

DEUTSCHER WETTERDIENST

Seewetteramt

Einzelveröffentlichungen

Nr. 30

Vergleichsmessungen des Seeganges

mit verschiedenen Meßgeräten zur Prüfung des Seegangs-
Beschleunigungsschreibers mit Film-Ritz-Aufzeichnung
und ihre Auswertung

von

Dr. Hans Walden und Dipl. Met. Jürgen Piest



Hamburg 1961

DK 551.46.018.9:532.59

551.46.086

EINZELVERÖFFENTLICHUNGEN

des Seewetteramtes

	<i>DM</i>		<i>DM</i>
Nr. 1 (1953): Höhe, Länge und Steilheit der Meereswellen im Nordatlantik (H. U. Roll)	3,50	Nr. 16 (1958): Zur Niederschlagsmessung auf See: Ergebnisse von Vergleichsmessungen auf Feuerschiffen und benachbarten Inseln (H. U. Roll)	1,30
Nr. 2 (1952, Nachdruck 1953): Die Nebelverhältnisse der Unterelbe im Jahrzehnt 1939-1948 (G. Hartenstein und H. Markgraf)	2,00	Nr. 17 (1958): Statistik der Meereswellen in der Nordsee (O. Petri)	2,50
Nr. 3 (1954): Die Nebelverhältnisse im Küstengebiet der Weser- und Emsmündung (P. Bintig und H. Markgraf)	2,00	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	zusammen 12,50
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)	7,00	Nr. 19 (1958): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1955	10,00
Nr. 5 (1954): Atlas der Monatswerte von Wassertemperatur, Wind und Bewölkung auf dem Seeweg Europa—Südamerika (H. J. Bullig)	12,00	Nr. 20 (1959): Statistisch-synoptische Untersuchung über das Verhalten von Tiefdruckgebieten im Bereich von Grönland (H. Walden)	3,60
Nr. 6 (1954): Die Größe der Meereswellen in Abhängigkeit von der Windstärke (H. U. Roll)	vergriffen	Nr. 21 (1959): Zur Theorie der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche (W. Brogmus)	3,00
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)	3,50	Nr. 22 (1959): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1956	10,00
Nr. 8 (1956): Die Meereswellen in der südlichen Nordsee (H. U. Roll)	5,00	Nr. 23 (1959): Hamburger Wetterdaten für das Bauwesen (R. Reidat)	2,00
Nr. 9 (1956): Laderaum-Meteorologie. Vorträge auf der Arbeitstagung am 20. Juni 1956 in Hamburg	3,00	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)	3,00
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)	12,50	Nr. 25 (1960): Die vorherrschenden Winde auf dem Atlantischen Ozean im April und Oktober (H. Markgraf)	7,00
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)	2,50	Nr. 26 (1960): Der Seegang bei den Feuerschiffen „Flensburg“, „Kiel“ und „Fehmarnbelt“ (H. Walden)	4,00
Nr. 12 (1957): Sturmweatherlagen bei Island 1950—1954 (H. O. Mertins)	3,50	Nr. 27 (1960): Ergebnisse der 3. laderaum-meteorologischen Forschungsfahrt auf TS „Düsseldorf“ an die Westküste Südamerikas, 1958 (E. Höller)	5,50
Nr. 13 (1957): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1953	10,00	Nr. 28 (1960): Beiträge zur Meteorologie Mittelamerikas (insbesondere El Salvadors) (W. H. Portig)	5,40
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)	3,50	Nr. 29 (1961): Klimatologie des Mittelmeeres. Teil 1: Windkarten (H. Markgraf)	10,20
Nr. 15 (1957): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1954	10,00	Nr. 30 (1961): Vergleichsmessungen des Seeganges mit verschiedenen Meßgeräten und ihre Auswertung (H. Walden u. J. Piest)	16,50

VERLAG DER DEUTSCHEN SEEWETTERAMT

HAMBURG

Berichtigung zu Einzelveröffentlichung Nr.30
(Walden/Piest: Vergleichsmessungen des Seegangs)

Auf Bildtafel 2, Abb.12

sind die Bilder a) und c) zu vertauschen!

Es gehören also

zur Unterschrift a) das Bild zu c) und

zur Unterschrift c) das Bild zu a).

DEUTSCHER WETTERDIENST
Seewetteramt

Einzelveröffentlichungen
Nr. 30

Vergleichsmessungen des Seeganges
mit verschiedenen Meßgeräten zur Prüfung des Seegangs-
Beschleunigungsschreibers mit Film-Ritz-Aufzeichnung
und ihre Auswertung

von

Dr. Hans Walden und Dipl. Met. Jürgen Piest



Hamburg 1961

DK 551.46.018.9:532.59
551.46.086

Wetteramt München
Handbücherei Nr. 3439

Inhaltsübersicht

Seite

Vorwort

Symbolverzeichnis

A. Die Messungen mit dem Seegangs-Beschleunigungs-schreiber 1957/58	1
B. Meßgeräte und Meßverfahren	
1. Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber	3
2. Die für den Vergleich angewendeten Meßverfahren	7
C. Aufbereitung der Meßergebnisse	
1. Entnahme der Meßwerte aus den Registrierstreifen und Vorbereitung für die weitere Auswertung	
a. "Objektive" Messung	
α . Herstellung einer kurvenartigen Punktfolge bei der kinematographischen Messung	11
β . Registrierungen der Leitfähigkeitssonde	14
γ . Ordinaten-Folgen (time-series)	15
δ . Schwarz-Weiß-Streifen	15
b. Registrierungen des Echogeräts nach Fahrentholz	16
c. Registrierung des Beschleunigungsschreibers	16
d. Doppelt integrierte Beschleunigungsregistrierung	17
2. Eichung der Vergleichsregistrierungen	
a. Zeitbestimmung bei den objektiven Registrierungen	18
b. Eichung der Leitfähigkeitssonde	19
c. Eichung des Echogerätes nach Fahrentholz	21
3. Die Integration der Beschleunigungsregistrierung	
a. Notwendigkeit der Integration	22
b. Mechanische Integration	23
c. Integration auf elektrischem Wege	25
4. Behandlung der Beschleunigungsregistrierung nach der Integration	
a. Eichung	27
b. Maßnahmen zur Gegenüberstellung mit den Repräsentativ-Messungen	30
D. Methoden zur Auswertung der Registrierungen	
1. Die Notwendigkeit statistischer Vergleiche	31
2. Häufigkeitsverteilungen von sichtbaren Wellen	32

	Seite
3. Ermittlung des Energiespektrums	
a. Einführung	36
b. Autokorrelationsanalyse	39
c. Periodogramm-Analyse	
α . Arbeitsweise des Analysators	49
β . Analyse des Energiespektrums	52
γ . Die Bestimmung der Gesamt-Intensität (E^*)	58
d. Gegenüberstellung von Autokorrelations- und Fourier-Analyse	
α . Gesamt-Intensität	64
β . Die Form der Spektren	66
4. Eichung des Beschleunigungs-Meßgerätes	
a. Notwendigkeit der Eichung	67
b. Vergleich von Häufigkeitsverteilungen	69
c. Vergleich der Energiespektren	72
E. Die Meß- und Vergleichsergebnisse	73
1. Vergleichsmessung auf der Außenalster	74
2. Leuchtturm Mellum Plate: Vergleichsmessung am 2.12.1957	79
a. Auswertung nach sichtbaren Wellen	79
b. Autokorrelationsanalyse	
α . Gesamt-Intensität	86
β . Die Form des Spektrums	88
c. Periodogramm-Analyse mit dem Fourier-Analysator	
α . Gesamt-Intensität	90
β . Form des Spektrums	92
d. Die Eichfaktoren	93
3. Leuchtturm Mellum Plate: Vergleichsmessung vom 14.2.1958	94
a. Auswertung nach sichtbaren Wellen	95
b. Autokorrelations-Analyse	97
4. Leuchtturm Mellum Plate: Vergleichsmessung vom 17.2.1958	99
a. Auswertung nach sichtbaren Wellen	100
b. Autokorrelations-Analyse	102
c. Periodogramm-Analyse	104
5. Gegenüberstellung der Ergebnisse für die vier ausgewerteten Vergleichsmessungen	105
6. Diskussion der Ergebnisse	110

	Seite
F. Ausblick	113
G. Herkunft der Geldmittel und Dank für Unterstützung	116
Schrifttum	117
Abbildungs-Verzeichnis	

V o r w o r t

In vielen schiffahrttreibenden Ländern wird seit Jahren der Untersuchung des Seeganges besondere Aufmerksamkeit gewidmet, da die Bedeutung der Meereswellen für das Seeverhalten der Schiffe und die Probleme des Küstenschutzes in steigendem Maße erkannt wird. Das Ziel dieser Bemühungen ist es, sowohl die Sicherheit der Seeschifffahrt und der Küstenschutzbauten als auch ihre Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Angesichts der bekannten Unregelmässigkeit der Meereswellen ist es selbstverständlich, dass die notwendigen Informationen nur durch den Einsatz registrierender Seegangsmessgeräte erhalten werden können.

Die Bundesrepublik Deutschland hatte bis vor wenigen Jahren an dieser Entwicklung kaum aktiv teilnehmen können, da es an den erforderlichen Geldmitteln für die Entwicklung von Geräten, Einrichtung von Meßstationen und Auswertung der Ergebnisse fehlte. Erst nachdem der Herr Bundesminister für Verkehr - einem Antrag des Seewetteramtes entsprechend - aus dem ERP-Sondervermögen dankenswerterweise Geldmittel für die Messung des Seeganges -erstmals im Jahre 1955 - zur Verfügung stellte und in den späteren Jahren seine Zuweisungen fortsetzte, kamen solche Untersuchungen in Gang. Der Zweck dieser Messungen war und ist es, durch den Einsatz gleichzeitig arbeitender Seegangsregistriergeräte in der Deutschen Bucht Aufschluss über die Umwandlung des Seegangsspektrums beim Einlaufen der Meereswellen in die flachen Gewässer des Küstenvorfeldes zu gewinnen und insbesondere die charakteristischen Grössen der Wellen zu erfassen, die schliesslich an unseren Seedeichen branden.

Die Erfüllung dieser Aufgabe stiess auf erhebliche technische Schwierigkeiten. Bei Beginn der Arbeiten existierte zwar ein neues, geeignet erscheinendes Seegangsmessgerät, welches das Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes entwickelt hatte und das auf dem Prinzip beruht, die vertikalen Beschleunigungen der wellenbewegten Meeresoberfläche zu messen. Doch waren weder die Eigenheiten dieses Meßinstrumentes vollständig erkundet, noch waren die Schwierigkeiten überwunden, die bei der Ab-

leitung einer Weg-Zeit-Abhängigkeit aus einer Beschleunigungsregistrierung durch die doppelte Integration zu entstehen pflegen. Mannigfache neue Probleme der Messung und Auswertung taten sich hierbei auf; sie erforderten ein gründliches Studium. Über die ersten Ergebnisse, die bei diesen Untersuchungen erzielt wurden, soll diese Arbeit berichten. Wie Titel und Inhaltsangabe erkennen lassen, beschäftigt sie sich mit Vergleichsmessungen des Seeganges mit verschiedenen Meßgeräten und unter Anwendung verschiedener Auswertmethoden. Es werden z.T. grundlegende Fragen der Seegangsmessung behandelt, wobei die Autoren sich offensichtlich bemüht haben, die Ergebnisse kritisch und objektiv zu betrachten. Mit diesen Dingen muss sich jeder, der sich einer solchen Aufgabe zuwendet, auseinandersetzen. Aus diesem Grunde glauben wir, den an diesen Problemen Interessierten einen ausführlichen Bericht hierüber nicht vorenthalten zu dürfen.

Im letzten Abschnitt wird angedeutet, welchen Weg die weitere Entwicklung auf Grund der hier dargestellten Erfahrungen genommen hat oder vermutlich nehmen wird, um die eingangs erwähnte Aufgabe vollständig zu erfüllen. Über die dabei erzielten Ergebnisse wird zu gegebener Zeit in der gleichen Schriftenreihe berichtet werden.

Hamburg, 11. November 1960

Dr. H. U. R o l l
Leiter des Seewetteramtes

Symbol - Verzeichnis

a_i	Abkürzung für $\sqrt{E_f(f_i)} \Delta f$
a_r	Verdoppelte Amplitude der Testfunktion nach deren doppelter Integration
a_t	Verdoppelte Amplitude in der Testfunktion
A	Amplitude der einfachen harmonischen Welle
A_y	Amplitude im diskontinuierlichen Spektrum
$b(t)$	Beschleunigung als Funktion der Zeit
B	B-Registrierung = Beschleunigungs-Registrierung
Bi	elektrisch doppelt integrierte Beschleunigungs-Registrierung
Bi(mech)	mechanisch doppelt integrierte Beschleunigungs-Registrierung
B_y	Amplitude im diskontinuierlichen Spektrum
c	Eichfaktor zwischen Beschleunigung und Ordinate der Beschleunigungs-Registrierung
c_i	Apparate-Konstante des mechanischen Integrators
c_y	Amplitude der Oberwellen der Ordnung ν für Gesamtregistrierung
c_{ν}	Amplitude der Oberwellen der Ordnung ν für Teilstreifen
c_{ν}^*	Ordinatenwerte der "Spitzen" der Oberwellen
$c_{\%}$	Faktor in der Beziehung zwischen der mittleren Wellenhöhe und $H_{\%}$
C	Umrechnungsfaktor zwischen mechanisch integrierter Beschleunigungs-Registrierung und Auslenkung an der Wasseroberfläche
\bar{C}	Umrechnungsfaktor zwischen elektrisch integrierter Beschleunigungs-Registrierung und Auslenkung an der Wasseroberfläche
d_k	Abweichung des Meßwertes vom Mittelniveau an der Stelle k
E	Wellenenergie
E_f	f-spektrale Energiedichte (genauer: "Intensitätsdichte")
\bar{E}_f	f-spektrale Energiedichte nach der Glättung (bei Fourier-Analyse)
E_{fr}	reduzierte f-spektrale Energiedichte
\overline{E}_{fr}	Mittelwert der Größen E_{fr}
$E_f^{(B)}$	f-spektrale Energiedichte bestimmt aus Beschleunigungs-Registrierung B ("Integration" durch Multiplikation mit $\frac{1}{(2\pi f)^2}$)
$E_f^{(Bi)}$	f-spektrale Energiedichte bestimmt aus elektrisch doppelt integrierter Beschleunigungs-Registrierung Bi

$E_f^{(L)}$	f-spektrale Energiedichte bestimmt aus L-Registrierung
$E_f^{(B_{i\text{mech}})}$	f-spektrale Energiedichte in mechanisch doppelt integrierter Beschleunigungs-Registrierung
E^*	Energiebezugszahl (= Gesamt-"Intensität", Dimension $[\text{cm}^2]$)
E_i^*	E^* aus innerem Teil der Photometerkurve
E_g^*	E^* unter Mitberücksichtigung der mehr außen liegenden Teile der Photometerkurve
E_α^*	Energiebezugszahl in einzelnen Teilstreifen (von 80 cm Länge)

E-Registrierung : Registrierung des Echogerätes von Dr. Fahrentholz

ξ	Erwartungswert
f	Frequenz
f_o	am Analysator fest eingestellte Frequenz
f_g	Zahl der Freiheitsgrade
f_h	Frequenz an der Stelle h
f_i	Frequenz an den Stellen i (Bereich f_1 bis f_N)
f_N	vgl. f_i
F	F-Registrierung = kinematographische Registrierung
\hat{F}	Filterfunktion des elektrischen Fourier-Analysators
g	Schwerebeschleunigung
gal	= $[\text{cm sec}^{-2}]$
G	die tabuliert vorliegende Wahrscheinlichkeitsfunktion
h	Index zur Kennzeichnung der Stelle auf der Frequenzachse, an denen das Spektrum berechnet wird (Bereich $h = 0$ bis m)
H	Wellenhöhe
H_g	gemessene Wellenhöhe
\tilde{H}_h	häufigste sichtbare Wellenhöhe (aus verdoppelten Halbschwingungen)
\tilde{H}	mittlere sichtbare Wellenhöhe
$\tilde{H}_{1/3}$	kennzeichnende Wellenhöhe
$\tilde{H}_{1/10}$	Durchschnittshöhe der dem oberen Zehntel angehörenden Wellen
$\tilde{H}_\%$	Wellenhöhe an der unteren Grenze der % höchsten Wellen

i	laufender Index zur Bezeichnung der Einzel- frequenzen (Bereich i = 1 bis N)
i'	vgl. i, in speziellen Fällen i' genannt
j	laufender Index zur Kennzeichnung der Stellen auf der Zeitachse, an denen die Ordinaten der Registrierung aufgenommen werden (äquidistante Werte) (Bereich j = 1 bis n)
J _φ	Faktor, gibt Phasenverschiebung um 90° cm
J	Beschleunigungs-"Intensität"
J _i	Beschleunigungs-"Intensität" aus innerem Teil der Photometerkurve
J _g	Beschleunigungs-"Intensität" unter Mitberück- sichtigung der mehr außen liegenden Teile der Photometerkurve
J _f	spektrale Intensität der Beschleunigung
k	Index für die Bezeichnung von äquidistanten Stellen für die Entnahme der time-series, wahlweise statt j gebraucht
k _ν	Fourier-Koeffizient der Ordnung ν
k*	Der an bestimmter Stelle vom Fourier-Analysator ausgeworfene Spektrumswert
K	Kumulatives Fourier-Spektrum
l	Zahl der zur übergreifenden Mittelbildung herangezogenen Werte (bei der Glättung)
L	Wellenlänge
L _r	Wellenlänge in der Testfunktion nach deren zwei- facher Integration
L _t	Wellenlänge in der Testfunktion
L-Registrierung:	Registrierung der Leitfähigkeitssonde
L _{1/3}	Länge der kennzeichnenden Wellen
m	Anzahl von Stellen auf der Frequenzachse (vgl. h und p)
mech	Index zur Kennzeichnung mechanisch durchge- führter Integration
mech red	vgl. red
n	Anzahl der Stellen äquidistanter Werte auf der Zeitachse (vgl. j)
N	Anzahl der Einzelfrequenzen (vgl. i)
N _h	Anzahl der betrachteten Wellenhöhen
N _M	Anzahl der Maxima in der Zeiteinheit
N _p	Gesamtzahl der Perioden bzw. Halbperioden in der Registrierung
N _T	Anzahl der je 80 cm langen Teilstreifen der Registrierung, vgl. auch α.
N _o ↑	Anzahl der zero-up-crossings pro Zeiteinheit

p	dient der Kennzeichnung der einzelnen diskreten Werte auf der Achse der Zeitverschiebung, Bereich 0 bis m.
pRE	Projektions-Rastereinheiten
q	bestimmte Frequenz (Registrierzeit)
q [*]	" " (Stromzeit)
Q	Autokorrelationsfunktion
Q _p	Autokorrelationsergebnis für die Zeitverschiebung p Δt
Q _{pt_j}	Hilfswert bei der Autokorrelation = 2 z(t _j) · z(t _j - p · Δt)
r	ganze Zahl
red	Index als Hinweis auf Reduktion zur Beseitigung unerwünschter Filterwirkungen
RC	Filterkonstante, = Widerstand mal Kapazität
s	Grenzperiode
S	Schwankungsbreite einer einzelnen Welle
t	Zeit bzw. Registrierzeit
t _j	äquidistante Stellen auf der Zeitachse bei der Autokorrelation
t [*]	Stromzeit
T	Periode
T _m	spezielle Periode, für die die harmonischen Anteile groß sind
T _{max}	Periode maximaler Energie im Spektrum
T _h	häufigste sichtbare Periode (verdoppelte Halbperiode)
T̄	mittlere Periode der sichtbaren Wellen
T̄ _{1/3}	kennzeichnende Periode
u	Umlaufzahl des Rades (Zyklen pro sec)
u _h	Filter an den Stellen h, gegeben durch Gl.(21)
u _{hp}	Hilfsgröße zur Berechnung einer Filterfunktion bei der Autokorrelations-Analyse
U	Funktion der in Spannung umgesetzten Registrierung
U(f)	Spektralfunktion bei der anschaulichen Erklärung der Autokorrelations-Analyse
U _h	Filterfunktion bei der Autokorrelation
u ₁ , u ₂	Eingangs- und Ausgangsspannung bei der elektrischen Integration

v	Windgeschwindigkeit
y	"Grauwert", Ordinate der Photometer-Registrierung
y_k	y-Werte (Grauwerte) an den diskreten Stellen k
y^*	Ordinate der Integralkurve
z	Auslenkung der Original-Einzelmeßwerte vom mittleren Niveau
\bar{z}	Auslenkung der Seegangsregistrierung auf den Schwarz-Weiß-Streifen bei der Feststellung der "Weiß-Anteile"
\hat{z}	$= \frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^*}}$
z_i	Auslenkung in der doppelt integrierten Beschleunigungs-Registrierung
z_k	Auslenkungen an den äquidistanten Stellen k
\hat{z}_k	\hat{z} - Werte an den diskreten Stellen k
z_p	Ordinatenwert, über dem der Spalt während der Messung steht
\bar{z}_{pk}	\bar{z}_p - Werte an den diskreten Stellen k
$\bar{z}_{p\alpha}$	\bar{z}_p - Werte auf den verschiedenen Teilstreifen (von 80 cm Länge)
$\bar{z}_p(0,5)$	\bar{z}_p - Wert an der Stelle $y = 0,5$
α	Index zur Kennzeichnung der einzelnen Teilstreifen der Seegangsregistrierung, läuft bis N_T
β	Proportionalitätsfaktor zwischen Oberwellen-Amplituden und "Intensität"
$\hat{\beta}$	Proportionalitätsfaktor zwischen "Spitzen" und wahren Amplituden der Oberwellen
δ_p	Faktor in der Filterformel
δ, δ_t	Eichkonstanten am Schreibgerät
ε	Parameter zur Kennzeichnung der Spektrumsbreite
ε_i	Phase bei Eigenfrequenzen der Ordnungszahl i
ζ	vertikale Auslenkung an der Meeresoberfläche
η	Lichtabsorptionsfaktor
α	Vorschub der Original-Beschleunigungs-Registrierung
α^*	Vorschub der Beschleunigungs-Registrierung als Schwarz-Weiß-Kurve
λ	zeitliche Länge der Streifen von 80 cm Länge
ν	Ordnungszahl der Oberwellen
ξ	Filterfaktor
μ	Zahl zusammengefaßter Werte bei der Glättung
ρ	Dichte des Seewassers
σ	"Empfindlichkeits"-Funktion
σ_1	"Empfindlichkeit" als Funktion von f (bei Seegangs-"Intensität")

$\sigma_I^{(B)}$	"Empfindlichkeit" oder "Eichfaktor" für B-Spektrum (Integration durch Multiplikation mit $\frac{1}{(2\pi f)^n}$)
$\sigma_I^{(Bi)}$ bzw. $\sigma_I^{(Bi\text{ mech})}$	"Empfindlichkeit" oder "Eichfaktor" für Bi- bzw. Bi(mech)-Registrierung
σ_s	"Empfindlichkeit" hinsichtlich sichtbarer Wellen
$\bar{\sigma}$	geglättete "Empfindlichkeit" oder "Eich"-Funktion
τ	Zeitspanne bei der Autokorrelation
φ	Phase
$\hat{\varphi}$	Phase im Fourier-Integral
φ_i	Phase bei Einzelfrequenzen der Ordnungszahl i
φ_ν	Phase einer harmonischen Welle der Ordnung ν
Φ	kumulative Verteilungsfunktion der Grauwerte (in Fourierreihe)
ψ	relative Häufigkeit für objektive Messung
ψ_{Bi}	relative Häufigkeit für Bi-Registrierung
ω	Kreisfrequenz

A. Die Messungen mit dem Seegangs-Beschleunigungsschreiber 1957/58

In den letzten 20 Jahren ist eine große Anzahl von Methoden bzw. von Instrumenten zum Messen oder Registrieren des Seegangs entwickelt worden. H.U. ROLL (Lit.20)^{*)} hat kürzlich im Handbuch der Physik eine Übersicht über die bisher angewendeten Meßverfahren gegeben. Bei einem großen Teil der Registriermethoden wird eine Verbindung zum Land oder zum Meeresgrund benötigt; solche Messungen sind also nur auf flachem Wasser oder dicht unter der Küste möglich. Beim Messen in tiefem Wasser vom Schiff aus treten oft Schwierigkeiten dadurch auf, daß es nicht möglich ist, die Schiffsbewegungen vollständig zu eliminieren. Für die Bestimmung der Seegangseigenschaften von Tiefwasser-Wellen fehlte es daher bislang an geeigneten Methoden. Der in England gebaute shipborne wave recorder nach Tucker bedarf großen Aufwandes und ist auf einem bestimmten Schiff fest eingebaut (Lit.23). Im Oktober 1954 haben amerikanische Wissenschaftler eine wohl nahezu einwandfreie Messung des Seegangsspektrums innerhalb eines größeren Flächenstücks durch Stereo-Aufnahmen von zwei Flugzeugen aus durchgeführt (SWOP (Lit.5)). Dieses Projekt war aber mit einem wirklich ungeheuer zu nennenden Aufwand verbunden, so daß eine häufige Wiederholung solcher Messungen nicht zu erwarten ist. Es besteht also ein großes Bedürfnis für Geräte, mit denen man die Eigenschaften des Seegangs in tiefem Wasser mit ausreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmen kann.

In Kenntnis dieser Sachlage hat Reg.Ob.Insp. A. Lang vom Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes vor einigen Jahren ein Wellenregistriergerät mit Film-Ritz-Aufzeichnung (Abb.1, Bildteil) entwickelt (Lit.9), das frei schwimmend die Beschleunigungen mißt, denen es an der Wasseroberfläche unterworfen ist. Es ist daher für den Einsatz auf tiefem Wasser vom Schiff aus geeignet. Ein auf dem Prinzip der Beschleunigungsmessung beruhendes Wellen-Meßgerät ist auch in Holland und später in den USA gebaut worden. Seine Meßfunktionen sind jedoch andersartig als in dem hier benutzten Gerät (Lit.7).

Eine erste Erprobung des Seegangs-Beschleunigungsmessers mit Film-Ritz-Aufzeichnung fand im Februar 1957 bei Wellen von etwa

^{*)} Literaturverzeichnis am Schluß der Arbeit

15 cm Höhe auf der Außenalster, einem see-artigen Gewässer in Hamburg unter Leitung von Herrn Dr. H.U. Roll statt. Als geeignet für die Durchführung der Messungen erwies sich ein Bootssteg am Ostufer der Außenalster. Die Lage der Meßstelle ist der Abb.2 zu entnehmen. Als Vergleichsinstrument diente eine vom Institut für Schiffbau in Hamburg entwickelte und von der Schiffsbauversuchsanstalt Hamburg zur Verfügung gestellte Leitfähigkeitssonde. Die mit der Beschleunigungsmessung erzielten Ergebnisse erwiesen sich für diese kleinen Wellen als im großen ganzen zufriedenstellend. Aus den Gründen, die im Abschnitt C 3 noch ausführlich erörtert werden, war es aber nötig, über die Meßeigenschaften des Langschen Gerätes auch in längeren und höheren Wellen Unterlagen zu erstellen. Dies geschah am Leuchtturm Mellum Plate.

Ein Meßtrupp, bestehend aus Herrn Ing. A. Lang, Frl. R. Meißner (Photographin) und den beiden Verfassern, stellte in der Zeit vom 24.11. bis 2.12.1957 und vom 5. bis 18.2.1958 eine Anzahl von Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate (Abb.3 u.4, s.Bildteil) an mit dem Ziel, das Beschleunigungsgerät bei verschiedenartigem Seegang zu erproben. Gleichzeitig sollte nach Möglichkeit bei passender Gelegenheit das Wellenspektrum für reine, also durch Fremddünung unbeeinflusste Windsee gemessen und ermittelt werden. Seegang mit einer kennzeichnenden Wellenhöhe $\tilde{H}_{1/3}$ **) ***) von 2 m und mehr tritt am Turm Mellum Plate fast ausschließlich bei stürmischen Winden oder Sturm aus den Richtungen WNW bis NNE auf, weil der Platz von Nordosten über Süden bis Westen durch Land bzw. durch Bänke geschützt ist. Auch im Nordwesten und im Nordnordosten sind Bänke vorgelagert, auf denen bei niedrigem Wasser ein Teil der größeren Wellen ausbrandet. Erst gegen Ende des zweiten Aufenthaltes auf dem Turm trat eine Lage ein, die für die Messung des geforderten hohen Seegangs ($\tilde{H}_{1/3} \cong 2$ m) geeignet war, nämlich am 17.2.1958 mit NWzW 8-9 bei Hochwasser und Tageshelligkeit.

**) Der Index "1/3" bezeichnet die "kennzeichnenden" Eigenschaften eines Seegangs. Unter der kennzeichnenden Wellenhöhe versteht man den Mittelwert aller Wellenhöhen, die in einem Meßkollektiv dem oberen Drittel angehören. Dabei werden nur solche Wellen in Betracht gezogen, die in einer Registrierung die Mittellinie anschneiden (zero-crossing-Wellen).

***) Verzeichnis der verwendeten Buchstaben-Symbole am Anfang der Arbeit.

Wartezeiten müssen bei Wellenmessungen fast immer in Kauf genommen werden. Auch beim Unternehmen SWOP, bei dem es darauf ankam, eine dünungsfreie Windsee zu messen, mußte die passende Wetterlage abgewartet werden. Bei Messungen, die von der Woods Hole Oceanographic Institution im Nov./Dez. 1956 im westlichen Atlantik mit einem shipborne wave recorder nach TUCKER (Lit.23) durchgeführt wurden, erwies es sich als ein großes Handicap, daß die Wellenmessungen nur an das übrige Programm "angehängt" waren, daß also nicht auf eine passende Seegangslage gewartet werden konnte. Von den damals angestellten fast 50 Registrierungen war keine frei von "Fremdsee".- Neben den Schwierigkeiten, die durch das seltene Zusammentreffen von geeigneten Wellen mit passender Tide bei Tageslicht bedingt waren, gab es auf Mellum Plate gelegentlich Ausfälle und Schäden an den Geräten, die von Herrn Lang immer beseitigt werden konnten.

Von den Vergleichsregistrierungen wurden die Messungen am 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958 ausgewertet. Als objektive Registrierung dienten in den beiden erstgenannten Fällen Messungen mit der Leitfähigkeitssonde und am 17.2.1958 eine durchgehende kinemographische Aufnahme (vgl. Abschn.B).

B. Meßgeräte und Meßverfahren

1. Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber

Um den Seegangs-Beschleunigungsschreiber (Abb.1)* für den Einsatz vom Schiff aus geeignet zu machen, wurde er sehr robust, möglichst stoßunempfindlich und einfach in der Handhabung gebaut. Auf einer kräftigen Grundplatte steht ein zylinderförmiges Gefäß (vgl. Abb.5 und Lit.9), dessen unterer Teil mit einem für die Dämpfung geeigneten Öl gefüllt ist. Zwischen vier horizontal liegenden, geeigneten Federn hängt eine "Masse" aus Messing, deren "vertikale" Bewegungen gegenüber dem Gehäuse über einen Zeiger mit einem Edelstein auf Rohfilm geschrieben werden. Die Führung erfolgt über eine kleine Kugel in einem Rohr. Der Platz bei K wurde für das Uhrwerk einer Programmanlage ausgenutzt. Der Film wird von einem kräftigen Federwerk in "F" mit einem Vorschub von 78 mm/min an dem Schreibstift vorbeigezogen. Die Eigenfrequenz des Meßteils beträgt 6 Hz und liegt für Seegangsmessungen günstig. Das Ganze wird mit einem stabilen Deckel wasserdicht verschlossen und in eine Boje (Rettungsring) gehängt. Für die Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate war dem Instrument ein elektrisch arbeitender Geber für Zeitmarken beigegeben.

*) s. Bildteil

Das Gerät wird ins Wasser gelegt und führt, sobald die Wasseroberfläche bewegt ist, Bewegungen aus, denen die in Federn aufgehängte Masse nach dem Prinzip der Trägheit nicht sofort folgt. Auf diese Weise ist es möglich, die Beschleunigungen, welche die Gesamtapparatur in den Wellen erfährt, aufzuzeichnen. Die Benutzung des Edelsteins ermöglicht eine sehr feine Aufschreibung, die einem Mikroschrieb entspricht. Die aufgezeichnete Kurve muß später bei der Auswertung auf optischem Wege vergrößert werden.

Wir müssen uns Klarheit darüber verschaffen, was wirklich aufgezeichnet wird. Die Abb.6 enthält eine schematische Darstellung des Wellenschreibers im Seegang. Zunächst ist leicht ersichtlich, daß der Rettungsring auf Wellen, deren Länge gleich seinem Durchmesser (= 60 cm) ist, nur mit einem Kippmoment, nicht aber mit einer Hebung oder Senkung reagiert. Sind die Wellen etwas länger oder etwas kürzer als der Ringdurchmesser, so wird das Gerät neben dem Kippen vertikale Bewegungen ausführen. Die vertikalen Auslenkungen sind aber kleiner als die Wellenhöhe. Ganz kurze und kleine Wellen üben überhaupt keinen Effekt auf den Schreiber aus, sofern sie in größerer Zahl dicht beieinander auftreten; ihr Einfluß wird "herausgemittelt". Es ist also sicher, daß der untere Teil des Periodenspektrums im Seegang nicht mitregistriert wird. Wendet man für die Beziehung zwischen Wellenlänge und -periode die klassische Formel $T^2 = \frac{L}{1,56}$ (T in sec, L in m) an, so ergibt sich, da der Ringdurchmesser 0,6 m lang ist, daß Wellen mit einer Periode von 0,62 sec nicht aufgezeichnet werden. Praktisch kommen alle Wellen von 0 bis 0,7 sec Periode nicht zur Aufzeichnung. Dieser Mangel ist aber ohne weiteres tragbar, da man im allgemeinen auf die Messung dieser kurzen Wellen bzw. Wellenanteile verzichten kann. Bei allen übrigen Wellen der Windsee wird nur ein Teilbetrag derjenigen Beschleunigungen verzeichnet, denen ein punktförmiger Schwimmkörper unterworfen sein würde. Auch bei langen Wellen wird die Boje mit dem Gerät immer etwas unterhalb des Firstes "spitzer" Wellenkämme bleiben; bei diesen Wellen ist der durch diesen Vorgang erzeugte Fehler allerdings sehr gering.

Das Problem, alle Teile des Wellenspektrums bei der Messung zu erfassen, tritt bei vielen Meßverfahren auf. Gerade die kurzen Wellen werden oft nicht mitgemessen, z.B. bei Instrumenten, die mit der Änderung des Wasserdruckes unterhalb der Welle arbeiten. Wegen einer ge-

wissen Mindestgröße des Öffnungswinkels sind auch Echogeräte von diesem Fehler nicht frei.

Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber von Lang mißt die auf seiner Grundplatte senkrecht stehende Beschleunigung. Er bewegt sich aber nicht nur senkrecht auf und ab, sondern als Folge der Orbitalbahnen in der Welle auf dem Wellenberg auch in der Laufrichtung der Wellen, im Tal in entgegengesetzter Richtung. Es treten im Gerät also auch Beschleunigungskomponenten auf, die parallel zur Grundplatte gerichtet sind. Ihnen ist - wenn auch in abgeschwächtem Maße - auch die "Masse" unterworfen. Der Konstrukteur hat ihren Einfluß auf die Aufschreibung dadurch zu mindern versucht, daß er den Drehpunkt für den Anzeigehebel h möglichst nahe an die Schreibstelle brachte; der "horizontale" Ausschlag wird wegen der Ungleichheit der beiden Hebelarme verringert. Es kann daher angenommen werden, daß die "Masse" bei der Art der Aufhängung hauptsächlich senkrecht zur Grundplatte schwingt und daß die Bewegungen parallel zur Grundplatte weitgehend unterdrückt werden.

Ausserdem aber befindet sich das Gerät während der Registrierung größtenteils nicht in horizontaler Lage. An den Flanken der brechenden Wellen, also dort, wo besonders starke Beschleunigungen auftreten, ist seine Neigung sogar recht bedeutend. Diese Erscheinung hat zur Folge, daß nur ein Teilbetrag der wirklich vertikalen Beschleunigungskomponenten gemessen wird, daß aber auch ein Teil der Horizontalbeschleunigungen, nämlich die zur Grundplatte senkrecht stehenden Komponenten, in die Aufschreibung eingeht. Dieser Mangel ist nicht vermeidbar. Im Zusammenhang mit der soeben beschriebenen Erscheinung kann die Fesselung des Beschleunigungsschreibers an einem Seil unter bestimmten Umständen zusätzliche Beschleunigungen bewirken, die die Registrierung in gewissem Maße verstärkt verfälschen dürfte. Steile oder bereits im Brechen befindliche Wellen führen das Gerät in ihrer Laufrichtung mit, wobei es eine Schräglage einnimmt. Sobald das Seil straff wird, erfolgt bei hohen, steilen Wellen unter Umständen ein scharfes Anrucken, das infolge der Schräglage des Gerätes eine Zusatz-Beschleunigung in der Vertikalen zur Grundplatte des Gerätes bewirkt^{*)}. Diese übergroßen Beschleunigungen sind - wie noch gezeigt werden wird - in der Registrierung vom 17.2.1958 zu sehen. Die doppelte Integration dieser Beschleunigungs-Registrierung kann also niemals die wirklichen Wellenhöhen H ergeben, vielmehr besteht zwi-

^{*)} Hinweise in dieser Frage erhielten wir in einer Diskussion mit Herrn Harlow G. Farmer

schen H und den gemessenen Wellenhöhen H_g eine Beziehung, die sich in erster Näherung durch die Beziehung $H = \sigma H_g$ ausdrücken läßt; σ ist dabei auch eine Funktion der Steilheit der Wellen. Da die mittlere Steilheit in einem Seegang, ausgedrückt durch den Quotienten $\frac{\tilde{H}}{L^{1/3}}$, bei höherem Seegang durchschnittlich kleiner als bei niedrigeren Wellen zu sein scheint, ist man gezwungen, die Größe σ für verschieden hohe und verschieden lange Seegangsarten einzeln zu bestimmen. Es ist zu hoffen, daß σ in einfacher Weise von der kennzeichnenden Wellenhöhe $\tilde{H}_{1/3}$ bzw. der kennzeichnenden Periode $\tilde{T}_{1/3}$ abhängt.

Bei den Messungen am Turm Mellum Plate wurde der Beschleunigungsschreiber mit Hilfe eines über Rollen laufenden endlosen Seils in die Nähe des Pfahls gezogen. An dem endlosen Tau war er durch eine etwa 15 m lange Leine befestigt, so daß er während der Messung etwa 15 m von den Vergleichsinstrumenten entfernt war. Bei dieser Anordnung ist es natürlich nicht möglich, Vergleichsmessungen für Einzelwellen anzustellen, sondern man muß sich darauf beschränken, die Meßergebnisse für die statistischen Seegangseigenschaften bei Anwendung verschiedener Meßverfahren zu vergleichen. Der Rettungsring hatte neben dem Meßgerät also eine Leine und außerdem noch ein zweiadriges Kabel für die Zeitkontakte zu tragen.

Bei Eich-Messungen in der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt ergab sich als Eichfaktor zwischen der Beschleunigung und der entsprechenden Ordinate auf der Original-Beschleunigungs-Registrierung die Größe $c = 437 \text{ [gal/mm]}^*$.

Die Größe der Beschleunigungen kann aus den Registrierungen direkt abgelesen und mit der Schwerebeschleunigung g verglichen werden, indem man die Auslenkungen von der Mittellinie der Registrierung bestimmt. Entsprechend der Höhe und Steilheit des Seegangs bei dem Sturm am 17.2.1958 traten die größten Beschleunigungswerte in der Messung an diesem Tage auf. Bei den Beschleunigungen nach oben ist festzustellen, daß die Ausschläge mit zunehmender Größe seltener werden bis zu einem Maximalwert der Auslenkung; dabei vollzieht sich die Abnahme der Häufigkeit in stetiger Form. Als maximale Aufwärts-Beschleunigung wurde 0.85 g gefunden. Bei Abwärts-Beschleunigungen sind die kleinen Werte gleichfalls die häufigsten. Mit zunehmender Größe von g nimmt die Häufigkeit bis zu einer bestimmten Grenze ab. Für diese "normalen" Maximumwerte findet man in der Messung vom 17.2.58 eine Beschleunigung von 1,4 g .

*) $\text{gal} = \text{cm sec}^{-2}$

Oberhalb dieser Grenze treten "regelmäßig" keine Ausschläge mehr auf; von Zeit zu Zeit enthält die Registrierung aber einen extremen Ausschlag, der die genannte Grenze stark überschreiten kann. Als Höchstwert fand sich 2,6 g.

Die Erklärung für diese Erscheinung ist in dem Anrucken des Gerätes beim Straffen der Fesselungsleine zu suchen. Sofern das Gerät bei diesem Vorgang geneigt liegt, verzeichnet es eine extrem starke vertikale Beschleunigung von kurzer Dauer.

Die hierdurch entstehenden Meßfehler sind nur durch Eichung mit einer fehlerfreien Registrierung zu eliminieren. Über die von uns hierfür benutzte Methode durch Anbringen der Eichgröße \mathcal{S} wurde oben - zunächst einführend - bereits berichtet.

2. Die für den Vergleich angewendeten Meßverfahren

Dem Entgegenkommen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich und insbesondere den Bemühungen des Wasser- und Schifffahrtsamtes Wilhelmshaven ist es zu verdanken, daß im November 1957 85 m nördlich des Leuchtturms Mellum Plate ein 28 m langer Vierkantpfahl aus Eisen nach einem neuartigen Verfahren mehr als 10 m tief in den Grund eingerüttelt wurde (vgl. Abb.7, Bildteil, und Abb.8). Die Wassertiefe beträgt dort bei mittlerem Spring-Niedrigwasser etwa 11 m, bei mittlerem Hochwasser rund 14 m. Der Pfahl trägt einen versteiften Rahmen aus Winkelleisen von 2,5 m Höhe und 3 m Breite mit der Front gegen den Turm. Die Höhenlage des Rahmens war so berechnet worden, daß das Wasser bei mittlerem Hochwasser und $3/4$ m Windstau in der Mitte zwischen den beiden waagerechten Streben steht. An den beiden senkrechten Eisen des Rahmens wurde je eine eiserne, 7 m lange Pegellatte angebracht.

Als einwandfreie Vergleichsmessung boten sich kinematographische Aufnahmen der Wellen gegen die Pegellatten mit einem Teleobjektiv an ("F-Registrierung"). Um eine zeitliche Zuordnung der Filmbilder zu den anderen Registrierungen zu ermöglichen und um die Geschwindigkeit des Films kontrollieren zu können, wurde eine Synchron-Uhr mit einer Minute Zeigerumlauf auf der oberen Querlatte angebracht und mitgefilmt. Vorher war durch Versuche festgestellt worden, daß das Filmmaterial (Perkine U 15, 16 mm) so feinkörnig ist, daß der Stand des Zeigers unter den gegebenen Verhältnissen bei der Auswertung mit

ausreichender Genauigkeit abgelesen werden kann. Um eine brauchbare Auswertung sicherzustellen, war es notwendig, mindestens 20 Minuten ohne Unterbrechung bzw. überlappend zu filmen. In dieser Zeit können 200 Wellen der Periode 6 sec erfaßt werden. Da es unmöglich war, eine Filmkamera mit 20-minütiger Laufzeit zu beschaffen, wurde schließlich mit zwei 16 mm-Kameras überlappend gefilmt (vgl. Abb.9, Bildteil), und zwar im November 1957 und bei den ersten Messungen Februar 1958 mit einer Arriflex der Vogelwarte Helgoland in Wilhelmshaven, die dankenswerterweise von Herrn H. Rittinghaus bedient wurde, und einer Pathex Webo 16. Später standen 2 Pathex Webo 16 zur Verfügung^{*)}. Jede Kamera ist mit einer 30 m-Spule geladen. Dieser Streifen wird bei 16 Bildern pro Sekunde in etwas mehr als 4 Minuten durchgezogen. Die beiden Kameras standen in einem großen Raum vor zwei nach NNE weisenden Fenstern im 3. Stock des Turms mit rund 14,5 m Objektivhöhe über mittlerem Hochwasser. (vgl. Abb.10.). Mit der Wahl dieser großen Standhöhe wurde erreicht, daß die Einsicht gegen die Pegellatte niemals durch andere Wellenkämme verdeckt wurde. Als maximale Steilheit setzt man bei Meereswellen 1 : 7 an. Das Verhältnis Standorthöhe zur Entfernung Turm-Pfahl beträgt rund 1 : 6. Diese Anordnung hat sich bewährt. Die Aufnahmen wurden mit Teleobjektiven der Brennweite $f = 200$ mm, zuletzt behelfsweise auch mit $f = 150$ mm gemacht.

Bei den Messungen auf der Alster hatte als Vergleichsinstrument eine Leitfähigkeits-Sonde gedient, deren Elektrodenstäbe eine Länge von 30 cm besaßen. Da gute Erfahrungen mit diesem Gerät vorlagen und um überhaupt eine zweite Vergleichsregistrierung zu erstellen, wurde eine für den Meßbereich von 3 m geeignete "Wellensonde" berechnet und gebaut^{**)}. Zwei V2A-Stahl-Stäbe von 12 mm Durchmesser und 3 m Länge wurden mit Isolier-Halterungen in 20 cm Abstand voneinander senkrecht am Rahmen des Pfahls angebracht. Die Stärke des von einer Elektrode zur anderen fließenden Stroms ist abhängig vom jeweiligen Wasserstand.

Abb. 11 enthält in vereinfachter schematischer Darstellung ein Bild von der Schalt-Anordnung der "Brücke", die eine Messung der

*) Eine Pathex Webo 16 der Deutschen Forschungsgemeinschaft lieh uns nach Vermittlung von Herrn H. Rittinghaus das Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen. Beiden sind wir zu großem Dank verpflichtet.

***) Für die Berechnung der Brückenschaltung sind wir Herrn Dr. H. Baumann vom Institut für Schiffbau, Hamburg, und Herrn Ing. P. Hafner zu Dank verpflichtet.

Stromunterschiede und somit der Wellenhöhen ermöglicht. G ist ein Generator für 220 Volt Wechselstrom. Über die Primärwicklung P_1 und die Sekundärspule S_1 eines Transformators, der am Pfahl angebracht wurde, werden die Elektroden mit Strom beschickt. Die Änderungen der Stromstärke im Sekundär-Stromkreis, die vom jeweiligen Wasserstand abhängen, haben Rückwirkungen auf die Stromstärke im Primär-Kreis zur Folge. Um die Belastungen von P_1 kontrollieren zu können, sind in den Stromkreis a ein Widerstand und ein Ampèremeter eingeschaltet.

Ein Teil des Stroms aus a wird über b und einen Regelwiderstand in den Stromkreis c eingeleitet. Vom Generator G werden über die Primärwicklung P_2 eines weiteren Transformators an der Sekundärspule S_2 16 Volt und an S_3 14 Volt entnommen. Diese Maßnahme ist erforderlich, um Spannungsschwankungen des Generators auszugleichen. Der Strom von S_2 wird über d einem GRAETZ-Gleichrichter Gl_2 zugeleitet. Der Regelwiderstand im Kreis c des von S_3 ausgehenden Stroms hat den Zweck, bei unbewegter Wasseroberfläche die positive Meßspannung von Gl_3 , $+_3$, auf die gleiche Größe wie die positive Meßspannung von Gl_2 , $+_2$, zu bringen. Ändert sich der Wasserstand an den Elektroden, so ändert sich auch die positive Meßspannung von Gl_3 , $+_3$. Gemessen wird schließlich der Unterschied von $+_2$ und $+_3$ an einer Meßschleife, die durch Arbeitswiderstände A_2 und A_3 geschuntet ist; auf diese Weise wird der richtige Arbeitsbereich für die Meßschleife hergestellt. Mittels Spiegelgalvanometer wird der Ausschlag der Meßschleife auf einen Registrierstreifen eingegeben. Man erhält eine kontinuierliche Wellenregistrierung.

Die Leitfähigkeits-Sonde mußte in jedem einzelnen Falle geeicht werden, da die Leitfähigkeit des Wassers von der Wassertemperatur und dem Salzgehalt sowie kleinen Festteilchen in starkem Maße abhängt. Bei den Messungen auf der Außenalster war eine unmittelbare Eichung durch Vergleich mit der Eintauchtiefe der Sondenstäbe möglich, indem man die Elektroden in einem mit Alsterwasser gefüllten Gefäß verschieden tief eintauchte. Da am Turm Mellum Plate diese unmittelbare Eichung des Gerätes durch verschieden tiefes Eintauchen und gleichzeitiges Messen der Eintauchtiefe am Pfahl nicht durchgeführt werden konnte, wurde die Eintauchtiefe zu Beginn und gegen Ende der Messung einige Zeit gefilmt. Durch Eingabe von Zeitmarken war es möglich, die Aufzeichnungen der Leitfähigkeits-Sonde den im Film festgehaltenen Eintauchtiefen zuzuordnen und die Eichung also auf diese Weise durchzuführen. Die

Registrierungen des Gerätes haben sich, wie noch ausgeführt werden wird, als gut erwiesen. Einige Schwierigkeiten bereitete es, die als Elektroden dienenden Stäbe isoliert am Rahmen des Pfahls zu befestigen. Tatsächlich sind beide Stäbe in der Nacht vom 5. zum 6. Februar 1958 bei schwerem Sturm verloren gegangen, nachdem sie 3 Monate lang dem Seegang ununterbrochen ausgesetzt gewesen waren. Auf weitere technische Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden.

Durch freundliches Entgegenkommen der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Kiel war es möglich, auch ein von Herrn Dr. Ing. Fahrentholz konstruiertes Wellenregistriergerät zeitweise einzusetzen. Das Instrument besteht aus einem beliebig langen Rohr von etwa 1 Zoll Durchmesser, dessen unterer Teil in das Wasser eingetaucht wird. Am oberen Ende des Rohrs werden von einer elektro-magnetisch betriebenen Membrane in rascher Folge Knallgeräusche erzeugt, deren Schall durch das Rohr gegen die jeweilige Wasseroberfläche im Rohr und von dort zurück zum Kopf des Rohrs läuft. Die Laufzeit des Echos wird gemessen und zu einer Punkt-Aufschreibung auf einem bewegten Registrierstreifen transformiert. Auch mit diesem Gerät wurden klare Registrierungen erzielt. Für die Vergleichsmessungen wurde es neben der Pegellatte an der pfahlabgewandten Seite des Rahmens angebracht. Es stellte sich heraus, daß der Kopf des Gerätes nicht vollständig wasserdicht war.

Mit der Zeitmarkenanlage konnten auf allen Registrierungen gleichzeitig Marken eingegeben werden. Sie fielen auf den Stand 0 sec der Uhr am Pfahl, so daß auf den Filmen die zeitliche Lage der Marken leicht bestimmt werden kann. Die Zeitmarken dienen erstens der Kontrolle der Laufgeschwindigkeiten sowohl der Registrierstreifen als auch des Films und bieten zweitens die Möglichkeit, die für den Vergleich bestimmten Zeitabschnitte auf den Registrierungen herauszufinden.

Abb. 12 (s. Bildteil) ist eine Photographie von Registrierproben; sie zeigt einen Filmstreifen von 16 mm Breite sowie Registrierungen der Leitfähigkeitssonde, des Echogerätes und des Beschleunigungs-Meßgerätes. (Die abgebildete Filmritz-Registrierung des Beschleunigungsschreibers ist mit Tusche nachgezogen worden. Die wirkliche Registrierkurve ist so fein, daß sie auf einer Photographie ohne Nachzeichnung nicht erkennbar sein würde.)

Gelegentlich haben wir auch spezielle visuelle Beobachtungen des Seegangs durchgeführt. Durch einen Theodolithen wurde die Höhe jeder

einzelnen zero-crossing-Welle an der Pegellatte geschätzt, angesagt und von einem Mitarbeiter notiert. Mehrere Sätze von je 100 Einzelbeobachtungen wurden angestellt. Für die 33 größten Höhen jedes Satzes wurde der Mittelwert berechnet und somit $H_{1/3}$ bestimmt.

C. Aufbereitung der Meßergebnisse

1. Entnahme der Meßwerte aus den Registrierungen und Vorbereitung für die weitere Auswertung

a. "Objektive" Messung

α. Herstellung einer kurvenartigen Punktfolge bei der kinematographischen Messung

Die mit zwei Film-Kameras aufgenommenen Bildstreifen (Abb.13, Bildteil) dienten teils als "objektive" Vergleichsmessung, teils auch nur zur Eichung der Registrierung der Leitfähigkeitssonde. Sofern die kinematographischen Aufnahmen als volle Vergleichsregistrierungen benutzt werden sollten, mußten sie die ganze Dauer der Messung überspannen. Da die Filmkamera Spulen für Filmstreifen von je nur 30 m Länge besitzt, die bei 16 Aufnahmen pro sec in etwas mehr als 4 min durchgelaufen sind, mußte zeitweise überlappend gefilmt werden.

Es war von vornherein erwartet worden, daß die Kameras den Film nicht mit völlig gleichbleibender Geschwindigkeit durchziehen würden. Aus diesem Grunde wurde die Synchron-Uhr am Meßpfahl mitgefilmt.

Auf dem Bildstreifen liegen die Messungen in einer Form vor, die für den Vergleich mit anderen Registrierungen ungeeignet ist. Es erwies sich als unumgänglich, den Gang des Wasserstandes an der Pegellatte oder an einer sonst gewünschten Stelle in eine "kurvenartige" Punktfolge umzuwandeln. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen :

Zunächst wurden alle Bilder eines Streifens von einer willkürlichen Aufnahme am Anfang des Films an fortlaufend nummeriert (Kontrolle durch zweimalige Zählung), zur späteren Kontrolle wurde jedes 10. Bild markiert. Dann wurde die Aufnahme in geeigneter Weise auf einen Tisch projiziert. Nunmehr mußten die Wasserstände an der äußeren (linken) Pegellatte Bild für Bild einzeln abgelesen und notiert werden. Die Eintauchtiefe der zur Leitfähigkeitssonde gehörigen Elektrodenstäbe und des Rohrs am Echogerät konnte dadurch bestimmt

werden, dass man bei den in der Projektion erscheinenden Pegellatten die Verbindungslinie zwischen gleichen Masszahlen auf den beiden Lat-ten zu Hilfe nahm; denn Rohr und Stäbe waren zwischen ihnen ange-bracht. - Ausserdem wurde jeder Durchgang des Uhrzeigers durch die auf dem Zifferblatt stärker markierten Vielfachen von 5 sec an der betr. Bildnummer notiert. Auf diese Weise erhält man die Zahl der Bilder in den einzelnen 5-Sekunden-Intervallen. Sie schwankte z.B. bei der Messung vom 2.12.1957 zwischen 57 und 74; am 17.2.1958 lief der Film grösstenteils wesentlich gleichmässiger. Eine genauere Ab-lesung der Uhr war infolge Unschärfe durch die Grösse des Filmkorns nicht möglich. Nimmt man an, dass der Kamera-Vorlauf während der einzelnen 5-sec-Intervalle konstant war, so kann man jedem Bild ei-nen Zeitpunkt zuordnen, zu dem die Belichtung erfolgte. Die Schwank-ungen der Bildzahlen wurden bei der weiteren Auswertung berücksich-tigt.

Die abgelesenen Wasserstände wurden in Abhängigkeit von der Zeit (Abszisse) als "Punktschrieb" in geeigneten Massstäben auf-gezeichnet (vgl.z.B. Abb.17). Wo sich die Filmstreifen überlappen, wurden die Ablesungen aus dem neuen Film besonders gekennzeichnet. Die Differenzen zwischen den beiden Streifen wurden nachher durch Interpolation ausgeglichen. Sie waren selbstverständlich äusserst gering.

Um die weitere Auswertung zu ermöglichen, wurde von dem fertig-gestellten "Punktschrieb" noch eine kontinuierliche "Kurve" ab-gezeichnet; dabei wurden sehr kurze Schwankungen, die nur durch 1 bis 2 Punkte belegt waren, ausgeglättet. In der neuen Form enthält die Registrierung keine Wellen mehr, deren sichtbare Periode $\leq 0,13$ sec war.

Im Herbst 1958 wurde vom Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes durch Ing. A.Lang ein spezielles Auswertegerät kon-struiert (vgl.Abb.14a,b,Bildteil), das die Arbeitszeit für die Über-tragung der kinematographisch aufgenommenen Wasserstände auf das Dia-grammpapier auf etwa 15% herabsetzt *). Das Gerät gestattet es, den "Punktschrieb" aus einer kinematographischen Registrierung mittels Einzelbild-Auswertung direkt, d.h. in einem Arbeitsgang herzustellen

*) Mit dem Gerät werden für die Übertragung einer Filmregistrierung von 20 min Dauer von einer Arbeitskraft 3 Wochen benötigt statt früher 5 Monate.

Ein Projektor wirft das Bild vergrössert - wie sonst auch - auf eine horizontale Tischplatte. Durch einen Druck auf einen Knopf löst man eine Einrichtung aus, die den Filmstreifen in der Filmbühne um genau ein Bild weitertransportiert; gleichzeitig wird ein dicht über der Tischplatte laufender Papierstreifen um eine bestimmte einstellbare Strecke weitergeschoben. Der Papiervorschub kann entsprechend der Filmbildgeschwindigkeit eingestellt werden, so dass die Zeit gleichmässig auf dem Papierstreifen abgetragen wird. Markiert man nun bei jedem Bild die Eintauchstelle ein und derselben Pegellatte am Pfahl durch einen Punkt, so erhält man den gewünschten "Punktschrieb" (Abb. 15, Bildteil). Es ist selbstverständlich darauf geachtet worden, dass die Pegellatten parallel zum Bildrand standen.

Im folgenden seien die Fehlermöglichkeiten bei dieser Art der Auswertung diskutiert:

1) Wird beim Filmtransport ein Bild nicht genau an die Stelle des vorhergehenden gerückt, so ergibt sich im "Punktschrieb" ein Fehler der Wasserhöhe. Bei Aufnahmen mit dem Tele-Objektiv $f = 1 : 20$ cm entsprach 1 mm Verschiebung des projizierten Bildes bei dem gewählten Projektionsabstand einer Fehlmessung des Wasserstandes von 1,8 cm.

Eine Prüfung hat ergeben, dass der durch ungleichmässigen Filmvorschub bedingte Fehler so klein ist, dass er nur zu einer schwachen "Verschmierung" des "Punktschriebes" führt, die leicht visuell beseitigt werden kann. Eine Verfälschung des Spektrums tritt keinesfalls ein.

2) Schwankungen des Messpfahls im Seegang sowie Bewegungen des Filmstreifens quer zur Richtung des Filmtransports durch "Lose" in der Filmführung ergeben einen Zeitfehler.

Der Pfahlschwankungen wird man dadurch Herr, dass die Ablesung dort erfolgt, wo sich der Pfahl im Projektionsbild in senkrechter Stellung befinden müsste. Man bedient sich dabei einfacher Hilfsmittel.- Die Filmführung ist so eingepasst, dass "Querbewegungen" des Streifens nur sehr klein sind.

3) "Lose" in der Führung des transportierten Papierstreifens sowie ungleichmässiger Papiervorschub können gleichfalls zu Höhen- und Zeitfehlern führen.

Die dadurch bedingten Ungenauigkeiten sind gering.

Nach Beseitigung anfänglicher kleinerer Fehlerquellen hat sich das Gerät ausserordentlich gut bewährt.

Unbedingte Voraussetzung für seinen Einsatz ist, dass die Kamera den Film mit konstanter Geschwindigkeit durchgezogen hat. Der gleichmässige Lauf unserer Kamera wurde durch Verwendung eines geeigneten Induktionsmotors erreicht. Nachprüfung ist erfolgt.

β. Registrierungen der Leitfähigkeitssonde

Die von der Leitfähigkeitssonde gelieferte Seegangsregistrierung ("L-Registrierung") liegt als kontinuierliche Kurve vor (Abb.12). Am oberen Rand des Streifens liegen die im Abstand von 1 min nach der Pfahluhr eingegebenen Zeitmarken (in der Abb. nicht sichtbar). Ungleichmässigkeiten im Lauf der Pfahluhr wurden an Hand von Vergleichs-Zeitmessungen mit der Stoppuhr eliminiert. Die Vorlaufgeschwindigkeit des Registrierstreifens ist also genau bekannt. Einer Auslenkung von 2,5 mm auf der Registrierung entsprach einer Wasserstandsänderung an der Elektrode von rund 10 cm. Der Registrierung wurde der Abstand zwischen dem unteren Rand des Streifens und den Extremwertlagen (Wellenberge und -täler) mit Hilfe eines besonderen Massstabes entnommen. Aus diesen Werten wurden Halbperioden (zeitlicher Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extremwerten verschiedenen Vorzeichens) und auch Vollperioden von Tal zu Tal bestimmt. In dieser Weise verfahren wir sowohl für alle erkennbaren Wellen als auch für die zero-crossing-Wellen.

Zur Ermittlung einer time-series wurden schliesslich die Abstände der Registrierung von der Papier-Unterkante an äquidistanten Stellen auf der Zeitachse im Abstand von annähernd 0.5 sec abgelesen und notiert. Nach Berechnung des arithmetischen Mittels konnten auch die Auslenkungen ermittelt werden. Alle Ordinatenwerte bedurften der Eichung durch die kinematographischen Aufnahmen, die während der Messung stattfanden. Die Durchführung der Eichung ist an anderer Stelle beschrieben.

Für die Analyse mit dem Fourier-Analysator des Deutschen Hydrographischen Instituts (vgl. Abschnitt D3c) wurden auch Schwarz-Weiss-Streifen der Registrierung hergestellt.

4. Ordinaten-Folgen (time - series)

An äquidistanten Stellen der Zeitachse wurden dem "Punktschrieb" im Abstand von je rund 0.5 sec die Ordinaten, also die Höhen des Wasserstandes an der Pegellatte, entnommen und somit eine sog. "Ordinaten-Folge" ("time-series") aufgestellt. Bei der Registrierung vom 17.2.1958, die sich über knapp 27 min erstreckte, ergaben sich für 1617 sec 3343 äquidistante Werte zuzüglich des Wertes an der Stelle $t = 0$.

Aus den Ordinatenwerten der Ordinaten-Folge wird zunächst der arithmetische Mittelwert bestimmt. Für die Messung vom 17.2.1958 ergab er sich zu 6,20 m Pegellatte; für den weiteren Gang der Auswertung wurde diese Grösse als Bezugsniveau benutzt. Teilmittelwerte, die gebildet wurden, zeigten keine systematische Schwankung.

5. Schwarz-Weiss-Streifen

Für bestimmte Schritte bei der weiteren Auswertung (Fourier-Analyse) müssen die Registrierungen in Teilstreifen auf eine vorgegebene Länge (80 cm) und auf einen gegebenen Ordinatenausschlag gebracht werden. Es wurde daher ein einfaches mechanisches Gerät nach Art eines Storchschnabels konstruiert, mit dem es möglich ist, Masstabsänderungen der Registrierungen nur in einer Richtung vorzunehmen.

Der Ordinatenmasstab der Registrierung musste zur Auswertung durch den benutzten Fourier-Analysator so gewählt werden, dass die Differenz zwischen grösster und kleinster Ordinate im Höchstfall 3 cm, mindestens aber 1 cm beträgt. Der Abszissenmasstab war so zu nehmen, dass auf einen Teilstreifen von 80 cm Länge der übertragenen Registrierung 30 bis 60 zero-crossing-Wellen entfallen; unter zero-crossing Wellen werden solche verstanden, die das Mittelniveau der Registrierung anschneiden.

Da der Fourier-Analysator auf der Grundlage der Umwandlung von Licht in elektrischen Strom arbeitet, müssen die Registrierstreifen, die von ihm analysiert werden sollen, so vorbereitet sein, dass die Seite unterhalb der eigentlichen "Kurve" völlig geschwärzt wird, während die Teile oberhalb der Registrierung weiss bzw. blank bleiben (vgl. Abb. 16, Bildteil).

b. Registrierungen des Echogeräts nach Fahrentholz

Auf dem Registrierstreifen des Echogeräts erscheint die Registrierung in Form einer Punktfolge. Die einzelnen Messpunkte liegen etwa 0.11 sec auseinander. Bezüglich der Zeitmarken gilt das gleiche wie bei der Auswertung der L-Registrierung. Auch sonst ist hier ebenso verfahren worden wie im Abschnitt C 1 b geschildert. Die Zuordnung der Extremwerte zu den entsprechenden Wellen der kinematographischen Messung war schwieriger als bei den L-Registrierungen, weil die Maxima und Minima teilweise mit grosser Zeitverschiebung registriert wurden. Ordinaten-Werte für die time-series wurden für äquidistante Zeitabstände von 0.5 sec genommen.

Eine Auslenkung von 5 mm auf dem Registrierstreifen entsprach bei der Messung am 2.12.1957 im Mittel einer Wasserstandsänderung von rund 10 cm.

c. Registrierung des Beschleunigungsschreibers

Die Registrierung des Beschleunigungs-Messgerätes in der hier benutzten Ausführung wurde auf einen Blank-Normalfilm mittels Edelstein eingeritzt. Sie ähnelte in ihrer Grösse einem Mikroschrieb. Vor einer weiteren Auswertung musste die Registrierung unbedingt optisch stark vergrössert werden. Anfangs, als noch Erfahrungen mit der Auswertung gesammelt werden mussten, wurde ein Mikroraster auf eine vertikale Wand, später auf einen Tisch mitprojiziert. Beachtung eventueller Parallaxen bzw. Bildverzerrungen und eine äusserst genaue Justierung der ganzen Apparatur waren selbstverständliche Voraussetzung für eine brauchbare Ablesung. Die eingegebenen Zeitmarken ermöglichten eine genaue Zuordnung zu den gleichzeitig genommenen "objektiven" Vergleichsmessungen und eine Kontrolle des Vorschubs des Blankfilms. Da die Zeitmarken nach dem Stand der Pfahluhr eingegeben worden waren, wurden deren eventuelle Unregelmässigkeiten durch Bezug auf die Kontroll-Stoppuhr eliminiert. Sowohl die Zeitwerte in der Abszisse als auch die Ordinatenwerte konnten zunächst nur in Einheiten des Mikrorasters abgelesen werden. Ermittelt wurden wie bei den anderen Registrierungen die Ordinaten an den Extremwertstellen, deren Abstände auf der Abszisse und eine time-series. Schliesslich musste von Rastereinheiten zu sec bzw. zu mm des Beschleunigungsausschlages übergegangen werden. Die

time-series wurde der Registrierung an äquidistanten Stellen von je rund 0.5 sec wahrem Zeitabstand entnommen.

Ab Oktober 1958 wurde eine neugebaute Projektionseinrichtung benutzt und von der Original-Mikroregistrierung zunächst eine vergrößerte Kopie auf einem Papierstreifen hergestellt.

Eine horizontale Tischplatte ist an einem senkrechten Rohr verschiebbar angebracht. Die Lichtführung bei der Projektion erfolgt von oben senkrecht nach unten. Das Mass der Vergrößerung kann durch Ändern des Abstandes zwischen Registrierstreifen und Tischplatte auf eine passende Grösse gebracht werden. Die Vergrößerung muss auf die Breite des vorgesehenen Papierstreifens abgestimmt sein; dabei waren die extremen Ausschläge zu berücksichtigen. Die "normalen" Ausschläge dürfen in der nachgezeichneten Registrierkurve nicht zu klein erscheinen, da sonst die eventuell durchzuführende mechanische Integration auf Schwierigkeiten stossen würde. Ausserdem sollte der Vorschub der projizierten Registrierung möglichst einen runden Wert besitzen. Versuche zeigten, dass sich für die Messung vom 2.12. 5 cm, für die Registrierung vom 14.2. 10 cm und für die "Sturm"-Messung vom 17.2.1958 eine Streifenbreite von 15 cm empfiehlt.

Um sicher zu sein, dass bei der Projektion keine Bildverzerrung eintrat, wurde ein Verfahren zur Justierung entwickelt.

Von den mit dieser Methode gewonnenen Registrierkurven wurden auch Schwarz-Weiss-Registrierungen von je 80 cm Länge zur Eingabe in den Fourier-Analysator hergestellt. Die Registrierung war vorher auf geeignete Ordinaten- und Abszissenmassstäbe gebracht worden.

d. Doppelt integrierte Beschleunigungs-Registrierung

Aus der zweifachen Integration^{*)} der Beschleunigungsregistrierung ergibt sich eine Kurve, die die Auslenkungen (Höhen) als Funktion der Zeit darstellt. Sie sei mit B_i bezeichnet.

Um B_i mit den anderen Messungen vergleichen zu können, wurden die "Höhen" der Extremwerte und ihre zeitlichen Abstände gemessen und notiert. Ausserdem wurde eine time-series von äquidistanten Stellen

*) Über die Durchführung der Integration Näheres in Abschn. C 3

mit einem Zeitabstand von je 0.47 sec genommen. Auch Schwarz-Weiss-Kurven für die Fourier-Analyse wurden hergestellt. Natürlich mußten die Grössen auf dem Registrierstreifen durch Berücksichtigung der Maßeinheiten in wahre Zeitwerte und Wellenhöhen umgerechnet werden.

2. Eichung der Vergleichsregistrierungen

a. Zeitbestimmung bei den objektiven Registrierungen

Als objektive Vergleichsmessung diente bei der Messung auf der Aussenalster die L-Registrierung. Die Zeitbestimmung geschah mittels eingegebener Zeit- und Orientierungsmarken. Für die Messungen auf dem Leuchtturm wurde entweder eine durchgehende kinematographische Registrierung oder die Registrierung der Leitfähigkeitssonde, die durch zeitweiliges gleichzeitiges Filmen geeicht war, als objektive Vergleichsmessung benutzt.

Von grosser Bedeutung ist bei allen Registrierungen eine einwandfreie Zeitbestimmung. Bei den meisten Messungen wurde eine am Meßpfehl befestigte Uhr mitgefilmt. Ihr Zeiger hatte eine Umlaufszeit von 1 min; ihr "Zifferblatt" war mit Sekundeneinteilung versehen. Sowohl diese Uhr als auch die Streifen-Transportwerke der Anzeigergeräte von L (Leitfähigkeitssonde) und E (Echogerät) wurden durch Synchron-Motore angetrieben, die ihren Strom aus einem speziellen Generator bezogen. Laufunregelmässigkeiten, die durch Frequenzschwankungen hervorgerufen sein könnten, gehen in alle drei Werke gleichermaßen ein und fallen daher nicht ins Gewicht. Durch einen Frequenzmesser wurde überdies festgestellt, dass die Frequenzschwankungen 1% nicht überschritten.

Der Gleichlauf der Motoren an den beiden Filmkameras liess jedoch teilweise zu wünschen übrig. Die Laufgeschwindigkeit bzw. die Anzahl der pro Sekunde aufgenommenen Bilder liess sich durch Ablesung der mitgefilmten Uhr bestimmen. Die Bilder auf dem Filmstreifen wurden durchgehend gezählt und jeweils Intervallen von 5 sec Dauer zugeordnet. Die Anzahl der Bilder pro 5 sec schwankt - wie bereits erwähnt - z.B. bei den Messungen am 2.12.1957 zwischen 57 und 74. Die Aufnahmen wurden nun "auf Gleichlauf", also auf wahre Zeit reduziert. Durch bestimmte Vereinfachungen bei den Zeitreduktionen kann im ungünstigsten Fall eine Zeitverschiebung von 0.17 sec aufgetreten sein. Dieser Fehler dürfte innerhalb der Genauigkeitsgrenzen liegen, mit

denen die Zeitordinaten von Werten der L- und E-Registrierungen bestimmt werden können.

Hinsichtlich der Zeitbestimmung ergab sich noch eine Schwierigkeit, die bei der Gegenüberstellung des F-Schriebes (kinematographische Messung) mit der L-Registrierung aufgefallen war. Der Vergleich zwischen ihr und der gleichzeitigen kinematographischen Registrierung nach Einzelwellen zeigte nämlich eine zeitweilige Phasenverschiebung der Wellen um 0.9 sec (vgl. Abb. 17). Davon war nur ein Anteil von maximal 0.17 sec durch die im vorigen Abschnitt erwähnte Zeitverschiebung erklärbar. Es stellte sich heraus, dass die Beträge der Zeitdifferenzen in Abhängigkeit von der Zeit beim Eintritt der Wellenextreme auf den beiden Registrierungen eine Periode von 60 sec haben. Wenn auch der Umstand, dass die Zeitmarken im Nov./Dez. 1957 in die L-Registrierung mit der Hand eingegeben wurden, einen gewissen, wahrscheinlich sehr kleinen Einfluss ausgeübt haben mögen, so ist der Hauptteil des Fehlers doch darauf zurückzuführen, dass der Uhrzeiger im Zusammenhang mit Getriebe- oder Lose des Zeigers abwärts (also auf der rechten Seite des Zifferblattes) schneller lief als aufwärts. Diese Ungenauigkeit wurde bei der Auswertung berücksichtigt und eliminiert.

b. Eichung der Leitfähigkeitssonde

Die Leitfähigkeit des Seewassers ist von seinem Salzgehalt, seiner Temperatur und auch von seinem Gehalt an pflanzlichen Schwebeteilchen abhängig. Aus diesem Grunde war es nötig, die Leitfähigkeitssonde während der Messung zu "eichen", also die Beziehung zwischen einigen wahren Wasserständen und den zugehörigen L-Messwerten zu ermitteln. Als objektive Messung standen die gleichzeitig durchgeführten Filmaufnahmen zur Verfügung. Auf den Bildern konnte der Wasserstand an den Stäben der Sonde abgelesen und in cm angegeben werden. Aus diesen Werten wurde eine Punktfolge mit dem Wasserstand als Ordinate und der Zeit in der Abszisse aufgezeichnet und der gleichzeitigen, auf gleichen Zeitmassstab gebrachten L-Registrierung gegenübergestellt (Abb. 17). Die für die Extreme, also für die Wellenberge und -täler, registrierten Messanzeigen wurden miteinander verglichen.

Bei der 15-minütigen Messung am 2. Dezember 1957 war zur Eichung der Leitfähigkeitssonde und des Echogerätes bei Beginn der Registrierung 100 sec und am Ende 90 sec lang gefilmt worden. Nimmt man als Mass

für den Wasserstand an den Stäben der Leitfähigkeitssonde den Abstand vom unteren Rand des Registrierstreifens (ausgedrückt in Einheiten des zur Ablesung optisch projizierten Rasters, "pRE") und ordnet man diese an den Wellenextremen eingetretenen den entsprechenden durch Filmaufnahme ermittelten wahren Wasserständen zu, so ergibt sich die in der Abb.18 dargestellte Punktwolke. Die Streuung der Punkte ist gering. Bildet man für eine bestimmte Klasseneinteilung Mittelwerte (Klassenbreite = 1.0 Rastereinheit) und berücksichtigt man auch die Verteilung der Punkte innerhalb jeder Klasse, so ergibt sich die Funktion der Abb.19. Sie ist leicht konkav nach oben gekrümmt. Führt man diese Gegenüberstellung für die Eichung zu Beginn der Messung (I) und für die Eichung am Ende der Messung (II) getrennt durch, so zeigt sich, dass die Kurve für die Schlusseichung etwas höher liegt als für die Anfangsaufzeichnung (Abb.20). Der Unterschied beträgt wenige cm. Er ist möglicherweise hervorgerufen durch eine Temperatur- oder Salzgehaltsänderung des Seewassers. Das Ergebnis zeigt aber, dass die Leitfähigkeitssonde für jede Messung im Seewasser neu geeicht und nach Möglichkeit - wie dies bei den Messungen auf Mellum Plate regelmässig geschehen ist - zu Beginn und am Ende der Registrierung geeicht werden muss.

Mit Hilfe des Standes des Sekundenzeigers an der Uhr am Pfahl und der Zeitmarken auf dem Registrierstreifen lässt sich feststellen, inwieweit die Extremwerte auf den verschiedenen Registrierungen zeitlich koinzidieren (Abb.17). Über die dabei aufgetretenen Zeitunterschiede bzw. Phasenverschiebungen ist oben schon berichtet worden. In der L-Registrierung liegen die Minima und Maxima fast durchweg später als bei der Filmmessung. - Die Zuordnung der einzelnen Wellen in den beiden Aufschreibungen ist aber ohne weiteres möglich gewesen.

Mit Hilfe der in Abb.19 wiedergegebenen Beziehung können die L-Messwerte also leicht auf Wasserstände (an den Sondenstäben) umgerechnet werden.

Die Leitfähigkeitssonde hat sich als ein brauchbares und genau arbeitendes Gerät erwiesen.

Nachdem die beiden V 2 A - Stahl- Stäbe bei Sturm in Verlust geraten waren, wurden behelfsmässig zwei 3 m lange Gasrohre am Messrahmen angebracht. Bei der Registrierung am 14.2.1958 diente die auf diese Weise geänderte Leitfähigkeitssonde als objektives Vergleichs-Messgerät und hat dabei gut gearbeitet. Die Eichung erfolgte durch Filmen von rund

60 sec Dauer am Anfang und von etwa 50 sec am Ende der Messung. Die Streuung der Eichpunkte (Extremwerte) ist nicht so gering wie in Abb.18; das Auffinden der Eichkurve bereitete aber keine Schwierigkeiten.

c. Eichung des Echogerätes nach Fahrentholz

Am 2.12.1957 war auch das von Herrn Dr.Fahrentholz entwickelte Echogerät (damaliger Ausführung) in Betrieb^{*)}. Seine Registrierung wurde mit kinematographischen Messungen von 100 sec und 90 sec Dauer in ähnlicher Weise wie mit der L-Registrierung verglichen (Abb.21). Die Zeitbestimmung auf dem Registrierstreifen erfolgte auch hier unter Benutzung von Zeitmarken, die von derselben Taste wie für die Leitfähigkeitssonde synchron eingegeben wurden. Einander gegenübergestellt wurden die den Filmbildern bei den Wellenextremen entnommenen Wasserstände am Rohr der Sonde und die Aufzeichnungen des Fahrentholz-Gerätes für die entsprechenden Kämme bzw. Täler. Abb.22 zeigt die sich ergebende Punktwolke. Die Skala für die Filmaufschreibung ist die gleiche wie bei der entsprechenden Darstellung für die Leitfähigkeitssonde; in der Abszisse finden wir für die Grösse der Auslenkung wieder Projektions-Rastereinheiten (pRE). Die Streuung der Einzelpunkte, die sich aus den Vergleichsablesungen für die Wellenextreme ergaben, ist hier wesentlich grösser. Für Klassen der Breite 20 Rastereinheiten wurden wieder Mittelwerte gebildet und eine "Eichkurve" gezeichnet (Abb.23). Sie ist hier etwas stärker konkav nach oben gekrümmt als die Eichkurve Filmmessung/L-Registrierung (Abb.19).

Der Zeitvergleich für die Extreme jeder einzelnen Welle ergab (Abb.21), dass die Anzeige des Echogeräts fast immer nachhinkte; einige Wellenberge bzw. -täler wurden vom Echogerät 2.0 sec später registriert als durch den Filmstreifen. Die Streuung des Zeitunterschiedes ist sehr gross; der kleinste Zeitunterschied wurde zu 0 sec gemessen. Eliminiert man den durch den ungleichmässigen Gang der Uhr hervorgerufenen Fehler, so bleibt ein Nachhinken der Echoregistrierung bis zu 1.5 sec.

An einigen Stellen der Registrierung erkennt man, dass das Nachbleiben dem Betrage nach kontinuierlich grösser wird und dann plötzlich

*) Das Gerät ist inzwischen von Dr.Fahrentholz verbessert worden.

abbricht. Durch Vergleich mit der kinematographischen Registrierung wurde festgestellt, dass die Erscheinung nicht bei markanten Wellen, sondern bei Wellen mittlerer Grösse und Periode auftritt. Es ist daher anzunehmen, dass im Rohr des damals benutzten Echogeräts eine Neigung zur Ausbildung von Eigenschwingungen bestand, die kürzer als die aufgetretenen Seegangperioden sind. Reibung des Wassers an den Rohrwänden und insbesondere Pressung der Luftsäule im Rohr mögen auch eine Rolle gespielt haben. Darauf ist wahrscheinlich die starke Streuung der Extremwerthöhen in Abb.22 zurückzuführen.

3. Die Integration der Beschleunigungsregistrierung

a. Notwendigkeit der Integration

Am Schluss der Auswertung wird für die Registrierung des Seegangs ein Energie-Spektrum gebracht; es ergibt sich daraus eine Kurve, die die Verteilung der Wellenenergie auf die verschiedenen Wellenperioden anzeigt. Ausserdem strebt man eine Aufstellung über die Häufigkeit der im Seegang vorhandenen tatsächlich existierenden, also "sichtbaren" Wellen an. Da die Analyse zur Feststellung des Spektrums und die Häufigkeitsbestimmung der sichtbaren Wellen von den "Auslenkungen" $z(t)$ der Wasserhöhe von dem Mittelniveau der Wasseroberfläche ausgehen muss, ist es unumgänglich, die vom Beschleunigungsmesser gezeichnete Registrierung zweimal zu integrieren.

Es wurde anfänglich erwogen, ob es möglich sei, die einzelne Seegangswelle als echte harmonische Schwingung zu betrachten und dementsprechend gemäss $\iint \cos x \, dx = -\cos x + \text{const}$ bzw. $\iint A \cdot \sin \omega t = \frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t - 180^\circ)$ ($\omega = \text{Kreisfrequenz}$, $t = \text{Zeit}$) doppelt zu integrieren. Es zeigte sich jedoch, dass Windseewellen wegen ihrer Verschiedenheit von Sinuswellen nicht in dieser Weise behandelt werden können. Alsdann wurde erwogen, die zeitraubende und kostspielige zweifache Integration der Beschleunigungs-Registrierungen dadurch zu ersetzen, dass man das fertig analysierte Spektrum der Beschleunigungsgrössen an jeder Stelle mit $\frac{1}{(2\pi f)^4}$ multipliziert. Die Anwendung dieser Methode zur Umgehung der doppelten Integration wurde versucht. Es ergab sich ihre Unbrauchbarkeit im vorliegenden Fall, weil im Bereich der kleinen Frequenzen bei der Division der zur vierten Potenz erhobenen kleinen Grössen die stets vorhandenen kleineren Störschwingungen so stark vergrössert werden, dass am langwelligen Ende des Spektrums

eine Aussage über dessen Beschaffenheit nicht mehr möglich ist.

Die Störschwankungen bestehen z.T. in überlagerten langwelligen Schwingungen oder Verschiebungen, die ihre Ursache teilweise in den Kippbewegungen des Gerätes im Seegang haben (vgl.Lit.24). Zum anderen Teil gehen sie wahrscheinlich auf Nullpunktschwankungen infolge kleiner Unregelmässigkeiten in der Filmführung zurück. Ausserdem ist vermutlich das sog. "white noise" vorhanden, also ein fehlerhafter Anteil der Beschleunigungsintensitäten, der für alle Frequenzen einen annähernd gleichen Wert besitzt (abgesehen von statistischen Schwankungen). - Die Störschwankungen fallen umso weniger ins Gewicht, je grösser die Intensität des Seegangs ist. Sie machen sich hauptsächlich am langwelligen Ende des Spektrums bemerkbar.

Wegen der Nicht-Sinusform der Seegangswellen und der Unmöglichkeit, bei der "nachträglichen" Integration des bereits analysierten Beschleunigungsspektrums Filter anzuwenden, müssen die Beschleunigungsregistrierungen also unbedingt zweimal integriert werden, bevor zur Analyse zwecks Ermittlung des Spektrums übergegangen werden kann.

b. Mechanische Integration

In Ermangelung eines geeigneten elektrisch arbeitenden Integrationsgeräts wurde zunächst ein mechanischer Integrator nach ABDANK-CONRADI (vgl. Abb.24, Bildteil) benutzt. Die als Mikroschrieb gegebene Original-Beschleunigungsregistrierung vom 2.12.1957 wurde für den vorliegenden Zweck optisch vergrössert und auf einen 5 cm breiten Streifen Millimeterpapier übertragen. Er zeigte die Registrierung in 25,15-facher Vergrösserung; die Vorlaufgeschwindigkeit betrug nach der Reduktion auf wahre Stoppuhrzeit 3,198 cm/sec.

Bei dem Schneidenrad-Integraphen nach ABDANK-CONRADI wird die zu integrierende Kurve $b(t)$ auf einem festen Tisch aufgespannt und mit einem Führungsstift abgefahren. Dadurch wird ein Wagen in der Abszissenrichtung bewegt; gleichzeitig treibt ein am Wagen befestigtes Schneidenrad eine Tischplatte, auf der die Integralkurve aufgezeichnet wird, in Ordinatenrichtung an. Das Schneidenrad steht senkrecht auf der Zeichenebene, bildet aber einen Winkel zu der Richtung, in der sich der Wagen bewegt. Diese Neigung ist in jedem Punkt proportional zu $b(t)$ und gleich derjenigen der aufzuzeichnenden Integralkurve.

Nennt man die Ordinate der Integralkurve y^* und die Richtung der Abszisse t , so erhält man

$$\frac{dy^*}{dt} = \frac{1}{c_i} b$$

oder

$$y^* = \frac{1}{c_i} \int_0^t b dt + Const \quad (1)$$

Der Proportionalitätsfaktor c_i ist eine Apparatekonstante und kann am Gerät eingestellt werden. Die additive Konstante in Gl. (1) hängt von der Anfangseinstellung ab.

Berücksichtigt man die Grösse des bei Versuchen in der Hamburgischen Schiffsbauversuchsanstalt festgestellten Eichfaktors zwischen Beschleunigung und Ordinate der Beschleunigungsregistrierung (= 437 gal/mm), so erhält man einen Faktor C (in unserem Falle = 26,55), mit dem die nach der doppelten Integration ermittelte Auslenkung (cm Millimeterpapier) multipliziert werden muss, um die wirkliche Auslenkung der Meeresoberfläche (in cm) zu erhalten. Die auf diese Weise berechnete Auslenkungsfunktion $z(t)$ wird mit der Abkürzung " $Bi_{(mech)}$ " (mechanisch integrierte Beschleunigungsregistrierung) bezeichnet.

Eine genaue Justierung aller Teile des Integrgraphen ist erforderlich. Trotz äusserster Sorgfalt war die Integralkurve bereits nach einmaliger Integration starken "Trends", also langen Schwankungen, unterworfen, die ihren Ursprung hauptsächlich in Nullpunktschwankungen der Registrierung haben. Es wurde versucht, die langen Schwingungen durch die Bildung eines gleitenden Mittelwertes aus je 31 Ordinatenwerten, der von den Einzelordinaten zu subtrahieren war, herauszufiltern. Abb.25 gibt einen Einblick über die Änderung der Nullpunktlage. Die Anwendung dieses "Filters" bewirkte zwar eine Besserung der Integrationsumstände; es erfüllte aber nur teilweise seinen Zweck. Die Filterfunktion, die für das Spektrum gültig ist, hat nach zweimaliger Anwendung, also nach Durchführung beider Integrationen, die Form der Abb.26. Man sieht, dass z.B. am Punkt $f = 0.14$, also bei einer Periode von 7.15 sec, nicht eine Abschwächung, sondern sogar eine Verstärkung der "Störschwankungen" eintritt. Selbstverständlich müssen die Filterwirkungen nach Fertigstellung der Kurve wieder berücksichtigt werden bzw. in geeigneter Weise rückgängig gemacht werden. Dies ist bei beiden Integrationen versucht worden.

c. Integration auf elektrischem Wege

Voraussetzung für die elektrisch bzw. elektronisch durchgeführte Integration ist das Vorliegen der Registrierung in Form von elektrischen Grössen. Die holländischen Seegangs-Beschleunigungsschreiber liefern die Registrierung von vornherein in elektrischer Spannung. Allerdings muss bei diesen Verfahren in Kauf genommen werden, dass jedem einzelnen Messgerät ein elektrisch arbeitender Integrator beigegeben wird. Sind die Registrierungen für optische Lesbarkeit vorgesehen - wie bei den von uns benutzten Geräten - so müssen sie durch besondere Massnahmen in elektrischen Strom umgewandelt werden. Auf der anderen Seite benötigt man bei dieser Art der Aufschreibung für viele Beschleunigungsschreiber nur ein Integrationsgerät.

Da die Beschleunigungsregistrierungen eingeritzt auf Blankfilm vorlagen, war es erforderlich, sie als Schwarz-Weiss-Kurven umzuzeichnen bzw. in dieser Form auf Filmstreifen zu bringen. Gewisse kleinere Ungenauigkeiten sind hierbei nicht ganz vermeidbar. Die nur an den blanken Stellen lichtdurchlässigen Normalfilm-Streifen wurden einem von Ing. A.Lang gebauten "Umsetzer" zugeleitet, in der die Schwarz-Weiss-Registrierungen über eine Selenzelle in elektrische Grössen umgewandelt wird. Die dort ausgehende Stromstärke betrug bei 5 k Ω Eingang 5 μ A.

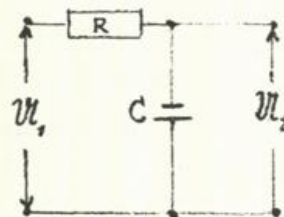
Das Prinzip der elektrisch arbeitenden Integratoren beruht auf der Koppelung eines Verstärkers mit einem Kondensator C unter Vorschaltung eines Widerstandes R. Die nebenstehende Prinzipskizze zeigt die sog. "Miller"-Schaltung; dabei bedeuten U_1 die Eingangs- und U_2 die Ausgangsspannung.

Man erhält:

$$U_2 = \frac{1}{1 + j\omega RC} U_1$$

und bei $RC \gg \frac{1}{\omega}$:

$$U_2 = -j\frac{U_1}{\omega RC}$$



($j\omega$ gibt eine Phasenverschiebung um 90° an). Wegen der Spannungsverluste, die mit der Phasenveränderung verbunden sind, müssen geeignete Verstärker eingesetzt werden. Bei Eingeben einer Spannung (gegen Erde) an den Widerstand am Ende des Schaltsatzes ergibt sich das zeitliche Integral dieser Spannung. Bei zweifacher Integration ist Kettenschaltung

erforderlich.

Von grosser Bedeutung ist auch bei der elektrischen Integration das Ausgleichen der Nullpunkts-Schwankungen. Hierzu stehen verschiedene Filter zur Verfügung. Man kann annehmen, dass alle Schwankungen in der Registrierung, die länger als eine bestimmte Periode sind, bei Anwendung des Filters zum Verschwinden gebracht werden. Die Filterfunktion (Abb.27) hat nicht eine streng rechteckige Form, sondern der Abfall vollzieht sich in Form einer Kurve. Eine exakt bestimmte Periode inmitten des Abfall-Bereiches wird als "Grenzperiode" bezeichnet. In dem von ihr abgetrennten langperiodischen Bereich werden nur noch geringe Beträge der gemessenen Grössen "durchgelassen". Die Abb.27 gibt eine Filterfunktion wieder, wie sie durch Überlagerung mehrerer Einzelfilter verschiedener Grenzperiode zu entstehen pflegt. Ausgefiltert oder wenigstens grösstenteils ausgelöscht werden Messwerte in dem mit s bezeichneten Periodenbereich.

Die Frage der richtigen Filterung ist von grosser Bedeutung für die Verlässlichkeit des durch die Analyse ermittelten Spektrums in seinem langwelligen Teil. Es darf auch nicht übersehen werden, dass die Beschaffenheit des Energiespektrums gerade im Bereich der langen Perioden bei Betrachtungen über die Umwandlung von Seegang von Wichtigkeit ist. Es sind daher besondere Untersuchungen angestellt worden, mit denen festgestellt werden soll, welche Filter eine optimale Wirkung bei der Integration von Seegangs-Beschleunigungsregistrierungen ausüben. Über diese Arbeiten wird gesondert berichtet werden.

Es ist schwierig oder sogar unmöglich, ein für alle Seegangsarten gut brauchbares Filter herauszufinden. - Leider können unerwünschte Filterwirkungen nach der Integration nicht immer rückgängig gemacht werden.

Dank dem besonderen Entgegenkommen des Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut in De Bilt konnten einige unserer Beschleunigungsregistrierungen mit einem in De Bilt befindlichen Miller-Integrationsgerät versuchsweise doppelt integriert werden. Zur Verstärkung des im Umsetzer erzeugten Stroms stellte das Kon.Ned.Met.Instituut dankenswerterweise einen geeigneten Verstärker zur Verfügung. Es ergab sich jedoch, dass die in De Bilt beim Gebrauch des Miller-Integrators verwendeten Filter für die Integration der am Leuchtturm Mellum Plate gewonnenen Beschleunigungsregistrierungen nicht geeignet sind.

Die Fa. Rohde & Schwarz, mit der Verbindung aufgenommen wurde, vertrat die Auffassung, dass der von der Fa. Donner, U.S.A., hergestellte Analogrechner Modell 3400 bei geeigneter Schaltung in der Lage sei, die erforderliche doppelte Integration auszuführen. Von ihrer Zweigniederlassung Köln wurde unter Mitwirkung des Deutschen Wetterdienstes - Instrumentenamt Hamburg - nach zahlreichen Versuchen eine Schaltung gefunden, mit der das Gerät in zufriedenstellender Weise integriert. Integrationsproben, die an Hand von reinen Sinusschwingungen und an Seegangregistrierungen vorgenommen wurden, verliefen befriedigend.

Dank dem besonderen Entgegenkommen der Fa. Rohde & Schwarz konnten in Köln mehrere Beschleunigungsregistrierungen, die am Leuchtturm Mellum Plate gewonnen worden waren, noch vor Ankauf des Gerätes kostenfrei durchgeführt werden. Dabei wurden zum Teil verschiedene Filter benutzt.

Die elektrisch doppelt integrierte Beschleunigungsregistrierung wird mit "Bi" bezeichnet.

4. Behandlung der Beschleunigungs-Registrierung nach der Integration

a. Eichung

Die mit dem Edelstein auf Blankfilm eingeritzte Registrierung der Beschleunigung musste mit Hilfe einer Projektionseinrichtung optisch vergrößert und auf diese Weise der Auswertung zugänglich gemacht werden. Bei der Integration kommt es durch Gerätekonstanten und andere Faktoren zu Änderungen der sich ergebenden Grössen. Es muss schliesslich ein Umrechnungsfaktor \bar{C} gefunden werden, mit dessen Hilfe man aus der Grösse der Auslenkung in der doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung, Z_i , die zugehörige "wahre" Auslenkung an der Meeresoberfläche, ζ , also den vom Beschleunigungsschreiber beschriebenen vertikalen Weg, nach der Gleichung

$$\zeta = \bar{C} \cdot Z_i \quad (2)$$

berechnen kann.

Für die Integration mit dem mechanisch arbeitenden Integrationsgerät war die Registrierung in geeignetem Masstab neu gezeichnet worden. Nach der zweifachen Integration waren neben der Gerätekonstante für die Grösse der Beschleunigung und den Vergrößerungsfaktoren nur die Apparate-

konstante des Integrators und die Filterwirkung zu berücksichtigen, um die "wahre" Registrierung der Auslenkungen ($B_{i(\text{mech})}$) zu erhalten.

Bei der elektrischen Integration war es erforderlich, zunächst eine vergrösserte Abbildung der Original-Beschleunigungsregistrierung als Schwarz-Weiss-Registrierung herzustellen. Die Umrechnungs- und Korrekturfaktoren für die Abszisse und Ordinate waren bekannt bzw. leicht zu bestimmen. Die Messkonstante c für die Abbildung der Beschleunigung war vorher experimentell zu $c = 4370$ Höheneinheiten (gal/cm) festgestellt worden. Werden die optischen Werte in elektrische Grössen umgewandelt, alsdann zweimal integriert und schliesslich mittels Kompensations-Schreibgerät als Kurve aufgezeichnet, so sind die folgenden Konstanten bzw. Umrechnungsfaktoren zu berücksichtigen

Abszisse: Vorschub der als Schwarz-Weiss-Kurve gefertigten Beschleunigungsregistrierung

Vorschub des licht-elektrischen Umsetzers

Vorschub des Schreibgerätes

Ordinate: Eichkonstante des Umsetzers

Licht-Absorptionsfaktor

Integratorkonstante

Eichkonstante des Schreibgerätes

Filterfaktor.

Die Vorschubgrössen in der Abszisse sind zu messen und können entsprechend aufeinander bezogen werden. Aus der vom Schreibgerät gezeichneten doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung (B_i -Registrierung) werden dann im Abstand Δt ($t = \text{Zeit}$) Ordinatenwerte als Ausgangsgrössen für die Autokorrelations-Analyse zu entnehmen sein.

Die Eichkonstanten des Umsetzers und des Schreibgerätes sind einzustellen oder durch Messung zu ermitteln; sie sind also als bekannt anzusetzen. Insbesondere wurde festgestellt, dass sich die Eichkonstanten des Schreibgerätes wie die angegebenen Eingangsspannungsbereiche verhalten. Die Genauigkeit der Eichkonstanten wurde kontrolliert. Der Licht-Absorptionsfaktor \mathcal{N} spielt nur dann eine Rolle, wenn die Lichtundurchlässigkeit des schwarzen Teiles oder die Durchlässigkeit des blanken Feldes in der Schwarz-Weiss-Kurve nicht vollkommen sind. Vergleiche mit einwandfreien Teststreifen ermöglichen die Berechnung des Licht-Absorptionsfaktors. Dies war bei der Auswertung der Messungen vom 14.2.58 und vom 17.2.58 erforderlich, weil die vergrösserte Be-

schleunigungsregistrierung nicht auf weissen, sondern auf hellblauen Film gebracht worden war. - Der Filterfaktor ξ kann am elektrischen Integrationsgerät durch Variation der sog. "Filterkonstanten" RC (Widerstand mal Kapazität) eingestellt werden, wobei von der Filterwirkung auf eine ausgewählte Frequenz ausgegangen wird. Bei den drei behandelten Registrierungen wurden benutzt:

Tabelle 1

	<u>2.12.1957</u>	<u>14.2.1958</u>	<u>17.2.1958</u>
RC	3	1,5	1,2
Filterfaktor	0,53237	0,18417	0,11354
a_r	912	582	1091

Je grösser der Filterfaktor ist, umso kleiner ist die Filterwirkung bei der Integration.

Obwohl sich die Apparatekonstante des engeren elektrischen Integrators (Integratorkonstante) auch berechnen lässt, bedienen wir uns bei der Ermittlung der Grösse \bar{C} schliesslich einer reinen Sinusschwingung als Testfunktion, die als Schwarz-Weiss-Kurve auf Normalfilm gebracht worden war. Bei einem solchen Vorgehen fällt die Integratorkonstante in der Formel für \bar{C} heraus und braucht also nicht erst bestimmt werden.

Die Testfunktion enthält gleichartige Wellen der Länge L_t und der Schwankungshöhe (doppelte Amplitude) a_t . Nach ihrer zweifachen Integration besitzt die Kurve, die gleichfalls eine rein harmonische Schwingung ist, Wellen der Länge L_r und der Höhe a_r . Dabei sind L_r von den Vorschubgrössen und a_r überdies von der gewählten Einstellung des Integrators, insbesondere von der Grösse RC und von der am Schreibgerät liegenden Eingangsspannung abhängig. Die Grösse von a_r bei den Einstellungen, die bei den drei Registrierungen gewählt worden waren, findet man in obenstehender kleiner Tabelle 1 in der untersten Zeile.

Für \bar{C} ergibt sich schliesslich eine Formel, auf deren genaue Ableitung hier verzichtet werden möge.

$$\bar{C} = \frac{a_t}{a_r} \left(\frac{L_t}{2\pi} \right)^2 \frac{\int_0^{\xi} \frac{c \cdot x}{x^3} dx}{\delta} \quad (3)$$

Dabei bedeuten :

- δ_t die am Schreibgerät für die Integration der Testfunktion eingestellte Eichkonstante,
- δ die am Schreibgerät bei der Integration der Beschleunigungs-Registrierungen eingestellte Eichkonstante,
- ξ Filterfaktor
- c Messkonstante für die Abbildung der Beschleunigung
- x Vorschub der Original-Beschleunigungsregistrierung
- x^* Vorschub der Beschleunigungsregistrierung als Schwarz-Weiss-Kurve
- λ Lichtabsorptionsfaktor

Der Umrechnungsfaktor \bar{c} ergab sich - bedingt durch die verschiedenen Einstellungen des Integrators und durch die Verwendung unterschiedlicher Filter - bei den drei behandelten Registrierungen zu

	<u>2.12.1957</u>	<u>14.2.1958</u>	<u>17.2.1958</u>
\bar{c}	0,10953	0,16590	0,63486

\bar{c} wurde bei der Durchführung der Autokorrelations-Analyse auf dem elektrischen Schnellrechner mit zum Ansatz gebracht.

b. Massnahmen zur Gegenüberstellung mit den Repräsentativ-Messungen

Hauptzweck der Vergleichsmessungen ist es, die Registrierungen des Seegangs-Beschleunigungsschreibers den gleichzeitigen "objektiven" Messungen gegenüberzustellen und auf diese Weise nach Möglichkeit eine "Eichung" des Beschleunigungs-Messgerätes herbeizuführen. Obwohl ein Vergleich der Einzelwellen nicht möglich ist, weil sich der Beschleunigungsschreiber während der Messungen in rund 15 m Entfernung von der Messeinrichtung für die "objektive" Registrierung befand, ist es notwendig, den Seegang während ein und derselben Zeitspanne zu betrachten. Die zusammengehörigen "Synchron"-Teile der Registrierungen konnten an Hand von Zeitmarkierungen und einigen zusätzlichen Hilfsmitteln herausgefunden werden. Die folgende Tabelle bringt in cm und sec Angaben über die Länge des Synchronstreifens, der für die weitere Bearbeitung der jeweiligen Registrierung benutzt wurde. Ausserdem wird die Zahl der Stellen auf der Abszisse angegeben, an denen Ordinatenwerte für die time-series und

die nachfolgende Autokorrelations-Analyse entnommen wurden :

Tabelle 2

	<u>2.12.57</u>	<u>14.2.58</u>	<u>17.2.58</u>
Länge des Streifens in cm	1089	848	670
Zeitliche Länge des Synchron- teils der Registrierung in sec	862	896	1617
Anzahl der Stellen für time-series	2157	1696	3343

Dass die cm-Länge der Streifen bei den zeitlichen kürzeren Messungen grösser ist als bei Registrierungen von längerer Dauer, geht darauf zurück, dass bei der Vergrößerung der Beschleunigungs-Registrierungen der Ordinaten-Spielraum so weit wie möglich ausgenutzt wurde und somit der Vergrößerungsfaktor sehr unterschiedlich war.

D. Methoden zur Auswertung der Registrierungen

=====

1. Die Notwendigkeit statistischer Vergleiche

Bei den bisherigen Vergleichen von Aufzeichnungen verschiedener Wellenmessgeräte liefen die Betrachtungen darauf hinaus, dass die Messanzeigen der Einzelwellen einander unmittelbar gegenübergestellt wurden. Dies war möglich, weil für jeden Wasserstand zwischen den beiden Messlatten die absolute Messung der Filmaufnahme zur Verfügung stand.

Für die Registrierungen des Seegangs-Beschleunigungsschreibers lassen sich Vergleiche dieser Art nicht durchführen. Das Gerät muss möglichst frei, also mit einer gewissen Lose, im Wasser schwimmen, und es wäre daher sinnwidrig, ihn etwa zwischen den Pegellatten am Messpfahl oder an den Sondenstäben festzubinden. Auf der Aussenalster wurden sowohl die Leitfähigkeitssonde als auch der Wellenschreiber vom Bootssteg aus ins Wasser gesetzt und in Windrichtung auf gleicher Höhe gehalten (Abb.28, Bildteil). Bei den Messungen am Leuchtturm Mellum Plate war das Gerät etwa 15 m vom Pfahl entfernt und befand sich infolge der Gezeitenströmung unter leichtem Zug. Auf der Strecke vom Pfahl zum Standort des Beschleunigungsmessers unterliegen die Einzelwellen einer mehr oder weniger starken Umwandlung, so dass ein unmittelbarer Vergleich nicht möglich ist. Dass sich die Struktur des Seegangs auf dieser Distanz ändert, ist dagegen nicht anzunehmen. Man ist daher auf Vergleiche statistischer Art angewiesen. An Hand geeigneter Häufigkeitsverteilungen lassen sich bereits Schlüsse über den Grad der Übereinstimmung

zweier Kollektive ziehen. Im vorliegenden Falle kommt es allerdings insbesondere darauf an, ob durch die Beschleunigungs-Registrierung die Verteilung der in einem Seegang "enthaltenen" Energie in Abhängigkeit von der Wellenperiode richtig bzw. mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben wird.

2. Häufigkeitsverteilungen von sichtbaren Wellen

Eine Seegangsregistrierung stellt die Wasserstandsänderungen an einem nicht bewegten Ort in See in Abhängigkeit von der Zeit dar. Geht man zunächst von einer beliebigen Bezugslinie, die parallel zur Zeitachse liegt, aus und bestimmt an äquidistanten Zeitstellen die Ordinaten, so stellt ihr arithmetisches Mittel das mittlere Niveau des Wasserstandes während der Registrierung dar. Die Abweichungen des Wasserstandes vom mittleren Niveau heissen die "Auslenkungen" $z(t)$.

In der Wellenforschung wird der Berechnung der den Schwingungsvorgängen innewohnenden Energie sowie anderer charakteristischer Grössen der root-mean-square-Wert ("rms") $\sqrt{\frac{\sum z_k^2}{N_k}}$ zugrunde gelegt. Dabei bedeuten z_k die Auslenkungen an den äquidistanten Stellen k und N_k die Anzahl der k -Stellen. Auf den rms-Wert werden wir mehrfach zurückkommen.

Betrachtet man eine Seegangsregistrierung (z.B. Abb.16), so stellt man fest, dass die Schwankungen sehr unregelmässig sind. Kleinere Wellen sind grösseren "aufgesetzt", und es treten Wellen auf, deren Täler oberhalb der Mittellinie liegen, während die Berge anderer unterhalb dieses Niveaus bleiben ("non-zero-crossing-Wellen", "Nicht-Nulldurchgangs-Wellen") (Abb.29). Unter "zero-crossing-Wellen" ("Null-Durchgangs-Wellen") versteht man - wie erwähnt - solche, bei denen die Registrierung die Mittellinie anschneidet. Als Zeitpunkt für die Wellenextreme wird der Eintritt des höchsten Wasserstandes zwischen einer zero-up-crossing-Stelle (Durchlaufen des Mittelnieaus in Aufwärtsrichtung) und der zugehörigen zero-down-crossing-Stelle (Durchlaufen der Mittellinie in Abwärtsrichtung) und der Eintritt des niedrigsten Wasserstandes zwischen zwei solchen Stellen in umgekehrter Reihenfolge angesehen.

Der Begriff des zero-crossing spielt bei der Definition bestimmter charakteristischer Wellenhöhen im Seegang eine Rolle.

Unter der "mittleren Wellenhöhe" \bar{H} versteht man die durchschnitt-

liche Höhe aller zero-crossing-Wellen, gemessen vom Berg zum Tal. Entsprechend ist die mittlere Periode \tilde{T} definiert. $\tilde{H}_{1/3}$ und $\tilde{H}_{1/10}$ sind die mittleren Höhen aller der Wellen, die dem die höchsten Wellen umfassenden Drittel bzw. Zehntel aller zero-crossing-Wellen angehören. $\tilde{H}_{1/3}$ wird die "kennzeichnende Wellenhöhe" ("Significant wave height") in einem Seegang genannt, weil man durch eine gute Augenbeobachtung einen in der Nähe von $\tilde{H}_{1/3}$ liegenden Wert erhält. Unter der "kennzeichnende Periode" $\tilde{T}_{1/3}$ haben wir folgende Grösse verstanden: Perioden-Mittelwert zu den Wellen, die für die Bestimmung des Wertes $\tilde{H}_{1/3}$ herangezogen worden waren.

Nach M.S. LONGUET-HIGGINS (Lit. 11) bestehen für den Fall, dass der Seegang ein "schmales" Spektrum besitzt, folgende Beziehungen zwischen den H-Grössen und dem root-mean-square-Wert:

$$\tilde{H} = 1,77 \sqrt{\frac{\sum z_k^2}{N_k}}$$

$$\tilde{H}_{1/3} = 2,83 \sqrt{\frac{\sum z_k^2}{N_k}}$$

$$\tilde{H}_{1/10} = 3,60 \sqrt{\frac{\sum z_k^2}{N_k}}$$

Bei der statistischen Behandlung von Wellenregistrierungen muss mit aller Deutlichkeit unterschieden werden zwischen Statistiken der den vollen Höhenunterschied vom Wellenberg zum Wellental umfassenden Schwankungen ("crest-trough" = "Berg - Tal") und solchen Aufstellungen, die sich mit den Auslenkungen vom Mittelniveau an den Extremwertstellen ("crest-mean" = "Berg - Mittellinie") befassen. Im letzteren Falle müssen die Maxima und Minima der Registrierung getrennt behandelt werden; die Ordinaten der Minima sind mit (-1) zu multiplizieren. Bei den genannten Verhältniszahlen nach M.S. LONGUET-HIGGINS (Lit. 11) handelte es sich um "Berg - Tal" - Schwankungen. Dagegen kommen wir im folgenden auf eine Arbeit zu sprechen, die sich mit "crest-mean"-Werten befasst.

Das Seegangsspektrum kann im gewöhnlichen Fall nicht als "schmal" bezeichnet werden. D.E. CARTWRIGHT und M.S. LONGUET-HIGGINS (Lit. 4) haben den Einfluss der Spektrumsbreite auf die statistische Verteilung der Maxima oder der mit (-1) multiplizierten Minima einer Zufalls-

funktion untersucht. Es wird dort eine Verteilung der relativen, auf die Klassenbreite 1 reduzierten Häufigkeiten, also die sog. "Wahrscheinlichkeitsverteilung", der Maxima benutzt. Die "Breite" des Spektrums wird durch einen Parameter \mathcal{E} beschrieben (Lit. 4). Es ergibt sich folgende Gleichung :

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{N_0^\uparrow}{N_M}\right)^2} \quad (4)$$

Hierbei bedeuten: N_0^\uparrow die Anzahl der zero-up-crossings pro Zeiteinheit der Registrierung und N_M die Anzahl der Maxima in der Zeiteinheit. An dem Verhältnis der beiden Grössen ändert sich nichts, wenn man für N_0^\uparrow die Gesamtzahl aller zero-crossing-Schwankungen der Registrierung und für N_M die Anzahl aller Schwankungen setzt.

Wenn \mathcal{E} den Wert 0 annimmt (schmales Spektrum, $N_0^\uparrow = N_M$), so ergibt sich nach der Theorie, dass die Extremwerte der Registrierung eine RALEIGH-Verteilung besitzen. Würden die Maxima im Seegang einer GAUSS-Verteilung unterliegen, so wäre $\mathcal{E} = 1$. Tatsächlich ist \mathcal{E} beim Seegang $\neq 1$. Dieser Befund zeigt an, dass die Maxima keine GAUSS-Verteilung besitzen.

Obwohl das Spektrum ziemlich breit ist, was einem verhältnismässig grossen, nahe 1 gelegenen Wert von \mathcal{E} entspricht, weichen die aus den Registrierungen berechneten statistischen Daten von den durch LONGUET-HIGGINS für das schmale Spektrum und "Berg-Tal"-Werte gegebenen Verhältniszahlen nur wenig ab. Wir erhielten beispielsweise für unsere Messung vom 17.2.1958 am Turm Mellum Plate bei Nordweststurm folgende Zahlen (links) verglichen mit den Werten von M.S. LONGUET-HIGGINS (rechts):

	beobachtet	LONGUET-HIGGINS
$\frac{\tilde{H}_{1/10}}{\tilde{H}}$	= 2,09	2,07
$\frac{\tilde{H}_{1/2}}{\tilde{H}}$	= 1,64	1,60

Ähnlich übereinstimmende Ergebnisse sind schon von anderen Autoren erzielt worden. Es ist daher naheliegend, zunächst anzunehmen, dass die von M.S. LONGUET-HIGGINS angegebenen Werte die tatsächlichen Verhältnisse im Seegang mit grosser Näherung wiedergeben.

Bei der Auswertung unserer Seegangsregistrierungen kam es darauf an, Vergleiche zwischen den Aufzeichnungen des Beschleunigungs-Messgerätes und einer objektiven Messung zu ziehen. In vieler Hinsicht ist die Gegenüberstellung von Häufigkeitsverteilungen einiger mit verschiedenen Messgeräten bestimmter Registriergrössen sehr instruktiv. Dargestellt wurde für die "crest-mean"-Werte die Häufigkeitsverteilung der Extremwerte, d.h. die Häufigkeit der Ordinatengrössen (Wasserstände) an allen Extremwertstellen der Registrierung (Maxima und Minima). In Betracht gezogen wurden also auch Wellenberge, deren Kamm unter dem mittleren Wasserstand lag, und entsprechend Wellentäler über Mittelniveau. Nicht dargestellt wurden die Zeitabstände (Perioden) zwischen den Extremwerten auf der Registrierung. - Bei den "Berg - Tal"-Werten wurden die Höhen- und auch die Zeitdifferenzen sowohl zwischen Berg und nachfolgendem Tal als auch zwischen diesem Tal und dem folgenden Wellenberg bestimmt. Berücksichtigt wurden nur zero-crossing-Wellen. Die Zeitabstände wurden als "Halbperioden" und nach Verdoppelung als "Perioden" angesehen. Für die Höhendifferenzen haben wir die Bezeichnung "Schwankungshöhen" und das Symbol "S" gebraucht. Verwendet wurden sowohl absolute als auch relative Häufigkeiten und deren Verteilungen. Auf Säulendarstellungen haben wir verzichtet, da sich Linienzüge besser vergleichen lassen. Bei "zweidimensionalen" Verteilungen wurden sowohl für die Wellenhöhe (Ordinate) als auch für die Periode (Abszisse) Klassen gebildet. Die Breite jeder einzelnen Klasse betrug bei der Höhe 5 bzw. 20 cm, bei der Periode 0.5 sec. In die entstehenden "Fächer" setzten wir die ihnen zukommenden Häufigkeiten ein. Wegen der Grösse der statistischen Schwankung dieser Häufigkeiten (Zahl der Fälle gering) war es erforderlich, eine bestimmte, später genauer beschriebene Ausgleichung der Werte vorzunehmen. Erst dann konnten Isolinien der Häufigkeit gezeichnet werden (vgl. Abb. 30).

Will man die Grössen \tilde{H} , $\tilde{H}_{1/3}$ und $\tilde{H}_{1/10}$ exakt bestimmen, so müssen alle "Berg-Tal"-Höhen gezählt und der Grösse nach geordnet werden. Da dieses Verfahren sehr zeitraubend ist, wurde eine andere Methode angewendet. Die absolute Häufigkeitsverteilung der Höhen wurde in eine verhältnismässig grosse Anzahl von Klassen (Unterkollektive) der Abszissen (Wellenhöhen) eingeteilt. In jede Klasse fällt stets eine andere Zahl von Höhen. Diese Zahl multipliziert man mit dem Mittelwert zwischen den Grenzen einer Klasse. Zur Bestimmung von $\tilde{H}_{1/3}$ führt man das für alle die Werte durch, die das Drittel der höchsten Wellen bilden. Die

Summe der erhaltenen Produkte teilt man durch $\frac{N_h}{3}$ (N_h = Gesamtzahl der Höhen) und erhält eine Approximation zu $\tilde{H}_{1/3}$. Entsprechend wurde bei der Ermittlung von $\tilde{H}_{1/10}$ und \tilde{H} verfahren.

Eine Reduktion der Verteilungen relativer Häufigkeiten ist erforderlich, weil unterschiedliche Klassenbreiten die Verteilung der Häufigkeit beeinflussen. Vergleiche sind nur bei reduzierten Häufigkeitsverteilungen möglich. Im übrigen ist für die Wahl der Klassenbreite das Verhältnis der Zahl der Klassen zur Gesamtzahl der Werte massgebend.

Als charakteristische Kurven bezeichnet LONGUET-HIGGINS (Lit.11) die Darstellung eines Faktors $c_{\%}$, der durch die Beziehung $\tilde{H}_{\%} = c_{\%} \cdot \tilde{H}$ gegeben ist, gegen die Indices von $\tilde{H}_{\%}$. Die Grösse $\tilde{H}_{\%}$ wird folgendermassen bestimmt: Alle in der Registrierung vorhandenen Wellenhöhen werden der Grösse nach geordnet. Diese Aufstellung wird in 10 gleich grosse Abschnitte eingeteilt. Z.B. ist die an der unteren Grenze des Abschnittes, der die 10% höchsten Wellen umfasst, liegende Wellenhöhe $\tilde{H}_{10\%}$. Als $\tilde{H}_{\%}$ (allgemein) ist also die Wellenhöhe definiert, die an der unteren Grenze eines die % höchsten Wellen umfassenden Abschnitte liegt.

Zwecks Vergleich mit den Ergebnissen von LONGUET-HIGGINS wurden für einige der am Turm Mellum Plate gewonnenen Registrierungen die charakteristischen Kurven berechnet und gezeichnet. Da die statistischen Angaben von LONGUET-HIGGINS nach den Feststellungen verschiedener Autoren den tatsächlichen Verhältnissen im Seegang weitgehend entsprechen, können die charakteristischen Kurven in gewisser Weise als kennzeichnend für die Qualität der Messung angesehen werden bzw. dafür, ob noch Reduktionen oder Umrechnungen erforderlich sind.

3. Ermittlung des Energiespektrums

a. Einführung

Seit einer Reihe von Jahren sind die Seegangsforscher bemüht, festzustellen, wie die Energie auf die sinusförmig zu denkenden Wellen-Komponenten im Seegang verteilt ist; man sucht zu ergründen, welche "spektrale" Energie jeder dieser Komponenten zukommt. Die Kenntnis des Energiespektrums in verschiedenartigem Seegang ist von grosser praktischer Bedeutung z.B. bei der Dünungsvorhersage und für die Berechnung der Umwandlungerscheinungen, die beim Auflaufen des Seegangs auf flacheres Wasser vor sich gehen.

Ein wesentliches Ziel der am Turm Mellum Plate durchgeführten Messungen war es, festzustellen, ob man mit dem Beschleunigungsgerät die gleiche Aufzeichnung des Energiespektrums für den Seegang erhalten kann, wie es sich bei einer direkten Messweise, z.B. durch Filmen gegen eine freihängende Messlatte ergibt, oder ob diese Spektren durch einfache Rechnung ineinander überführbar sind. Selbstverständlich ist eine doppelte Integration des Beschleunigungsschriebes erforderlich.

Da zwischen der Wellenhöhe H und der Wellenenergie E für Sinuswellen die einfache Beziehung

$$E = \frac{1}{8} \cdot g \cdot \rho \cdot H^2$$

besteht, die Energie also dem Quadrat der Wellenhöhe proportional ist, lässt sich leicht eine Beziehung zwischen der Amplitudenfunktion $A(f)$ und dem Energiegehalt des Seegangs angeben (g = Schwerebeschleunigung, ρ = Dichte des Seewassers). Bezeichnet man mit E^* das Gebiet (in cm^2) unter dem "Spektrum" und mit A die Amplitude der einfachen harmonischen Welle, so gilt (vgl. W.J. PIERSON, JR., Lit.15 und S.O. RICE, Lit.19):

$$\int_0^{\infty} [A(f)]^2 df = E^* \quad (5)$$

E^* steht mit der totalen Wellenenergie E des Seegangs in folgender Beziehung (vgl. G. NEUMANN, Lit. 13):

$$E^* = \frac{2E}{g\rho} \quad (6)$$

Die Grösse E^* wird von uns im folgenden mit "Intensität" oder "Gesamtintensität" bezeichnet werden. Sie ist nach Gl.(6) der Wellenenergie E proportional.

Die mit verschiedenen Messmethoden ermittelten Spektren müssen also miteinander verglichen werden.

Gegeben ist uns zunächst eine Registrierung, welche den Stand der Wasseroberfläche an einem festen Ort in Abhängigkeit von der Zeit wiedergibt. Kennt man das mittlere Niveau der Wasseroberfläche während der Registrierzeit bzw. die "Mittellinie" der Registrierung, so ergeben sich an jedem Zeitpunkt Abweichungen von diesem Niveau bzw. "Auslenkungen" z . Von diesen Auslenkungen müssen wir ausgehen, um die Energie zu bestimmen.

Nach den gegenwärtig erreichten Erkenntnissen (Lit.16) wird der Seegang an einem festen Punkt der Meeresoberfläche in Abhängigkeit von

der Zeit t beschrieben durch die Gleichung

$$z(t) = \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \sqrt{E_f(f_i) \Delta f} \quad (7)$$

Hier bedeuten:

z : die "Auslenkung" vom Mittelniveau der Registrierung

f : die Frequenz der im Seegang vorhandenen Sinuswellen;

$f = \frac{1}{T}$ (T = Sinusperiode)

φ : Phase, die eine Zufallsvariable darstellt.

E_f : "f-spektrale Energiedichte" des Seegangs, d.h. die auf die Frequenz f bezogene Energiedichte; es ist üblich, $E_f(f)$ als "Energiespektrum" zu bezeichnen. Genau genommen handelt es sich um die "Intensitätsdichte" E_f^* . Es ist jedoch üblich, E_f und "Energiedichte" zu schreiben.

i : dient der Bezeichnung und Zählung der Einzelfrequenzen im Bereich $i = 1$ bis N .

Aus Gründen der einfacheren Schreibweise sei der Ausdruck $\sqrt{E_f(f_i) \Delta f} = \alpha_i$ gesetzt. Gl.(7) nimmt dann die Form an:

$$z(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (7a)$$

Man denkt sich den Seegang also zusammengesetzt aus Sinuswellen verschiedener Periode, Phase und Höhe; letztere ist proportional zu $\sqrt{E_f \Delta f}$.

Vollzieht man in Gl.(7) den Grenzübergang, so erhält man für N und $\Delta f \rightarrow 0$ den integralartigen Ausdruck

$$z(t) = \int_0^{\infty} \cos(2\pi f t + \varphi) \sqrt{E_f(f) df} \quad (8)$$

Erläuterungen zur Berechtigung des Grenzübergangs und zu obiger Schreibweise findet man bei J.W.TUKEY und R.W.HAMMING (Lit.26), W.J.PIERSON, JR. (Lit. 16) und H.BARTSCH (Lit. 1 und 2).

Bezüglich der Zufallsvariablen φ kann angenommen werden, dass sie stets innerhalb des Intervalls 0 bis 2π bleibt. Sie besitzt eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung, die so beschaffen sein soll, dass in dem genannten Intervall kein Phasenwert vor dem anderen bevorzugt ist; das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeitsdichte hier konstant sein soll. (Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist so definiert, dass das Gesamt-Integral über dieser Grösse = 1 gesetzt wird; sie selbst ist also = $\frac{1}{2\pi}$.) Bezüglich φ muss ausserdem gefordert werden, dass alle

Phasen φ im statistischen Sinne unabhängig voneinander sein sollen.

Die Analyse, also die Ermittlung des Wellenspektrums aus der gegebenen Registrierung, kann entweder mittels Autokorrelation oder unter Anwendung der Theorie der Fourier-Reihen durchgeführt werden. Bei der Auswertung sind von uns beide Wege versucht worden.

Beide Verfahren werden im folgenden beschrieben.

Im Falle der Beschleunigungs-Registrierungen stellt die notwendige zweifache Integration noch ein besonderes Problem dar; es wird im Anschluss an die beiden Analysenverfahren besprochen werden.

b. Die Analyse von Registrierungen mittels Autokorrelation

Die theoretischen Grundlagen für die Autokorrelationsanalyse von Registrierungen sind in den Jahren 1944 bis 1952 von S.O.RICE (Lit.18), J.W.TUKEY (Lit.25), J.W.TUKEY und R.W.HAMMING (Lit.26) sowie von W.J.PIERSON JR. (Lit. 16) erstellt bzw. behandelt worden.

Vor einer Wiedergabe bzw. Erläuterung der mathematischen Grundlagen wollen wir die Funktionsweise der Autokorrelation zunächst in einer möglichst anschaulichen Weise zur Darstellung bringen; sie wird das Verständnis der daran anschliessenden mathematischen Betrachtungen erleichtern.

Mit der Analyse soll ein endliches Stück einer unendlich lang gedachten Registrierung untersucht werden. Aus praktischen Gründen werden die Auslenkungen $z(t)$ vom mittleren Niveau der Gesamt-Registrierung betrachtet. Entlang der Zeitachse seien n Messwerte $z(t_j)$ an äquidistanten Stellen t_j im Abstände Δt gegeben (Abb.31a). Man nennt dieses Kollektiv eine "time series", deutsch: "Ordinatenfolge".

Entsprechend dem Vorgehen bei der gewöhnlichen Autokorrelation multiplizieren wir zunächst die zu einem bestimmten Zeitpunkt t_j registrierte Auslenkung $z(t_j)$ mit der Auslenkung $z(t_j + \tau)$, die man zum Zeitpunkt $(t_j + \tau)$ findet. τ bedeutet eine feste positive Zeitspanne. Diese Operation führen wir für das festgewählte τ für alle Stellen t_j auf der Zeitachse durch. Ob die einzelnen Produkte gross oder klein bzw. positiv oder negativ ausfallen, hängt davon ab, in welchem Verhältnis die Grösse τ zu den vorherrschenden Perioden der Registrierung steht. Nehmen wir an, es habe sich um einen Seegang gehandelt, in dem die harmonischen Anteile mit Perioden um den Wert T_m herum besonders stark

ausgeprägt waren. Wenn $\tau = T_m$ gewählt wurde, so werden die Produkte gewöhnlich stark positiv, bei $\tau = \frac{1}{2} T_m$ im allgemeinen stark negativ ausfallen. Für das gewählte τ bilden wir nun den Mittelwert aller erhaltenen Produkte. Er hat die Form $\overline{z(t_j) \cdot z(t_j + \tau)}$, wobei der Querstrich das arithmetische Mittel kennzeichnet.

Alsdann wird τ variiert; die beschriebenen Rechnungen werden z.B. für 50 verschiedene Werte von τ durchgeführt. Man erhält für jedes τ einen Mittelwert der oben angegebenen Form. Für bestimmte τ , nämlich solche $\approx T_m$, werden die Produkte und ihre Mittelwerte stark positiv sein. Liegt τ nahe $\frac{T_m}{2}$, so ist der Mittelwert der Produkte negativ. Am grössten - und zwar mit positivem Vorzeichen - ist $Q(\tau)$ für $\tau = 0$; denn dann erhält man statt der Produkte einfach die Quadrate der Ordinaten der Registrierung an den gewählten Stellen t_j .

Das Doppelte der oben angegebenen Produkt-Mittelwerte $\overline{z(t_j) \cdot z(t_j + \tau)}$ bezeichnet man als "Autokorrelationsfunktion": $Q(\tau) = 2 \overline{z(t_j) \cdot z(t_j + \tau)}$ (Abb.31b). $Q(\tau)$ gibt in gewisser Weise die Sinuswellen, die in der Seegangsregistrierung überlagernd vorhanden sind, wieder; nur erscheinen die Amplituden der einzelnen Anteile in der Dimension $[cm^2]$. Ausserdem überlagern sie sich an der Stelle Null sämtlich phasengleich, was zur Folge hat, dass die Ordinatenwerte der Autokorrelationsfunktion in Nullpunktnähe sehr gross sind. Mit zunehmendem τ laufen die Wellenanteile der verschiedenen Perioden auseinander und überlagern sich so, dass die "Ausschläge" von $Q(\tau)$ kleiner werden.

Es ist nun erforderlich, die harmonischen Anteile in $Q(\tau)$ zu ermitteln. Zu diesem Zwecke führt man eine Art "Test" durch, indem man die Autokorrelationsfunktion $Q(\tau)$ an allen möglichen Stellen mit der Funktion $\cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)$ zunächst multipliziert, wobei die Periode T festgehalten wird. Die Produkte haben die Form $Q(\tau) \cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)$. Man bildet alsdann ihren Mittelwert $\overline{Q(\tau) \cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)}$. Diese Operation führt man für verschiedene Perioden T aus. Man erhält also eine Anzahl von Mittelwerten, die nun auf einer T -Skala aufgetragen werden können; sie ergeben eine bestimmte Verteilung. Da im weiteren wieder in Frequenzen f gedacht werden soll, haben wir sie in Abb.31 c als Funktion von f dargestellt.

Bei der in Abb.31b wiedergegebenen Testfunktion $\cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)$ ist $T = T_m$, d.h.: T entspricht der in der Registrierung besonders markant in Erscheinung tretenden Wellenperiode. In diesem Fall werden die mit der

Autokorrelationsfunktion gebildeten Produkte und entsprechend auch ihr Mittelwert stark positiv sein. Je mehr sich T von T_m unterscheidet, umso kleiner werden die Mittelwerte. Dieser Befund ist in Abb.31c dargestellt. Wir erhalten auf diese Weise also eine Verteilung $U(f)$, die man als Spektrum und im vorliegenden Fall speziell als "Intensitätsspektrum" bezeichnen kann.

Das "Testen" entspricht in gewisser Weise der Einführung und Anwendung eines "Filters". Die Wirkungsweise des Filters wird in den kommenden Abschnitten eingehend erörtert.

In der nun folgenden Besprechung der wichtigsten mathematischen Grundlagen für die Autokorrelationsanalyse haben wir uns in wesentlichen Teilen an J.W.TUKEY und R.W.HAMMING (Lit. 26) gehalten. Auf die Wiedergabe einiger einführender Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen wurde verzichtet.

Von der (endlichen) Registrierung sei - wie schon anfangs erwähnt - eine Ordinaten-Folge mit n Messwerten $z(t_j)$ an äquidistanten Stellen t_j im gegenseitigen Abstände Δt gegeben. Die $z(t)$ sind Auslenkungen von der Mittellinie.

Multipliziert man je zwei Messwerte $z(t)$, die einen zeitlichen Abstand $p \cdot \Delta t$ (p ganzzahlig) voneinander haben, so erhält man nach Multiplikation mit 2 eine Grösse, die Q_{ptj} genannt sein möge:

$$Q_{ptj} = 2z(t_j) z(t_j - p \Delta t) \quad (9)$$

Aus Gleichung (7) erhält man nun an den Stellen t_j :

$$z(t_j) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t_j + \varphi_i) ; \quad (10)$$

an den Stellen $(t_j - p \Delta t)$ ergibt sich

$$z(t_j - p \Delta t) = \sum_{i'=1}^N a_{i'} \cos[2\pi f_{i'} (t_j - p \Delta t) + \varphi_{i'}] , \quad (10a)$$

wenn man aus formalen Gründen hier die Indizes i' statt i benutzt.

Die Gl.9 nimmt jetzt folgende Form an :

$$2z(t_j) z(t_j - p \Delta t) = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N a_i a_{i'} \cos(2\pi f_i t_j + \varphi_i) \cos[2\pi f_{i'} (t_j - p \Delta t) + \varphi_{i'}] . \quad (11)$$

Jeder Mittelwert dieser Produkte ist zugleich eine Approximation an den im folgenden mit \mathcal{E} bezeichneten statistischen Erwartungswert. Im vorliegenden Falle ist der Mittelwert des durch Gl.(11) gegebenen Produkts auszurechnen. Ohne Mittel- bzw. Erwartungswert kommen wir im Fortgang der Betrachtungen nicht aus, weil die Phasen φ_i und $\varphi_{i'}$ als Zufallsvariable von Fall zu Fall verschieden gross sind. Sie sind nicht nur für jede verschiedene Frequenz $f_i = f_1$ bis f_N von unterschiedlicher Grösse, sondern nehmen unabhängig davon ausserdem für jede vorgegebene Frequenz f_i (im Bereich f_1 bis f_N) bei verschiedenen Registrierungen innerhalb eines statistisch gleichen Sëegangs verschiedene Werte an. Die zuletzt getroffene Aussage gibt das eigentliche Charakteristikum einer Zufallsvariablen wieder.

Für spätere Überlegungen benötigen wir die Feststellung, dass der Mittelwert der Funktion einer Zufallsvariablen gleich ist dem Integral über das Produkt dieser Funktion mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallsvariablen, von der sie abhängt (vgl.z.B. H.CRAMER Lit.6). Dabei ist das Integral über dem ganzen Bereich der Zufallsvariablen zu bilden.

Für unsere weiteren Betrachtungen ist von Bedeutung, dass man den gleichen Wert erhält, gleichgültig, ob man den Mittelwert aus der Gesamtsumme bildet oder ob man für jeden Summanden die Mittelbildung einzeln durchführt und die Ergebnisse anschliessend aufsummiert.

Unter diesen Voraussetzungen kann der Erwartungswert für das doppelte Produkt der Auslenkungen an den Stellen t_j und $(t_j - p\Delta t)$ (Gl.11) folgendermassen geschrieben werden (vgl. J.W.TUKEY und R.W.HAMMING, Lit.26):

$$\mathcal{E}[z(t_j)z(t_j - p\Delta t)] = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N a_i a_{i'} \mathcal{E} \{ \cos(2\pi f_i t_j + \varphi_i) \cos[2\pi f_i (t_j - p\Delta t) + \varphi_{i'}] \} \quad (12)$$

Es bestehen die beiden Möglichkeiten : $i \neq i'$ oder $i = i'$. Setzt man zunächst $i \neq i'$, ist also der Erwartungswert \mathcal{E} von φ_i und von $\varphi_{i'}$ abhängig, so findet man, dass der Ausdruck in der geschweiften Klammer bei der Integration verschwindet, weil die Phasen voneinander unabhängig sind (vgl. TUKEY und HAMMING, Lit.26).

Von Null verschieden sind nur jene Anteile in Gl.(12) für die $i = i'$ ist. Die rechte Seite von Gl.12 nimmt dann folgende Form an :

$$= 2 \sum_{i=1}^N a_i^2 \mathcal{E} \{ \cos(2\pi f_i t_j + \varphi_i) \cos[2\pi f_i (t_j - p\Delta t) + \varphi_i] \} \quad (12a)$$

Nach obigen Angaben hat die Wahrscheinlichkeitsdichte pro Einheit im Intervall 0 bis 2π die Grösse $\frac{1}{2\pi}$. Unter Berücksichtigung dieses Sachbestandes ist die Gleichung (12a) in Integralform folgendermassen zu schreiben :

$$\Psi[2z(t_j)z(t_j - p\Delta t)] = 2 \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \cos(2\pi f_i t_j + \varphi_i) \cos[2\pi f_i (t_j - p\Delta t) + \varphi_i] \right\} d\varphi_i \quad (13)$$

Nach Umformung des Ausdrucks in der geschweiften Klammer gemäss dem Additionstheorem $\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$ ergibt sich :

$$\Psi[2z(t_j)z(t_j - p\Delta t)] = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \cos(4\pi f_i t_j - 2\pi f_i p\Delta t + 2\varphi_i) + \cos(2\pi f_i p\Delta t) \right\} d\varphi_i \quad (13a)$$

Da über die ganze Periode (0 bis 2π) integriert wird, verschwindet das Integral des ersten cos-Ausdrucks; dagegen ist $\cos(2\pi f_i p\Delta t)$ konstant. Man erhält :

$$\Psi[2z(t_j)z(t_j - p\Delta t)] = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 \cos(2\pi f_i p\Delta t) \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi_i}{2\pi} \quad (13b)$$

Da $\int_0^{2\pi} \frac{d\varphi_i}{2\pi} = 1$ ist, ergibt sich nach Einsetzen von $\sqrt{E_f(f_i)} \Delta f$ für α_i der Erwartungswert der Grösse Q_{ptj} (vgl. Gl.9) zu :

$$\Psi(Q_{ptj}) = \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f_i p\Delta t) E_f(f_i) \Delta f \quad (14)$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite ist die Näherungssumme für ein normales Riemannsches Integral.

Führt man nunmehr den Grenzübergang hinsichtlich der Frequenzen durch, lässt man also $i \rightarrow \infty$ und $\Delta f \rightarrow 0$ gehen, so erhält man :

$$\Psi(Q_{ptj}) = \int_{f=0}^{\infty} \cos(2\pi f p\Delta t) E_f(f) df \quad (15)$$

Der aus einer Anzahl verschiedener Registrierungen im gleichen See-gang gewonnene Erwartungswert ist somit von dem gewählten Zeitpunkt t_j unabhängig. Bildet man also aus ein und derselben Registrierung die Werte Q_{ptj} zu verschiedenen Zeitpunkten t_j , so ergibt sich, dass der Erwartungswert um den gleichen Wert schwankt.

Den Wert Q_{ptj} kann man aus n Messwerten zu $(n - p)$ verschiedenen Zeitpunkten t_j bilden. Den Mittelwert dieser Werte nennen wir Q_p und erhalten :

$$Q_p = \frac{1}{n-p} \sum_{j=1}^{n-p} Q_{ptj} ; \quad (16)$$

als Erwartungswert dieses Mittelwertes findet man :

$$\Psi(Q_p) = \Psi\left(\frac{1}{n-p} \sum_{j=1}^{n-p} Q_{pt_j}\right) = \frac{1}{n-p} \sum_{j=1}^{n-p} \Psi(Q_{pt_j}) \quad (17)$$

Da die Einzelausdrücke unter dem \sum -Zeichen sämtlich gleich gross sind, kann man schreiben :

$$\Psi(Q_p) = \frac{1}{n-p} \sum_{j=1}^{n-p} \Psi(Q_{pt_j}) = \Psi(Q_{pt_j}) \quad (17a)$$

Der Wert Q_p schwankt also um dasselbe Mittel wie Q_{pt_j} . Man wird aber annehmen dürfen, dass die Schwankung um diesen Mittelwert erheblich geringer ist als bei Q_{pt_j} . Man erhält sogar eine Approximation an den gleichen Erwartungswert, wenn man entweder die Produkte für ein bestimmtes t_j aus vielen Registrierungen des gleichen Seegangs oder für verschiedene t_j ein und derselben Registrierung zur Mittelbildung heranzieht. Das ist die Aussage des sog. Ergodic-Theorems (Lit.8).

Gemäss Gl.(15) und(17a) wird

$$\Psi(Q_p) = \int_{f=0}^{\infty} \cos(2\pi f p \Delta t) E_f(f) df \quad , \quad (18)$$

wobei p von 0 bis m laufen möge.

Gl.(18) stellt die exakte Autokorrelationsfunktion für den Seegang dar. Man würde sie erhalten, wenn man eine grosse Anzahl von Registrierungen im gleichartigen Seegang der Auswertung zugänglich machen könnte. Uns steht für die Autokorrelationsanalyse nur eine Registrierung zur Verfügung, aus der man - wie eben festgestellt - die gleiche Approximation erhält. Für unsere Zwecke besteht praktisch kein Unterschied zwischen $\Psi(Q_p)$ und Q_p .

Es soll nun versucht werden, durch Bildung von Linearkombinationen zu Ausdrücken zu kommen, die Aussagen über das Spektrum an einer bestimmten Stelle f_h machen. "Linearkombinationen" stellen die Summenausdrücke für Produkte dar, die man bei aufeinanderfolgender Multiplikation der Einzelglieder zweier Zahlenreihen erhält.

Im vorliegenden Falle multipliziert man alle Grössen $\Psi(Q_p)$ für alle verschiedenen p = 0 bis m mit einem Ausdruck u_{hp} . Aus den u_{hp} -Werten erhält man, wie wir noch sehen werden, die Filterfunktion, die notwendig ist, um das Energiespektrum an einer bestimmten Stelle zu beschreiben. Der Index h dient der Kennzeichnung der Stellen der Frequenzachse, die für die Berechnung des Spektrums herangezogen werden. h läuft

im Bereich 0 bis m.

Bildet man von den einzelnen Produkten der u_{hp} -Werte mit den Grössen $\Psi(Q_p)$ die Summe, so erhält man :

$$U_h = \sum_{p=0}^m u_{hp} \Psi(Q_p) \quad (19)$$

Die u_{hp} stellen reine Zahlen dar, während die Grösse U_h die gleiche Dimension wie $\Psi(Q_p)$, nämlich $[cm^2]$ besitzt.

Es muss versucht werden, den u_{hp} solche Werte zu geben, dass U_h eine geeignete Aussage über das Spektrum macht; d.h., dass das Filter passend gewählt werden muss. Auf diese Frage werden wir später zurückkommen.

Zweck dieser Überlegungen ist es, auszurechnen, welche Beziehungen zwischen U_h und dem Spektrum $E_f(f)$ bestehen. Ausserdem muss eine Betrachtung darüber angestellt werden, in welcher Weise die Energie der sehr kleinen Perioden ($< 2\Delta t$) berücksichtigt wird, die von den äquidistanten Auswahlwerten auf der Registrierung nicht mit erfasst werden, weil Δt nicht ∞ klein wird, sondern eine endliche Länge besitzt.

Durch Einsetzen von $\Psi(Q_p)$ aus Gl.(18) in Gl.(19) erhält man :

$$U_h = \sum_{p=0}^m u_{hp} \int_{f=0}^{\infty} \cos(2\pi f p \Delta t) E_f(f) df \quad (20)$$

Setzt man nach Vorziehen des Integrals

$$\sum_{p=0}^m u_{hp} \cos(2\pi f p \Delta t) = u_h(f) , \quad (21)$$

so kann man für die Beziehung zwischen U_h und dem Spektrum schreiben :

$$U_h = \int_{f=0}^{\infty} u_h(f) E_f(f) df \quad (22)$$

Zu der Bezeichnungsweise ist zu bemerken: Wenn der Grösse u zwei Indices, nämlich h und p , beigegeben sind, so bedeutet dies, dass es sich um bestimmte Werte handelt, die für konkrete Berechnungen benutzt werden sollen. Ist u nur mit einem Index versehen, so zeigt das an, dass diese Grösse nur bei theoretischen Überlegungen eine Rolle spielt.

u_h kommt hier die Bedeutung eines "Filters" zu, das aus einem Gesamtspektrum ein bestimmtes schmales Band heraus-"filtert". Die Filterfunktion besitzt besondere Eigenschaften, die zu einem wesentlichen Teil durch den cos-Ausdruck bestimmt werden.

Abb.32 zeigt die Wirkungsweise eines rechteckigen Filters der "Breite" Δf , das in der Ordinate den Wert $u_h(f) = 1$ besitzt (unterer Teil der Abb.). Multipliziert man das zugehörige Stück des Spektrums mit diesem Filter, so erhält man eine Fläche, die oben durch die vollausgezogene (nicht gestrichelt gezeichnete) Linie begrenzt ist. Sie entspricht dem in Abb.32 schraffierten Rechteck. Teilt man durch Δf , so ergibt sich der Mittelwert für $E_f(f)$ in diesem Bereich von f . Man wird daher stets versuchen, den Filtern rechteckige Gestalt zu geben.

Durch unser Filter wird nicht nur ein einziger "Energieblock" im Spektrum erfasst. Der \cos -Term in Gl.(21) bewirkt vielmehr, dass das "Filterrechteck" jedesmal an der Stelle auftritt, an der der Ausdruck $\cos(2\pi f p \Delta t)$ eine bestimmte Grösse annimmt. Je zwei dieser Filterrechtecke liegen symmetrisch auf beiden Seiten der Abszissenstellen $\frac{1}{2\Delta t}, \frac{3}{2\Delta t}, \frac{5}{2\Delta t}$ usw. Abb.33 zeigt ausser dem Spektrum diese Situation. Die Senkrechte durch $\frac{1}{2\Delta t}$ ist die Spiegelungsachse für die ersten beiden Filterrechtecke; die nächste Stelle dieser Art ist $\frac{2}{2\Delta t} - \frac{1}{\Delta t}$ auf der Abszisse entfernt und liegt bei $\frac{3}{2\Delta t}$. Diese Gegebenheiten lassen sich auch mathematisch zeigen, indem man in Gl.(21) die Grösse f einmal durch $(\frac{r}{\Delta t} - f)$ und dann durch $(\frac{r}{\Delta t} + f)$ ersetzt, wobei r eine beliebige ganze Zahl bedeuten soll. Da p gleichfalls ganzzahlig ist, erhält man bei beiden Ansätzen das gleiche Ergebnis; die Funktion besitzt also Symmetrien.

Auf Grund dieser Ergebnisse wird nun ein "reduziertes Spektrum" $E_{fr}(f)$ definiert, das den Bereich 0 bis $\frac{1}{2\Delta t}$ umfasst und das in bestimmter Weise die Energie der Perioden $< 2\Delta t$ berücksichtigt: Man ist gezwungen ein "reduziertes Spektrum" zu benutzen; denn man erhält wegen der endlichen Maschenbreite keine Aussage über eine bestimmte Stelle des unreduzierten Spektrums.

Unter diesen Bedingungen kann (vgl. auch Gl.(22))

$$U_h = \int_{f=0}^{\infty} u_h(f) E_f(f) df = \int_{f=0}^{\frac{1}{2\Delta t}} u_h(f) E_{fr}(f) df \quad (23)$$

gesetzt werden. Das "reduzierte Spektrum" enthält zwischen 0 und $\frac{1}{2\Delta t}$ die gleiche "Intensität" wie das gesamte Spektrum von $f = 0$ bis $f = \infty$; denn bei der Integration wird die "Intensität" an allen Filterstellen erfasst. Jedem Filterrechteck, das innerhalb des Bereichs des reduzierten Spektrums liegt, werden die ihm "korrespondierenden"

∞ vielen Stellen zugeschlagen. Auf diese Weise erhält man für das reduzierte Spektrum eine exakte Aussage; sie wird dadurch erreicht, dass man die Rechnung auf einen Teil der ursprünglichen Spektralbreite zusammendrückt. Dieser Bereich ist allerdings der wesentliche Teil des Gesamtspektrums.

Bei der Besprechung der Wirkungsweise eines Filters an Hand Abb.32 war oben bereits erwähnt worden, dass der einer Stelle der Abszissenachse zukommende Energiewert ("Intensität") durch einen bestimmten Durchschnittswert approximiert wird. Bezeichnet man die frequenzspektrale Energiedichte, die hier für die Stelle h im reduzierten Spektrum gelten soll, mit $\overline{E}_{fr}(f_h)$ so kann man folgendermassen definieren :

$$\overline{E}_{fr}(f_h) = \frac{\int_0^{\frac{1}{2\Delta t}} u_h(f) E_{fr}(f) df}{\int_0^{\frac{1}{2\Delta t}} u_h(f) df} \quad (24)$$

Nach Gl.(23) ist der Zähler = U_h . Die Filterfunktion kann wie in Abb.32 die Gestalt eines Rechtecks mit der Filterbreite Δf besitzen, nämlich wenn sie ausserhalb der Filterbreite den Wert Null annimmt und wenn U_h auf der ganzen Breite von konstanter Grösse ist. In diesem Falle entspricht der Quotient in Gl.(24) exakt dem arithmetischen Mittelwert. Bei Abweichungen des Filters von der Rechteckgestalt weicht auch $\overline{E}_{fr}(f_h)$ vom arithmetischen Mittel ab.

Da es nicht möglich ist mit u_{hp} -Werten einen analytischen Formel-ausdruck für ein rechteckig geformtes Filter zu erstellen, haben wir es bei den praktischen Rechnungen nicht mit rechteckigen Filtern, sondern solchen zu tun, deren Gestalt einem Rechteck möglichst weitgehend angenähert ist. Abb.34 zeigt die von J.W.TUKEY and R.W.HAMMING (Lit.26) berechnete und schliesslich empfohlene Filterform ("Filterfunktion" u_h^*) als Nachzeichnung des Originals. Von entscheidender Bedeutung ist, dass die beiden "Ränder" des Filters sehr steil abfallen. Die von TUKEY und

*) Abb.34 zeigt die Filterfunktion u_h für $h = 0$. Für $h \neq 0$ ergibt sich das Filter durch Überlagerung zweier solcher Funktionen, bei deren einer das Hauptmaximum an die Stelle $f = h/(2m\Delta t)$ verschoben ist, bei der anderen an die Stelle $f = -h/(2m\Delta t)$. Auf diese Weise ergibt sich ein formell verhältnismässig einfacher Ausdruck. In dem benutzten Bereich von $f = 0$ bis $f = 1/(2\Delta t)$ ist der Verlauf der Filterfunktion praktisch der gleiche wie in Abb.34 mit dem Unterschied, dass das Hauptmaximum an die Stelle $f = h/(2m\Delta t)$ verschoben ist.

HAMMING ausgewählten u_{hp} -Werte sind von folgender Form:

$$u_{hp} = \gamma_p \left(0,23 \cos \frac{p(h-1)\pi}{m} + 0,54 \cos \frac{ph\pi}{m} + 0,23 \cos \frac{p(h+1)\pi}{m} \right) \quad (25)$$

Dabei ist γ_p ein Faktor, der an allen Stellen p konstant ist mit Ausnahme der Randstellen des Filters :

$$\gamma_p = \begin{cases} \frac{1}{m} & \text{für } p=0 \text{ und } p=m \\ \frac{2}{m} & \text{für alle übrigen Werte von } p \end{cases} \quad (26)$$

Eine Begründung für die Einführung der Grösse γ_p findet man bei TUKEY und HAMMING (Lit.26).

Die Festsetzung der u_{hp} -Werte durch Gl.(25) ist nicht frei von Willkür. Es kam dabei darauf an, ein Filter zu finden, das der Rechteckgestalt möglichst nahe kommt. Ein solches Filter stellt eine Grösse dar, die bei der Linearkombination mit $\mathcal{L}(Q_p)$ (Gl.(19)) eine geeignete Aussage über das Spektrum geben kann.

Die Filterfunktion u_h von TUKEY und HAMMING (Abb.34) ist symmetrisch zu einer Spiegelungsachse, die senkrecht durch den Punkt S verläuft. Dem Schnittpunkt dieser Achse mit der Abszisse müssen die bei dieser Filterlage durch Rechnung erhaltenen Werte zugeordnet werden. Es ist die Stelle

$$f_h = \frac{h}{2m \Delta t} \quad (27)$$

Es gilt nun, Zähler und Nenner der Gl.(24) auszurechnen. Der Zähler ist nach Gl.(23) $= U_h$. Der Nenner hat unabhängig von h stets den gleichen Wert. Nach TUKEY und HAMMING ergibt sich :

$$\int_{f=0}^{\frac{1}{2\Delta t}} u_h(f) df = \frac{1}{2m \Delta t} \quad (28)$$

Setzt man in Gl.(24) ein, so erhält man :

$$\overline{E}_{fr}(f_h) = U_h 2m \Delta t \quad (29)$$

wobei U_h durch Einsetzen von u_{hp} der Gl.(25) in Gl.(19) folgende Gestalt besitzt :

$$U_h = \sum_{p=0}^m \gamma_p \left[0,23 \cos \frac{p(h-1)\pi}{m} + 0,54 \cos \frac{ph\pi}{m} + 0,23 \cos \frac{p(h+1)\pi}{m} \right] \mathcal{L}(Q_p) \quad (30)$$

Die Autokorrelationsrechnungen wurden mit einer etwas vereinfachten Filterfunktion durchgeführt. Mit einer nachher durchgeführten Zusatzrechnung wurde jedoch die Filterwirkung der von TUKEY und HAMMING ange-

gebenen und oben beschriebenen Filterfunktion (Abb.34) hergestellt.

Die praktischen Rechnungen zur Autokorrelationsanalyse wurden teils von der Hollerith-Rechengruppe des Seewetteramts, teils auf einer elektronischen Rechenmaschine IBM 650 des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Hamburg durchgeführt.*)

Die Ordinaten wurden aus der Seegangs-Registrierung an äquidistanten Stellen im Zeitabstand von 0,4 bis 0,5 sec entnommen. Das Doppelte dieser Zeitspanne ist gleich der kleinsten Periode, die noch in die Analyse eingeht. Bei einer Registrierung von 15 min Dauer erhält man etwa 2000 Ordinatenwerte, welche die Ordinaten-Folge ("time-series") bilden. Mittelwerte werden für 50 verschiedene Zeitabstände (τ bzw. $p\Delta t$) berechnet. Das bedeutet rund 100 000 Multiplikationen mit nachfolgender Aufsummierung der Produkte. Die Berechnung des Spektrums aus der Autokorrelationsfunktion bringt weitere 2000 Multiplikationen mit sich. Ausserdem sind Kontrollrechnungen erforderlich.

c. Periodogramm - Analyse

d. Arbeitsweise des Analysators

Jede empirische Funktion, die in einem Intervall von der Länge 2π definiert ist, lässt sich durch eine Fouriersche Reihe der Form

$$z(t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu} \cos\left(\frac{2\pi\nu}{\lambda} t + \varphi_{\nu}\right) \quad (31)$$

(vgl. z.B. K. STUMPF (21)) beliebig gut annähern.

In Gl.(31) bedeuten c_{ν} die Amplitude jeder einzelnen Harmonischen (= "Oberwelle"), ν die Ordnungszahl der "Oberwelle", λ die Dauer der Registrierung und φ die Phase der betreffenden harmonischen Welle.

Umgekehrt ist es möglich, eine gegebene Funktion in Fourier-Komponenten zu zerlegen, deren Gesamtheit die Ursprungsfunktion annähernd darstellt.

Unser Ziel ist es, eine Seegangsregistrierung in Fourier-Komponenten aufzulösen und die Verteilung der ihnen "innewohnenden" Energie bzw. "Intensität" zu ermitteln.

*) Den grössten Teil der Programmierung besorgte Herr H. Rittenbruch. - Bei der Programmierung der Rechnungen waren uns die Mathematiker des Instituts für Angewandte Mathematik in dankenswerter Weise sehr behilflich. So wurde auch das cos-Unterprogramm für die Autokorrelationsrechnung benutzt, das vom Institut für Angewandte Mathematik schon vorher für andere Zwecke aufgestellt worden war.

Für die Analyse wurde ein Gerät benutzt, das vom Deutschen Hydrographischen Institut, Hamburg, entwickelt und gebaut worden ist. Wir sind dem Institut und insbesondere den Herren Dr. Christoph und Friedrich für das Entgegenkommen bzw. für die Durchführung der Analyse einer grossen Zahl von Streifen sehr zu Dank verpflichtet.

Der Fourier-Analysator des Deutschen Hydrographischen Instituts (Abb. 35a)* besitzt als Eingabeteil ein Rad von 80 cm Umfang. Ihm wird der zu analysierende Streifen aufgeklebt, der gleichfalls 80 cm lang sein muss. Der Registrierstreifen ist so vorbereitet, dass die gesamte Fläche unterhalb der Registrierkurve schwarz angelegt ist, während das Papier oberhalb der Kurve weiss stehen bleibt (vgl. Abb. 16)*. Man versetzt das Rad auf hohe Tourenzahl und lässt es dann langsam auslaufen.

Eine kräftige Lichtquelle strahlt den auf dem Rad rotierenden Registrierstreifen von einer Seite an. Das von dem Streifen reflektierte Licht über einen zur Rotationsachse parallel stehenden Spalt (vgl. Abb. 35b)* und eine Optik auf eine Photozelle geleitet. Sie setzt die erhaltene Lichtmenge in elektrischen Strom um. Wenn der Spalt genügend schmal ist, so ist der Strom in jedem Augenblick proportional der Lichtmenge, die an der betr. Stelle des Streifens von dem Weiss-Anteil reflektiert wird. Er ist somit proportional dem Ordinatenwert für denjenigen Punkt der Abszisse, der gerade an der Photozelle vorbeiläuft. Da der Streifen in immer wiederkehrender Folge an der Photozelle vorbeiläuft, wird der Strom in Abhängigkeit von der Zeit t durch die in Gl. (31) gegebene Funktion $z(t)$ beschrieben. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der ursprüngliche Zeitmasstab auf dem Registrierstreifen entsprechend der Rotationsgeschwindigkeit des Rades verändert ist. Bezeichnet man die Zeitkoordinate auf der Registrierung als "Registrierzeit" ($= t$) und die Zeitkoordinate, in der die elektrischen Vorgänge ablaufen, als "Stromzeit" ($= t^*$), so erhält man

$$t = \lambda u t^* , \quad (32)$$

wobei λ die zeitliche Länge des 80 cm langen Streifens und u die Umlaufzahl des Rades pro sec (Zyklen pro sec) bedeuten. In 1 sec Stromzeit laufen nämlich u mal λ sec Registrierzeit an der Photozelle vorbei. Enthält die Registrierung einen Wellenzug mit der Frequenz q , so laufen in 1 sec Stromzeit $\lambda \cdot u \cdot q$ Wellen durch; d.h., dass man in der Aufnahme

*) s. Bildteil

des elektrischen Stromes die Frequenz

$$q^* = \lambda u q \quad (33)$$

findet.

Aus Gl. (31) ersieht man, dass eine Registrierung der Länge λ , die sich stets wiederholt, nur Frequenzen $q = \frac{\nu}{\lambda}$ enthält. Die entsprechenden elektrischen Frequenzen nach der Umsetzung durch die Photozelle sind also

$$q^* = u \nu \quad (\nu = \text{Ordnungszahl der betr. Oberwelle}) \quad (34)$$

Der durch die lichtelektrische Umwandlung erzeugte oszillierende elektrische Strom wird nunmehr in einen speziellen Fourier-Analysator eingegeben. Vom Deutschen Hydrographischen Institut wird hierzu ein Seriengerät der Fa. Rohde & Schwarz verwendet. Der Analysator kann auf eine bestimmte Frequenz f eingestellt werden.

Wir nehmen zunächst an, dass die dem Analysator zugeleitete "Spannungsregistrierung" als Funktion der Zeit durch ein Fourier-Integral beschrieben werden kann:

$$U(t^*) = \int_{f=0}^{\infty} \cos(2\pi f t + \hat{\varphi}) dK(f) \quad (35)$$

Die Phase $\hat{\varphi}$ ist abhängig von f . $K(f)$ bezeichnet das kumulative kontinuierliche Fourier-Spektrum der oszillierenden Spannung; es entspricht in gewisser Weise einem Hörenspektrum, weil es eine nicht-quadratische Dimension besitzt.

Stellt man den Analysator auf die Frequenz f_0 ein, so ergibt er an dieser Stelle einen Wert

$$k^*(f_0) = \int_{f=0}^{\infty} \hat{F}(f-f_0) dK(f) \quad (36)$$

Der Ausdruck $\hat{F}(f - f_0)$ stellt das "Filter" des Analysators dar, das in Abhängigkeit von f eine Gestalt wie etwa das "mathematische Filter" in Abb. 36 besitzt. Während die Form der Filterfunktion stets die gleiche ist, liegt ihr "Maximum" stets über der gewählten Einstellfrequenz f_0 . Wenn es sich um ein "Linienpektrum" (mit Energiewerten an diskreten Stellen) handelt, so stellt das kumulative Spektrum eine Treppenfunktion dar, die an den Stellen $f = \frac{\nu}{\lambda}$ ($\nu = 1, 2, 3 \dots$) Sprünge der Höhe k_ν besitzt. Für die verschiedenen $k^*(f_0)$ ergeben

sich also "Spitzen" wie in Abb.36; sie sind den Fourierkoeffizienten k_v proportional.

Bei der praktischen Analyse verfährt man so, dass man den Analysator auf eine feste Frequenz $q^* = f_0$ einstellt, die nicht mehr geändert wird, und das Rad mit aufgespannter Registrierung aus anfangs sehr hoher Drehgeschwindigkeit langsam auslaufen lässt. Für einen genügend kleinen Zeitabschnitt, für den die Umlaufzeit u als annähernd konstant angesehen werden kann, ergeben sich Ausschläge der in Abb.36 wiedergegebenen Form. Sie haben ihr Maximum stets an den Stellen, an denen $uv = f_0$ ist; dabei ist $f_0 = q^* = \lambda u q$ (Gl.33). Die Maximumstellen treten beim Ablaufen des Rades also immer dann ein, wenn $u = \frac{f_0}{v}$ ist. Wenn alle Oberwellen bei der Analyse erfasst werden sollen, muss die Umlaufgeschwindigkeit u so hoch gebracht werden, dass die ganze Länge des Streifens als die am Analysator eingestellte Frequenz verzeichnet wird; d.h., es muss $u = f_0$ sein. Beim Ablaufen erhält man zuerst die niedrigen Oberwellen (lange Wellen) und dann zunehmend höhere (kürzere). $u = f_0$ ist nicht gebraucht worden; es wurde im extremen Fall bei $u = 6$ begonnen.

Mit Hilfe einer sinnreichen Einrichtung kann die Umlaufgeschwindigkeit des Rades während des Laufens bestimmt und somit die vom Analysator registrierte Oberwelle identifiziert werden. Dies ist selbst dann möglich, wenn die Amplitude einer Oberwelle = 0 ist; denn der Abszissen-Abstand der den einzelnen Oberwellen zukommenden Ausschläge voneinander (vgl. Abb.37) *) auf dem Registrierpapier ist im allgemeinen wenig unterschiedlich. Durch Auszählen ist die Zuordnung der einzelnen Oberwellen somit möglich. Erst bei den höheren Oberwellen wird der Abstand zunehmend geringer und schliesslich so klein, dass das Filter, dessen Breite konstant ist, nicht mehr genügend Auflösungsvermögen besitzt. Die einzelnen Ausschläge gehen dann ineinander über. Nach den kurzen Wellen zu ist der Analyse also eine Grenze gesetzt. Aus diesem Grunde muss bei breiten Spektren mit zwei verschiedenen Einstellfrequenzen f_0 analysiert werden.

β. Analyse des Energiespektrums

Zweck der Analyse ist es, die Energie des durch die Registrierung repräsentierten Seegangs zu ermitteln. Eingangs dieses Kapitels hatten

*) Abb.37 stellt einen Ausschnitt des Registrierstreifens dar; die Zahlen an der Oberkante des Streifens sind für die Analyse ohne Bedeutung.

wir gesehen, dass der Seegang an einem festen Ort in Abhängigkeit von der Zeit nach den gegenwärtigen Erkenntnissen durch die Gleichung (vgl. Gl. (8))

$$z(t) = \int_{f=0}^{\infty} \cos(2\pi ft + \varphi) \sqrt{E_f(f)} df$$

beschrieben wird.

Mit Hilfe des Fourier-Analysators und einer noch darzulegenden Rechnung erhält man aus jedem 80 cm langen Teilstreifen der Registrierung eine Anzahl von Fourier-Koeffizienten c_ν (vgl. Gl. (31)) verschiedener Grösse.

Nach W.J. PIERSON (Lit. 14) könnte man für den Fall, dass die Koeffizienten c_ν für ein bestimmtes ν sämtlich gleich gross wären, annehmen, dass c_ν^2 der Energie im Frequenzband zwischen $\frac{\nu - \frac{1}{2}}{\lambda}$ und $\frac{\nu + \frac{1}{2}}{\lambda}$ proportional ist. Stellt β einen Proportionalitätsfaktor dar, so erhält man :

$$\beta c_\nu^2 = \int_{f=\frac{\nu-\frac{1}{2}}{\lambda}}^{\frac{\nu+\frac{1}{2}}{\lambda}} E_f(f) df \approx \frac{1}{\lambda} E_f\left(\frac{\nu}{\lambda}\right); \quad (37)$$

bei genügend grossem λ geht das Näherungszeichen praktisch in ein Gleichheitszeichen über.

Die Fläche unter der "Kurve" eines Energiedichtespektrums hatten wir mit E^* oder "Energiezahl" bzw. "Gesamtintensität" bezeichnet:

$$E^* = \int_{f=0}^{\infty} E_f(f) df$$

Setzt man die linke Seite von Gl. (37) ein und summiert, so ergibt sich

$$E^* = \beta \sum_{\nu=0}^{\infty} c_\nu^2 \quad (38)$$

Oben wurde gezeigt, dass man bei der Analyse nicht alle Koeffizienten c_ν erhält, weil das Analysator-Filter bei den Oberwellen höherer Ordnung nicht mehr die notwendige Auflösungskraft besitzt. Man darf aber annehmen, dass die Energie der kurzen Oberwellen sehr klein ist. Man begeht daher keinen ins Gewicht fallenden Fehler, wenn man die kurzen Oberwellen hier ausser Acht lässt und sich auf jene c_ν -Werte beschränkt, die man bei der Analyse einwandfrei erhält.

Ausser dem (technischen) Filter des Analysators ist das mathematische Filter von Bedeutung, das wie bei der Autokorrelations-Analyse dazu

dient, der Stelle f die durchschnittliche "Intensität" im Intervall Δf zuzuordnen.

Wir hatten gesehen, dass die Original-Seegangsregistrierung in einzelne Abschnitte von je 80 cm Länge zerteilt wird, die dann zwecks Fourier-Analyse auf das Rad gespannt werden. An der "Nahtstelle", an der Anfang und Ende des aufgelegten Streifens aneinanderstossen, liegt eine Diskontinuität. Da die Apparatur erst dann zu analysieren in der Lage ist, wenn der Streifen eine bestimmte Anzahl von Rotationen auf dem Rad durchgeführt hat, also mehrfach durchgelaufen ist, wird ein "Seegang" registriert, der in Wirklichkeit der ständigen Wiederholung eines verhältnismässig kurzen Teilstreifens entspricht. Die wirkliche Wellenbewegung wird ersetzt durch eine fiktive. W.J. PIERSON, JR. (Lit. 14) hat sich mit den Konsequenzen, die sich aus der Wiederholung eines Teilstreifens mit diskontinuierlicher Nahtstelle ergeben, eingehend beschäftigt. Es ergibt sich dabei eine periodische Funktion der Periode λ , die sich durch eine Fourier-Reihe beschreiben lässt. W.J. PIERSON, JR. wählt für ihre Darstellung folgende Form:

$$z(t) = \sum_{\nu=0}^{\infty} [A_{\nu} \cos(2\pi t \frac{\nu}{\lambda}) + B_{\nu} \sin(2\pi t \frac{\nu}{\lambda})] \quad (39)$$

Für A_{ν} und B_{ν} ergeben sich komplizierte Ausdrücke. W.J. PIERSON, JR. beweist mit Hilfe des zentralen Grenzwertsatzes der Statistik, dass die Erwartungswerte

$$\psi(A_{\nu}) = \psi(B_{\nu}) = 0 \quad (40)$$

sind. Für $\psi(A_{\nu}^2)$ findet man nach bestimmten kleineren Vernachlässigungen :

$$\psi(A_{\nu}^2) = \frac{2}{\lambda^2} \int_0^{\infty} E_f(f) \frac{1}{4\pi^2} \left[\frac{\sin(\pi \lambda f)}{f - \frac{\nu}{\lambda}} \right]^2 df \quad (41)$$

Der Ausdruck in der eckigen Klammer entspricht dem Filter.

Hier möge bemerkt werden, dass man bei der Autokorrelations-Analyse das Filter innerhalb gewisser Grenzen frei aussuchen konnte, weil man dort keine einengende Annahme, wie sie bei der Fourier-Analyse wegen der Wiederholung nötig ist, zu machen brauchte. Bei der Autokorrelations-Analyse wird als Annahme zugrundegelegt, dass es sich einfach um einen stochastischen Prozess handelt. Dagegen wird das Filter bei der Fourier-Analyse - wie man mathematisch zeigen kann - dadurch festgelegt, dass sich die Funktion ständig wiederholt. Die Form der Filterfunktion

(eckige Klammer in Gl.41) ist also von vornherein gegeben.

In Gl.(41) wird das Spektrum an jeder Stelle mit dem Filterwert multipliziert; der Ausdruck $\frac{1}{4\pi^2}$ ist eine Konstante. Dann wird das Produkt über die gesamte Spektralbreite integriert.

Der Zähler des Filterausdruckes ist = 0, wenn $f = \frac{1}{\lambda}, \frac{2}{\lambda}, \frac{3}{\lambda} \dots$ usw. gesetzt wird. Gibt man dem Zähler den Wert $\frac{\nu}{\lambda}$, so werden Zähler und Nenner = 0; es lässt sich zeigen, dass der Quotient in diesem Falle den Grenzwert 1 annimmt.

Abb.36 gibt die Form der Filterfunktion wieder. Die Breite des Filters ist annähernd $\frac{2}{\lambda}$. Es ist also praktisch nur für einen schmalen Frequenzbereich $\neq 0$, so dass man in erster Näherung einen Mittelwert über den zugehörigen schmalen Frequenzbereich Δf erhält; wie beim Autokorrelations-Filter wäre die Rechteckform "ideal". Die Abweichung vom Rechteck und die kleineren "Wellen" rechts und links vom Hauptmaximum der Filterfunktion bewirken eine gewisse "Verschmierung" bei der Analyse, die aber in durchaus tragbaren Grenzen liegt.

Aus den einzelnen Teilstreifen, die mit $\alpha = 1, 2, 3 \dots$ numeriert sein mögen, erhält man Intensitäten verschiedener Grösse. Wir machen die Annahme, dass das Mittel der Intensitäten, die proportional zu den ins Quadrat erhobenen Koeffizienten $c_{\nu\alpha}$ sind, gleich der entsprechenden Intensität der Gesamtregistrierung sind. Es ergibt sich

$$\frac{1}{N_T} \sum_{\alpha=1}^{N_T} c_{\nu\alpha}^2 = c_{\nu}^2 \quad (42)$$

(N_T = Zahl der Teilstreifen von je 80 cm Länge.)

Auf dem Registrierpapier ergibt der Fourier-Analysator nicht direkt die Werte $c_{\nu\alpha}$. Die Spitzen der zu jeder Oberwelle erhaltenen Auslenkung mögen Ordinaten der Grösse $c_{\nu\alpha}^*$ (im Masstab des Registrierpapiers) haben. Nimmt man an, dass die $c_{\nu\alpha}^2$ zu den $c_{\nu\alpha}^{*2}$ proportional sind und dass der Proportionalitätsfaktor $\hat{\beta}$ für jeden Teilstreifen α gleich gross ist, so erhält man :

$$\hat{\beta} c_{\nu\alpha}^{*2} = c_{\nu\alpha}^2 \quad (43)$$

Aus Gl.(38),(39),(40) und (41) folgt :

$$\frac{1}{N_T} \hat{\beta} \sum_{\alpha} \sum_{\nu} c_{\nu\alpha}^{*2} = \beta \sum_{\nu} c_{\nu}^2 = E^* \quad (44)$$

und analog

$$\hat{\beta}\hat{\beta} = \frac{E^*}{\frac{1}{N_T} \sum_{\alpha} \sum_{\nu} c_{\nu\alpha}^{*2}} \quad (44a)$$

bzw. unter Berücksichtigung von Gl.(37) die Beziehung zwischen den vom Analysator gelieferten Fourier-Koeffizienten und der f-spektralen Energiedichte :

$$\frac{1}{N_T} \hat{\beta}\hat{\beta} \sum_{\alpha} c_{\nu\alpha}^{*2} = \beta c_{\nu}^2 = \frac{1}{\lambda} E_f\left(\frac{\nu}{\lambda}\right) \quad (45)$$

Vergleicht man die erhaltenen Fourierkoeffizienten $c_{\nu\alpha}$ gleicher Oberwelle, jedoch von verschiedenen Teilstreifen der Registrierung, miteinander, so zeigt sich, dass sie stark streuen. W.J.PIERSON, JR.(Lit.14) hat das Verteilungsgesetz angegeben, nach dem die $c_{\nu\alpha}^2$ für unterschiedliche α um den Mittelwert schwanken. Ein wesentliches Merkmal der bezüglichen Gleichung ist es, dass die $c_{\nu\alpha}^2$ eine sogenannte Chi-square-Verteilung der Form

$$\frac{1}{\varphi} e^{-\frac{c_{\nu\alpha}^2}{\varphi}}$$

besitzen.

φ , genauer $\varphi(c_{\nu\alpha}^2)$, bezeichnet den statistischen Erwartungswert. Nach PIERSON besitzen die ins Quadrat erhobenen Fourier-Koeffizienten eine χ^2 -Verteilung mit 2 Freiheitsgraden. Abb.38 enthält diese Verteilung in einem auf φ bezogenen Koordinatensystem. Der Verlauf der Kurve gibt die Streuung an. Die Kurve würde steiler verlaufen bei Verteilungen mit geringerer Streuung. Die kleinsten Werte sind die häufigsten. Nach W.J.PIERSON, JR. (Lit.14) liegen die Vertrauensgrenzen für 90% ("90% confidence limits") bei $0,051 \varphi(c_{\nu\alpha}^2)$ und $3,00 \varphi(c_{\nu\alpha}^2)$. Das bedeutet, dass von 10 $c_{\nu\alpha}^2$ -Werten für eine bestimmte Oberwelle verschiedener Streifen 9 innerhalb der angegebenen Grenzen liegen. Es ist ersichtlich, dass die Streuung äusserst grosse Werte annimmt.

Auch wenn man mehrere Registrierungen des gleichen Seegangs analysiert und für ein bestimmtes ν die aus Teilstreifen erhaltenen $c_{\nu\alpha}^2$ mittelt, so haben die Mittelwerte nach W.J.PIERSON, JR. wiederum χ^2 -Verteilungen; bestehen sie aus p Einzelwerten, so ist die Anzahl der Freiheitsgrade 2 p.

Bei der Autokorrelations-Analyse ist es gelungen, die statistischen

Schwankungen auf ein erträgliches Mass zu senken (vergl. J.W. TUKEY and R.W. HAMMING (Lit.26) sowie W.J. PIERSON, JR. (Lit.16)). Es erscheint daher angebracht, für die Glättung das bei der Autokorrelation verwendete Verfahren zum Vorbild zu nehmen.

Reine "Glättung" erreicht man durch die Bildung von übergreifenden Mittelwerten. Schwankungen in einer Punktfolge kann man in gewissem Masse auch dadurch dämpfen, dass man von je einer Gruppe aufeinanderfolgender Funktionswerte ("Punkte") die arithmetischen Mittel bildet. Im vorliegenden Falle lässt sich durch die Kombination beider Methoden ein Rechenverfahren finden, dessen Wirkung den bei der Autokorrelation getroffenen Glättungsmassnahmen weitgehend entspricht.

Zunächst werden je μ benachbarte Werte des Spektrums durch Bildung des arithmetischen Mittels zusammengefasst. Die Grösse μ ist so zu wählen, dass sie dem Ausdruck $\frac{\lambda}{2m\Delta t}$ möglichst nahe kommt. Dabei bedeuten m die Anzahl der Spektrumswerte bei der Autokorrelations-Analyse und Δt den Zeitabstand zwischen benachbarten Werten der time-series bei der Autokorrelations-Analyse. Für μ haben wir bei der B-Registrierung vom 2.12.1957 den Wert 2 und bei der Bi-Registrierung den Wert 3 gewählt.

Ausserdem muss das Spektrum noch durch Bildung eines gleitenden Mittelwertes über je l benachbarte Spektrumswerte geglättet werden.

Wir erinnern uns an dieser Stelle, dass ein Filter mit Rechteckgestalt als "ideal" zu bezeichnen ist, dass es in der Praxis aber nicht zu erreichen ist. Je "schmäler" das Filter ist, umso weniger wird es das wirkliche Spektrum verfälschen. Es lässt sich aber zeigen, dass die statistischen Schwankungen umso grösser sind, je schmaler das Filter ist. Ein breites Filter dagegen bewirkt "Verschmierung" des Spektrums und gleichzeitig Glättung der statistischen Schwankungen.

Damit das Filter eine ähnliche Form erhält, wie dasjenige der Autokorrelations-Analyse, muss der arithmetische Mittelwert aus "gewogenen" Einzelwerten gebildet werden, dabei sind die "inneren" Werte des Mittels mit stärkeren "Gewichten" zu belegen als die "äusseren". Für die am häufigsten vorkommenden Werte von $\mu = 2, 3, 4$ wurden (ohne eingehendere Untersuchung) folgende Gewichtsbelegungen festgelegt:

μ	Belegung			
2		1	1	
3		1	2	1
4	1	2	2	1

Es lässt sich nun zeigen, dass l dann günstig gewählt ist, wenn es der Grösse $4 - \frac{1}{\mu}$ möglichst nahe kommt. Im allgemeinen wird man also $l = 4$ setzen können.

Für $\mu = 2$ und $l = 4$ erhält man aus den Oberwellen der Ordnung ν bis $(\nu + 7)$, d.h. aus den Spektralwerten E_f an den Stellen $\frac{\nu}{\lambda}$ bis $\frac{\nu+7}{\lambda}$ einen geglätteten Spektralwert \bar{E}_f an der Stelle $\frac{\nu+3,5}{\lambda}$, und zwar nach der Formel

$$\bar{E}_f\left(\frac{\nu+3,5}{\lambda}\right) = \frac{1}{6} \left[E_f\left(\frac{\nu+0,5}{\lambda}\right) + 2E_f\left(\frac{\nu+2,5}{\lambda}\right) + 2E_f\left(\frac{\nu+4,5}{\lambda}\right) + E_f\left(\frac{\nu+6,5}{\lambda}\right) \right] \quad (46)$$

Die Grössen E_f an den Stellen $\left(\frac{\nu+0,5}{\lambda}\right)$, $\left(\frac{\nu+2,5}{\lambda}\right)$ usw. sind Mittelwerte aus den Werten von E_f bei ν und $(\nu+1)$, $(\nu+2)$ und $(\nu+3)$, u.s.w.

Die sich hier ergebenden Zahlen sind Relativwerte ^{und} müssen auf absolute Grössen umgerechnet werden. Hierzu ist die Ermittlung der Gesamt-Intensität E^* erforderlich.

Die Bestimmung der Gesamt-Intensität (E^*)

Mit Gl.(38) und (44) ist eine Beziehung zwischen den Fourier-Koeffizienten c_ν und der Grösse E^* gewonnen worden. Das Produkt $\beta\hat{\beta}$ ist unbekannt. Es ist aber möglich, E^* nach einer Methode zu bestimmen, die im folgenden beschrieben werden wird.

Der Lichtspalt wird in die in Abb.39 angedeutete Lage gebracht. Die Ordinaten der auf das Rad aufgespannten Registrierung sind die Grössen $\bar{z}(t)$. Nachdem das Rad in schnelle Bewegung versetzt worden ist, wird der Lichtspalt langsam quer über die Registrierung, also in \bar{z} -Richtung, bewegt. Die bei dieser Operation auftretende Variable in der \bar{z} -Richtung wird mit \bar{z}_p bezeichnet. Von der Photozelle wird dann in jeder \bar{z}_p -Lage ein bestimmter "Grauwert" gemessen (schwarz = Grauwert 0, weiss = Grauwert 1). Er besagt, dass bei dem gerade zur Betrachtung stehenden Wert von \bar{z}_p , also für einen bestimmten Ordinatenwert der Registrierung, ein bestimmter Prozentsatz "Weiss", gemessen auf der ganzen Länge des Streifens, vorhanden ist. Der von der Photozelle erzeugte Strom wird registriert. Das Verhältnis zwischen dem Vorschub des Spaltes in der \bar{z}_p -Richtung und dem Vorschub des Registrierpapiers für die Photometeraufzeichnung (Abb.40^{*}) ist eine bekannte Grösse. Die sich ergebende

^{*}) vgl. Fussnote S.52 zu Abb.37

Stromgrösse kann daher als Funktion von \bar{z}_p (gerechnet von einer willkürlichen Stelle $\bar{z}_p = 0$ an) beschrieben werden. Wählt man den Ordinatenmasstab y des Registrierpapiere so, dass dem Grauwert 0 der Wert $y = 0$ und dem Grauwert 1 der Wert $y = 1$ entspricht, so ist die registrierte Funktion die sog. kumulative Verteilungsfunktion des Teilstreifens. Sie sei mit $y = \Phi(\bar{z}_p)$ bezeichnet. (Obwohl es sich um Ergebnisse aus den 80 cm langen Teilstreifen der Registrierung handelt, wird hier und zunächst auch weiterhin von der Verwendung des Index α abgesehen). Die kumulative Verteilungsfunktion gibt auch die Wahrscheinlichkeit dafür wieder, dass die Ordinate $\bar{z}(t)$ der Registrierung bei einer bestimmten Lage des Schlitzes $\bar{z}(t) < \bar{z}_p$ ist. Es lässt sich zeigen (vgl. RICE (Lit. 19)), dass sich die kumulative Verteilungsfunktion durch folgende Formel beschreiben lässt :

$$y = \Phi(\bar{z}_p) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^*}}} e^{-\frac{\bar{z}^2}{E^*}} d\bar{z} \quad , \quad (47)$$

sofern der Seegang eine Gaussverteilung besitzt. Dabei ist E^* die gesuchte Energiezahl, \bar{z} ist die Variable auf der Ordinate des eingespannten Schwarz-Weiss-Streifens, während \bar{z}_p derjenige Ordinatenwert ist, über dem der Spalt jeweils steht.

Die Integration der Gl. (47) kann man für die Bereiche $\bar{z} = -\infty$ bis 0 und $\bar{z} = 0$ bis $\frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^*}}$ getrennt durchführen; es ergibt sich

$$y = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^*}}} e^{-z^2} dz = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^*}}} e^{-z^2} dz \right) . \quad (48)$$

Man führt nun als neue Variable $\hat{z} = \frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^*}}$ ein und setzt sie als obere Grenze in Gl. (48) ein :

$$y = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\hat{z}} e^{-z^2} dz \right) \quad (49)$$

Die Substitutionen hatten den Zweck, die Gleichung in eine solche Form zu bringen, dass ein bestimmter Term, nämlich der 2. Summand in Gl. (49) mit dem Wahrscheinlichkeitsintegral, leicht bestimmbar wird. Dieser 2. Summand kann als Funktion von \hat{z} geschrieben werden :

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\hat{z}} e^{-z^2} dz = G(\hat{z}) \quad (50)$$

Funktionen der Form \hat{z} liegen tabuliert vor, was die praktische Durchführung der Rechnung erleichtert. Durch Einsetzen in Gl.(49) erhält man

$$y = \frac{1}{2} (1 + G(\hat{z})) \quad (51)$$

und daraus :

$$G(\hat{z}) = 2y - 1 \quad (52)$$

Zur Berechnung der \hat{z} -Werte kann man also so verfahren: Man entnimmt den durch Verschiebung des Lichtspaltes in der z-Richtung erhaltenen Photometerkurven die Funktionswerte y_k an diskreten Stellen \bar{z}_{pk} und berechnet daraus mit Hilfe eines Tabellenwerkes die \hat{z}_k . Zwischen \bar{z} und \hat{z} besteht die Beziehung

$$\hat{z} = \frac{\bar{z}_p}{\sqrt{E^2}} \quad ; \quad (53)$$

sie entspricht einer Geraden mit der Neigung $\frac{1}{\sqrt{E^2}}$.

Trägt man die aus der Photometerkurve (Abb.40) ermittelten \bar{z}_p -Werte in ein Wahrscheinlichkeitspapier (Abszisse linear, Ordinate Wahrscheinlichkeitsfunktion) gegen die entsprechenden Grauwerte y an diskreten Stellen ein, so müsste sich für den Fall, dass der Seegang eine Gaussverteilung besitzt, eine Gerade der Neigung $\frac{1}{\sqrt{E^2}}$ ergeben. Da der Seegang dieser idealen Verteilung nicht genügt, weicht die Kurve der Abb.41 an beiden Enden von der im mittleren Teil erkennbaren geradlinigen Strecke ab. Diese Erscheinung ist nicht nur darauf zurückzuführen, dass die Streuung wegen der geringeren Zahl von Beobachtungswerten an den Enden der Kurve grösser ist, sondern es handelt sich um eine systematische Abweichung. Sie bedeutet, dass in dem von uns betrachteten Seegang eine geringere Anzahl sowohl grosser Wellenhöhen als auch sehr tiefer Täler aufgetreten sind, als man theoretisch bei Ansatz der Gaussverteilung erwarten würde. Es sei betont, dass grosse Wellenextreme aufgetreten sind, nur geschah dies seltener als nach der theoretischen Erwartung. Es ist nicht ganz ausgeschlossen, dass die geringe Wassertiefe den von uns gemessenen Seegang beeinflusst hat. Bei anderen Registrierungen sind jedoch auch Fälle aufgetreten, in denen die Kurve an den Enden steiler verläuft als im mittleren Bereich. Das bedeutet, dass extrem hohe bzw. extrem tiefe Ordinatenwerte häufiger auftreten, als es der Gaussverteilung für den registrierten See-

gang entspricht. Durchweg wurde die erstgenannte Kurvenkrümmung (Enden flacher) bei Beschleunigungsmessungen, der zweite Fall (Enden steiler) bei Direktmessungen des Seegangs (kinematographisch u.s.w.) gefunden. Da die Photometerkurve eine Art Mittelung über den ganzen Schrieb darstellt, ist anzunehmen, dass dieses Ergebnis nicht zufällig, sondern für die betreffende Art der Registrierung charakteristisch ist. Der Abb.41 liegt die doppelt integrierte Beschleunigungsmessung vom 2.12.1957 am Turm Mellum Plate zugrunde.

Je flacher die Kurve auf dem Wahrscheinlichkeitspapier geneigt ist, umso grösser ist die sich ergebende Energiezahl E_{α}^* für den betreffenden 80 cm langen Registrierstreifen; denn E^* steht in Gl.(53) im Nenner. Berücksichtigt man in Abb.41 bei der Festlegung der Neigung der (gedachten) Geraden die Enden mit, so erhält man eine kleinere Neigung und somit einen grösseren Wert für E_{α}^* . Die Abb.41 dient daher auch der Feststellung des für unsere Betrachtungen "gültigen" Abschnitts, nämlich desjenigen Bereichs von Wellen, in dem die gewünschte (kumulative) Gaussverteilung herrscht. Als "gültig" wird also der mittlere Teil der Kurve angesehen werden.

Hier erhebt sich allerdings die Frage, inwieweit die nicht-gaussverteilten Seegangsanteile in die Rechnung eingehen, wenn man E^* mit Hilfe des mean-square-Wertes $\frac{\sum z_k^2}{N_k}$ (z_k = Abweichung vom Mittelniveau an der Stelle k , N_k = Gesamtzahl der k -Stellen) bestimmt. Die Benutzung der root-mean-square-Werte wird im allgemeinen als das Standard-Rechenverfahren für den vorliegenden Zweck angesehen.

Wir haben für die Bestimmung der Neigung der Geraden bei unseren Auswertungen stets den gleichen, zu $y = 0.5$ symmetrisch liegenden Bereich benutzt und auf diese Weise eine Anzahl von Werten E_{α}^* (je einen pro Streifen) erhalten.

Es ist nun naheliegend, im arithmetischen Mittel der E_{α}^* eine brauchbare Näherung für E^* zu sehen. Es zeigte sich jedoch, dass die auf diese Weise bestimmte Grösse E^* einen so grossen Wert annahm, dass es ratsam erschien, die Grösse E^* versuchsweise noch nach einer anderen Methode zu ermitteln :

Bei dem eben beschriebenen Vorgehen war der Ausgangspunkt für die Festlegung der äquidistanten Stellen (1 cm Abstand) auf der \bar{z}_p -Achse der Photometer-Registrierung willkürlich festgelegt. Die Grenzen des betrachteten Bereiches lagen symmetrisch zum Wert $y = 0,5$ (Abb.41).

Der Bereich kann auch folgendermassen bestimmt werden: Zum Wert $y = 0,5$ findet man auf der Abszisse eine Stelle $\bar{z}_p^{(0,5)}$ (vgl. Abb. 42). Die äquidistanten Punkte auf der Abszisse können nun so gelegt werden, dass man von $\bar{z}_p^{(0,5)}$ ausgeht und nach rechts und links zählt. Alle diese Stellen liegen symmetrisch zu $\bar{z}_p^{(0,5)}$ und sind je eine Abszisseneinheit (= 1cm auf dem Registrierpapier) voneinander entfernt. Je nachdem, wieviele Ordinaten für die Rechnung berücksichtigt werden, wird man teils nach oben, teils nach unten über den nach dem ersten Verfahren zur Bestimmung der E_α^* betrachteten Ordinatenbereich hinauskommen.

In welcher Weise man aus den einzelnen E_α^* den Wert für E^* ermitteln soll, ist nicht genau bekannt. Es erscheint aus diesem Grunde exakter, die E_α^* gar nicht erst zu bestimmen, sondern die 7 Photometerkurven durch Überlagerung zusammenzufassen und daraus E^* zu ermitteln. Würden die Abszissen der Photometerkurven sämtlich ein und denselben Bezugspunkt haben, würde also auf jeder von ihnen an einer Abszissenstelle ein Punkt so markiert sein, dass alle 7 Punkte auf ein und denselben Ordinatenwert der entsprechenden 80 cm langen Seegangsregistrierungen fallen, so würde die gewünschte Überlagerung keine Schwierigkeiten bereiten. - Dies ist aber nicht der Fall; so muss man hinsichtlich der Zuordnung zwischen den Punkten auf der Seegangsregistrierung und auf der Photometerkurve eine Plausibilitätsbetrachtung zu Hilfe nehmen: Vergleicht man für einen bestimmten Wert y ("Grauwert" bzw. Ordinatenwert der Photometerkurve) die ihm auf allen 7 Teilstreifen zukommenden \bar{z} -Werte auf der Seegangsregistrierung (Ordinatenwerte der Seegangsregistrierung), so werden diese \bar{z} -Werte umso weniger streuen, ein je grösserer Anteil aller Ordinaten auf einen kleinen Bereich $\Delta\bar{z}$ um \bar{z} fällt; denn je grösser diese Anzahl ist, umso mehr werden sich die Unterschiede zwischen den einzelnen (80 cm langen) Streifen herausmitteln. Da - wie wir wissen - Ordinaten mittlerer Grösse häufiger sind als sehr hohe Wellenberge und tiefe Täler, kann man annehmen, dass die $\bar{z}_{p\alpha}$ -Werte der 7 verschiedenen Registrierungen am wenigsten in der Nähe von $y = 0,5$ streuen; denn y liegt zwischen 0 und 1. Es wird daher die Annahme gemacht, dass die 7 Werte $\bar{z}_{p\alpha}^{(0,5)}$ für die 7 (80 cm langen) Registrierstreifen sämtlich (nahezu) gleich sind. Man hat also die Photometerkurven so zu superponieren, dass die Stellen $\bar{z}_{p\alpha}^{(0,5)}$ auf den Abszissen der Photometer-Registrierung genau aufeinanderfallen; dann sind die Funktionswerte y_k an allen Stellen zu mitteln. Nimmt man die y_k -Werte

in allen 7 Registrierungen symmetrisch zu $\bar{z}_p^{(0,5)}$ auf und schreibt die in bezug auf $\bar{z}_p^{(0,5)}$ an gleicher Stelle stehenden y_k der einzelnen Photometerstreifen nebeneinander (vgl. Tab. 3), so kann man die Mittelwertbildung sofort durchführen (rechte Spalte der Tab.3). Aus diesen Mittelwerten wurde unter Benutzung einer Tabelle die zugehörige Gerade nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und schliesslich daraus E^* ermittelt.

Tabelle 3

	1	2	3	4	5	6	7	Mittel
-10	00	00	00	00	00	00	00	000
- 9	00	01	00	00	01	01	00	004
- 8	02	02	01	01	01	02	01	014
- 7	03	04	02	02	02	03	01	024
- 6	07	07	05	04	03	05	02	047
- 5	11	13	08	07	06	08	05	093
- 4	15	18	14	12	10	13	09	130
- 3	21	25	22	18	18	20	17	201
- 2	29	33	30	28	28	28	27	290
- 1	38	42	41	40	39	40	38	397
0	50	50	50	50	50	50	50	500
1	62	60	59	63	60	60	59	604
2	69	67	66	73	68	70	68	687
3	78	75	74	80	77	77	75	766
4	84	81	82	86	84	82	82	830
5	90	88	88	91	90	88	87	889
6	94	92	91	95	94	93	91	929
7	97	97	95	97	97	97	95	964
8	99	98	97	98	98	99	98	981
9	100	99	99	100	99	100	99	996
10	100	100	100	100	100	100	100	1000

(Mellum Plate, Messung mit der Leitfähigkeitssonde
am 2.12.1957)

d. Gegenüberstellung von Autokorrelations- und Fourier-Analyse

d. Gesamt-Intensität

Während bei der Autokorrelations-Analyse rein rechnerische bzw. mathematische Schritte vorgenommen werden, stützt sich die Fourier-Analyse mit Hilfe eines Analysators der beschriebenen Art auch auf bestimmte technische Gegebenheiten. Um Vergleiche zwischen den beiden Methoden anstellen zu können, wurden einige Registrierungen nach beiden Verfahren analysiert.

Tabelle 4

	Autokorrelations- analyse	Fourieranalyse
L - Registrierung vom 2.12.57	$E^* = 530 \text{ [cm}^2\text{]}$	$E^* = 573 \text{ [cm}^2\text{]}$
B - Registrierung vom 17.2.58	$J = 126\,887 \text{ [gal}^2\text{]}$	$J = 72\,500 \text{ [gal}^2\text{]}$
Bi- Registrierung (mechanisch integriert) vom 2.12.57	$E^* = 1181 \text{ [cm}^2\text{]}$	$E^* = 1237 \text{ [cm}^2\text{]}$
B - Registrierung vom 2.12.57	$J = 1,755 \cdot 10^4 \text{ [gal}^2\text{]}$	$J = 2,01 \cdot 10^4 \text{ [gal}^2\text{]}$

Die mit der Fourier-Analyse erzielten Gesamt-Intensitäten sind teils kleiner, teils grösser als die entsprechenden Werte mittels Autokorrelations-Analyse. Es wurde eine Untersuchung durchgeführt mit dem Ziel, diese Abweichungen zu erklären. Praktisch bedeutsame Fehler bei der Faktorenbildung für die beiden Analysen konnten nicht gefunden werden. Bei der Bestimmung der Fläche unter dem Spektrum, z.B. bei der Gesamt-Intensität, durch Photometrierung können zwei wesentliche Fehler eingehen :

- 1) Es besteht die Möglichkeit, dass sich die Registrierstreifen während der Analyse in nicht genau abzissen-paralleler Lage befinden.
- 2) Die theoretische Grundlage dieser Analysenform ist nicht adäquat, da der photometrierte Prozess nicht gaussisch ist.

Fehler 1 ergibt stets eine Vergrößerung der Gesamt-Intensität. Die fehlerhafte zusätzliche spektrale Intensität erscheint nur am langwelligeren Ende des Spektrums.

Fehler 2 kann sowohl eine Vergrößerung als auch eine Verkleinerung der Gesamt-Intensität bewirken. Bei der Ermittlung der Gesamt-Intensität geht man stets vom mittleren Teil der Photometerkurve aus. Entfallen in den Randteilen der Kurve weniger Ordinaten auf die Höheneinheit als bei einer einwandfreien Gauss-Verteilung, ist die Photometer-Kurve im Wahrscheinlichkeitsnetz also an den Enden abgeflacht, so ergibt die Berechnung aus dem mittleren Teil der Photometerkurve einen zu kleinen Wert der Gesamt-Intensität. Im umgekehrten Fall (Photometer-Kurve an den Enden aufgeteilt) fällt die Gesamt-Intensität zu gross aus.

Die B-Registrierung vom 17.2.58 ist an den Enden bis in den zentralen Teil erheblich abgeflacht. Für die Gesamt-Intensität ergibt sich daher ein zu kleiner Wert. In den übrigen Fällen überwiegt Fehler 1.

Um zu demonstrieren, dass die Ermittlung der Gesamt-Intensität aus der Photometer-Kurve einer nicht unerheblichen Willkürlichkeit unterliegt, wurde sie für die B-Registrierung vom 17.2.58 viermal bestimmt, wobei jedesmal verschieden grosse Bereiche der Photometerkurve benutzt wurden. Es ergab sich, dass J zwischen 80600 [gal²] und 188000 [gal²] schwankte. Es bleibt zu untersuchen, ob sich für die Bestimmung der Gesamt-Intensität ein in jedem Falle gültiges Verfahren finden lässt.

Im Hinblick auf die Unsicherheit, die die Fourier-Analyse in dieser Beziehung bisher noch besitzt, sind schliesslich sämtliche interessierende Registrierungen der Autokorrelations-Analyse unterworfen worden. Werden bei der Darstellung der Ergebnisse Spektren gebracht, die mit der Fourier-Analyse gewonnen wurden, so geschieht dies lediglich zu Vergleichszwecken hinsichtlich der spektralen Form; diesen Spektren liegt jedoch eine Gesamt-Intensität zugrunde, die in jedem Falle von der Autokorrelations-Analyse übernommen wurde. Auf die Schwierigkeiten, die bei der Fourier-Analyse aufzutreten pflegen, hat auch R.W. BURLING (Lit.3) hingewiesen.

β. Die Form der Spektren

Bei der Autokorrelations-Analyse wird ein "Filter" verwendet, das auf S. 45 durch Gl.(21) beschrieben ist. Wie in Abb.33 ersichtlich und auf S. 46 erörtert, bewirkt der cos-Term der Gl.(21), dass das Filter nicht nur in dem betrachteten Frequenz-Bereich 0 bis $\frac{\pi}{\Delta t}$ wirksam wird, sondern auch an unendlich vielen Stellen ausserhalb dieses Intervalls. Aus diesem Grunde erhält man stets die Summe aller Intensitätswerte, die an diesen Stellen liegen. Allerdings umfasst der Bereich $(0, \frac{\pi}{\Delta t})$ alle energiereichen Seegangsfrequenzen, so dass auf der kurzwelligen (hochfrequenten) Seite von $\frac{\pi}{\Delta t}$ nur geringfügige Beiträge (Ordinatenwerte) erfasst werden und in die Summe eingehen. Wegen der Symmetrie der Filterrechtecke um die Spiegelungsachse $\frac{1}{2\Delta t}$ (vgl. S. 46 und Abb.33) fallen in dem mit der Autokorrelations-Analyse berechneten Spektrum solche Ordinatenwerte noch am meisten ins Gewicht, die sich ausserhalb des "reduzierten Spektrums", also ausserhalb des Bereichs $(0, \frac{\pi}{\Delta t})$, in der Nähe des Wertes $\frac{1}{2\Delta t}$ befinden; denn sie sind verhältnismässig energiereich und werden den symmetrisch zu $\frac{1}{2\Delta t}$ innerhalb $(0, \frac{\pi}{\Delta t})$ liegenden Ordinatenwerten zugeschlagen. Aus diesem "Faltungseffekt" des Filters ergibt sich, dass das mit der Autokorrelations-Analyse berechnete Spektrum im Gebiet der kurzen Wellen zu hohe Werte ergibt und dass es am Wert $2\Delta t$ abbricht.

Die Form des mit der beschriebenen Fourier-Analyse gewonnenen Spektrums ist im Bereich der langen Wellen unrichtig. Es ist bei dieser Art der Analyse nicht zu umgehen, Teilabschnitte der Registrierung auszuwerten. Die Streifen von je 80 cm Länge können nicht absolut abszissenparallel auf das Rad aufgelegt werden. Dadurch und überdies durch den Sprung an der Nahtstelle wird eine nicht reelle Vergrösserung der langen Fourier-Glieder bewirkt. Im Gebiet der langen Perioden werden also grössere Intensitäten bzw. Energien vorgetäuscht als wirklich vorhanden sind.

Bei der Besprechung der Ergebnisse werden Spektren der beiden Analysenarten einander gegenübergestellt werden.

Unregelmässigkeiten in der Spektralfunktion ergeben sich daraus, dass der Seegang in jedem einzelnen Falle nur durch einen Mess-Ausschnitt von endlicher Länge repräsentiert wird. Bei dem mit der Fourier-Analyse gewonnenen Spektrum spielen dabei die Anzahl der Fourier-Koeffizienten, die zu einem Spektralwert zusammengefasst werden, eine Rolle.

Ausserdem geht die Zahl der Spektralwerte ein, über welche zur Glättung der Spektralfunktion überlappend gemittelt wird. Diese beiden Werte wurden so festgelegt, dass eine möglichst weitgehende Anpassung an die Wirkungsweise des Filters bei der Autokorrelations-Analyse erreicht wird. Es ergibt sich dann, dass das Spektrum mit der Fourier-Analyse im allgemeinen etwas stärkere statistische Schwankungen aufweist als mit der Autokorrelations-Analyse. In einem Falle (17.2.58., B-Registrierung) wurde von dieser Anpassung abgegangen, als bei der Autokorrelations-Analyse ein schmaleres Filter gewählt wurde als für die vorher durchgeführte Fourier-Analyse angesetzt worden war. Beim Vergleich der Spektren zeigt sich (Abb.90), dass in diesem Falle das Autokorrelations-Spektrum die grösseren statistischen Schwankungen enthält.

Insgesamt gesehen kann jedoch gesagt werden, dass die Autokorrelations-Analyse ohne Bedenken durch die Fourier-Analyse ersetzt werden könnte, sofern es gelingt, die Gesamtenergie bzw. -Intensität in genügende Übereinstimmung zu bringen.

4. Eichung des Beschleunigungs-Messgerätes

a. Notwendigkeit der Eichung

Die Messungen am Leuchtturm Mellum Plate verfolgten den Zweck, festzustellen, ob es möglich ist, die mit dem Seegangs-Beschleunigungsschreiber nach A.LANG (Lit.9) erzielten Messergebnisse in eine einfache Beziehung zu den objektiven Messresultaten zu setzen. Die folgenden Ausführungen zeigen auf, dass diese "Eichung" nur auf empirischem Wege möglich ist.

Der Messteil des Beschleunigungs-Messgerätes wird durch einen mechanischen Schwingkörper (eine "Masse") gebildet; dieser führt Schwingungen aus, die ihm durch das sich bewegende Gehäuse aufgezwungen werden. Auf das Gehäuse einschliesslich des Rettungsringses wiederum werden die Bewegungen der Meeresoberfläche übertragen; es folgt diesen nicht genau, sondern führt gegen die Oberfläche Tauchbewegungen aus. Sie sind besonders augenfällig, wenn das Messgerät auf "spitzen" Wellenkämmen etwas unterschneidet. Ausserdem erfährt das Gerät Zusatzbeschleunigungen infolge der Fesselung mittels Leine.

Das Spektrum der Bewegung des Gehäuses ist also nicht das gleiche

wie dasjenige der Wellenbewegung, sondern berechnet sich aus diesem nur nach Anbringen einer "Verzerrungsfunktion". Da man die Vorgänge während der Tauchbewegungen und des Unterschneidens nicht quantitativ beherrscht, ist es nicht möglich, diese Funktion theoretisch zu berechnen. Sie muss vielmehr empirisch ermittelt werden.

Auch wenn man das Spektrum der Bewegungen des Schwingkörpers relativ zum Gehäuse aus dem Bewegungsspektrum des Gehäuses berechnen will, ist eine "Verzerrungsfunktion" bzw. ein "Verzerrungsfaktor" anzubringen. Aus den im Labor feststellbaren Eigenschaften des Schwingkörpers lässt sich diese Funktion rechnerisch bestimmen.

Will man das Spektrum der Wellenbewegung direkt zu dem der Schwingung der "Masse" in Beziehung setzen, so hat man das Produkt der beiden "Verzerrungsfunktionen" anzubringen; diese Grösse bildet also die "Eichfunktion" für das doppelt integrierte Spektrum der mit dem Gerät von A.LANG gemessenen Beschleunigungsregistrierung.

Die "Eichung" des Beschleunigungs-Messgerätes läuft somit auf die empirische Ermittlung der "Verzerrungsfunktion" zwischen Wellenspektrum und Bewegungsspektrum des Gehäuses hinaus. Ist sie für verschiedenartigen Seegang einmal bestimmt, so dürfen die äusseren Abmessungen des Gerätes, sein Gewicht und die Fesselung bei allen weiteren Messungen nicht geändert werden. Dagegen kann man die inneren Abmessungen des Gerätes verändern, ohne dass nachher unbedingt neue Vergleichsregistrierungen notwendig sind; denn die im Inneren des Gehäuses auftretenden Vorgänge beherrscht man; es sei denn, es sind grundsätzliche Konstruktionsänderungen vorgenommen worden.

Da sich der Beschleunigungsschreiber während der Vergleichsmessung in etwa 15 m Abstand vom Messpfahl befand, ist es nicht möglich, einen Vergleich von Einzelwellen durchzuführen. Es besteht kein Zweifel, dass auch markante Wellen auf ihrem Weg vom Messpfahl bis zum Beschleunigungsmessgerät grossen Änderungen unterworfen sein können. Der Vergleich muss daher statistisch erfolgen. Man kann dazu entweder Häufigkeitsverteilungen der Einzelwellen in den verschiedenen Registrierungen oder auch die errechneten Wellenspektren heranziehen.

Die Vergleichsmessungen auf der Aussenalster und am Turm Mellum Plate bezweckten eine Klärung, ob und in welcher Weise die Resultate der Beschleunigungs-Registrierungen durch eine Art "Reduktion" mittels Multiplikation mit einfachen Grössen bzw. Funktionen den objektiven

Messergebnissen angeglichen werden können. Als "ideal" wäre es zu bezeichnen, wenn sich herausstellen würde, dass eine einzige frequenzabhängige Funktion von Eichfaktoren für alle Seegangsarten eine zufriedenstellende "Reduktion" bewirkt. Dies ist indessen nicht zu erwarten, da die Beschleunigungen von der Steilheit des Seegangs abhängig sind und die Steilheit in einer ausgereiften Windsee im allgemeinen umso kleiner ist, je grösser die wellenerzeugende Windstärke und je höher entsprechend die Windsee ist. Es ist also von vornherein damit zu rechnen, dass diese Reduktions- bzw. Eichfunktionen je nach Beschaffenheit des Seegangs unterschiedlich sind. Zu gebrauchen sind sie nur dann, wenn sich die Eichkurven in Abhängigkeit vom Seegang in einer solchen Weise anordnen, dass eine Inter- und Extrapolation möglich ist. Beispielsweise wäre es denkbar, dass die Schar der Eichkurven von Funktionen verschieden grosser Krümmung, die nebeneinander liegen und nach der Höhe des Seegangs geordnet sind, gebildet wird.

b. Vergleich von Häufigkeitsverteilungen

Bei Betrachtung der sichtbaren Wellen beruht diese "Eichung" des Beschleunigungsmessgerätes auf dem Vergleich verschiedenartiger Häufigkeitsverteilungen. Die Gegenüberstellung der doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung (B_i) mit der entsprechenden objektiven kinematographischen Messung oder der Registrierung der Leitfähigkeitssonde liefert interessante Aufschlüsse über die Funktionsweise des zu prüfenden Gerätes.

Berücksichtigt man bei Häufigkeitsverteilungen nur eine Messgrösse, also entweder die Wellenhöhe oder die Periode, so spricht man von "Randverteilungen".

Mit "reduzierten" relativen Häufigkeiten sind solche gemeint, bei denen Reduktion auf eine Klassenbreite vorgenommen wurde.

Es lässt sich auch eine "zweidimensionale" Häufigkeit für die Eigenschaften der in einer Registrierung erfassten zero-crossing-Wellen ermitteln: Für jede Welle, die in der Aufzeichnung vorhanden ist, werden die Periode T (verdoppelte Halbperiode) und die Schwankungshöhe S bestimmt; für beide werden Klassen gebildet. Ein Tabellen-Formular wird so vorbereitet, dass es in der Waagerechten die getroffene Klasseneinteilung für die Höhen, in der Senkrechten die Klassen für die Perio-

den enthält. Die aus Periode und Höhe bestehenden Eigenschaften einer jeden Welle lassen sich einem "Fach" in der Tabelle zuordnen. Die Anzahlen der Fälle, die nach Abschluss der Auszählung, in den verschiedenen Fächern enthalten sind, stellen die "zweidimensionalen" absoluten Häufigkeiten für die betreffende Registrierung dar. Durch einfache Umrechnung ermittelt man die "zweidimensionale" relative (prozentuale) Häufigkeit. Die erhaltenen Häufigkeitswerte lassen sich in ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit den (in Klassen eingeteilten) Wellenhöhen und -perioden einsetzen. Schliesslich können Isolinien gleicher relativer Häufigkeit gezogen werden (vgl. Abb.30).

Die "zweidimensionalen" relativen Häufigkeiten wurden für die Registrierungen L, Bi_(mech) und Bi vom 2.12.1957, L und Bi vom 14.2.1958 sowie F und Bi vom 17.2.1958 berechnet. Für die Messungen vom 2.12.1957 und 14.2.1958 dienten $\Delta S = 5$ cm und $\Delta T = 0,5$ sec, für die Registrierung vom 17.2.1958 $\Delta S = 20$ cm und $\Delta T = 0,5$ sec als Abschnitte der Klassenbreite für die Auszählung. Die sich ergebenden absoluten Häufigkeitswerte wurden durch Multiplikation mit dem Faktor $\frac{100}{N_p \cdot \Delta S \cdot \Delta T}$ auf die einheitlichen Klassenbreiten 1 cm, 1 sec und auf die Anzahl 1 "reduziert". N_p ist die Gesamtzahl der in der Registrierung festgestellten bzw. berücksichtigten Perioden. Bei Bi war die Reduktion auf einheitliche Klassenbreite in die Rechnung zur Autokorrelations-Analyse auf der IBM 650 bereits eingeschlossen. Da im Tabellenformular pro "Fach" nur verhältnismässig wenig Fälle gefunden werden, ist die "zweidimensionale" Streuung sehr bedeutend. Es wurde daher eine erste Glättung dadurch vorgenommen, dass für jedes "Fach" ein Mittel aus dem eigenen Wert und den vier (laut nebenstehender Skizze) angrenzenden Häufigkeitszahlen gemäss $\frac{a + b + c + d + e}{5}$ gebildet wurde.



In das graphische Koordinatensystem wurden nur Häufigkeitswerte oberhalb einer Mindestgrösse (2.12.1957 und 14.2.1958: 0,1%; 17.2.1958: 0,03%) eingetragen, um die allzu grosse Streuung bei den kleinen Werten auszuschalten.

Trotz dieser Massnahmen traten in einigen Fällen im Bereich von wenigen, einander benachbarten "Fächern" starke Unterschiede infolge statistischer Schwankungen auf. Wenn beim Zeichnen der Isolinien gleicher "geglätteter reduzierter Häufigkeit" diese Oszillationen streng beachtet worden wären, so hätte sich teilweise ein zunächst ver-

wirrendes Linienbild ergeben. In solchen Fällen wurde daher ausserdem geringfügig subjektiv ausgeglichen und somit zusätzlich geglättet. Die Gegenüberstellung der von den Isolinien gegebenen Bilder für die objektiven Registrierungen L bzw. F und für die Bi- bzw. Bi_(mech)-Registrierungen ermöglicht Schlüsse hinsichtlich der Übereinstimmung der verschiedenen Messungen.

Bezeichnet man mit Ψ_{Bi} (für Bi) und Ψ (für objektive Messung) die zweidimensionalen geglätteten reduzierten relativen Häufigkeiten, so stellt der pro Klasse gebildete Quotient

$$\frac{\Psi_{Bi}}{\Psi} = \mathcal{G}_s \quad (54)$$

ein Mass für die Übereinstimmung der Registrierungen dar. Wir nennen \mathcal{G}_s die "Empfindlichkeit hinsichtlich sichtbarer Wellen".

Solltesich \mathcal{G}_s für verschiedene Registrierungen von der Art des Seegangs unabhängig zeigen, so kann man es als Eichgrösse benutzen: Hat sich für irgend eine Messung Bi die Häufigkeit Ψ_{Bi} ergeben, so würde man durch Division durch \mathcal{G}_s die "objektive Häufigkeit" Ψ erhalten. Eine Bezugsrechnung dieser Art ist nur für solche Höhen-Perioden-Bereiche erlaubt, für die \mathcal{G}_s nicht zu gross und nicht zu klein gegen 1 ist. Wird Ψ_{Bi} sehr viel grösser oder sehr viel kleiner als Ψ , so muss angenommen werden, dass die Anzeige des Beschleunigungs-Messgerätes falsch gewesen ist, so dass man durch Anbringen eines "Eichfaktors" keine zuverlässigen Ergebnisse mehr erhält. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass $\mathcal{G}_s < 0,1$ ist; denn bei Empfindlichkeiten so geringen Betrages werden (zufällige) statistische Schwankungen in der Registrierung stark vergrössert, so dass es zu fehlerhaften Ergebnissen kommen kann.

Nach einer vorläufigen, sehr groben Schätzung glauben wir, dass man die "Reduktion" unter Anwendung des "Empfindlichkeitskoeffizienten" \mathcal{G}_s durchführen darf, solange

$$0,1 \leq \mathcal{G}_s \leq 10 .$$

\mathcal{G}_s kann in dem genannten Koordinatensystem (Wellenhöhe und Wellenperiode als Koordinaten) an den betreffenden Stellen eingesetzt bzw. auch aus den Ψ_{Bi} - und Ψ -Werten graphisch ermittelt werden. Hierbei wurden nur solche \mathcal{G}_s berücksichtigt, für die die Häufigkeitswerte sowohl von Ψ als auch von Ψ_{Bi} die oben genannte Mindestgrösse besaßen (2.12.1957

und 14.2.1958: 0,1%; 17.2.1958: 0,03%). Die Verteilung der \mathcal{G}_s lässt sich schliesslich in einem zweidimensionalen System durch Isolinien darstellen (vgl. Abb. 57).

Es muss dann geprüft werden, ob die Verteilung der \mathcal{G}_s bei Registrierungen von verschiedenartigem Seegang annähernd die gleiche ist. Es wird sich zeigen, dass starke Filterung bei der Integration grosse Verzerrungen bei der Darstellung der Verteilung sichtbarer Wellen bewirkt. Schwache Filter haben - wenn ihre Wirkung nicht allzu gering ist - eher eine günstige Wirkung, was im Gegensatz zu den Ergebnissen bei der Gegenüberstellung der Energiespektren steht.

c. Vergleich der Energiespektren

Stellt man zwei Energiespektren einander gegenüber, so kann man - ähnlich wie bei den Häufigkeitsverteilungen - eine "Empfindlichkeits"- oder "Eich"-Funktion \mathcal{G} ermitteln, indem man die beiden spektralen Energiebeträge an allen verschiedenen Stellen f durcheinander dividiert. Da die Wellenenergie der "Gesamtintensität" E^* proportional ist, kann die "Empfindlichkeit" \mathcal{G} auch für Spektren der "Intensitätsdichte" bestimmt werden.

Wir bezeichnen die "objektiv" gemessene "Intensitätsdichte" (mit der Leitfähigkeitssonde oder durch Filmen) mit E_f und die aus der elektrisch doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung ermittelte "Intensität" mit $E_f^{(Bi)}$. Bildet man die Quotienten für alle Frequenzen f , so erhält man

$$\frac{E_f^{(Bi)}}{E_f} = \mathcal{G}_I^{(Bi)} \quad (55)$$

wobei \mathcal{G}_I die "Empfindlichkeit" als Funktion von f bedeutet.

Die Empfindlichkeit bzw. Eichfunktion $\mathcal{G}_I^{(Bi_{mech})}$ zwischen der repräsentativen L-Registrierung und der mechanisch doppelt integrierten Beschleunigungsmessung hat die Form

$$\frac{E_f^{(Bi_{mech})}}{E_f} = \mathcal{G}_I^{(Bi_{mech})} \quad (56)$$

Ebenso kann man die Empfindlichkeit für die Seegangs-"Intensität" ($= E_f^{(B)}$) berechnen, die man erhält, wenn man die spektrale Intensität der Beschleunigungen \mathcal{F}_f durch $(2\pi f)^4$ dividiert. Die Massnahme stellt eine rechnerische zweifache Integration nach der Analyse dar, die auf

Grund bestimmter theoretischer Annahmen durchgeführt wurde. Sie wird in Zukunft als "behelfsmässige Integration" bezeichnet werden. Es ist dann :

$$\frac{J_f}{(2\pi f)^k} = E_f^{(B)} \quad (57)$$

Die Eichfaktoren für das auf diese Weise berechnete $E_f^{(B)}$ nehmen folgende Form an :

$$G_I^{(B)} = \frac{E_f^{(B)}}{E_f} \quad (58)$$

Wie sich zeigen wird, enthalten die Eichfunktionen kurze, durch Zufälligkeiten bedingte Schwankungen von z.T. grossem Betrage. Sie sind darauf zurückzuführen, dass die zeitliche Länge der Registrierungen verhältnismässig klein ist.

Um die statistischen Schwankungen in den Eichfunktionen zu eliminieren oder wenigstens stark abzuschwächen, wurden diese Funktionen geglättet. Zu diesem Zwecke sind zunächst die G_I -Werte an solchen Stellen ausgezogen worden, an denen die Frequenz ein ganzes Vielfaches von 0,05 innehat. Alsdann wurden übergreifende Mittel für je 5 benachbarte der aufgenommenen G_I -Werte gebildet. Die geglätteten Funktionen, die mit \bar{G} bezeichnet wurden, ermöglichen übersichtlichere Vergleiche.

Solange die G_I bzw. \bar{G} -Werte zwischen ungefähr 0.1 und 3 liegen, halten wir eine "Reduktion" der mit dem Seegangs-Beschleunigungs-schreiber gewonnenen Spektren auf ihren wahren oder wenigstens weitgehend angenähert wahren Verlauf für möglich. Nach unserem vorläufigen Eindruck werden Werte $G > 3$ durch die wiederholt genannten überlagern, langperiodischen Fremdstörungen hervorgerufen, die die erhaltenen Spektralwerte der Messung unbrauchbar machen. $G > 3$ trat ausschliesslich im langwelligen Bereich auf.

E. Die Mess- und Vergleichsergebnisse

=====

Im folgenden werden nun die Ergebnisse der Messungen und ihrer Auswertung gebracht. Dabei sollen die Daten, die wir mit verschiedenen Geräten und zum Teil unterschiedlichen Auswerte-Verfahren ermittelt haben, miteinander verglichen werden. Der hauptsächliche Zweck dieser Gegenüberstellung ist es, die "Empfindlichkeit" des Seegangs-Be-

schleunigungsschreibers zum Zwecke seiner "Eichung" zu bestimmen. Wir wissen, dass dieses Gerät sehr kleine, kurze Wellen nicht messen kann. Jetzt soll es in verschiedenartigem Seegang durch geeigneten Vergleich mit der Repräsentativ-Registrierung (kinematographische Messung oder Registrierung der Leitfähigkeitssonde) "geeicht" werden. Sollte sich herausstellen, dass die sich ergebenden Eichfunktionen bei verschiedenartigem Seegang einen gleichen oder wenigstens ähnlichen Verlauf haben, dann kann gesagt werden, dass der Beschleunigungsmesser für Seegangsmessungen geeignet ist. Brauchbar wären die Registrierungen auch dann noch, wenn die Unterschiede zwischen den Eichfunktionen bei verschiedenartigem Seegang so sind, dass Inter- und schliesslich auch Extrapolation möglich wären.

Für die Messung am 2.12.1957 kann auch die Registrierung des Echo-gerätes nach Dr. Fahrentholz mit der Repräsentativ-Registrierung verglichen werden.

Ausserdem wird versucht, unsere Kenntnisse über die Eigenschaften des Seegangs an Hand der Registrierungen und ihrer Auswertung zu erweitern. Allerdings muss man sich stets der Tatsache bewusst bleiben, dass die Messungen in verhältnismässig flachem Wasser am Turm Mellum Plate auf rund 14 m Wassertiefe stattfanden; unter diesen Bedingungen bleiben nur Wellen bis zu etwa $3\frac{1}{2}$ sec Periode von der Wassertiefe unbeeinflusst.

1. Vergleichsmessung auf der Aussenalster

Am 6. Februar 1957 fand auf der Aussenalster, einem seeartigen Gewässer in Hamburg, unter Leitung von Herrn Dr. H. U. Roll eine erste Vergleichsmessung zwischen dem Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit Film-Ritz-Aufzeichnung und einer Leitfähigkeitssonde der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt im natürlichen Seegang statt.

Es wurden eine Vergleichsmessung von 5 min und gleich danach eine weitere von 20 min Dauer durchgeführt. Bei leichtem Regen herrschte zur Zeit der 1. Messung Wind aus 205° von zunächst etwa 9 kn Geschwindigkeit. Die Luft war 3 bis 4°C wärmer als das Wasser. Das Windfeld (Fetch) war rund 1,5 km lang und durchschnittlich etwa 0,6 km breit (vgl. Abb. 2).

Statistisch ausgewertet wurde nur die 1. Messung. Die Auswertung der von der Leitfähigkeitssonde gelieferten Registrierung ("L-Regi-

strierung") ergab, dass 68,4% aller verzeichneten Schwankungen zero-crossing-Wellen waren. Durch Ausmessen der sichtbaren Wellen wurden die charakteristischen Grössen des Seegangs bestimmt. Einige von ihnen sind in der folgenden Aufstellung den entsprechenden, aus der Beschleunigungs-Registrierung ermittelten Werte gegenübergestellt.

Tabelle 5

	L-Registrierung	Beschleunigungsmessung
a) Auswertung nach Vollperioden (von Berg zu Berg)	alle Wellen ($N_p=384$)	($N_p=259$)
	$\bar{T} = 0,848 \text{ sec}$	$\bar{T} = 1,159 \text{ sec}$
	$\bar{H} = 6,10 \text{ cm}$	$\bar{H} = 5,66 \text{ cm}$
	$\tilde{H}_{1/3} = 11,20 \text{ cm} = 1,84 \bar{H}$	$\tilde{H}_{1/3} = 10,01 \text{ cm} = 1,77 \bar{H}$
	$\tilde{H}_{1/10} = 15,34 \text{ cm} = 2,52 \bar{H}$	$\tilde{H}_{1/10} = 13,08 \text{ cm} = 2,31 \bar{H}$
	<u>zero-crossing-Wellen</u> ($N_p=265$)	
	$\bar{T} = 1,156 \text{ sec}$	
	$\bar{H} = 8,16 \text{ cm}$	
	$\tilde{H}_{1/3} = 12,98 \text{ cm} = 1,58 \bar{H}$	
	$\tilde{H}_{1/10} = 16,35 \text{ cm} = 2,00 \bar{H}$	
b) Auswertung nach verdoppelten Halbperioden	alle Wellen ($N_p=765$)	($N_p=518$)
	$\bar{T} = 0,800 \text{ sec}$	$\bar{T} = 1,159 \text{ sec}$
	$\bar{H} = 6,04 \text{ cm}$	$\bar{H} = 5,69 \text{ cm}$
	$\tilde{H}_{1/3} = 11,68 \text{ cm} = 1,94 \bar{H}$	$\tilde{H}_{1/3} = 11,37 \text{ cm} = 2,00 \bar{H}$
	$\tilde{H}_{1/10} = 15,86 \text{ cm} = 2,63 \bar{H}$	$\tilde{H}_{1/10} = 17,19 \text{ cm} = 3,02 \bar{H}$
	<u>zero-crossing-Wellen</u> ($N_p=523$)	
	$\bar{T} = 1,140 \text{ sec} = 0,130v$	
	$\tilde{T}_{1/3} = 1,32 \text{ sec} = 0,151v$	
	$\bar{H} = 8,30 \text{ cm}$	
	$\tilde{H}_{1/3} = 13,26 \text{ cm} = 1,60 \bar{H}$	
	$\tilde{H}_{1/10} = 17,02 \text{ cm} = 2,10 \bar{H}$	

Die Wellenhöhen wurden aus der Beschleunigungsmessung versuchsweise dadurch ermittelt, dass man die Beschleunigungsgrößen durch die ins Quadrat erhobenen Kreisfrequenzen dividierte; das bedeutet, dass man die Wasserstandsschwankungen so behandelte, als seien sie Sinuswellen. Es bedeuten: v die Windgeschwindigkeit in Knoten, N_p die Gesamtzahl der Perioden bzw. Halbperioden in der Registrierung. Für die zero-crossing-Wellen ist die Übereinstimmung mit den von M.S.LONGUET-HIGGINS (Lit.11) gegebenen Werten befriedigend.

Aus der Autokorrelations-Analyse der L-Registrierung erhielten wir die Periode maximaler Energie beim Frequenzspektrum

$$T_{\max} = 1,45 \text{ sec} = 0,166 \text{ v.}$$

Beim Vergleich verschiedener charakteristischer Periodenwerte ergibt sich :

$$\frac{\tilde{T}_{1/2}}{\bar{T}} = 1,16; \quad \frac{T_{\max}}{\bar{T}} = 1,27; \quad \frac{T_{\max}}{\bar{T}} = 1,10$$

(vgl. auch H.WALDEN und H.G.FARMER, Lit.28).

Die relativen Häufigkeitsverteilungen der bei der 1.Messung auf der Aussenalster mit verschiedenen Verfahren ermittelten doppelten Halbperioden werden in Abb.43 zum Vergleich gebracht. Es entspricht durchaus der Erwartung, dass das Häufigkeitsmaximum bei der Auswertung nach allen Wellen bei kleineren Perioden liegt, als wenn nur zero-crossing-Wellen berücksichtigt werden. Auch bei den der B-Registrierung entnommenen verdoppelten Halbperioden liegt die Häufigkeitsspitze bei verhältnismässig langen Wellen. Es zeigt sich hier, dass die Leitfähigkeitssonde die kurzen, kleinen Wellen bei der Messung erfasst, während das Beschleunigungs-Messgerät aus den im Abschnitt B1 näher bezeichneten Ursachen Wellen unterhalb einer bestimmten Periode nicht oder nur unvollkommen registriert. Aus dem gleichen Grunde erhält man für die B-Registrierung eine bedeutend grössere mittlere Periode \bar{T} als aus der entsprechenden L-Registrierung (vgl.Tab.5). Auch die Unterschiedlichkeit der Zahlen N_p in dieser Tabelle ist auf diesen Umstand zurückzuführen. Greift man eine Anzahl markanter, in beiden Registrierungen gut erkennbarer Wellen heraus, und vergleicht ihre Höhen (bei der Beschleunigungsregistrierung durch Multiplikation mit $\frac{1}{(2\pi f)^2}$ berechnet) sowie ihre Perioden, so zeigt sich auch, dass das Beschleu-

nigungs-Messgerät verhältnismässig kleine Wellen nicht so gut erfasst wie die Leitfähigkeitssonde. In Abb.44 sind die Differenzen der (mit $\frac{1}{(2\pi f)^2}$ multiplizierten) Höhen in B und entsprechender Höhen in L für bestimmte markante Wellen gegen die entsprechenden Periodendifferenzen aufgetragen worden. Bei nahezu allen markanten Wellen sind die Höhen-differenzen negativ; d.h., dass der Wellenschreiber eine kleinere Wellenhöhe verzeichnete als die Sonde.

Entsprechende Unterschiede treten bei der Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen (Abb.45) auf. Einige charakteristische Einzelheiten prägen sich sowohl der Verteilung der aus der L-Registrierung entnommenen Wellenhöhen als auch jener aus der Originalregistrierung der nicht integrierten Beschleunigung (B-Registrierung) auf. Diese Übereinstimmung wurde positiv für die Verwendbarkeit des Beschleunigungs-Messgerätes gewertet. Gewisse Fehler in der Höhenverteilung aus der B-Registrierung sind mit Sicherheit darauf zurückzuführen, dass die Integration wegen der Annahme, die Schwankungen seien Sinuswellen, unzureichend ist.

Ordnet man alle in einer Registrierung vorhandenen Wellenhöhen der Grösse nach, so lässt sich von einem Kollektiv, das die 10%, 20%,... 90% höchsten Wellen umfasst, leicht dessen kleinste Wellenhöhe $H_{\%}$ (vgl. Abschn. D 2) feststellen. Vergleicht man die $H_{\%}$ mit \bar{H} durch die Beziehung $H_{\%} = c_{\%} \bar{H}$, so erhält man verschiedene $c_{\%}$. Trägt man $c_{\%}$ in der Ordinate gegen die zugehörige Prozentzahl auf, so ergibt sich die sog. "charakteristische Kurve". Abb.46 gibt einen Vergleich der "charakteristischen Kurven" für die L-Registrierung auf der Aussenalster mit dem von M.S.LONGUET-HIGGINS (Lit.11) angegebenen Verlauf. Für "zero-crossing Wellen" ist die Übereinstimmung gut. Dagegen verläuft die Kurve für alle Wellen der Registrierung zu steil, ein Ergebnis, das zu erwarten war. Die in Abb.46 angegebenen Einzelpunkte beziehen sich auf die Höhen $\tilde{H}_{1/3}$ und $\tilde{H}_{1/10}$, also mittlere Höhen für das obere Drittel bzw. obere Zehntel aller Wellenhöhen.

Sowohl die L-Registrierung als auch die Registrierung der Beschleunigungen der 1. Messung auf der Aussenalster wurden der Autokorrelationsanalyse unterworfen. Zugrunde lagen time-series für äquidistante Werte entlang der Abszisse (Zeitachse) von 0.305 sec. Bei der Festlegung dieser Grösse war berücksichtigt worden, dass sich bei der Auswertung nach sichtbaren Wellen als häufigste Periode der L-Registrierung 0,6 sec,

der B-Registrierung 1,0 sec und als durchschnittliche Perioden 0,8 bzw. 1,16 sec ergeben hatten. Die Zeitgrösse 0,305 sec entsprach 4 Einheiten des als Masstab angelegten Rasters. Die time-series umfasste bei 300 sec Messdauer $\frac{300}{0.305} = n = 984$ Werte.

Die Gesamt-Intensität E^* ergab sich objektiv gemessen (Leitfähigkeitssonde) zu $E^* = 23,3 \text{ [cm}^2\text{]}$.

Abb.47 zeigt das Spektrum der Intensitätsdichte E_f im Seegang, das man mittels Autokorrelations-Analyse der L-Registrierung erhält, und das "Intensitäts"-Spektrum wie es aus der B-Registrierung ermittelt wurde. Dabei wurde so verfahren, dass die B-Registrierung in formal gleicher Weise analysiert wurde, wie die L-Registrierung und dann mittels Division durch die zur 4. Potenz erhobene Kreisfrequenz behelfsmässig doppelt integriert wurde.

Das Spektrum der "Seegangs-Intensitäten" aus der L-Registrierung zeigt eine deutliche Spitze bei $T = 1,45$ sec; es fällt flach in Richtung der kleinen, steil in Richtung der grösseren Perioden ab. Die Neben-Maxima dürften grösstenteils auf Zufallsschwankungen zurückzuführen sein. Die höheren E^* -Werte bei den Perioden $> 2,6$ sec werden durch das Auftreten von Störeinflüssen hervorgerufen. Ähnliche "Schein-Energien" hat TUCKER (Lit.23) beobachtet. Das B-Spektrum besitzt sein Maximum bei einer etwas grösseren Periode (1,5 sec). Im Gebiet der kleineren Perioden bringt es erwartungsgemäss geringere "Seegangsintensitäten" als das Spektrum aus der L-Registrierung. In Richtung grosser Perioden steigt es dagegen nach einem Abfall zwischen 1,5 und 1,8 sec plötzlich steil an (in Abb.47 punktiert gezeichnet). Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass sich die Störeinflüsse besonders stark bemerkbar machen, wenn sie im Zuge der doppelten Behelfsintegration durch die zur 4. Potenz erhobenen kleinen Frequenzwerte dividiert werden.

Als "Empfindlichkeit" oder "Eichfaktor" $G_I(f)$ hatten wir den Quotienten $E_f^{(B)}/E_f^{(L)}$ an jeder Stelle der Frequenzskala bezeichnet. Dabei bedeuten $E_f^{(B)}$ und $E_f^{(L)}$ die f-spektralen Energiedichten oder die f-spektralen "Seegangsintensitäten", wie sie sich aus der B- bzw. aus der L-Registrierung ergeben und wie sie in Abb.47 dargestellt worden sind. Die Abb.48 zeigt die Verteilung dieser "Eichfunktion" G_I entlang der Frequenz- bzw. Periodenskala. Bei einer Periode von etwa 1,5 sec nimmt G_I den Wert 1 an. Für längere Perioden sind die "Eichfaktoren" grösser; wahrscheinlich nehmen sie für lange Perioden sehr grosse Werte

an. Sehr klein ist σ_1 dagegen für Periode $T \leq 0,9$ sec. Die Ursache dafür ist in Abschnitt B1 ausführlich diskutiert worden.

2. Leuchtturm Mellum Plate : Vergleichsmessung am 2.12.1957

Bei der Vergleichsmessung vom 2.12.1957 am Leuchtturm Mellum Plate wurden gleichzeitig der Seegangs-Beschleunigungsschreiber (B) nach LANG, das Echogerät (E) nach Dr.FAHRENTHOLZ, das Leitfähigkeitsgerät (L) mit 3 m langen Elektroden und zu dessen Eichung die kinematographische Messung vom Turm aus eingesetzt. Die Lage und die Anordnung der Messapparate sind im Abschn.B bereits beschrieben worden.

Die Messung begann um 0925 Uhr (MEZ) und erstreckte sich über 15 min. Zu dieser Zeit herrschte Wind aus 300° , dessen Geschwindigkeit nach dem Zustand der Windsee auf 16 kn (4-5 Bft) geschätzt und 5 m oberhalb des Leuchtturm-Daches mit einem Handwindmesser zu 18 kn gemessen wurde. Der Wind war mässig böig. Gegen nördlichere Winde als 290° bieten die Inseln Oldeog und Wangerooge sowie die ihnen vorgebauten Bühnen keinen Schutz am Turm Mellum Plate. Ausser der Windsee wurde zur Zeit der Messung etwas NNW-Dünung beobachtet. Es herrschte nahezu Hochwasser, so dass die Wassertiefe am Messpfahl zu etwa 14 m veranschlagt werden darf. Mit $6,9^\circ\text{C}$ war das Wasser um $0,1^\circ$ wärmer als die Luft ($6,8^\circ$). Visuell wurde die kennzeichnende Wellenhöhe $\tilde{H}_{1/3}$ auf etwa 0,6 m geschätzt.

Hinsichtlich der Eichung der Leitfähigkeitssonde und des Echogerätes ist im Abschnitt B 2 bereits ausführlich berichtet worden.

Nunmehr steht die Feststellung einer "Empfindlichkeitsfunktion" σ_1 für die doppelt integrierte Beschleunigungs-Registrierung im Vordergrund. Die Integration wurde sowohl mechanisch als auch elektrisch (Analogrechner) durchgeführt. Als objektive repräsentative Messung diente die auf kinematographischem Wege geeichte L-Registrierung.

a) Auswertung nach sichtbaren Wellen

Die statistische Auswertung nach "sichtbaren Wellen" wurde im wesentlichen nur für verdoppelte Halbperioden, jedoch getrennt für alle Wellen und für zero-crossing Wellen durchgeführt.

64% aller Wellen sind bei der L-Registrierung zero-crossing-Wellen.

In der folgenden Tabelle 6 werden einige statistische Werte für verdoppelte Halbperioden gebracht. Dabei bedeuten \tilde{H}_n die häufigste

Tabelle 6

	L-Registrierung	E-Registrierung	B-Registrierung	Bi (mech) -Registrierung	Bi-Registrierung
Alle Wellen	(N _p = 872)	(N _p = 577)			
\bar{T}	= 2,0 sec	= 2,8 sec	\bar{T}	= 1,5 sec	
\tilde{T}_h	= 1,0 sec	= 2,6 sec			
\tilde{H}_h	= 0,27 m	= 0,38 m			
$\tilde{H}_{1/3}$	= 0,53 m	= 0,59 m			
$\tilde{H}_{1/10}$	= 0,70 m	= 0,72 m			
\tilde{H}_h	= 0 (*) m	= 0,32 m			

zero-crossing-Wellen	(N _p = 556)	(N _p = 524)				
\bar{T}	= 3,1 sec	= 3,1 sec	\bar{T}		\bar{T}	= 3,1 sec
\tilde{T}_h	= 2,2 sec	= 2,6 sec	\tilde{T}_h	= 1,3 sec	\tilde{T}_h	= 3,0 sec
\tilde{H}_h	= 0,40 m	= 0,41 m			\tilde{H}_h	= 0,52 m
$\tilde{H}_{1/3}$	= 0,61 m	= 0,60 m			$\tilde{H}_{1/3}$	= 0,87 m
$\tilde{H}_{1/10}$	= 0,76 m	= 0,73 m			$\tilde{H}_{1/10}$	= 1,14 m
\tilde{H}_h	= 0,32 m	= 0,32 m			\tilde{H}_h	= 0,47 m
					\tilde{T}	= 3,1 sec
					\tilde{T}_h	= 2,2 sec
					\tilde{H}_h	= 0,33 m
					$\tilde{H}_{1/3}$	= 0,55 m
					$\tilde{H}_{1/10}$	= 0,73 m
					\tilde{H}_h	= 0,22 m

(v = Windgeschwindigkeit in kn, angesetzt zu 16 kn)

*) Der Wert $\tilde{H}_h = 0$ für die L-Registrierung besagt, daß die Klasse mit den kleinsten \tilde{H} -Werten die größte Häufigkeit aufweist

Wellenhöhe, \tilde{T}_h die häufigste "Periode". Für die B-Registrierung sind keine Werte der Wellenhöhe aufgeführt, da die Art der "Integration" (Division durch zur 4. Potenz erhobenen Kreisfrequenz) als unzureichend angesehen wird. Die $Bi_{(mech)}$ -Registrierung ist die auf mechanischem Wege, die Bi-Registrierung die mit dem Analog-Rechner doppelt integrierte und gefilterte Beschleunigungsmessung; es ergibt sich dann also eine Registrierung der Auslenkungen. Es muss erwartet werden, dass die aus der $Bi_{(mech)}$ - und der Bi-Registrierung ermittelten statistischen Größen von der Repräsentativ-Messung (L-Registrierung) abweichen. Sinn der Gegenüberstellung ist es, die "Empfindlichkeit" des Beschleunigungs-Messgerätes zu bestimmen, was auf eine "Eichung" des Gerätes hinausläuft.

Als massgebende Repräsentativwerte sind die unter zero-crossing-Wellen für die L-Registrierung verzeichneten

$$\tilde{H}_{1/3} = 0,61 \text{ m und } \tilde{T} = 3,1 \text{ sec}$$

anzusehen.

Bildet man aus Tab.6 für die zero-crossing-Wellen der L-Registrierung den Quotienten $\frac{\tilde{T}}{\tilde{T}_h}$, so erhält man $\frac{3,1}{2,2} = 1,4$.

Abb.49 bringt die "charakteristischen Kurven" (vgl.S.36) für alle Wellen und für die zero-crossing-Wellen der L-Registrierung sowie zum Vergleich die Werte von M.S.LONGUET-HIGGINS (Lit.11). Während die Kurve für alle Wellen wesentlich steiler als die Verteilung nach LONGUET-HIGGINS verläuft, ergeben die zero-crossing-Wellen einen etwas flacheren Verlauf. Bei Auswertung nach vollen Perioden würde man nach den vorliegenden Erfahrungen eine noch flachere "charakteristische Kurve" erhalten. - Die über den Kurven liegenden Einzelpunkte geben die Werte für $\tilde{H}_{1/3}$ und $\tilde{H}_{1/10}$ wieder; wie erwähnt, handelt es sich dabei um Höhen-Mittelwerte für den Wellenanteil, auf den sich die Höhenangabe bezieht.

Die entsprechenden "charakteristischen Kurven" für das Echogerät enthält Abb.50. Sowohl für "alle Wellen" als auch für zero-crossing-Wellen verlaufen sie flacher als nach der Theorie von LONGUET-HIGGINS. Dass dies auch bei "allen Wellen" der Fall ist, liegt daran, dass - wie noch genauer gezeigt werden wird - bei dem Echogerät die kleinen, kurzen Wellen zum grossen Teil nicht in die Registrierung eingehen.

Abb.51 zeigt die charakteristischen Kurven für die $Bi_{(mech)}$ -Registrierung (mechanische Integration) und, für die Bi-Registrierung (elektrische

Integration), für die L-Registrierung und zum Vergleich die Kurven nach LONGUET-HIGGINS. Es zeigt sich, dass die Kurven für L wesentlich flacher verlaufen als die theoretische Verteilung, was wahrscheinlich auf den Einfluß der die Windsee überlagernden längeren, verhältnismäßig flachen Dünung zurückzuführen ist. Die Kurve für $B_{i(\text{mech})}$ weicht stärker von L und LONGUET-HIGGINS ab als B_i . Sie verläuft steiler als alle charakteristischen Kurven; der Anteil hoher Wellen ist also grösser, der Prozentsatz niedriger Wellen kleiner als theoretisch zu erwarten.

Wir bringen nun eine Anzahl von Verteilungen der relativen Häufigkeit. Von Säulendarstellungen wurde Abstand genommen, weil sich Linienzüge ("Kurven") zeichnerisch besser zum Vergleich bringen lassen.

In Abb.52 sind für alle Wellen die Verteilungen der reduzierten relativen Häufigkeiten verdoppelter Halbperioden aus den Registrierungen L, E und B einander gegenübergestellt. Die Reduktion der Häufigkeiten war mit Rücksicht darauf erforderlich, dass bei der Auswertung Klassen verschiedener Breite benutzt worden waren; sie sind nunmehr auf ein und dieselbe Klassenbreite bezogen. B wurde der ursprünglichen, also nicht-integrierten Beschleunigungsregistrierung entnommen. Es zeigt sich, dass kurze Wellen durch das Echogerät nahezu überhaupt nicht erfasst werden. Bei der B- und der L-Registrierung ist die Verteilung in grossen Zügen ähnlich. Dass die "Perioden" in der B-Registrierung im Bereich $(2 \cdot \frac{\bar{T}}{2}) < 1,7$ sec überwiegend häufiger als bei der L-Registrierung sind, hat seinen Grund in folgendem: Unregelmässigkeiten im Profil einer grösseren Welle werden in vielen Fällen zur Umkehrung des Vorzeichens bei der Beschleunigung führen. Dadurch werden in der (nicht integrierten) B-Registrierung kürzere Perioden bevorzugt. Im Zusammenhang damit sind die verdoppelten Halbperioden im Bereich $> 1,7$ sec in der B-Registrierung weniger häufig als bei der objektiven Registrierung der Auslenkungen (L-Messung). Aus dem gleichen Grunde ist die Grösse \bar{T} in Tab.6 für die B-Registrierung kleiner als in den anderen Spalten. - Für die $B_{i(\text{mech})}$ und B_i -Registrierungen wurde auf die Darstellung der Verteilungen aller Wellen verzichtet, da für die doppelt integrierten Registrierungen die Betrachtung von zero-crossing-Wellen von grösserer Bedeutung ist.

Einen guten Überblick über die Zusammensetzung eines Seegangs pflegen Verteilungen der Extremwert-Ordinaten (vgl. S.33 und S.35) zu geben. Wellenberge, deren Kämme in der Registrierung unter dem Mittelniveau

verzeichnet sind, erscheinen im negativen Abszissen-Bereich. Die Verteilung der Minima (Wellentäler) sind um die Ordinatenachse durch den Abszissenwert 0 umgeklappt worden. Im Negativen erscheinen auf diese Weise Wellentäler, deren Minimum in der Registrierung oberhalb des Mittelniveaus liegt. Die Abb. 53a und b enthalten reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen für die Ordinatenwerte (Wasserhöhen) der Maxima und der Minima in den Registrierungen L, Bi und Bi_(mech). Auffällig ist in Abb. 53a, dass die Bi-Registrierung im Bereich der kleinen Wellenhöhen grössere Häufigkeit erzielt als die Objektiv-Messung. Dies ist als eine Folge der scharfen Filterung bei der Integration im Gebiet der hohen, langen Wellen anzusehen. Zu beachten ist auch, dass am 2.12.1957 bei Mellum Plate relativ hohe Wellenberge häufiger waren als entsprechend tiefe Wellentäler. - Für Bi_(mech) verläuft die Verteilung der Extremwert-Ordinaten dagegen flacher (Abb. 53b) als für L. Die Ursache für diese Erscheinung ist hauptsächlich in der unzulänglichen Filterung bei der mechanischen Integration zu suchen.

Aus der L-Registrierung wurden 51 markante Wellen herausgesucht und zu bestimmten Klassen zusammengestellt. Eine Verteilung der absoluten Häufigkeit für Vollperioden gemessen von Tal zu Tal enthält Abb. 54. Das Maximum der Häufigkeit liegt zwischen 3 und 4 sec. Das Ergebnis dieser Betrachtung hat lediglich für die Wahl der Grössen Δt bei der Aufstellung der time-series und m bei der Berechnung des Spektrums Bedeutung. Ein Vergleich mit entsprechenden Verteilungen für E, Bi usw. erübrigt sich daher.

Wenn alle Schwankungen in einer Registrierung, also auch die vielen kleinen Wellen an den Hängen grösserer "Wogen", als selbstständige "Wellen" angesehen werden, so muss sich - falls das Gerät alle Schwankungen verzeichnet - eine andere Häufigkeitsverteilung ergeben, als wenn nur zero-crossing-Wellen berücksichtigt werden. Abb. 55 zeigt diesen Unterschied mit grosser Deutlichkeit für die L-Registrierung. Beim Echogerät damaliger Ausführung dagegen, das nur einen geringen Teil der kleinen Wellen erfasste, stimmen die Häufigkeitsverteilungen für "alle Wellen" und für zero-crossing-Wellen im Fall des 2.12.57 gerade überein (Abb. 56). Bei höherem Seegang, bei dem auch grössere Wellen zum Teil das Mittelniveau des Wasserstands nicht anschneiden können, würden die beiden Verteilungen stärkere Unterschiede aufweisen.

Unter "Höhe der Schwankung" verstehen wir den Wasserstandsunter-

schied vom Wellental bis zum nächsten Wellenberg, bzw. vom Wellenberg bis zum nächsten Tal. In einer Registrierung entspricht sie dem Ordinaten-Unterschied zwischen zwei Abszissenstellen, die durch eine "Halbperiode" festgelegt sind. Die Verteilung der prozentualen Häufigkeiten solcher "Schwankungshöhen" ist für die L-Registrierung und die E-Registrierung in Abb.57 dargestellt. Bei Berücksichtigung aller Wellen, also auch der Nicht-zero-crossing-Wellen, fällt das Häufigkeitsmaximum bei der L-Registrierung auf sehr kleine Höhen. Der Vergleich mit der entsprechenden Kurve für die E-Registrierung zeigt wieder, dass das Echogerät die kleinen Wellen nur zu einem geringen Teil erfasst. Für zero-crossing-Wellen dagegen sind die beiden Häufigkeitsverteilungen einander ähnlich. Würde man die Kurve für die L-Registrierung glätten, so würde man das Maximum zwischen 0,3 und 0,35 m erhalten.

Ausserdem wurden der B-Registrierung die zu Halbperioden gehörenden Ordinaten-Unterschiede, also "Schwankungen" der Beschleunigung entnommen ($N_p = 1222$). Entsprechend der Art der Auswertung sind sie in Rastereinheiten gegeben. Die Verteilung der relativen Häufigkeit (Abb.58) hat ihr Maximum bei 3,5 Rastereinheiten entsprechend etwa $150 \text{ [cm sec}^{-2}\text{]}$. Die Kurve darf nicht mit den L- und E-Verteilungen verglichen werden. Dabei zeigt sich erwartungsgemäss, dass der Beschleunigungsschreiber für die Messung sehr kleiner Wellen nicht "empfindlich" genug ist. Die Form der Kurve lässt jedoch erkennen, dass er kleine Wellen besser erfasst als das Echogerät damaliger Ausführung.

Von besonderem Interesse ist der Vergleich der doppelt integrierten und gefilterten Beschleunigungsregistrierungen $B_{i(\text{mech})}$ und B_i mit der repräsentativen L-Registrierung. Reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der verdoppelten Halbperioden von zero-crossing-Wellen werden für die Registrierungen L, B_i und $B_{i(\text{mech})}$ in Abb.59 einander gegenübergestellt. Die Rechnungen sind kontrolliert. Auffällig sind insbesondere die starken Schwankungen in der Verteilung für L im Bereich von 2 bis etwa 5 sec. Dass der Wert für L bei 3,7 sec so stark herausfällt, ist wahrscheinlich auf Zufallseinflüsse zurückzuführen. Einen sehr klaren, wenig gestörten Verlauf mit einem gut ausgebildeten Maximum bei $T = 22 \text{ sec}$ zeigt die Verteilung von B_i . Dass die Verteilung für $B_{i(\text{mech})}$ im ganzen etwas in Richtung der grösseren Perioden verschoben ist, beruht hauptsächlich auf der zu schwachen Filterung bei der mechanischen Integration

im langperiodischen Bereich.

Die entsprechende Häufigkeits-Verteilung der Wellenhöhen enthält die Abb.60. Es macht sich hier bemerkbar, dass das Filter bei der elektrischen Integration die langen und somit grössten hohen Wellen übermässig reduzierte. Die Abweichungen der Verteilung von $Bi_{(mech)}$ dürften ausser auf die unzulängliche Filterung auch auf die Ungenauigkeit beim Nachfahren der Kurven zurückgehen.

In Abb.61 sind die absoluten Häufigkeitsverteilungen der verdoppelten Halbperioden der zero-crossing-Wellen für die Registrierungen L, Bi und $Bi_{(mech)}$ einander gegenübergestellt. - Während der Höchstwert der Häufigkeit bei L und Bi an der gleichen Stelle liegt, ist er bei $Bi_{(mech)}$ in Richtung der grösseren Perioden verschoben. Die Nebenmaxima der "Kurve" für L sind wahrscheinlich ein Effekt von Zufallsschwankungen. Bei den Höhen der Schwankungen (Abb.62) haben die Häufigkeitsverteilungen einen recht unterschiedlichen Verlauf. Die von $Bi_{(mech)}$ gelieferte Verteilung gibt eine zu grosse absolute Häufigkeit hoher Wellen, während Schwankungshöhen zwischen rund 0,2 und 0,5 m wesentlich zu selten verzeichnet werden. Die Unterschiede sind - wie man auch durch Vergleich mit Bi feststellen kann - auf unzulängliche Integration mit dem mechanischen Integrator zurückzuführen. Dass Bi in Richtung der kleineren Schwankungshöhen gegenüber L verschoben ist, geht wahrscheinlich auf Filterwirkungen zurück.

In Abb. 63 werden die zweidimensionalen geglätteten reduzierten relativen Häufigkeitsverteilungen für Bi und L einander gegenübergestellt. Die entsprechenden Verteilungen für $Bi_{(mech)}$ findet man in Abb.30. Die Isolinien bezeichnen Häufigkeiten in Prozent aller registrierten zero-crossing-Wellen. Benutzt wurden Klassenbreiten von 5 cm (Höhe) bzw. 0.5 sec (Periode). Beim Zeichnen der Isolinien erschien eine gewisse Ausgleichung bzw. Glättung empfehlenswert, um das Bild übersichtlich zu halten. Die Unterschiede zwischen den beiden Teilen der Abb.63 sind nicht allzu gross. Ihr Maximum erreichen die Häufigkeitswerte für L bei $S = 0,22$ m und $T = 1,8$ sec, für Bi bei $S = 0,20$ m und $T = 2,0$ sec; in der Verteilung für L deutet sich ein Nebenmaximum bei $S = 0,29$ m und $T = 2,3$ sec an. Eine ganz andere Form der Isolinien ergibt sich für die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung aus der $Bi_{(mech)}$ -Registrierung (Abb.30). Das Häufigkeitsmaximum liegt nahe $S = 0,16$ m und $T = 1,7$ sec.

Als "Empfindlichkeit hinsichtlich sichtbarer Wellen" \mathcal{G}_s haben wir

den Quotienten des Häufigkeitswertes für Bi bzw. $Bi_{(mech)}$ durch die entsprechenden Grössen für L oder F bezeichnet (vgl. Abschn. 54b, S. 73). Führt man die Division für die einzelnen (zweidimensionalen) Klassen aus, so ergibt sich eine Verteilung der G_s -Werte im Koordinatensystem (S,T). Es lassen sich Isolinien zeichnen, die in Abb. 64a für Bi gegen L und in Abb. 64b für $Bi_{(mech)}$ gegen L dargestellt sind. Berücksichtigt wurden nur solche Quotienten, für die die relativen Häufigkeiten sowohl im Zähler als auch im Nenner $\geq 0,1\%$ waren. Im zentralen Gebiet der Abb. 64a (Bi) ergeben sich G_s -Werte in der Nähe des "idealen" Wertes 1. Für $Bi_{(mech)}$ gegen L erhält man eine völlig andersartige, wesentlich unruhigere Verteilung. Die Ursache dafür ist darin zu suchen, dass die mechanische Integration stärkere Fehler enthält als die elektrische (Bi).

b) Autokorrelations-Analyse

d. Gesamt-Intensität
.....

Um die Spektren der "Seegangs-Intensität" zu finden, ist jede der Registrierungen L, B, $Bi_{(mech)}$ und Bi der Autokorrelations-Analyse unterworfen worden. Die folgende Gegenüberstellung gibt an, wieviele Ordinatenwerte zur Autokorrelations-Analyse bei den verschiedenen Registrierungen herangezogen wurden; d.h., wieviel Werte die time-series (Stelle Null mit einbezogen) umfasste. Ausserdem enthält die Tabelle die Anzahl der Punkte auf der Abszisse (Null einbezogen), für die das Spektrum jeweils berechnet wurde.

Tabelle 7

	L	B	$Bi_{(mech)}$	Bi
n (Anzahl der time-series-Werte)	1921	1921	1933	2158
m +1 (Spektrumspunkte)	46	46	46	61

Mit Hilfe der time-series aus der L-Registrierung wurde zunächst der mittlere Wasserstand an den Elektroden berechnet. Zur Kontrolle der Nullpunktlage während der Messung wurden Teil-Mittelwerte von je 100 Einzelwerten bestimmt. Es ergab sich eine Abnahme des Wasserstandes um rund 10 cm im Laufe der Messung. Die Wasserstands-Erniedrigung

ist eine Folge der Gezeit.

Auch für die B-Registrierung wurde die Nullpunktstabilität durch Bildung von Teil-Mittelwerten (je 200 Einzelwerte) geprüft. Die sich ergebenden Nullpunktsschwankungen waren klein.

Von grosser Bedeutung ist die Bestimmung der Gesamt-Intensität "unter dem Spektrum".

Bei der Autokorrelationsanalyse erhält man für die Autokorrelationsfunktion bei der Zeitverschiebung $p \cdot \Delta t = 0$ den doppelten Mittelwert der quadrierten Ordinatenwerte (mean-square) an den Stellen t_j ; dieser Wert ist $= E^*$, die sog. "Seegangs-Intensität". Für die L-Registrierung vom 2.12.1957 ergibt sich bei dieser als repräsentativ zu betrachtenden Berechnungsmethode $E^* = 530 \text{ [cm}^2\text{]}$.

Setzt man voraus, dass die Wellenhöhen im Seegang eine Gauss-Verteilung besitzen, so lässt sich E^* auch aus der Häufigkeitsverteilung der benutzten time-series über eine Zeichnung nach Art der Abb.41 finden (vgl. Abschn. D 3c S.58ff). Sind die Werte einzeln nach der zwischen L-Registrierung und der objektiven kinematographischen Messung bestehenden Eichkurve geeicht, so erhält man für die L-Registrierung $E^* = 500 \text{ [cm}^2\text{]}$

Berechnet man für $E^* = 530 \text{ [cm}^2\text{]}$ die kennzeichnende Wellenhöhe $\tilde{H}_{1/3} = 2,83 \cdot \sqrt{E^*}$, so erhält man $\tilde{H}_{1/3} = 0,65 \text{ m}$. Bei der Auswertung nach sichtbaren Wellen hatte sich $\tilde{H}_{1/3} = 0,61 \text{ m}$ ergeben. Die Übereinstimmung ist also gut.

Es liegt nahe, diese Werte mit den Seegangsdiagrammen von W.J. PIERSON, JR., G. NEUMANN und R.W. JAMES (Lit.18) und von H. WALDEN (Lit.27) zu vergleichen. Nach beiden Diagrammen erhält man für die Windgeschwindigkeit $v = 16 \text{ kn}$ und die bei Mellum Plate gegebenen Fetch-Verhältnisse $\tilde{H}_{1/3} \approx 1,4 \text{ m}$ unter der Voraussetzung grosser Wassertiefe. Da die Wassertiefe in der Umgebung des Messpfahls etwa 14 m beträgt, kommt ein Teil des Windseespektrums, nämlich die Seegangsanteile mit Perioden $\approx 3,5 \text{ sec}$ (annähernd) nicht voll zur Ausbildung. Da die kennzeichnende Periode $\tilde{T}_{1/3}$ für eine ausgereifte Windsee bei $v = 16 \text{ kn}$ bei etwa 4,5 sec und die Periode maximaler Energie, T_{\max} , nahe 6,5 sec liegen, überrascht es nicht, dass in dem am 2.12.57 gemessenen Seegang $\tilde{H}_{1/3}$ nur 0,61 bis 0,65 m erreichte.

Mit dem Repräsentativ-Wert $E^* = 530 \text{ [cm}^2\text{]}$ vergleichen wir nunmehr die E^* -Werte, wie sie sich aus den Registrierungen B_i und $B_{i(\text{mech})}$ ergeben. Der Wert B stellt die Gesamt-Intensität der (nicht integrierten) Beschleunigung dar.

Tabelle 8

Repräsentativ-Wert (L)	Gesamt-Intensität E*	
	530	[cm ²]
Bi	425	[cm ²]
Bi _(mech)	1181	[cm ²]
B	17550	[gal ²]

Die Unterschiede zwischen L, Bi_(mech) und Bi erklären sich aus der Filterungsart bei der Integration. Bi wurde zu stark, Bi_(mech) wesentlich zu schwach gefiltert.

β. Die Form des Spektrums

Wir wenden uns nun der spektralen Verteilung der "Seegangs-Intensität" E* bzw. der Energiedichte in Abhängigkeit von der Frequenz bzw. der Periode zu.

Bei der Autokorrelations-Analyse der B-Registrierung erhält man das Spektrum des auf die Frequenzeinheit bezogenen Quadrats der Beschleunigung. Zur Ermittlung der Grösse der Beschleunigung aus den Auslenkungen in den Registrierfilmen steht ein Eichfaktor zur Verfügung, der in der Hamburgischen Schiffsbauversuchsanstalt bestimmt worden ist (vgl. Abschn. B1 S. 6). Dass der Eichfaktor eine Funktion der Wellenfrequenz ist, wurde zunächst vernachlässigt. Diese "Intensität der Beschleunigung" (J) ist in Abb. 65 für die Messung Mellum Plate 2.12.1957 dargestellt und mit den entsprechenden Grössen aus den Messungen auf der Aussenalster und beim Turm Mellum Plate vom 14.2. und 17.2.1958 zum Vergleich gebracht worden. Ihr Maximum erreicht die "Beschleunigungsintensität" für die Messung vom 2.12.57 bei $T \approx 2,4$ sec. In Richtung der grösseren Perioden nimmt J sehr rasch ab. Nach der anderen Seite fällt das Spektrum weniger steil, aber recht unregelmässig ab. Diese Schwankungen sind vermutlich insofern Erscheinungen des Zufalls, als während des Messintervalls am Messplatz des Beschleunigungsschreibers in etwa 15 m Abstand vom Messpfahl möglicherweise andere Wellenarten bevorzugt aufgetreten sind als an den Stäben der Leitfähigkeitssonde. Ausserdem stellt die Registrierung nur einen verhältnismässig kleinen Ausschnitt aus dem Seegangsgeschehen dar. Die Zunahme von J im Bereich der Perioden $T > 10$ sec wird durch die bereits oben erwähnten Störerscheinungen hervorgerufen.

Das in Abb.65 dargestellte Spektrum für den 2.12.1957 wurde an einer Reihe von Stellen durch die zur 4.Potenz erhobene Kreisfrequenz dividiert. Diese Operation entspricht für Sinuswellen einer doppelten Integration und einer Quadrierung; es ergibt sich die Intensitätsdichte. Das Ergebnis findet man in Abb.66. Das auf diese Weise ermittelte Spektrum der "Seegangs-Intensität" ist dort mit dem entsprechenden Spektrum aus der L-Registrierung und aus der $B_i(\text{mech})$ -Registrierung, also der mechanisch zweimal integrierten und gefilterten Beschleunigungsregistrierung, verglichen. Alle Spektren sind mittels Autokorrelations-Analyse berechnet worden.

Auf die Nachteile der "Integration" mittels einfacher Division durch die zur 4.Potenz erhobene Kreisfrequenz ohne Ansatzmöglichkeit für ein Filter ist wiederholt hingewiesen worden. Aus der Abb.66 ersieht man, dass die auf diese Weise integrierte B-Registrierung bei $T = 5$ sec ein Maximum besitzt, also in der Nähe des Maximums der L-Registrierung. Während der Abfall von dort in Richtung grosser Perioden "reell" ist, geht der neue Anstieg auf Störschwankungen zurück.

Bei der Integration mit dem mechanischen Integraphen muss man sich eines "Regelungs-Filters" bedienen, um den Einfluss der langen Störschwankungen auszuschalten. Wir haben eine geeignete Filterwirkung durch eine übergreifende Mittelbildung von je 31 Ordinaten zu erzielen versucht.

Nach der Autokorrelation hat das Spektrum die Gestalt der mit $E_f^{(B_i(\text{mech}))}$ bezeichneten Kurve. Auch hier liegt ein "reelles" Maximum in der Nähe von $T = 5$ sec. Das Maximum bei $T = 11$ sec ist ein Effekt der durch die Integration verstärkten Störschwankungen; jedoch erzwingt das verwendete Filter einen Abfall des Spektrums gegen 0 für sehr grosse Perioden.

Das Filter enthält starke Oszillationen (vgl.Abb.26). Es zeigt sich, dass die "Intensität" im Bereich $T = 7$ sec annähernd verdoppelt ist. Dagegen hat die Filterfunktion im Gebiet des fehlerhaften Maximums bei 11 sec in der $E_f^{(B_i(\text{mech}))}$ - Kurve nur den Wert 0,7. Die Wirkung des Filters ist also nicht stark genug; die "Breite" des gleitenden Mittelwertes hätte um noch 20 bis 30% kleiner sein können.

Die durch die Verwendung des Filters bedingten Fehler müssen nach Möglichkeit wieder eliminiert werden (vgl.Abschn. C 3a, S. 24). Es er-

gibt sich das mit $E_f^{(\text{Bi(mech red)})}$ *) bezeichnete Spektrum (Abb.66). Sein reelles Maximum liegt bei der gleichen Frequenz wie das Maximum des E_f -Spektrums von L. Auch der starke Abfall in Richtung grösserer Perioden ist sehr befriedigend und besser als beim Spektrum $E_f^{(\text{B})}$. Bei sehr grossen Perioden steigt die $E_f^{(\text{Bi(mech red)})}$ auf sehr hohe Werte der Energiedichte an, nachdem der Einfluss des Filters beseitigt worden ist.

Eine Gegenüberstellung des "objektiven" Spektrums, das aus der L-Registrierung mittels Autokorrelations-Analyse gewonnen wurde, und des Spektrums aus der elektrisch doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung ($E_f^{(\text{Bi})}$) bringt Abb.67. Die $E_f^{(\text{Bi})}$ -Werte wurden gleichfalls mittels Autokorrelation ermittelt. Unterschiede ergeben sich insbesondere hinsichtlich der Gesamt-Intensität, so dass die "Spitze" der $E_f^{(\text{Bi})}$ -Verteilung bei geringeren Intensitäten liegt als bei der Repräsentativ-Messung. Die Form der Spektren stimmt zum grossen Teil in zufriedenstellender Weise überein. Bei den kleinen Frequenzen zeigt sich allerdings, dass auch bei der elektrischen Integration die überlagerten langperiodischen Fremdschwankungen nicht ganz zu unterdrücken sind. Die Unterschiede der beiden Spektren werden bei der Besprechung der Eichfaktoren bzw. -funktionen noch genauer diskutiert werden.

Gewisse Ansätze zu überlagernden Schwankungen im kurzwelligen Bereich zeigt auch das repräsentative Spektrum aus der L-Messung. Es kann sich dabei um Zufallserscheinungen wegen der verhältnismässig geringen Länge der Registrierung handeln. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass das kleine Nebenmaximum bei etwa 2,4 sec dem von L.TICK (Lit.22) beschriebenen quadratischen Seegangsanteil entspricht.

Abb.68 stellt die Autokorrelationsfunktionen für die L-Registrierung (repräsentative Messung) und für die Bi-Registrierung (elektrisch doppelt integrierte Beschleunigungsregistrierung) dar. Die Unterschiede entsprechen der Unterschiedlichkeit der zugehörigen Spektren.

c) Periodogramm-Analyse mit dem Fourier-Analysator

α. Gesamt-Intensität
.....

Im Abschn. D 3c ist ausgeführt worden, auf welche Weise die

*) Der Index "red" wird nur zur Kennzeichnung der Reduktion zwecks Beseitigung unerwünschter Filterwirkungen benutzt.

"Seegangs-Intensität" E^* am Fourier-Analysator bestimmt wird. Man erhält die Grössen E_{α}^* für die einzelnen (80 cm langen) Teilstreifen der Registrierung. Ermittelt man die Neigung der Geraden, die durch die Punktwolke auf dem Wahrscheinlichkeitspapier zu ziehen ist, mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate, so erhält man für die in 7 Teilstreifen zerlegte L-Registrierung am 2.12.1957 :

α	E_{α}^*
1	611
2	733
3	656
4	500
5	475
6	581
7	565

Setzt man das arithmetische Mittel dieser Werte zu E^* , so ergibt sich $E^* = 588$.

Eine andere Berechnungsmethode besteht darin, dass man auf das Eintragen der Punkte in das Wahrscheinlichkeitspapier verzichtet und die Grössen E_{α}^* unter Benutzung der Methode der kleinsten Quadrate unmittelbar aus den Wahrscheinlichkeitstabellen bestimmt. Wir erhielten :

α	E_{α}^*
1	583
2	654
3	606
4	489
5	495
6	569
7	497

Daraus ergibt sich $E^* = 556$. Wieder anders kann man verfahren, indem man bereits die erhaltenen Grauwert-Kurven mittelt und dann für die Mittel-Kurve in die Wahrscheinlichkeitstafeln eingeht. Bei dieser Methode erhält man $E^* = 575$. Diese Grösse erscheint uns am vertrauenswürdigsten von allen mit der Fourier-Analyse bestimmten E^* - Werten.

Bei der Darstellung der spektralen Verteilungen der "Intensitätsdichte" E_f haben wir jedoch -wie erwähnt - stets die Gesamt-Intensität zugrunde gelegt, die man aus den time-series bei Berechnung des Mittelwertes der quadrierten Abweichungen vom Null-Niveau (mean-square-Wert), im vorliegenden Fall $E^* = 530$, erhält.

β. Form des Spektrums

Bei der Fourier-Analyse können nur die Oberwellen innerhalb eines bestimmten Intervalles erfasst werden. Andererseits ist die zeitliche Länge der 80 cm langen Einzelstreifen α verhältnismässig klein, so dass auch die Oberwellen kleiner Ordnungszahl, also die langen Perioden, noch grosse Intensitäten besitzen. Bei der ersten Analyse der B-Registrierung zeigte sich, dass der Oberwellen-Bereich mit den Ordnungszahlen 15 bis 120 nicht ausreichend ist, sondern dass sich die Durchführung der Analyse in zwei Abschnitten empfiehlt. So wurde die B-Registrierung nochmals analysiert, und zwar in den Ordnungszahl-Bereichen 7 bis 30 und 15 bis 120.

Die Analyse der Bi-Registrierung wurde sofort in Abschnitten für die genannten Bereiche vorgenommen.

Von den sich ergebenden Werten für die Koeffizienten der einzelnen Oberwellen wurden zunächst einige benachbart liegende zusammengefasst. Diese Grössen wurden alsdann für alle Einzelstreifen α gemittelt und normiert, d.h. auf die Gesamtintensität bezogen. Nunmehr wurden - wie im Abschn. D 3c erwähnt - noch gleitende Mittelwerte gebildet. Dabei wurde folgende Formel verwendet :

$$E_f^{(0)} = \frac{1}{4} [E_f^{(-1)} + 2E_f^{(0)} + E_f^{(+1)}] ,$$

wobei (0) , $(+1)$ und (-1) nebeneinanderliegende Werte auf der Abszisse (Koeffizienten von Oberwellen) bedeuten.

Abb.69 zeigt, in welcher Weise es sich hinsichtlich der Spektralform auswirkt, welche Analysenart (Autokorrelations- bzw. Fourier-Analyse) angewendet wird. Zum Vergleich gebracht werden in dieser Abb. jeweils die beiden Spektren der Beschleunigungs-Intensität (nicht integriert) und der bei den Spektren von Bi, also der elektrisch doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung. Vorher ist die mit der Fourier-Analyse ermittelte Gesamt-Intensität auf den mit der Autokorrelations-Analyse festgestellten Intensitäts-Wert gebracht worden, so dass sich die beiden Spektren hinsichtlich ihrer Fläche unter dem Spektrum nicht unterscheiden. Die Unterschiede in der Form sind im vorliegenden Fall nicht sehr erheblich. Ihre Ursache ist bereits in Abschnitt D 3d erörtert worden.

d. Die Eichfaktoren

Die "Empfindlichkeiten" bzw. "Eichfaktoren" erhält man durch Bildung des Quotienten :

$$\sigma_I^{(B)} = \frac{E_f^{(B)}}{E_f} ; \quad \sigma_I^{(Bi)} = \frac{E_f^{(Bi)}}{E_f} ; \quad \sigma_I^{(Bi_{mech})} = \frac{E_f^{(Bi_{mech})}}{E_f} .$$

Hinzu kommt noch ein Eichfaktor für das "reduzierte" $Bi_{(mech\ red)}$ -Spektrum, also für ein Spektrum, aus dem ein wesentlicher Teil der fehlerhaften Filterwirkung wieder eliminiert wurde. Die Verteilung der Eichfaktoren als Abhängige der Periode (Abb.70) ergibt die "Eichfunktion". Die starken Schwankungen in den "Spektren" der Eichfaktoren sind schwer erklärbar; möglicherweise haben sie ihre Ursache darin, dass der Seegang an Stellen gemessen wurde, die rund 15 m voneinander entfernt lagen und dass die Zusammensetzung des Seegangs durch Zufallseffekte statistisch nicht gleichartig war. Ausserdem sind die Registrierungen von verhältnismässig geringer Dauer. Dass die Ungleichmässigkeiten durch die Massnahmen zur Auswertung (Autokorrelations-Analyse, Integration, Filterung) entstanden sind, ist nicht anzunehmen, weil die "Empfindlichkeits"- Funktionen recht ähnlich verlaufen.

Die Übereinstimmung mit der Repräsentativ-Messung ist für den Fall vollständig, dass die Eichfaktoren den Wert $\sigma_I = 1$ annehmen. Sie ist gänzlich unzureichend bei $\sigma_I < 0,1$ oder $\sigma_I > 3$. Für das B-Spektrum (Spektrum der Beschleunigungs-Intensität multipliziert mit $\frac{1}{(2\pi f)^2}$) fallen die Eichfaktoren bei Perioden von 0.9 sec unter den Wert $\sigma_I = 0,1$, d.h., dass in diesem Bereich die Übereinstimmung mit der Repräsentativ-Messung sehr schlecht ist. Bei einer Periode = 5 sec übersteigen die Eichfaktoren die Grösse 2,2 und nehmen sehr hohe Werte an. Auch in diesem Bereich weicht das B-Spektrum also sehr stark vom L-Spektrum ab.

Die Eichfunktion $\sigma^{(Bi_{mech})}$ unterscheidet sich von $\sigma^{(B)}$ insbesondere durch eine geringere "Empfindlichkeit" im Frequenzbereich 0,2 bis 0,3 und durch grössere Werte bei $f = 0.9$ bis 1.1. $\sigma^{(Bi_{mech})}$ liegt in diesen Frequenzabschnitten also näher am "idealen" Eichfaktorwert 1. Bei $\sigma^{(Bi_{mech\ red})}$ sind unerwünschte Filterwirkungen z.T. beseitigt worden. Dass $\sigma^{(Bi_{mech\ red})}$ an einigen Stellen sehr stark von $\sigma^{(Bi_{mech})}$ abweicht, liegt an der Form des bei der mechanischen Integration verwendeten Filters (Abb.26). An $\sigma^{(Bi)}$ ist auffällig, dass die Eichfaktoren im Bereich grösserer Frequenzen sehr klein sind. Es ist zu vermuten, dass diese Werte nicht fehlerhaft sind,

sondern dass eher die grösseren Eichfaktoren in $\mathcal{G}^{(Bi_{mech})}$ und $\mathcal{G}^{(Bi_{mech\ red})}$ mit Unzulänglichkeiten behaftet sind, die sich an den Schwierigkeiten bei der Handhabung des mechanischen Integrations ergeben. Dass $\mathcal{G}^{(Bi)}$ bei $f = 0.18$ so stark absinkt, ist eine Folge der scharfen Filterung. Erst bei $f < 0.17$ wachsen die Eichfaktoren infolge langwelliger Störungen äusserst stark an. Der Bereich von $f = 1$ wird bei dem benutzten Δt ($\Delta t < 0,5$ sec) nicht mit erfasst. Von besonderem Interesse ist es, festzustellen, bei welcher Frequenz (Wellenperiode) der steile Anstieg der Eichfunktion einsetzt. Während in $\mathcal{G}^{(B)}$ dieser Punkt bei $f = 0.3$ ($T = 3.3$ sec) liegt, wird er in $\mathcal{G}^{(Bi)}$ infolge der Filterung auf $f = 0.17$ ($T = 5.9$ sec) verschoben.

Im rohen Mittel heben sich die Eichfunktionen von rechts unten nach links oben, um erst dort wieder gegen $\mathcal{G}_1 = 0$ zu gehen, wo die Schwankungen durch äusserst scharfe Filterungen zum Verschwinden gebracht werden.

Die durch übergreifende Mittelbildung geglätteten Eichfunktionen werden bei der Gegenüberstellung der Messergebnisse in Abschn. E 5 gebracht (Abb. 96 und 98).

3. Leuchtturm Mellum Plate : Vergleichsmessung vom 14.2.1958

Die am 14.2.1958 um 17 Uhr MEZ vorgenommene Vergleichsmessung fand bei Südwest 7 Bft statt. In den vorangegangenen Tagen hatten in der Deutschen Bucht ständig ablandige Winde geweht. Nach der Wetterlage konnte am Messort auch keine Dünung aus der Nordsee oder dem Nordmeer anwesend gewesen sein. Es besteht also guter Grund zu der Annahme, dass die Windsee zur Zeit der Messung sehr "rein", also nicht durch Fremdsee überlagert gewesen ist. Mit Rücksicht auf die Gestalt der Küste ist die Windwirklänge (Fetch) nicht genau anzugeben: sie hat ungefähr 5 Seemeilen betragen.

Wetterangaben : Wind 240° etwa 30 kn, mässig böig, Luft $+ 11,7^\circ\text{C}$, Wasser $+ 3,8^\circ\text{C}$.

Das Wasser war ablaufend; während der Dauer der Messung erniedrigte sich der (mittlere) Wasserstand um etwa 10 cm.

Die Registrierung erstreckte sich über 15 min. Als repräsentative Vergleichsmessung für die Aufzeichnung des Beschleunigungsschreibers diente eine Registrierung der Leitfähigkeitssonde, deren Elektroden zu dieser Zeit behelfsmässig aus zwei 3 m langen Gasrohren bestanden.

Das Gerät war durch kinematographische Aufnahme während der Anfangs- und der Schlussphase der Messung geeicht worden. Die Beschleunigungs-Registrierung wurde mit dem Analogrechner der Fa. Donner elektrisch integriert. Hinsichtlich der Wahl von RC und des Filterfaktors findet man Angaben im Abschn. C4a auf S. 29 . Bezüglich der Filterung sei von vornherein bemerkt, dass das verwendete Filter eine übermässige Abschwächung der langen Seegangsanteile bewirkte. Die Vergleiche der Ergebnisse leiden sämtlich unter der zu scharfen Filterung der Beschleunigungs-Registrierung.

Unsere Untersuchungen beschränkten sich im wesentlichen auf eine Gegenüberstellung der repräsentativen L-Registrierung und der Bi-Registrierung.

a. Auswertung nach sichtbaren Wellen

Bei der Bearbeitung der Messungen auf der Aussenalster und am Turm Mellum Plate vom 2.12.1957 hat sich herausgestellt, dass die zero-crossing-Wellen und die nach Halbperioden ermittelten Registrierwerte eine geeignete Unterlage für die Auswertung nach sichtbaren Perioden darstellen. Bei der vorliegenden Messung wird daher auf die bei den ersten Messungen gebrachten Statistiken für alle Wellen (unter Mitberücksichtigung der Nicht-zero-crossing-Wellen) sowie der nach vollen Perioden gewonnenen Registriergrössen grösstenteils verzichtet.

Für die zero-crossing-Schwankungen der Registrierungen L und Bi wurden die Extremwert-Koordinaten, also die Ordinatenwerte der Maximum- und der Minimumstellen, und die Abszissen-Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Extremwerten abgelesen. Daraus wurden die Schwankungshöhen (Berg/Tal) der zero-crossing-Wellen und die "verdoppelten Halbperioden" bestimmt.

Es ergaben sich folgende Mittelwerte :

Tabelle 9

	L-Registrierung	Bi-Registrierung
\tilde{H}_h	72 cm	35 cm
\bar{H}	78.0 cm	47,6 cm
$\tilde{H}_{1/3}$	118.4 cm = 1,52 \bar{H}	76,0 cm = 1,60 \bar{H}
$\tilde{H}_{1/10}$	146.4 cm = 1,88 \bar{H}	93,3 cm = 1,96 \bar{H}
\tilde{T}	3.52 sec = 0,117 v	3,05sec
\tilde{T}_h	3.2 sec	2,2 sec

(v angesetzt zu 30 kn)

Die grösste Wellenhöhe beläuft sich in der L-Registrierung auf 1,90 m, in der Bi-Registrierung auf 1,20 m.

Abb.71 zeigt die charakteristischen Kurven sowie die Mittelwertsgrössen für $\tilde{H}_{1/3}$ und $\tilde{H}_{1/10}$ für L und Bi. Sie werden mit den entsprechenden Angaben von LONGUET-HIGGINS (Lit.11) in Vergleich gesetzt. Dass die Kurve für L wesentlich flacher verläuft als die von LONGUET-HIGGINS, dass also hohe Wellen seltener auftreten als theoretisch erwartet, ist wahrscheinlich eine Folge davon, dass es sich um eine nicht-ausgereifte Windsee auf verhältnismässig flachem Wasser handelt. Die Ursache für die steilere Lage der Kurve für Bi liegt bei der Art der Filterung.

Die Häufigkeitsverteilungen der Extremwert-Ordinaten in L und Bi bringt Abb.72. Dass bei Bi niedrige Maxima und niedrige Minima (rund 10 cm Höhe) wesentlich häufiger gefunden wurden als bei L und dass bei L entsprechend die grösseren Extremwerte häufiger sind, ist gleichfalls eine Folge der übermässig scharfen Filterung bei der Integration. Die Bezeichnung "reduziert" bezieht sich auf die Vereinheitlichung der bei den Registrierungen ursprünglich unterschiedlichen Klassenbreiten. Im übrigen ist in Übereinstimmung mit Lit.4 festzustellen, dass die Verteilung zwischen den theoretischen Verteilungen nach RALEIGH und GAUSS liegen.

Abb.73 und 74 geben die reduzierten relativen Häufigkeitsverteilungen der Schwankungshöhen und der verdoppelten Halbperioden für die zero-crossing-Wellen in L und Bi wieder. Die zum Teil sehr beträchtlichen Unterschiede sind wieder auf die Filterwirkung zurückzuführen. Die Verteilung für die Perioden ist verhältnismässig schmal, was auch zu erwarten war, weil es sich um eine junge Windsee handelt.

Die geglätteten reduzierten Häufigkeiten in zweidimensionaler Darstellung (vgl. Abschn. D 4b, S.70ff) für L und Bi enthält Abb. 75a,b. Berücksichtigt wurden nur Häufigkeitswerte $\geq 0,1\%$. Für die L-Registrierung ergibt sich ein einfach gegliedertes Bild der Isolinien mit einem Häufigkeitsmaximum der Wellen von $S = 0,66$ m und $T = 2,8$ sec. Es deutet sich eine gewisse Zweiteilung im zentralen Gebiet an, die aber vermutlich auf Zufälligkeiten beruht. Die gleichfalls übersichtliche zweidimensionale Häufigkeitsverteilung für Bi (Abb. 75b) hat eine weniger gestreckte Form als bei L (Abb. 75a), was hauptsächlich auf die starke Ausfilterung langer Wellen bei der Integration zurückzuführen ist. Das Häufigkeitsmaximum fällt hier nahe $S = 0,23$ m und

$T = 1,8$ sec, liegt also bei wesentlich kleineren Wellengrößen als für die L-Registrierung.

Abb.76 bringt die zweidimensionale Darstellung der "Empfindlichkeit hinsichtlich sichtbarer Wellen", \mathcal{G}_s , Bi- gegen L-Registrierung. Vergleicht man mit der entsprechenden Empfindlichkeits-Verteilung für den 2.12.1957 (Abb.64), so fällt auf, dass das Isolinien-Bild für die Messung vom 14.2. wesentlich geschlossener ist. Erwünscht sind aber schwache Gegensätze, die sich um den Wert 1 herum gruppieren. Die verhältnismässig hohen \mathcal{G}_s -Werte um $S = 0,22$ m und $T = 0,19$ sec kennzeichnen also starke Abweichungen zwischen Bi und L, bleiben aber innerhalb der geforderten Grenzen.

b. Autokorrelations-Analyse

Die Registrierungen L, Bi und B wurden der Autokorrelations-Analyse mit dem elektronischen Schnellrechner IBM 650 des Instituts für Angewandte Mathematik, Hamburg, unterworfen. B ist die nicht integrierte Beschleunigungs-Registrierung. Tabelle 10 enthält Angaben über die verwendeten N_k und m (einschliesslich an den Stellen Null).

Tabelle 10

	L	Bi	B
n (Anzahl der time-series-Werte)	1800	1813	1696
m +1 (Anzahl der Punkte, für die das Spektrum berechnet wurde)	46	46	61

Abb. 77 gibt die Autokorrelationsfunktionen für die Registrierungen L, Bi und B wieder. Die Unterschiede von L und Bi im Gebiet der kleinen $p \cdot \Delta t$ sind nur quantitativer Art ($\Delta t = 0,5$ sec). Dagegen verlaufen die Kurven bei grösseren Werten von $p \cdot \Delta t$ teilweise gegenläufig. Dass das Maximum bei $p \cdot \Delta t \sim 4$ für L höher als für Bi ist, kann so interpretiert werden, dass die ausgeprägtesten Wellen des Seegangs durch L in konzentrierterer Weise erfasst werden als durch Bi. Die Gegenläufigkeit bei grösseren $p \cdot \Delta t$ kann durch sehr kleine Unterschiede in den Registrierungen bewirkt werden, weil in der Autokorrelationsfunktion Phasenüberlagerungen auftreten, bei denen schwebungsartige Erscheinungen eine bedeutende Rolle spielen.

Auffällig ist ausserdem, dass die Autokorrelationsfunktion von L

zum grössten Teil oberhalb $Q = 0$ liegt, während bei Bi eine ungefähre Gleichverteilung zu beiden Seiten statthat. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich darin, dass der L-Registrierung und somit dem Seegang eine sehr lange Schwingung überlagert ist, die in der Bi-Registrierung durch Filterung zum Verschwinden gebracht wurde.

Für die Gesamt-Intensität (unter dem Spektrum) erhielten wir folgende Werte :

$$L : 2064 \text{ [cm}^2\text{]} \quad Bi : 826 \text{ [cm}^2\text{]} \quad B : 43\,420 \text{ [gal}^2\text{]}$$

Die Differenzen von L und Bi sind auf die wesentlich zu scharfe Filterung bei der Integration zurückzuführen.

Die Spektren der "Seegangsintensität" der Registrierungen L, Bi und B sind in Abb.78 einander gegenübergestellt. Durch die sehr scharfe Filterung wurde erreicht, dass das Bi-Spektrum im Bereich der langen Wellen nicht wieder stark ansteigt, sondern dass sich der Einfluss der durch die doppelte Integration verstärkten langen Störschwankung (vgl. L-Registrierung) nur durch eine kleine Hebung der Kurve zwischen 7 und 9 sec Periode bemerkbar macht. Die scharfe Filterung bewirkt aber auch, dass das Spektrum an nahezu allen Stellen unterhalb der objektiven Grössen liegt. Bezüglich der Form ist zufriedenstellend, dass das Maximum der Intensität in beiden Spektren an der nahezu gleichen Frequenzstelle ($f \sim 0,24$; $T \sim 4,2$ sec) liegt. Die Ungleichmässigkeiten im Kurvenverlauf beider Spektren sind entweder auf Zufallsschwankungen oder auf nicht-lineare Seegangsanteile nach L.TICK (Lit.22) zurückzuführen.

Das Spektrum $E_f^{(B)}$ wurde durch Multiplikation des Spektrums der Beschleunigung mit der Grösse $\frac{1}{(2\pi f)^2}$ berechnet. In seinem langwelligen Teil ist es von Fremdschwingungen überlagert. Als Folge davon liegt die Spitze der Kurve (Intensitäts-Maximum) bei einer längeren Periode als in L. Im kurzwelligen Teil der Spektren verzeichnet das Beschleunigungsgerät aus den bekannten Gründen zu wenig Intensität.

Abb.79 bringt zu Vergleichszwecken das Spektrum der (nicht integrierten) Beschleunigungsintensität. Das Wiederansteigen der Verteilung oberhalb $T = 15$ sec ist eine nicht seegangseigene Störung. Sie ist möglicherweise eine Folge von Nullpunktschwankungen auf dem Registrierstreifen. Dies ist denkbar, weil schon äusserst kleine Pendelungen des Filmstreifens während des Schreibvorgangs wegen der Kleinheit der Aufschreibung Bedeutung erlangt haben könnten.

Die aus dem Vergleich des repräsentativen Spektrums (L-Registrierung)

mit den aus der Beschleunigungs-Registrierung durch behelfsmässige Integration und durch elektrische Integration gewonnenen "Eichfunktionen" $\mathcal{G}_I^{(B)}$ und $\mathcal{G}_I^{(Bi)}$ sind in Abb.80 dargestellt. $\mathcal{G}_I^{(B)}$ steigt von kleinen Werten bei Perioden $T < 1$ sec auf sehr hohe Werte bei $T > 5$ sec an. Die Ursachen dafür sind mehrfach erläutert worden. Ebenso sind die kürzeren Schwankungen der Funktion wiederholt angesprochen worden. $\mathcal{G}_I^{(Bi)}$ bleibt grösstenteils unter dem Wert 1. Es ist dies eine Folge der viel zu starken Filterung.

4. Leuchtturm Mellum Plate : Vergleichsmessung 17.2.1958

Nach längerer Wartezeit trat am 17. Februar 1958 eine Wetterlage ein, bei der am Turm Mellum Plate eine verhältnismässig hohe See entsteht.

Zur Zeit der Messung, von 09⁵⁵ bis 10²² Uhr MEZ, wehte ein sehr böiger Wind aus 300° rw mit Stärke 8-9, in Böen 11 Bft. Die Luft (+0.8°C) war 3.3° kälter als das Wasser (+4.1°C). Eine Schauerbö brachte in den ersten Minuten Schneefall. Die Sicht war für die kinemographische Aufnahme der Wellen vor den Messlatten aber ausreichend.

Messpfahl und Pegellatten wurden von einigen besonders hohen Wellen vollständig überspült. Die Wassertiefe unter der mittleren Wasseroberfläche betrug während der Messung rund 15 m. Visuell wurde die kennzeichnende Wellenhöhe des Seegangs am Messpfahl auf etwa 2 m geschätzt. Die Messung fand rund 1 3/4 Stunden vor Hochwasser statt; es herrschte daher ein mässig kräftiger Gezeitenstrom aus ungefähr Nord.

Für die objektive Repräsentativ-Messung standen zwei gleichartige 16 mm-Filmkameras (Pathex Webo 16) mit Teleobjektiven von 14,5 bzw. 20 cm Brennweite zur Verfügung. Die Registrierung erstreckte sich über 27 min. Die Beschleunigungs-Registrierung wurde mit dem Analogrechner, also elektrisch integriert. Da mit der Festsetzung von RC und des Filterfaktors keine Erfahrungen vorlagen, wurden die beiden Grössen nach Gutdünken festgesetzt; Angaben findet man in Abschn. C 4a auf S. 29. Im Gegensatz zu dem Filter, das bei der Integration der Registrierung vom 14.2.1958 benutzt wurde, erwies sich das hier verwendete Filter als zu schwach. Auf die im folgenden gebrachten Gegenüberstellungen von L und Bi wirkt sich dieses Faktum sehr ungünstig aus.

a. Auswertung nach sichtbaren Wellen

Wie bei der Messung vom 14.2.1958 beschränken wir uns auf die Darstellung der Ergebnisse für zero-crossing-Wellen und für verdoppelte Halbperioden. Nur bei der Auszählung der Extremwert-Ordinaten werden alle Wellen berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle sind die aus der kinematographischen Registrierung (F) berechneten charakteristischen Seeganggrößen den entsprechenden Werten aus B und Bi gegenübergestellt.

Tabelle 11

Anzahl der zero-crossing-Wellen	F-Registrierung		Bi-Registrierung	
	$N_p = 822$		$N_p = 612$	
\bar{T}	= 4,05 sec = 0,09 v		= 5,19 sec = 0,115 v	
\bar{T}_h	= 3,0 sec		= 2,7 sec	
\bar{H}	= 1,31 m		= 1,66 m	
$\bar{H}_{1/3}$	= 2,15 m = 1,64 \bar{H}		= 2,83 m = 1,71 \bar{H}	
$\bar{H}_{1/10}$	= 2,74 m = 2,09 \bar{H}		= 4,11 m = 2,48 \bar{H} *)	
\bar{H}_h	= 1,3 m		= 1,10 m	

(v zu 45 kn angesetzt)

Bildet man die Verhältnisse von $\bar{H}_{1/3}$ und $\bar{H}_{1/10}$ zu \bar{H} , so erhält man Werte, die denen von M.S.LONGUET-HIGGINS (Lit.11) für ein "schmales" Spektrum gut entsprechen :

Tabelle 12

	F-Reg.	LONGUET-HIGGINS
$\frac{\bar{H}_{1/3}}{\bar{H}}$	1,64	1,60
$\frac{\bar{H}_{1/10}}{\bar{H}}$	2,09	2,07

In diesem Zusammenhang wurde auch der Parameter ϵ bestimmt, der die "Breite" eines Spektrums kennzeichnet. Bei Benutzung der Formel

$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{N_f}{N_M}\right)^2}$$

*) Einige extrem starke Ausschläge in der Beschleunigungsregistrierung, die sicher fehlerhaft sind (Anrucken an der Seilfesselung), bewirken eine nicht reelle Überhöhung der höchsten Wellen. Aus diesem Grunde ergibt sich mit $\bar{H}_{1/10} = 2,48 \cdot \bar{H}$ ein außergewöhnlich hoher Wert.

(Gl.(4), vgl.Abschn. D 2) ergibt sich aus $N_0^\dagger = 822$ und $N_M = 1660$ für die F-Registrierung vom 2.12.1957 $\epsilon = 0.87$. Das Spektrum ist also verhältnismässig breit. Umso erstaunlicher ist die gute Übereinstimmung der oben aufgeführten Quotienten mit den von LONGUET-HIGGINS gegebenen Grössen des "schmalen" Spektrums.

Bei den charakteristischen Kurven (Abb.81) liegt F nahe der Verteilung nach LONGUET-HIGGINS, während Bi bei allen Indices $\geq 70\%$ sehr wesentlich darunter gelegen ist. Die Ursache dafür ist darin zu suchen, dass der Seegangs-Beschleunigungsschreiber viele kleine Wellen nicht erfasst, so dass die Grösse \bar{H} zu hoch ausfällt. Dass \bar{H} zu gross ausfällt, ist ausserdem auf die Überhöhung der extrem hohen Wellen (vgl. oben) zurückzuführen.

Für die "Extremwerte", also die Auslenkungen an den Maximum- und Minimumstellen vom Mittelniveau der Registrierung, wurde in Abb.82 die Häufigkeitsverteilung getrennt nach Maxima und Minima zum Vergleich gebracht. Für diese Statistik werden alle Wellen unter Einschluss der Nicht-zero-crossing-Wellen berücksichtigt. Die Auslenkungen an den Minimumstellen wurden mit (-1) multipliziert. Die Ordinate in Abb.82 gibt relative Häufigkeiten, die auf die Klassenbreite "1" reduziert wurden. Die Werte für negative Abszissen stellen Extremwerte von Nicht-zero-crossing-Wellen dar. Man erkennt, dass bei der repräsentativen F-Registrierung eine verhältnismässig grosse Anzahl von Wellenbergen unterhalb der Mittellinie blieb und dass noch mehr Minima oberhalb dieser Linie registriert wurden. Die Häufigkeitsverteilung für die Maxima liegt in der Abb. überhaupt weiter rechts als die der Minima. Das bedeutet, dass die Wellenmaxima im Durchschnitt stärker von der Mittellinie der Registrierung abweichen als die Täler. Das heisst auch, dass der Seegang (am 2.12.57) keine Gauss-Verteilung besass; anderenfalls müssten die beiden Extremwert-Verteilungen in Abb.82 miteinander identisch sein. Für die meisten Ordinaten sind Maxima- und Minima-Verteilungen bei Bi in entgegengesetztem Sinne gegeneinander verschoben. Dies dürfte grösstenteils darauf zurückzuführen sein, dass insbesondere kleine spitze Wellenberge vom Seegangs-Beschleunigungsschreiber nicht vollständig erfasst werden. Der grosse Unterschied zwischen Maxima und Minima für Extremwert-Ordinaten um +70 cm ist bei Bi besonders augenfällig. Eine Erklärung kann dafür noch nicht beigebracht werden.

Die Abb.83 und 84 bringen die auf einheitliche Klassenbreite redu-

zierten relativen Häufigkeiten der Schwankungshöhen und der verdoppelten Halbperioden für die zero-crossing-Wellen der Registrierung F und Bi vom 17.2.1958. Abgesehen von einer leichten bis mässigen Verschiebung nach rechts (in Richtung grösserer Schwankungshöhen) der Bi-Verteilung ist die Übereinstimmung in beiden Abbildungen zufriedenstellend. Die Verschiebung ist eine Folge des zu schwachen Filters bei der Integration.

Die zweidimensionale Darstellung der geglätteten reduzierten relativen Häufigkeiten für die F- und Bi-Registrierung bringt Abb.85. Berücksichtigt wurden nur Häufigkeitswerte $\geq 0,03\%$. Für die objektive Messung ergab sich eine ausgesprochen langgestreckte Form der Isolinien. Wellen der Klasse 2,30 m und 4,75 sec traten noch mit einer Häufigkeit von 0,05% auf. Bemerkenswert erscheint uns, dass auch hier ein Doppel-Maximum der Häufigkeit, nämlich bei $S = 0,64$ m und $T = 2,1$ sec sowie bei $S = 0,36$ m und $T = 3,2$ sec zu beobachten ist. Somit hat sich eine Neigung zur Ausbildung zweier Maximumstellen in den zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen sämtlicher am Turm Mellum Plate gewonnener objektiver Registrierungen gezeigt. - Ein recht geschlossenes Bild bietet die Verteilung der Häufigkeiten für Bi (Abb.85b). Die langgestreckten Isolinien liegen steiler als bei F. Die Unterschiede gehen zum Teil darauf zurück, dass der Seegangs-Beschleunigungsschreiber sehr kurze Wellen nicht aufzeichnet; zum anderen sind die langen Wellen der Integration herausgefiltert oder geschwächt worden.

Im erfassten Bereich des zweidimensionalen Häufigkeitsfeldes ergibt sich für die "Empfindlichkeit hinsichtlich sichtbarer Wellen", \mathcal{E}_s , eine recht flache, allerdings unregelmässige Verteilung in der Nähe des erwünschten Wertes 1 (Abb.86). Vergleicht man mit der entsprechenden Darstellung für die Messung vom 2.12.1957 (Abb.64a), so lässt sich eine schwache Ähnlichkeit darin finden, dass bei mittleren Schwankungshöhen in beiden Verteilungen eine "Furche" kleiner \mathcal{E}_s -Werte liegt und dass links unten in den Abbildungen (bei niedrigen und kurzen Wellen) kleine Werte von \mathcal{E}_s auftreten.

b. Autokorrelations-Analyse

Die Registrierungen F und Bi sowie B (nicht integriert) wurden der Autokorrelations-Analyse mit der IBM 650 unterzogen. Tabelle 13 enthält die dabei verwendeten Anzahlen der time-series-Werte, n , und der

Abszissenstellen, $m + 1$, für die das Spektrum jeweils berechnet wurde (beide Grössen einschliesslich der Stelle Null).

Tabelle 13

	F	Bi	B
n	3232	3344	3280
m + 1	91	91	91

Der zeitliche Abstand der einzelnen Werte für die Ordinaten-Folge ("time-series") betrug $\Delta t = 0,502$ sec.

Die Autokorrelationsfunktionen für die Registrierungen F, Bi und B enthält Abb.87. Die Unterschiede von F und Bi sind nicht allzu beträchtlich. Eine völlig andere Form zeigt die Kurve für die (nicht integrierte) Beschleunigungsregistrierung.

Die Gesamt-Intensität ergab mittels Autokorrelations-Analyse folgende Werte :

$$F : 6593 \text{ [cm}^2\text{]} \quad Bi : 13\,325 \text{ [cm}^2\text{]} \quad B : 126090 \text{ [gal}^2\text{]}$$

Dass E^* für Bi so bedeutend grösser ist als der aus F gewonnene, repräsentative E^* -Wert, ist wenigstens teilweise eine Folge der zu schwachen Filterung bei Bi. Ausserdem tritt in diesem hohen und besonders steilen Seegang als Folge der Fesselung der im Abschnitt B1 (S.5) beschriebene "Anruck-Effekt" auf, der an bestimmten Stellen der Registrierung eine fälschliche Vergrösserung der Beschleunigung hervorruft.

Abb.88 enthält die Spektren der "Seegangsintensität" E_f für die repräsentative F-Registrierung, $E_f^{(Bi)}$ für die elektrisch doppelt integrierte Beschleunigungsmessung und $E_f^{(B)}$ für die durch Multiplikation mit $\frac{1}{(2\pi f)^4}$ behelfsmässig integrierte Beschleunigungsregistrierung. Eingezeichnet ist ausserdem das Spektrum der Beschleunigungsintensität J_f (nicht integriert).

Der Einfluss des "Anruck-Effekts" und der nicht zum Seegang gehörigen Fremdschwingungen ist nach der doppelten Integration bei dem gewählten Filter (vgl. Abschn. C 4a, S.29) so gross, dass $E_f^{(Bi)}$ für $T > 2,3$ sec an allen Stellen oberhalb E_f liegt. Hinsichtlich der Form der beiden Spektren deutet sich - abgesehen von zufälligen Schwankungen - eine grosse Ähnlichkeit an. T_{max} ist für F zwischen 10 und 11 sec gelegen. $E_f^{(B)}$ liegt im Bereich der längeren Perioden erwartungs-

gemäss viel zu hoch. Es überrascht auch nicht, dass das Maximum des Beschleunigungsspektrums B bei wesentlich kleineren Perioden auftritt.

Die Eichfunktionen $\sigma_I^{(B)}$ und $\sigma_I^{(Bi)}$ (Abb.89) verlaufen beide von rechts unten verhältnismässig steil nach links oben. Erwartungsgemäss verläuft $\sigma_I^{(B)}$ steiler. Dass $\sigma_I^{(Bi)}$ bei grösseren Perioden grosse Werte annimmt, ist darauf zurückzuführen, dass das Filter wenig scharf war.

c. Periodogramm-Analyse

Von der 27 min umfassenden B-Registrierung wurden 15 Teilstreifen von je 80 cm Länge als Schwarz-Weiss-Kurven mit passender Ordinate und Abszisse hergestellt. Einige prägnant herausfallende Extremwerte wurden auf das Anrücken des Gerätes am Seil zurückgeführt und als nicht reell angesehen. Diese Werte wurden "gekappt", d.h. der oberhalb eines bestimmten Beschleunigungswertes liegende Teil wurde weggelassen.

Bei der Photometrierung zur Ermittlung der Gesamt-Intensität sind wir wie bei der Auswertung der Messung vom 2.12.1957 vorgegangen. Es ergaben sich

$$J_i = 0,806 \cdot 10^5 \text{ [gal}^2\text{]} \quad (\text{nur innerer Teil der Photometerkurve berücksichtigt})$$

$$J_g = 1,008 \cdot 10^5 \text{ [gal}^2\text{]} \quad (\text{äussere Teile der Photometerkurve mitberücksichtigt})$$

Diese Werte sind wesentlich niedriger als die mittels Autokorrelations-Analyse berechneten (dort $J = 1,261 \cdot 10^5 \text{ [gal}^2\text{]})$.

Die Analyse zur Ermittlung der spektralen Verteilung der Beschleunigungs-Intensität wurde bei allen 15 Streifen α wieder in zwei Schritten, nämlich getrennt für die Oberwellen-Bereiche 7 bis 33 und 28 bis 200 durchgeführt. Die Überlappungsstellen wurden ausgenutzt, um die Ergebnisse beider Teilanalysen aufeinander zu beziehen. Im übrigen wurde so verfahren wie bei der Analyse des Materials vom 2.12.1957. Da die Anzahl der Spektrumswerte, die bei der Autokorrelations-Analyse angewendet werden sollten, noch nicht bekannt war, wurde $m = 60$ gesetzt. Unter Berücksichtigung von $\Delta t = 0,502 \text{ sec}$ ergibt sich dann $\mu = 2$ (vgl. Abschn. D 3c β , S. 57).

Das Ergebnis der Fourier-Analyse ist in Abb.90 mit dem Spektrum verglichen, das man mit der Autokorrelations-Analyse erhält. Zu diesem Zwecke ist die Gesamt-Intensität der Fourier-Analyse auf den mit der Autokorrelations-Analyse erhaltenen Wert gebracht worden. Die J_f -

Werte wurden entsprechend angeglichen. Dass im Bereich kleiner Perioden das Autokorrelationsergebnis höher liegt, ist eine Folge des "Faltungseffektes" bei der Filterung (vgl. Abschn. D 3dβ, S. 66). Die hohen Werte bei der Fourier-Analyse gehen auf die Wirkung der Nahtstelle der zwecks Analyse aufgelegten Registrierstreifen zurück (vgl. S. 66). Das Autokorrelations-Spektrum ist in diesem Falle wesentlich unruhiger. Die Gründe dafür sind gleichfalls im Abschn. D 3dβ besprochen. Ihr Maximum erreicht die "f-spektrale-Intensität" [$\text{gal}^2 \text{ sec}$] etwa an der Stelle $f = 0,33$, in beiden Spektren übereinstimmend, also bei $T = 3 \text{ sec}$.

Sämtliche Rechnungen zur Fourier-Analyse sind zwecks Kontrolle zweimal ausgeführt worden.

5. Gegenüberstellung der Ergebnisse für die vier ausgewerteten Vergleichsmessungen.

Wenn die Vergleichsmessungen bei verschiedenartigem Seegang angestellt wurden, so geschah das mit der Absicht, die Messanzeige des Seegangs-Beschleunigungsschreibers in Meereswellen von möglichst unterschiedlicher Höhe und Periode zu prüfen. Es galt festzustellen, ob die Beschleunigungs-Registrierungen nach ihrer doppelten Integration durch einfache Eichgrößen so "reduziert" werden können, dass sie die Eigenschaften des gemessenen Seegangs richtig wiedergeben.

Von nicht geringem wissenschaftlichen Interesse ist ausserdem der Vergleich der mit "objektiven" Methoden durchgeführten Messergebnisse untereinander, weil auf diese Weise Schlüsse darüber gezogen werden, wie sich die "Zusammensetzung" des Seegangs ändert, wenn seine Höhe grösser wird.

Zur Verbesserung der Übersicht über die Eigenschaften des gemessenen Seegangs werden im folgenden die bei den vier Messungen objektiv ermittelten kennzeichnenden Höhen $\tilde{H}_{1/3}$ und die mittleren Perioden \tilde{T} einander gegenübergestellt :

Tabelle 14

	Aussenalster	2.12.1957	14.2.1958	17.2.1958	
$\tilde{H}_{1/3}$	0,13	0,61	1,18	2,15	m
\tilde{T}	1,1	3,1	3,5	4,1	sec

In Abb.91 und 92 sind für zero-crossing-Wellen die (auf einheitliche Klassenbreite) reduzierten relativen Häufigkeiten der Schwankungshöhen bzw. der verdoppelten Halbperioden auf Grund der objektiven Registrierung (L oder F) dargestellt. Man erkennt die Verschiebung der häufigsten Schwankungshöhe und der häufigsten Periode in Abhängigkeit von der Seegangart.

Beim Vergleich der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen sichtbarer Wellen für die drei objektiven Registrierungen am Turm Mellum Plate (Abb.63a, 75a und 85a) fallen die grossen Unterschiede ins Auge. Die "gedrungenere", in Richtung langer Perioden "ausladende" Form des Isolinien-Bildes vom 2.12.1957 (Abb.63a) ist darauf zurückzuführen, dass die Windsee von einer verhältnismässig niedrigen Dünung etwas längerer Periode überlagert wurde. Die langgestreckte Gestalt der Linien gleicher relativer Häufigkeit in den Verteilungen vom 14.2.1958 (Abb.75a) und vom 17.2.1958 (Abb.85a) charakterisiert die reine Windsee. Auffällig ist das Auftreten bzw. der Ansatz zur Ausbildung zweier Maximumstellen in den drei Verteilungen. Im Seegang sind also zwei oder mehr verschiedene Wellenarten mit annähernd gleicher Häufigkeit vorgekommen. - In ihren Hauptzügen wird die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung auch von der elektrisch integrierten Beschleunigungs-Registrierung (Bi) wiedergegeben. Beim 14.2.1958 (Abb.75b) macht sich die übermässig scharfe Filterung bei der Integration besonders stark bemerkbar.

Die vier "objektiv" gemessenen Spektren der "Seegangsintensität" E_f werden in Abb.93 einander gegenübergestellt. Abb.94 bringt die drei $E_f^{(Bi)}$ -Spektren vom 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958 zum Vergleich. Wie bereits erörtert, sind die Unterschiede in Abb.94 gegenüber Abb.93 darauf zurückzuführen, dass bei der elektrischen Integration Filter verschiedener "Schärfe" verwendet wurden. Aus diesem Grunde bringt Abb.94 keinen brauchbaren Vergleich der Spektren.

Zahlenangaben über Eigenschaften der Spektren, die sich bei den vier ausgewerteten Vergleichsmessungen ergeben haben, bringt Tabelle 15.

Tabelle 15

Messung	Beschleunigungs-Intensität			Objektive Registrierung			Bi-Registrierung		
	T_{\max} für Beschleunigungs-Intensität (sec)	f-spektrale Beschleunigungs-Intensität a.d.Stelle T_{\max}	Beschleunigungs-Gesamt-Intensität	T_{\max}	E_f a.d. Stelle T_{\max}	Gesamt-Intensität* E^*	T_{\max}	E_f (Bi) a.d.Stelle T_{\max}	Gesamt-Intensität* E^*
Außenalster	1,41	$0,19 \cdot 10^5$	$0,92 \cdot 10^4$	1,45	57	23,3	1,48	57	
2.12.1957	2,4	$0,43 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^4$	4,2	$2,9 \cdot 10^3$	530	4,6	$1,9 \cdot 10^3$	425
14.2.1958	3,2	$1,2 \cdot 10^5$	$4,3 \cdot 10^4$	4,1	$1,3 \cdot 10^4$	2064	4,3	$5,0 \cdot 10^3$	826
17.2.1958	3,0	$1,5 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$	10,5	$4,8 \cdot 10^4$	6593	11	$1,0 \cdot 10^5$	13325
Dimension	[sec]	[gal ² sec]	[gal ²]	[sec]	[cm ² sec]	[cm ²]	[sec]	[cm ² sec]	[cm ²]

Dass T_{\max} bei der objektiven Messung vom 14.2.1958 kleiner ist als am 2.12.1957, ist auf den Umstand zurückzuführen, dass die Windsee am 2.12.1957 von einer längeren Dünung überlagert war.

Die Schwierigkeiten, die sich bei der Auswertung der Beschleunigungen im Zusammenhang mit der doppelten Integration ergeben, zeigen sich mit besonderer Deutlichkeit, wenn man die "Eichfunktionen" $\mathcal{G}_s, \mathcal{G}_I$ und $\bar{\mathcal{G}}$, die sich bei den verschiedenen Messungen ergeben haben, für ein und dieselbe Registrierart vergleicht.

Mit Hilfe der Verteilung der "Empfindlichkeit" und der "Eichfunktionen" sollen - wie im Abschnitt D 4a auf S. 67 ausgeführt - die mit dem Seegangs-Beschleunigungsschreiber gewonnenen Messergebnisse auf die wahren Seegangsgrößen umgerechnet werden können. Diese "Reduktion" wird nur dann durchgeführt werden können, wenn jeder Seegangsart eine bestimmte Eichfunktion zugeordnet werden kann. Dies ist nur möglich, wenn sich die bei Vergleichsmessungen ermittelten Eichfunktionen so anordnen, dass zwischen ihnen eine Inter- bzw. Extrapolation möglich ist.

Die Verteilung der "Empfindlichkeit hinsichtlich sichtbarer Wellen", \mathcal{G}_s , im zweidimensionalen Koordinatensystem ist bei den drei Mellum-Plate-Registrierungen recht unterschiedlich. Eine schwache Ähnlichkeit kann man - wie erwähnt - höchstens zwischen den \mathcal{G}_s -Verteilungen vom 2.12.1957 und dem 17.2.1958 finden.

Die Eichfunktionen $\mathcal{G}_I^{(B)}$ (Abb.95) beziehen sich auf die mittels Division der Beschleunigungswerte durch $(2\pi f)^4$ behelfsmässig "integrierten" Beschleunigungsregistrierungen. Die Abb. enthält ausserdem

eine "durchschnittliche" Eichfunktion, die man durch eine Mittelung der bei den drei Mellum Plate-Messungen erzielten Eichfaktoren berechnet hat. Das steile Ansteigen im Periodenbereich >4 sec macht die Eichfunktion vollständig unbrauchbar für eine Umrechnung des $E_f^{(B)}$ -Spektrums in das wahre Seegangsspektrum E_f . Solange dem Seegang "Fremd"-Schwankungen im langwelligen Bereich überlagert sind, bringt die einfache Multiplikation der Beschleunigung mit $\frac{1}{(2\pi f)^4}$ zwecks "Integration" keine befriedigende Lösung - ganz abgesehen davon, dass die sichtbaren Seegangswellen keine harmonischen Schwingungen sind. Die Reihenfolge der verschiedenen Eichfunktionen lässt sich besser erkennen, wenn die Kurven ihrer durch Zufälligkeiten bedingten kurzen Schwankungen entkleidet sind. Wir haben die Kurven durch 5wertig übergreifende Mittelbildung geglättet (Abb.96).

Zwar zeigt sich eine gewisse Ordnung der Lage zwischen den Messungen Aussenalster, 2.12.1957 und 14.2.1958; jedoch fällt die Eichfunktion für den 17.2.1958 (Nordweststurm 8-9 Bft) aus dieser Reihenfolge heraus.

Hierzu ist zu bemerken, dass der Seegang am 2.12.1957 und auf der Aussenalster weniger steil war als während der beiden anderen Messungen am Turm Mellum Plate. Da der Seegang am 17.2.1958 ausserdem hoch und mit Brechern durchsetzt war, trat wahrscheinlich eine insgesamt beträchtliche Vergrösserung der Beschleunigungsintensität auf.

Die Filterung bei der elektrischen Integration bewirkt zwar, dass sich die Kurve der Eichfaktoren $\sigma_f^{(Bi)}$ (Abb.97) bis zu $T = 6$, $T = 8$, bzw. $T = 12$ sec in einem Bereich hält, für den die "Reduktion" des Bi-Spektrums auf das wahre Spektrum möglich erscheint; wegen der unterschiedlichen Filterung weichen die Funktionen jedoch sehr stark voneinander ab. Übersichtlicher lassen die geglätteten Kurven $\bar{\sigma}_f^{(Bi)}$ (Abb.98) erkennen, dass Lage und Form der Eichfunktionen in hohem Masse von der Art des verwendeten Filters abhängig ist. Im Frequenzbereich $f = 0,4$ bis $0,9$ ($T = 1,5$ bis $1,1$ sec), wo die Filterwirkung gering ist, liegen die $\bar{\sigma}_f^{(Bi)}$ -Kurven in der gleichen Reihenfolge wie die $\bar{\sigma}_f^{(B)}$ in Abb.96. Vielleicht ist in dieser Tatsache, nämlich dass der Seegang am 2.12.1957 weniger steil war, als zur Zeit der beiden anderen Messungen am Turm Mellum Plate, ein Grund dafür zu finden, dass die σ -Werte für den 2.12.1957 am wenigsten von der "idealen" Grösse 1 abweichen. Sowohl in Abb.96 als auch in Abb.98 weisen die Eichkurven für den 2.12.1957 einen Nebenmaximum bei $f = 0,5$ auf. Möglicherweise ist diese Erscheinung

darauf zurückzuführen, dass die Windsee an diesem Tage von längerer nordwestlicher Dünung überlagert war. - Die Glättung in Abb.98 ist nur für den Bereich ausserhalb des steilen Anstiegs am niederfrequenten Ende durchgeführt worden. Die aufwärts weisenden Pfeile deuten an, dass am linken Ende der Kurven der steile Anstieg der $\bar{\sigma}_x^{(Bi)}$ -Werte liegt.

In der folgenden Aufstellung werden die Perioden maximaler spektraler Intensitätsdichte, T_{\max} , verglichen, wie sie sich für die objektiven Messungen L bzw. F und für das Beschleunigungsspektrum B (nicht integriert) ergeben. Zu erwarten ist, dass T_{\max} in B kleiner ist als in einer Registrierung der Auslenkung; denn auch an kurzen Wellen treten starke Beschleunigungen auf. Hohe Wellen sind in der Beschleunigungs-Registrierung durch ein längeres Anhalten positiver bzw. negativer Beschleunigungsgrössen gekennzeichnet.

Tabelle 16

	objekt.Messg. Intensitätsspektrum	Beschleun.-Messung Beschleunigungsspektrum
2.12.1957	$T_{\max} = 4,2 \text{ sec}$	2,4 sec
14. 2.1958	$T_{\max} = 4,1 \text{ sec}$	3,2 sec
17. 2.1958	$T_{\max} = 10,1 \text{ sec}$	3,2 sec

Es erweist sich, dass T_{\max} bei den verschiedenen Beschleunigungsspektren (rechte Spalte) von ähnlicher Grösse ist, während die Unterschiede zu den T_{\max} der objektiven Spektren (linke Spalte) stark variieren. Möglicherweise steht die Uneinheitlichkeit des Verhältnisses, das von den jeweils zueinander gehörigen T_{\max} bei den drei Messungen gebildet wird, damit im Zusammenhang, dass im Spektrum vom 17.2.1958 in Richtung der langen Perioden ein sehr scharfer Abfall auftritt (Wirkung der geringen Wassertiefe bei hohem Seegang), während die Verteilung vom 14.2.1958 nach dieser Seite allmählich abfällt (junge Windsee bei kurzem Fetch).

6. Diskussion der Ergebnisse

Betrachtet man rückschauend und zusammenfassend die bei den vier Vergleichsmessungen erzielten Ergebnisse, so muss festgestellt werden, dass es bisher nicht gelungen ist, die Registrierungen des Seegangs-Beschleunigungsschreibers durch einfache "Eichfunktionen" auf die wahren Verhältnisse zu "reduzieren".

Die Schwierigkeiten hierbei gehen auf verschiedene Ursachen zurück :

- 1) Die Beschleunigungs-Registrierung enthält neben den durch den gewöhnlichen Seegang erzeugten Aufzeichnungen überlagernde langwellige Schwankungen. Ihrer Natur nach könnte es sich um Nullpunktsschwankungen durch eine nicht vollständig genaue Führung des nicht emulsierten Film im Gerät handeln. Im Perioden-Bereich von 20 sec und mehr sind durch die objektiven Messungen Schwankungen des Wasserstandes erfasst worden (Abb.67), deren Ursprung in den Gezeiten oder in seiche-ähnlichen Erscheinungen gesucht werden könnte.
- 2) Die "Fremdschwankungen" machen es erforderlich, bei der Integration ein Filter zu benutzen, das die langwelligen Wellenanteile aller Art ausschaltet. Andernfalls wird bei der unvermeidlichen doppelten Integration infolge des Eingehens von T^4 als Faktor die "Intensität" der langen Störschwankungen so stark vergrößert, dass die langwellige Flanke des Spektrums durch Überlagerungs-Erscheinungen vollständig unkenntlich gemacht wird. Ein "ideales" Filter wäre so beschaffen, dass es die Störschwankungen herausbringt, während das langwellige Ende des Spektrums nicht oder nur wenig beeinflusst werden würde. Je nach den Eigenschaften des Seegangs müssten daher Filter unterschiedlichen Wirkungsbereiches benutzt werden. Hier liegt der Grund dafür, dass wir bei der elektrischen Integration der drei Mellum Plate-Registrierungen verschiedene Filter verwendet haben. Es handelte sich um erste Versuche bei der Wahl der Filter. Die Integration mit anderen Filtern zu wiederholen, würde sich nicht gelohnt haben, weil in Zukunft ein verbesserter Seegangs-Beschleunigungsschreiber benutzt werden wird. Hinsichtlich der Auswahl der richtigen Filter sind noch besondere Untersuchungen erforderlich.

Ein zu "scharfes" Filter (Mellum Plate 14.2.1958) bewirkt, dass die langwelligen Seegangsanteile gelöscht werden. Das Intensitäts- bzw. Energiespektrum ist dann am langwelligen Ende gekappt. "Schwache"

Filter (17.2.1958) lassen das Abfallen der Verteilung auf der langwelligeren Seite von T_{\max} nicht in zufriedenstellender Weise erkennen.

- 3) Bei der Übertragung der mit dem Edelstein auf Blankfilm eingeritzten Registrierungen in "gezeichnete" Kurven und insbesondere bei der Umzeichnung in Schwarz-Weiss-Registrierungen auf Normalfilm zwecks elektrischer Integration sind Ungenauigkeiten nicht zu vermeiden. Die Fehler können bei der anschliessenden doppelten Integration stark vergrössert werden.
- 4) Einen nicht geringen Einfluss übt der Umstand aus, dass der Seegangs-Beschleunigungsschreiber im Seegang grösstenteils nicht horizontal liegt und dass dadurch Komponenten vertikaler Beschleunigungen verloren gehen, während horizontale Komponenten mit aufgenommen werden. Die Grösse des dadurch bedingten Fehlers wird durch die Steilheit des Seeganges beeinflusst.

Ausserdem werden sehr kleine Wellen von dem Beschleunigungs-Messgerät nicht registriert. Darüberhinaus werden die höchsten Spitzen der Kämme vernachlässigt, weil das Gerät auf dem Wellenkamm etwas unterschneidet.

Die Berücksichtigung der durch diese Ungenauigkeiten bedingten Fehler ist Gegenstand der "Eichung", also der Ermittlung von Eich- oder Reduktionsfunktionen.

- 5) Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber ist mittels Leine gefesselt. Bei den Vergleichsmessungen war das Seil verhältnismässig kurz (etwa 15 m). Ausserdem herrschte ein nicht geringer Gezeitenstrom, der dafür sorgte, dass die Leine straff stand. Das Gerät ruckte daher im Zusammenhang mit der Wasserbewegung in den Wellen gelegentlich scharf an, was (bei nicht horizontaler Lage) zu Fehlern in der Registrierung führt.

Die weitaus grössten Schwierigkeiten entstehen im Zusammenhang mit der zweifachen Integration. Dass die Wellen des Seegangs nicht als harmonische Schwingungen aufgefasst und ohne Ansatz eines Filters durch einfache Multiplikation des Beschleunigungsspektrums mit $\frac{1}{(2\pi f)^2}$ integriert werden dürfen, ist gezeigt worden. Die doppelte Integration mit einem mechanisch arbeitenden Gerät ist praktisch an den unvermeidbaren Ungenauigkeiten beim Nachfahren der (vergrösserten) Beschleunigungs-Registrierung und der Unzulänglichkeit des Versuchs-Filters ge-

scheitert. Auch die nachträgliche Beseitigung übermässiger Filterwirkungen brachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Auch bei der elektrischen Integration ist die Wahl der Filter von ausschlaggebender Bedeutung. Bei Seegangs-Untersuchungen ist die Wellenenergie im langwelligen Bereich des Spektrums von grösstem Interesse. Ein ungerichtetes Kappen am langwelligen Ende fälscht nicht nur das Messergebnis bezüglich der Gesamt-Intensität, sondern verhindert auch ein Urteil über Anwesenheit und Energie-Anteil der längeren Seegangskomponenten und eventuell sogar über die Grösse von T_{\max} . Es ist deshalb von entscheidender Wichtigkeit, Untersuchungen über ein optimales Filter anzustellen. Es schwebt uns vor, für Klassen des Seegangs (z.B. 0-1 m, 1-2 m Höhe, 2-4 m Höhe usw.) je ein optimales Filter ausfindig zu machen, das dann fallweise anzuwenden wäre. Möglicherweise wird man die "wahre" Beschaffenheit des langwelligen Spektrums für Bi auch dadurch feststellen können, dass die Registrierung nacheinander verschiedenen Filtern unterworfen wird.

Auf der positiven Seite ist zu den Messungen und zu den erzielten Ergebnissen zu bemerken :

- 1) Es ist erstmalig gelungen, integrierte Beschleunigungsmessungen objektiven Vergleichsregistrierungen gegenüberzustellen und somit Vergleiche anzustellen hinsichtlich der Energiespektren und der sichtbaren Wellen. Die Gegenüberstellung mit objektiven Registrierungen schafft eine wesentliche Grundlage zur Prüfung der Brauchbarkeit von Seegangs-Beschleunigungsmessungen.
- 2) Bei passender Filterwahl ergeben die Beschleunigungsregistrierungen Spektren, die geeignet sind, nach Anbringen von Eich- bzw. "Reduktions"-funktionen Schlüsse auf die Zusammensetzung des Seegangs zu ziehen. Bei unseren Vergleichsmessungen fielen die Maxima des Repräsentativ-Spektrums und des Bi-Spektrums auf die gleiche Wellenperiode oder auf eng benachbarte Perioden. Die spektrale Form der Intensitäts-Verteilung wird für grosse Teile des Spektrums in ausreichender Weise wiedergegeben. Dieser Befund zeigt, dass der Seegangs-Beschleunigungsschreiber prinzipiell für Seegangsmessungen geeignet ist.
- 3) Die Eichkurven zeigen deutliche Ansätze zu einem annähernd einheitlichen General-Verlauf. Im langwelligen Spektrumsbereich nehmen die Eichfaktoren G_1 grosse Werte an; sie gehen für mittlere Perioden auf

- $\sigma_1 \sim 1$ zurück, um im kurzwelligen Gebiet auf Werte < 0.5 abzusinken.
- 4) Auch bei Auswerte-Resultaten für sichtbare Wellen sind teilweise ausreichende Übereinstimmungen der Randverteilungen (eindimensionale Häufigkeitsverteilungen) zwischen "objektiver" und Bi-Messung erzielt worden.
 - 5) Bei der Integration sind Fortschritte erzielt worden. Nachdem sich herausgestellt hat, dass die behelfsmässige "Integration" (Division durch $(2\pi f)^2$) und die mechanische Integration keine brauchbaren Ergebnisse erbringen, wurden ein Analog-Rechner und eine Schaltung ausfindig gemacht, die eine verbesserte Integration ermöglichen. Die Lösung des Integrationsproblems erforderte bzw. erfordert grosse Anstrengungen sowie immer wieder neue Überlegungen und Massnahmen.
 - 6) Endlich ist mit Hilfe der Vergleichsmessungen untersucht worden, wie sich eine Beschleunigungs-Seegangsmessung zur entsprechenden "objektiven" Messung verhält. Die Unterschiede zwischen den beiden Spektren wurden dargestellt und schliesslich Vorschläge gemacht, wie man aus Beschleunigungsregistrierungen die wahren Seegangseigenschaften durch Reduktionsmassnahmen ermitteln kann.

F. Ausblick

=====

Es besteht kein Zweifel darüber, dass die hier angewandten Messmethoden und die Auswertungsverfahren noch nicht den Ansprüchen genügen, die gefordert werden müssen, wenn zeitliche oder örtlich bedingte Änderungen der Seegangsstruktur - etwa durch Simultanmessungen - ermittelt werden sollen.

Nach Abschluss der Vergleichsmessungen im Februar 1958, bei denen der Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit Film-Ritz-Aufzeichnung benutzt wurde, und nach Vorliegen der ersten Auswerte-Ergebnisse begann das Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes an einer Verbesserung des bisherigen Gerätes zu arbeiten. Bei der Neukonstruktion durch Ing.A.Lang besteht die Masse aus einem Magneten, der durch ein Magnetfeld in der Null-Lage gehalten wird. Die Registrierung erfolgt photographisch auf Normalfilm in Form einer Schwarz-Weiss-Kurve. Die Vorzüge des neuen Instrumentes (vgl.Lit.10) liegen hauptsächlich in folgendem :

- 1) Für die elektrische Integration und die anschliessenden Analysen sind keinerlei Übertragung, Vergrösserungen und Umzeichnungen mehr erforderlich, sondern die Original-Registrierung kann über einen lichtelektrischen Umsetzer dem integrierenden Analog-Rechner unmittelbar zugeführt werden. Dadurch werden Nullpunktsschwankungen, die durch das verschiedentliche Nachzeichnen der Beschleunigungs-Registrierungen bisher unvermeidbar waren, ausgeschaltet.
- 2) Nullpunkts-Schwankungen, die im bislang benutzten Gerät durch Ermüdungserscheinungen der Haltefedern für die Masse aufgetreten sein können, entfallen mit Rücksicht auf die nunmehr magnetische "Aufhängung" der Masse. Die magnetischen Felder können unter Kontrolle gehalten werden.
- 3) Die Masse kann bei der Neukonstruktion nur noch Bewegungen ausführen, die genau vertikal zur Grundplatte des Gerätes gerichtet sind; Horizontalkomponenten (parallel zur Grundplatte) entfallen nahezu ganz.
- 4) Die Uhr mit Federwerks-Antrieb ist durch eine elektrische Synchron-Uhr ersetzt worden.

Die Beseitigung der Nullpunktsschwankungen bzw. deren Verkleinerung ist von grosser Wichtigkeit im Hinblick auf die notwendige doppelte Integration. Es besteht durchaus die Möglichkeit, dass ein Teil der "langwelligen" Schwankungen in der Registrierung, welche die Integration so stark erschwerten, auf Schwankungen des Mittelniveaus zurückzuführen sind.

Echte Schwankungen der Wasseroberfläche, die - wie z.B. die objektive Messung vom 2.12.1957 zeigt (Abb.67) - ausserdem aufgetreten sind, werden auf freier See bzw. in grösserem Abstand von der Küste gleichfalls weniger stark in Erscheinung treten als bei den Messungen am Turm Mellum Plate, der im Bereich einer langgestreckten Bucht liegt.

Werden die Messungen von einem Schiff aus vorgenommen, so wird das Gerät an einer längeren (schwimmenden) Leine ausgebracht als bei den Vergleichsmessungen in der Nähe des Messpfahls am Leuchtturm Mellum Plate. Unrealistisch grosse Beschleunigungswerte durch Anrücken des Gerätes der straff gespannten Leine kommen dann in Fortfall. Ebenso entfällt eine eventuelle Verzerrung der Beschleunigungs-Registrierung bei horizontalen Bewegungen der Masse und der angeschlossenen mechanischen Schreibvorrichtung.

Auch hinsichtlich der bei der elektrischen Integration verwendeten Filter ist mit Verbesserungen zu rechnen. Wenn man bedenkt, dass die bisher ohne Erfahrung und ohne speziell vorbereitende Filterungsversuche durchgeführten Integrationen wenigstens bezüglich der Spektrumsform sofort ansprechende Ergebnisse gebracht haben, so darf man annehmen, dass gezielte Filter-Untersuchungen die bisherigen Unzulänglichkeiten der doppelten Integration im langwelligen Bereich stark mindern werden.

So ist zu hoffen und aufgrund vorliegender Ergebnisse bereits zu erkennen, dass die bereits durchgeführten oder in Aussicht genommenen Verbesserungen der Messtechnik und der Auswerte-Methoden in Kürze zufriedenstellende Seegangsmessungen auf freier See auf dem Prinzip der Beschleunigungs-Registrierung ermöglichen werden.

G. Herkunft der Geldmittel und Dank für Unterstützung
=====

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes

"Messung des Seeganges, insbesondere seiner spektralen
Struktur, in der Deutschen Bucht unter Verwendung
gleichzeitig arbeitender Wellenregistriergeräte"

vorgenommen. Die Geldmittel für die Durchführung des Projektes wurden
seitens der Bundesrepublik Deutschland aus dem ERP-Sondervermögen in
mehreren Abschnitten zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen wurden
von verschiedenen Stellen des Deutschen Wetterdienstes, und zwar vom
Instrumentenamt Hamburg, vom Zentralamt in Offenbach und vom Seewetter-
amt in Hamburg, hier insbesondere von der Hollerith-Gruppe, unterstützt.

Folgenden Damen und Herren, Institutionen und Firmen sei besonderer
Dank für ihre Hilfe, ihre Mitarbeit oder ihr Entgegenkommen ausge-
sprochen :

Herr Reg.Ob.Insp. A.Lang, Hamburg
Herr Dipl.Ing. W.Mildner, Köln
Herr H.Rittinghaus, Wilhelmshaven
Herr Dr.J.Albrecht, Hamburg
Herr Dr.P.Christoph, Hamburg
Herr H.Friedrich, Hamburg
Herr Dr.H.Baumann, Hamburg
Herr P.Hafner, Hamburg
Herr H.Rittenbruch, Hamburg
Herr J.Greiter, Hamburg
Fräulein R.Meissner, Hamburg
Wasser- und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven
Besatzungen des Leuchtturms Mellum Plate
Besatzungen der Schiffe "Oldeoog", "Schillig"
und "Lurch" (WSA Wilhelmshaven)
Institut für Angewandte Mathematik der Universität Hamburg,
Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg
Nederlands Koninklijk Meteorologisch Instituut, De Bilt,
Niederlande,
Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Hamburg,
Fa. Rohde & Schwarz Vertriebs G.m.b.H., Zweigniederlassung Köln,
Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel.

Die Zeichnungen führte grösstenteils Fräulein M.Flashaar aus.

S c h r i f t t u m

1. BARTSCH, H. : Statistische Methoden zur Untersuchung der Bewegungen eines Schiffes im Seegang. Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Bericht Nr. 1151 (1958)
2. BARTSCH, H. : Zur statistischen Verteilung der Wellenhöhen im Seegang sowie der Stampf- und Rollwinkel eines Schiffes im Seegang. Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Bericht Nr.1173 (1959)
3. BURLING, R.W. :. The spectrum of waves at short fetches. Dtsch. Hydrogr.Zeitschr.12, 45-64 und 96-117 (1959)
4. CARTWRIGHT, D.E. und M.S. LONGUET-HIGGINS :
 The statistical distribution of the maxima of a random function. Proc.Roy.Soc., A,237, 212-232 (1956)
5. CHASE, J., L.J. COTE, W. MARKS, E. MEHR, W.J. PIERSON, JR., F.C. RÖNNE, G. STEPHENSON, R.C. VETTER, R.G. WALDEN :
 The directional spectrum of a wind generated sea "Stereo Wave Observation Project" (SWOP), New York Univ. Coll. of Eng., Res.Div., (1957)
6. CRAMER, H. : Mathematical Methods of Statistics. Princetown Univ.Press, 6.Aufl., 1954
7. DORRESTEIN, R. : A wave recorder for use on a ship in the open sea. Proceed. Sympos. on the behaviour of ships in a seaway, 7.-10. Sept. 1957
8. GRENANDER, U. und M. ROSENBLATT :
 Statistical Analysis of Stationary Time Series. Almquist u. Wiksell, Stockholm 1956
9. LANG, A. : Ein einfaches Beschleunigungs-Registriergerät für Wellenhöhen-Messungen. Techn.Mitt.d.Instr.Wes.des DWD, Nr.26, Dez. 1953.
10. LANG, A. : Über die Entwicklung von Beschleunigungsschreibern für Seegangsmessungen. Dtsch.Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentl. Nr.24 (1960)
11. LONGUET-HIGGINS, M.S. :
 On the statistical distribution of the heights of sea waves. Journ.Mar.Res. 11, No.3 (1952)
12. MILDNER, W. : Anleitung zum praktischen Gebrauch des elektronischen Analogrechners. Herausgeg. Fa. Rohde & Schwarz Vertriebs G.m.b.H., 1959

13. NEUMANN, G. : On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea. Beach Eros. Bd., Techn.Mem. No. 43 (1953)
14. PIERSON, W.J.,JR.: An electric wave spectrum analyser and its use in engineering problems. Beach Eros.Bd. Techn.Mem. No. 56 (1954)
15. PIERSON, W.J.,JR.: A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean surface waves. New York Univ., Coll.of Eng., Dep. of Met., 1952
16. PIERSON, W.J.,JR.: Wind Generated Gravity Waves. Advances in Geophysics. Vol. 2, H.E.Landsberg Ed., New York 1955
17. PIERSON, W.J., JR. and MARKS, W. :
The Power Spectrum Analysis of Ocean Wave Records. Trans.American Geoph. Un. Vol.33 No. 6, 834-844 (1952)
18. PIERSON, W.J., JR., G. NEUMANN and R.W. JAMES :
Practical methods for observing and forecasting ocean waves etc. U.S. Hydrogr. Office Pub.No.603, Washington 1955
19. RICE, S.O. : Mathematical analysis of random noise. Bell System Techn.Journ. (1944 u.1945)
20. ROLL, H. U. : Oberflächen-Wellen des Meeres. Handbuch der Physik Bd.XLVIII, S.671-733, Springer-Verlag (1957)
21. STUMPF, K. : Grundlagen und Methoden der Periodenforschung. Verl. Springer, Berlin 1937
22. TICK, L. : A non-linear random model of gravity waves I. New York Univ.Coll.of Eng.,Dep.of Math. (1958)
23. TUCKER, M.J. : A shipborne wave recorder. Transactions of the Institute of Naval Architects, 98, 236-250 (1956)
24. TUCKER, M.J. : The accuracy of wave measurements made by vertical accelerometers. Deep Sea Res. 5, 185-192, London (1959)
25. TUKEY, J.W. : The sampling theory of power spectrum estimates. Symp. on App. of Autocorr. Anal. Woods Hole/Mass., 1949
26. TUKEY, J.W. and R.W. HAMMING :
Measuring noise color I. Bell Telephone Lab., Murray Hill, New Jersey, 1949
27. WALDEN, H. : Ein neues Diagramm zur Berechnung des Seegangs aus den Windverhältnissen. Ann.Meteorol. 7, 213-218 (1955/56)

28. WALDEN, H. und H.G. FARMER :

Auswertung von Seegangsregistrierungen des Forschungsschiffes "Atlantis" mit dem "ship-borne wave recorder" sowie Vergleich mit entsprechenden Seegangsberechnungen aus den Windverhältnissen (hindcasting). Dtsch.Hydrogr. Zeitschr. 10, 121-134 (1957).

Abbildungen - Verzeichnis

- Abb. 1 s.Bildtafel 1
- Abb. 2 Außenalster mit Meßstelle
- Abb. 3 s.Bildtafel 1
- Abb. 4 Die Lage des Leuchtturms Mellum Plate
(Ausschnitt aus einer Seekarte)
- Abb. 5 Schematische Skizze des Beschleunigungs-Meßgerätes (Aufriß)
- Abb. 6 Wellenschreiber im Seegang (schematisch)
- Abb. 7 s.Bildtafel 1
- Abb. 8 Schematische Skizze des Meßpfahls
- Abb. 9 s.Bildtafel 1
- Abb.10 Schematische Skizze von Leuchtturm, Meßstand und Meßpfahl
- Abb.11 Brückenschaltung der Leitfähigkeitssonde
- Abb.12 s.Bildtafel 2
- Abb.13 s.Bildtafel 3
- Abb. 14a,b s.Bildtafel 3
- Abb.15 „Punktschrieb“, gefertigt mit dem Übertragungsgerät
nach A.Lang
- Abb.16 Schwarz-Weiß-Kurve
- Abb.17 Gegenüberstellung von kinematographischer und L-Registrierung
(2.12.1957)
- Abb.18 Extremwerte aus kinematographischer und L-Registrierung
gegeneinander aufgetragen. „pRE“ = Raster-Einheiten
- Abb.19 Ergebnisse der Abb.18 geglättet
- Abb.20 Anfangs- und Schlußzeichnung der Leitfähigkeitssonde
(Messung 2.12.1957)
- Abb.21 Gegenüberstellung kinematographischer und E-Registrierung
- Abb.22 Extremwerte aus kinematographischer und E-Registrierung
gegeneinander aufgetragen. „pRE“ = Raster-Einheiten
- Abb.23 „Eichkurve“ gemäß Abb.22

- Abb.24 s.Bildtafel 3
- Abb.25 Nullpunktslage bei Anwendung übergreifender Mittelwertbildung
- Abb.26 Integrations-Filterfunktion, angewendet bei mechanischer Integration
- Abb.27 Filterfunktion des Miller-Integrators
- Abb.28 s.Bildtafel 4
- Abb.29 Zero-crossing- und Nicht-zero-crossing-Wellen (schematisch)
- Abb.30 Beispiel für zweidimensionale relative Häufigkeitsverteilung (geglättet und reduziert) - Mellum Plate 2.12.1957, Registrierung B_i (mech)
- Abb.31 Autokorrelations-Analyse
- Abb.31a Registrierung $z(t)$ und Ordinaten an äquidistanten Stellen t_j
- Abb.31b Autokorrelationsfunktion und Testfunktion $T = T_m$
- Abb.31c Spektrale Verteilung der Autokorrelation
- Abb.32 Wirkungsweise eines rechteckigen Filters
- Abb.33 Symmetrische Lage der Filterstellen
- Abb.34 Filterfunktion nach TUKEY und HAMMING
- Abb.35a s.Bildtafel 4
- Abb.35b s.Bildtafel 4
- Abb.36 Form der Filterfunktion bei der Fourier-Analyse
- Abb.37 Ausschnitt aus dem mit dem Fourier-Analysator registrierten Analysen-Ergebnis
- Abb.38 χ^2 -Verteilung mit 2 Freiheitsgraden
- Abb.39 Lage von Rad und Lichtspalt zur Bestimmung von E^* (Grauwert-Ermittlung)
- Abb.40 Photometerkurve
- Abb.41 Photometerkurve im Wahrscheinlichkeitspapier
- Abb.42 Photometerkurve, Zählung der äquidistanten Punkte ausgehend von $\bar{z}_p^{(0,5)}$
- Abb.43 Außenalster, Häufigkeitsverteilung verdoppelter Halbperioden
- Abb.44 Außenalster, Vergleich markanter Wellen

- Abb.45 Außenalster, Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen
- Abb.46 Außenalster, charakteristische Kurven, L-Registrierung
- Abb.47 Alstermessung, Vergleich der „Seegangintensitäten“ aus B- und L-Registrierung
- Abb.48 Alstermessung, spektrale Verteilung des Eichfaktors
- Abb.49 Mellum Plate 2.12.1957, charakteristische Kurven aus L-Registrierung
- Abb.50 Mellum Plate 2.12.1957, charakteristische Kurven aus Registrierung des Echogeräts (E)
- Abb.51 Mellum Plate 2.12.1957, charakteristische Kurven der Registrierungen L, Bi und Bi_(mech)
- Abb.52 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilungen für verdoppelte Halbperioden (alle Wellen) - Registrierungen L,E,B
- Abb.53a Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen L und Bi
- Abb.53b Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen L und Bi_(mech)
- Abb.54 Mellum Plate 2.12.1957, absolute Häufigkeitsverteilung der Perioden markanter Wellen
- Abb.55 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung für verdoppelte Halbperioden, L-Registrierung, alle Wellen und zero-crossing-Wellen
- Abb.56 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung für verdoppelte Halbperioden, E-Registrierung, alle Wellen und zero-crossing-Wellen
- Abb.57 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung der Schwankungshöhen, Registrierungen L und E
- Abb.58 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung der Schwankungen der Beschleunigung, $N_p = 1222$
- Abb.59 Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung für verdoppelte Halbperioden, Registrierungen L, Bi und Bi_(mech), zero-crossing-Wellen
- Abb.60 Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung für Höhen der zero-crossing-Wellen, Registrierungen L, Bi und Bi_(mech)

- Abb.61 Mellum Plate 2.12.1957, absolute Häufigkeitsverteilung verdoppelter Halbperioden, Registrierungen L, Bi und Bi(mech)
- Abb.62 Mellum Plate 2.12.1957, absolute Häufigkeitsverteilung der Schwankungshöhen, Registrierungen L, Bi und Bi(mech)
- Abb.63 a,b Mellum Plate 2.12.1957, zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen für die Registrierungen L (63a) und Bi (63b)
- Abb.64 a Mellum Plate 2.12.1957, „Empfindlichkeit“ („Eichfaktoren“) hinsichtlich sichtbarer Perioden für Registrierungen L gegen Bi, zweidimensional
- Abb.64 b Mellum Plate 2.12.1957, „Empfindlichkeit“ („Eichfaktoren“) hinsichtlich sichtbarer Perioden für Registrierungen L gegen Bi(mech), zweidimensional
- Abb.65 Mellum Plate 2.12.1957 und Außenalster, Spektrum der Beschleunigungs-Intensität
- Abb.66 Mellum Plate 2.12.1957, Spektren der „Seegangs-Intensitäten“ für Registrierungen L, B, Bi(mech) und Bi(mech red)
- Abb.67 Mellum Plate 2.12.1957, Spektren der „Seegangs-Intensitäten“ für Registrierungen L und Bi
- Abb.68 Mellum Plate 2.12.1957, Autokorrelationsfunktionen für Registrierungen L und Bi
- Abb.69 Mellum Plate 2.12.1957, Gegenüberstellung von Spektren, die mittels Autokorrelations- bzw. durch Fourier-Analyse ermittelt wurden
- Abb.70 Mellum Plate 2.12.1957, Eichfunktionen für „Intensitäts“-Spektren B, Bi(mech) und Bi(mech red)
- Abb.71 Mellum Plate 14.2.1958, charakteristische Kurven
- Abb.72 Mellum Plate 14.2.1958, reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen L und Bi
- Abb.73 Mellum Plate 14.2.1958, reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der Schwankungshöhen, zero-crossing-Wellen, Registrierungen L und Bi

- Abb.74 Mellum Plate 14.2.1958, reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der verdoppelten Halbperioden, zero-crossing-Wellen, Registrierungen L und Bi
- Abb. 75a,b Mellum Plate 14.2.1958, zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen, Registrierungen L (75a) und Bi (75b)
- Abb.76 Mellum Plate 14.2.1958, „Empfindlichkeit“ (Eichfaktoren), zweidimensional, Bi gegen L
- Abb.77 Mellum Plate 14.2.1958, Autokorrelationsfunktionen für Registrierungen L, Bi und B
- Abb.78 Mellum Plate 14.2.1958, Spektren der „Seegangsintensität“ für Registrierungen L, Bi und B
- Abb.79 Mellum Plate 14.2.1958, Spektrum der Beschleunigungsintensität
- Abb.80 Mellum Plate 14.2.1958, Eichfunktionen, Registrierungen Bi und B gegen L für Intensitäts-Spektren
- Abb.81 Mellum Plate 17.2.1958, charakteristische Kurven
- Abb.82 Mellum Plate 17.2.1958, reduzierte relative Häufigkeit der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen F und Bi
- Abb.83 Mellum Plate 17.2.1958, reduzierte relative Häufigkeit der Schwankungshöhen, zero-crossing-Wellen, Registrierungen F u. Bi
- Abb.84 Mellum Plate 17.2.1958, reduzierte relative Häufigkeit der verdoppelten Halbperioden, zero-crossing-Wellen, Registrierungen F und Bi
- Abb.85 a,b Mellum Plate 17.2.1958, zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen, Registrierungen F (85a) und Bi (85b)
- Abb.86 Mellum Plate 17.2.1958, „Empfindlichkeit“ (Eichfaktoren), zweidimensional, Bi gegen F
- Abb.87 Mellum Plate 17.2.1958, Autokorrelationsfunktionen für Registrierungen F, Bi und B
- Abb.88 Mellum Plate 17.2.1958, Spektren der „Seegangs-Intensität“ für Registrierungen F, Bi und B (behelfsmäßig integriert), Spektrum der Beschleunigungs-Intensität (Registrierung B, nicht integriert)
- Abb.89 Mellum Plate 17.2.1958, Eichfunktionen für Intensitätsspektren, Registrierungen Bi und B gegen F
- Abb.90 Mellum Plate 17.2.1958, Spektren der Beschleunigungs-Intensität, Gegenüberstellung von Autokorrelations- und Fourier-Analyse

- Abb.91 Reduzierte relative Häufigkeit der Schwankungshöhen (zero-crossing-Wellen). Registrierungen L bzw. F: Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958
- Abb.92 Reduzierte relative Häufigkeit der verdoppelten Halbperioden (zero-crossing-Wellen). Registrierungen L bzw. F: Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958
- Abb.93 Spektren der „Seegangs-Intensität“ E_f . Registrierungen L bzw. F: Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958
- Abb.94 Spektren der „Seegangs-Intensität“ $E_f^{(Bi)}$. Registrierungen Bi: Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958
- Abb.95 Eichfunktionen $\epsilon_I^{(B)}$, Registrierungen Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958
- Abb.96 Geglättete Eichfunktionen $\epsilon_I^{(B)}$, Registrierungen Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 u. 17.2.1958
- Abb.97 Eichfunktionen $\epsilon_I^{(Bi)}$, Registrierungen Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958
- Abb.98 Geglättete Eichfunktionen $\epsilon_I^{(Bi)}$, Registrierungen Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958



Abb. 1
Seegangs-Beschleunigungsschreiber nach Lang

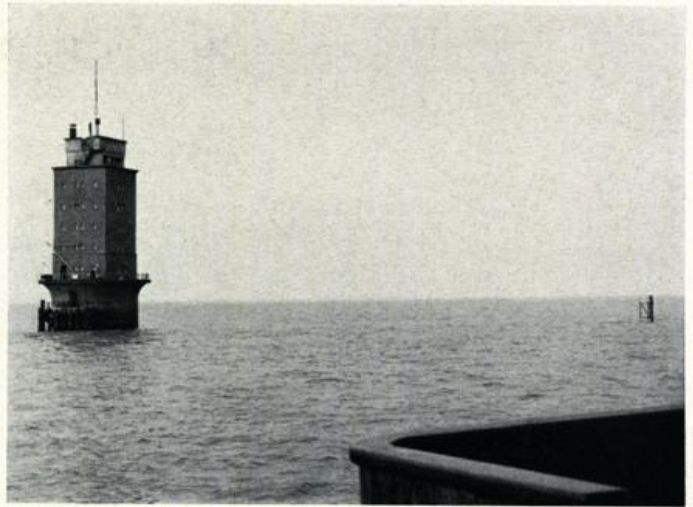


Abb. 3 Leuchtturm Mellum Plate mit Meßfahl (rechts)



Abb. 7 Meßfahl bei niedrigem Wasserstand

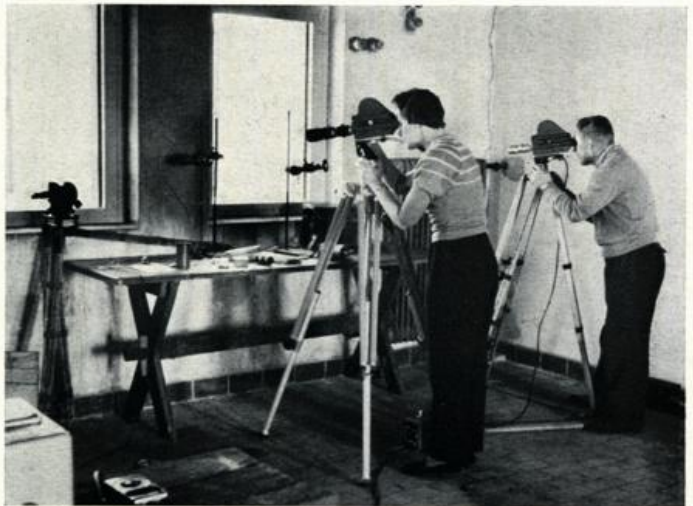
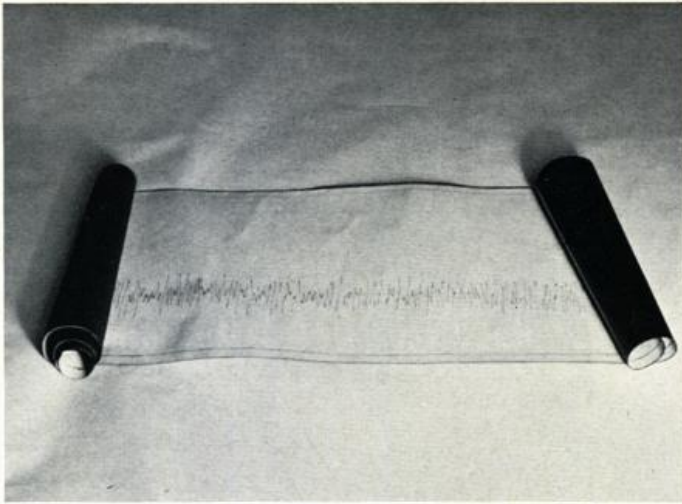
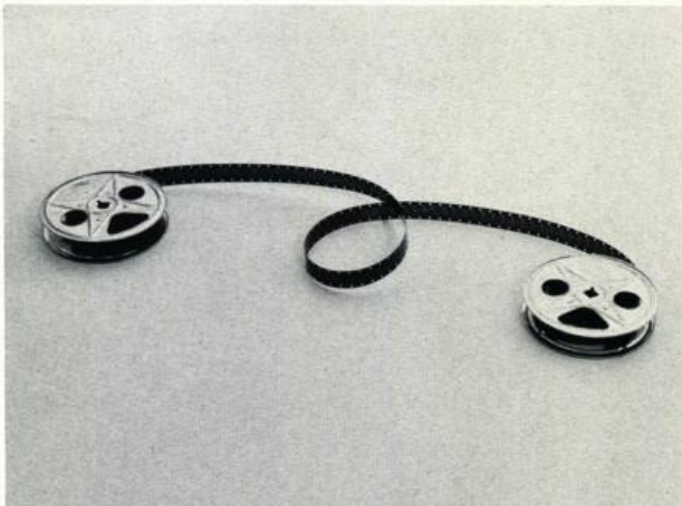


Abb. 9 Stand der Filmkameras

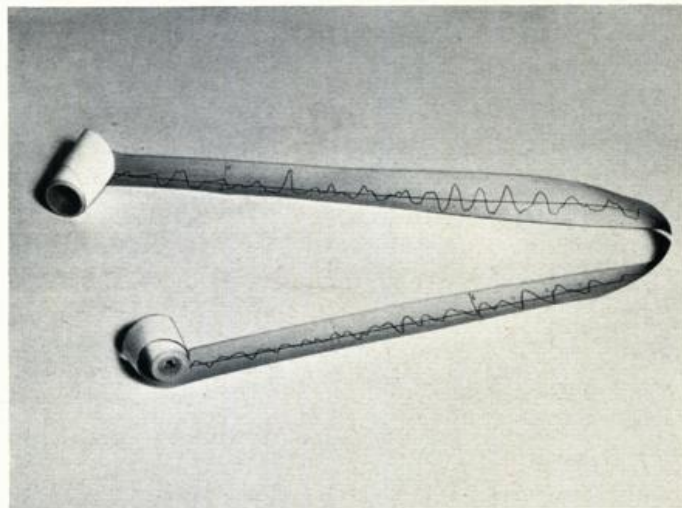
Abb. 12 Registrierstreifen



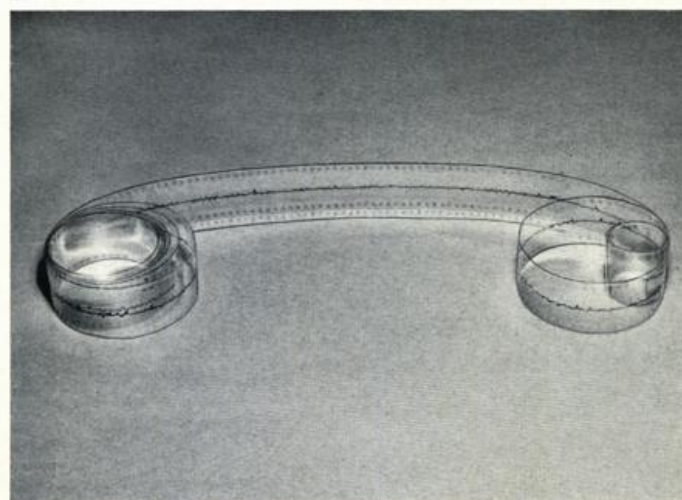
a) Leitfähigkeitssonde



b) Filmstreifen



c) Echogerät



d) Beschleunigungsschreiber



Abb. 13
Filmstreifen mit kinematographischen Seegangsaufnahmen (vergrößert)

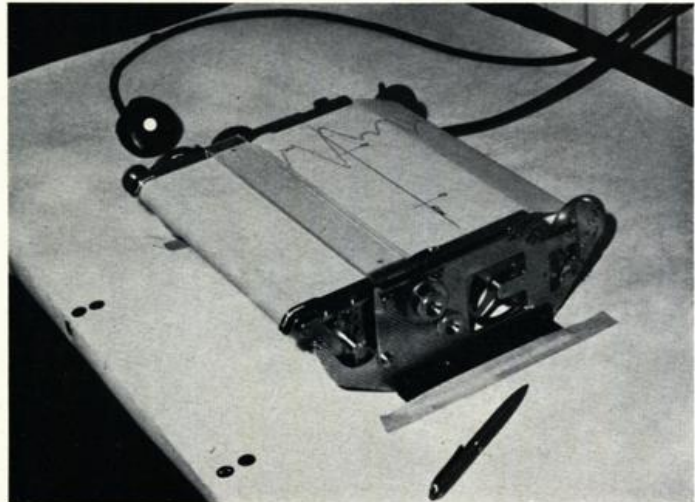
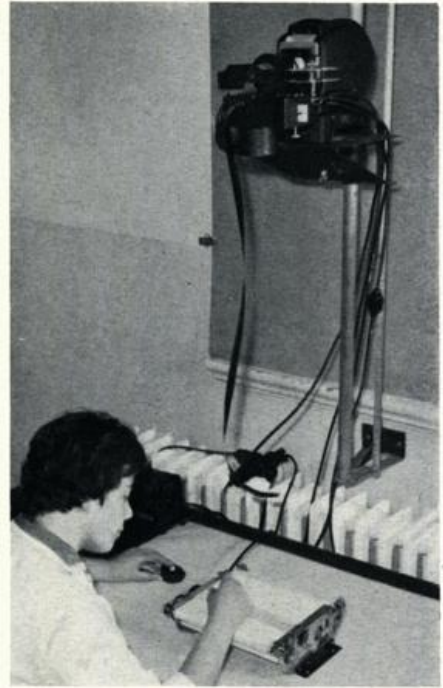


Abb. 14 a, b
Gerät zur Übertragung der kinematographischen Registrierung

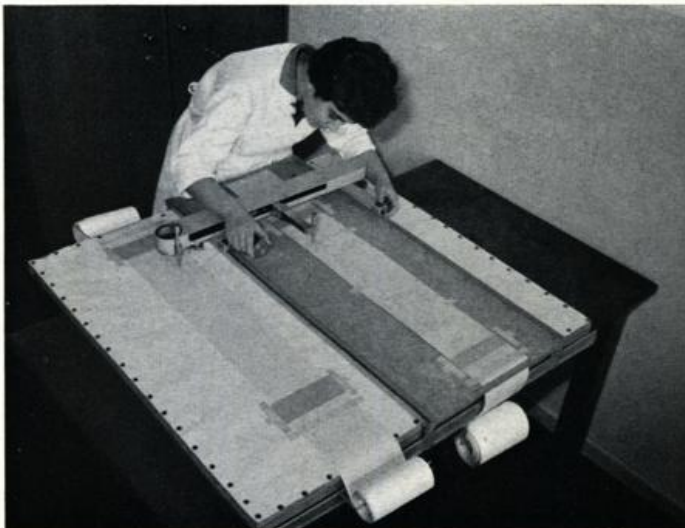


Abb. 24
Mechanischer Integrator

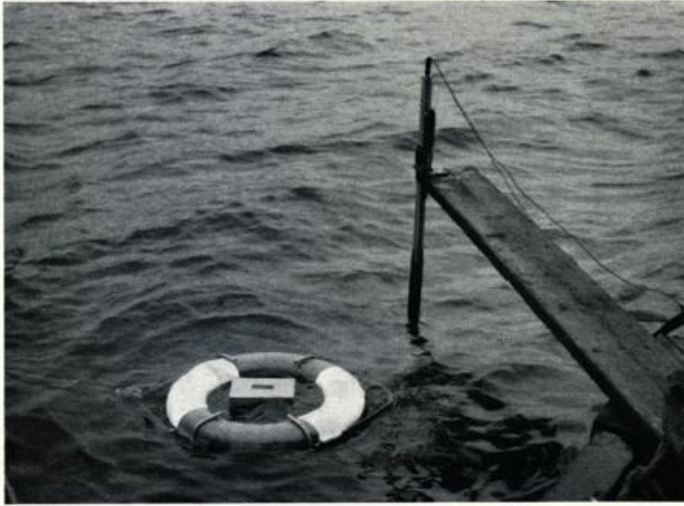


Abb. 28
Meßanordnung der Geräte auf der Außenalster

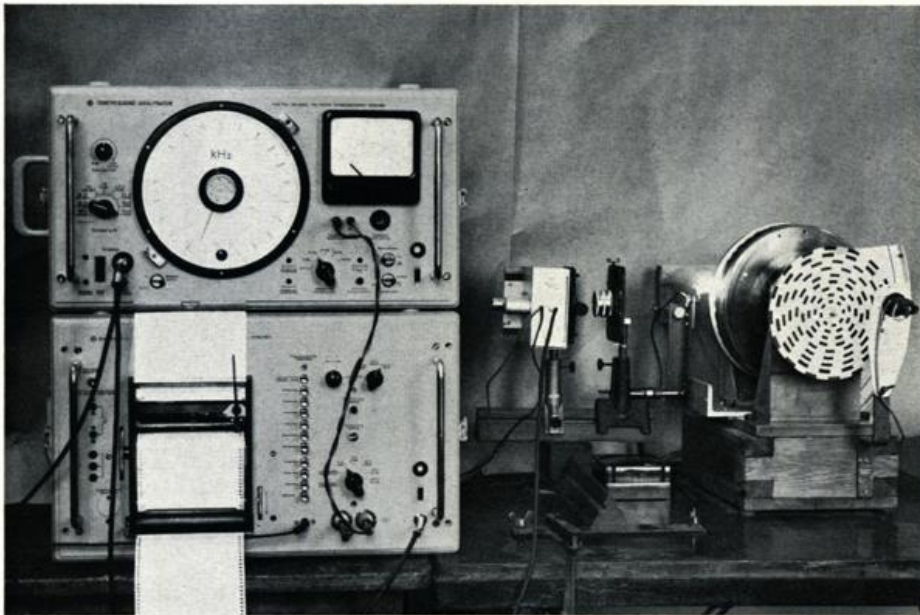


Abb. 35 a
Fourier-Analysator des
Deutschen
Hydrographischen
Instituts

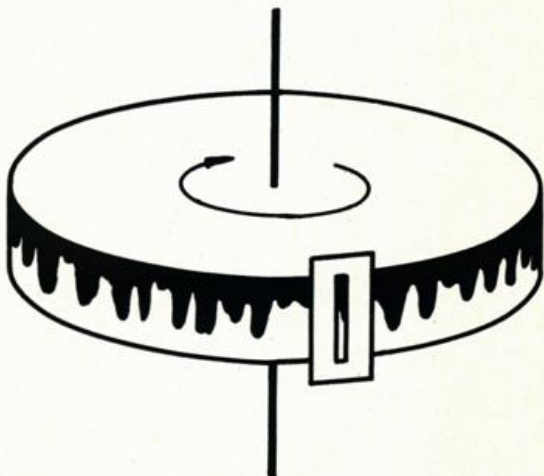


Abb. 35 b
Funktionsweise des Fourier-Analysators.
Lichtelektrische Abtastung der Schwarz-Weiß-Kurve

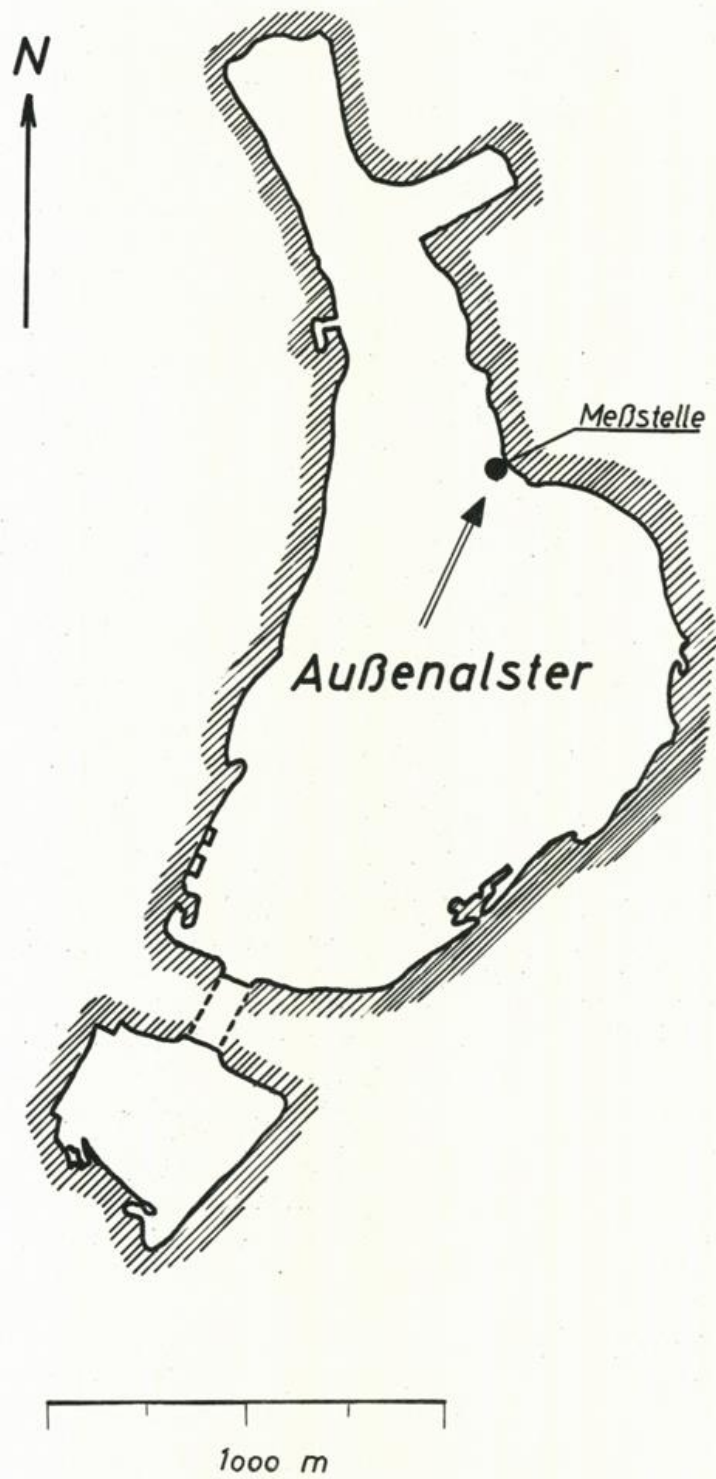


Abb. 2 Außenalster mit Meßstelle

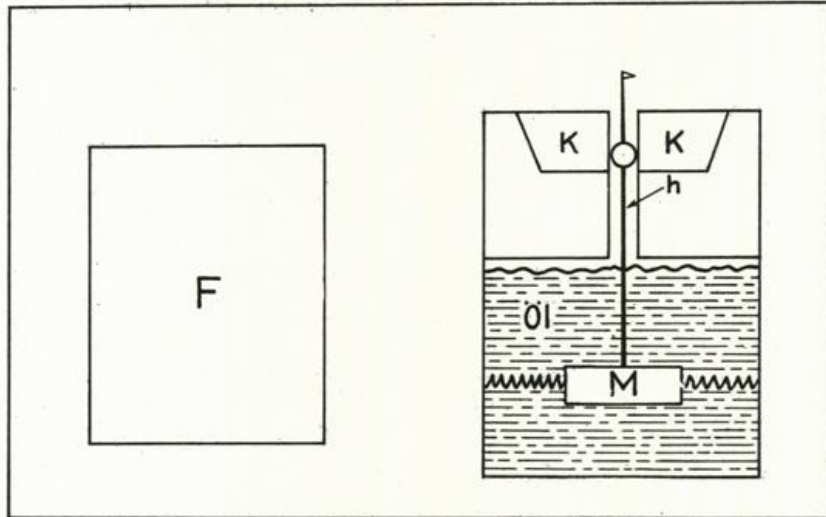


Abb. 5 Schematische Skizze des Beschleunigungs-Meßgerätes (Aufriß)



Abb. 6 Wellenschreiber im Seegang (schematisch)

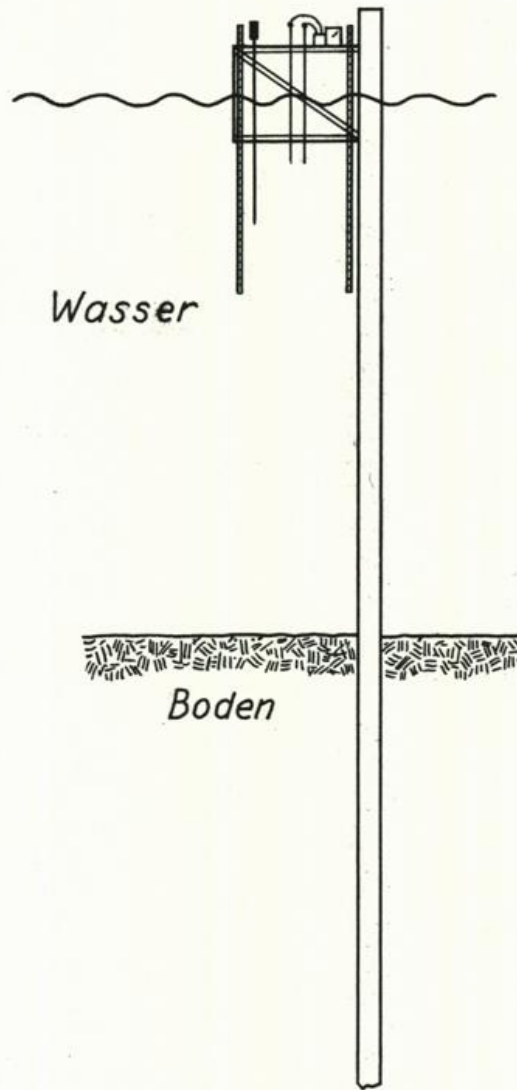


Abb. 8 Schematische Skizze des Meßpfahls

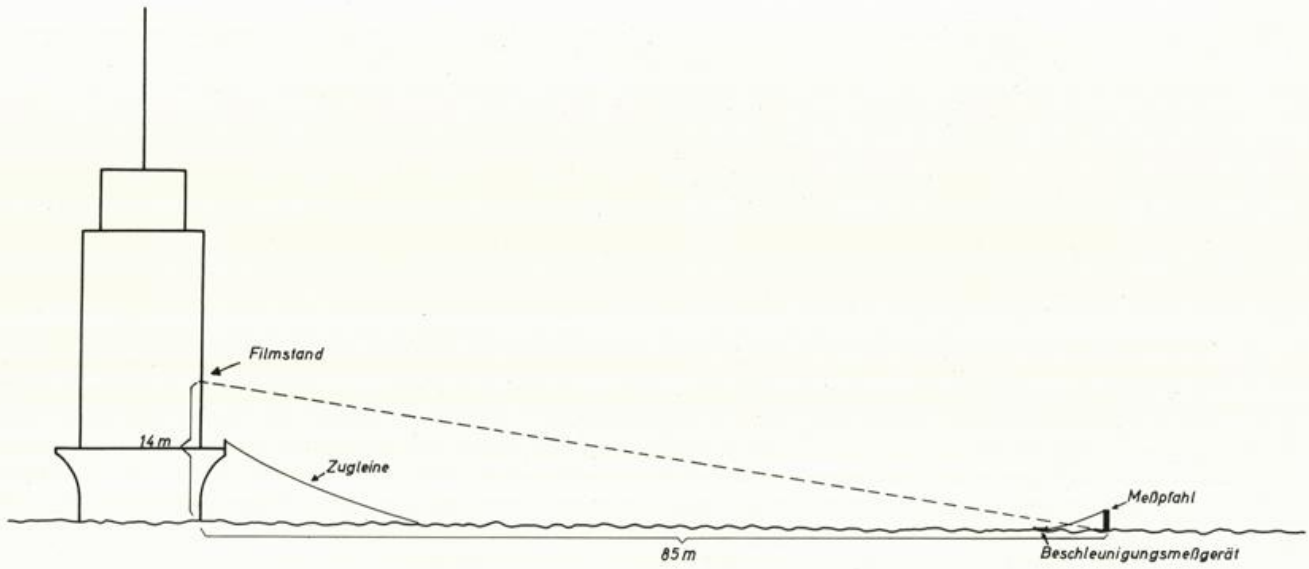


Abb.10 Schematische Skizze von Leuchtturm, Meßstand und Meßpfehl

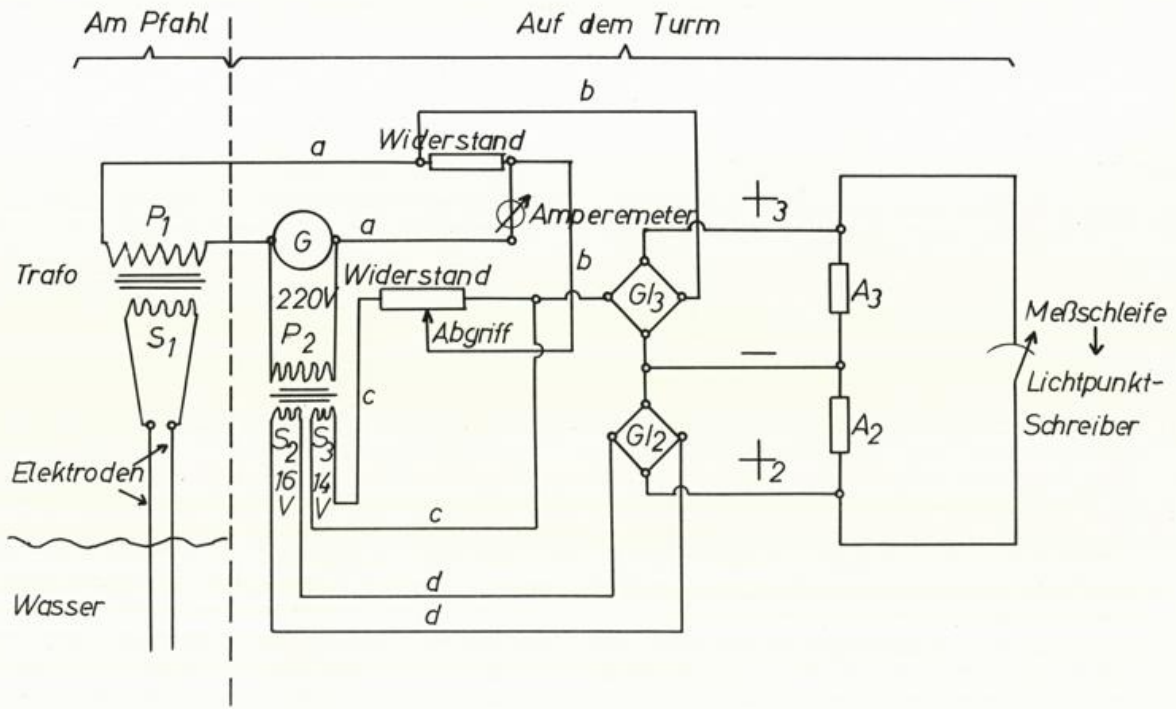


Abb.11 Brückenschaltung der Leitfähigkeitssonde

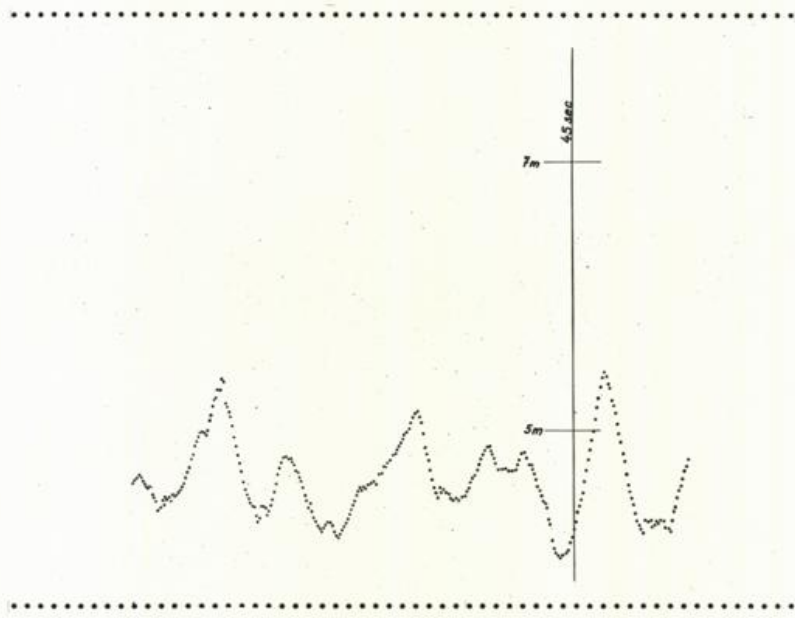


Abb.15 „Punktschrieb“, gefertigt mit dem Übertragungsgerät nach A.Lang



Abb.16 Schwarz-Weiß-Kurve

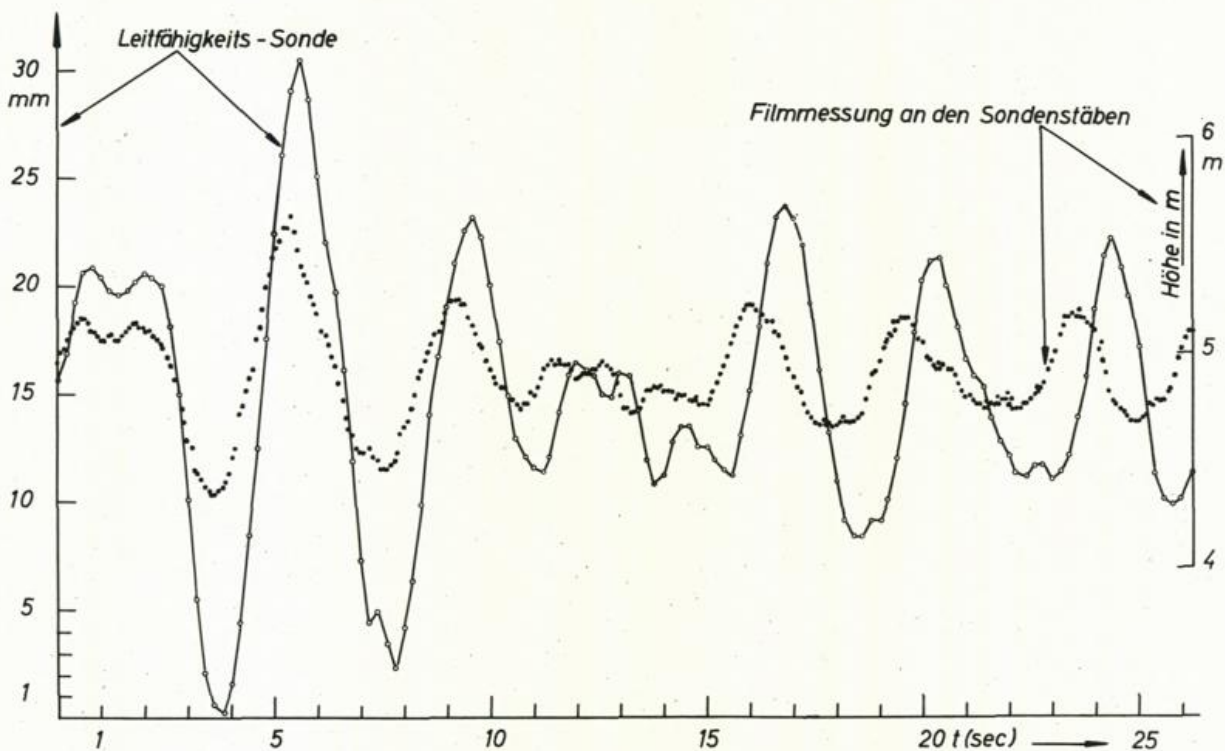


Abb.17 Gegenüberstellung von kinematographischer und L-Registrierung (2.12.1957)

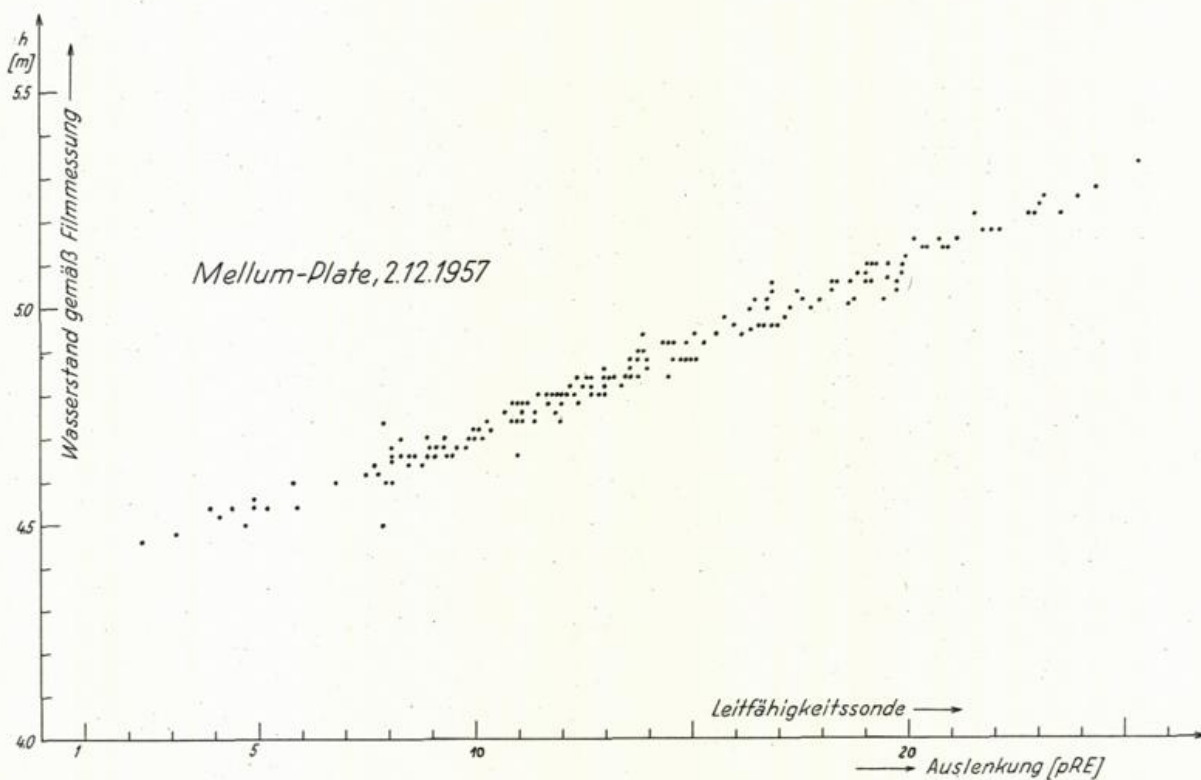


Abb.18 Extremwerte aus kinematographischer und L-Registrierung gegeneinander aufgetragen. „pRE“ = Raster-Einheiten

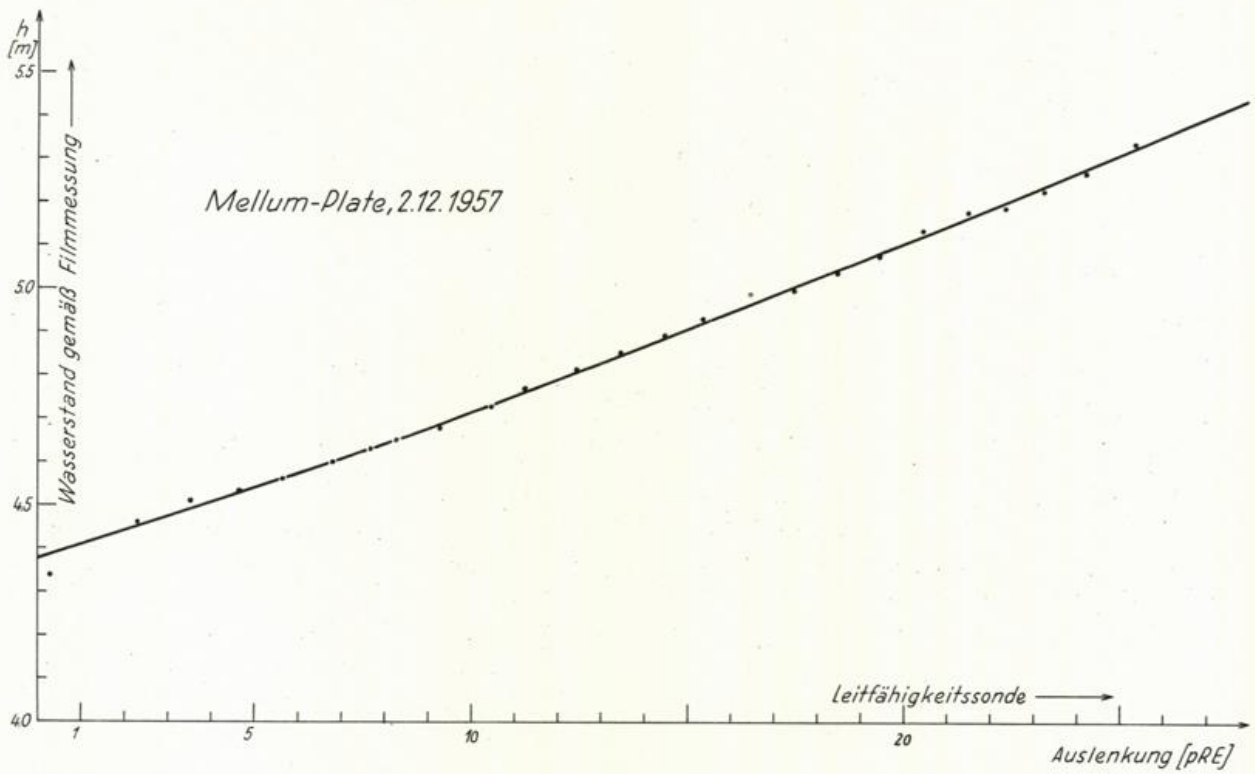


Abb.19 Ergebnisse der Abb.18 geglättet

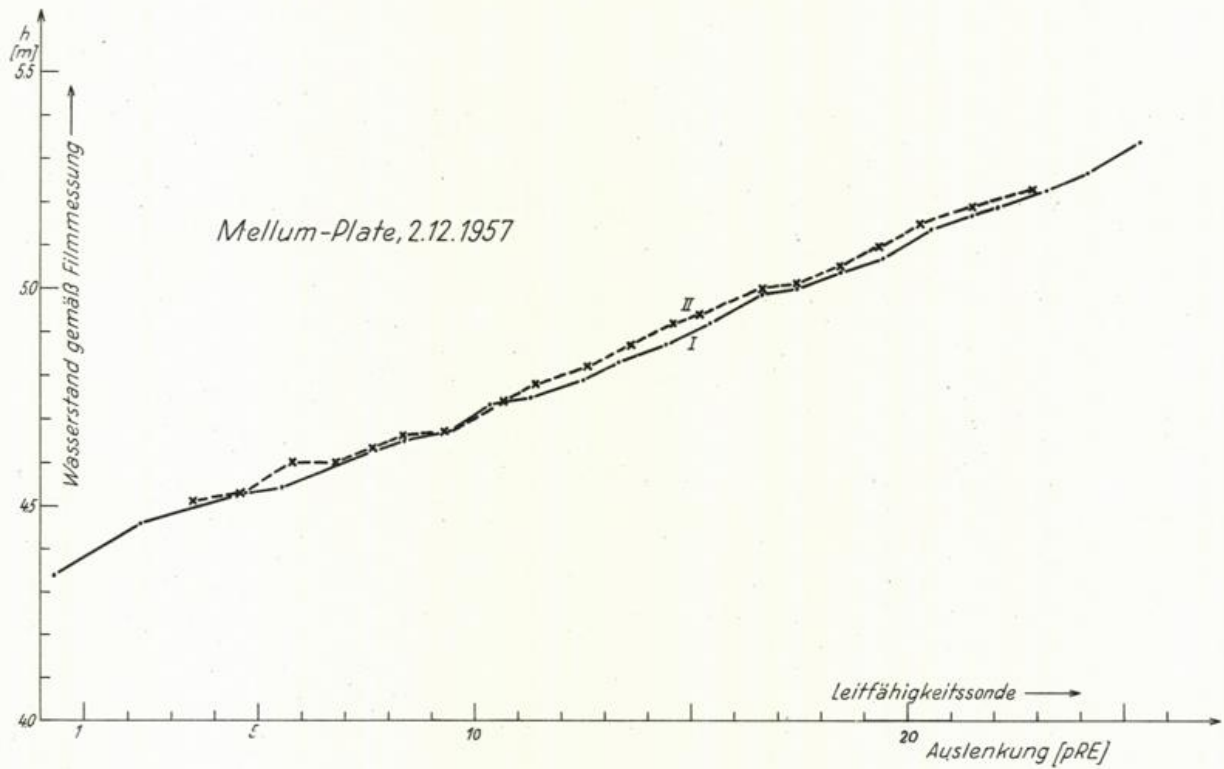


Abb.20 Anfangs- und Schlußzeichnung der Leitfähigkeitssonde (Messung 2.12.1957)

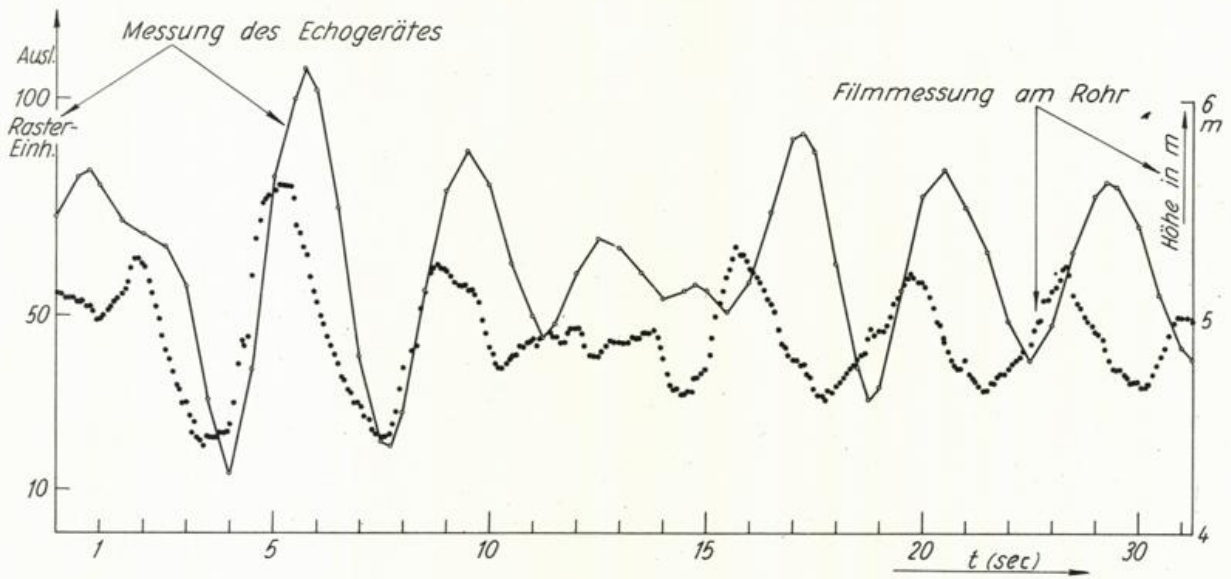


Abb.21 Gegenüberstellung kinematographischer und E-Registrierung

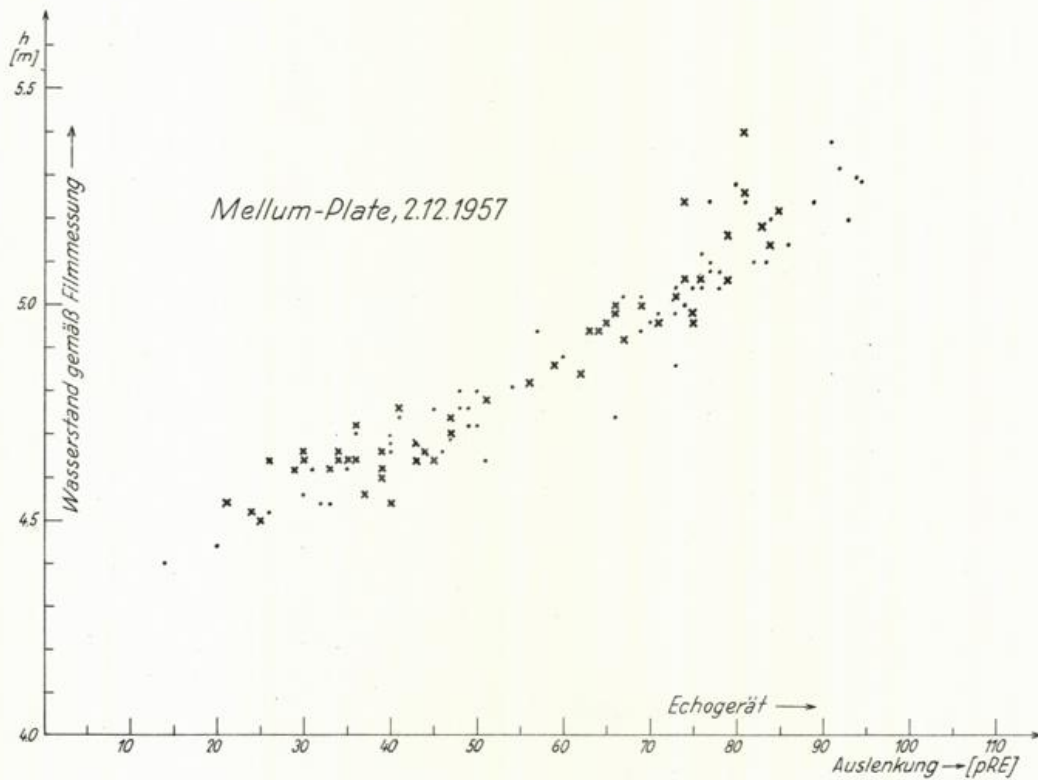


Abb.22 Extremwerte aus kinematographischer und E-Registrierung gegeneinander aufgetragen. „pRE“ = Raster-Einheiten

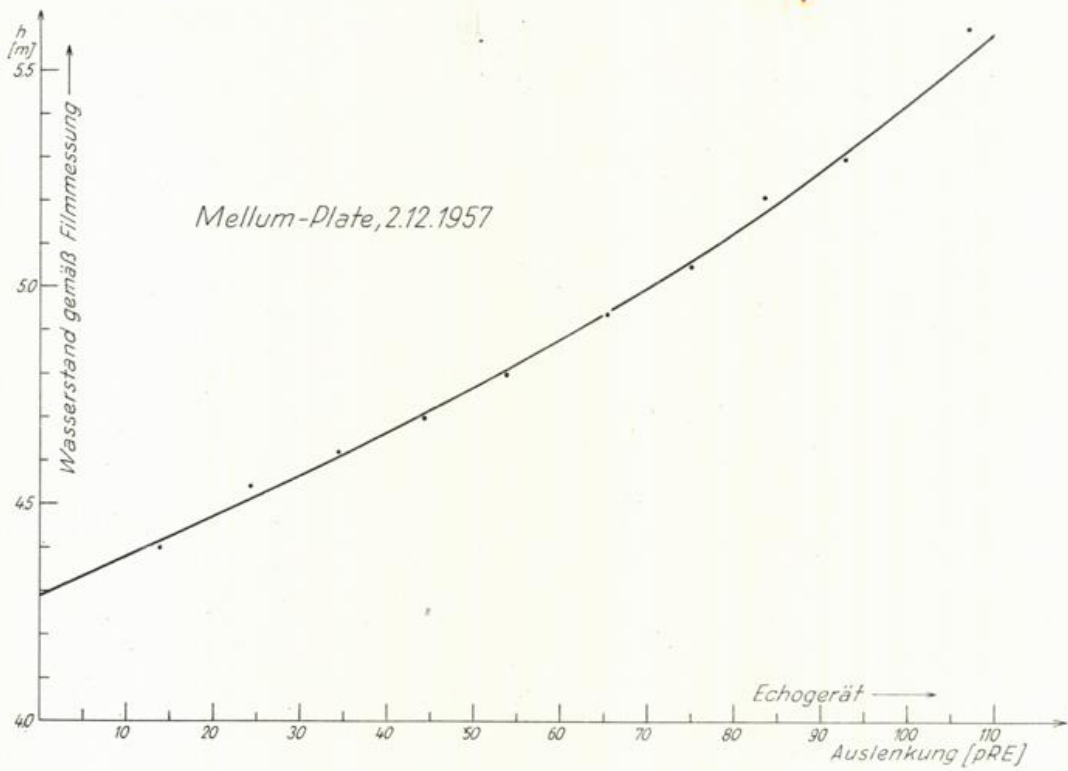


Abb.23 „Eichkurve“ gemäß Abb.22

Abb.24 s. Bildtafel 3

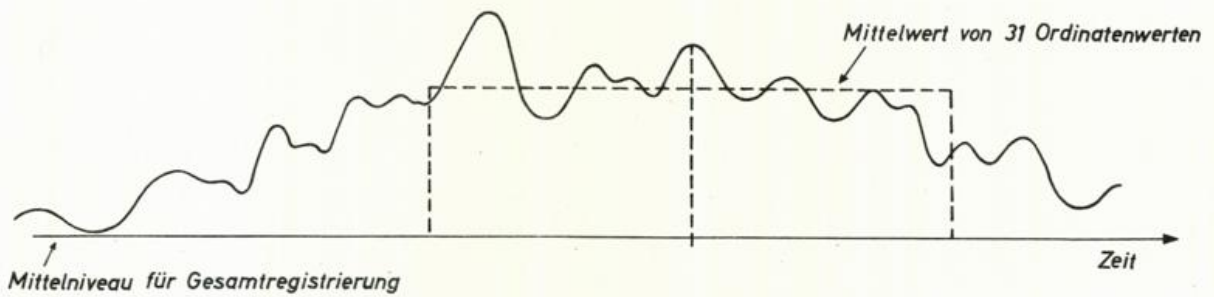


Abb.25 Nullpunktslage bei Anwendung übergreifender Mittelwertbildung

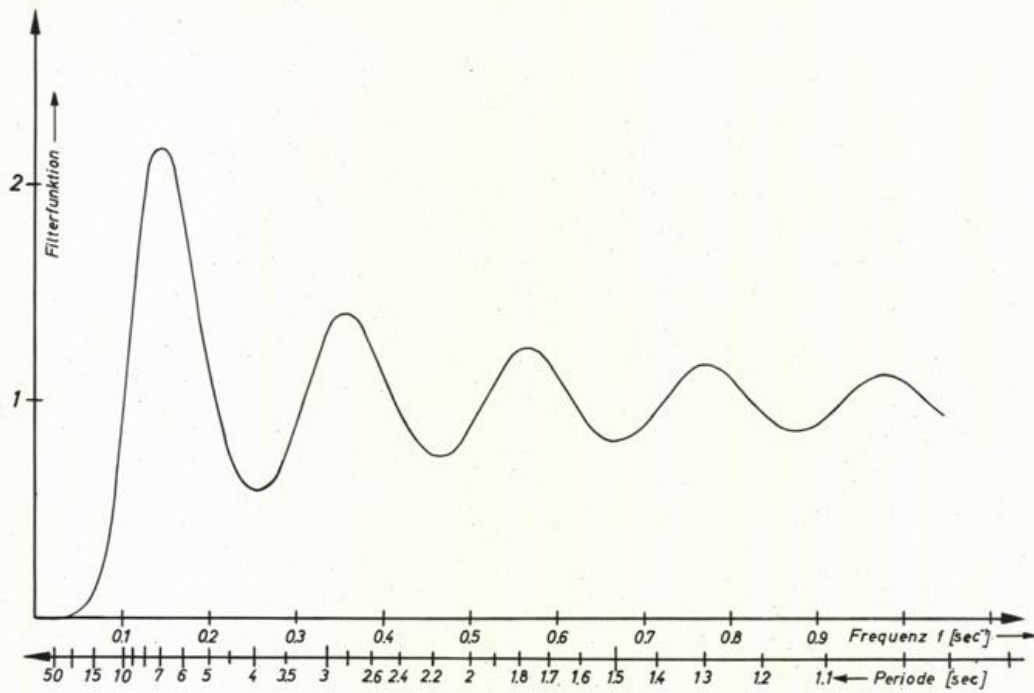


Abb.26 Integrations-Filterfunktion, angewendet bei mechanischer Integration

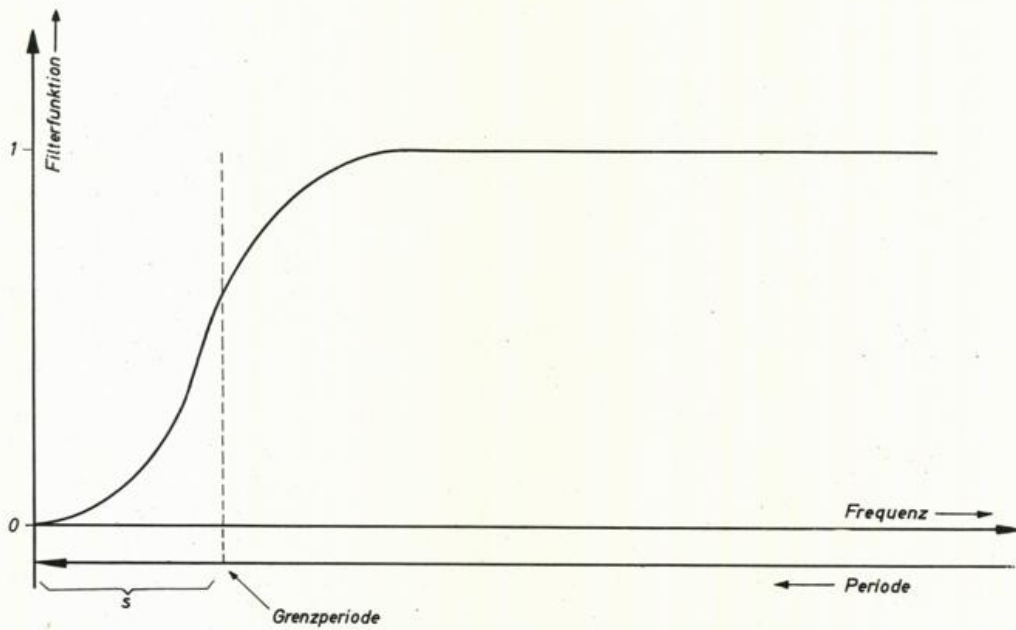


Abb.27 Filterfunktion des Miller-Integrators

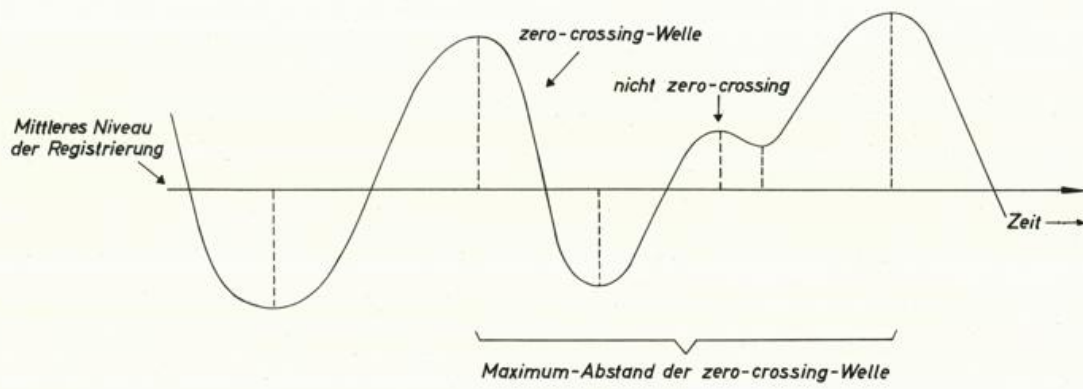


Abb.29 Zero-crossing- und Nicht-zero-crossing-Wellen (schematisch)

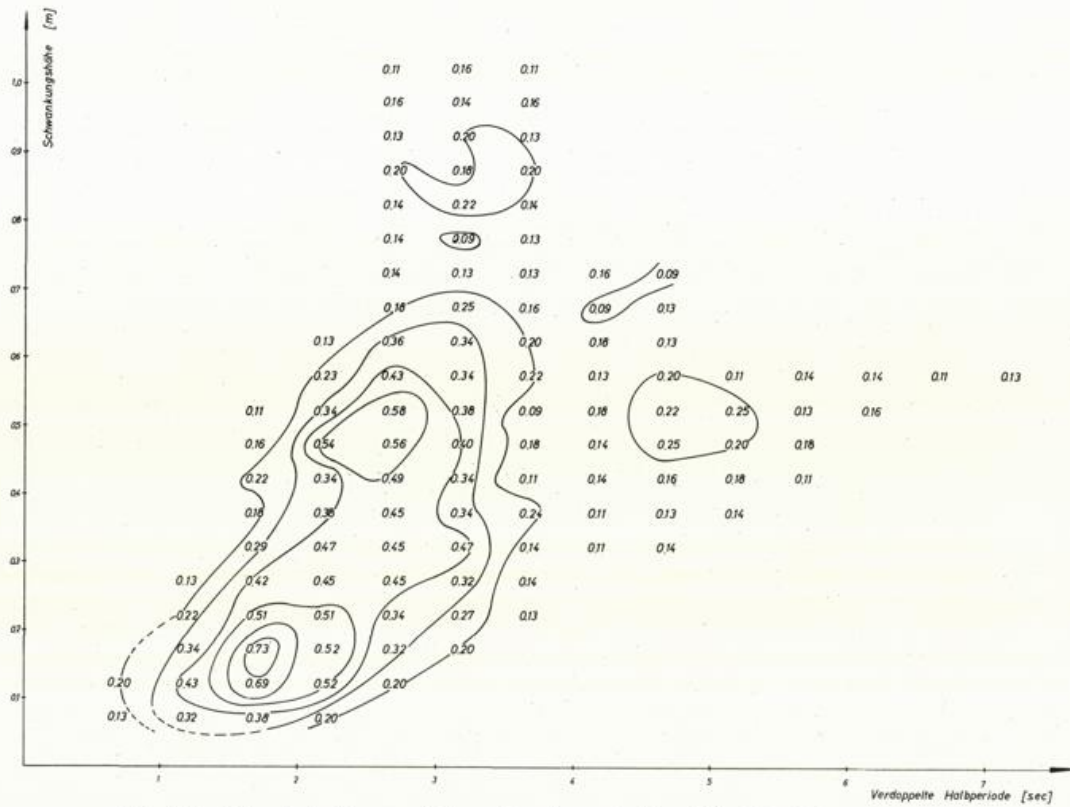


Abb.30 Beispiel für zweidimensionale relative Häufigkeitsverteilung
 (geglättet und reduziert) - Mellum Plate 2.12.1957,
 Registrierung Bi (mech)

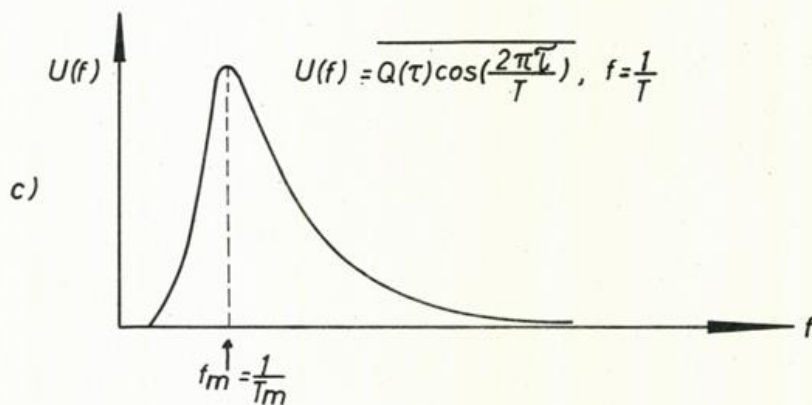
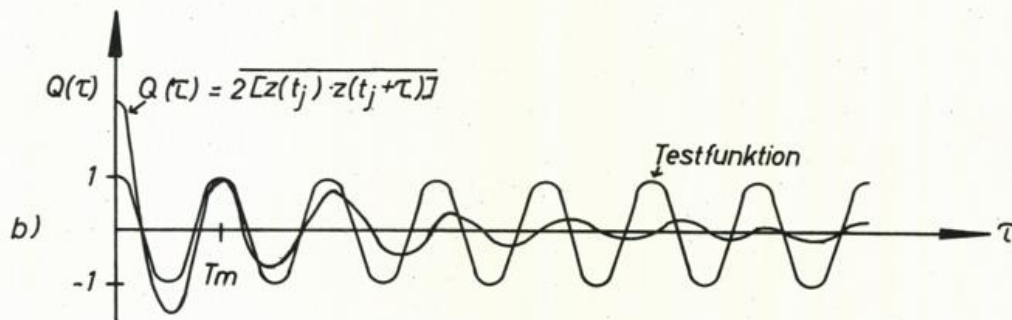
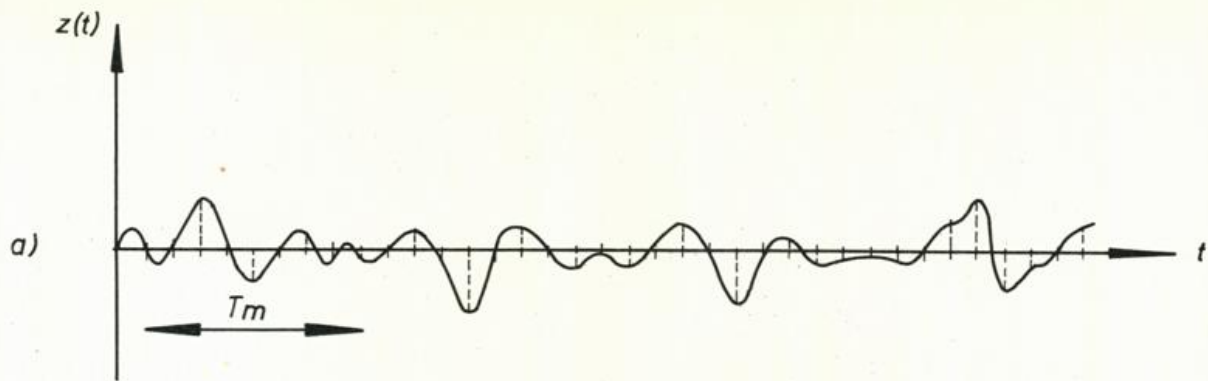


Abb.31 Autokorrelations-Analyse

- a Registrierung $z(t)$ und Ordinaten an äquidistanten Stellen t_j
- b Autokorrelationsfunktion und Testfunktion $T = T_m$
- c Spektrale Verteilung der Autokorrelation

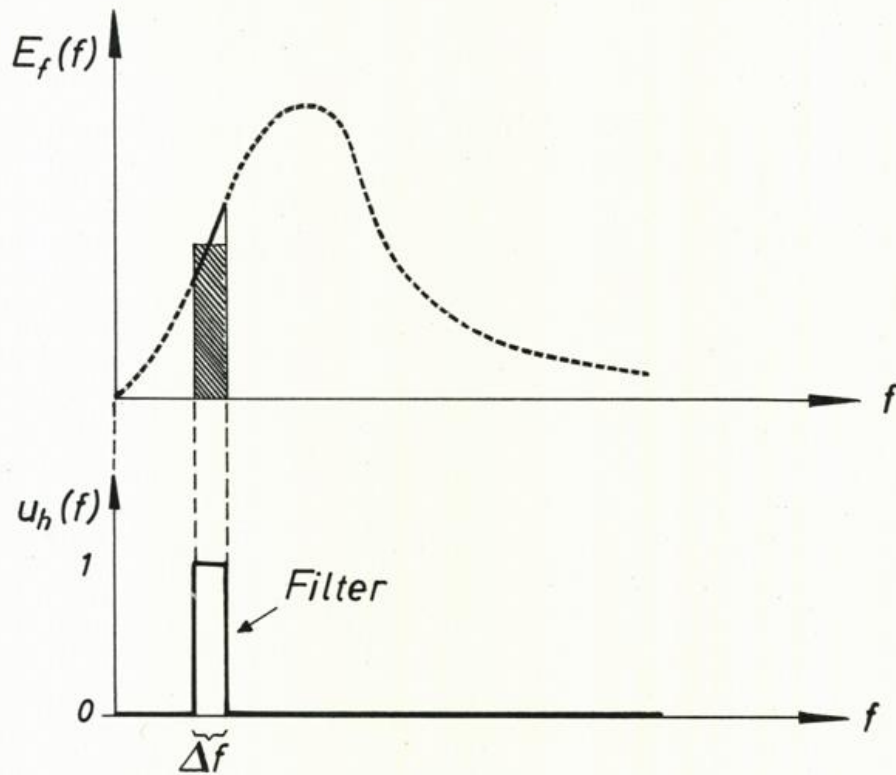


Abb.32 Wirkungsweise eines rechteckigen Filters

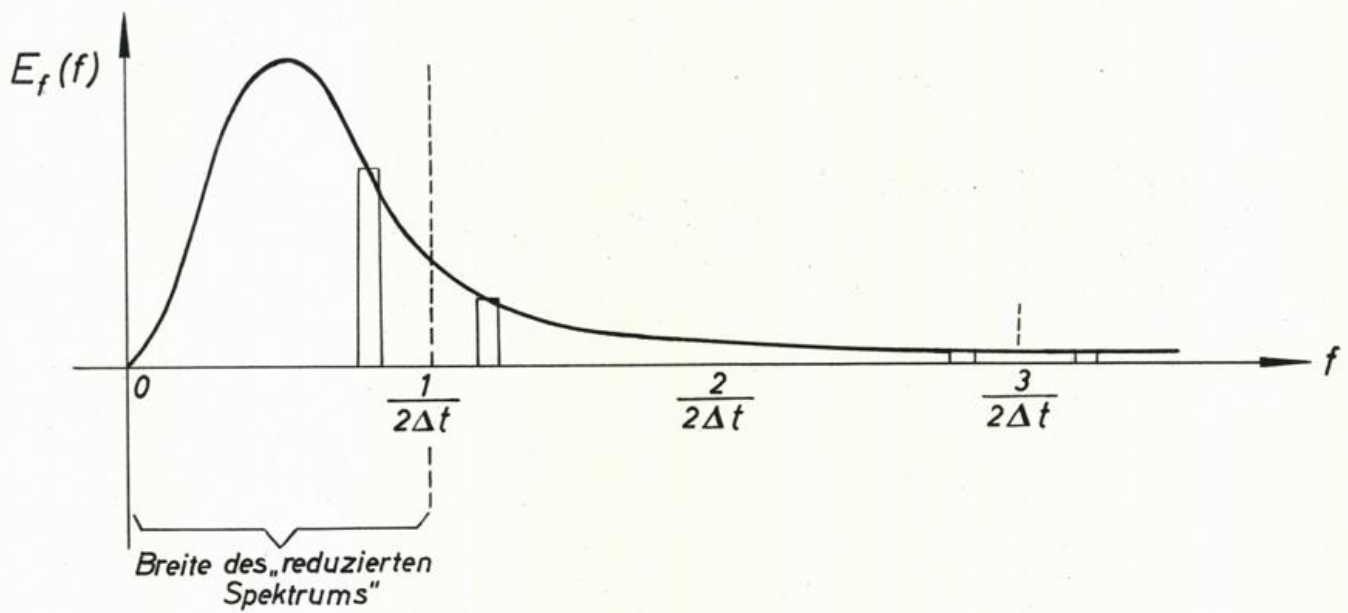


Abb.33 Symmetrische Lage der Filterstellen

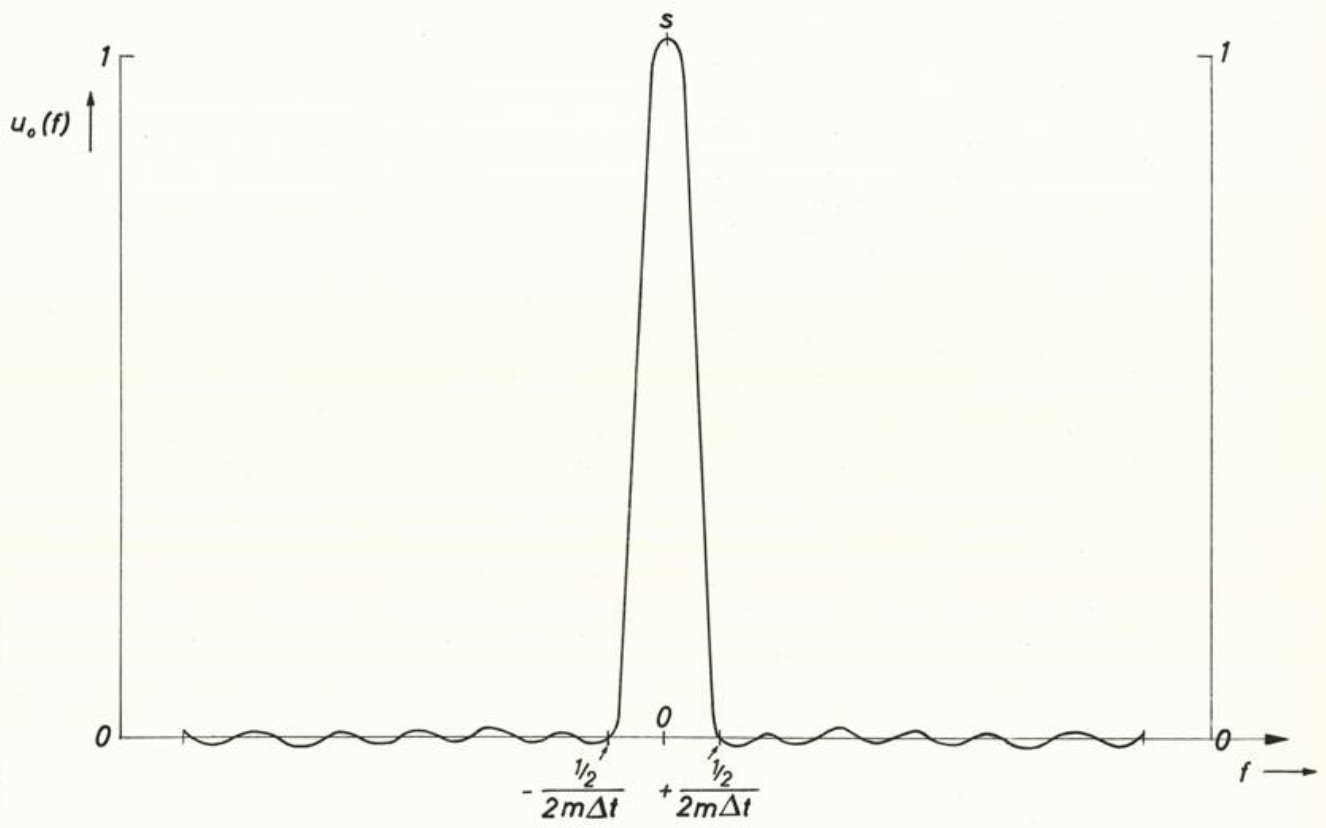


Abb. 35a s. Bildtafel 4
 Abb. 35b s. Bildtafel 4

Abb. 34 Filterfunktion nach TUKEY und HAMMING

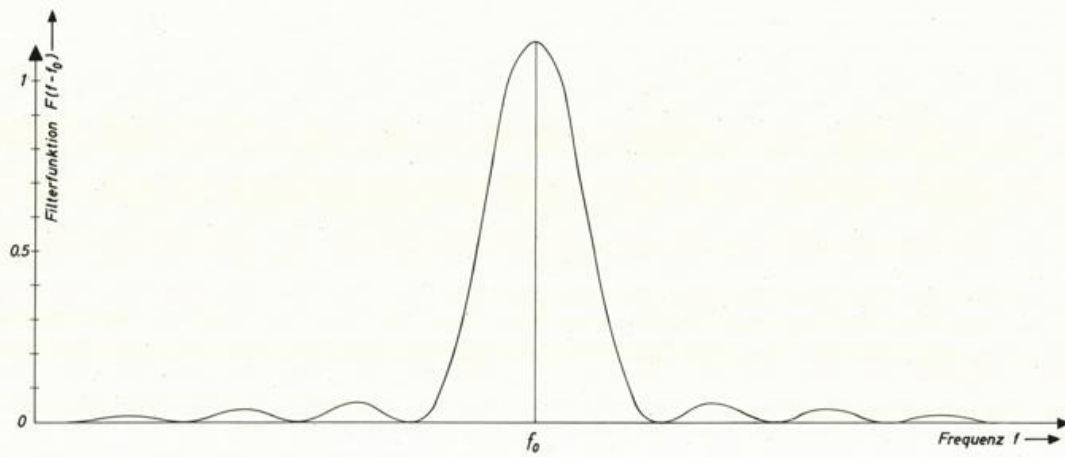


Abb.36 Form der Filterfunktion bei der Fourier-Analyse

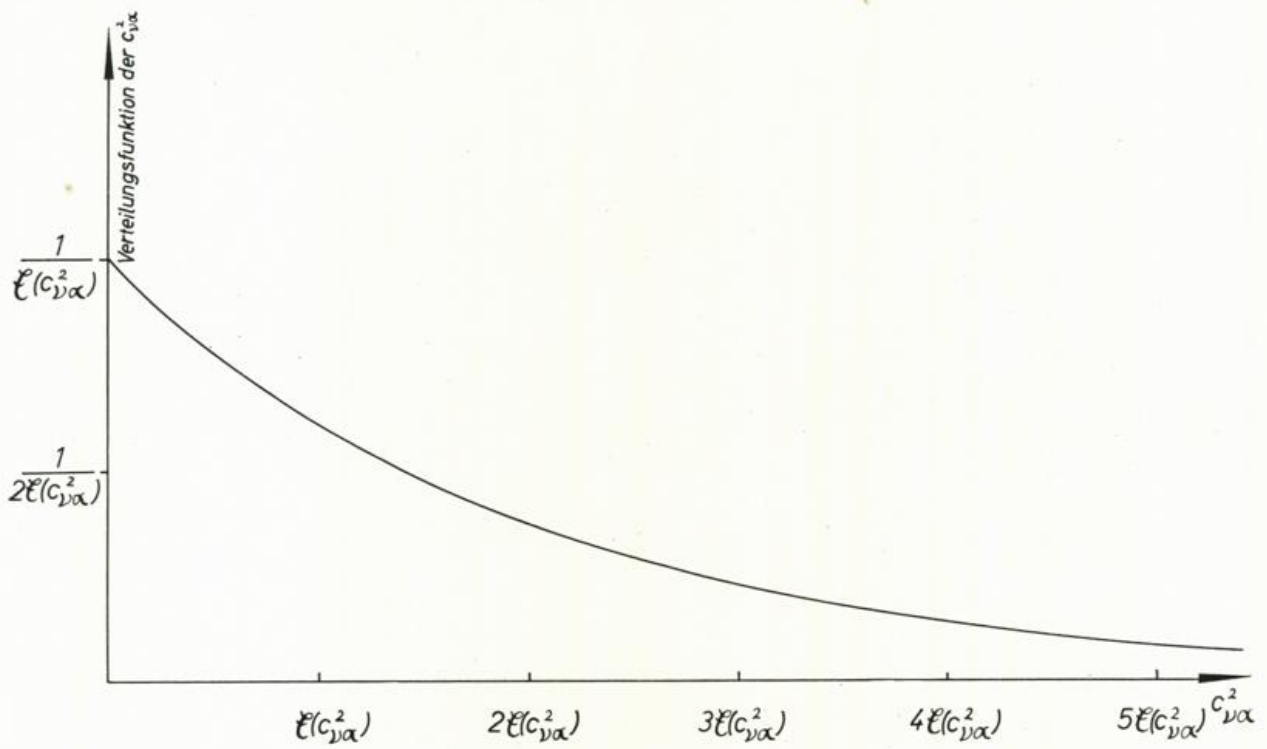


Abb.38 χ^2 -Verteilung mit 2 Freiheitsgraden

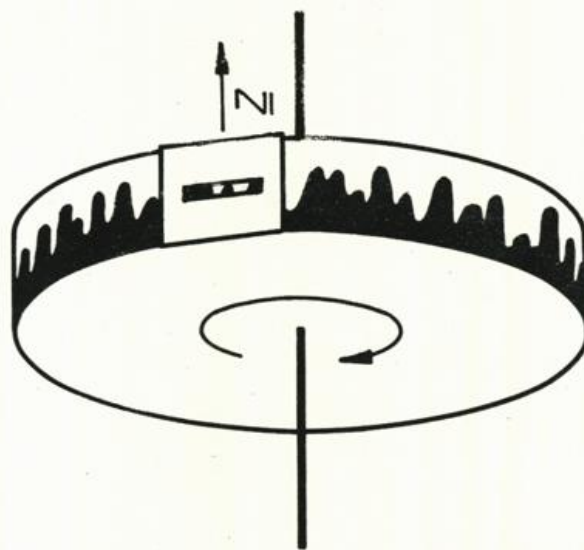


Abb.39 Lage von Rad und Lichtspalt zur Bestimmung von E^*
(Grauwert-Ermittlung)

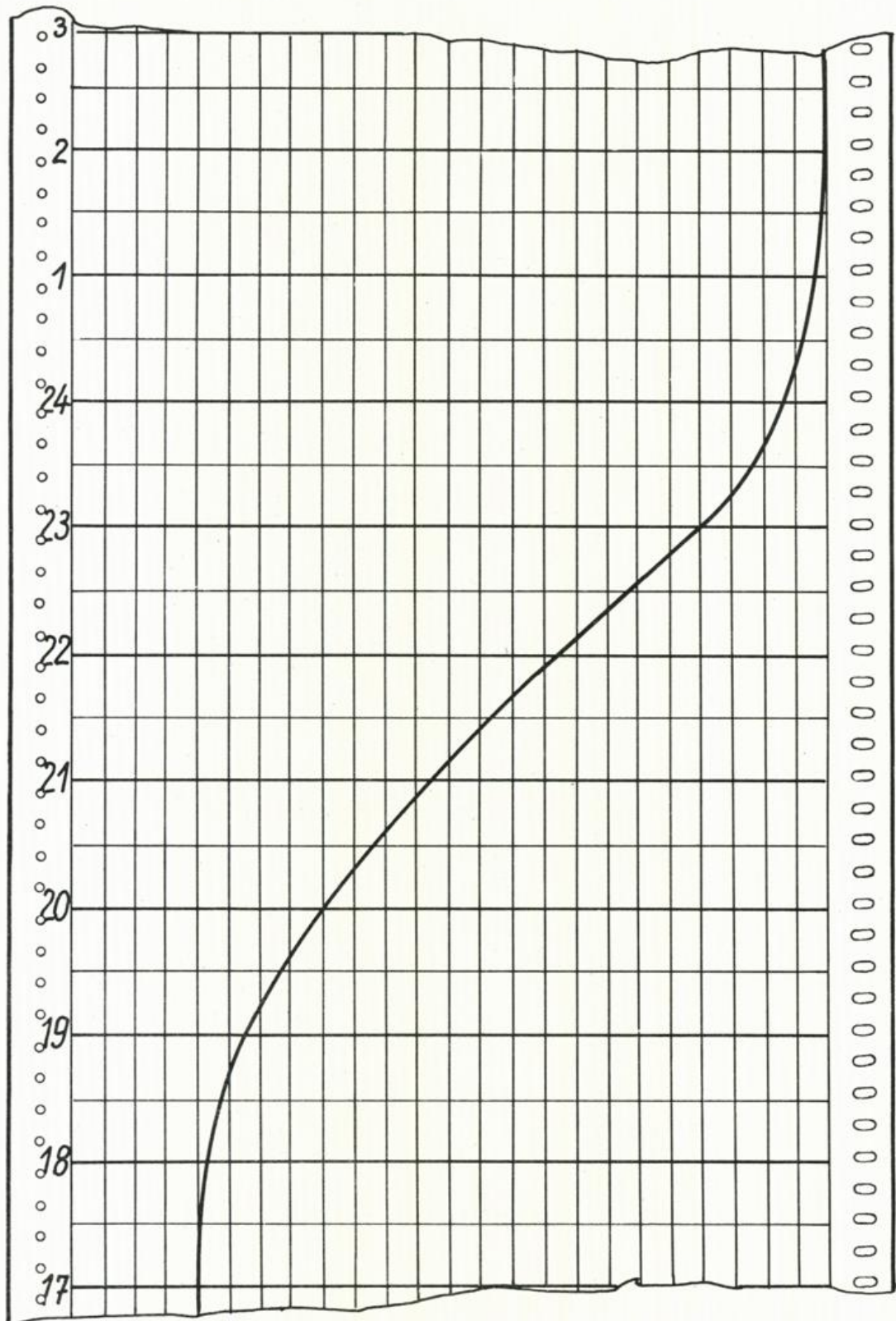


Abb.40 Photometerkurve

Wahrscheinlichkeitsnetz

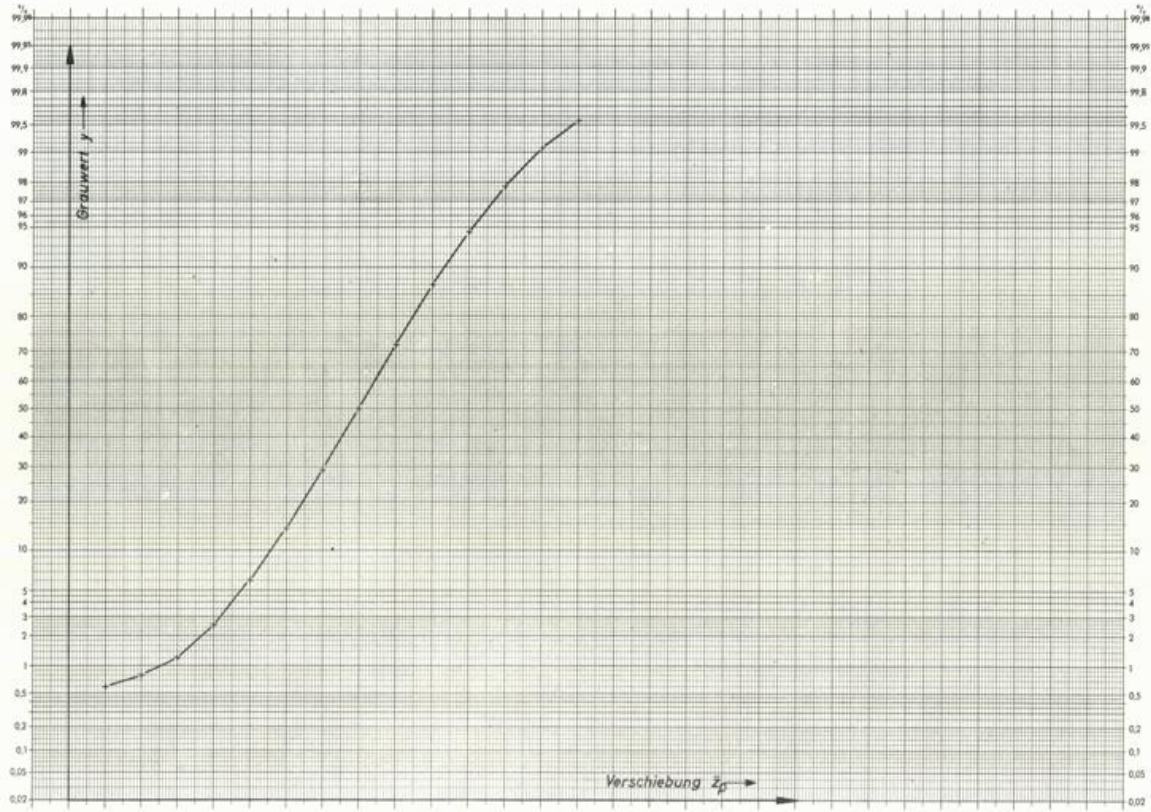


Abb.41 Photometerkurve im Wahrscheinlichkeitspapier

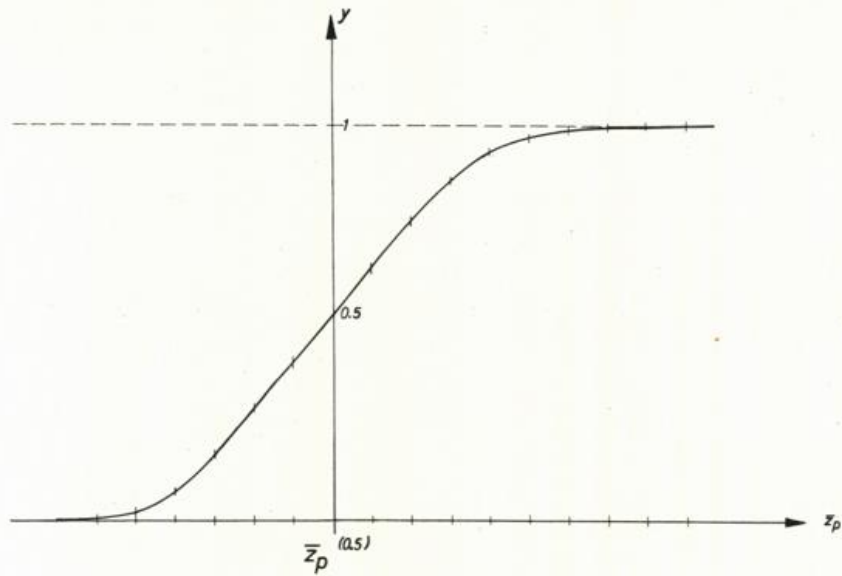


Abb.42 Photometerkurve, Zählung der äquidistanten Punkte ausgehend von $\bar{z}_p^{(0,5)}$

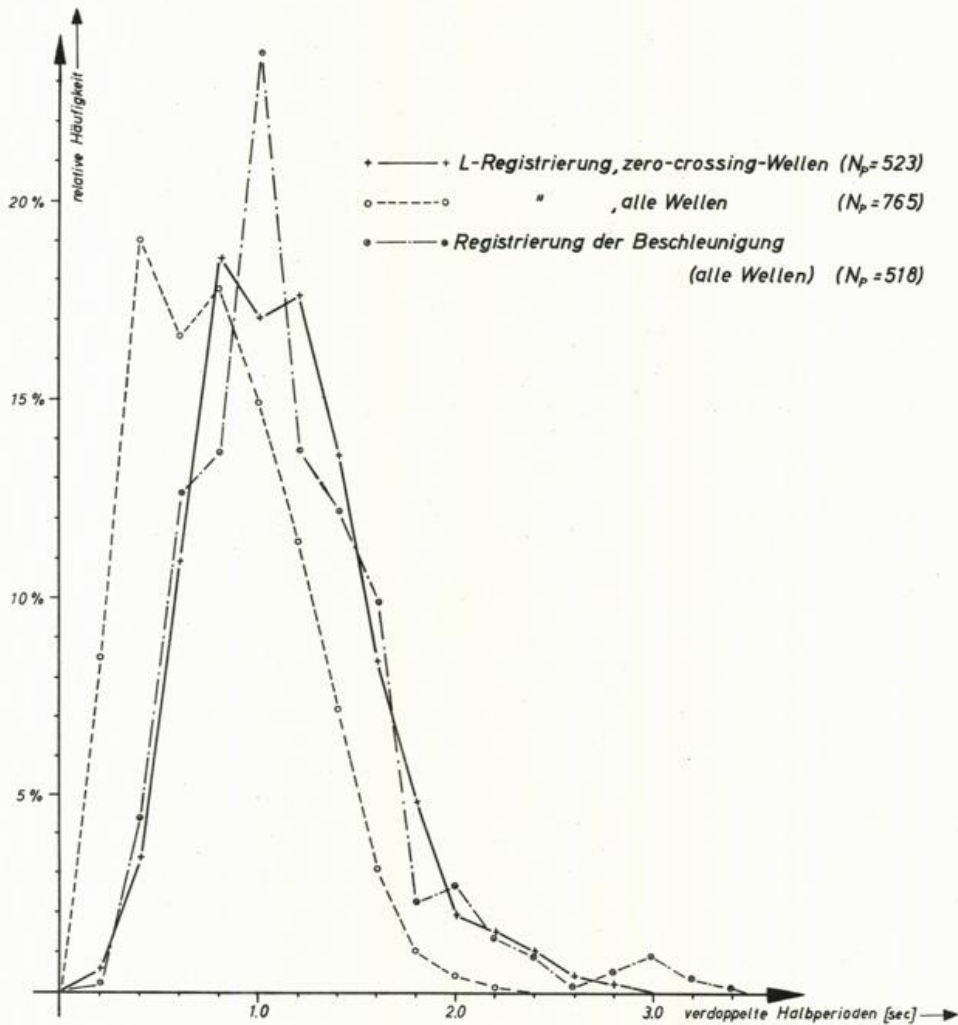


Abb.43 Außenalster, Häufigkeitsverteilung verdoppelter Halperioden

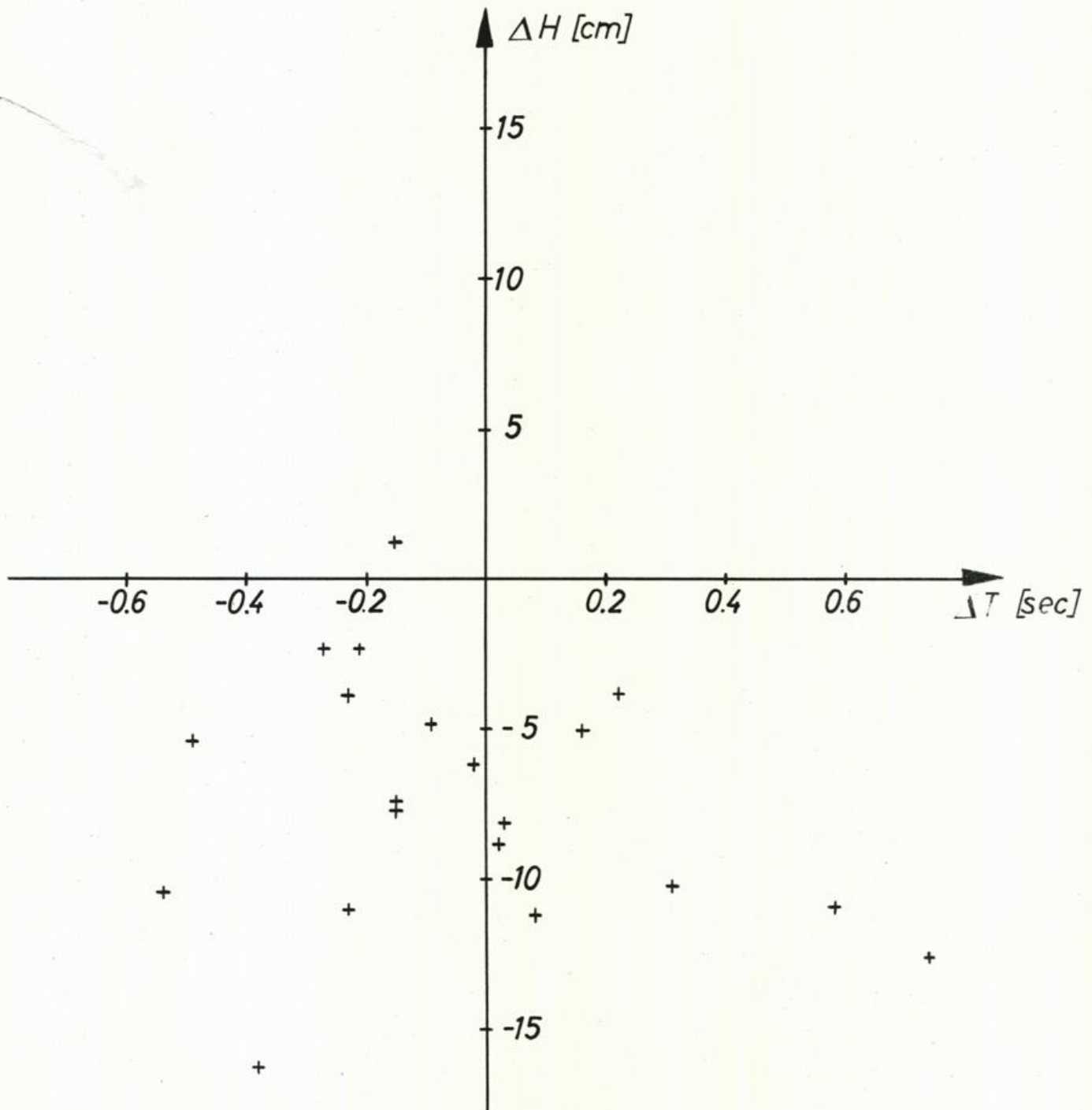


Abb.44 Außenalster, Vergleich markanter Wellen

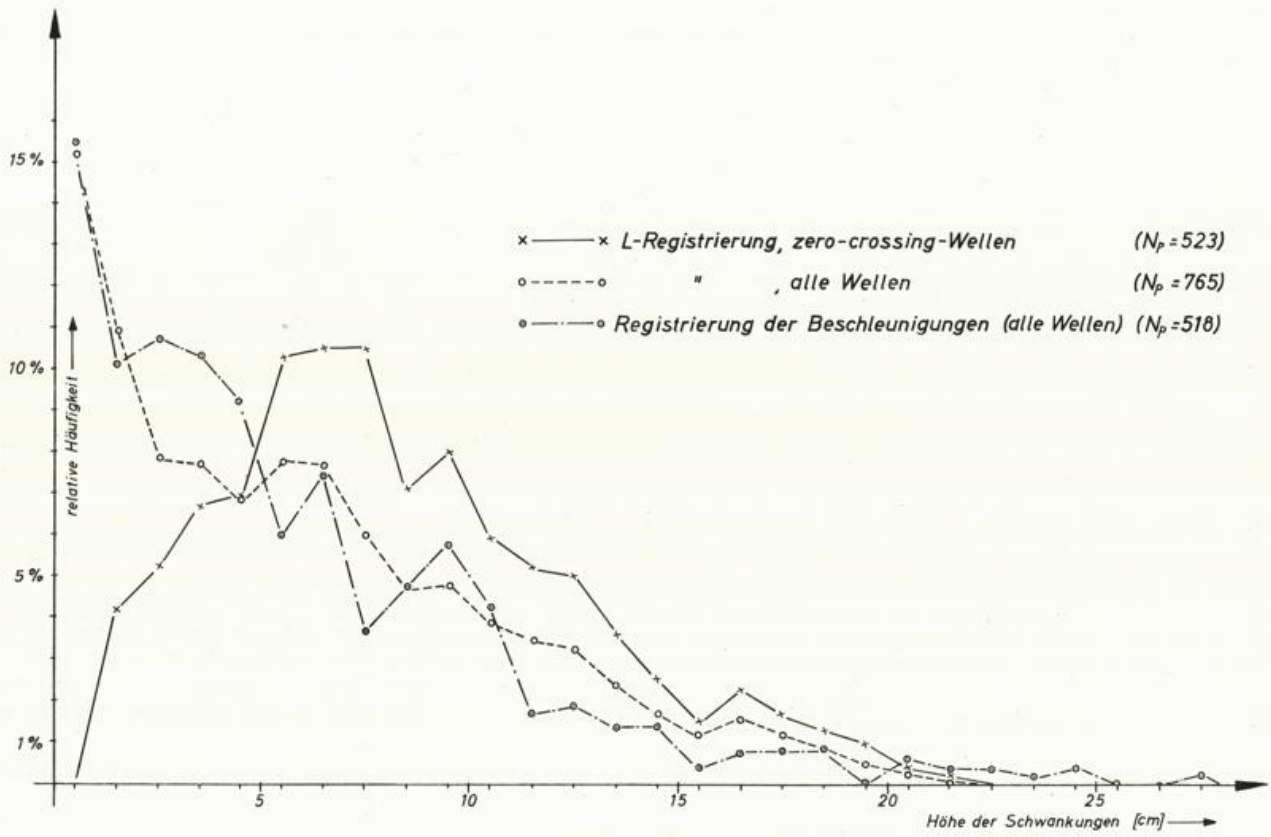


Abb.45 Außenalster, Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen

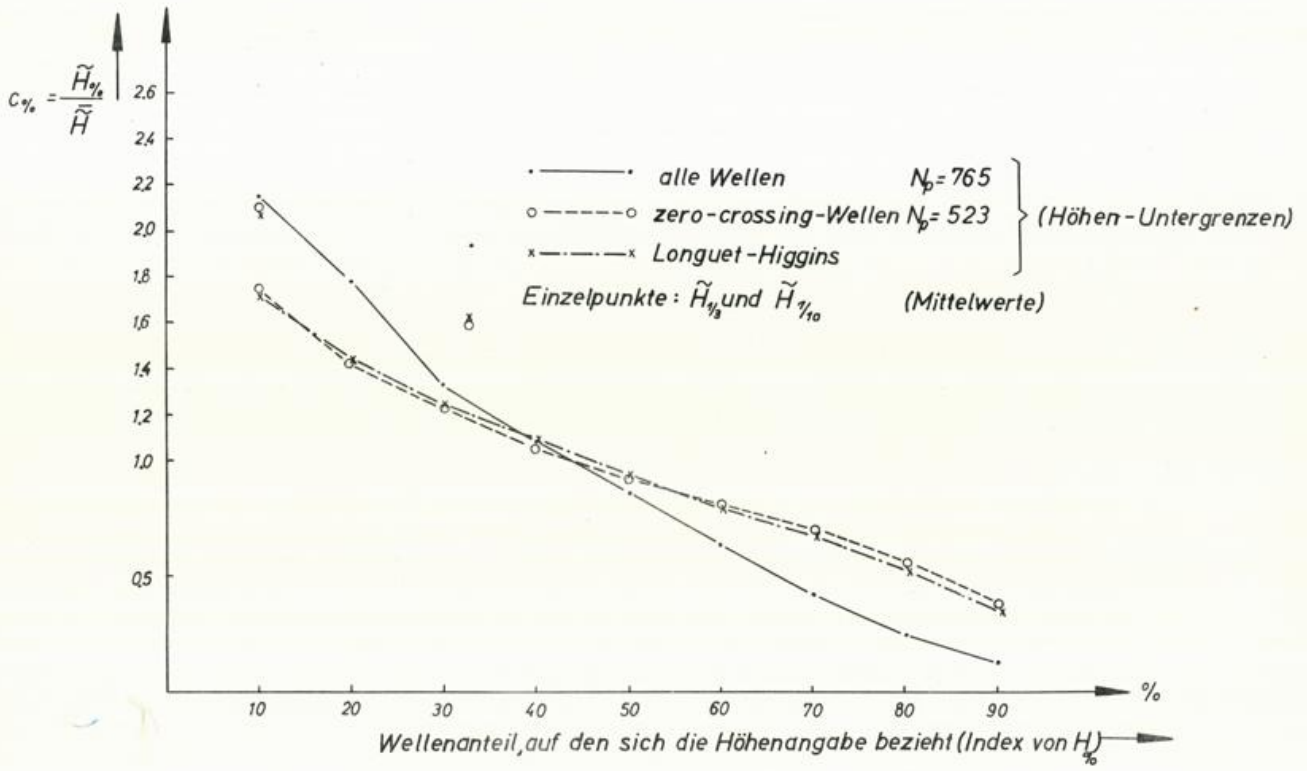


Abb.46 Außenalster, charakteristische Kurven, L-Registrierung

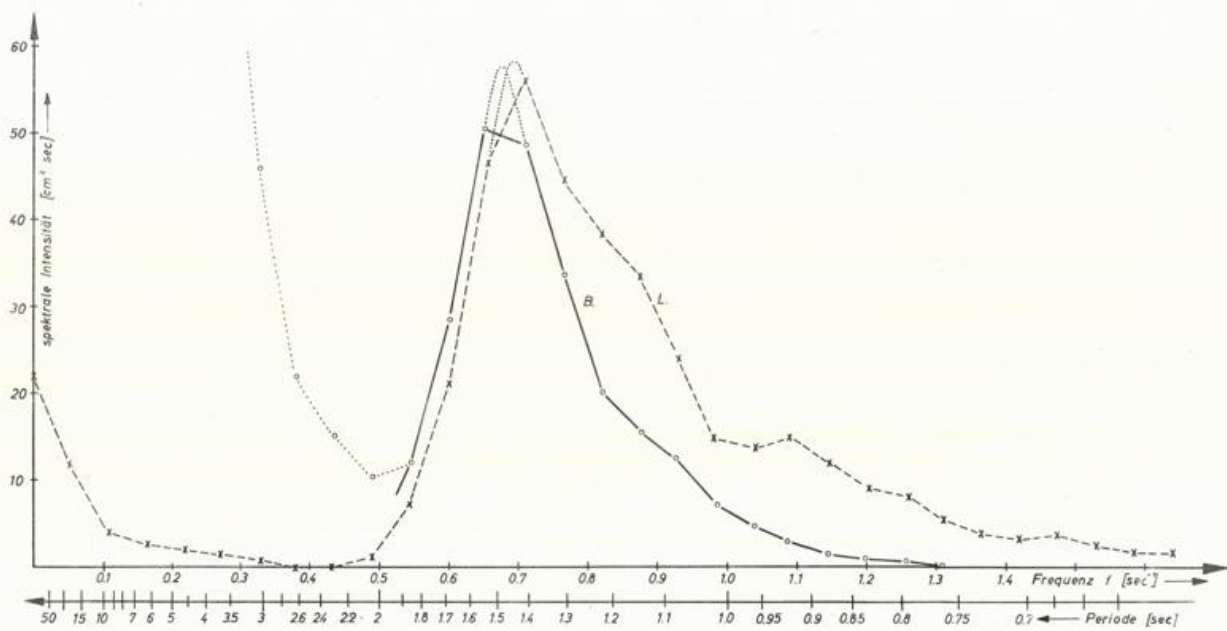


Abb.47 Alstermessung, Vergleich der „Seegangintensitäten“ aus B- und L-Registrierung

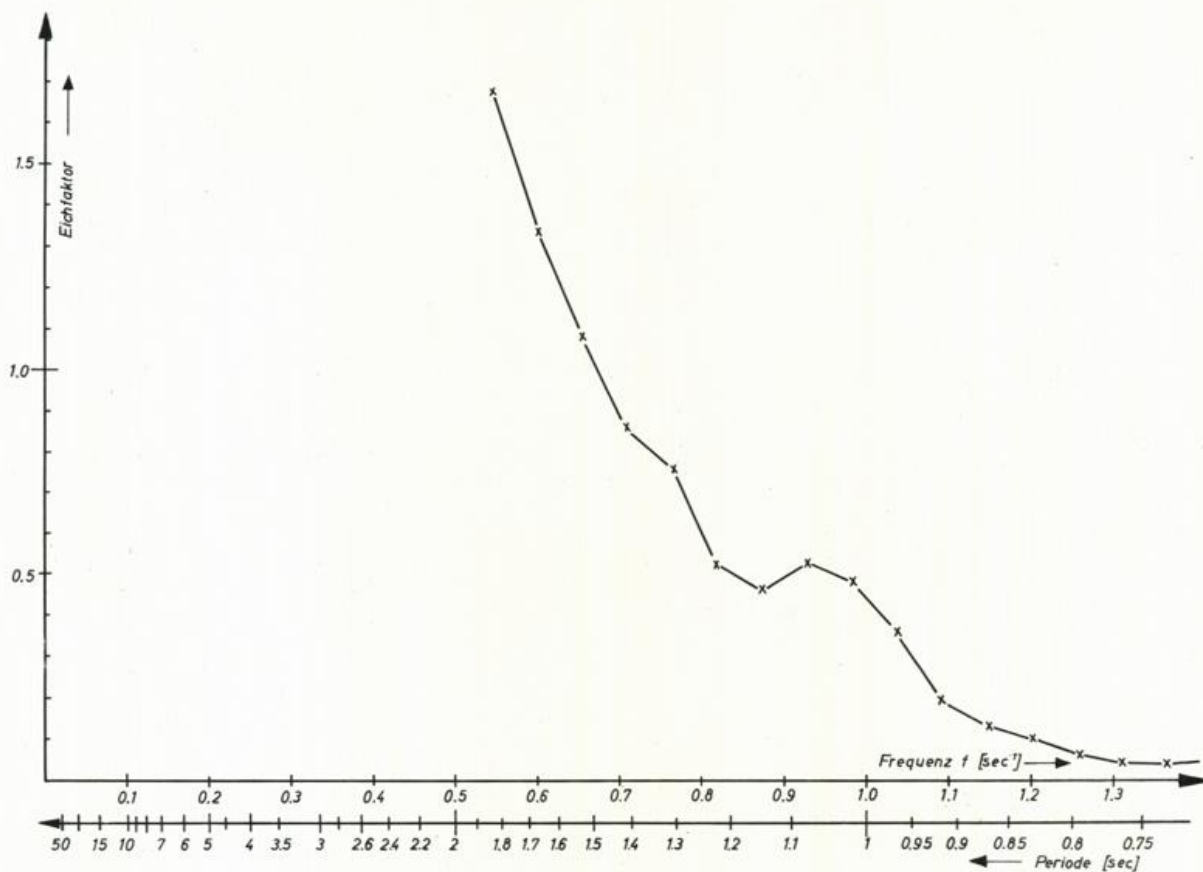


Abb.48 Alstermessung, spektrale Verteilung des Eichfaktors

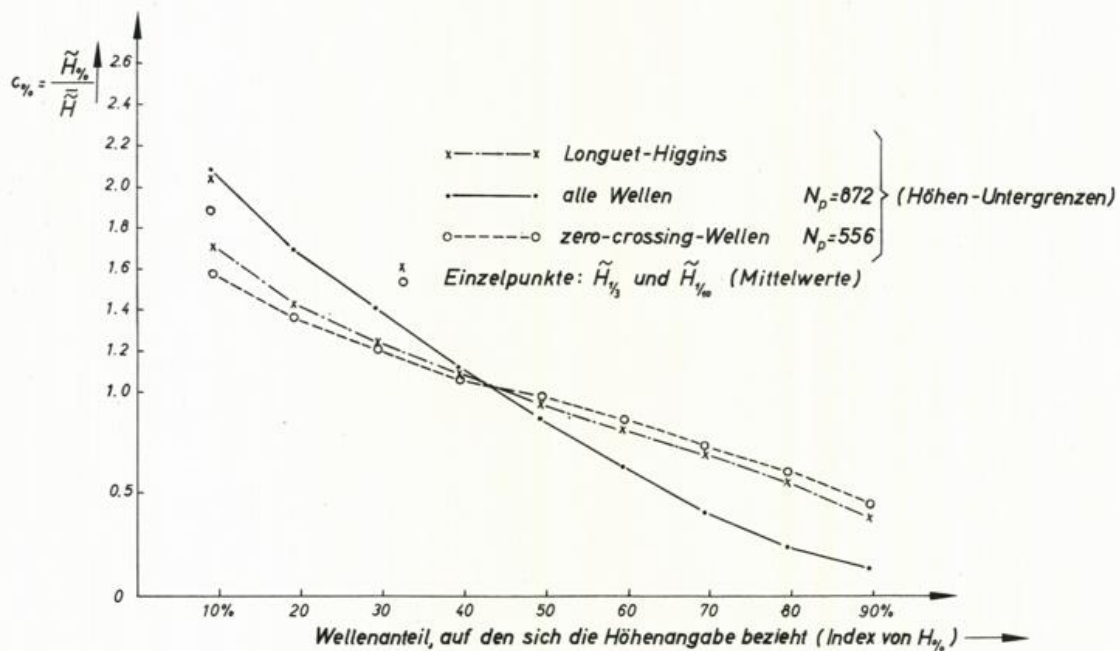


Abb.49 Mellum Plate 2.12.1957, charakteristische Kurven aus L-Registrierung

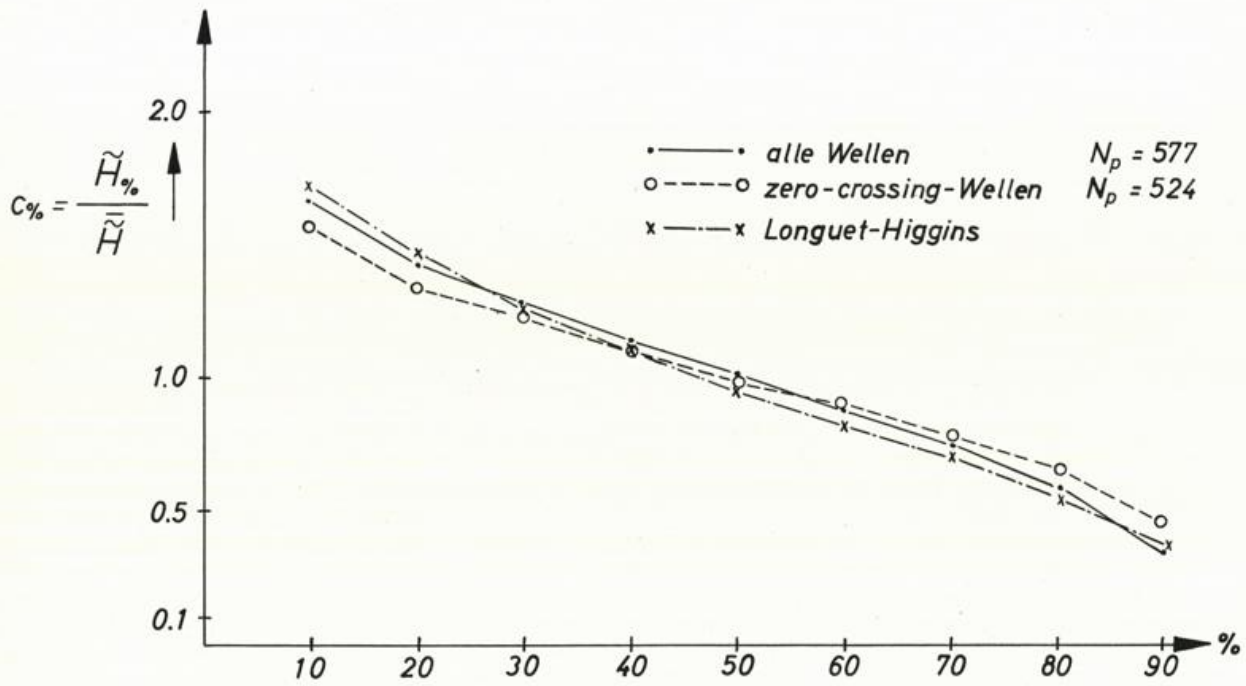


Abb.50 Mellum Plate 2.12.1957, charakteristische Kurven aus Registrierung des Echogeräts (E)

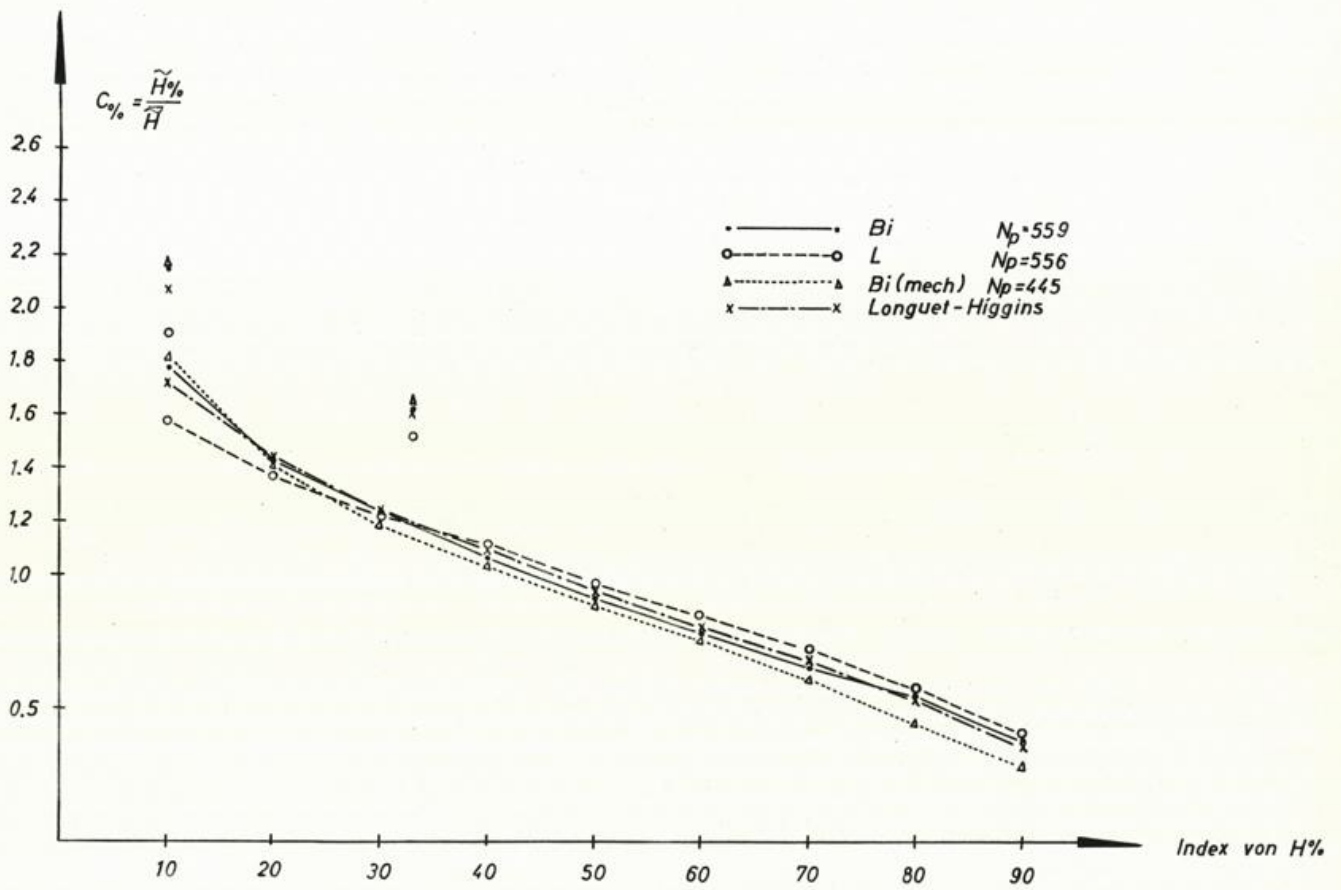


Abb.51 Mellum Plate 2.12.1957, charakteristische Kurven der Registrierungen L, Bi und Bi(mech)

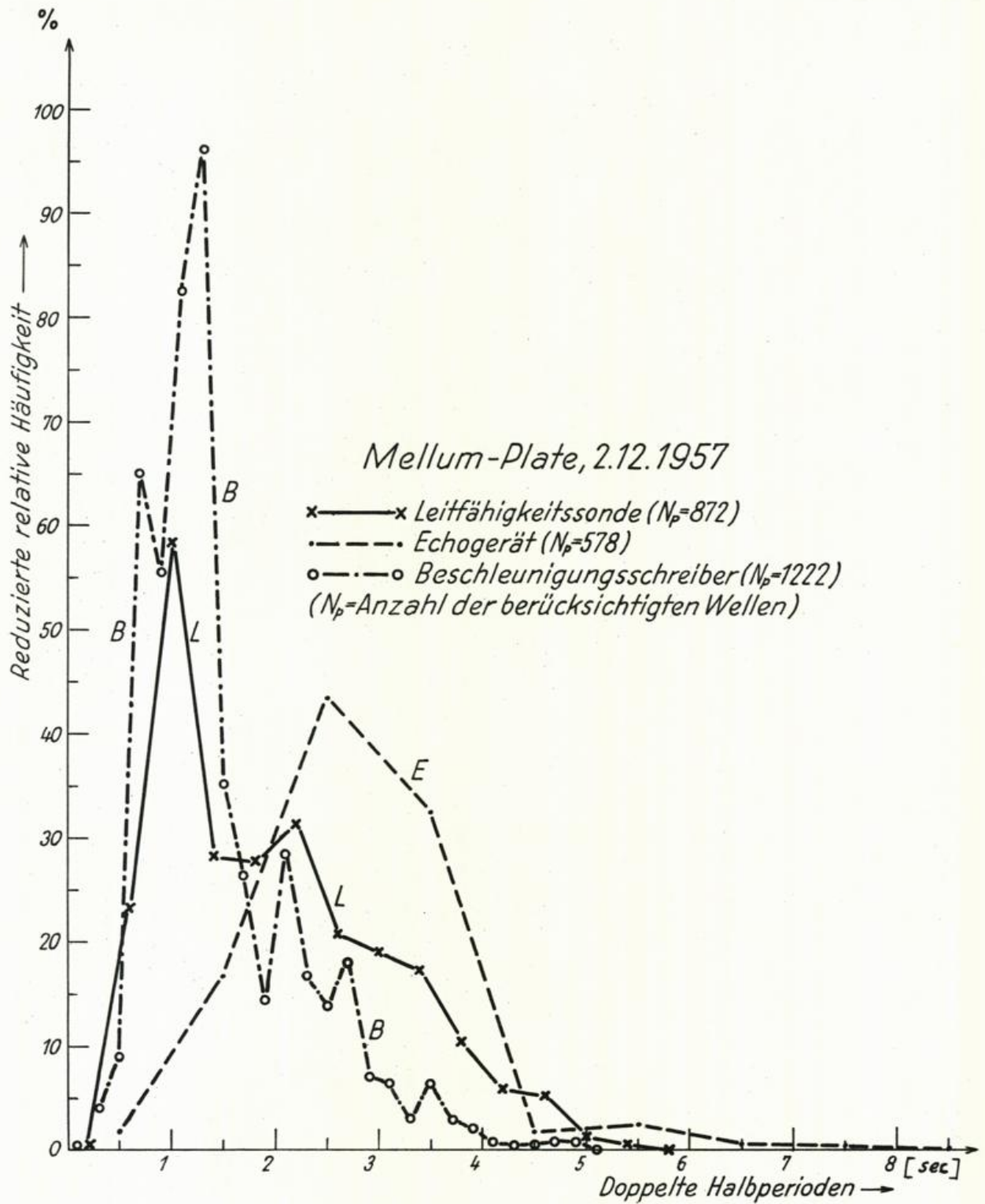


Abb.52 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilungen für verdoppelte Halbperioden (alle Wellen) - Registrierungen L,E,B

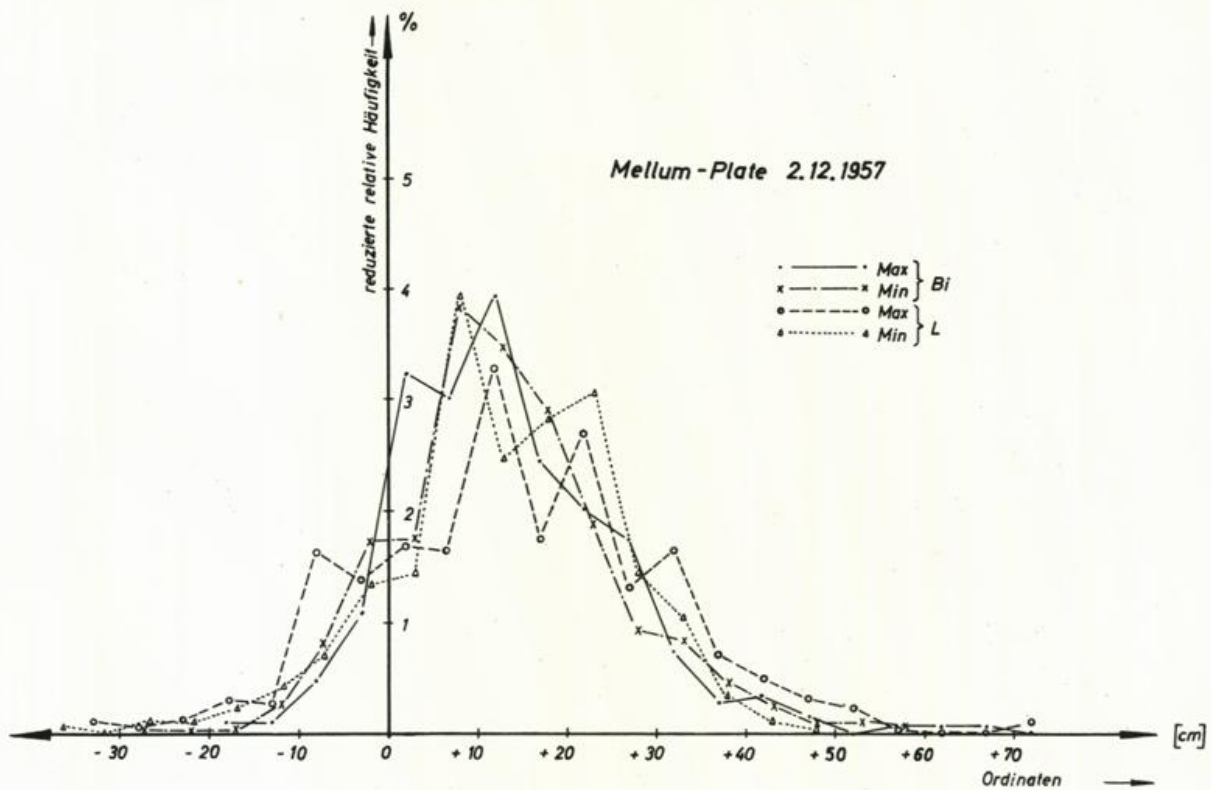


Abb.53a Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen L und Bi

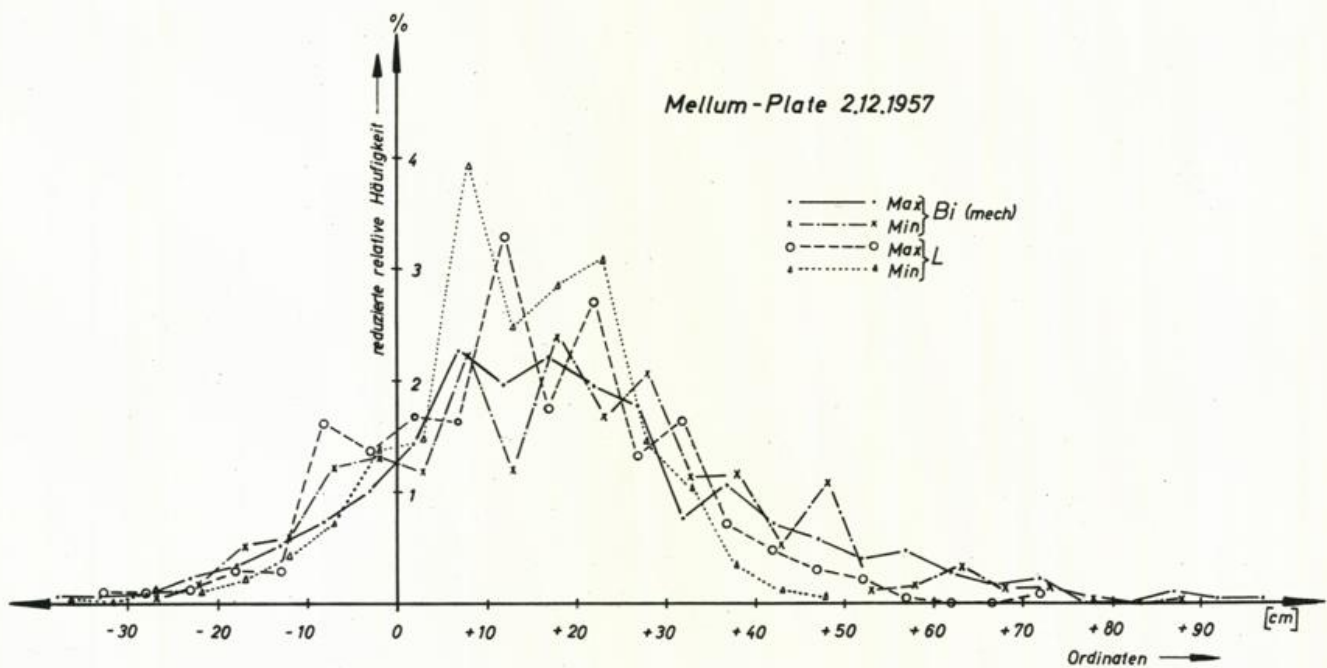


Abb.53b Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen L und Bi (mech)

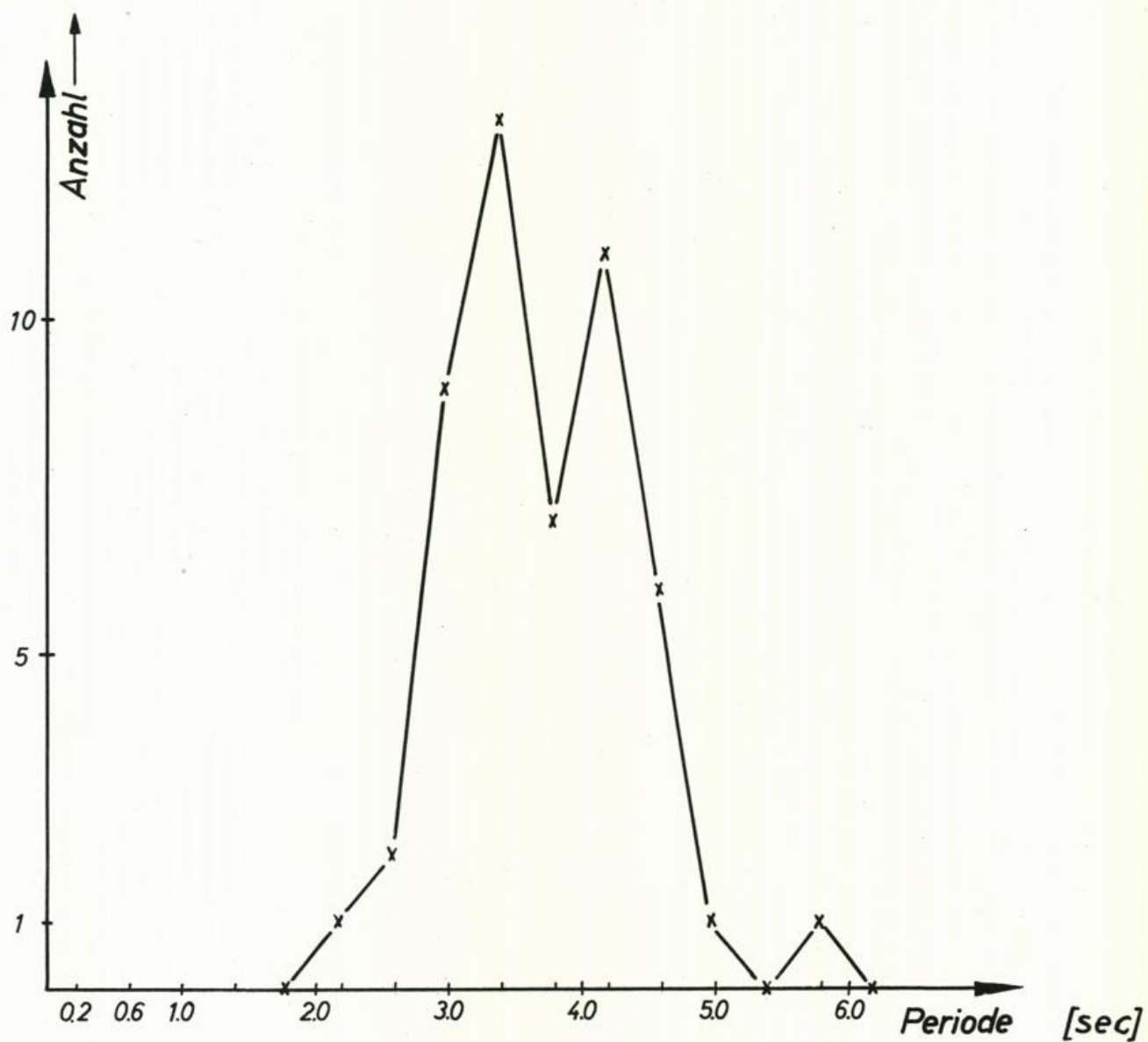


Abb.54 Mellum Plate 2.12.1957, absolute Häufigkeitsverteilung der Perioden markanter Wellen

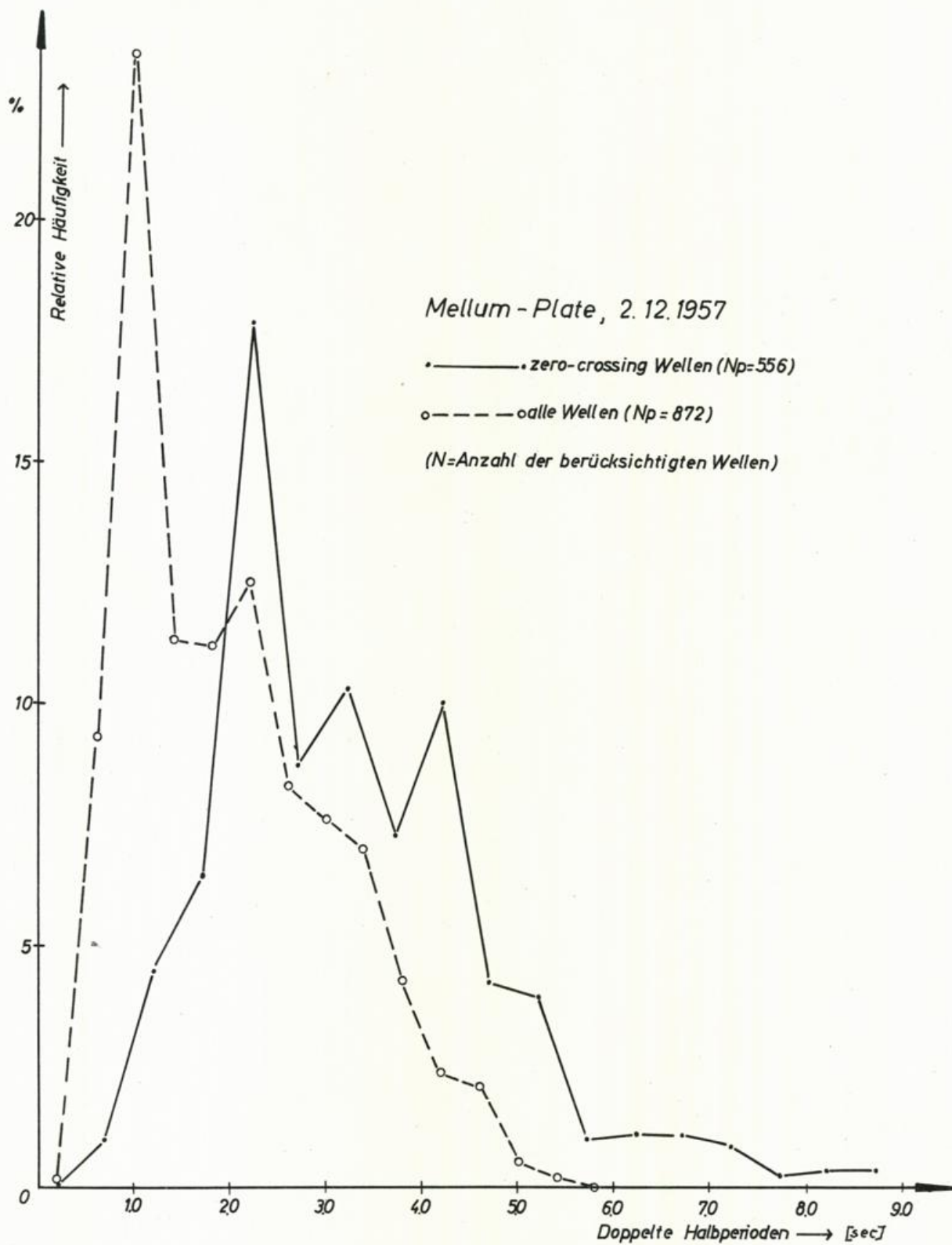


Abb.55 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung für verdoppelte Halbperioden, L-Registrierung, alle Wellen und zero-crossing-Wellen

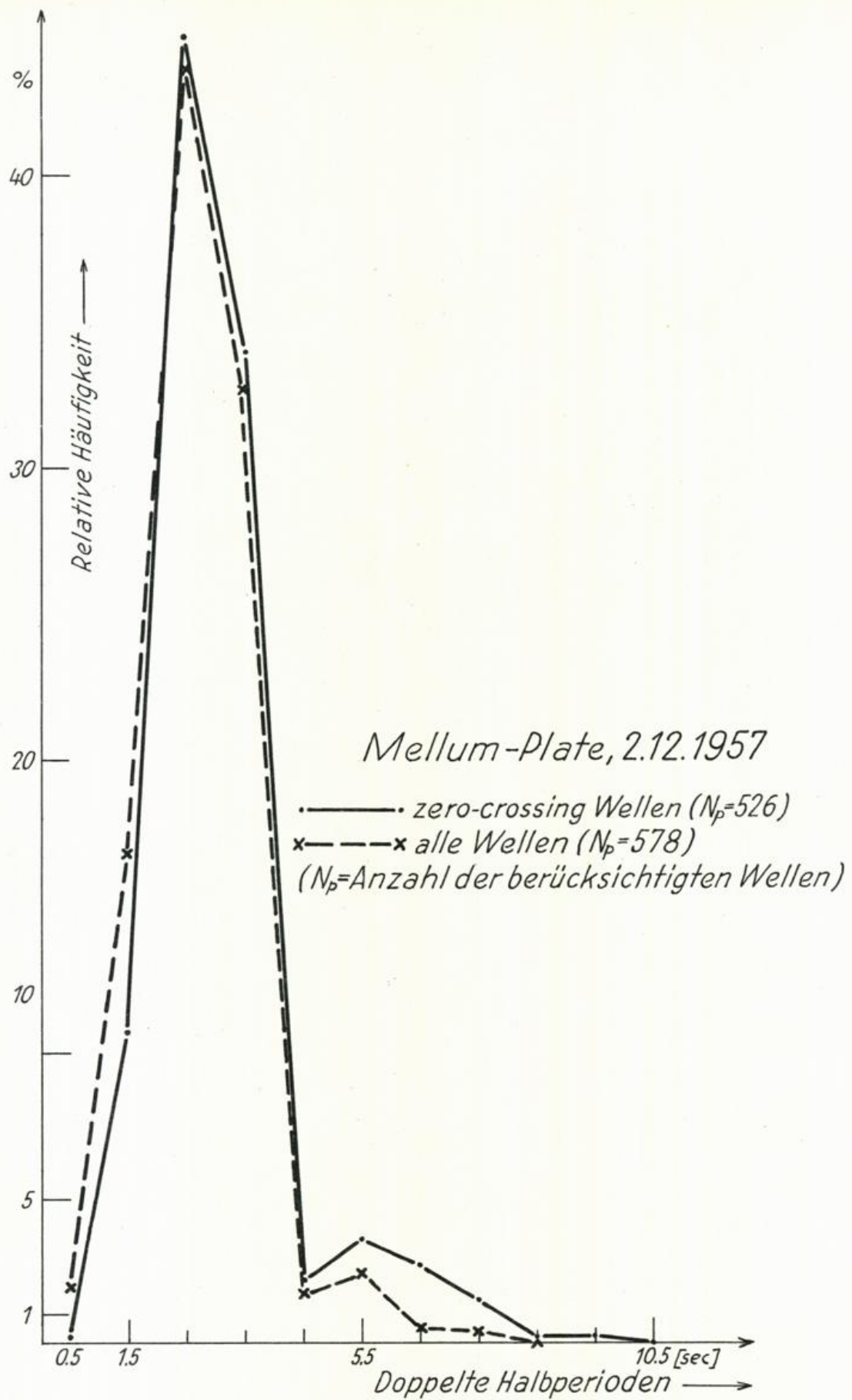


Abb.56 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung für verdoppelte Halbperioden, E-Registrierung, alle Wellen und zero-crossing-Wellen

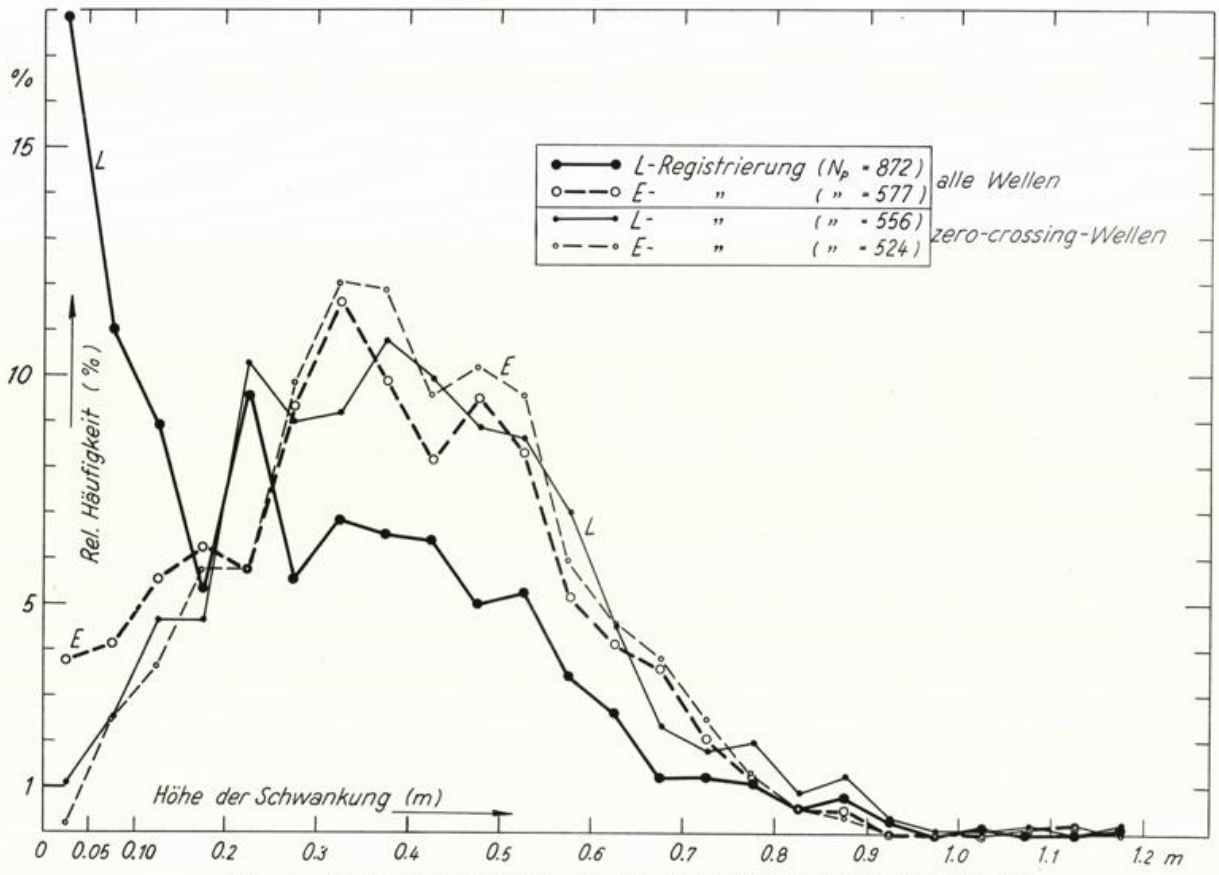


Abb. 57 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung der Schwankungshöhen, Registrierungen L und E

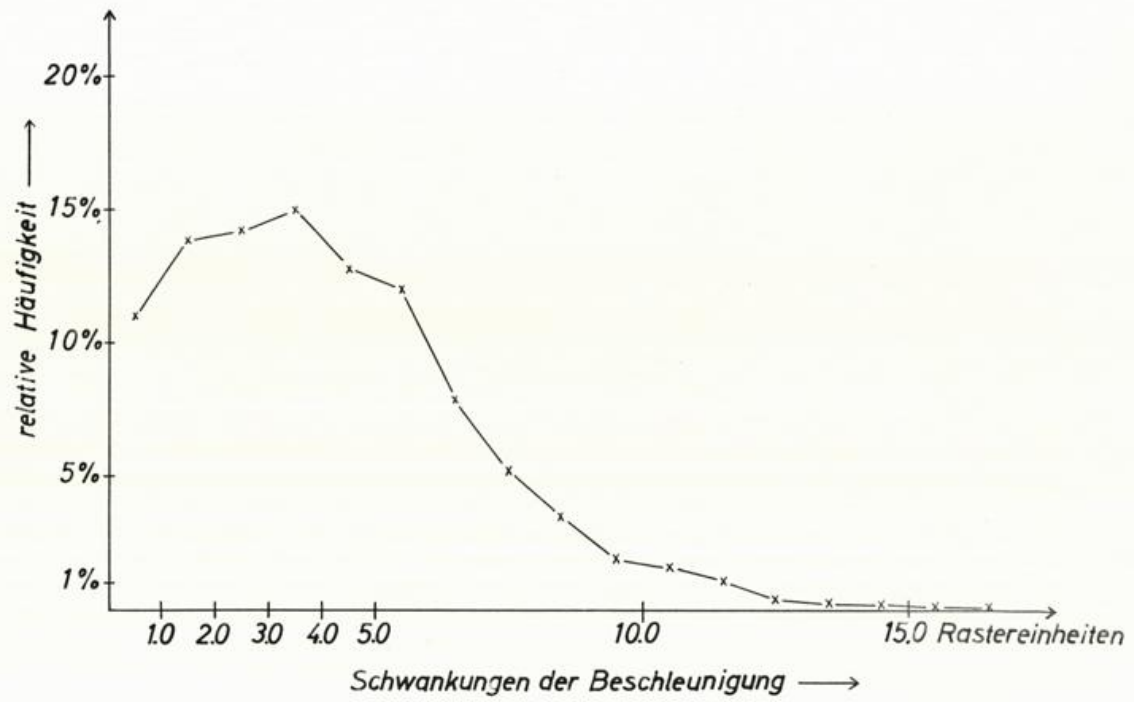


Abb.58 Mellum Plate 2.12.1957, relative Häufigkeitsverteilung der Schwankungen der Beschleunigung, $N_p = 1222$

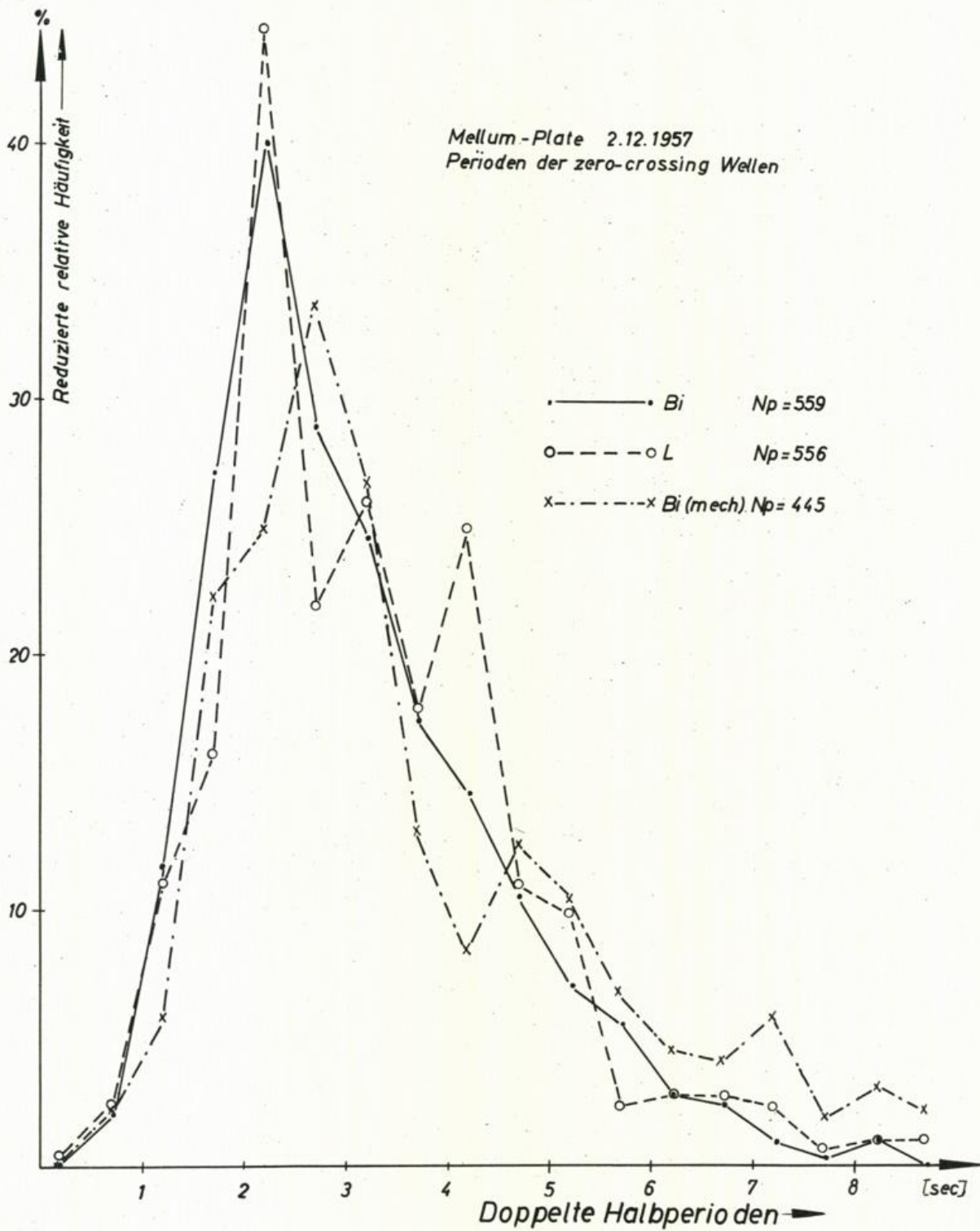


Abb.59 Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung für verdoppelte Halbperioden, Registrierungen L, Bi und Bi(mech), zero-crossing-Wellen

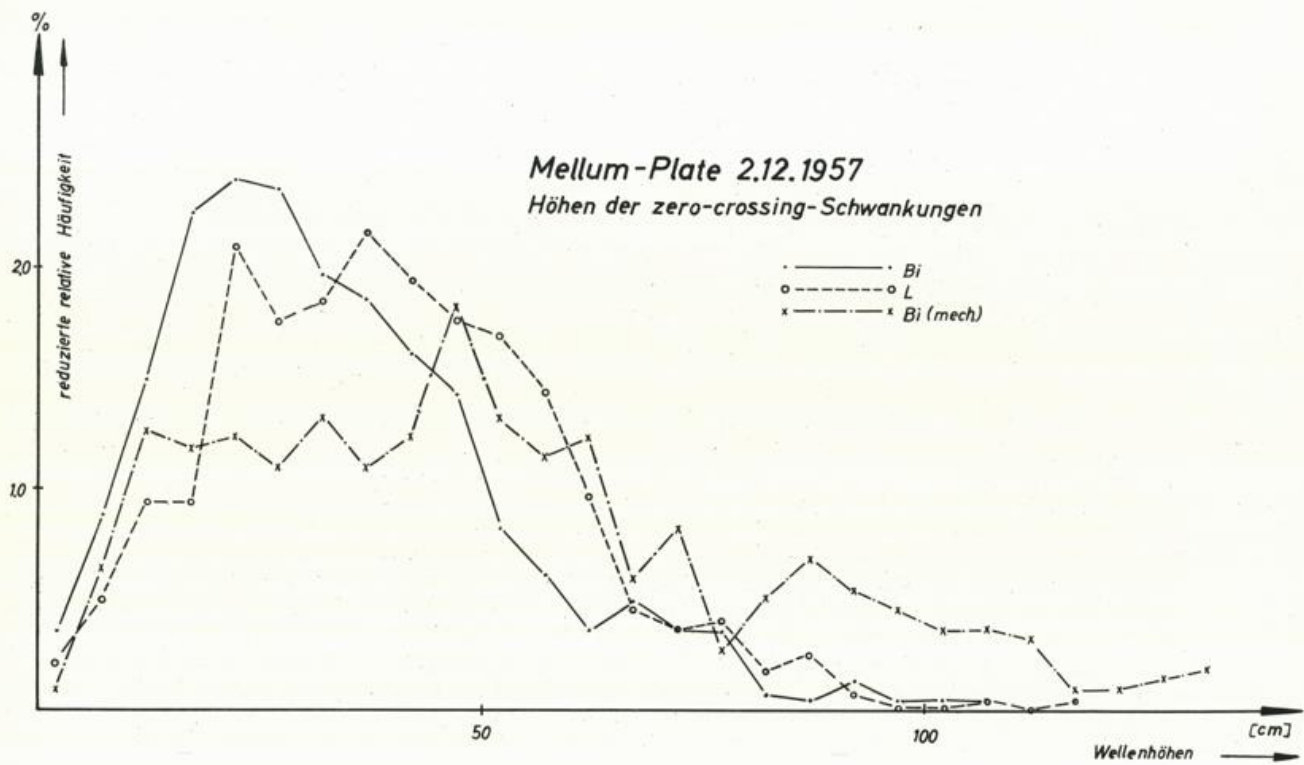


Abb.60 Mellum Plate 2.12.1957, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung für Höhen der zero-crossing-Wellen, Registrierungen L, Bi und Bi (mech)

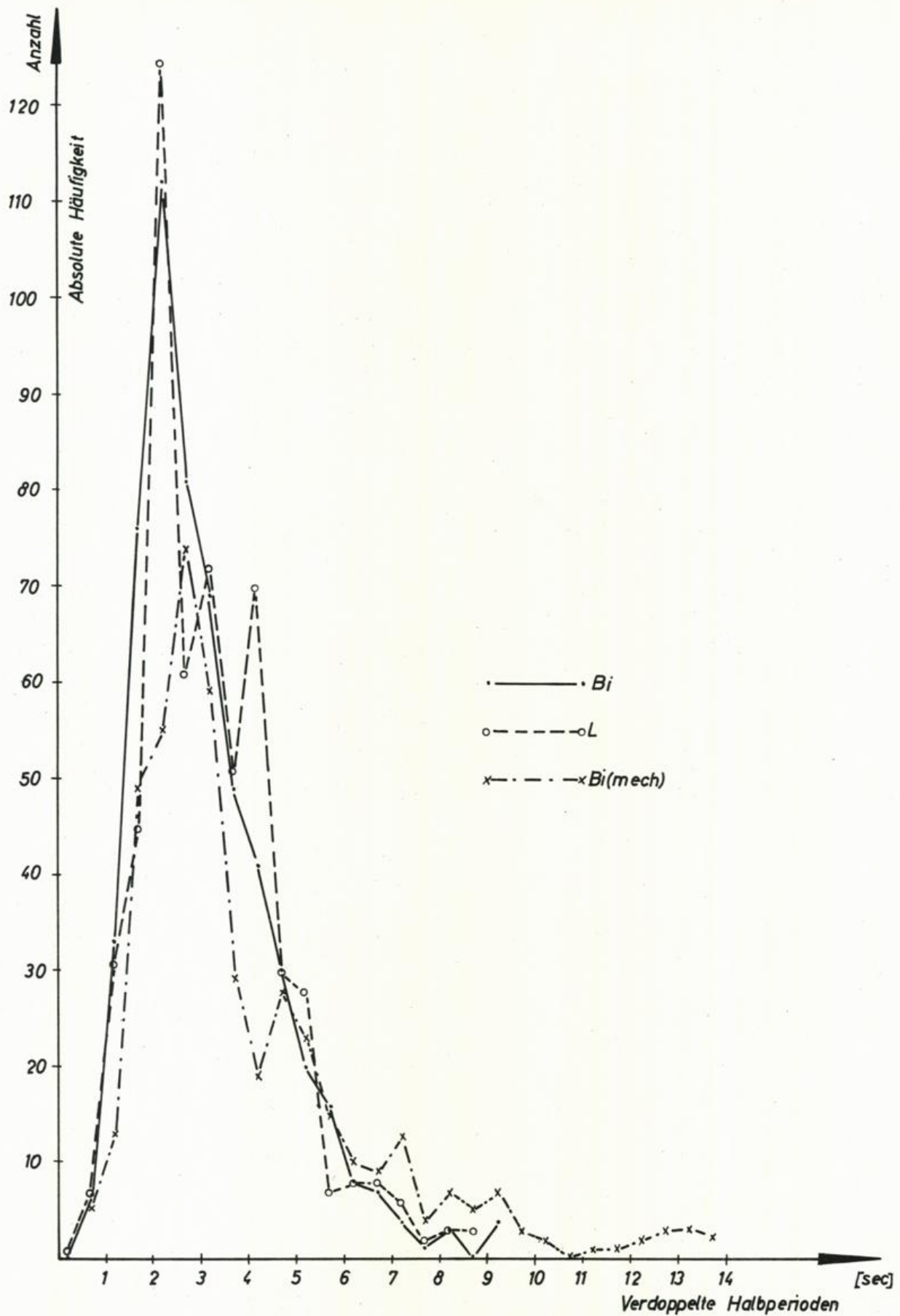


Abb.61 Mellum Plate 2.12.1957, absolute Häufigkeitsverteilung verdoppelter Halbperioden, Registrierungen L, Bi und Bi(mech)

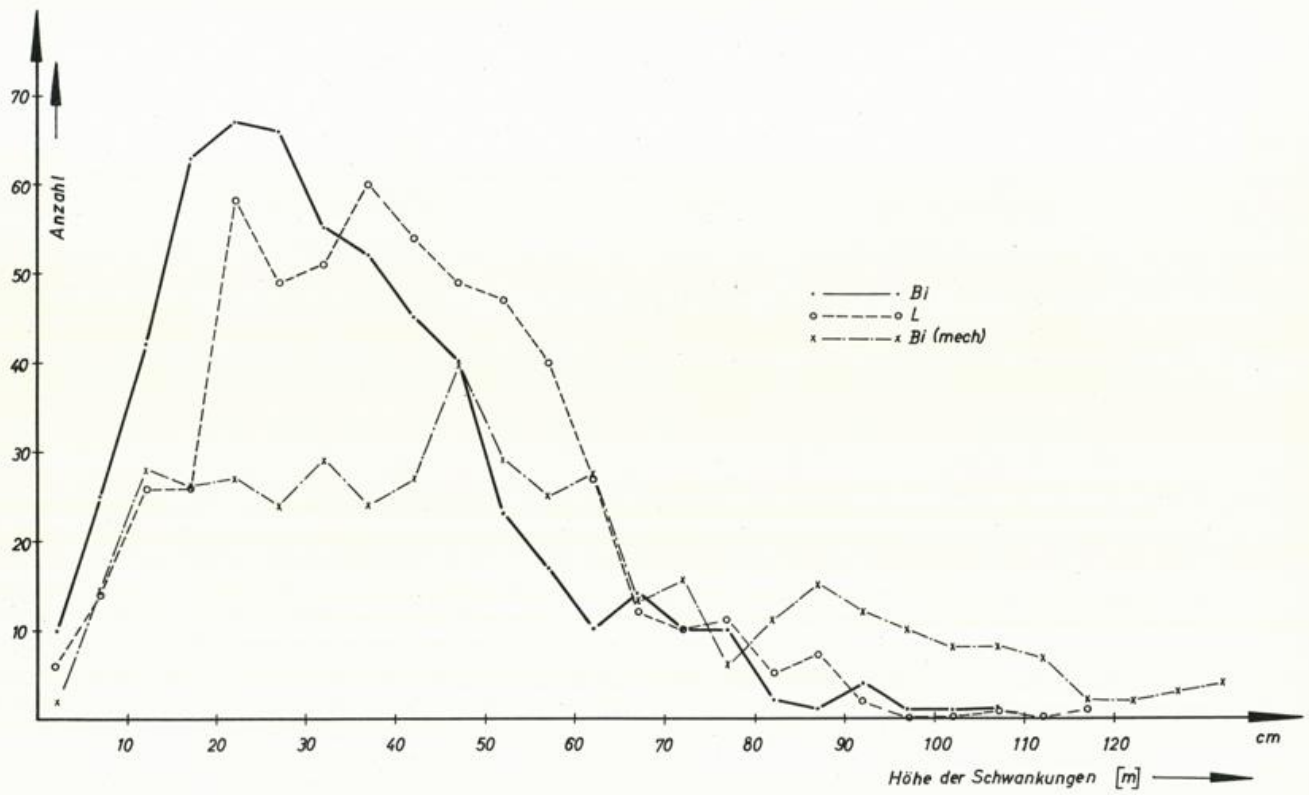


Abb.62 Mellum Plate 2.12.1957, absolute Häufigkeitsverteilung der Schwankungshöhen, Registrierungen L, Bi und Bi (mech)

Abb. 63 a Meilum Plate 2.12.1957, zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung für die Registrierung I

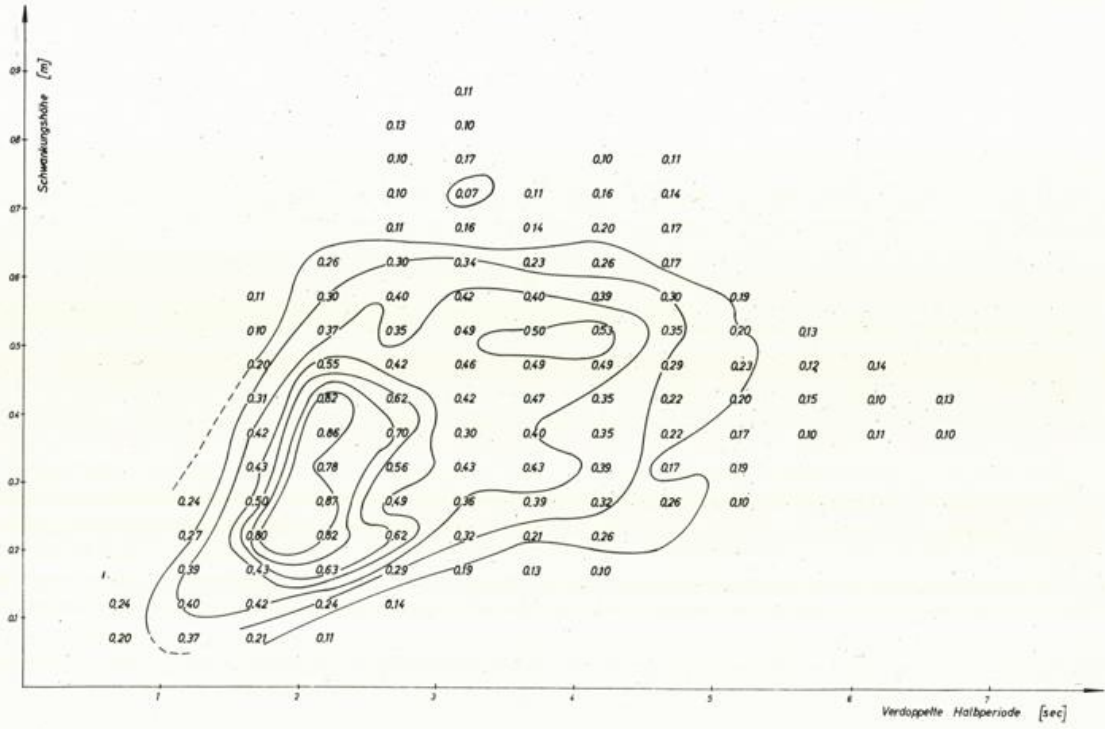
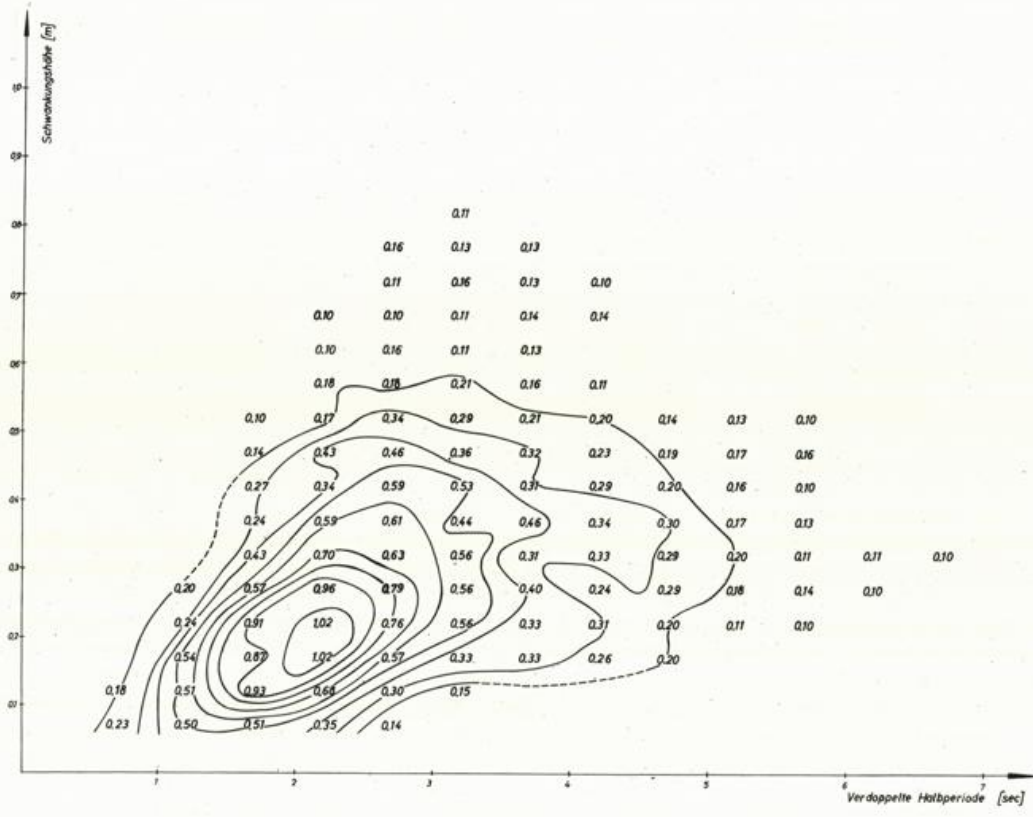


Abb. 63 b Mellum Plate 2.12.1957, zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung für die Registrierung B1



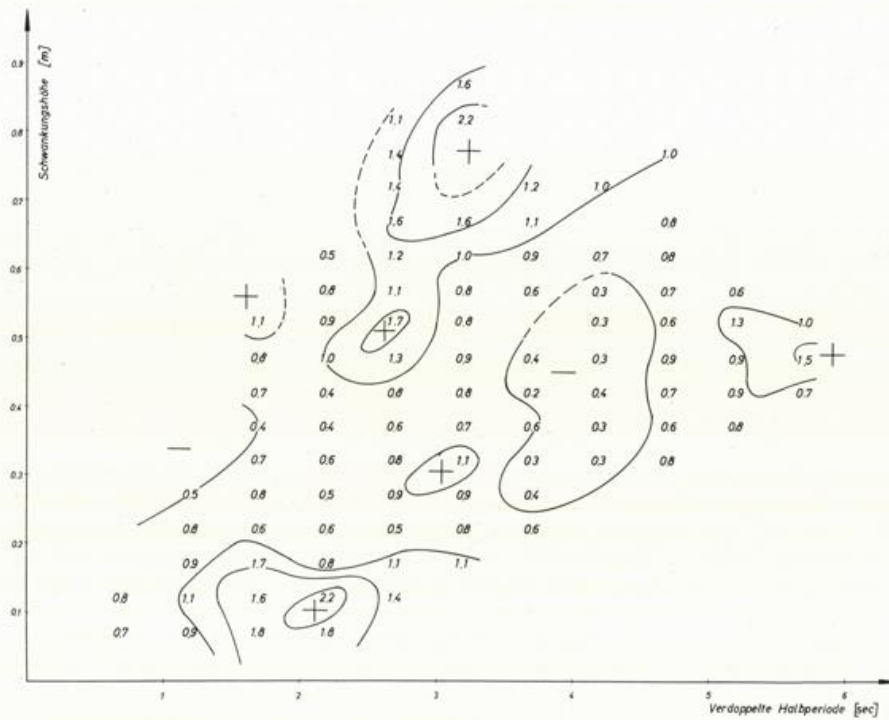


Abb.64 a Mellum Plate 2.12.1957, „Empfindlichkeit“ („Eichfaktoren“) hinsichtlich sichtbarer Perioden für Registrierungen L gegen Bi, zweidimensional

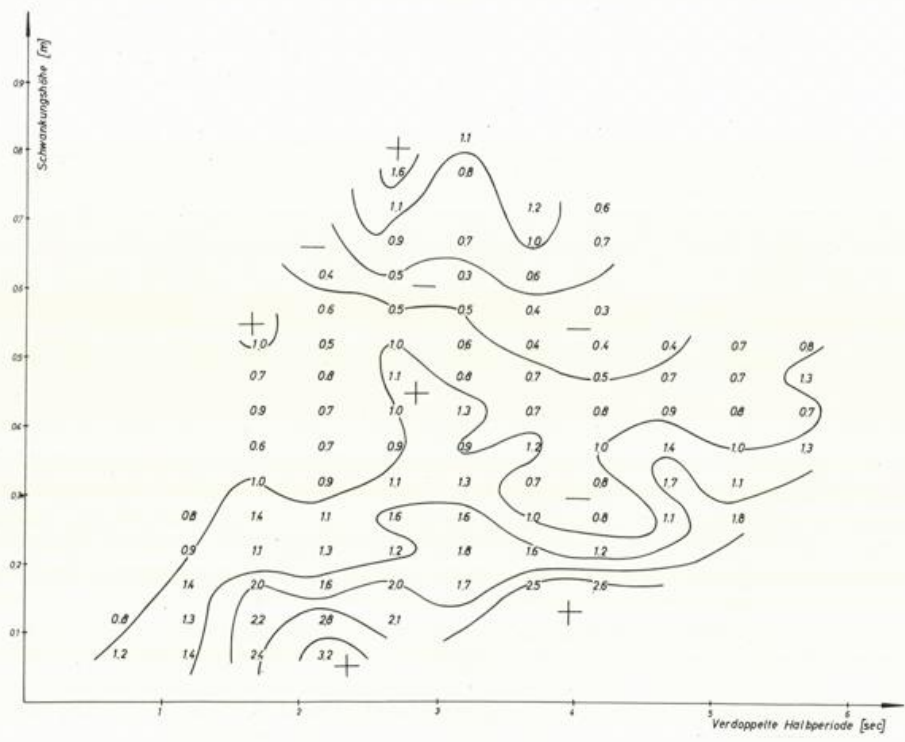


Abb.64 b Mellum Plate 2.12.1957, „Empfindlichkeit“ („Eichfaktoren“) hinsichtlich sichtbarer Perioden für Registrierungen L gegen $B_{i(mech)}$, zweidimensional

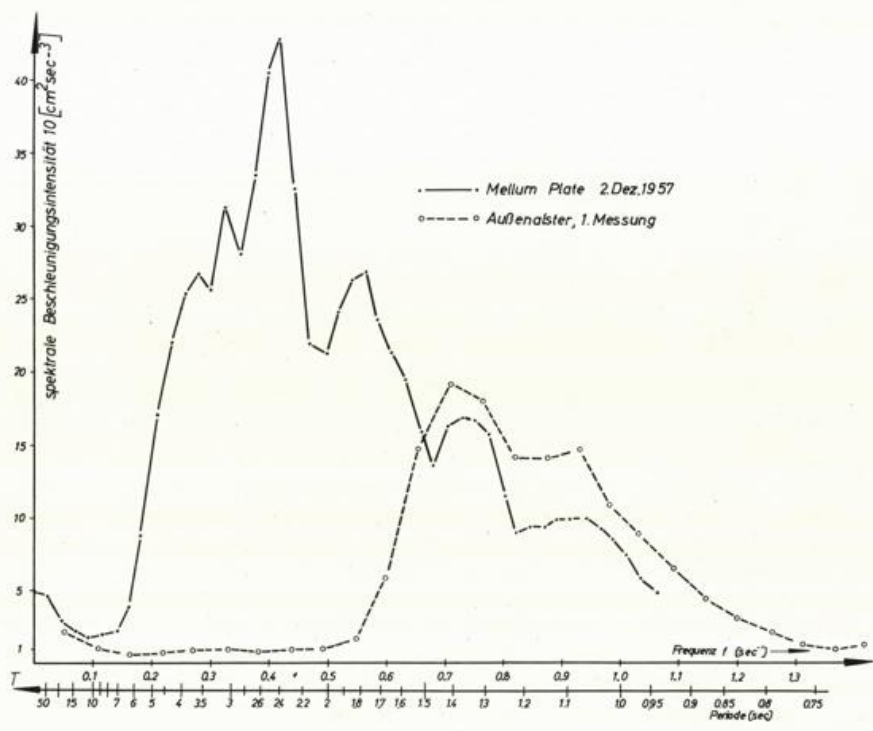


Abb.65 Mellum Plate 2.12.1957 und Außenalster, Spektrum der Beschleunigungs-Intensität

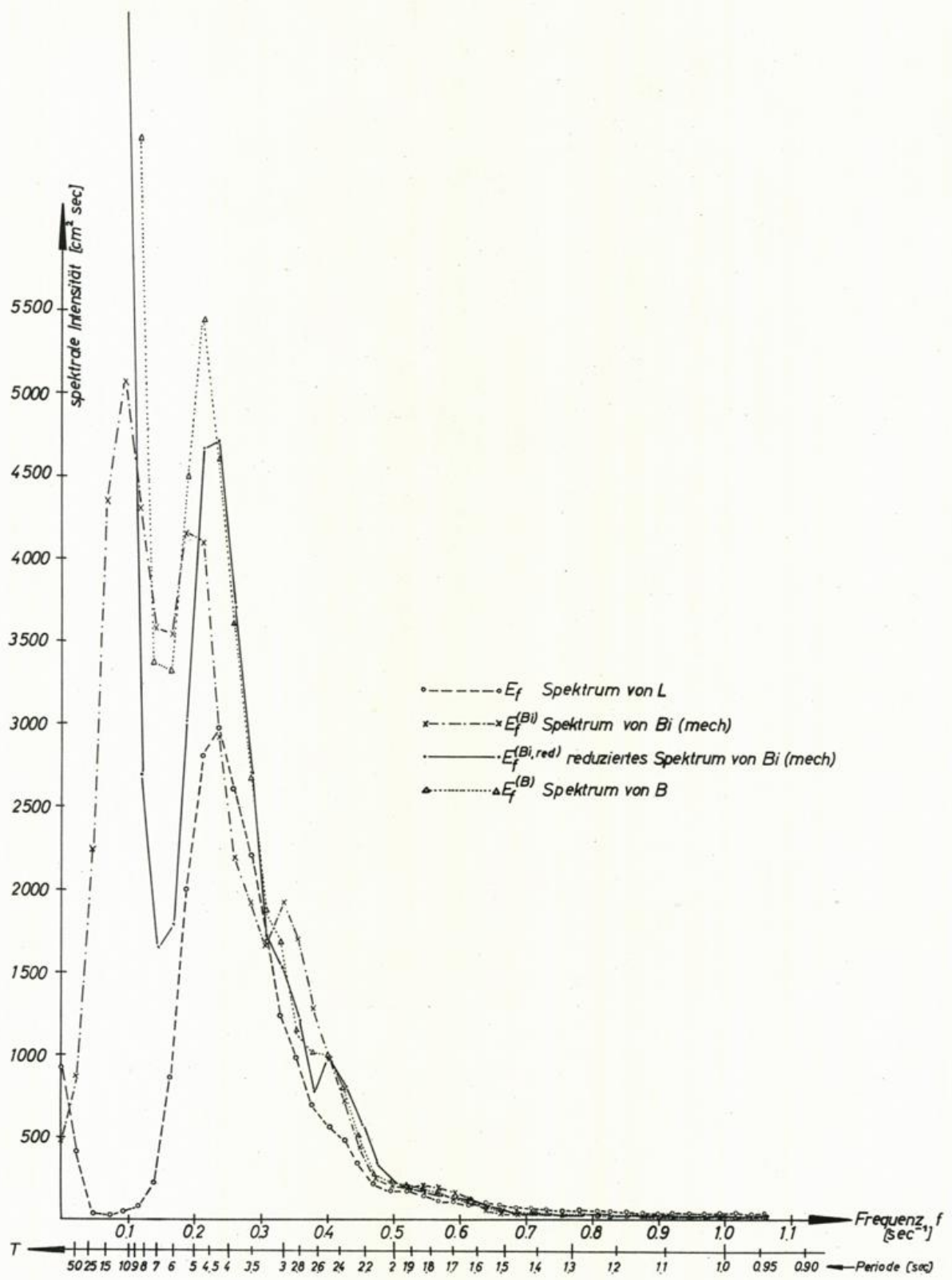


Abb.66 Mellum Plate 2.12.1957, Spektren der „Seegangs-Intensitäten“ für Registrierungen L, B, Bi (mech) und Bi (mech red)

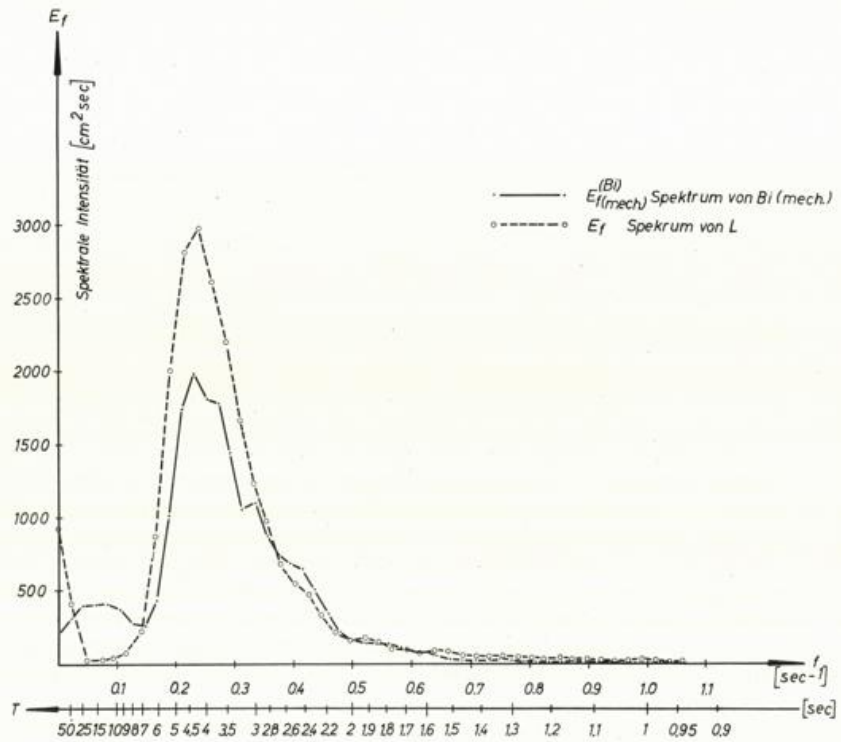


Abb.67 Mellum Plate 2.12.1957, Spektren der „Seegangs-Intensitäten“ für Registrierungen L und Bi

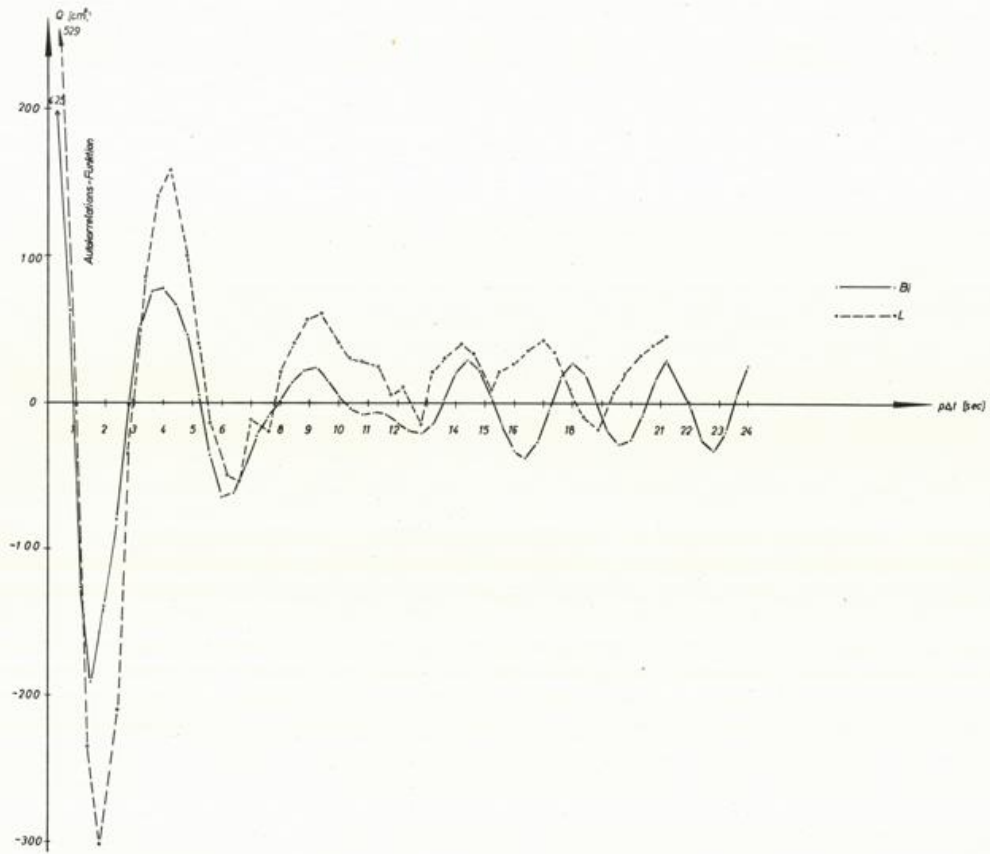


Abb.68 Mellum Plate 2.12.1957, Autokorrelationsfunktionen für Registrierungen L und B_i

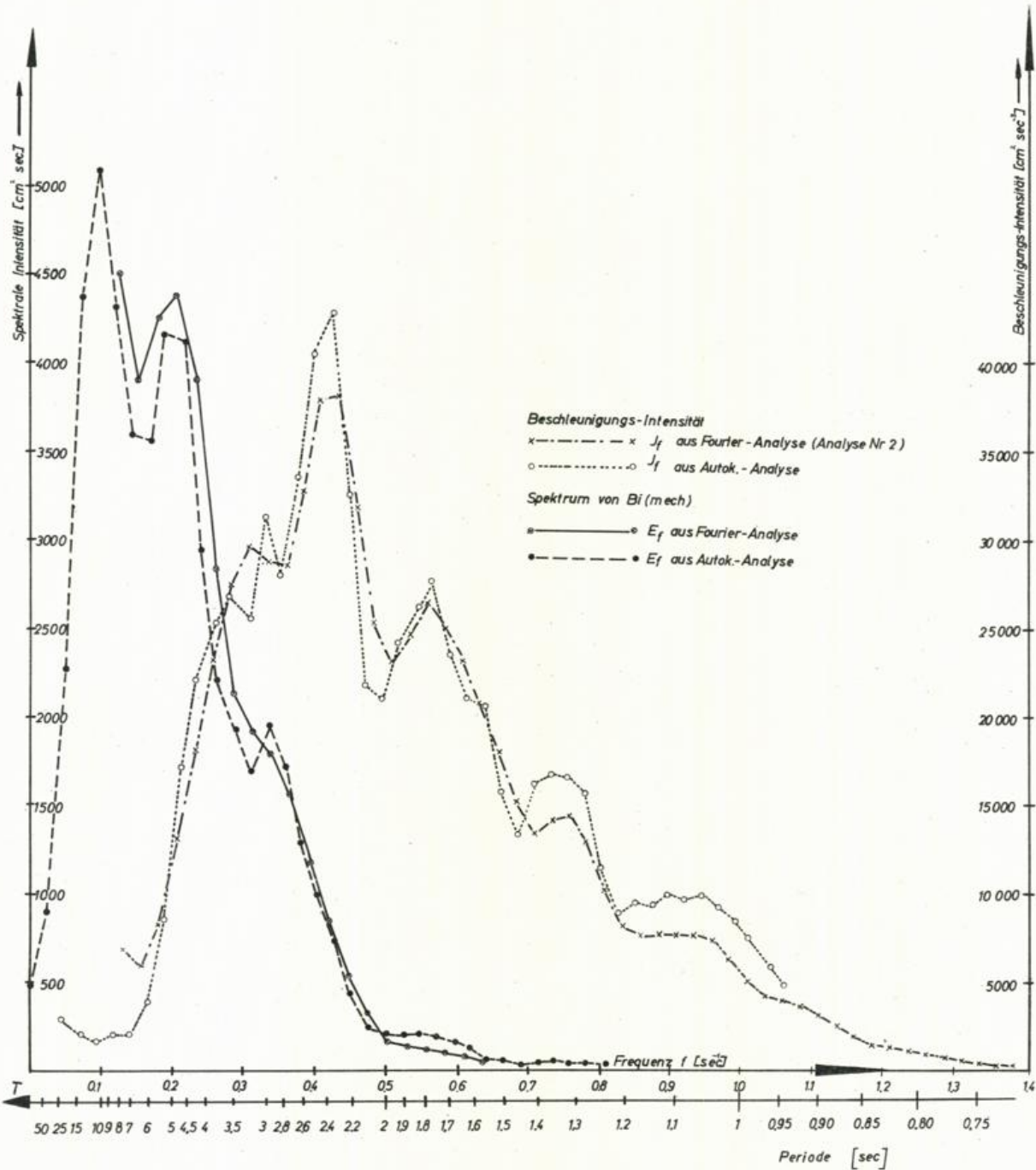


Abb.69 Mellum Plate 2.12.1957, Gegenüberstellung von Spektren, die mittels Autokorrelations- bzw. durch Fourier-Analyse ermittelt wurden

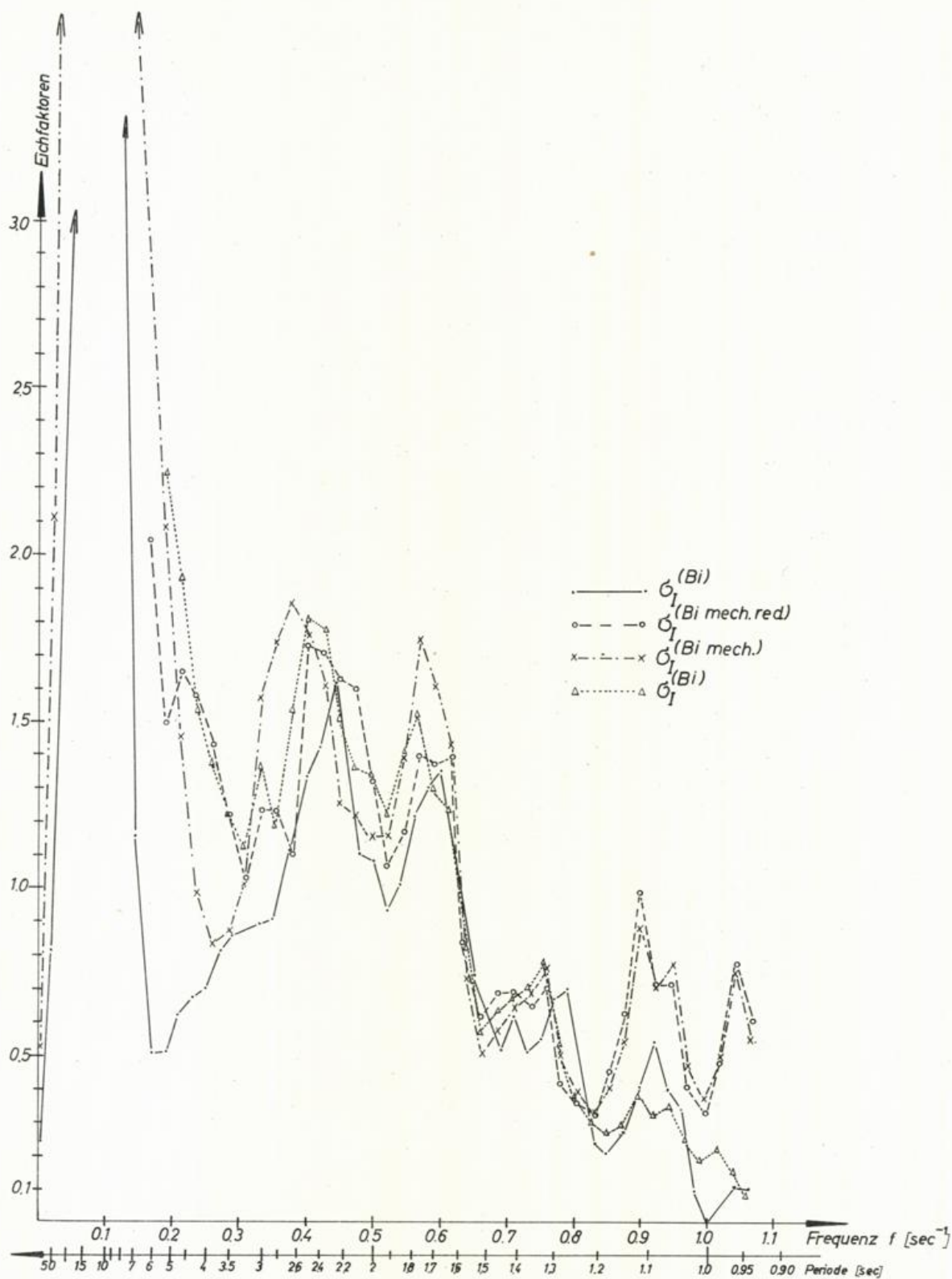


Abb.70 Mellum Plate 2.12.1957, Eichfunktionen für „Intensitäts“-Spektren B, Bi_(mech) und Bi_(mech red)

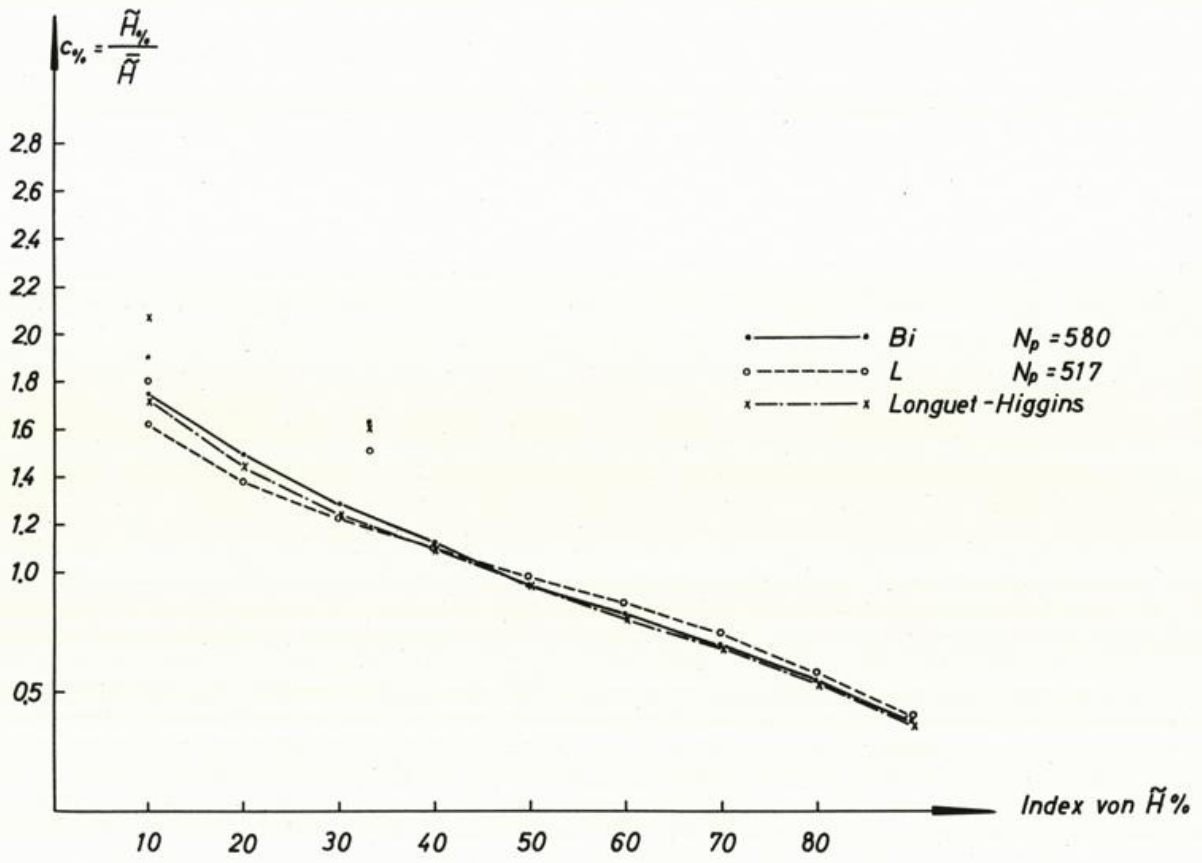


Abb.71 Mellum Plate 14.2.1958, charakteristische Kurven

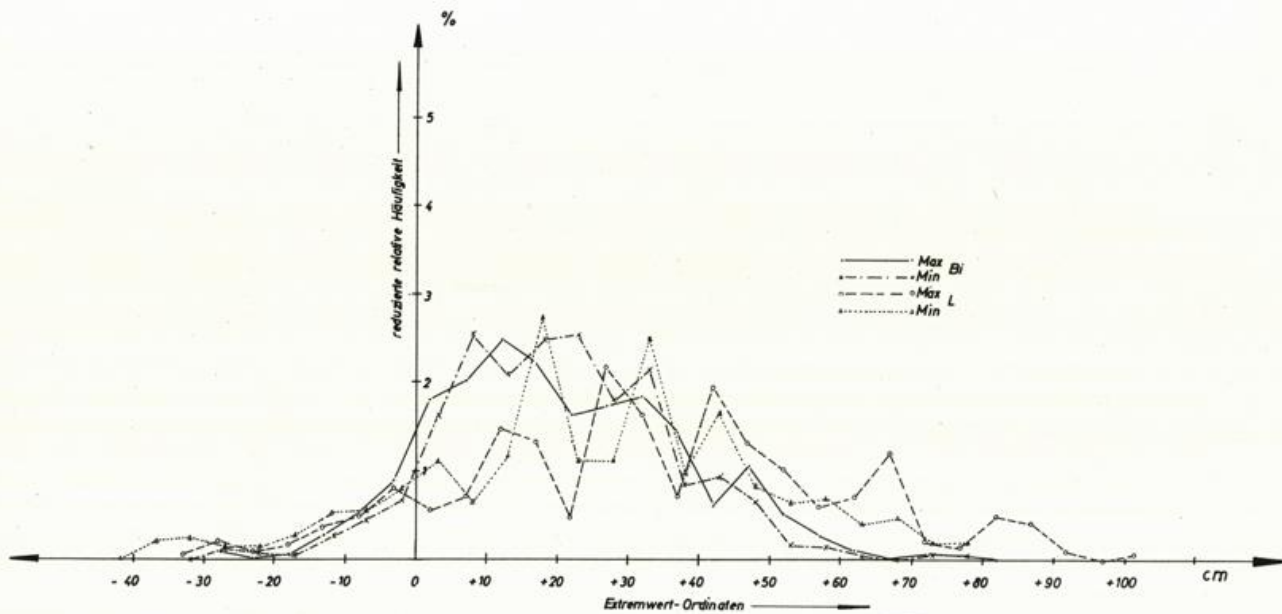


Abb.72 Mellum Plate 14.2.1958, reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen L und Bi

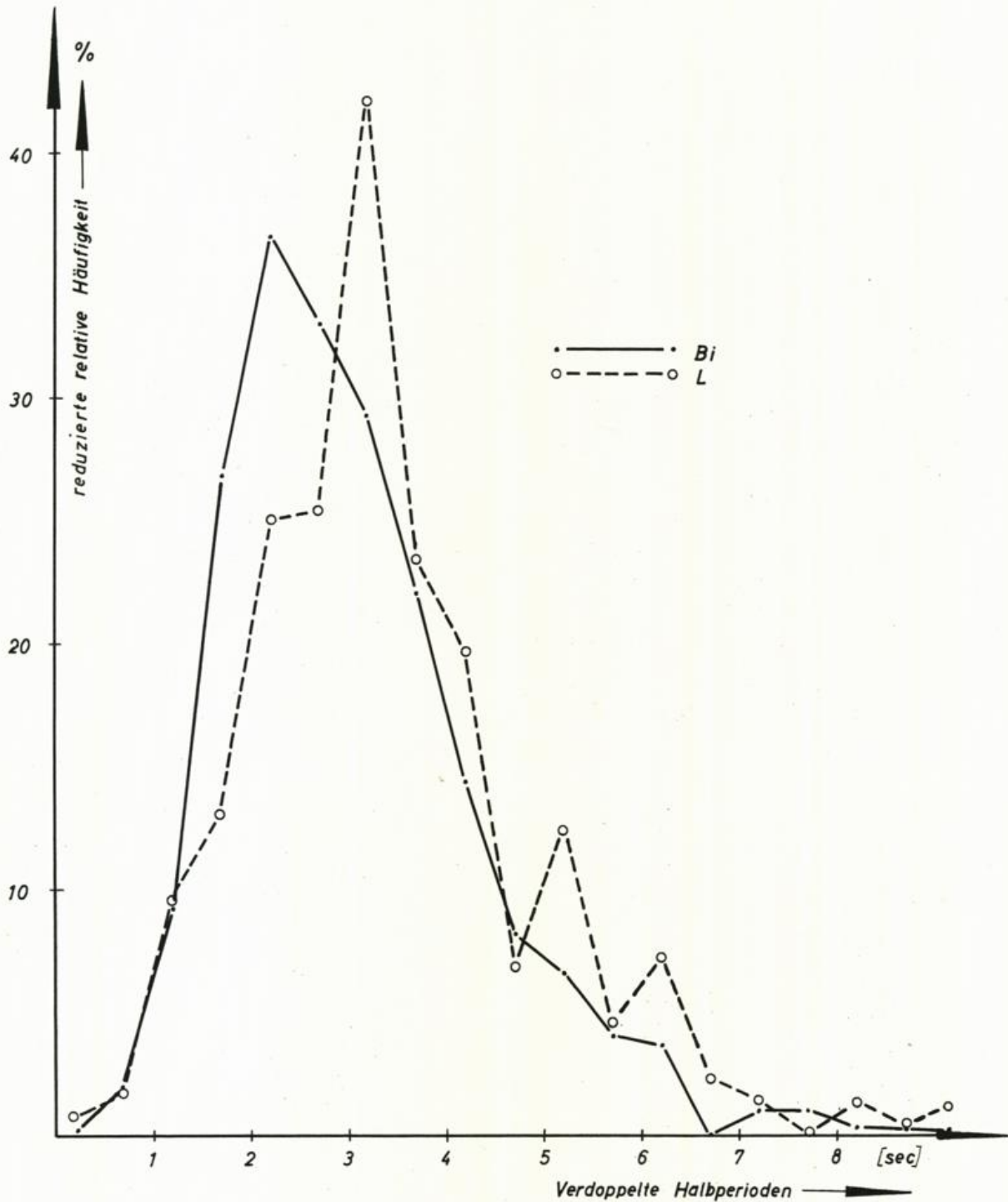


Abb.73 Mellum Plate 14.2.1958, reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der Schwankungshöhen, zero-crossing-Wellen, Registrierungen L und Bi

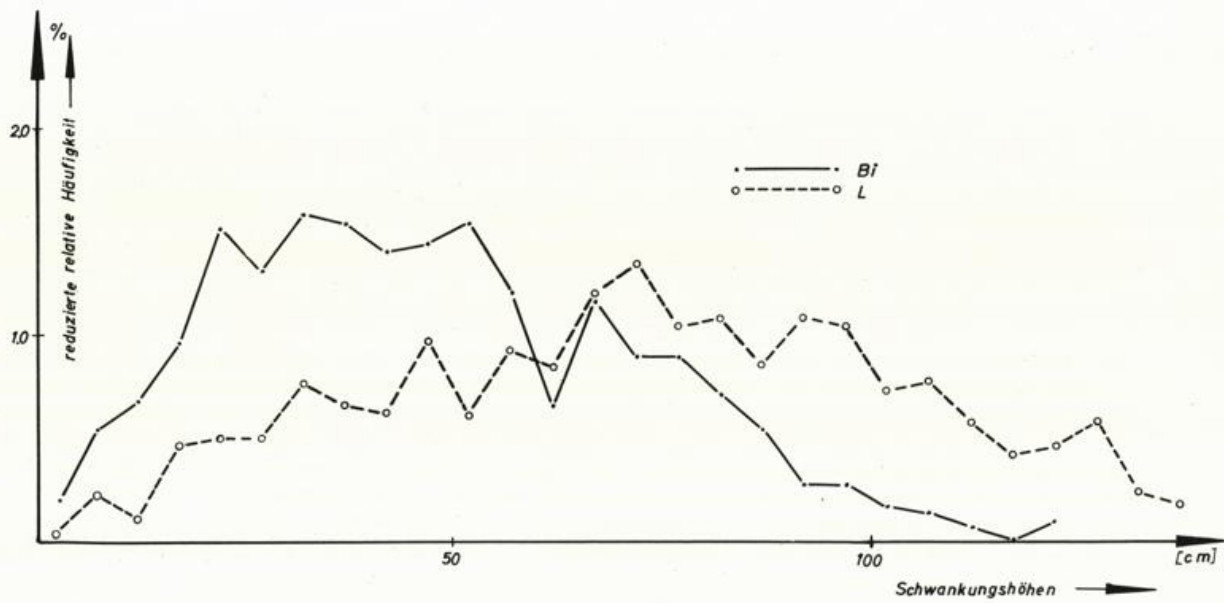


Abb.74 Mellum Plate 14.2.1958, reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen der verdoppelten Halbperioden, zero-crossing-Wellen, Registrierungen L und B1

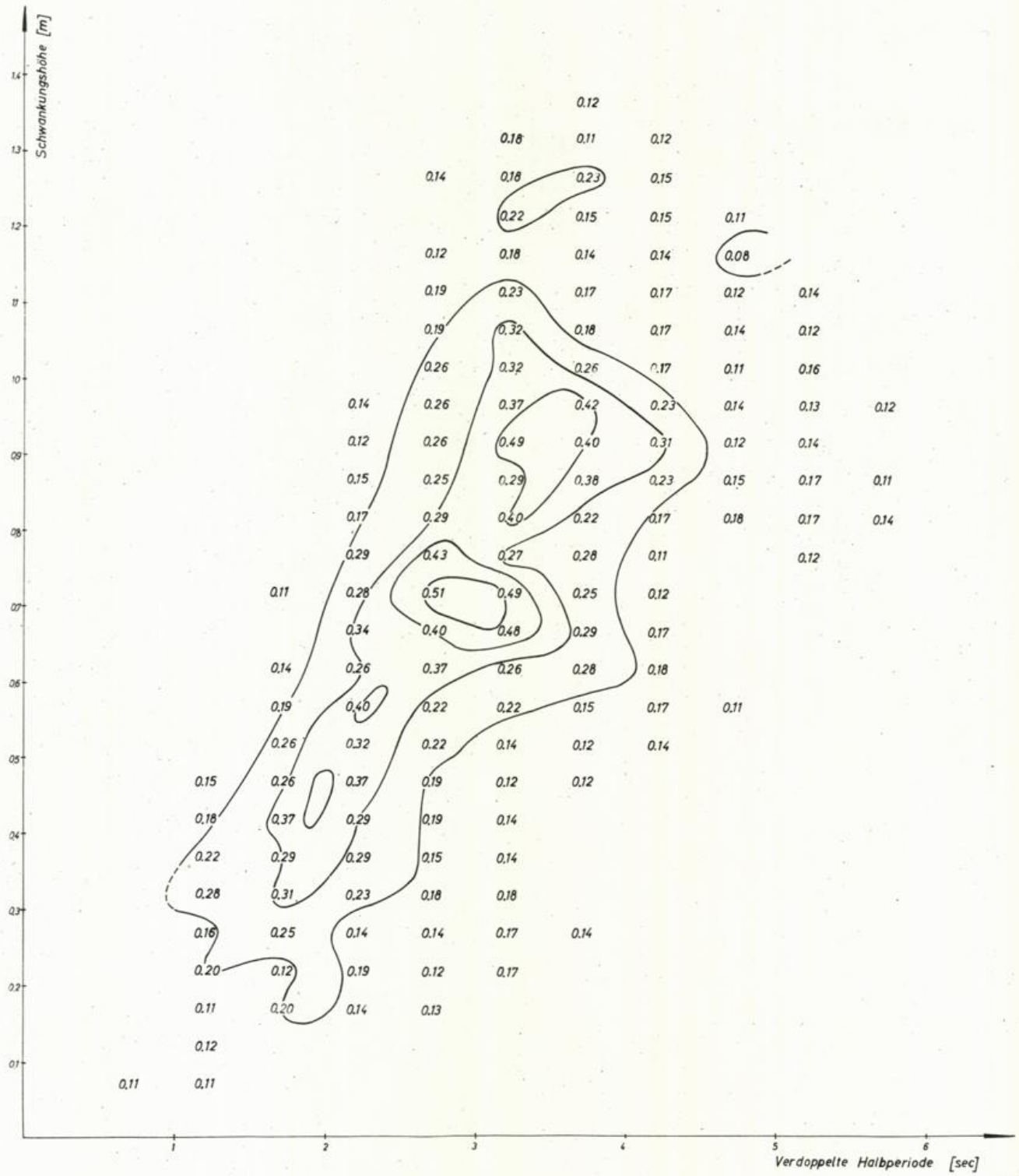
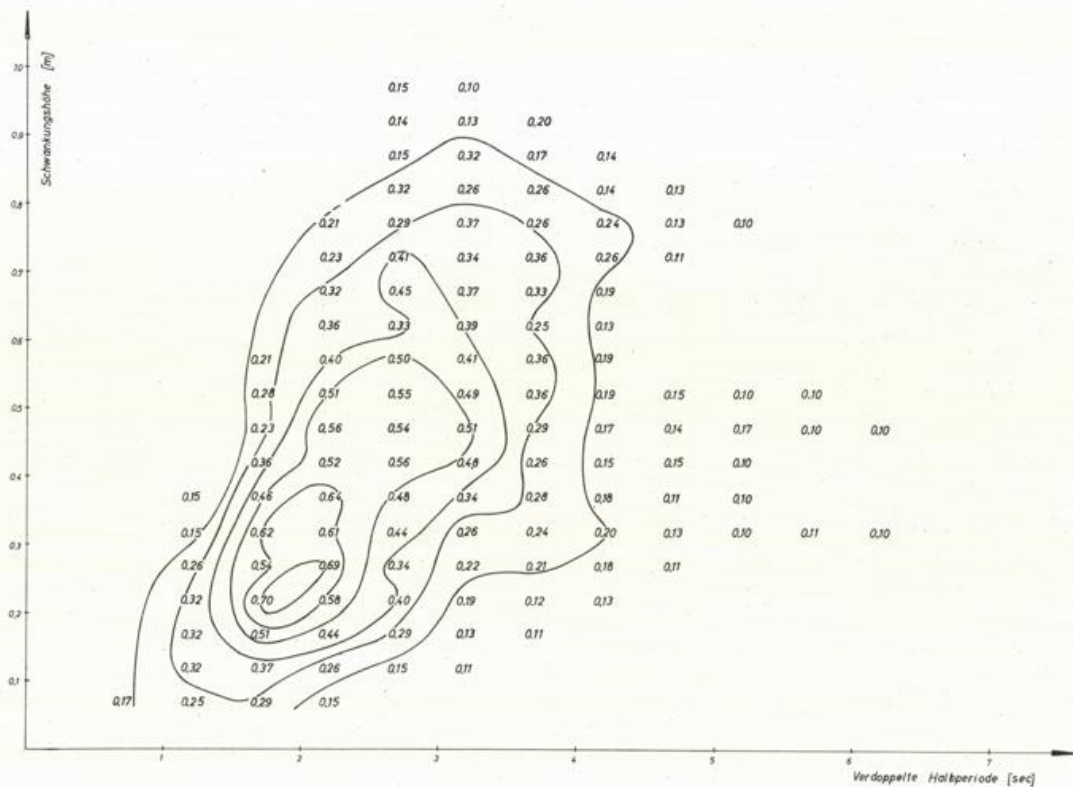


Abb.75 a Mellum Plate 14.2.1958, zweidimensionale Häufigkeitsverteilung, Registrierung L

Abb. 75 b Mellum Plate 14.2.1958, zweidimensionale Häufigkeitsverteilung, Registrierung B1



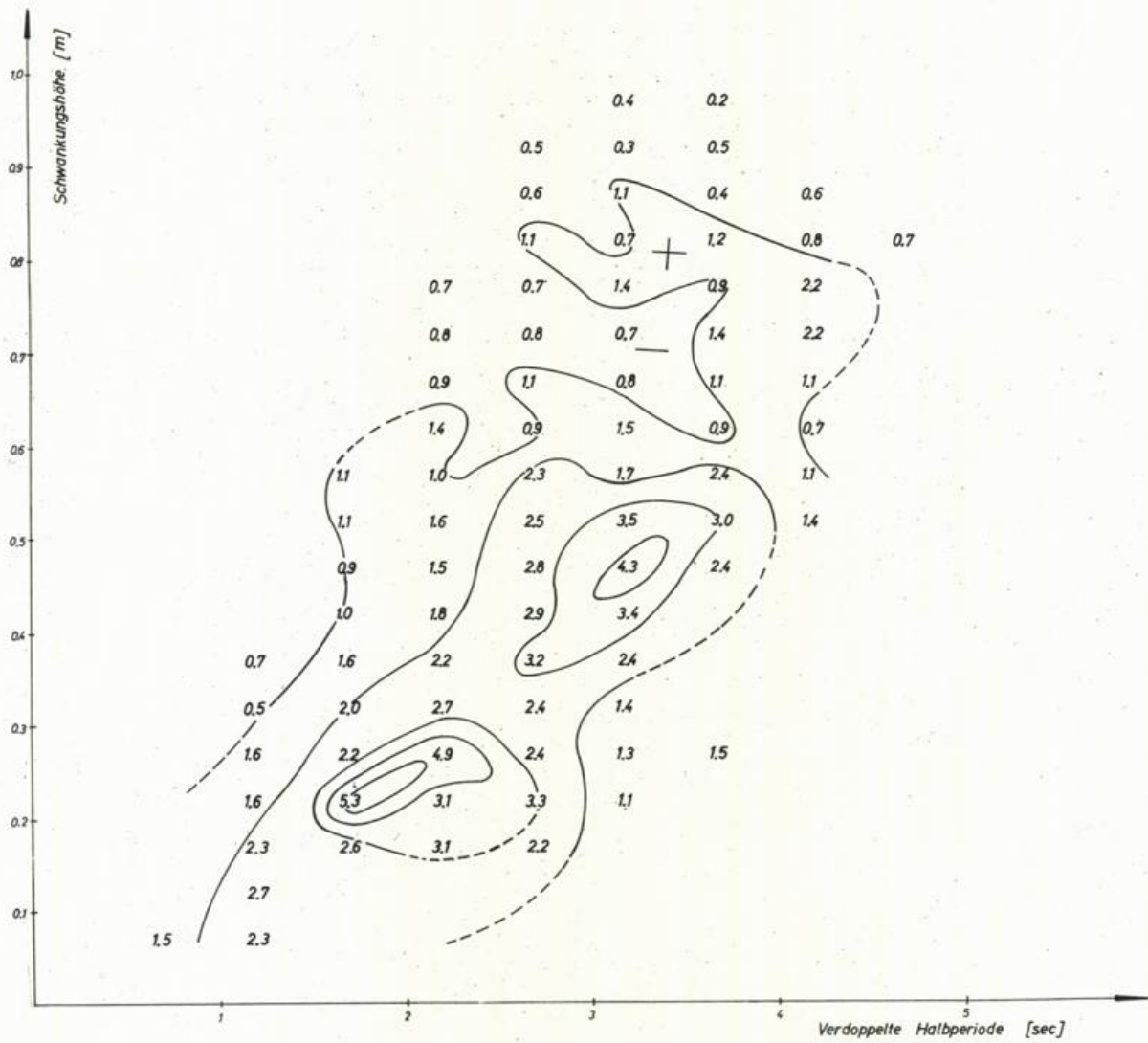


Abb.76 Mellum Plate 14.2.1958, „Empfindlichkeit“ (Eichfaktoren), zweidimensional, Bi gegen L

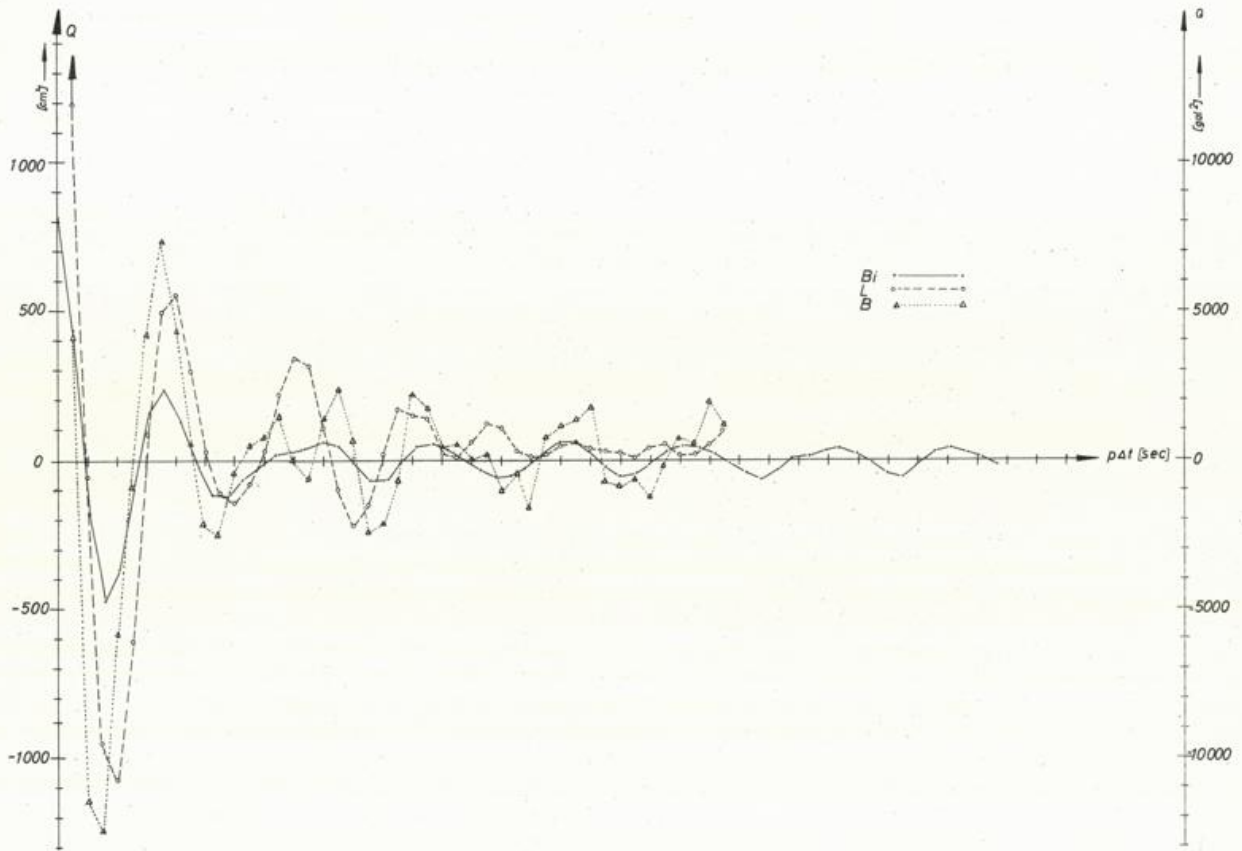


Abb.77 Mellum Plate 14.2.1958, Autokorrelationsfunktionen für Registrierungen L, Bi und B

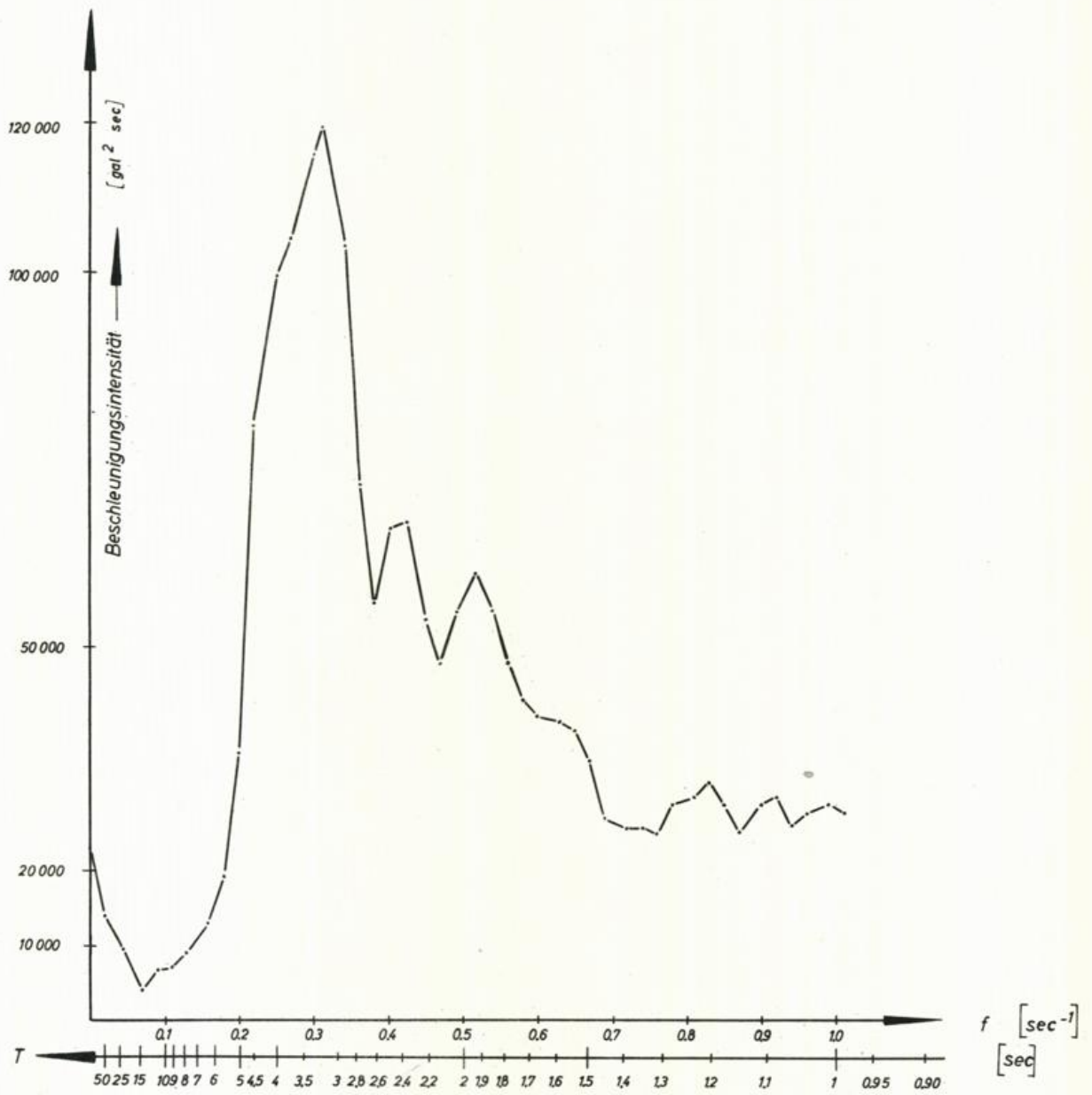


Abb.79 Mellum Plate 14.2.1958, Spektrum der Beschleunigungsintensität

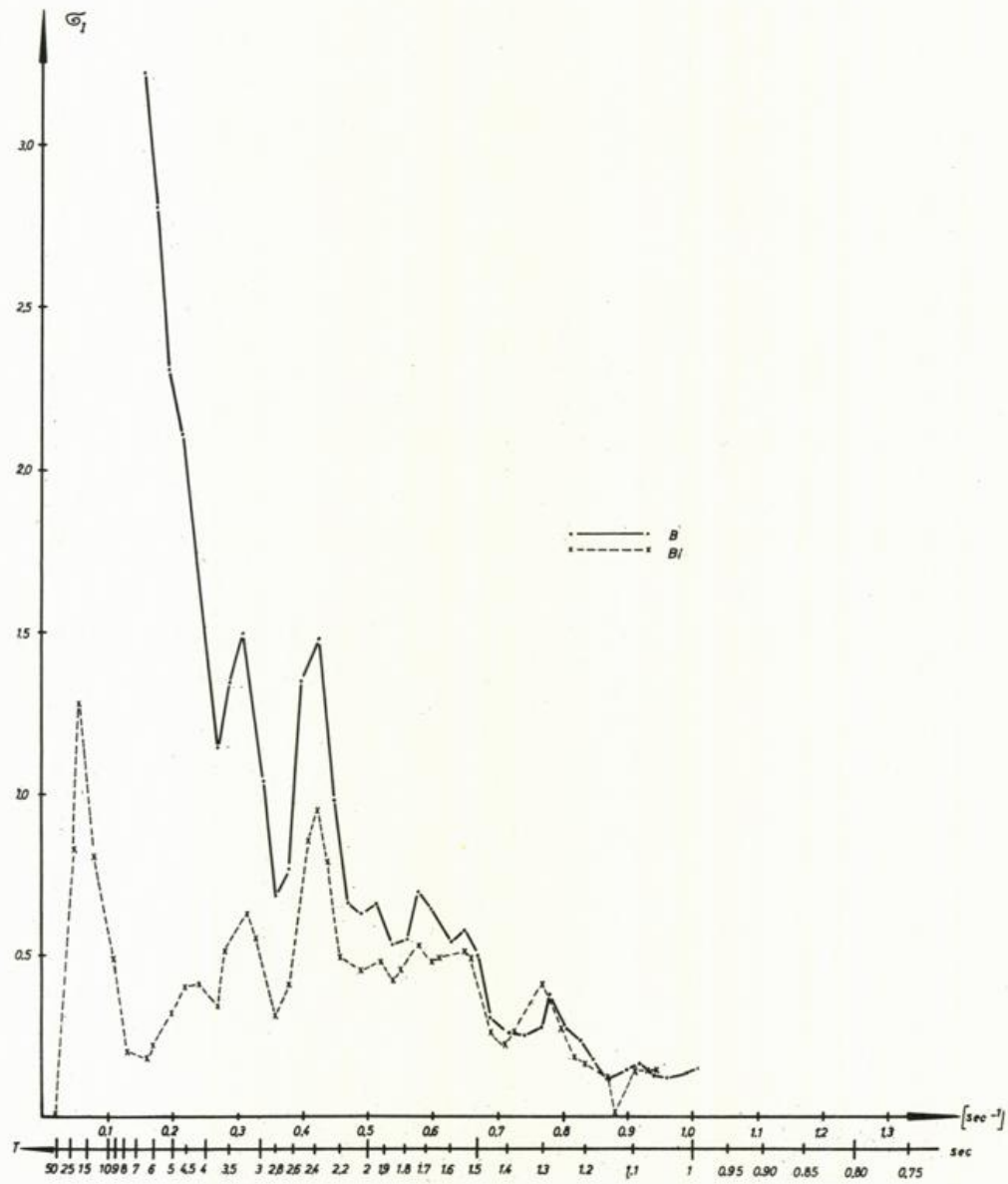


Abb.80 Mellum Plate 14.2.1958; Eichfunktionen, Registrierungen B_i und B gegen L für Intensitäts-Spektren

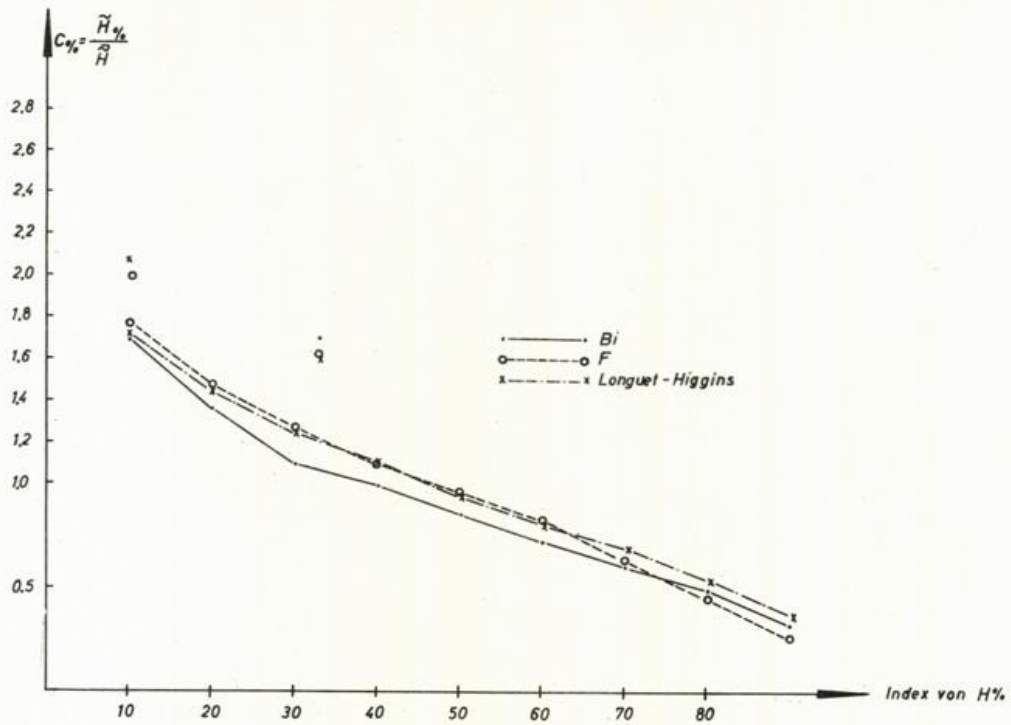


Abb.81 Mellum Plate 17.2.1958, charakteristische Kurven

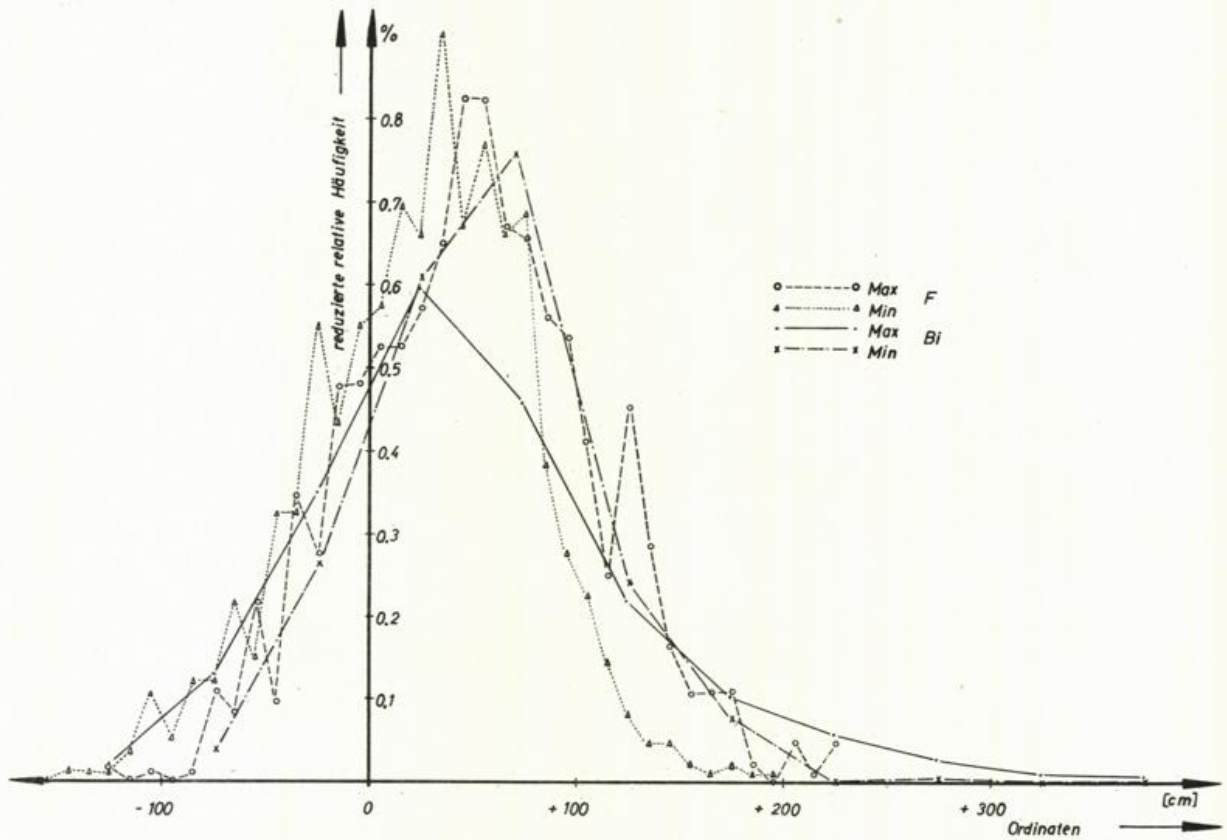


Abb.82 Mellum Plate 17.2.1958, reduzierte relative Häufigkeit der Extremwert-Ordinaten, Registrierungen F und Bi



Abb.83 Mellum Plate 17.2.1958, reduzierte relative Häufigkeit der Schwankungshöhen, zero-crossing-Wellen, Registrierungen F u. Bi

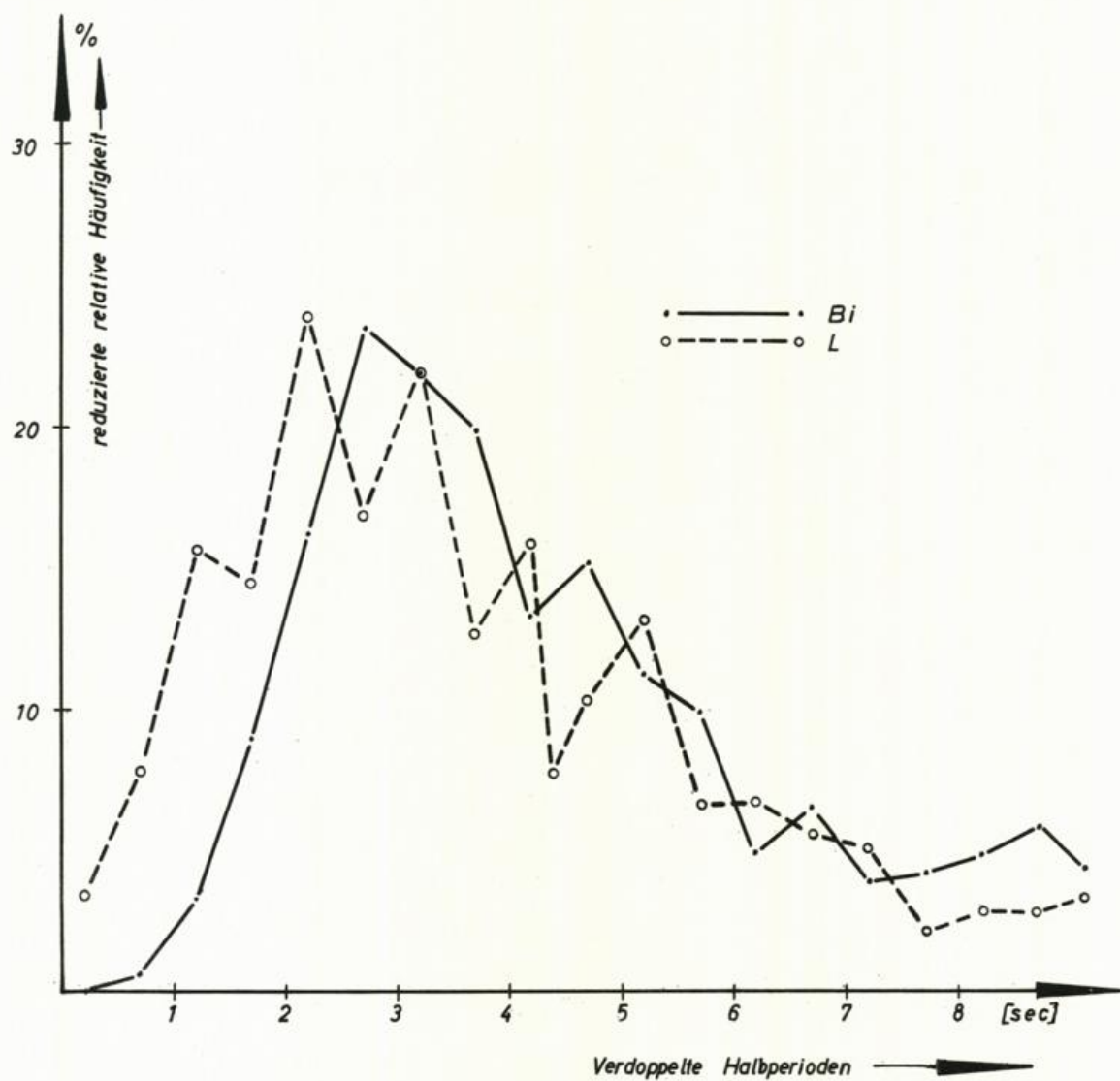


Abb.84 Mellum Plate 17.2.1958, reduzierte relative Häufigkeit der verdoppelten Halbperioden, zero-crossing-Wellen, Registrierungen F und Bi

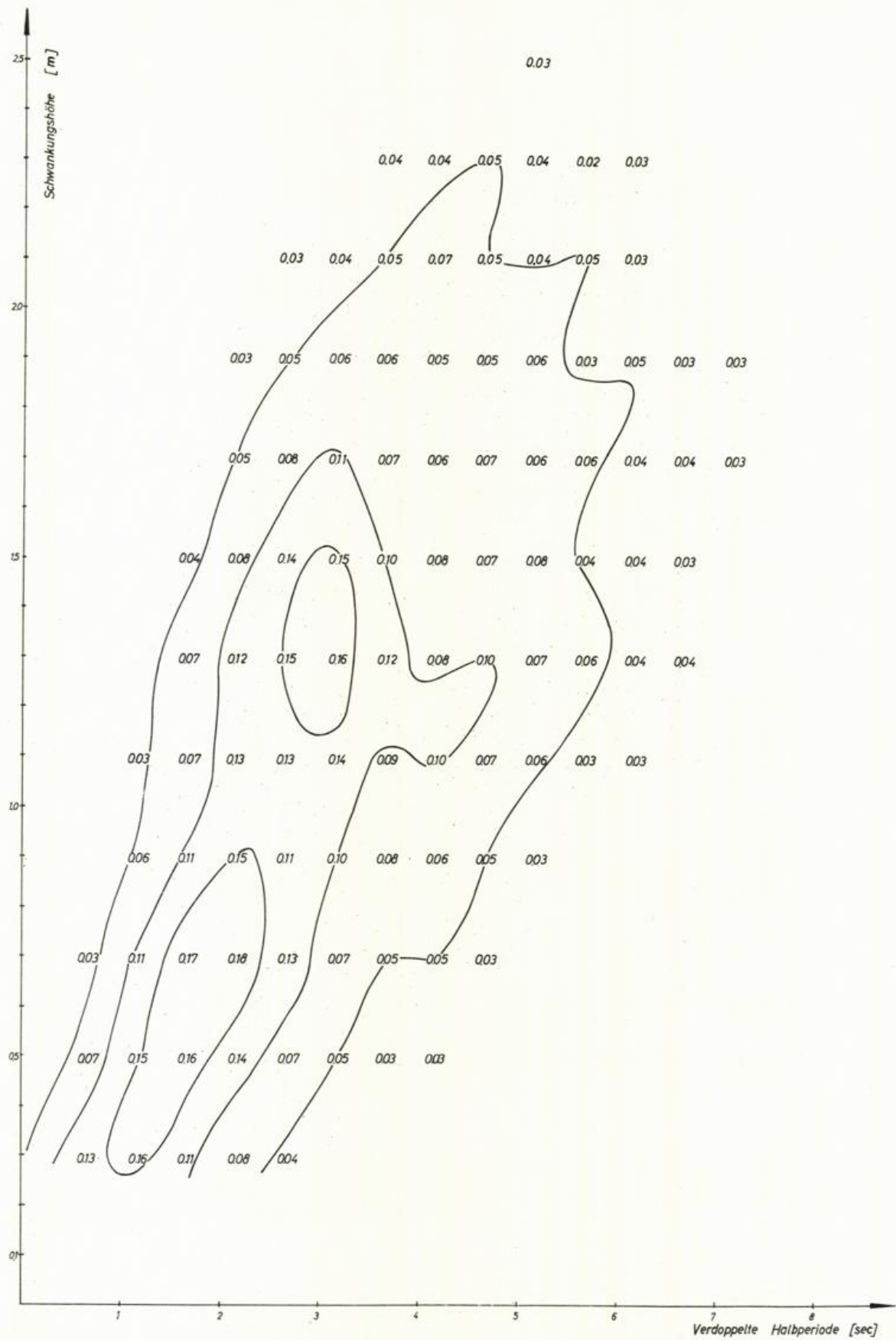


Abb.85 a Mellum Plate 17.2.1958, zweidimensionale Häufigkeitsverteilung, Registrierung F

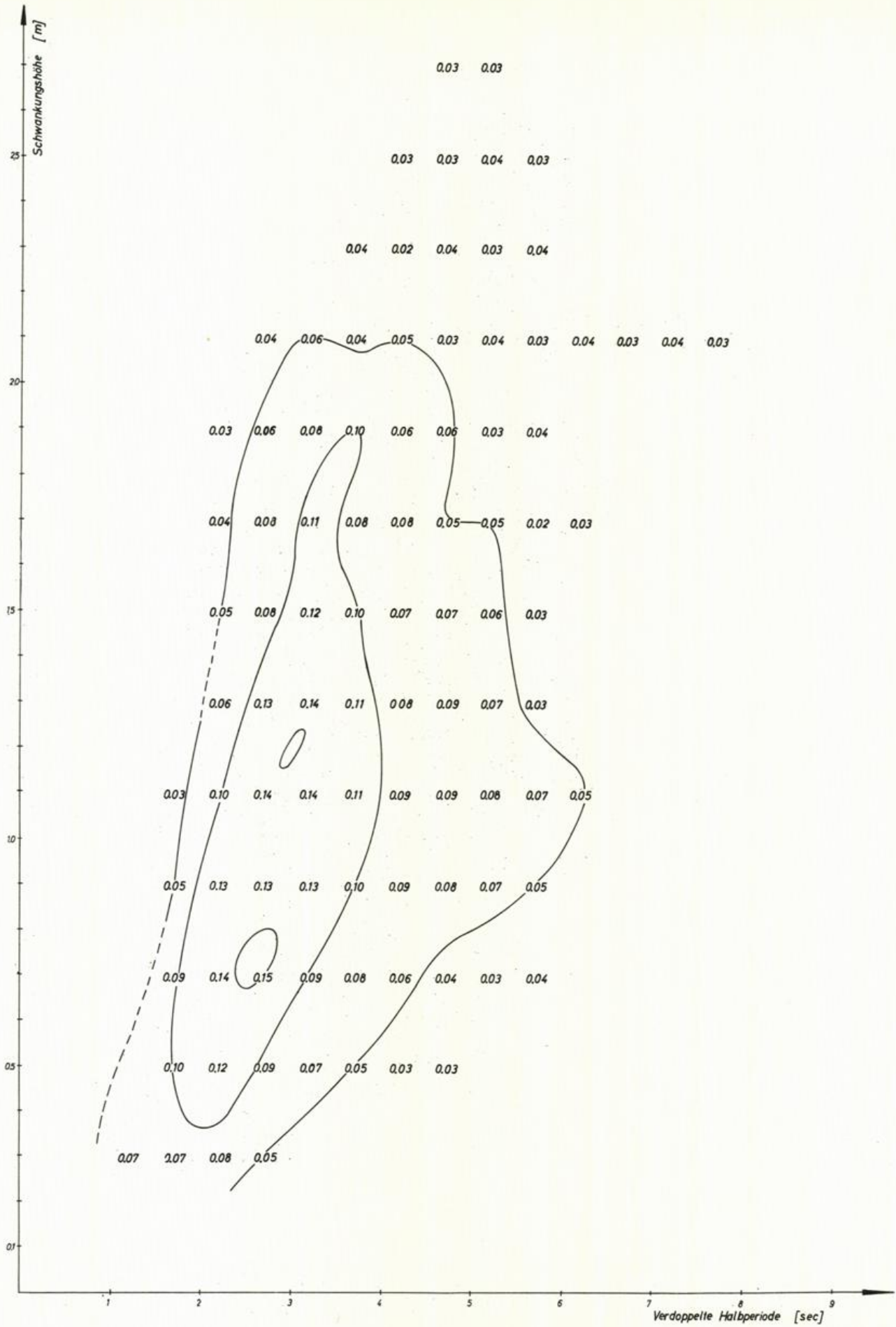


Abb.85 b Mellum Plate 17.2.1958, zweidimensionale Häufigkeitsverteilung, Registrierung Bi

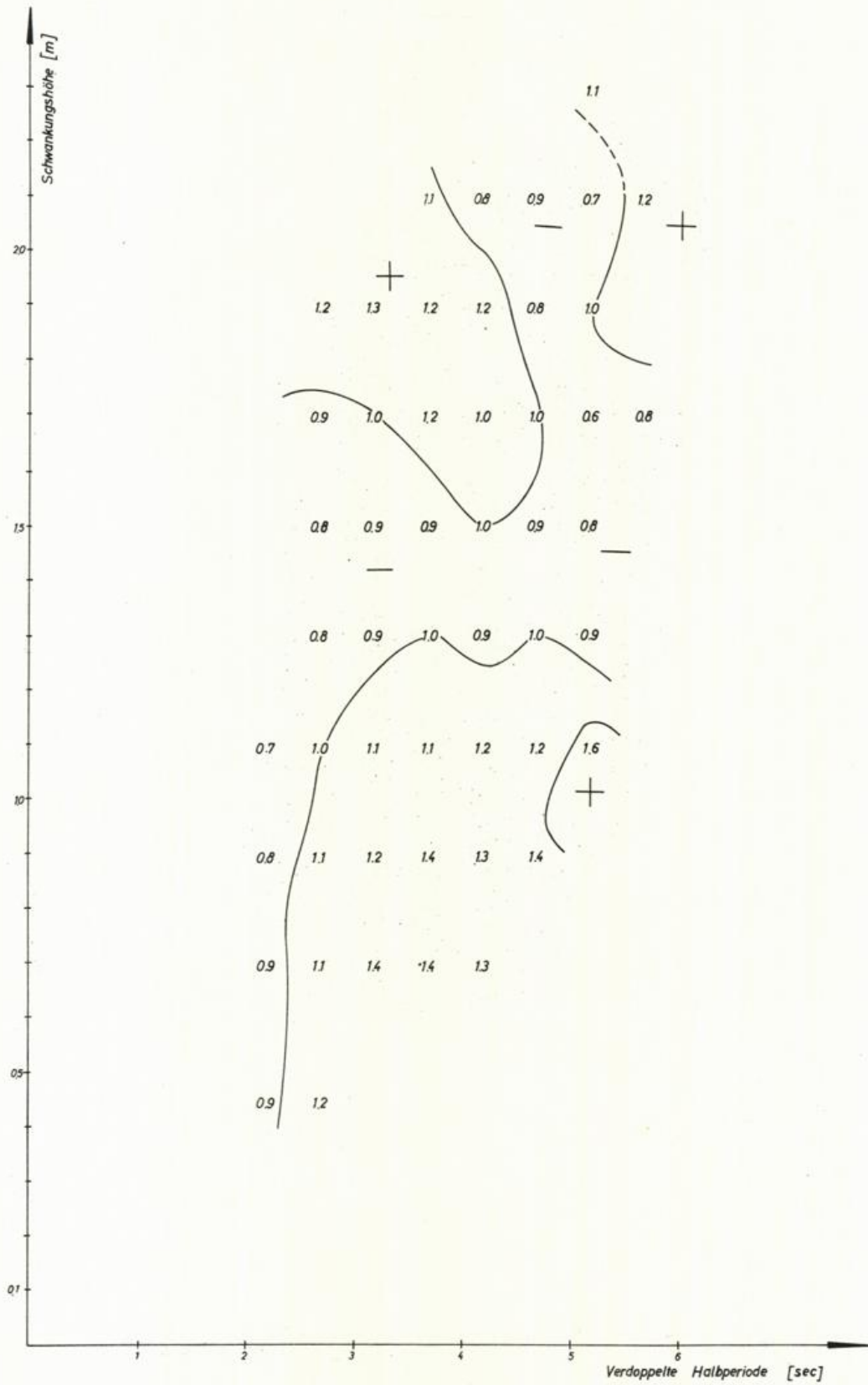


Abb.86 Mellum Plate 17.2.1958, "Empfindlichkeit" (Eichfaktoren),
zweidimensional, B_i gegen F

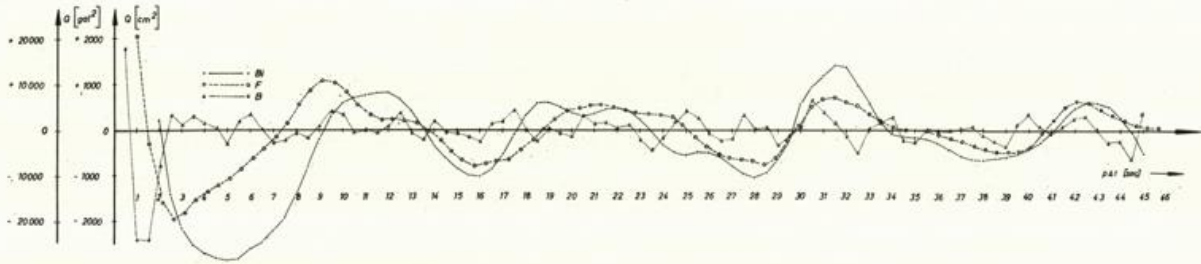


Abb.87 Mellum Plate 17.2.1958, Autokorrelationsfunktionen für Registrierungen F, B₁ und B

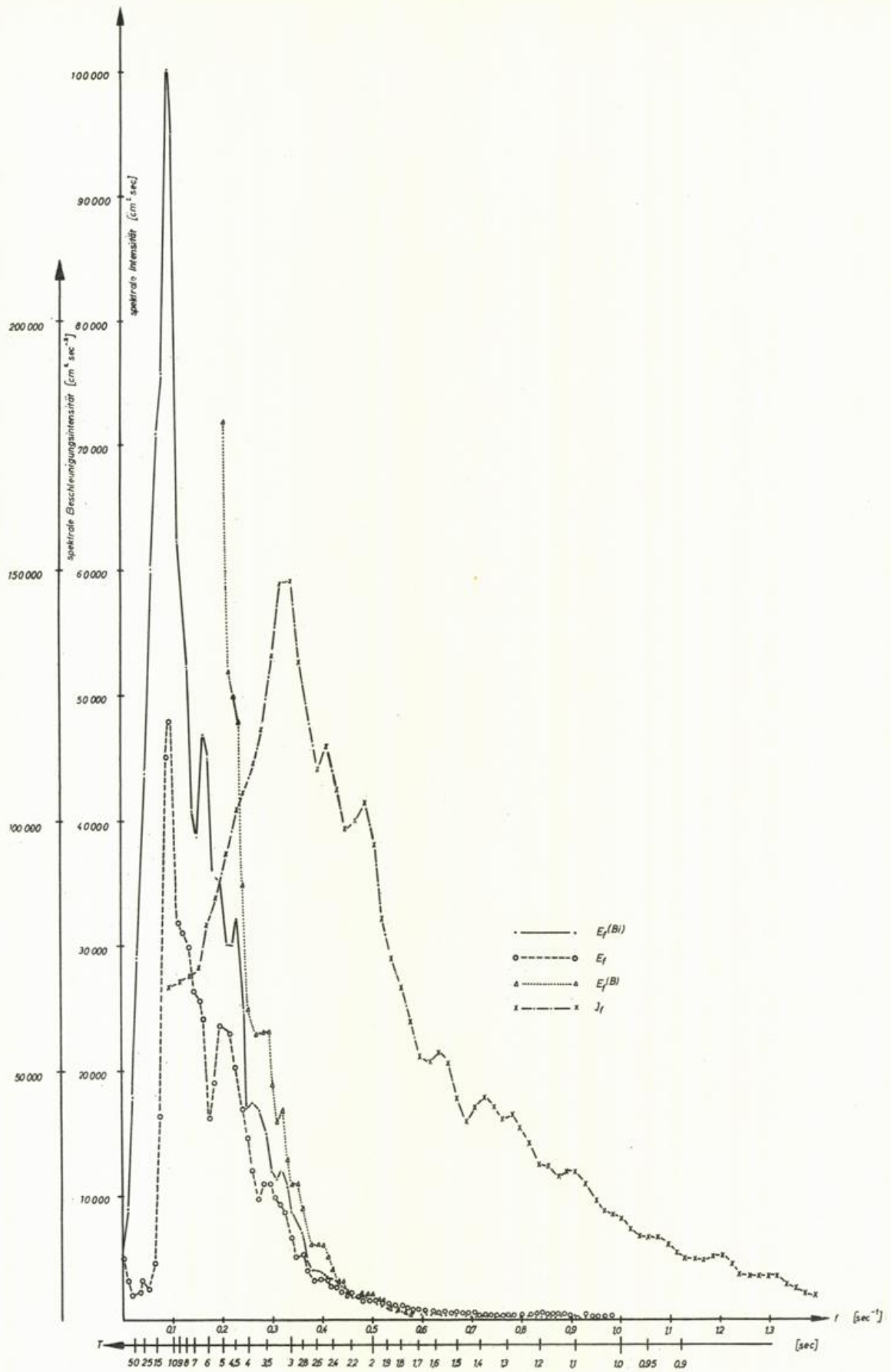


Abb.88 Mellum Plate 17.2.1958, Spektren der „Seegangs-Intensität“ für Registrierungen F, Bi und B (behelfsmäßig integriert), Spektrum der Beschleunigungs-Intensität (Registrierung B, nicht integriert)

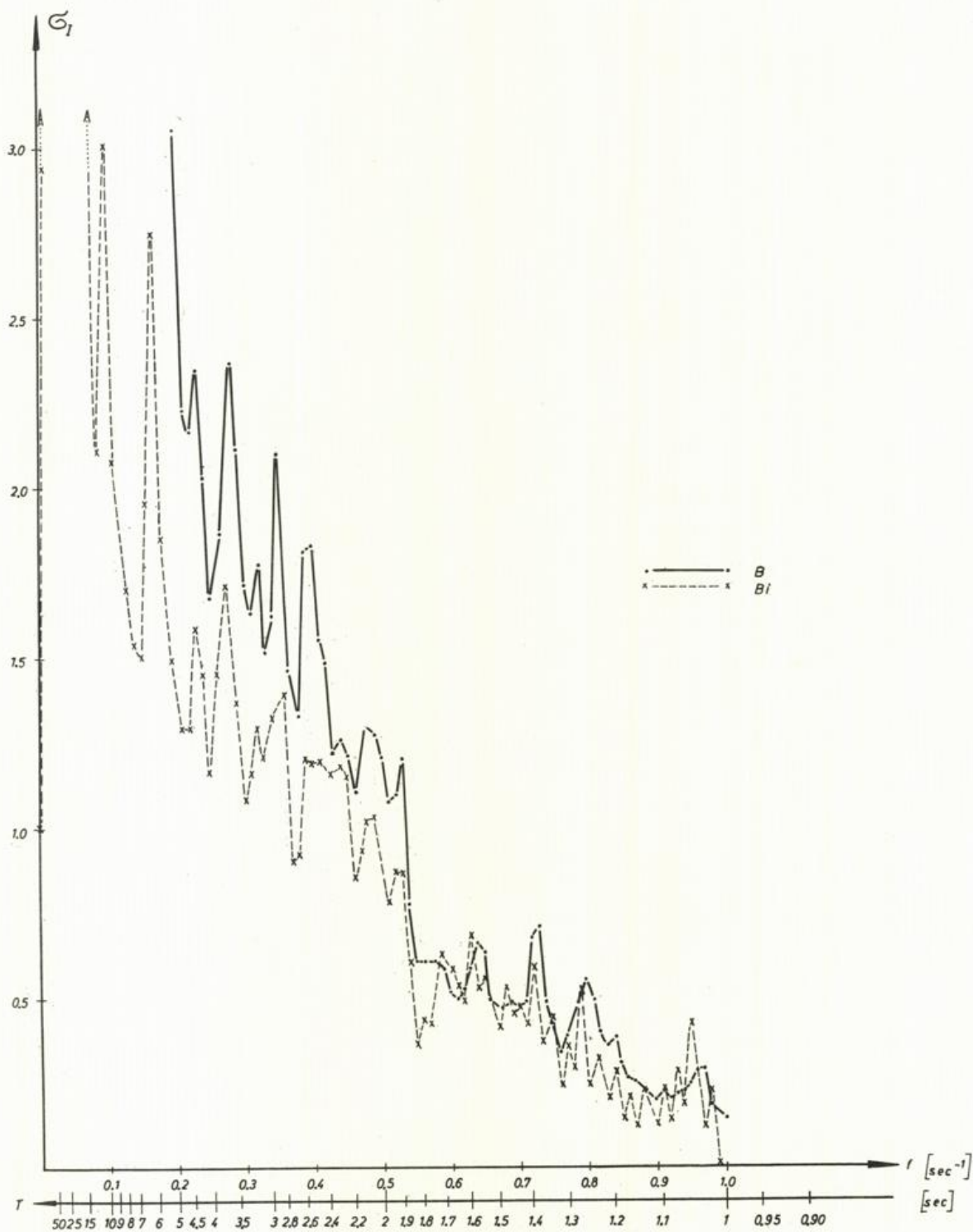


Abb.89 Mellum Plate 17.2.1958, Eichfunktionen für Intensitätsspektren, Registrierungen Bi und B gegen F

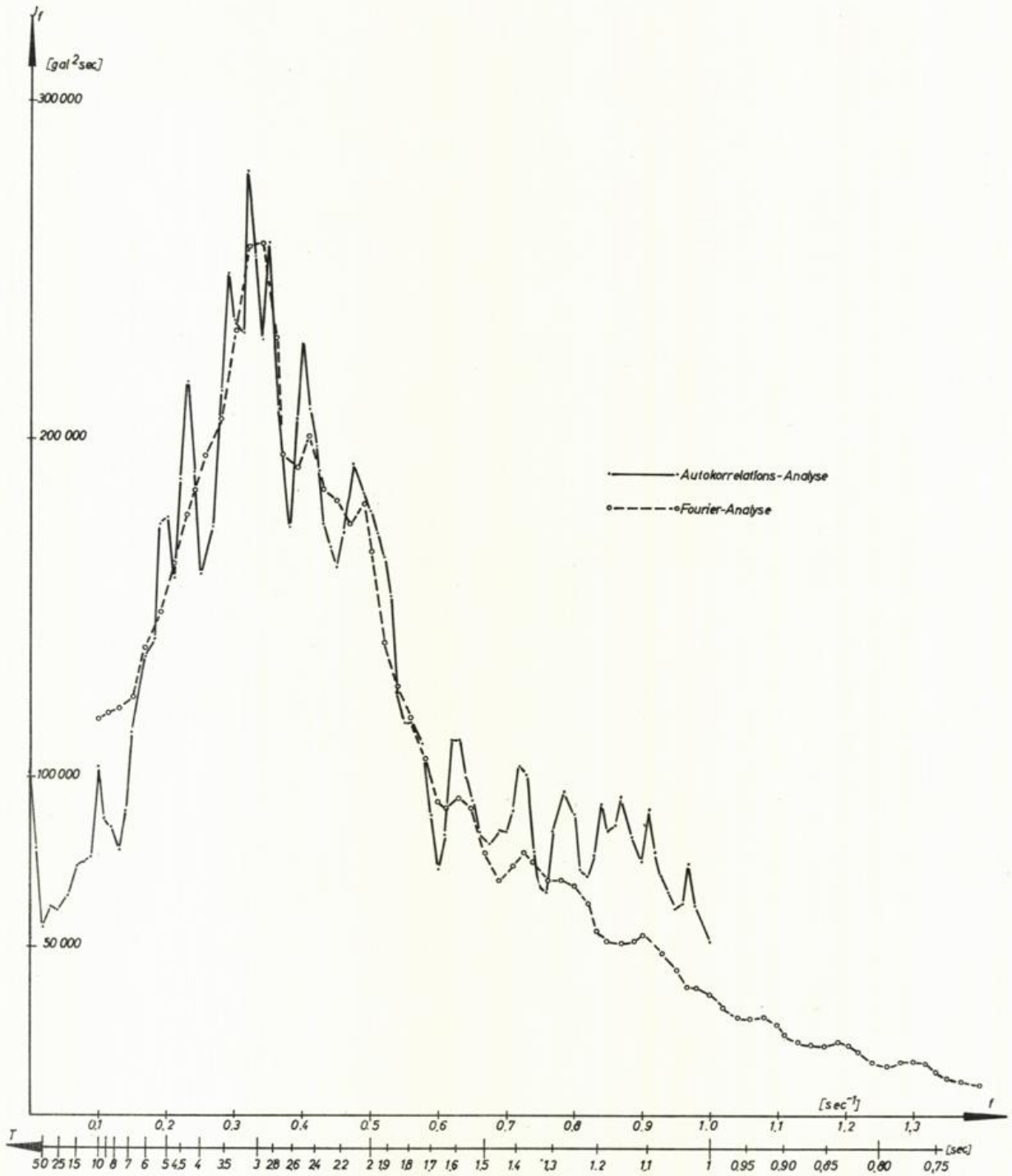


Abb.90 Mellum Plate 17.2.1958, Spektren der Beschleunigungs-Intensität, Gegenüberstellung von Autokorrelations- und Fourier-Analyse

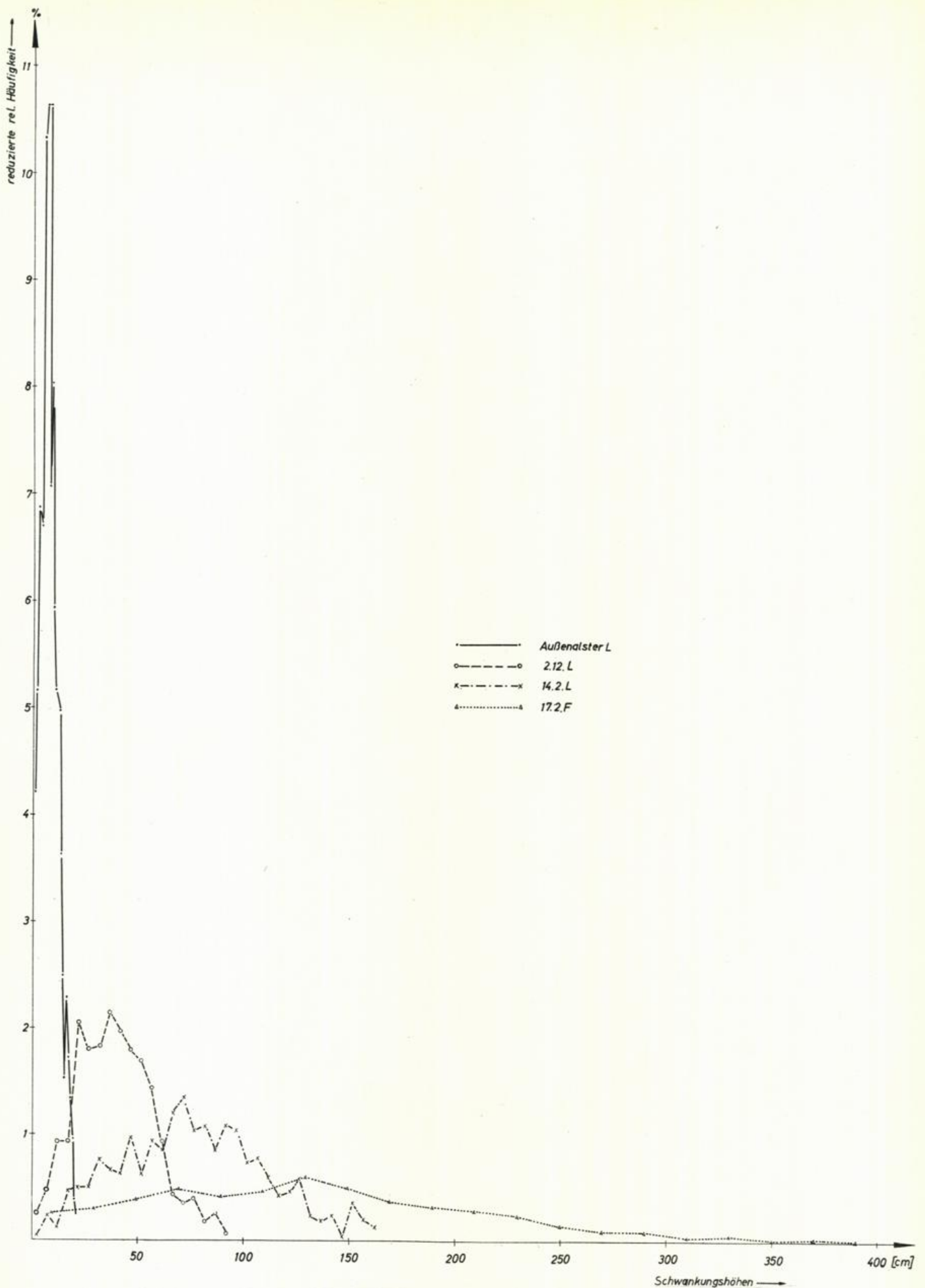


Abb.91 Reduzierte relative Häufigkeit der Schwankungshöhen (zero-crossing-Wellen). Registrierungen L bzw. F: Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

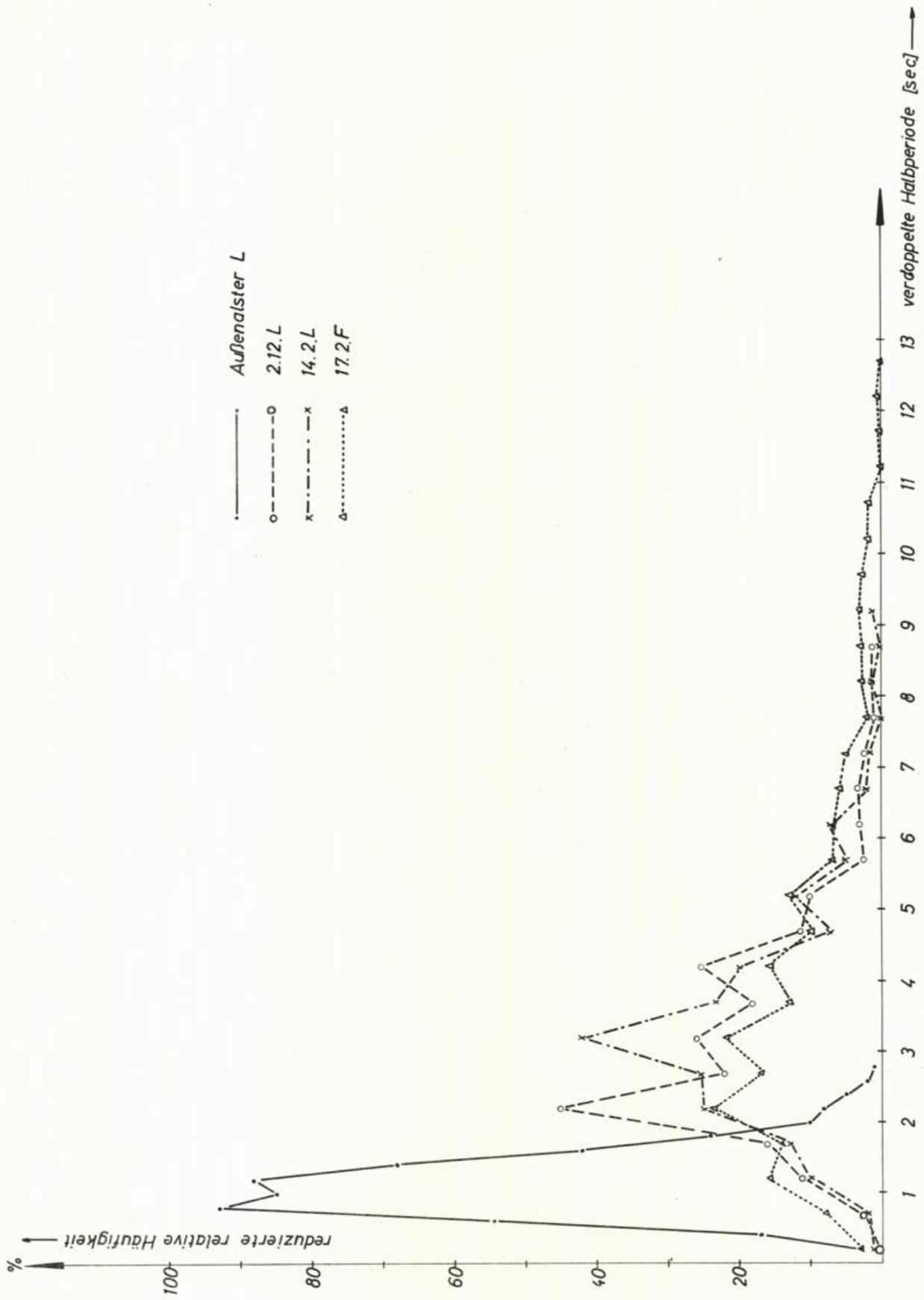


Abb. 92 Reduzierte relative Häufigkeit der verdoppelten Halbperioden (zero-crossing-Wellen). Registrierungen L bzw. F: Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

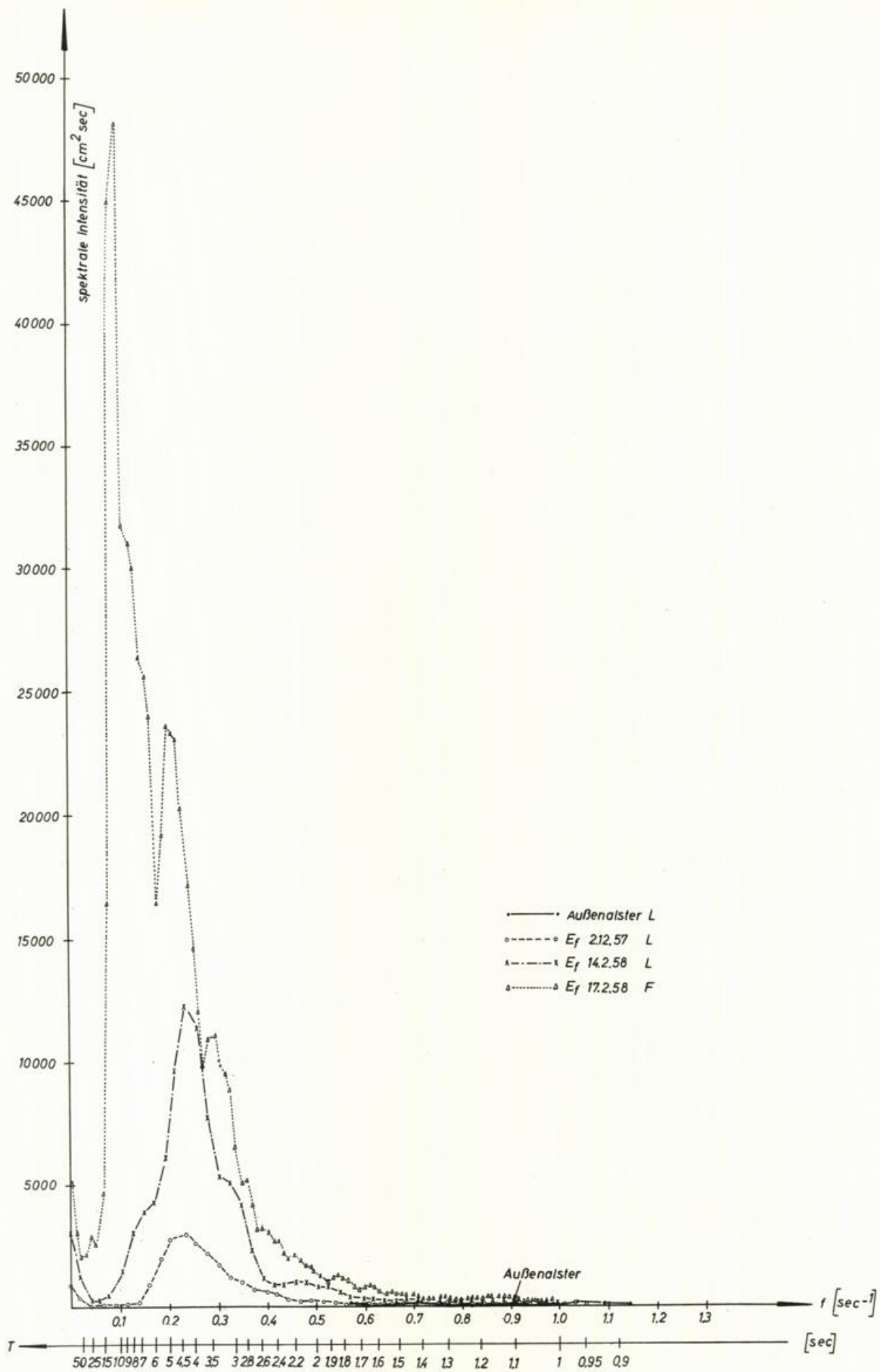


Abb. 93 Spektren der "Seegangs-Intensität" E_f. Registrierungen L bzw. F: Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

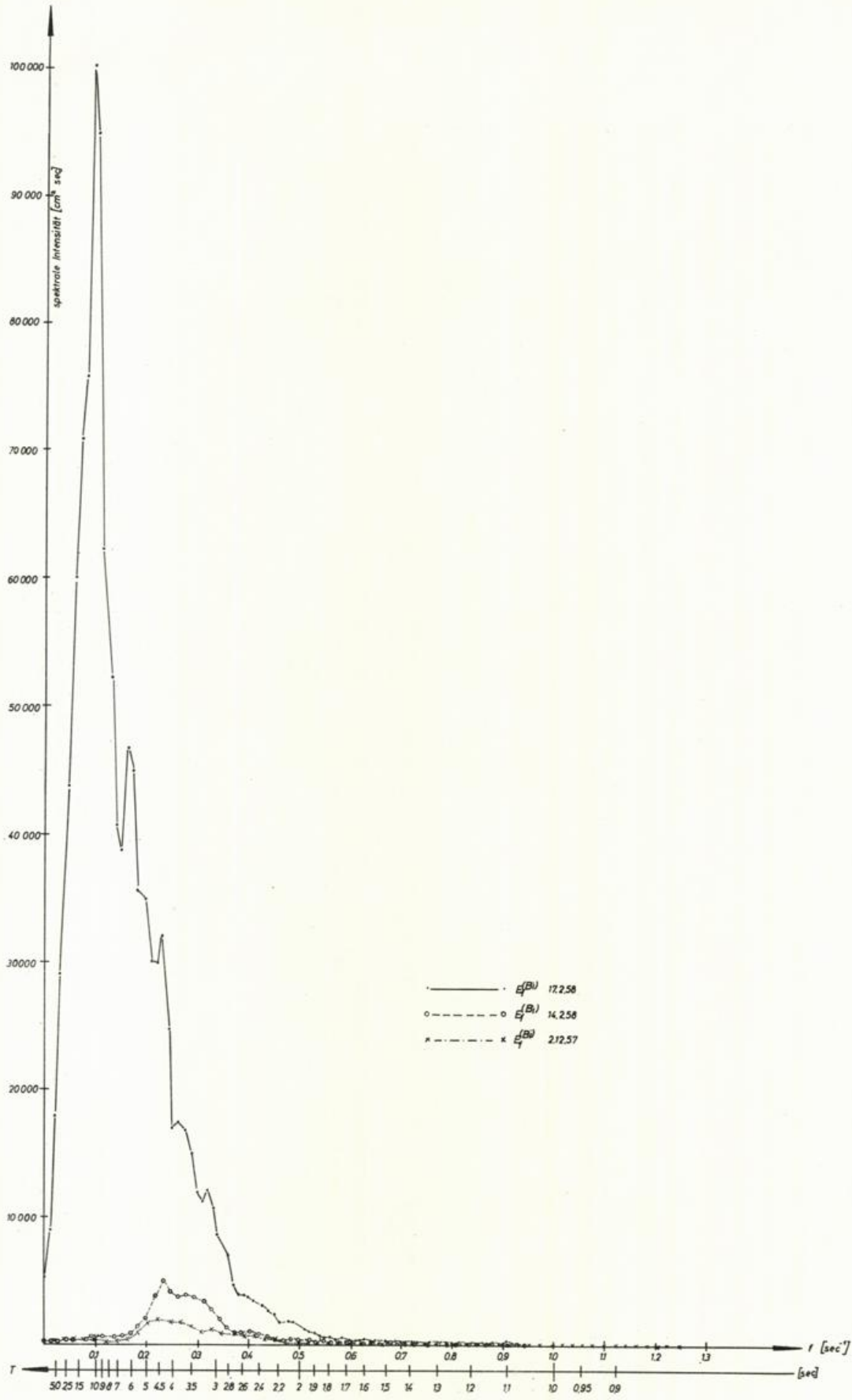


Abb.94 Spektren der „Seegangs-Intensität“ $E_f^{(Bi)}$. Registrierungen Bi: Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

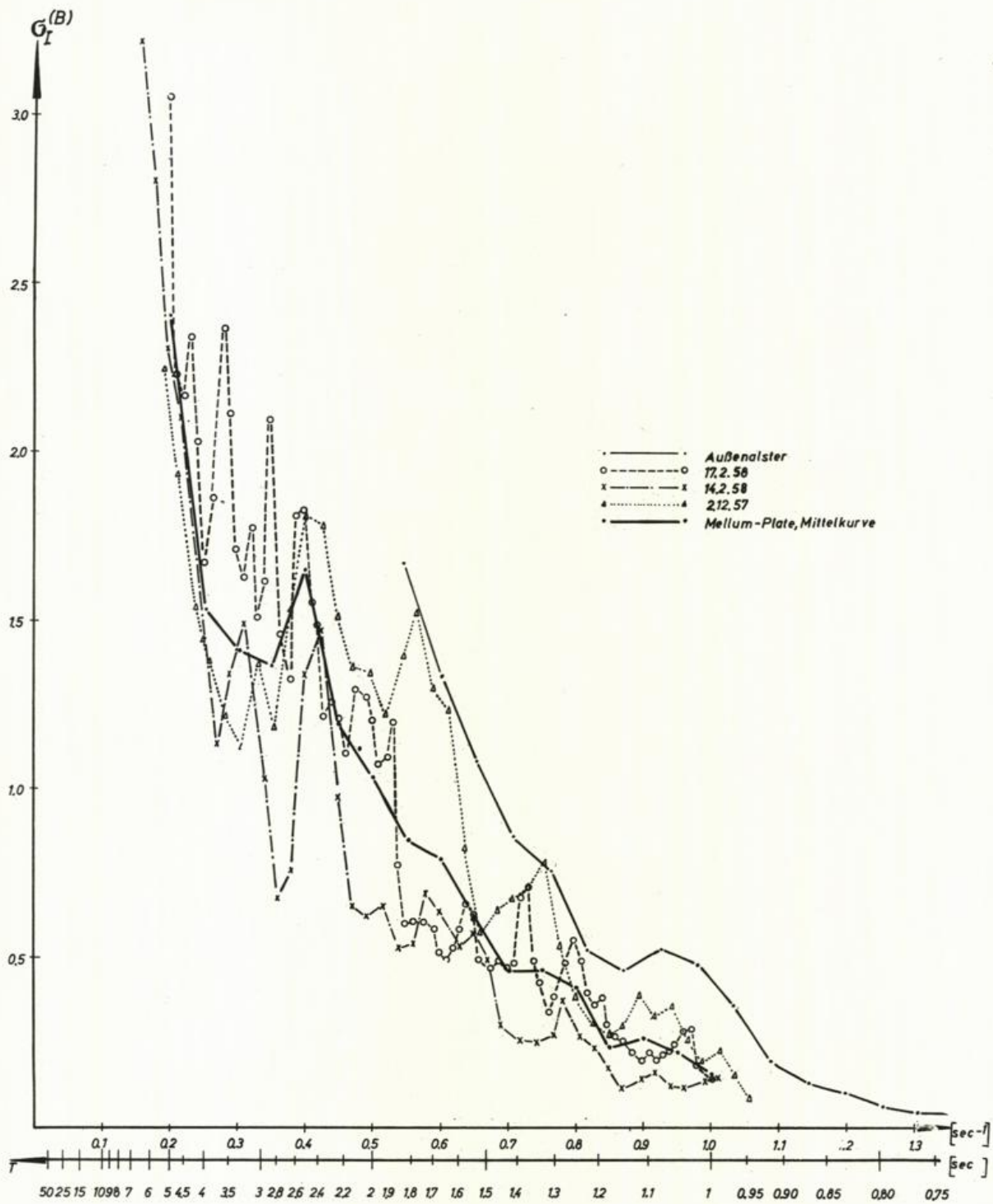


Abb.95 Eichfunktionen $G_I^{(B)}$, Registrierungen Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

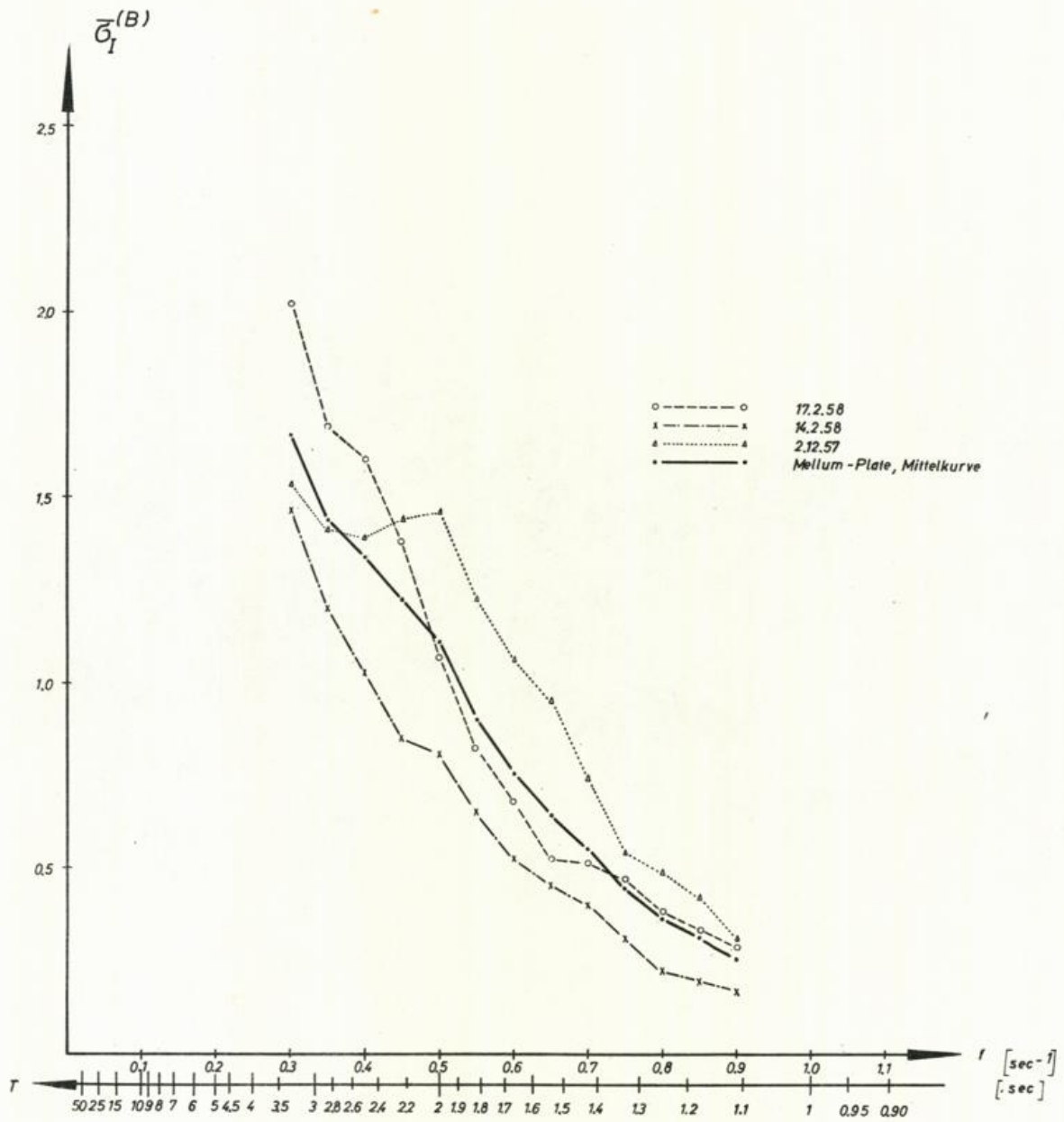


Abb.96 Geglättete Eichfunktionen $\bar{\sigma}_I^{(B)}$, Registrierungen Außenalster, Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 u.17.2.1958

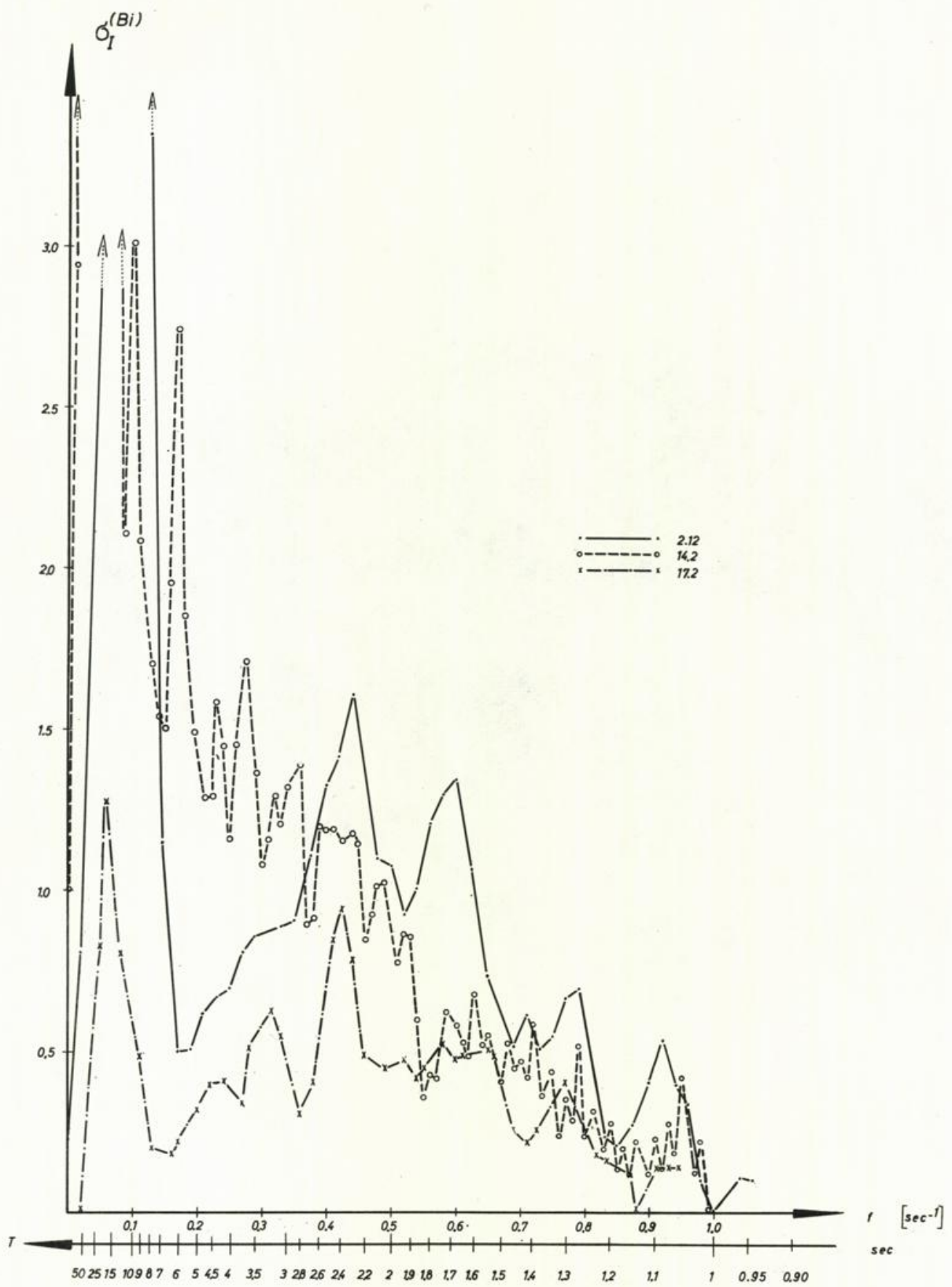


Abb.97 Eichfunktionen $\sigma_I^{(Bi)}$, Registrierungen Mellum
 Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

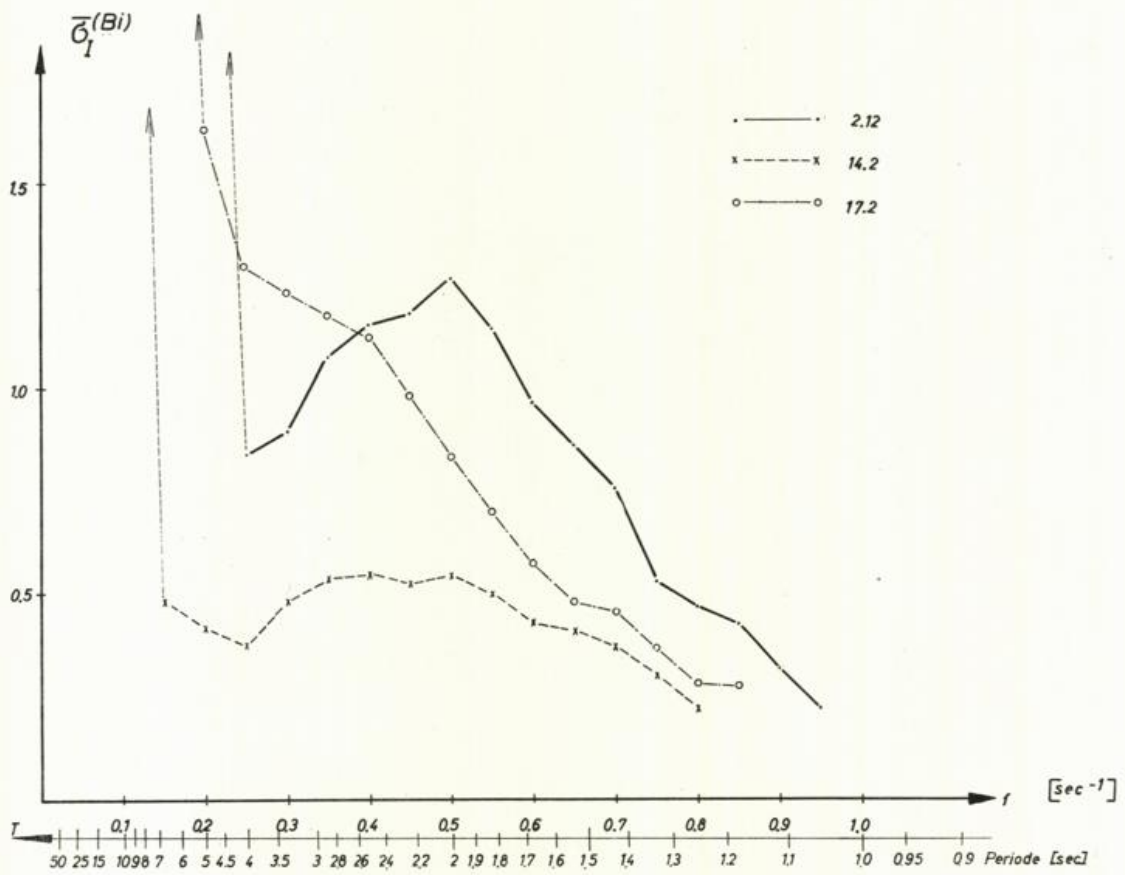


Abb.98 Geglättete Eichfunktionen $\sigma_I(Bi)$, Registrierungen Mellum Plate 2.12.1957, 14.2.1958 und 17.2.1958

