

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

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

German copyright law applies.

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

Über die Verteilung der kinetischen Energie im Bereich der Trägheits- und Seichesfrequenzen der Ostsee im August 1964 (Internationales Ostseeprogramm)

VON JÜRGEN KIELMANN, WOLFGANG KRAUSS UND LORENZ MAGAARD

Zusammenfassung: Mit Hilfe von Strom- und Temperaturmessungen aus dem Internationalen Ostseeprogramm 1964 wird die Energieverteilung im Bereich von Trägheits- und Seichesfrequenzen in der Ostsee untersucht. Im Beobachtungszeitraum konzentriert sich die Energie auf die Trägheitsfrequenz mit leichter Verschiebung des Energiemaximums zu höheren Frequenzen sowie auf eine Seichesperiode von ca. 27 h (1. Eigenschwingung des Systems Westliche Ostsee/Finnischer Meerbusen). Dabei ist der Energieanteil interner Trägheitswellen von gleicher Größenordnung wie derjenige der EKMAN'schen Trägheitsschwingungen (FREDHOLM'sche Lösungen). In den oberen 60% der Wassersäule ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Energie E der Trägheitsschwingung und $\Gamma^{-1/2}$ (Γ Stabilität). Dort scheinen die Trägheitsschwingungen direkt vom Wind erregt zu werden. Dabei sind die Absolutwerte der Energie in den oberen 20% etwa viermal größer als im Bereich von 30% bis 60%. In den unteren 30% erhält man $E \sim \Gamma^{1/2}$ (Relation für interne Wellen). Die Trägheitswellen, die als ausgeprägte Wellengruppen auftreten, zeigen über die großen Distanzen zwischen den einzelnen Meßpositionen keine signifikante Kohärenz, während sich hohe Kohärenzen zwischen den verschiedenen Tiefen an derselben Position ergeben. Die Phase ist nahezu tiefenunabhängig, lediglich an der Temperatursprungschicht tritt ein Phasensprung um etwa π auf. Zwischen Ost- und Nordkomponente der Geschwindigkeit, die etwa gleich große Amplituden haben, besteht eine Phasendifferenz von $3\pi/2$ (rechtsdrehende Strombewegung).

On the energy distribution in the range of the inertial- and seiches-period motions in the Baltic Sea in August 1964 (International Baltic Sea Programme) (Summary): The energy distribution of inertial- and seiches-period motions in the Baltic has been studied by means of current and temperature measurements from the International Baltic Sea Programme 1964. During the observation period the energy is concentrated at the inertial frequency (with a small shift of the energy maximum to higher frequencies) and at a seiches period of about 27 h (1. mode of the seiches system Western Baltic/Gulf of Finland). The amount of energy of internal inertial oscillations is of the same order of magnitude as that of the EKMAN inertial oscillations (FREDHOLM's solutions). In the upper 60% to the water column the energy E of the inertial oscillation is proportional to $\Gamma^{-1/2}$ (Γ static stability). There the inertial oscillations seem to be generated by wind. The absolute values of energy in the upper 20% are about four times larger than those in the range 30%—60%. In the lower 30% one obtains $E \sim \Gamma^{1/2}$ (characteristic for internal waves). The inertial oscillations which occur as marked wave groups, have no significant coherence between different positions being separated by several 100 km but high coherences occur between different depths at the same position. Phase is nearly independent of depth, only at the thermocline there is a phase shift of about π . East and north components of the velocity vector are of approximately equal amplitudes and there is a phase difference of $3\pi/2$ (clockwise rotating circular current).

1. Das Internationale Ostseeprogramm 1964

Entsprechend der Empfehlung 1964—14 der IV. Konferenz der Baltischen Ozeanographen in Warnemünde führten die an die Ostsee grenzenden Länder in der Zeit vom 1.—12. August 1964 gemeinsam Untersuchungen über die Strom- und Schichtungsschwankungen in der Ostsee durch. Ziel dieser Messungen war, zu klären, ob großräumige Zusammenhänge in den Schwankungen vorhanden sind. Die Forschungsschiffe „Professor Krümmel“, „Karl Liebknecht“, „Baltyk“, „Birkut“, „Mazirbe“, „Ozeanograph“, „Thetis“, „Hävringe“, „Svenska Björn“ und „Professor Penck“ ankerten auf den in Abb. 1 angegebenen Positionen; zusätzlich wurden durch „Hermann Wattenberg“ zwei Beobachtungsmaste („Mast I“ und „Mast II“ in Abb. 1) ausgelegt.

Die meteorologischen Verhältnisse und die Wasserstände im Untersuchungsgebiet lassen sich durch die in Abb. 2a—2c angegebenen Werte charakterisieren. Ende Juli herrschten in der westlichen Ostsee starke W- bis NW-Winde (20 kn), die zu Beginn der Ankerstationen auf 25 kn zunahmen und bis zum 6. August aus NW anhielten (Abb. 2a). Der Wind drehte dann auf SE und frischte erneut bis ca. 20 kn auf. Am Abend des 8. August ließ der Wind nach; es folgte ein Zeitraum schwacher Winde aus wechselnden Richtungen.

Der Luftdruck fiel vom 30. Juli bis zum Abend des 1. August um ca. 20 mb, stieg dann erneut rasch an und änderte sich ab 3. August nur langsam (Abb. 2b). Der Wasserstand im Bereich der westlichen Ostsee (Ystad und Kungsholmsfört) stieg während der Winddrehung von W auf NW vom 1.—3. August um ca. 20—30 cm; mit der Winddrehung am 6. August setzten Seichesschwingungen des Systems Westliche Ostsee/Finnischer Meerbusen mit einer Periode von ca. 25—26 Stunden ein (Abb. 2c).

In der mittleren Ostsee (Landsort und Stockholm) sind diese Schwingungen ebenfalls erkennbar, aber schwächer ausgeprägt, wie es der Theorie entspricht (vgl. G. NEUMANN, 1941, sowie W. KRAUSS und L. MAGAARD, 1962).

1.1. Das Datenmaterial

Als Grundlage der vorliegenden Arbeit dienten die von den obengenannten Schiffen und Masten gewonnenen Zeitreihen für die Stromgeschwindigkeit, Stromrichtung und Temperatur. Die Salzgehaltmessungen wurden zur Bestimmung der mittleren Schichtungsverhältnisse verwandt. Die bearbeiteten Daten sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt. Dabei bedeutet H die Wassertiefe der Station, h die Meßtiefe, N die Anzahl der Meßwerte und Δt das Abtastintervall in Stunden.

1.2. Die Originalregistrierungen von Strömung und Temperatur

Einige ausgewählte Beispiele der Strommessungen sind in den Abb. 3 und 4 wiedergegeben (Ostkomponente U und Nordkomponente V der Strömungsgeschwindigkeit in cm/sec als Funktion der Zeit). Die Zahlen hinter U und V bedeuten die Meßtiefen in Metern: U 10 ist z. B. die Ostkomponente in 10 m Tiefe. Beispiele für die Temperaturmessungen findet man in Abb. 5a. Dort sind die Temperaturschwankungen T um den Mittelwert \bar{T} gegen die Zeit aufgetragen.

Aus den abgebildeten Originalregistrierungen kann man entnehmen, daß hauptsächlich in der Zeit vom 1. 8.—4. 8. intensive periodische Schwankungen der Stromgeschwindigkeit und der Temperatur mit Perioden nahe der Trägheitsperiode (13—15 h) auftreten, und zwar besonders prägnant in der westlichen und mittleren Ostsee auf den Positionen „Mast II“, „Baltyk“ und „Birkut“. Auf der westlichsten Position („Professor Krümmel“) treten zumindest in der Originalregistrierung diese Schwankungen im Trägheitsbereich kaum hervor. Diese Station befindet sich auf der Darsser Schwelle mit verhältnismäßig flachem Wasser (17 m), so daß andere durch das Flachwasser und die Bodentopographie bedingte Erscheinungen (z. B. Ein- und Ausstrom) dominieren. Die übersichtlichsten Trägheitsschwingungen treten bei der vom Küsteneinfluß freien Station „Baltyk“ auf.

Die östlichen Positionen („Thetis“ und „Professor Penck“) zeigen in der Originalregistrierung keine deutlichen Trägheitsschwingungen für denselben Zeitraum (bis 4. 8.), so daß die intensive Anregung der Trägheitsschwingungen hauptsächlich lokal im Westen während der Starkwindperiode erfolgt zu sein scheint.

Um das Auftreten der Schwankungen in der Nähe der Trägheitsperiode an allen Positionen und Tiefenniveaus zu untersuchen, ist es notwendig, in den Zeitreihen diese

Tabelle 1
Strommessungen

Schiff/Mast	Position		H [m]	Meßtiefen h [m]	N	Δt [h]
Thetis	$\varphi = 58^{\circ}25'N$	$\lambda = 18^{\circ}07'E$	105	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	116	2.00
Thetis	$\varphi = 58^{\circ}25'N$	$\lambda = 18^{\circ}07'E$	105	80	650	0.33
Hävringe	$\varphi = 58^{\circ}33'N$	$\lambda = 17^{\circ}31'E$	ca. 43	0, 10, 30	140	2.00
Mast I	$\varphi = 55^{\circ}05.4'N$	$\lambda = 14^{\circ}07.4'E$	46	17, 21, 27, 31, 37, 41	102	0.50
Mast II	$\varphi = 55^{\circ}20.2'N$	$\lambda = 14^{\circ}29.0'E$	54	25, 29, 35, 39, 45, 49	825	0.50
Prof. Krümmel . .	$\varphi = 54^{\circ}38'N$	$\lambda = 12^{\circ}31'E$	17	5, 10, 15	274	1.00
Prof. Penck	$\varphi = 59^{\circ}27'N$	$\lambda = 21^{\circ}49'E$	66	5, 15, 25, 35	262	1.00
Baltyk	$\varphi = 55^{\circ}16'N$	$\lambda = 16^{\circ}32'E$	60	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	146	2.00
Birkut	$\varphi = 54^{\circ}50'N$	$\lambda = 19^{\circ}20'E$	108	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	146	2.00
Ozeanograph . . .	$\varphi = 57^{\circ}56'N$	$\lambda = 20^{\circ}00'E$	165	40	877	0.25
				165	226	0.25

247

Tabelle 2
Temperatur- und Salzgehalts-Messungen

Schiff/Mast	Position		H [m]	Meßtiefen h [m]	N	Δt [h]
Thetis	$\varphi = 58^{\circ}25'N$	$\lambda = 18^{\circ}07'E$	105	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 T und S	140	2.00
Hävringe	$\varphi = 58^{\circ}33'N$	$\lambda = 17^{\circ}31'E$	ca. 43	0, 5, 10, 15, 30, 40	142	2.00
Mast I	$\varphi = 55^{\circ}05.4'N$	$\lambda = 14^{\circ}07.4'E$	46	13, 19, 29, 33, 39, 43, 45	102	0.50
Mast II	$\varphi = 55^{\circ}20.2'N$	$\lambda = 14^{\circ}29.0'E$	54	21, 27, 37, 41, 47, 51, 53	825	0.50
Baltyk	$\varphi = 55^{\circ}16'N$	$\lambda = 16^{\circ}32'E$	60	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 T und S	146	2.00
Birkut	$\varphi = 54^{\circ}50'N$	$\lambda = 19^{\circ}20'E$	108	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 T und S	146	2.00
Ozeanograph . . .	$\varphi = 57^{\circ}56'N$	$\lambda = 20^{\circ}00'E$	165	0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150	143	2.00

Schwankungen von den anderen Vorgängen zu trennen (s. unter 3.). Zunächst soll jedoch eine Einsicht in die Energieverteilung im gesamten Periodenbereich von 4—50 h gegeben werden.

2. Die kinetische Energie der Horizontalbewegung im Periodenbereich von 4 bis 50 Stunden

Die kinetische Energie der Horizontalbewegung wurde aus den gefilterten Energiespektren von U und V für den Periodenbereich von 4—50 h entnommen. Das verwandte Filter ist in Abb. 5c angegeben. Es wurden die Meßreihen der Forschungsschiffe „Professor Penck“ und „Thetis“ (östliche Ostsee), „Birkut“, „Baltyk“ sowie „Mast II“ (mittlere Ostsee) und „Professor Krümmel“ (westliche Ostsee) verwendet.

2.1. Die Energieverteilung als Funktion von Frequenz und Tiefe

Die kinetische Energie E der Horizontalbewegung ist für den Periodenbereich von 4—50 h als Funktion der Frequenz ν [h^{-1}] und der Tiefe z in den Abb. 6a—8b dargestellt. Allen Diagrammen — mit Ausnahme von „Mast II“ — ist eine starke Konzentration der Energie im Bereich der Trägheitsfrequenz gemeinsam, wobei häufig eine leichte Verschiebung des Energiemaximums zu höheren Frequenzen auftritt. (Die Trägheitsperiode ist in den Abb. 6a—8b durch [] gekennzeichnet.) Die Energie im Trägheitsbereich ist am größten in Oberflächennähe und erreicht ein Minimum unterhalb der Temperatursprungschicht, die im allgemeinen in einer Tiefe von ca. 20 m liegt. Je nach Wassertiefe findet man ein zweites Maximum der Energie der Trägheitsbewegungen in Tiefen von 40—80 m. Diese Maxima befinden sich im Niveau der Salzgehaltssprungschicht, was in Abschn. 2.2. noch näher erläutert wird.

Wie bereits in den Wasserstandsschwankungen ersichtlich, treten während des Beobachtungszeitraums Seiches des Systems Westliche Ostsee/Finnischer Meerbusen mit Perioden von ca. 25—26 h auf. Die theoretische Grundperiode dieses Systems beträgt 27,4 h. In Abb. 6a—8b sind alle Seichesperioden der Ostsee im angegebenen Frequenzbereich durch Pfeile gekennzeichnet. Bei 27,4 h findet man sowohl im Energiediagramm von „Professor Penck“ als auch von „Thetis“ (östliche Ostsee) Energiemaxima in Oberflächennähe, was auf eine Anregung durch Wind hindeutet. In der mittleren Ostsee („Birkut“, „Baltyk“ und „Mast II“) ist dies nicht der Fall; dort haben die Seiches maximale Energie in mittleren Tiefen. Diese Verteilungen deuten darauf hin, daß die Seiches in diesem Meeresgebiet aus Oberflächen- und internen Seiches ungefähr gleicher Energie zusammengesetzt sind. Die Messungen des Forschungsschiffes „Professor Krümmel“ zeigen etwas abweichende Verteilungen. Hierfür ist sicherlich die Lage

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 1)

Abb. 1: Geographische Lage der Ankerstationen sowie der Beobachtungsmaste.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2)

Abb. 2a: Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet.

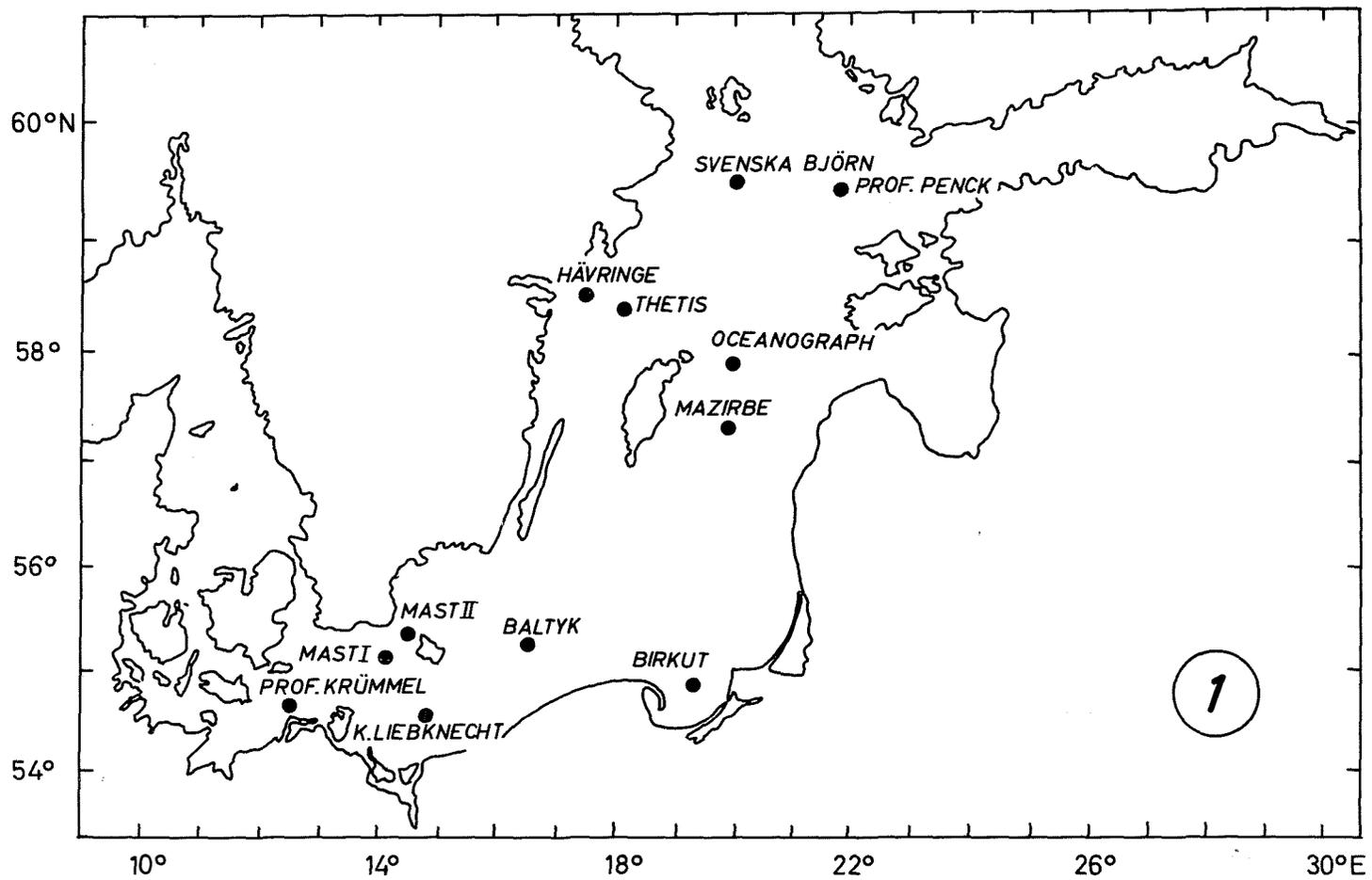
Abb. 2b: Luftdruck im Untersuchungsgebiet.

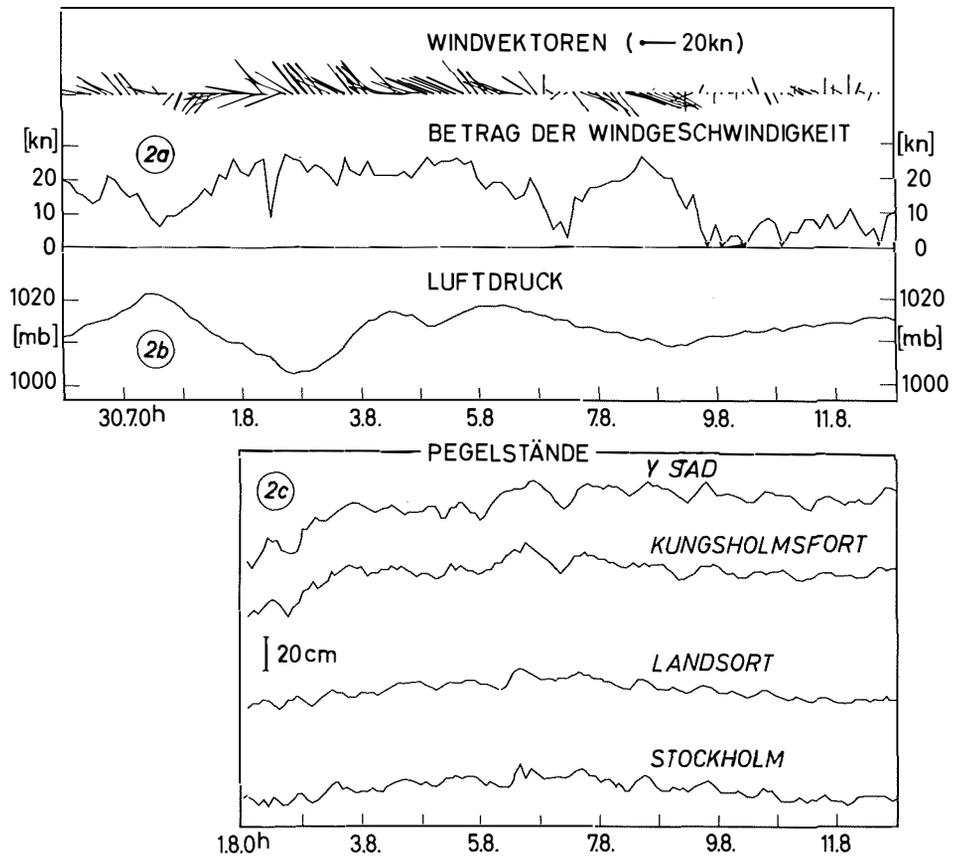
Abb. 2c: Wasserstände an den Küsten des Untersuchungsgebietes.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

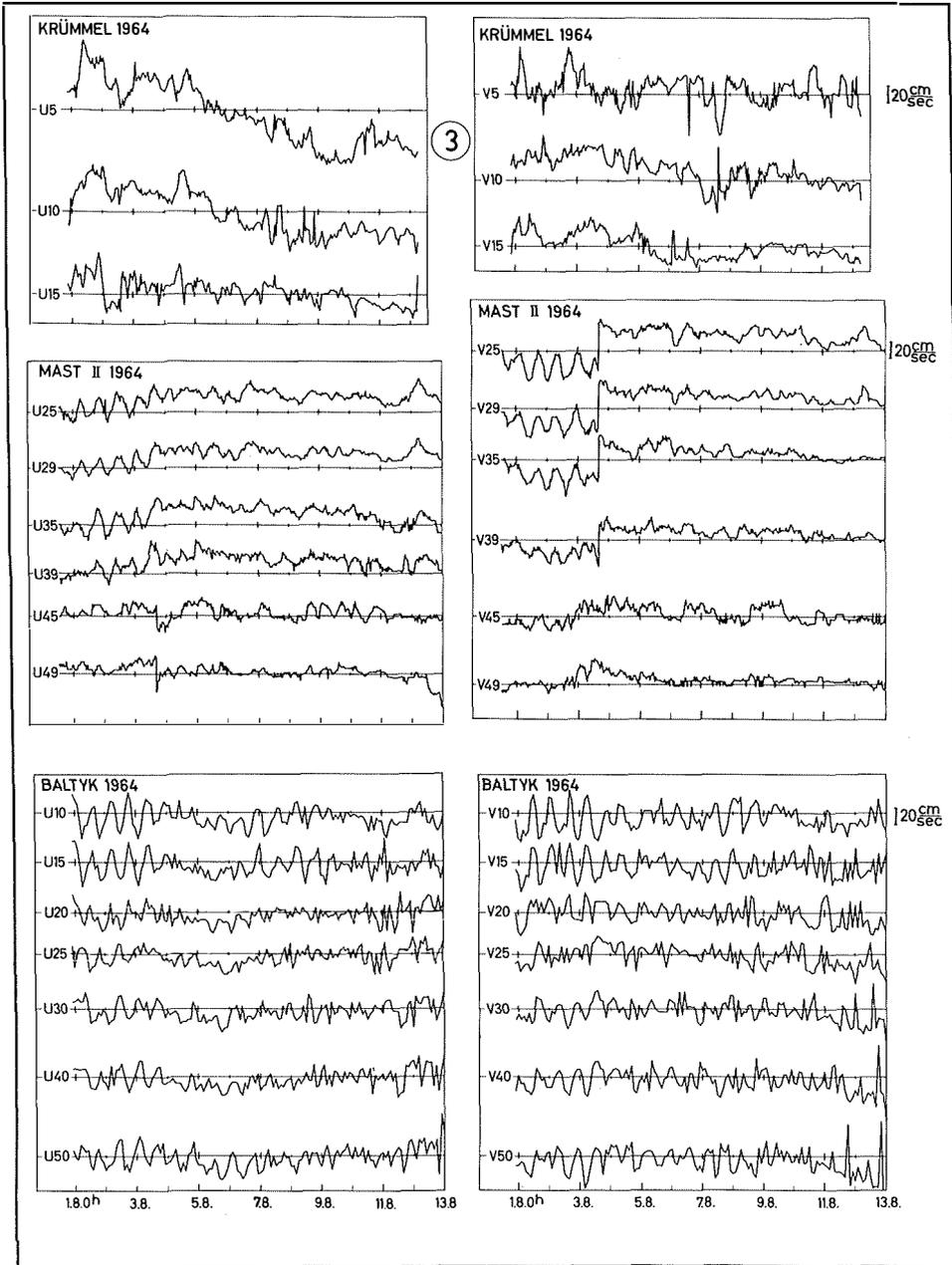
Abb. 3: Strömungsgeschwindigkeit an ausgewählten Positionen in verschiedenen Tiefen (U Ostkomponente, V Nordkomponente, Tiefenangabe in Metern als Index bei U und V).

Tafel 1 (zu J. Kiehmann, W. Krauß u. L. Magaard)

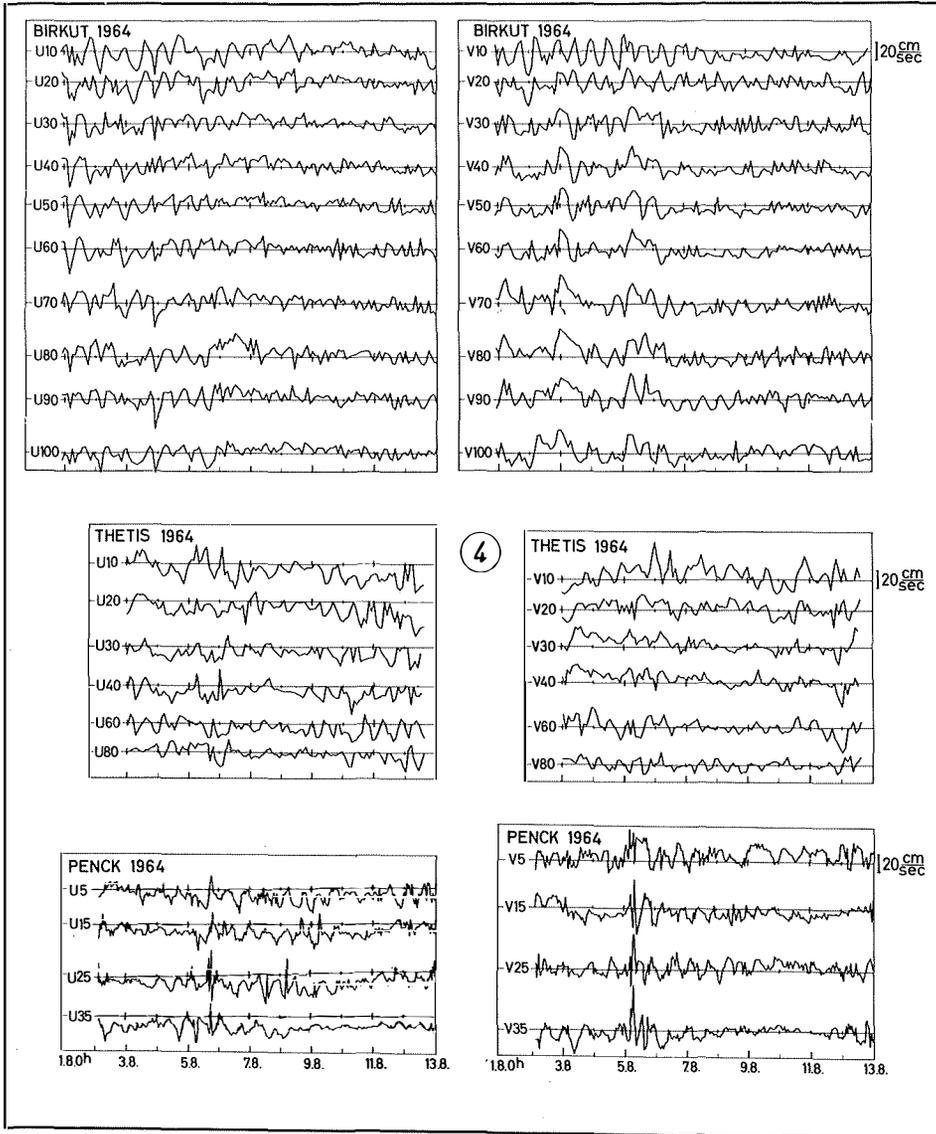




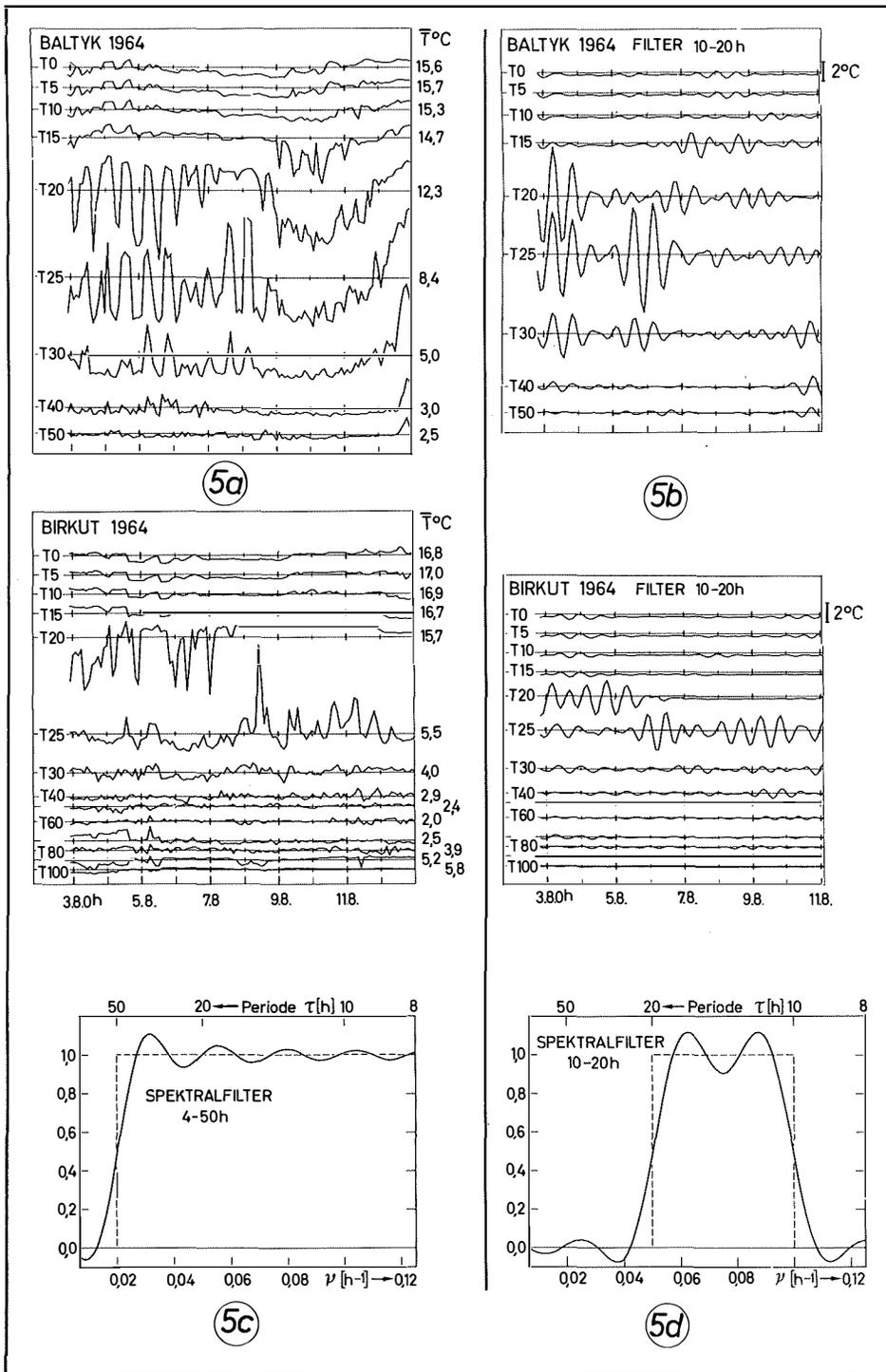
Tafel 2 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Magaard)



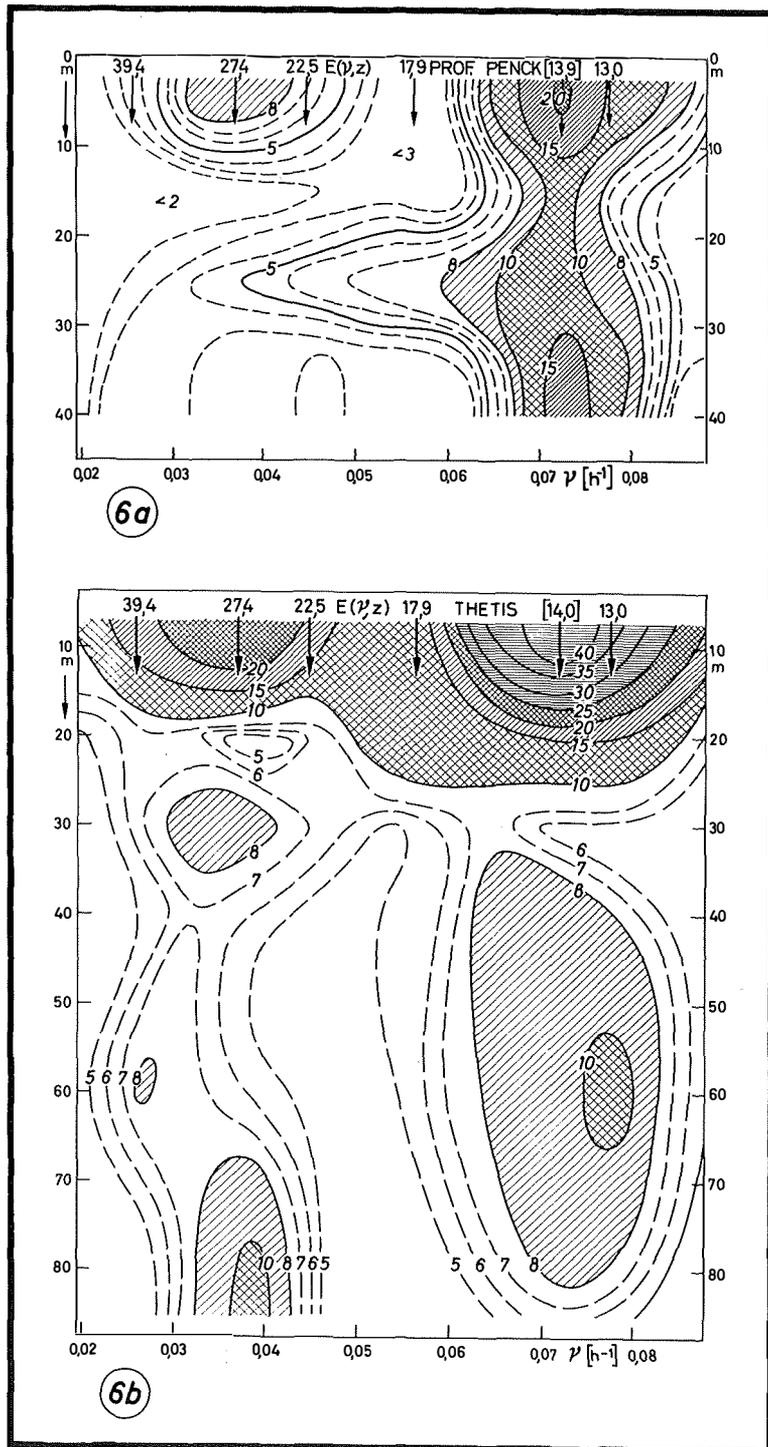
Tafel 3 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Magaard)



Tafel 4 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Magaard)



Tafel 5 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Maggaard)



Tafel 6 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Magaard)

der Ankerstation auf der Darsser Schwelle verantwortlich. Generell kann man sagen, daß sich die kinetische Energie im Beobachtungszeitraum auf die Trägheits- und die Seichesperiode von ca. 27 h konzentriert und daß bei beiden Perioden der Anteil interner Wellen von gleicher Größenordnung ist wie der barotrope Teil.

2.2. Die kinetische Energie im Bereich der Trägheitsfrequenz als Funktion der Stabilität

Die Meßreihen der Forschungsschiffe „Baltyk“, „Birkut“ und „Thetis“ sind hinreichend lang und umfassen zahlreiche Meßtiefen, so daß man die kinetische Energie als Funktion der Stabilität darstellen kann. Für die Trägheitsperiode (Frequenz ν_*) wurde $E(\nu_*, z)$ den $E(\nu, z)$ -Diagrammen entnommen und getrennt für die Tiefenbereiche 0—0,2 H, 0,3 H—0,6 H, 0,7 H—1,0 H (H = Wassertiefe) als Funktion der Stabilität $\Gamma(z)$ dargestellt (Abb. 9a—9c). Die Werte in den beiden oberen Tiefenbereichen lassen sich in hinreichend guter Näherung durch $E \sim \Gamma^{-1/3}$ darstellen, wobei die Energie in der Deckschicht (0—0,2 H) ca. viermal größer ist als unterhalb der Temperatursprungschicht. Dies ist auch den $E(\nu, z)$ -Diagrammen direkt zu entnehmen.

Aus der Abhängigkeit gemäß $\Gamma^{-1/3}$ in den vom Wind beeinflussten oberen 0,6 H der Wassersäule kann man evtl. schließen, daß sich die kinetische Energie entsprechend den aus der statistischen Theorie der Turbulenz bekannten Drittel-Potenz-Gesetzen über zahlreiche Wellenzahlen verteilt. Hierzu sind jedoch weitere Messungen notwendig.

Im Tiefenbereich 0,6 H—1,0 H folgt die Energieverteilung dem aus der Theorie der internen Wellen bekannten Zusammenhang $E \sim \Gamma^{1/2}$, den auch F. WEBSTER (1968) bei Messungen im Atlantik fand. In diesen Tiefen scheinen somit interne Wellen das Strömungsfeld zu beherrschen. $\Gamma(z)$ und $\bar{\sigma}_t(z)$ sind in Abb. 9d—9e für die drei Ankerstationen dargestellt.

3. Schwingungen im Trägheitsbereich und ihr räumlicher Zusammenhang

Wie aus den Originalregistrierungen und den $E(\nu, z)$ -Diagrammen hervorgeht, spielen die Schwankungen von Strömung und Temperatur im Bereich der Trägheitsperiode eine dominierende Rolle. Es sind daher aus der originalen Zeitreihe alle Erscheinungen außerhalb des Periodenbereichs von 10—20 h durch Filterung (übergreifend gewichtete Mittelung, siehe W. KRAUSS, 1966) eliminiert worden. Das verwandte Filter ersieht man aus Abb. 5d.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 4)

Abb. 4: Strömungsgeschwindigkeit an ausgewählten Positionen in verschiedenen Tiefen.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 5)

Abb. 5a: Temperaturen an ausgewählten Positionen und in verschiedenen Tiefen. \bar{T} ist der zeitliche Mittelwert. Der Index bei T gibt die Tiefe in m an.

Abb. 5b: Gefilterte Werte der in Abb. 5a dargestellten Temperaturen.

Abb. 5c: Spektralfilter (4—50 h).

Abb. 5d: Spektralfilter (10—20 h).

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 6)

Abb. 6a: Energieverteilung $E(\nu, z)$ auf der Position „Professor Penck“ (ν Frequenz, z Wassertiefe). Die Abbildung zeigt Linien gleicher Energie (Zahlenangaben in $\text{cm}^2 \text{sec}^{-2}$).

Abb. 6b: $E(\nu, z)$ auf der Position „Thetis“.

3.1. Die gefilterten Strom- und Temperaturschwankungen

Die gefilterten Strommessungen sind in Abb. 10 und Abb. 11 aufgetragen. Durch den Filterprozeß sind die Meßreihen am Beginn und Ende um jeweils 40 Stunden verkürzt worden. Man sieht aus den gefilterten Zeitreihen sehr gut, daß Trägheitsschwankungen mehr oder weniger intensiv im gesamten Beobachtungszeitraum auftreten. Auffällig ist überall der starke Wellengruppencharakter der Schwankungen, insbesondere die komplizierte Vertikalverteilung der Zentren der Wellengruppen. Die Wellengruppen treten nicht immer in allen Tiefen gleichzeitig auf.

Im großen und ganzen werden die Wellengruppen allerdings oberhalb der Sprungschicht fast gleichzeitig und mit hoher Intensität angeregt, also gerade in dem vom Wind beeinflussten oberen Teil der Wassersäule, wie in 2.2. schon angedeutet wurde.

Die dominierende Rolle des Windes für die Entstehung der Trägheitsschwankungen in der oberflächennahen Schicht erkennt man auch daran, daß sich zwei Zeiträume intensiver Wellenanregung in den gefilterten Meßreihen unterscheiden lassen, die durch starken N-NW-Wind bis zum 5. 8. und anwachsenden SE-Wind ab 7. 8. gekennzeichnet sind (Abb. 2 a):

- a) Der Zeitbereich bis zum 4. 8. bei den westlichen Positionen („Professor Krümmel“, „Baltyk“, „Birkut“ und „Mast II“).
- b) Der Bereich vom 7. 8.—8. 8. bei allen Positionen außer der von „Mast II“.

„Mast II“ enthält im Zeitraum b) kaum nennenswerte Trägheitsschwankungen, da die Station zu dieser Zeit im Windschatten der Insel Bornholm liegt. Dies deutet ebenfalls darauf hin, daß die Trägheitswellen zumindest in der Deckschicht direkt durch den Wind erregt werden, wie es durch die FREDHOLM'schen Lösungen der EKMAN'schen Triftstromtheorie beschrieben wird (V. W. EKMAN, 1905). Die beiden Zeiträume intensiver Anregung findet man auch in den ungefilterten und gefilterten Temperaturschwankungen in Sprungschichttiefe (Abb. 5 a und Abb. 5 b).

Die Vertikalverteilung der Amplituden der gefilterten Stromschwankungen von „Baltyk“ und „Birkut“ (Abb. 10 und Abb. 11) lassen sich grob durch interne Wellen 1. Ordnung mit Perioden in der Nähe der Trägheitsperiode deuten, da die Amplituden Maximalwerte in Oberflächen- und Bodennähe, Minimalwerte in mittleren Tiefen aufweisen. Die Temperaturschwankungen, die bedingt ein Maß für die Vertikalbewegung darstellen, zeigen dagegen gerade umgekehrtes Verhalten: Maximalwerte in der Sprungschicht.

Für die anderen Stationen ist dieses Verhalten nicht so ausgeprägt, da hier möglicherweise eine Kombination von internen Wellen verschiedener Ordnungen und Phasengeschwindigkeiten eine kompliziertere Vertikalabhängigkeit der Amplitude bewirkt.

3.2. Horizontale und vertikale Kohärenz und Phasenbeziehungen im Trägheitsbereich

B. KULLENBERG und I. HELA (1942) haben erstmals in der Ostsee Untersuchungen über die Phasendifferenz der Trägheitswellen auf benachbarten Stationen durchgeführt. Sie fanden in 15 m Tiefe über eine horizontale Distanz von ca. 200 km Phasenschwankungen von $\pm 31^\circ$ um den Mittelwert. Demgegenüber ergaben die Schwankungen in 30 m Tiefe kein klares Bild. Letzteres deckt sich mit unserem nachfolgenden Ergebnis, daß die Kohärenz in der Nähe der Temperatursprungschicht ein Minimum aufweist.

Um den Zusammenhang der Trägheitswellen über vertikale Distanzen (zwischen den einzelnen Tiefenniveaus einer Station) zu untersuchen, wurden aus den Energie- und Kreuzspektren der gefilterten Stromschwankungen die Kohärenz als Zusammenhangsmaß und die Phasendifferenzen ermittelt (R. B. BLACKMAN and J. W. TUKEY, 1958, W. KRAUSS, 1966, C. W. J. GRANGER and M. HATANAKA, 1964).

Tabelle 3
Kohärenzen und Phasendifferenzen, vertikal und zwischen U und V

Baltyk — Baltyk: $k_s = 0,607$															
		k	φ			k	φ			k	φ				
U	10 — U	15	0.895	0.133	V	10 — V	15	0.897	6.084	U	10 — V	10	0.889	4.785	
U	15 — U	20	.596	0.163	V	15 — V	20	.774	5.705	U	15 — V	15	.799	4.694	
U	20 — U	25	.438	3.885	V	20 — V	25	.572	5.172	U	20 — V	20	.698	4.446	
U	25 — U	30	.514	0.019	V	25 — V	30	.320	3.753	U	25 — V	25	.488	5.332	
U	30 — U	40	.721	6.059	V	30 — V	40	.799	0.008	U	30 — V	30	.824	4.847	
U	40 — U	50	.924	6.078	V	40 — V	50	.836	5.858	U	40 — V	40	.927	4.691	
U	10 — U	50	.763	3.201	—	—	—	—	—	U	50 — V	50	.843	4.531	
Birkut — Birkut: $k_s = 0.607$															
		k	φ			k	φ			k	φ				
2 II	U	10 — U	20	0.930	0.075	V	10 — V	20	0.909	6.262	U	10 — V	10	0.892	4.880
	U	20 — U	30	.420	2.605	V	20 — V	30	.512	2.885	U	20 — V	20	.823	4.896
	U	30 — U	40	.564	0.175	V	30 — V	40	.599	6.180	U	30 — V	30	.397	4.957
	U	40 — U	50	.717	6.062	V	40 — V	50	.851	6.277	U	40 — V	40	.667	4.895
	U	50 — U	60	.879	6.281	V	50 — V	60	.889	6.078	U	50 — V	50	.807	5.024
	U	60 — U	70	.782	5.931	V	60 — V	70	.851	5.758	U	60 — V	60	.772	4.722
	U	70 — U	80	.785	4.871	V	70 — V	80	.676	4.799	U	70 — V	70	.799	4.805
	U	80 — U	90	.794	0.057	V	80 — V	90	.727	6.201	U	80 — V	80	.749	4.896
	U	90 — U	100	.804	5.933	V	90 — V	100	.638	5.715	U	90 — V	90	.752	4.744
	U	100 — U	10	.716	5.790	V	100 — V	10	.706	5.683	U	100 — V	100	.600	4.859
Mast II — Mast II: $k_s = 0.500$															
		k	φ			k	φ			k	φ				
U	25 — U	29	0.877	6.074	V	25 — V	29	0.792	5.827	U	25 — V	25	0.478	5.231	
U	29 — U	35	.636	0.051	V	29 — V	35	0.815	6.004	U	29 — V	29	0.427	5.388	
U	35 — U	39	.556	5.409	V	35 — V	39	0.463	0.437	U	35 — V	35	0.327	5.579	
U	39 — U	45	.372	6.018	V	39 — V	45	0.229	0.998	U	39 — V	39	0.279	4.888	
U	45 — U	49	.547	5.319	V	45 — V	49	0.223	4.127	U	45 — V	45	0.697	0.241	
U	49 — U	25	.242	2.058	V	49 — V	25	0.366	5.379	U	49 — V	49	0.579	6.240	

In den folgenden Tabellen sind die Kohärenz k und die Phase φ (Bogenmaß) jeweils für die Periode 14,4 h (Trägheitsperiode in der westlichen Ostsee 14,6 h) einiger Stationen aufgeführt. Dabei bedeutet k_s die 90%-Konfidenzschwelle der Kohärenz (entnommen aus C. W. J. GRANGER and M. HATANAKA, 1964).

In Tabelle 3 sind jeweils für die drei Stationen „Baltyk“, „Birkut“ und „Mast II“ zwischen benachbarten Tiefen Kohärenzen k und Phasendifferenzen φ angegeben. Ebenfalls findet man dort k und φ zwischen Ost- und Nordkomponente derselben Tiefe und Station.

„Baltyk“ und „Birkut“ weisen die höchsten Kohärenzen auf, „Mast II“ die niedrigsten, sogar unter der Schwelle k_s liegende, Kohärenzen.

Die Beispiele „Baltyk“ und „Birkut“ zeigen eine Abnahme der Kohärenz benachbarter Tiefen bis zur Sprungschicht und dann wieder eine Zunahme bis in Bodennähe. Im Beispiel „Birkut“ nimmt die Kohärenz nochmals in der Salzgehaltssprungschicht wieder ab und zum Boden hin zu. Dies bestätigt die in 2.2. erwähnte Aufteilung in verschiedene von der Schichtung bestimmte Anregungsregime. Die Phasendifferenzen zwischen benachbarten Tiefen bewegen sich außer in Sprungschichtnähe um 0 bzw. 2π , d. h. benachbarte Stromschwankungen sind etwa in Phase. In der Sprungschicht selbst springt die Phase etwa um π . Hier ist die Angabe der Phase auf Grund der nicht-signifikanten Kohärenz allerdings mit einem größeren Fehler versehen (etwa $\pm 0,5$). Erstaunlich gut ist die Kohärenz zwischen Oberfläche und Boden (U 10—U 50) der Station „Baltyk“. Die Phasendifferenz beträgt etwa π . Die vertikale Abhängigkeit der Phase der Station „Baltyk“ ist gerade die einer internen Welle 1. Ordnung. Erstaunlich gut ist ebenfalls die Kohärenz zwischen U 10 und U 100 und V 10 und V 100 der Station „Birkut“.

Die Phasendifferenzen zwischen Ost- und Nordkomponente betragen für „Baltyk“ und „Birkut“ für alle Tiefen etwa $3\pi/2$. Da U und V außerdem etwa gleich große Amplituden haben, entspricht dies bei dem benutzten Verfahren zur Berechnung der Phasendifferenzen (W. KRAUSS, 1966, S. 201) erwartungsgemäß einer rechtsdrehenden kreisförmigen Strombewegung. Die hier nicht angegebenen Kohärenzen und Phasen der Station „Professor Penck“ zeigen ein analoges Verhalten wie „Baltyk“ und „Birkut“. Die Station „Mast II“ fällt aus diesem Rahmen auf Grund ihrer geographischen Lage (Bornholm Gatt) heraus. Dies gilt ebenfalls für die Station „Professor Krümmel“ (Darsser Schwelle).

In Tabelle 4 findet man Kohärenzen und Phasen über die horizontalen Distanzen „Baltyk“ — „Birkut“ und „Baltyk“ — „Mast II“. Wie man sieht, liegen die Kohärenzen größtenteils unterhalb der Signifikanzschwelle. Dies ist auf Grund der großen Distanz (200 km) unter der Annahme der lokalen Anregung von Trägheitswellen auch verständlich.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 7)

Abb. 7a: $E(v, z)$ auf der Position „Birkut“.

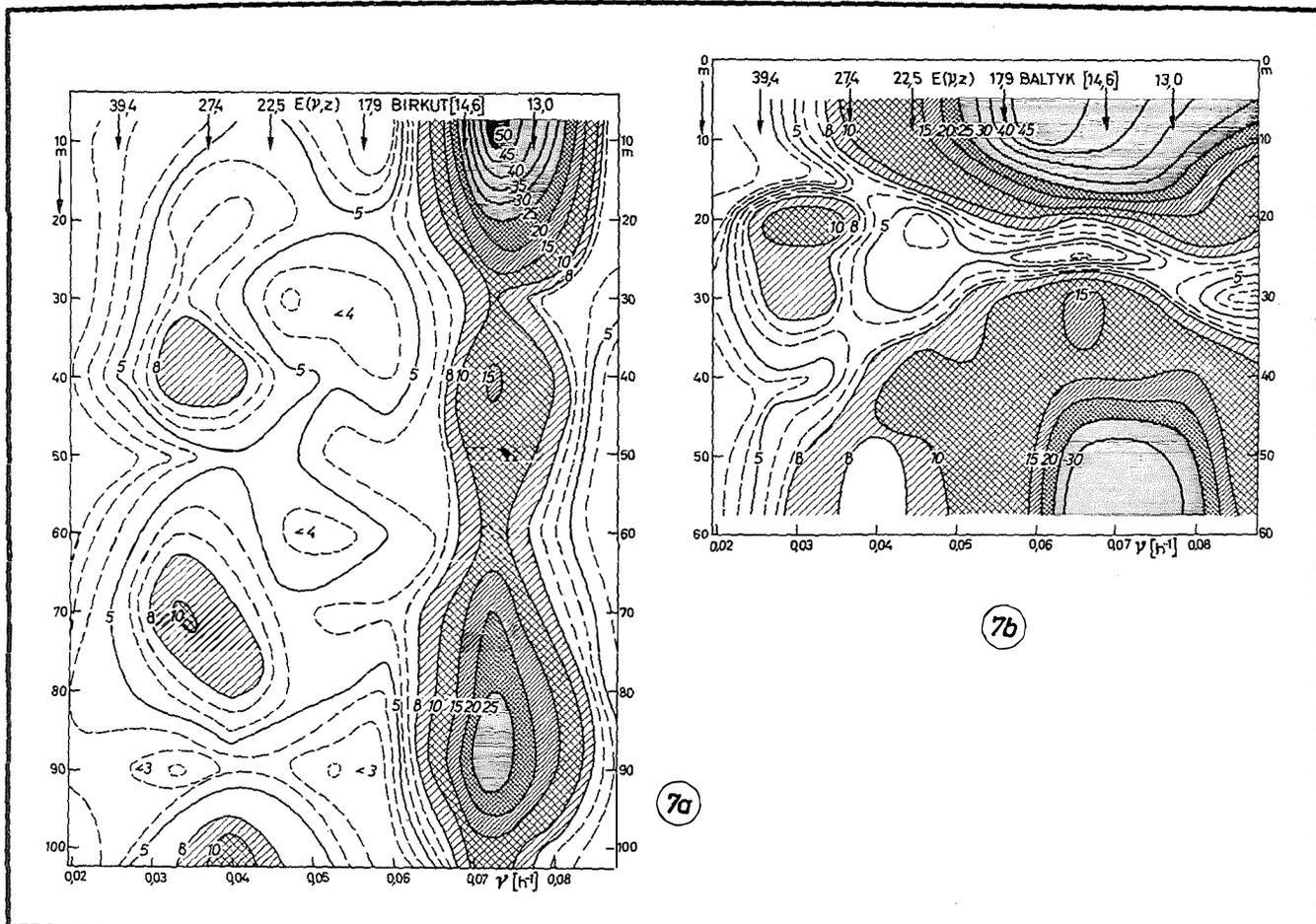
Abb. 7b: $E(v, z)$ auf der Position „Baltyk“.

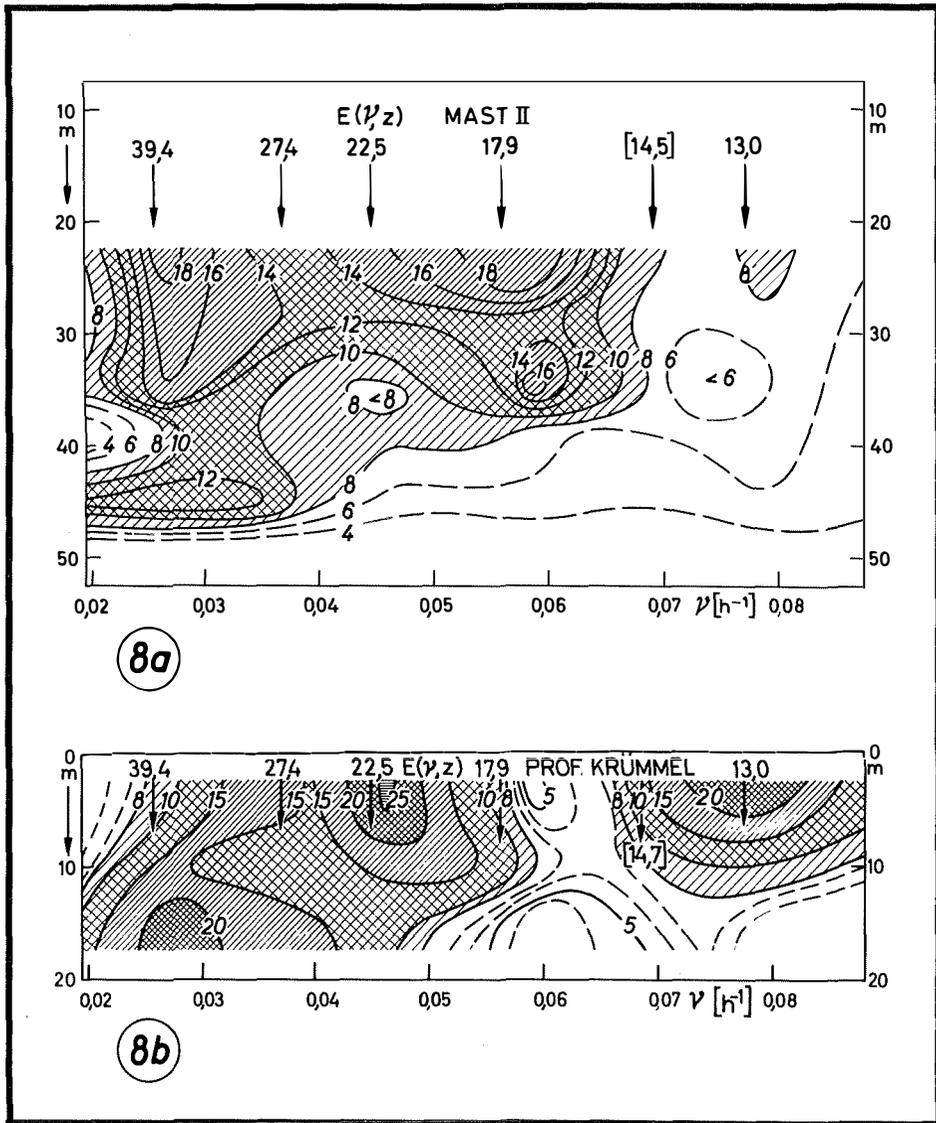
Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 8)

Abb. 8a: $E(v, z)$ auf der Position „Mast II“.

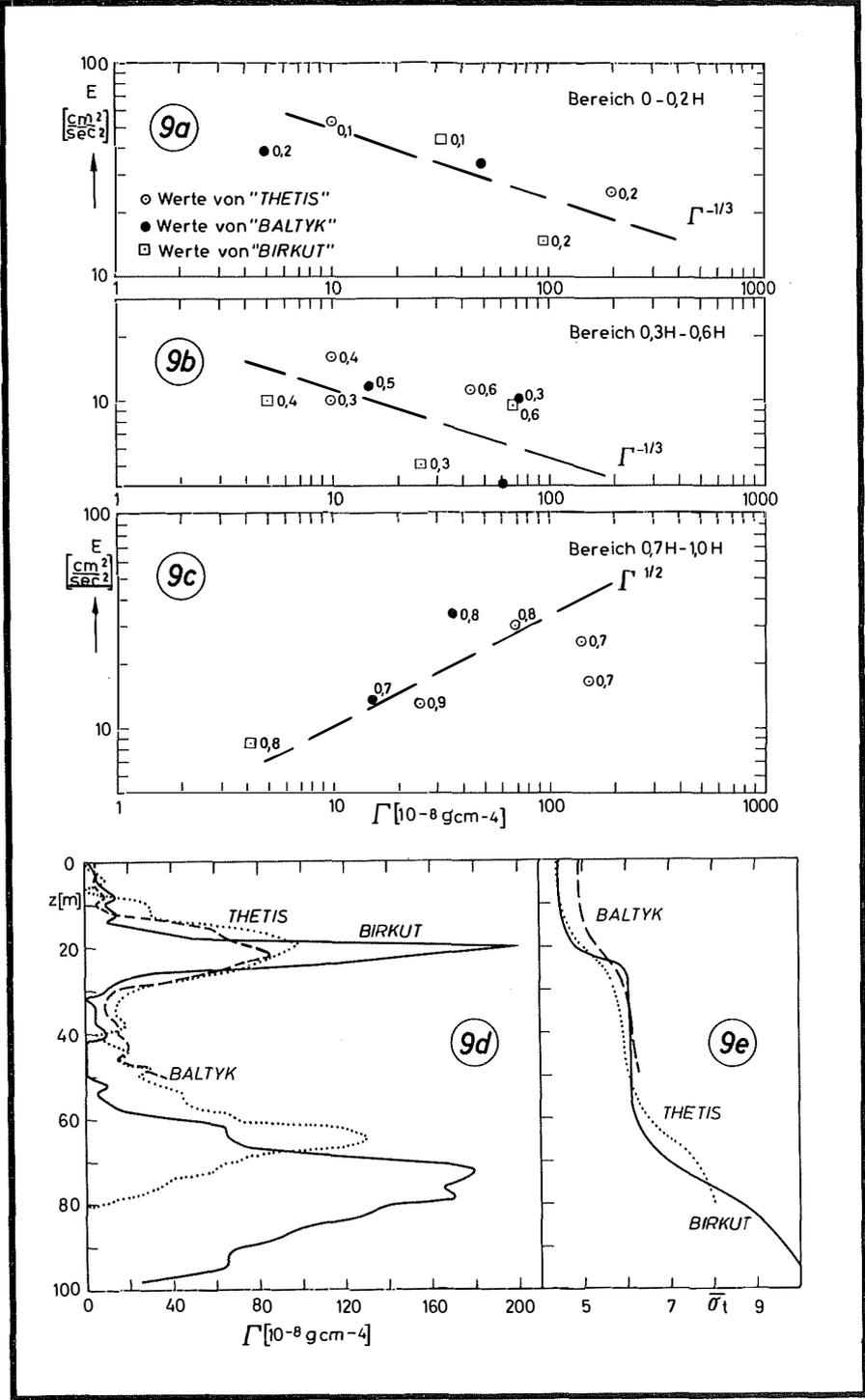
Abb. 8b: $E(v, z)$ auf der Position „Professor Krümmel“.

Tafel 7 (zu J. Kiehmann, W. Krauß u. L. Maggard)

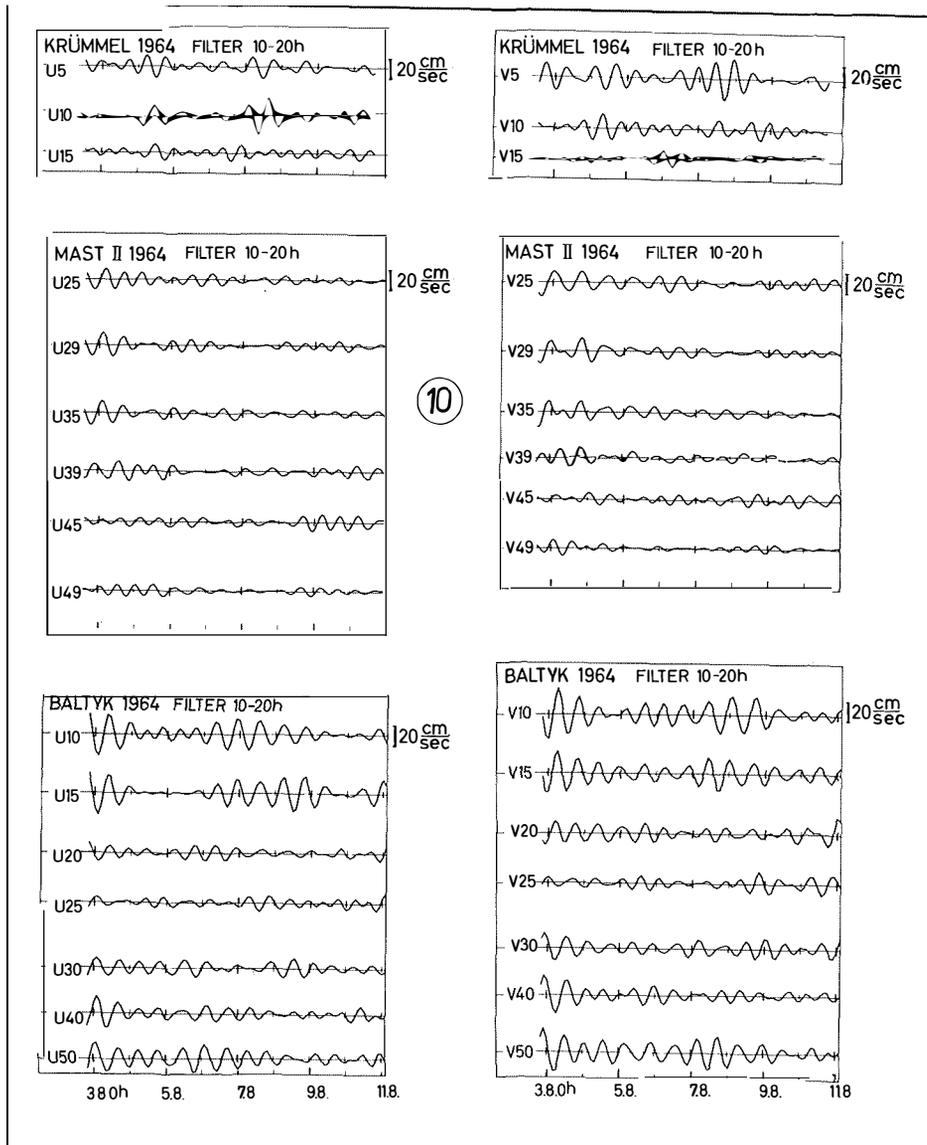




Tafel 8 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Maggaard)



Tafel 9 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Mgaard)



Tafel 10 (zu J. Kielmann, W Krauß u L. Magaard)

Tabelle 4
Kohärenzen und Phasendifferenzen horizontal

Baltyk — Birkut: $k_s = 0.607$		
	k	φ
U 10 — U 10	0.543	1.187
U 20 — U 20	0.421	1.020
U 30 — U 30	0.755	0.426
U 40 — U 40	0.539	1.189
U 50 — U 50	0.715	1.032
V 10 — V 10	0.606	1.448
V 20 — V 20	0.459	2.014
V 30 — V 30	0.333	1.145
V 40 — V 40	0.661	1.566
V 50 — V 50	0.574	1.791
Baltyk — Mast II: $k_s = 0.732$		
	k	φ
U 25 — U 25	0.477	5.397
U 30 — U 29	0.851	6.161
U 40 — U 39	0.715	4.371
U 50 — U 49	0.606	3.215
V 25 — V 25	0.118	5.201
V 30 — V 29	0.080	5.681
V 40 — V 39	0.376	4.440
V 50 — V 49	0.828	1.787

F. WEBSTER (1968) hat bei seinen Messungen im Nordatlantischen Ozean eine relativ hohe Kohärenz über horizontale Distanzen von 3 km festgestellt. Dagegen erhielt er für die Kohärenz zwischen Strommessungen in 10 und 80 m sehr kleine Werte. Möglicherweise sind diese Kohärenzen ebenfalls auf Grund der dazwischen liegenden Sprungschicht so klein.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 9)

- Abb. 9a: Die Energie E der Trägheitsschwingung als Funktion der Stabilität Γ für den Tiefenbereich 0—0,2 H. (Aus den Meßreihen von „Baltyk“, „Birkut“ und „Thetis“.)
- Abb. 9b: Wie Abb. 9a für den Tiefenbereich 0,3 H—0,6 H.
- Abb. 9c: Wie Abb. 9a für den Tiefenbereich 0,7 H—H.
- Abb. 9d: Die Stabilität $\Gamma(z)$ für die drei in Abb. 9a genannten Positionen.
- Abb. 9e: Die mittlere Dichte $\bar{\rho}(z)$ dargestellt durch $\bar{\sigma}_t(z) = (\bar{\rho}(z) - 1) \cdot 10^3$ für die in Abb. 9a genannten Positionen.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 10)

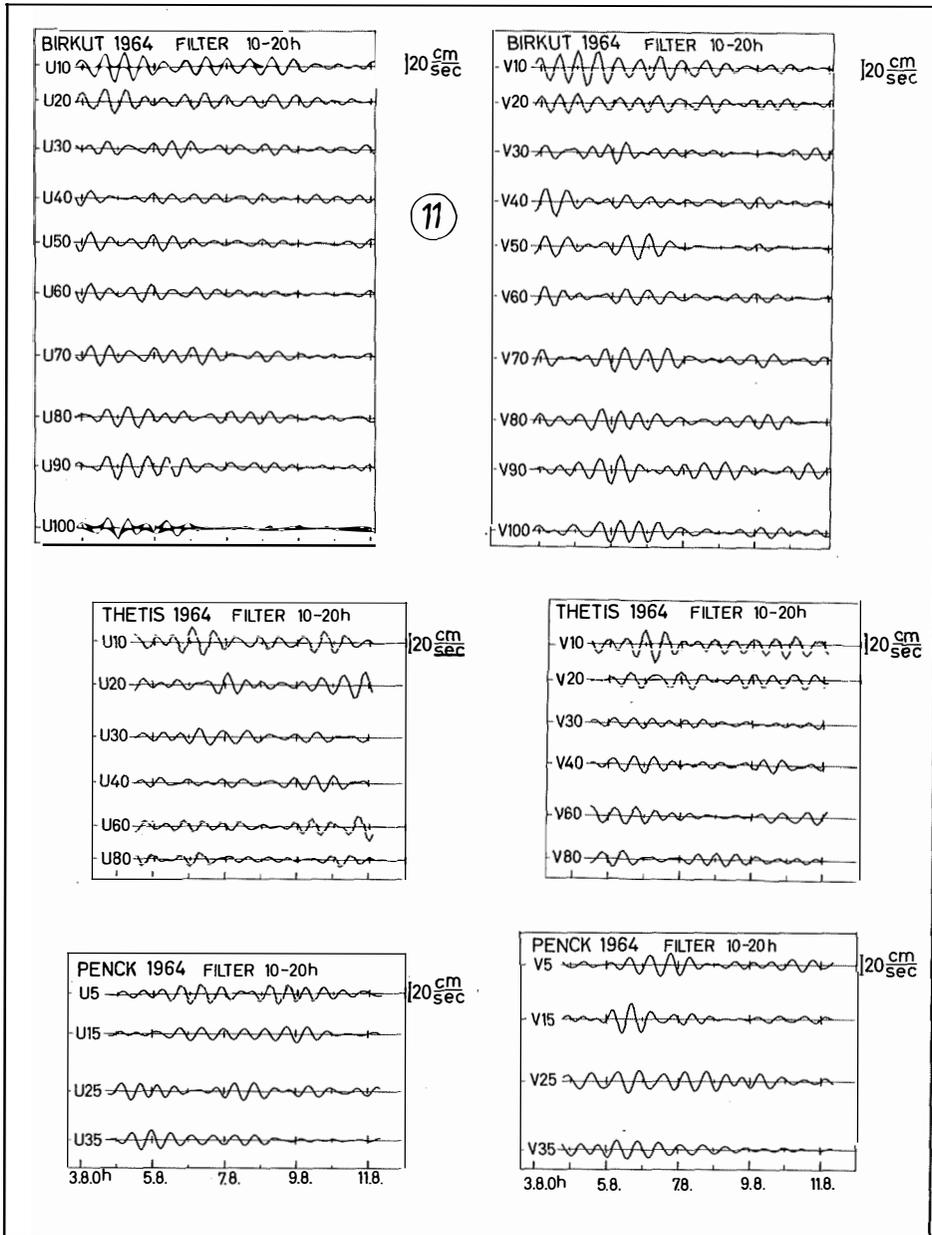
- Abb. 10: Gefilterte Werte der in Abb. 3 dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten.

Literaturverzeichnis

BLACKMAN, R.B. and J.W. TUKEY (1958): The measurement of power spectra. Dover Publ., New York. — EKMAN, V.W. (1905): On the influence of the earth's rotation on ocean-currents. Ark. Math. Astr. och Fys. 2, 11 Stockholm. — GRANGER, C. W. J. and M. HATANAKA (1964): Spectral analysis of economic time series. Princeton U. P.. — KRAUSS, W. und L. MAGAAR (1962): Zum System der Eigenschwingungen der Ostsee. Kieler Meeresforsch. 18, 184—186. — KRAUSS, W. (1966): Methoden und Ergebnisse der Theoretischen Ozeanographie, Band II. Interne Wellen. Borntraeger Berlin. — KULLENBERG, B. und I. HELA (1942): Om tröghetssvängningar i Ostersjön. Svenska Hydrograf. Biol. Komm. Skrifter Ny Ser. Hydrograf. 16, 14 pp. — NEUMANN, G. (1941): Eigenschwingungen der Ostsee. Archiv d. Seewarte und Marineobservatorium, 61, 4. — WEBSTER, F. (1968): Observations of inertial-period motions in the deep sea. Rev. Geophys. 6 (4), 473—490.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 11)

Abb. 11: Gefilterte Werte der in Abb. 4 dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten.



Tafel 11 (zu J. Kielmann, W. Krauß u. L. Magaard)