

Berichte
aus dem
Institut für Meereskunde
an der
Christian-Albrechts-Universität Kiel

Nr. 73

SPEKTRALE BETRACHTUNG DER GROSS-SKALIGEN TRANSPORTE
VON SENSIBLER ENERGIE UND DREHIMPULS
AN AUSGEWÄHLTEN GITTERPUNKTEN DES DWD-GITTERNETZES
DER NORDHEMISPHERE

von

Jutta Perkuhn

DOI 10.3289/IFM_BER_73

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Institut für Meereskunde
Abt. Maritime Meteorologie

Düsternbrooker Weg 20
D 2300 K i e l 1

ISSN 0341-8561

SPEKTRALE BETRACHTUNG DER GROSS-SKALIGEN TRANSPORTE
VON SENSIBLER ENERGIE UND DREHIMPULS
AN AUSGEWÄHLTEN GITTERPUNKTEN DES DWD-GITTERNETZES
DER NORDHALBKUGEL

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung
des Grades eines Diplommeteorologen des
Fachbereiches Mathematik-Naturwissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von: Jutta Perkuhn
Referent: Prof. Dr. Fr. Defant
Koreferent: Prof. Dr. P. Speth

Kiel 1979

ZUSAMMENFASSUNG

Großskalige Austauschprozesse in der Atmosphäre bewirken, daß von den Gebieten mit Strahlungsüberschuß in den niederen Breiten sensible Wärme polwärts transportiert wird, wo ein Strahlungsdefizit vorhanden ist. Ähnlich erfolgt ein meridionaler Drehimpulsfluß von niederen Breiten und etwas schwächer aus den Polgebieten in die westwindregionen der mittleren Breiten hinein, dort wo die Atmosphäre ständig durch Reibung Drehimpuls an die Erde abgibt. Ein großer Teil dieser Transporte ist großturbulenter Natur, und sie werden von den stehenden und wandernden Wellen getätigt.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Beteiligung der wandernden Wellen an diesen Transporten mit Hilfe von Zeitspektren an 13 Punkten im Breitenbereich zwischen 30°N und 60°N . Diese speziellen Punkte wurden gewählt, weil an ihnen im Januarmittel maximale oder minimale Transporte auftreten (SPETH, 1974).

Die Zeitreihen, die für die 200, 500 und 850 mb-Flächen erstellt werden, überdecken einen Zeitraum von 10 Jahren (1.4.1967 - 31.3.1977) mit zwei Messungen pro Tag. Damit werden Spektralwerte für Perioden von 1 bis 512 Tage berechnet. In der Arbeit von U. HERRMANNSEN (1979) werden für den gleichen Zeitraum die Energiespektren der Temperatur, des Geopotentials und des Windes behandelt, in dieser Arbeit hingegen die Cospektren, um die Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls zu untersuchen.

Die Beiträge der unterschiedlichen Scales, d.h. Jahres- und Halbjahreswelle, Perioden von 7 - 50 Tagen, Lange Wellen und Zyklonen (1 - 7 Tage), zum Gesamttransport an den einzelnen Punkten werden abgeschätzt.

Für den meridionalen Wärmefluß erweisen sich als am effektivsten die Jahreswelle und der Periodenbereich von 1 bis 7 Tagen, in dem sensible Wärme überwiegend nach Norden transportiert wird. Der Jahrespeak ist zwar an einigen Punkten und Niveaus negativ und kompensiert damit zum Teil den Transport, der durch die kürzeren Perioden verursacht wird, doch bleibt der Gesamttransport für jeden Punkt in jedem Niveau positiv.

Der meridionale Drehimpulstransport ist im Vergleich zum Fluß sensibler Energie im allgemeinen in weniger Periodenbereichen signifikant. So sind sogar die Cospektren zweier Punkte, die in der Nähe der Polarfront gelegen sind, gar nicht kohärent. Bei den anderen Punkten ist die Wichtigkeit der Langen Wellen und Zyklonen als Träger des meridionalen turbulenten Drehimpulstransportes erkennbar und ebenso eine Zunahme des Flusses mit der Höhe.

ABSTRACT

Due to large-scale processes in the atmosphere sensible heat is transported from low-latitude regions with a surplus of radiation towards polar regions with a deficit. There is a similar flux of angular momentum from low-latitudes and somewhat less from polar regions towards the belts with westerly winds in mid-latitudes, where the atmosphere delivers momentum to the Earth because of surface-friction. A great part of these transports is due to large-scale turbulent processes, and they are maintained by standing and transient waves.

The present work investigates the participation of transient waves in these transports with the aid of time-spectral-analysis carried out at 13 points being situated between 30°N and 60°N . These special points have been selected because extreme transports occur in the January-mean at these locations (SPETH, 1974).

Time series are supplied for the 200, 500 and 850 mb-levels for a time-period consisting of 10 years (1.4.67 - 31.3.77) with two measurements each day. Spectral values for periods from 1 to 512 days are computed. The work of U. HERRMANNSEN (1979) deals for the same period with power spectra of temperature, of geopotential and of wind while the present work considers the cospectra in order to investigate transports of sensible heat and angular momentum.

The participation of different scales, i.e. annual-, semi-annual waves, "middle" periods in the range of 7 - 50 days, "short" periods of 1 - 7 days according to ROSSBY-waves and cyclones, in the total transport and their influence at the different points is examined.

The most effective periods for the meridional flux of sensible energy are the annual wave and the spectral range of 1 - 7 days. In this range sensible heat is mostly trans-

ported poleward. Though the transport due to the annual wave results to be negative at some points and levels and is therefore partly compensating the transfer due to the short periods, the total transport for every point at any level remains still positive, i.e. it is directed towards the pole.

Compared with the flux of sensible heat the meridional momentum-transport is statistically less significant. The cospectra of two points which are situated near the polar-front are not at all coherent. At the other points the importance of the ROSSBY-waves and cyclones as carrier of the meridional turbulent momentum-transport is readily understood and equally the increase of the flux with increasing altitude.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung: Bedeutung der Transporte	1
1.1 Transport sensibler Energie	1
1.2 Transport von Drehimpuls	2
1.3 Der Sinn einer spektralen Betrachtung	4
2. Datenverarbeitung und Berechnung der Transporte	5
2.1 Wahl der Gitterpunkte	5
2.2 Erstellung der Zeitreihen	7
2.3 Bestimmung von Energie- und Cospektren	9
2.4 Anwendung des Spektralprogramms	10
2.5 Statistische Absicherung der Ergebnisse	12
2.6 Berechnung der Transporte aus den Cospektren	16
ERGEBNISSE	
3. Transport sensibler Energie	17
3.1 Ausführliche Interpretation am Beispiel des Gitterpunktes A (Boston, 43°N , 70°W)	17
3.1.1 Meridionaler Wärmetransport an Punkt A	17
3.1.2 Die Phasenbeziehung zwischen T' und v'_g im Periodenbereich 1 - 10 Tage	21
3.1.3 Zonalen Wärmetransport an Punkt A	23
3.2 Besonderheiten der anderen Punkte	25
3.2.1 Punkt B, Beringmeer (56°N , 172°W)	25
3.2.2 Punkt C, Ost-China (35°N , 118°E)	29
3.2.3 Punkt D, Danzig (55°N , 20°E)	32
3.2.4 Punkt E, San Francisco (40°N , 125°W)	35
3.2.5 Punkt F, Ostsibirien (60°N , 123°E)	38

	Seite
3.3 Meridionale Transporte sensibler Energie - Übersicht und Vergleich	41
3.3.1 Die Beiträge der verschiedenen Scales zum meridionalen Transport sensibler Energie	42
3.3.2 Die integrierten Spektren	45
3.4 Zonale Transporte sensibler Energie - Übersicht und Vergleich	51
3.4.1 Die Beiträge der verschiedenen Scales zum zonalen Transport sensibler Energie	51
3.4.2 Die integrierten Spektren	51
4. Meridionaler Transport von Drehimpuls	55
4.1 Besonderheiten der einzelnen Punkte	55
4.1.1 Punkt III, Ural (58°N , 65°W) und Punkt VII, Shetland-Inseln (63°N , 0°)	55
4.1.2 Punkt I, NE-Pazifik (38°N , 140°W)	58
4.1.3 Punkt II, NW-Pazifik (47°N , 175°E)	60
4.1.4 Punkt IV, Bermuda-Inseln (35°N , 65°W)	62
4.1.5 Punkt V, Hudson-Bay (65°N , 80°W)	64
4.1.6 Punkt VI, W-Pazifik (30°N , 150°E)	66
4.2 Meridionale Transporte von Drehimpuls - Übersicht und Vergleich	68
4.2.1 Die Beiträge der verschiedenen Scales	69
4.2.2 Die integrierten Spektren	71
5. Schlußbetrachtung	76

1. EINLEITUNG: BEDEUTUNG DER TRANSPORTE

1.1 TRANSPORT SENSIBLER ENERGIE

Für das Gesamtsystem Erde plus Atmosphäre verursachen die kurzwellige direkte und diffus einfallende Sonnenstrahlung stets einen Gewinn an Wärmeenergie. Jedoch ist diese Zufuhr stark von der geographischen Breite abhängig (unterschiedlicher Einfallswinkel), und im Winter fehlt eine solche Zufuhr im Bereich der polaren Nacht ($> \text{ca. } 60^\circ \text{N}$) gänzlich. Außerdem verliert das Gesamtsystem Wärmeenergie durch die terrestrische effektive Ausstrahlung, welche für Erde und Atmosphäre überall einen Wärmeenergieverlust verursacht, der weniger breitenabhängig ist.

Bestimmt man einen Strahlungshaushalt von Erde plus Atmosphäre im Jahresmittel, so zeigt sich (siehe Abb.1), daß zwischen 38°N und dem Äquator die Einstrahlung die Ausstrahlung übertrifft, während in höheren Breiten vom Gesamt-

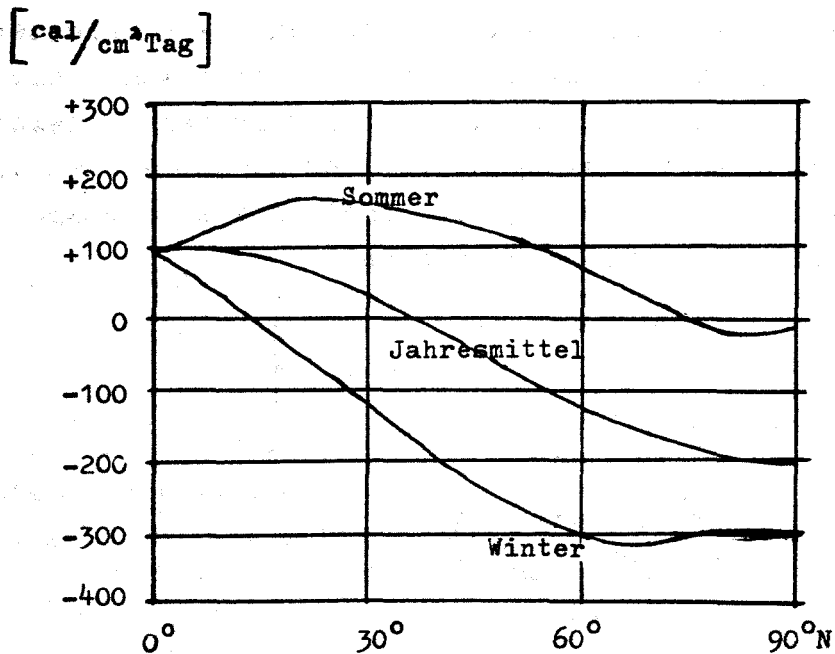


Abb.1: Strahlungsbilanz der Nordhalbkugel
(nach DEFANT, 1976)

system im Mittel mehr Wärmeenergie abgestrahlt als aufgenommen wird. Die Breite des Strahlungsausgleichs liegt natürlich im Winter weiter äquatorwärts, im Sommer aber weiter polwärts als 38° .

Da sich das Gesamtsystem in Äquatornähe nicht dauernd erwärmt und an den Polen abkühlt, muß es zur Erhaltung des beobachteten Zustands einen Mechanismus geben, der Wärme von niederen nach hohen Breiten transportiert. Diesen Ausgleich der sensiblen Wärme besorgen turbulente Bewegungen (großskalige Wellen- und Wirbelstörungen synoptisch beobachtbarer Größe) in der Atmosphäre und auch Strömungen in den Meeren.

1.2 TRANSPORT VON DREHIMPULS

In einem abgeschlossenen rotierenden System, an das kein Drehmoment angreift, bleibt der Drehimpuls zeitlich erhalten. Ein solches System ist die Erde zusammen mit ihrer Atmosphäre.

Das Bild der allgemeinen Zirkulation zeigt sowohl Breitenbereiche mit überwiegend Westwinden als auch solche mit Ostwinden. Durch die Bodenreibung erfolgt in den Westwindzonen eine westliche Drehimpuls-Abgabe von der Atmosphäre an die Erde, in den Ostwindzonen dagegen erhält die Atmosphäre westlichen Drehimpuls von der Erde her.

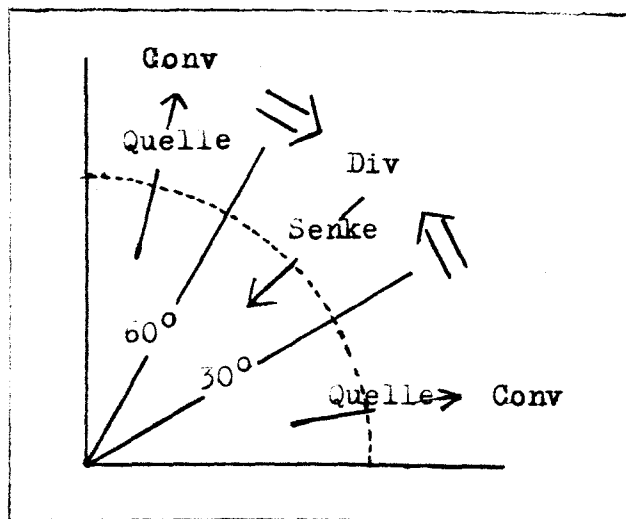


Abb. 2: Quellen und Senken von Drehimpuls

Da die Zonalwinde quasistationär sind, muß es Mechanismen geben, die in der Lage sind, Drehimpuls von den Ostwindzonen nach den Westwindzonen in der Atmosphäre zu transportieren.

Im Mittel herrscht in der Atmosphäre zwischen 0° und 30° ein Ostwindregime (zonale Komponente der Passate), in den mittleren Breiten ($30^\circ - 60^\circ$) hingegen ein Westwindregime, und in Polnähe treten wieder schwache Ostwinde auf. Quellen von Drehimpuls (Konvergenz) für die Atmosphäre findet man also im Mittel zwischen 0° und 30° und in Polnähe, während sich über den mittleren Breiten eine Senke einstellt (Divergenz), s. Abb. 2. Der Ausgleich muß durch meridionale Impulstransporte erfolgen, die wiederum großturbulenter Natur sind.

Der absolute Drehimpuls M von 1 g Luft in der Breite φ ist durch

$$M = \underbrace{\Omega a^2 \cos^2 \varphi}_{(\Omega\text{-Moment})} + \underbrace{u a \cos \varphi}_{(u\text{-Moment})} \quad (1.1)$$

definiert. Der 1. Term, das sog. " Ω -Moment", wird verursacht durch die Drehung der Erde um ihre Achse, der 2. Term, das sog. " u -Moment", durch die zonale Windkomponente.

Es gilt:

$$\vec{M} = \vec{V} \times \vec{r} \quad (1.2)$$

$$\text{mit } \vec{V} = \vec{\Omega} \times \vec{r} + \vec{v}$$

$$|\vec{r}| = a \cos \varphi$$

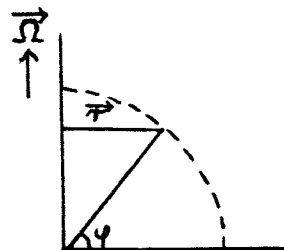
$$\vec{v} = (u, v) \quad \text{Windgeschwindigkeit relativ zur Erde}$$

$$\Omega \quad \text{Winkelgeschwindigkeit der Erde}$$

$$\vec{M} = (\vec{\Omega} \times \vec{r} + \vec{v}) \times \vec{r} \quad (1.3)$$

$$M = (\Omega a \cos \varphi + u) a \cos \varphi \quad (1.4)$$

$$M = \Omega a^2 \cos^2 \varphi + u a \cos \varphi \quad (1.1)$$



Für einen festen Ort auf der Erde ist das Ω -Moment konstant, (φ ist konstant), Schwankungen von M beruhen nur auf Änderungen der zonalen Windkomponente.

1.3 DER SINN EINER SPEKTRALEN BETRACHTUNG

Der meridionale Transport einer Größe E (Energie oder Drehimpuls) in einem bestimmten Höhen- oder Druckintervall dz oder dp kann nach einer zonalen und zeitlichen Mittelbildung folgendermaßen zerlegt werden:

$$\int \rho [\overline{E v}] dz = \frac{1}{g} \int \left\{ \underbrace{[\overline{E}] [\overline{v}]}_{(1)} + \underbrace{[\overline{E^* v^*}]}_{(2)} + \underbrace{[\overline{E' v'}]}_{(3)} \right\} dp \quad (1.5)$$

- [] : zonales Mittel
- * : Abweichung vom zonalen Mittel
- : zeitliches Mittel
- ' : Abweichung vom zeitlichen Mittel

Man erkennt, daß der meridionale (oder zonale) Transport in drei Teile zerlegt werden kann, welche durch folgende drei Zirkulationseigenheiten verursacht werden:

- (1) mittlere meridionale (zonale) Zirkulation
 - (2) stehende Wellen
 - (3) wandernde Wellen
- } großturbulente Störungen (Wellen
oder Wirbel)

In dieser Arbeit wird ausschließlich der Einfluß der wandernden Wellen betrachtet. Turbulente Störungen von verschiedenem Scale tragen zum Transport bei. Um den Einfluß der unterschiedlichen Scales zu erkennen, werden zeitliche Spektren der horizontalen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls erstellt und untersucht.

2. DATENVERARBEITUNG UND BERECHNUNG DER TRANSPORTE

2.1 WAHL DER GITTERPUNKTE

Grundlage für die Wahl der Gitterpunkte, an welchen Berechnungen vorgenommen werden sollen, ist eine Untersuchung von SPETH (1974) über horizontale Flüsse von sensibler Energie und Drehimpuls für die Atmosphäre der Nordhalbkugel. Abb.3 zeigt horizontale Verteilungen der vertikal integrierten meridionalen Flüsse aus dieser Untersuchung.

Auffallend ist, daß die Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls nicht gleichmäßig über die mittleren Breiten hinweg erfolgen, sondern daß an bestimmten Stellen ausgeprägte Minima und Maxima auftreten.

		ϕ	λ	Gitterkoordinaten		Transport sens.Energie [cal cm ⁻¹ sec ⁻¹ mb ⁻¹]	
				x	y		
A	Boston	43°N	70°W	13	24	527	Max
B	Beringsee	56°N	172°W	27	36	517	Max
C	O-China	35°N	118°E	42	31	302	Max
D	Danzig	55°N	20°E	28	17	82	Min
E	San Francisco	40°N	125°W	16	37	50	Min
F	Sibirien	60°N	123°E	34	30	50	Min

Tab. 1a: Lage der Gitterpunkte (sensible Energie)

		ϕ	λ	Gitterkoordinaten		Transport von Drehimpuls [10 ¹² g cm sec ⁻² mb ⁻¹]	Transportrichtung
				x	y		
I	NO-Pazifik	38°N	140°W	19	40	266	S→N
II	NW-Pazifik	47°N	175°E	30	38	226	N→S
III	Ural	58°N	65°E	34	21	207	S→N
IV	Bermuda-Ins.	35°N	65°W	11	22	201	S→N
V	Hudson-Bay	65°N	80°W	20	26	169	N→S
VI	W-Pazifik	30°N	150°E	38	40	121	S→N
VII	Shetlandin.	63°N	0°	25	19	73	N→S

Tab. 1b: Lage der Gitterpunkte (Drehimpuls)

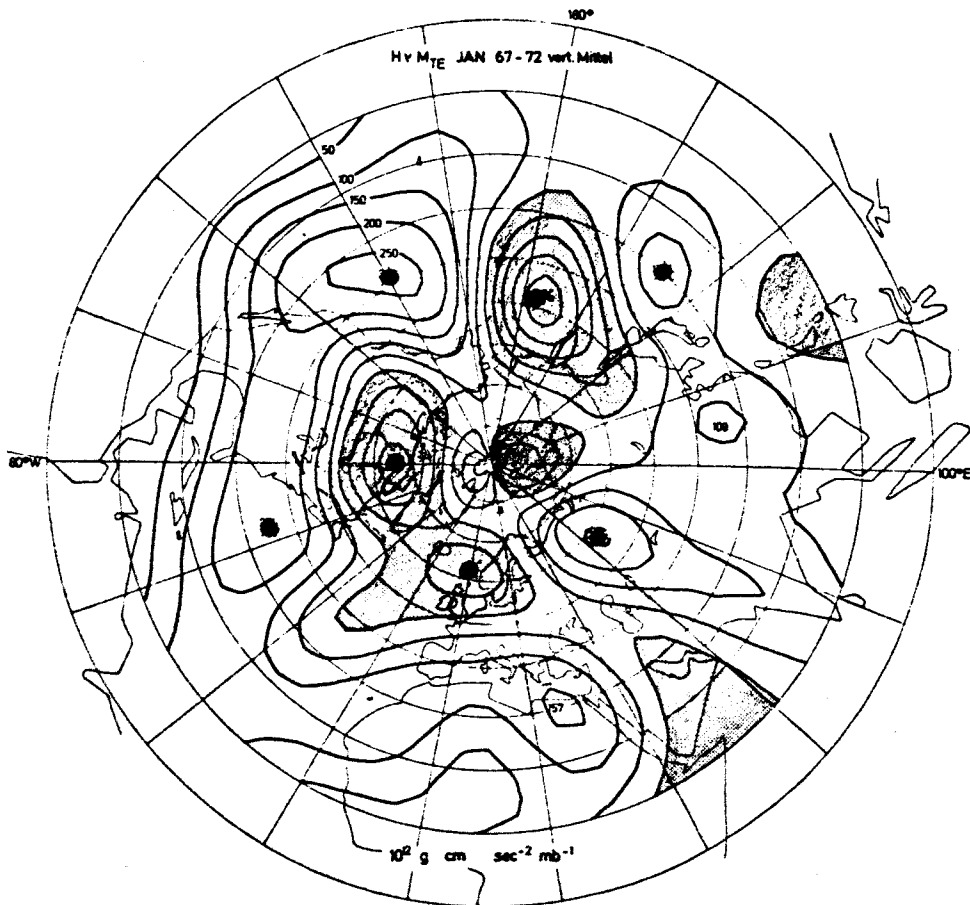
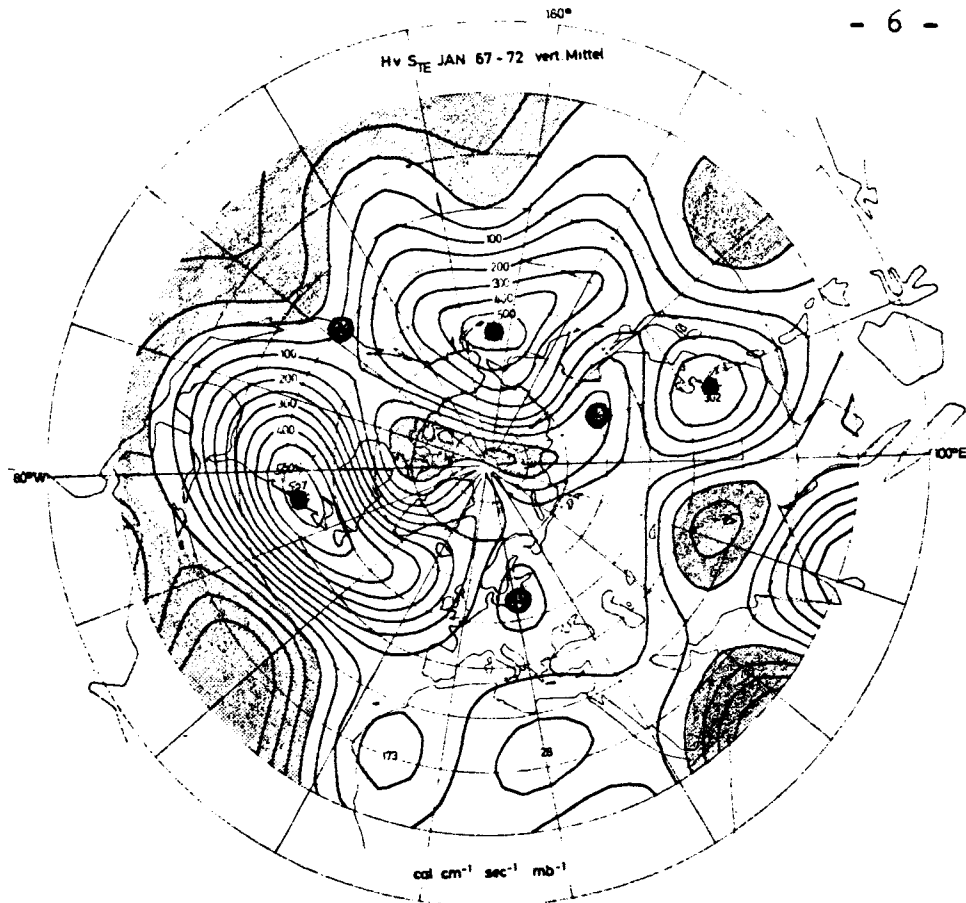


Abb.3 oben: Der meridionale Fluß von sensibler Energie im vertikalen Mittel für den Januar (1967 bis 1972).
unten: Der meridionale Fluß von Drehimpuls im vertikalen Mittel für den Januar (1967 bis 1972).
Ein südwärts gerichteter Transport ist schraffiert.

Einige Stellen, an denen die Transporte maximal oder minimal sind, sollen in dieser Diplomarbeit genauer untersucht werden. Dazu werden Energiespektren (T, Φ, u, v) und Cospektren (Tu, Tw, uv) für die Niveaus 850, 500 und 200 mb erstellt. Diese Niveaus wurden gewählt, weil im langjährigen Mittel die $\overline{T'v'}$ - Transporte in 850 und 200 mb maximal, in 500 mb etwas weniger intensiv sind. Die Energiespektren werden in einer Diplomarbeit von Ulla HERRMANNSEN untersucht, die Cospektren in dieser Arbeit.

Da keine Meßwerte exakt an den ausgewählten Punkten vorhanden sind, werden die Werte des jeweils nächsten Gitterpunktes des DWD-Gitternetzes verwendet. Der Abstand zwischen wahren Punkt und Gitterpunkt beträgt höchstens 250 km. Tab. 1 gibt Auskunft über die Lage der Gitterpunkte.

2.2 ERSTELLUNG DER ZEITREIHEN

Zur Verfügung standen die Magnetbänder des DWD mit Werten von T und Φ an den Gitterpunkten des DWD-Gitternetzes in den Standarddruckniveaus zu den Terminen 00.00 und 12.00 GMT. Der Inhalt von 56 Magnetbändern überdeckt den gewünschten 10jährigen Zeitraum vom 1.4.1967 bis 31.3.1977. Diesem Zeitraum entsprechen 7306 Termine:

$$(10 \text{ Jahre} * 365 \text{ Tage} + 3 \text{ Schalttage}) * 2 \frac{\text{Termine}}{\text{Tag}} = 7306 \text{ Termine}$$

Es wurde zunächst überprüft, ob alle Blöcke, die gebraucht werden, auf den Magnetbändern vorhanden sind. Dabei wurde festgestellt, daß manchmal ganze Termine oder einzelne Blöcke fehlen, ohne daß (wie in der DWD-Anleitung beschrieben) ein Pseudotermin auftritt.

Weiterhin wurde ein Programm erstellt, mit dessen Hilfe T - und Φ -Werte an den 13 ausgewählten Gitterpunkten in den Niveaus 850, 500 und 200 mb herausgefiltert werden. Auch wurden die Φ -Werte der 4 an den Hauptpunkt angrenzenden Nachbarpunkte ermittelt, um mit ihrer Hilfe die geostrophischen Windkomponenten für die Gitterpunkte zu berechnen. (Abb. 4)

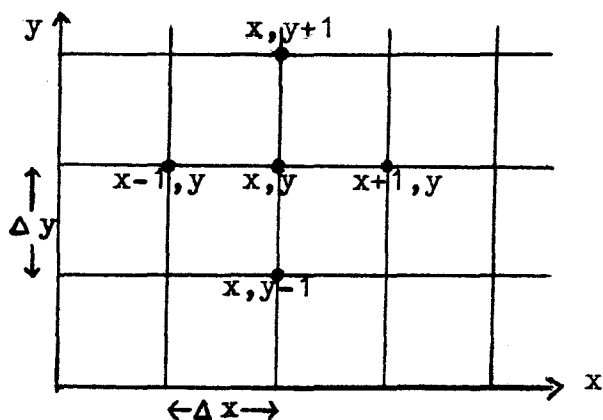


Abb. 4

Der geostrophische Wind wird berechnet mit:

$$v_g = + \frac{1}{f} \frac{d\Phi}{dx} \approx + \frac{1}{f} \frac{\Phi(x+1, y) - \Phi(x-1, y)}{2 \Delta x} \quad (2.1)$$

$$u_g = - \frac{1}{f} \frac{d\Phi}{dy} \approx - \frac{1}{f} \frac{\Phi(x, y+1) - \Phi(x, y-1)}{2 \Delta y} \quad (2.2)$$

In die Prozedur zur Berechnung des geostrophischen Windes geht ein, daß die x- und y-Achsen des DWD-Gitternetzes nicht den Ost-west- und Nord-Süd-Richtungen entsprechen. Bei fehlenden Daten wurde linear zwischen den Werten vom Vor- und Nachtermin interpoliert.

Nach Anwendung dieses Programms ergaben sich 7306 Blöcke. Jeder Block beinhaltet einen Termin mit T' , Φ' , u'_g , v'_g in den Niveaus 850, 500 und 200 mb.

Die Daten dieser 7306 Blöcke wurden zu 156 Zeitreihen (13 Punkte * 4 Arten (T' , Φ' , u'_g , v'_g) * 3 Niveaus = 13 * 4 * 3 = 156) umgeordnet, wobei die Trommel als Zwischenspeicher benutzt wurde, weil der Kernspeicherplatz der X8 nicht ausreichte. Die Zeitreihen wurden im IfM-Format auf einem X1-Magnetband gespeichert.

Um eventuelle Übertragungsfehler der Daten zu korrigieren, wurden Mittelwert und Standardabweichung σ jeder Zeitreihe berechnet. Werte, die um mehr als 4σ vom Mittelwert abweichen, und augenscheinlich falsch sind, wurden durch lineare Interpolation ersetzt. Insgesamt traten 240 Überschreitungen der 4σ -Grenze auf. Dies entspricht bei einer Werteanzahl von 1 139 736 nur 0.2 ‰. In einer Zeitreihe gab es maximal 12 Überschreitungen der 4σ -Grenze, d.h. 1.6%.

2.3 BESTIMMUNG VON ENERGIE- UND COSPEKTREN

Gegeben sind zwei Zeitreihen $Z_1(t)$ und $Z_2(t)$. Jede Zeitreihe hat N Meßwerte. Der Abstand zwischen zwei Meßpunkten ist Δt . Man kann eine derartige Zahlenfolge darstellen als Fourierreihe:

$$F(t) = a_0/2 + \sum_{k=1}^{N-1} a_k \cos(k\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{N-1} b_k \sin(k\omega_0 t) \quad (2.3)$$

Die a_k und b_k sind die Fourierkoeffizienten, welche mit Hilfe der Fast Fourier Transform (FFT) berechnet werden.

ω_0 ist die Grundfrequenz. Es gilt:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{N\Delta t} \quad (2.4)$$

Der Spektralwert des Energiespektrums bei der Frequenz $k\omega_0$ wird berechnet nach der Formel

$$E(k) = a_k^2 + b_k^2 \quad (2.5)$$

Trägt man die Spektraldichte $\frac{E(k)}{\Delta\omega}$ über dem Logarithmus der Frequenz auf, um die Frequenzachse zu verkürzen, wird der Energiewert mit der Frequenz $k\omega_0$ multipliziert und die Größe $S(k) = k\omega_0 \frac{E(k)}{\Delta\omega}$ über der Frequenz aufgetragen. Damit ist die Fläche unter der Kurve der Energie proportional.

Das Kreuzspektrum $E_{12}(k)$ zweier Zeitreihen Z_1 und Z_2 wird folgendermaßen berechnet:

$$E_{12}(k) = \underbrace{(a_1 a_2 + b_1 b_2)}_{\text{CSP}} - i \underbrace{(a_1 b_2 + a_2 b_1)}_{\text{QSP}} \quad (2.6)$$

Der Index k wurde bei den Fourierkoeffizienten der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Das Kreuzspektrum ist eine komplexe Größe. Sein Realteil, das sogenannte Cospektrum CSP, gibt den "In-Phasen-Teil" der beiden Prozesse an, während der Imaginärteil, das Quadraturpektrum QSP, der Anteil ist, bei dem die Phasendifferenz zwischen beiden Prozessen 90° beträgt.

Das Kreuzspektrum kann auch durch Kohärenz (Koh) und Phase φ beschrieben werden:

$$\text{Koh} = \frac{|E_{12}|}{\sqrt{E_{11} E_{22}}} = \frac{\sqrt{\text{CSP}^2 + \text{QSP}^2}}{\sqrt{E_{11} E_{22}}} \quad (2.7)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\text{QSP}}{\text{CSP}} \quad (2.8)$$

$$\text{CSP} = \text{Koh} \sqrt{E_1 E_2} \cos \varphi \quad (2.9)$$

$$\text{QSP} = \text{Koh} \sqrt{E_1 E_2} \sin \varphi \quad (2.10)$$

Die Kohärenz ist ein frequenzabhängiger Korrelationskoeffizient. Er sagt aus, wie ähnlich sich die Zeitreihen $Z_1(t)$ und $Z_2(t)$ auf der Frequenz $k\omega_b$ sind, wobei egal ist, ob die beiden Prozesse gegeneinander zeitverschoben sind oder nicht. Die Kohärenz kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. 0 bedeutet keine, 1 bedeutet totale Korrelation bei der betreffenden Frequenz.

2.4 ANWENDUNG DES SPEKTRALPROGRAMMS

Aus den korrigierten Zeitreihen wurden mit Hilfe eines vorhandenen Spektralprogramms Energie- und Cospektren berechnet. Folgende Dinge wurden im Programm berücksichtigt:

- Der lineare Trend wurde bei jeder Zeitreihe eliminiert.
- Jede Zeitreihe wurde aufgespalten in 6 Teilzeitreihen à 2048 Werte bzw. 27 Teilreihen à 512 Werte. (Die Anzahl der Teilreihen ergibt sich aus Überlegungen zur statistischen Absicherung, s. Abschnitt 2.5)
Es ist wichtig, daß die Länge der Teilzeitreihen eine 2er-Potenz ist, da die Spektren mit Hilfe der Fast-Fourier-Transform ("FFT") berechnet werden.
Die Teilzeitreihen überlappen sich um ca. 50% und werden so noch als unabhängig voneinander angesehen. Es wird von jeder Teilzeitreihe ein Spektrum berechnet, und der Mittelwert der 6 bzw. 27 Spektren ist dann das Ergebnis.
- Ein HANNsches Datenfenster wurde angewendet, um dem Effekt, der durch die Endlichkeit der Zeitreihen ver-

ursacht wird, entgegenzuwirken. Dabei werden die Nebenmaxima eines Spektralpeaks unterdrückt, leider aber auch das Hauptmaximum verbreitert.

Die maximale Frequenz f_N (NYQUIST-Frequenz) eines Spektrums ist gegeben durch:

$$f_N = \frac{2\pi}{2\tau}, \quad \tau = \text{Meßwertabstand} \quad (2.11)$$

$$\tau = 12 \text{ h} = 1/2 \text{ Tag} \Rightarrow f_N = 1 \left[\frac{2\pi}{\text{Tag}} \right]$$

Im 1. Durchlauf (6 Teilreihen à 2048 Werte) berechnet das Spektralprogramm Spektralwerte bei den Frequenzen

$$\frac{1}{a} \quad \frac{2}{a} \quad \frac{3}{a} \quad \frac{4}{a} \quad \frac{5}{a} \quad \frac{6}{a} \quad \dots \quad \frac{1023}{a} \quad \frac{1024}{a} \quad \left[\frac{2\pi}{\text{Tag}} \right], \quad a = \frac{2048}{2} = 1024$$

Bei Mittelung über je 3 Werte bleiben Spektralwerte bei

$$\frac{2}{a} \quad \frac{3}{a} \quad \frac{4}{a} \quad \frac{5}{a} \quad \frac{6}{a} \quad \dots \quad \frac{1023}{a} \quad \left[\frac{2\pi}{\text{Tag}} \right]$$

entsprechend

Perioden von 512, 341, 256, 205, 171, ... ca. 1 [Tag]

Im 2. Durchlauf (27 Teilreihen à 512 Werte) liefert das Programm Spektralwerte für die Frequenzen

$$\frac{1}{a} \quad \frac{2}{a} \quad \frac{3}{a} \quad \frac{4}{a} \quad \dots \dots \dots \quad \frac{255}{a} \quad \frac{256}{a} \quad \left[\frac{2\pi}{\text{Tag}} \right], \quad a = \frac{512}{2} = 256$$

Nach Mittelung über je 5 Werte bleiben Spektralwerte bei

$$\frac{3}{a} \quad \frac{4}{a} \quad \frac{5}{a} \quad \dots \quad \frac{254}{a} \quad \left[\frac{2\pi}{\text{Tag}} \right]$$

entsprechend

Perioden von 85 64 51 ... ca. 1 [Tag]

Das Spektralprogramm berechnet die Energiespektren T'^2 , Φ'^2 , $u'_g{}^2$, $v'_g{}^2$ sowie Kohärenz und Phase von $T'u'_g$, $T'v'_g$, $u'_g v'_g$.

2.5 STATISTISCHE ABSICHERUNG DER ERGEBNISSE

Meteorologische Zeitreihen, wie die, die für diese Arbeit zur Verfügung stehen, sind weder stationär, noch sind die Werte einer Zeitreihe unabhängig voneinander. Ursache für Nichtstationarität sind z.B.: Jahresgang, täglicher Gang, Säkularvariationen, regionale Erscheinungen. Außerdem ist jeder Wert der Zeitreihe nicht ganz zufallsbedingt, sondern zu einem gewissen Teil abhängig von dem Wert davor:

$$x_{n+1} = y_n + q x_n \quad (2.12)$$

mit y_n : Zufallswert

x_n, x_{n+1} : Werte der Zeitreihe

$$0 < q < 1$$

Lehrbücher und Aufsätze über Statistik setzen aber stationäre und stochastische (d.h. ausschließlich zufällige) Wertfolgen voraus, um über die Zuverlässigkeit der Ergebnisse Aussagen zu treffen. Es scheint in der Literatur noch nichts zu geben, das befriedigend das Problem meteorologischer Zeitreihen behandelt. Daher sollen wenigstens die Methoden der allgemeinen Statistik herangezogen werden - sozusagen als 1. Näherung - um einen groben Eindruck über die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu vermitteln.

Nach NUTTAL (1971) gilt für die Zahl der Freiheitsgrade K :

$$K = \frac{2 * P}{\sum_{k=-(P-1)}^{P-1} \left(1 - \frac{|k|}{P}\right) \left| \frac{\bar{\Phi}_u \left(k \frac{T/L - 1}{P - 1}\right)}{\bar{\Phi}_u(0)} \right|^2} \quad (2.13)$$

P : Zahl der Teilzeitreihen

T/L : Zeitreihenlänge/Teilzeitreihenlänge

$\bar{\Phi}_u$: Autokorrelation des Datenfensters

Die Anzahl der Freiheitsgrade ist also abhängig von Anzahl und Länge der Teilzeitreihen sowie der Form des Datenfensters.

Das Spektralprogramm liefert $K \approx 2P$. Die Zahl der Freiheitsgrade wächst, wenn man eine Mittelung der Spektralwerte

vornimmt. Überlappen sich die Teilzeitreihen um 50 % und mittelt man über 3 bzw. 5 Spektralwerte, so beträgt K ca. 3P bzw. 5P.

Es wird vorausgesetzt, daß die Spektralwerte unabhängig voneinander sind und einer χ^2 -Verteilung genügen. Mit Hilfe des χ^2 -Tests, in den K eingeht, werden die $(1-\alpha) \times 100\%$ igen Intervalle für die Werte der Energiespektren, für Kohärenz und Phase berechnet. (α = Irrtumswahrscheinlichkeit, z.B.: $\alpha = 0.05 \hat{=}$ Intervall, in dem mit 95%iger Wahrscheinlichkeit der Spektralwert liegt.) Je größer die Zahl der Freiheitsgrade wird, desto enger wird das Konfidenzintervall für die Energiespektralwerte und für die Kohärenz- und Phasenwerte.

Außerdem wird die 95%ige Kohärenzschwelle C_{95} berechnet. Auch sie ist abhängig von K. Liegt ein Kohärenzwert $Koh(\omega)$ über dieser Schwelle, heißt das, daß die beiden Zeitreihen bei der Frequenz ω mit über 95%iger Wahrscheinlichkeit korreliert sind. Man kann also das Cospektrum bei dieser Frequenz interpretieren. Liegt der Kohärenzwert aber unter der Schwelle, ist es wenig sinnvoll, über den Cospektralwert bei dieser Frequenz etwas auszusagen, denn bei dieser Frequenz sind die Zeitreihen so wenig korreliert, daß der Spektralwert im Rauschen untergeht.

Am Punkt A, Boston (43°N , 70°W), 850 mb, wurden verschiedene Glättungen probiert, um die beste Lösung bzgl. statischer Absicherung und bzgl. Länge und Auflösungsvermögen der Spektren zu finden. Tab.2 und Abb.5 zeigen die Möglichkeiten. Die Anzahl der Freiheitsgrade K und die Kohärenzschwelle C_{95} wurden nach Formeln von J. KIELMANN und Dr. J. WILLEBRAND (Abt. Theoretische Ozeanographie, I.f.M. Kiel, persönliche Rücksprache) berechnet.

Möglichkeit a) wird für den langperiodischen Bereich (≤ 70 Tage) gewählt, weil sie den Jahrespeak enthält.

	P	M	L	Über- lappung	effektive Wertezahl	$\Delta\nu \left[\frac{1}{\text{Tag}} \right]$	K	C_{95}
a)	6	3	2048	997	7303	1/1024	21	0.53
b)	13	3	1024	501	7300	1/ 512	45	0.38
c)	27	3	512	251	7298	1/ 256	~75	0.28
d)	27	5	512	251	7298	1/ 256	143	0.21
e)	58	3	256	133	7267	1/ 128	~175	0.18

Tab.2: Statistik, Vergleich der Glättungsmöglichkeiten

P: Zahl der Teilstücke

M: Mittelung über M Spektralwerte

L: Länge der Teilreihen

$\Delta\nu$: Auflösungsvermögen, Frequenzabstand der Spektralwerte

K: Freiheitsgrade

C_{95} : 95%ige Kohärenzschwelle

Als beste Lösung für den kurzperiodischen Bereich gilt Einteilung d). Die 95%ige Kohärenzschwelle liegt mit 0.21 nicht wesentlich über 0.18 von e), während das Spektralbild von e) schon zu stark geglättet wirkt.

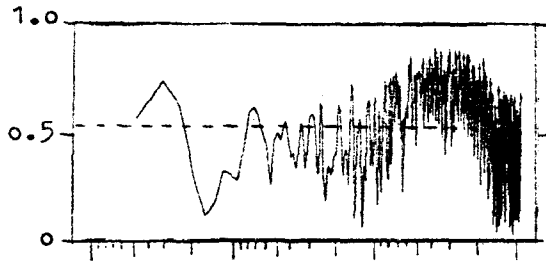
Der Periodenbereich 70 - 512 Tage wird mit Einteilung a) berechnet, der Periodenbereich 1 - 50 Tage mit d). Die beiden Kurvenstücke werden zwischen 50 und 70 Tagen geradlinig (bei logarithmischer x-Achse!) verbunden, wobei darauf geachtet wird, daß kein Peak in diesem Periodenintervall unterdrückt wird.

In einigen Cospektren treten extreme Tagespeaks auf, die zudem eine hohe Kohärenz aufweisen. Diese Werte sind dennoch nicht interpretierbar oder als zuverlässig anzusehen, weil Energie noch höherer Frequenzen das Spektrum am hochfrequenten Ende verfälscht (sog. "Aliasing").

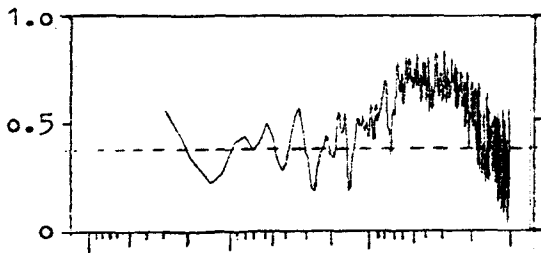
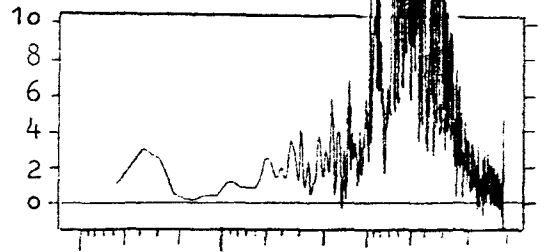
Kohärenz

$\nu^{Co T, v}$

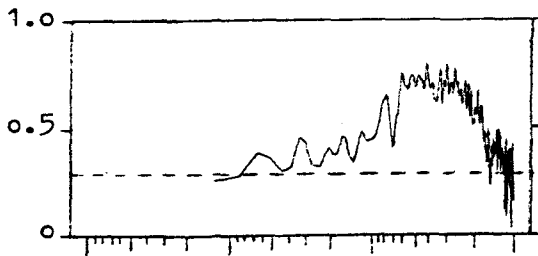
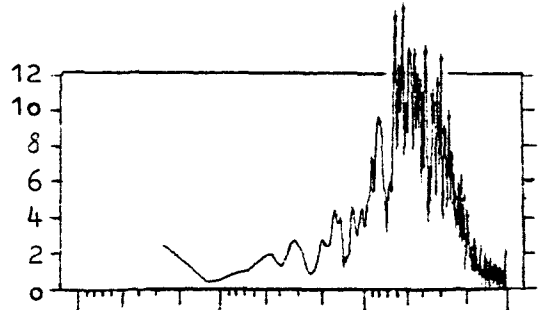
$[^{\circ}K m sec^{-1}]$



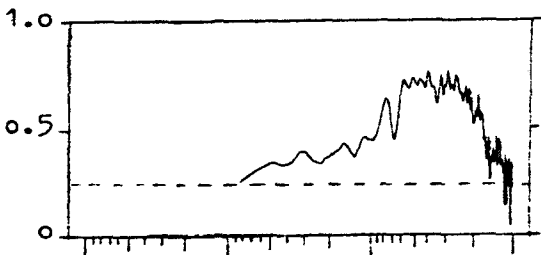
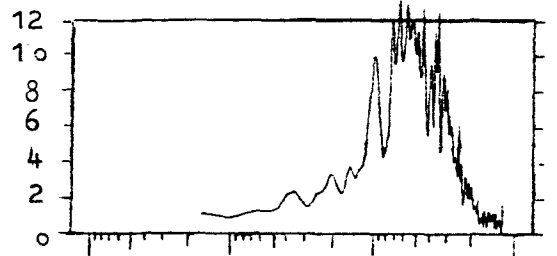
$K = 21$



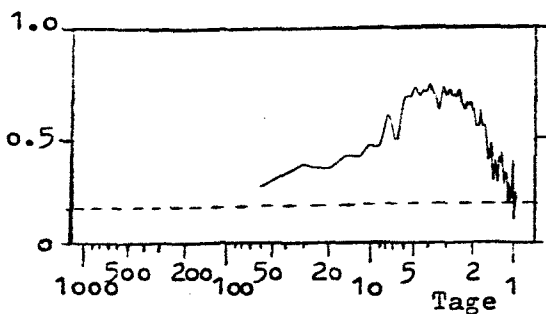
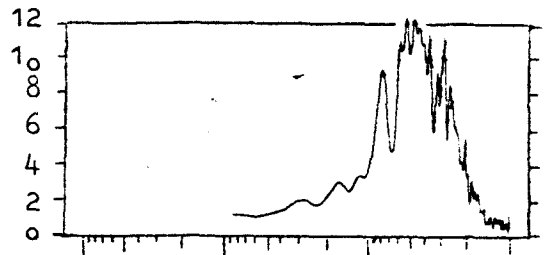
$K = 45$



$K \approx 75$



$K = 143$



$K \approx 175$

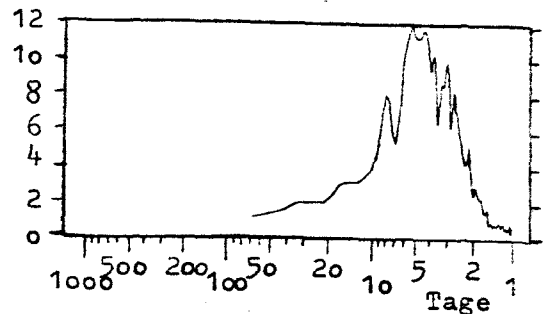


Abb.5:

Glättungsmöglichkeiten am Beispiel
des Gitterpunktes A ($43^{\circ} N, 70^{\circ} W$), Boston, 850 mb

2.6 BERECHNUNG DER TRANSPORTE AUS DEN COSPEKTREN

Für den meridionalen Transport sensibler Energie durch alle Eddies in einer Schicht von 1 mb Dicke gilt:

$$\frac{1}{g} \frac{\int_{p_0}^{p_0+1\text{mb}} c_p [\overline{T'v'}] dp}{\text{mb}} = \frac{c_p}{g} \int_0^\infty \text{Co}_{T,v}(\nu) d\nu \quad (2.14)$$

und entsprechend für den Drehimpulstransport:

$$\frac{1}{g} \frac{\int_{p_0}^{p_0+1\text{mb}} a \cos\varphi [\overline{u'v'}] dp}{\text{mb}} = \frac{a \cos\varphi}{g} \int_0^\infty \text{Co}_{u,v}(\nu) d\nu \quad (2.15)$$

Umrechnung der Einheiten der Cospektren in Einheiten der Transportgrößen ergibt:

$$\begin{aligned} \left[\text{K} \frac{\text{m}}{\text{sec}} \right] &\hat{=} 0.245 \left[10^4 \frac{\text{cal}}{\text{sec m mb}} \right] \\ &\hat{=} 1.024 \left[10^4 \frac{\text{J}}{\text{sec m mb}} \right] \\ \cos\varphi \left[\frac{\text{m}^2}{\text{sec}^2} \right] &\hat{=} \cos\varphi 0.649 \left[10^8 \frac{\text{kg m}}{\text{sec}^2 \text{ mb}} \right] \end{aligned}$$

ERGEBNISSE

3. TRANSPORT SENSIBLER ENERGIE

3.1 AUSFÜHRLICHE INTERPRETATION AM BEISPIEL DES GITTERPUNKTES A (BOSTON, 43°N, 70°W)

Zunächst sollen die Ergebnisse für Punkt A ausführlich besprochen werden, um zu zeigen, was bei einer Interpretation zu beachten ist. Punkt A diente in dieser Arbeit bereits als Beispielpunkt für Überlegungen zur Statistik, und er weist nach der Untersuchung von SPETH (1974) den größten meridionalen Transport sensibler Energie auf.

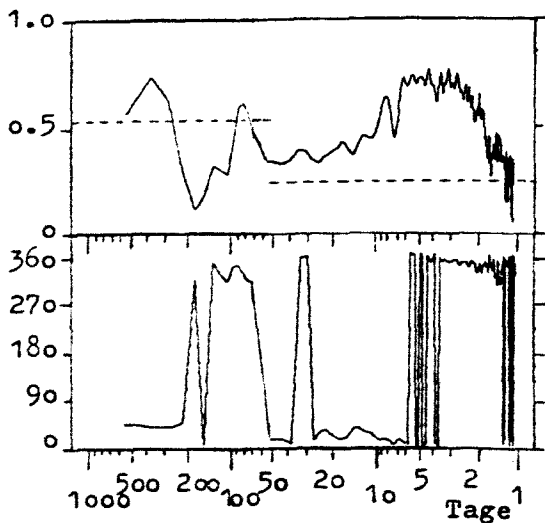
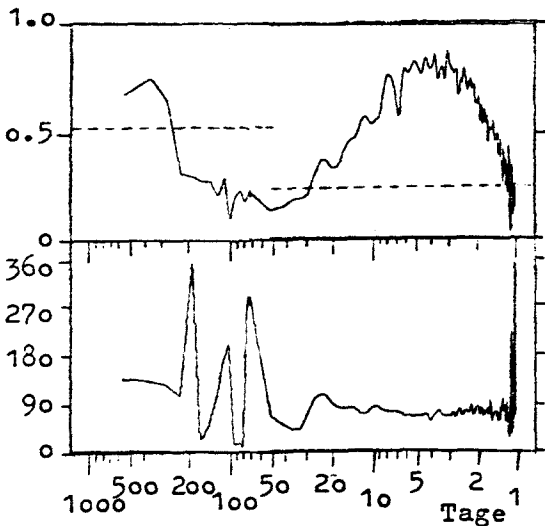
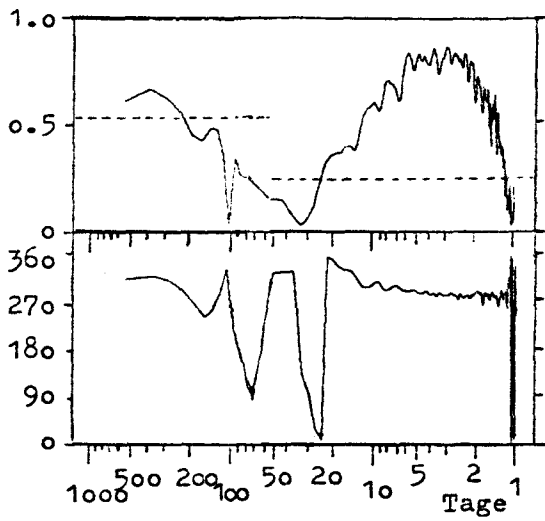
3.1.1 Meridionaler Wärmetransport an Punkt A

Abb. 6 zeigt Kohärenz, Phase und Cospektren in 200, 500 und 850 mb für Punkt A. In allen drei Niveaus liegt die Kohärenz in großen Periodenbereichen über der 95%igen Kohärenzschwelle, die gestrichelt eingezeichnet ist. Der Jahrespeak und der Periodenbereich ≤ 30 Tage zeigen hohe Kohärenz und sind daher im Cospektrum interpretierbar.

Interessant an den Phasenbildern ist der Bereich zwischen 1 und ca. 10 Tagen. Hier erkennt man eine Phasenverschiebung mit der Höhe, die in Abschnitt 3.1.2 erläutert wird.

Die großen Nordwärtstransporte erfolgen vor allem durch die langen Wellen, auch Rossby-Wellen genannt. Der größte Wert liegt mit ca. $12 \text{ [}^\circ\text{K m sec}^{-1}\text{]}$ bei 5 Tagen in 850 mb. Punkt A befindet sich im Winter in der Nähe der Polarfront an der Südostflanke des nordamerikanischen Trog (s. z.B. DEFANT/MÖRTH, 1978), d.h. innerhalb der allgemeinen Zugbahn von Zyklonen. Perioden von ca. 1 - 2 Tagen können hauptsächlich synoptischen Wellenstörungen zugeordnet werden. Es ist aber nicht möglich, immer die langen Wellen

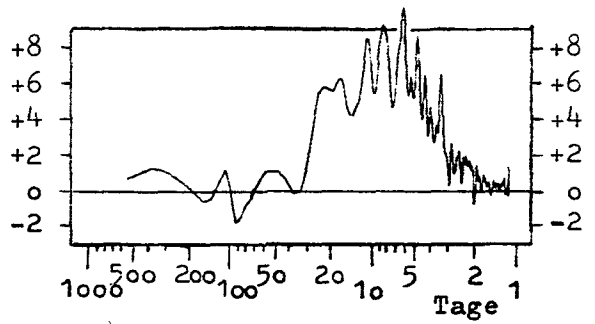
Kohärenz
Phase



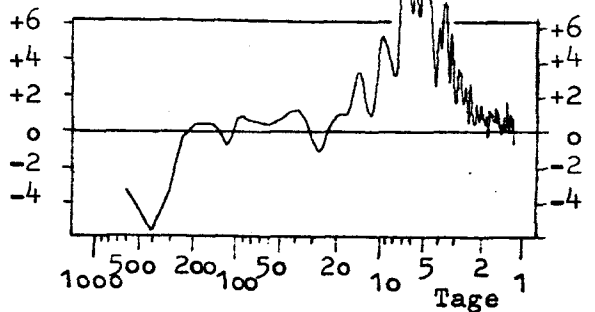
ν Co T, v

$$\left[\text{K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

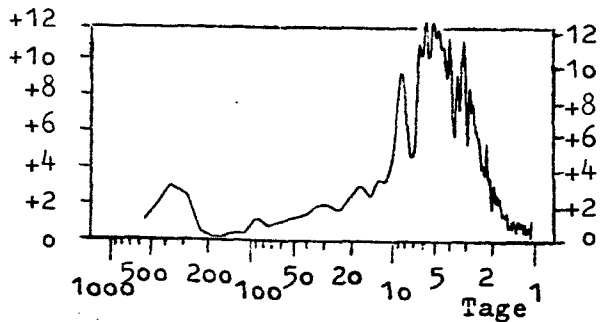


Abb.6: Punkt A, Boston 43° N, 70° W

der oberen Schichten und die Tiefdrucksysteme in meist tieferen streng voneinander zu trennen, weil zeitweise stark entwickelte Wirbelzyklonen Deformationen von der Größenordnung einer Rossby-Welle in der Höhenströmung hervorrufen können.

Die Energiespektren (s. HERRMANNSEN, Diplomarbeit I.f.M., Kiel, 1979) zeigen, daß die Varianz der Temperatur im (3 - 7)-Tage-Bereich an Punkt A in allen drei Niveaus ungefähr gleich ist, während die Varianz von v_g in diesem Periodenintervall mit der Höhe zunimmt. Man könnte deshalb annehmen, daß auch die Größe des Transports mit der Höhe wächst. Das ist aber nicht der Fall, sondern es treten gerade im 850-mb-Niveau die größten Transporte auf, weil in diesem Niveau die Schwingungen von T und v_g in Phase verlaufen, während sie in 500 und 200 mb um fast $1/4$ Wellenlänge gegeneinander verschoben sind. Es muß daher bei den Cospektralwerten unbedingt auch auf die Phase geachtet werden (vergl. Formel (2.9)).

Nordwärtstransporte sensibler Energie sind auch bei Perioden, die größer als 7 Tage sind, zu verzeichnen. Bis zu Perioden von 20 Tagen liegt in allen drei Niveaus die Kohärenz über C_{95} . Die Peaks (18 Tage in 200 mb, 9 und 13 Tage in 500 mb, 9 Tage und der Bereich bei 20 Tagen in 850 mb) sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf Indexschwankungen, vor allem Blocking-Bildungen, zurückzuführen.

Die Energiespektren der meridionalen Windkomponente haben in allen drei Höhen keine Jahrespeaks (s. HERRMANNSEN, 1979). Außerdem fehlt eine Jahresschwankung im T'^2 -Spektrum in 200 mb, denn in der Nähe dieses Niveaus liegt im Mittel die Tropopause. Daher ist ein Jahrespeak in $Co_{T,v}$, 200 mb, kaum ausgebildet. Die Transporte durch die Jahreswelle in 500 und 850 mb sind relativ gering, weil das Produkt $T'v'_g$ (Jahr) wegen des unbedeutenden v'_g (Jahr) klein bleibt. Die Jahresschwankung von v_g ist so gering, weil die Achse des nordamerikanischen Troges nur eine schwache Änderung mit den Jahreszeiten erfährt.

Auffällig ist der südwärts gerichtete jährliche Wärmetransport in 500 mb. Er beruht auf der negativen Korrelation zwischen T' und v'_g (Phase $\approx 140^\circ$). Es gilt überwiegend im

Sommer: $T' > 0$, $v'_g < 0$, $v_g = \overline{v_g} - |v'_g| \Rightarrow$
Trogachse wenig östlich von Punkt A

Winter: $T' < 0$, $v'_g > 0$, $v_g = \overline{v_g} - |v'_g| \Rightarrow$
Trogachse wenig westlich von Punkt A

Der kleine Mittelwert $\overline{v_g} = -0.2$ [m/sec] (s. Tab. 3) bedeutet, daß Punkt A in 500 mb relativ recht nahe an der Trogachse liegt. Bereits eine geringe Schwankung der Trogachse (im Sommer wenig östlich von Punkt A, im Winter wenig westlich) bedingt einen negativen Jahrestransport sensibler Energie.

Die integrierten Cospektren (s. z.B. Abb.7) sollen nur eine erste Näherung sein, um einen Eindruck von der Größenordnung des gesamten Transportes zu bekommen. Die Zahlenwerte sollten nicht als allzu genau angesehen werden, weil auch über die Cospektralwerte summiert wird, die wegen ihrer geringen Kohärenz als unzuverlässig gelten. Die integrierten Energie- und Cospektren gehen aus den Spektren hervor, die mit 6 Teilreihen berechnet wurden.

Der Wert des integrierten Cospektrums bei der Periode P sagt aus, welche Menge die Wellen mit Perioden $\leq P$ insgesamt transportieren.

Die integrierten Spektren $\int \rho Co_{T,v} dv$ (Abb.7) an Punkt A zeigen in den drei Niveaus einen starken Anstieg bis zur Periode von ca. 10 Tagen auf Grund der großen Nordwärtstransporte durch Zyklonen

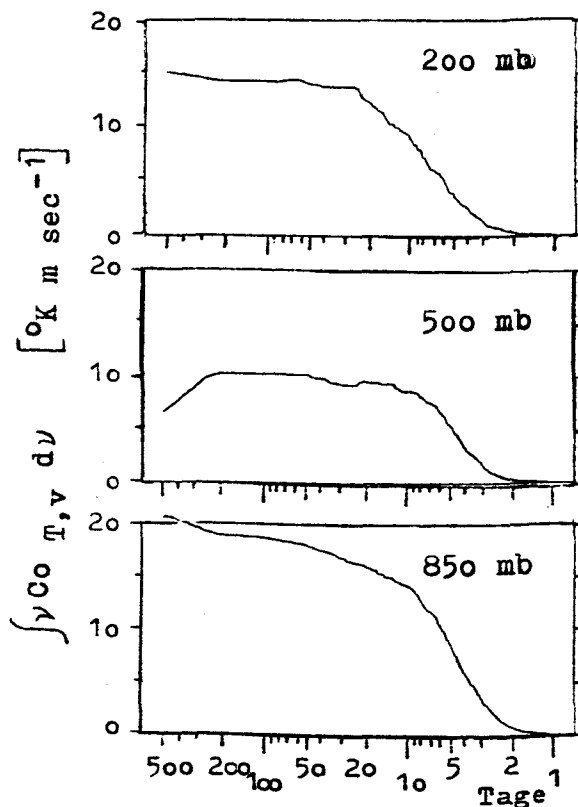


Abb.7: Integrierte Cospektren, meridionaler Transport sensibler Energie an Punkt A, Boston

und Rossby-Wellen. Während sich in 200 mb ab 20 Tagen der Wert zu höheren Perioden hin kaum verändert, weist 500 mb einen leichten Abfall wegen des negativen Jahrespeaks im Cospektrum auf, und 850 mb zeigt einen weiteren Anstieg wegen des kleinen positiven Jahrespeaks.

In 200 und 850 mb ist der Gesamttransport sensibler Energie nach Norden größer als in 500 mb. Diese Tatsache entspricht dem langjährigen Mittel. Die Größenordnung des Gesamttransportes bis zu Wellen mit Perioden von ca. 1 Jahr beträgt 10 bis 20 [$^{\circ}\text{K m/sec}$].

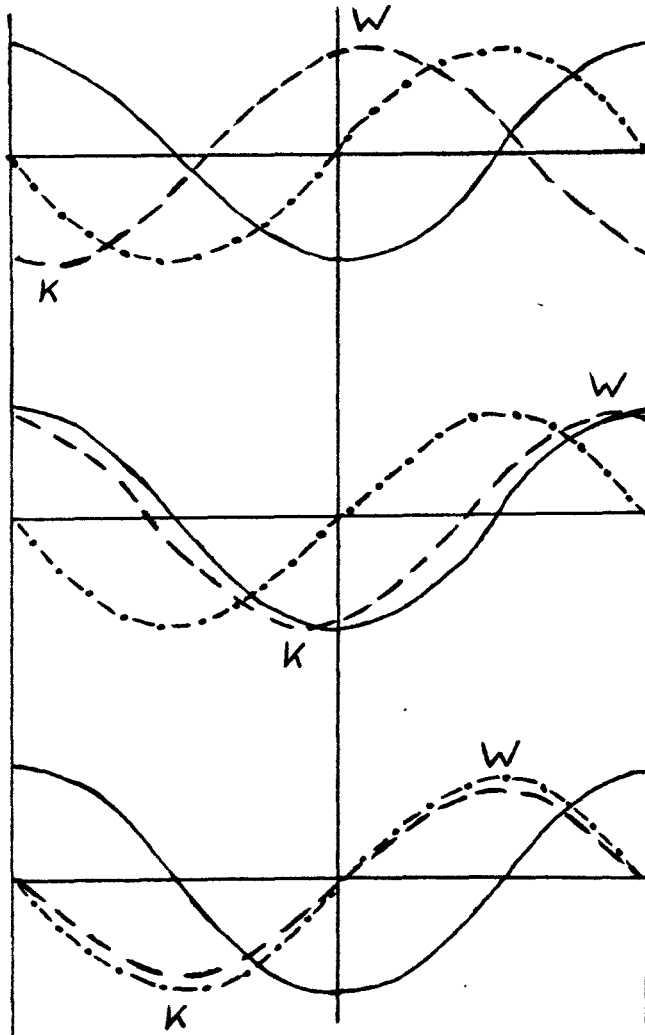
3.1.2 Die Phasenbeziehung zwischen T' und v'_g im Periodenbereich 1 - 10 Tage

Während in 850 mb T' und v'_g im Periodenbereich 1 - 10 Tage fast in Phase sind, liegt T' in 500 mb bzw. 200 mb ca. 70° bzw. 290° vor v'_g . Abb. 8 veranschaulicht dieses Verhalten. Unter der Voraussetzung, daß sich die Wellen mit konstanter Geschwindigkeit von West nach Ost verlagern, kann die Abszisse sowohl als Orts- als auch als Zeitphase angesehen werden. Wird weiterhin vereinfachend angenommen, daß $\overline{v_g} = 0$ und damit $v_g = \overline{v_g} + v'_g = v'_g$, kann man Tröge und Rücken der Höhenströmung direkt mit den Temperaturwellen in Beziehung setzen.

Es zeigt sich, daß in 850 mb Nordwinde kalt und Südwinde warm sind, so daß der meridionale Wärmetransport besonders effektiv ist.

In 500 mb sind die Tröge größtenteils relativ kalt und die Rücken warm, der Wärmetransport erfolgt jedoch noch vom warmen Süden zum kalten Norden. In 200 mb, d.h. in der unteren Stratosphäre, ist die polare Luft wärmer als die subtropische, und sensible Energie wird gegen den Temperaturgradienten nach Norden transportiert.

West ⇒ Ost



200 mb
 $T' 290^\circ$ vor v_g' $\hat{=}$
 $v_g' 70^\circ$ vor T'
 Trog warm
 Rücken kalt

500 mb
 $T' 70^\circ$ vor v_g'
 $T' \approx$ in Phase mit ϕ'
 Trog kalt
 Rücken warm

850 mb
 T' in Phase mit v_g'
 $\phi' 90^\circ$ vor T'
 Nordwind kalt
 Südwind warm

— ϕ'
 - · - v_g'
 - - - T'

Abb. 8: Phasenbeziehung zwischen T' und v_g' im Periodenbereich 1 - 10 Tage

Auch die Cospektren der anderen Punkte (B,C,D,E,F) zeigen eine derartige Phasenverschiebung mit der Höhe in diesem Periodenbereich. Eine solche Phasenbeziehung ist typisch für wandernde barokline Wellen (vgl. z.B. HARTMANN, 1974; DEFANT, 1974).

3.1.3 Zonaler Wärmetransport an Punkt A

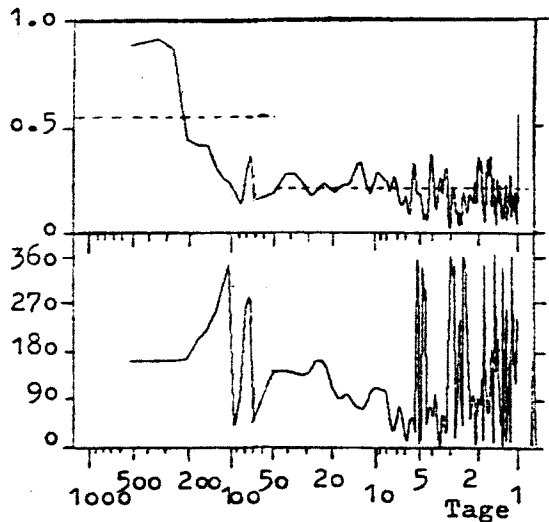
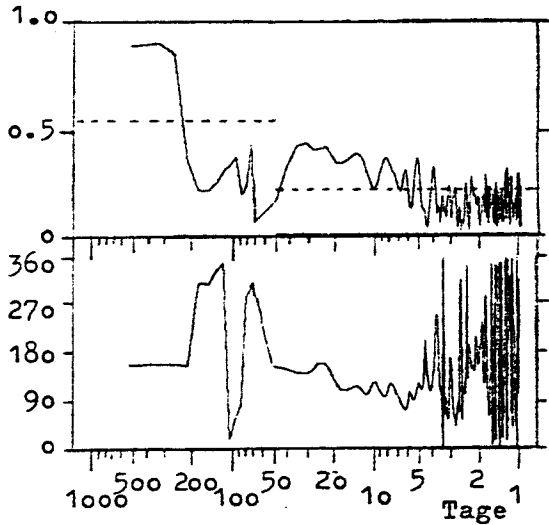
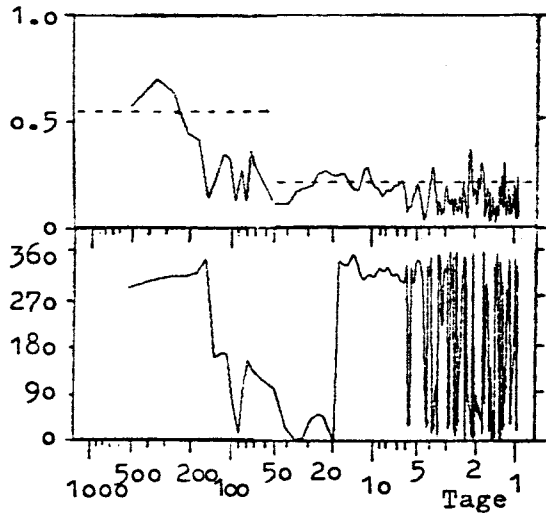
Bezgl. der Tu-Cospektren (Abb.9) ist Punkt A kein gutes Beispiel, weil die Spektren in weiten Periodenbereichen nicht kohärent sind und lediglich der Jahrespeak gesichert scheint.

In den Troposphärenniveaus 850 und 500 mb ist der Transport sensibler Wärme durch die Jahreswelle in zonaler Richtung negativ, d.h. nach Westen gerichtet. u'_g und T' schwingen fast gegeneinander (Phase $\approx 180^\circ$). Im Sommer ($T' > 0$) ist $u'_g < 0$, der Westwind $u_g = \overline{u_g} + u'_g$ ist relativ schwach. Im Winter dagegen ($T' < 0$, $u'_g > 0$) herrscht stärkerer Westwind. u'_g hat in 500 mb eine sehr große Jahresamplitude (s. HERRMANNSEN, 1979), bedingt durch die jährliche Verlagerung des Trops über Nordamerika und die kräftigere Zirkulation im Winter, so daß der zonale Jahrestransport an diesem Gitterpunkt in 500 mb überdurchschnittlich hoch ist.

Der Transport durch die jährliche Welle in 200 mb dagegen bleibt trotz hoher Varianz von u_g gering, weil die Temperaturschwankung nur sehr klein ist (vgl. Energiespektren, HERRMANNSEN).

Das integrierte Spektrum des zonalen Wärmetransportes (s. Abb. 10) verdeutlicht noch einmal die Wichtigkeit des Jahrespeaks für den zonalen Transport, der damit die gleiche Größenordnung erreicht wie der meridionale Fluß sensibler Energie.

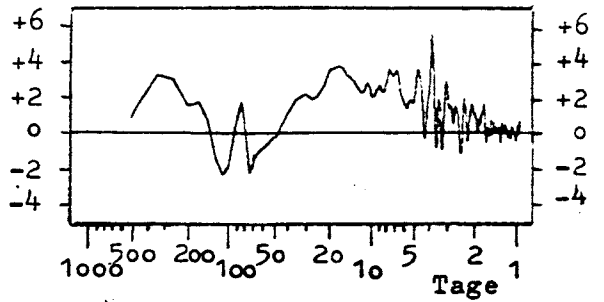
Kohärenz
Phase



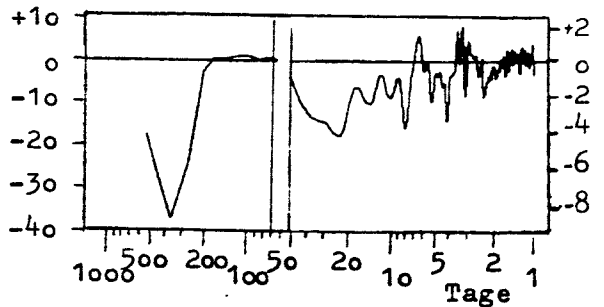
$\mu Co_{T,u}$

$$\left[\text{°K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$$

200 mb



500 mb



! 500 mb anderer Maßstab
im hochperiodischen Bereich !

850 mb

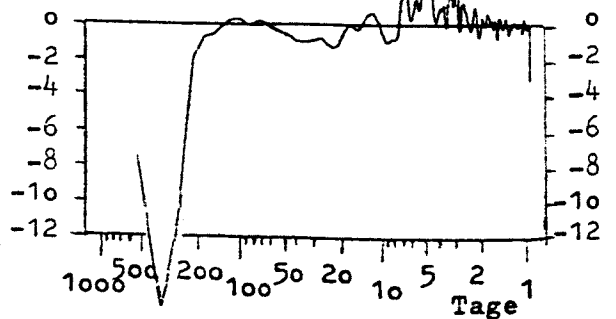


Abb.9: Punkt A , Boston

43° N, 70° W

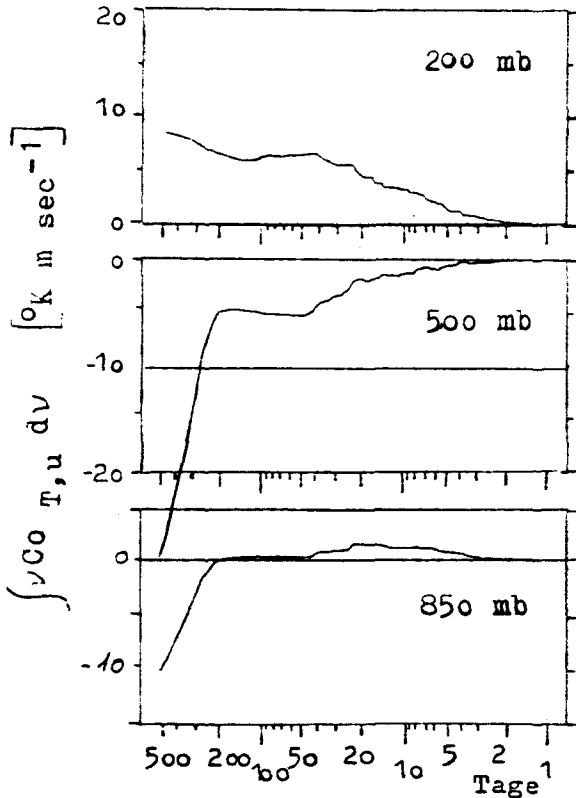


Abb. 10:
Integrierte Cospektren,
zonaler Transport
sensibler Energie an
Punkt A, Boston

3.2 BESONDERHEITEN DER ANDEREN PUNKTE

3.2.1 Punkt B, Beringmeer ($56^{\circ}N$, $172^{\circ}W$)

Eine Eigenart der Cospektren ($Co_{T,v}$) dieses Punktes (s. Abb. 11) sind die negativen Jahrespeaks in 200 und 500 mb, d.h., die Jahreswelle transportiert Wärme von Norden nach Süden und kompensiert damit zum Teil den Nordwärtstransport durch die Wellen mit kleinerer Periode. Dieses Verhalten wird verständlich, wenn man die Phasenbeziehung zwischen T' und v'_g beachtet und aus Mittelwert (Tab. 3) und Energiespektralwert (HERRMANNSEN, 1979) die mittleren meridionalen Windkomponenten für Sommer und Winter abschätzt: Es gilt:

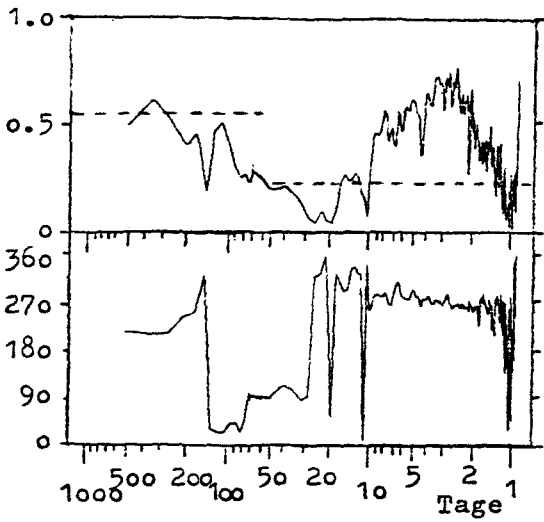
$$\overline{v_g} \text{ (Jahr)} = \overline{v_g} \pm v'_g \text{ (Jahr)} \approx 1.4 \pm 1.0 \text{ [m/sec]}$$

Sommer: $T' > 0$, $v'_g < 0 \Rightarrow \overline{v_g} \approx 0.4 \text{ [m/sec]} \hat{=} \text{schwacher Südwind}$

Winter: $T' < 0$, $v'_g > 0 = \overline{v_g} \approx 2.4 \text{ [m/sec]} \hat{=} \text{starker Südwind}$

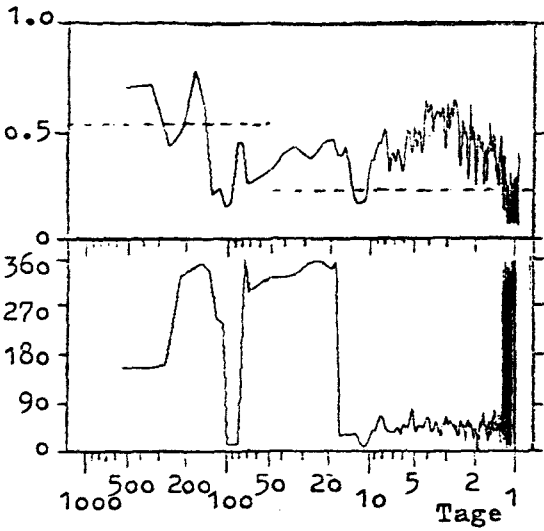
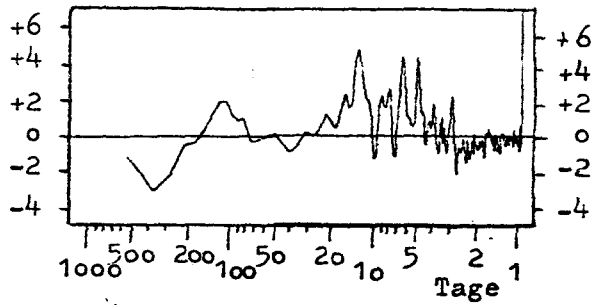
Kohärenz
Phase

v Co T, v

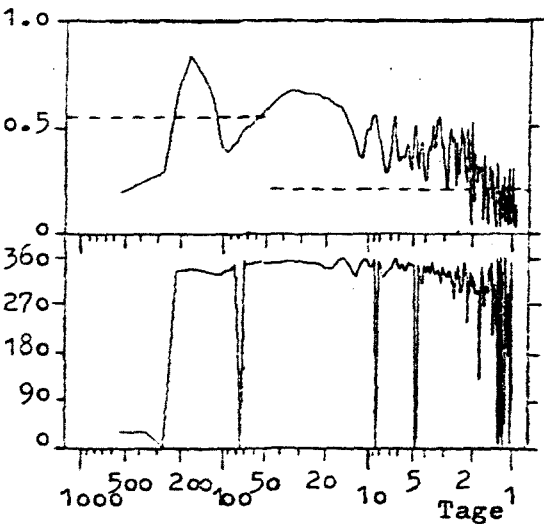
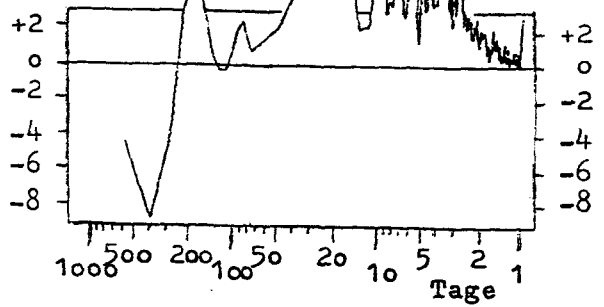


$[^{\circ}K m sec^{-1}]$ $[10^4 J sec^{-1} m^{-1} mb^{-1}]$

200 mb



500 mb



850 mb

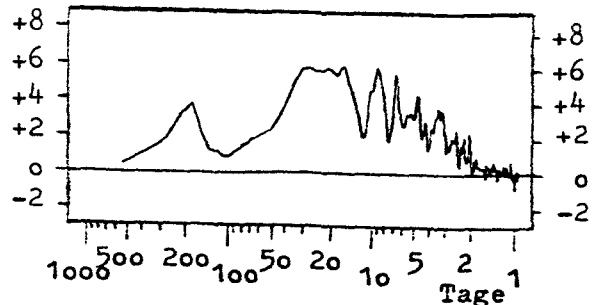
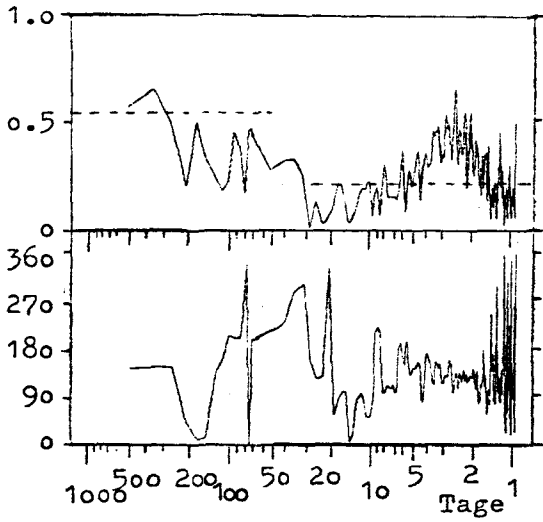


Abb.11: Punkt B, Beringmeer, $56^{\circ} N$, $172^{\circ} W$

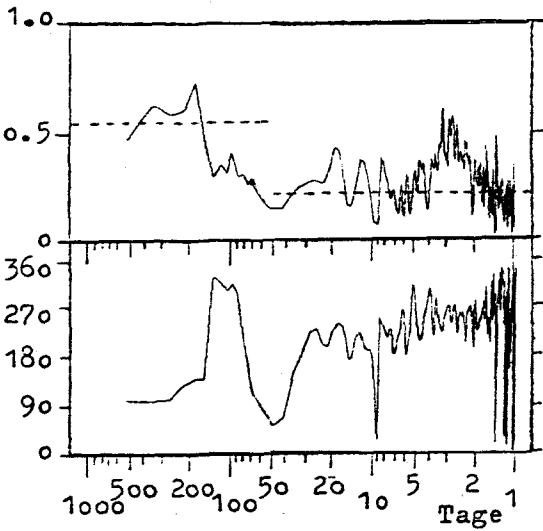
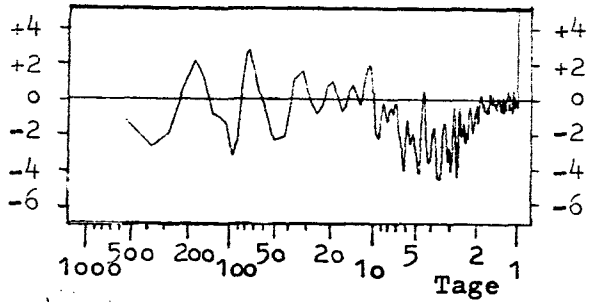
Kohärenz
Phase

ν Co T,u

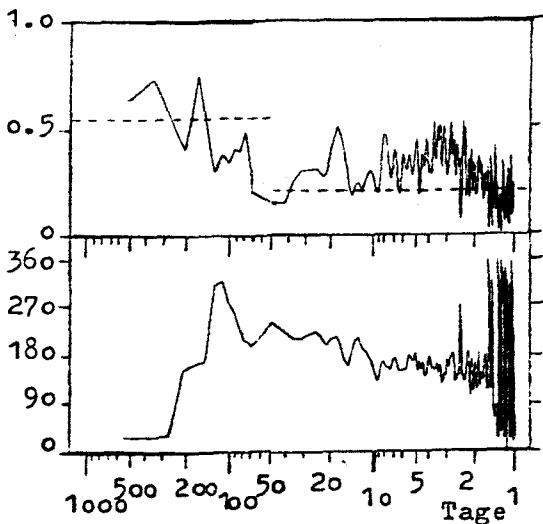
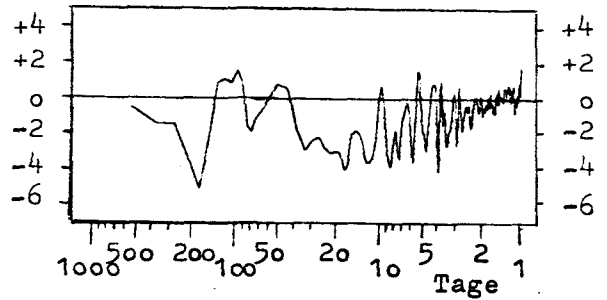


$$\left[\text{K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

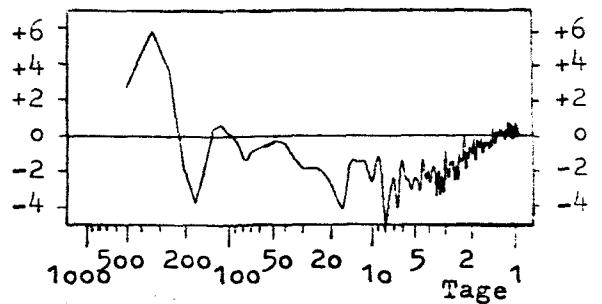


Abb.12: Punkt B , Beringmeer 56° N, 172° W

Diese Aussagen decken sich mit den langzeitlich gemittelten Höhenkarten (Fig. 48,49,52,53 in DEFANT/MÖRTH, 1978):

Im Sommer liegt Punkt B am Südrand eines Troges, d.h., die Meridionalwindgeschwindigkeit ist relativ klein, während im Winter an der Ostflanke des asiatischen Troges bzw. Westseite des ostpazifischen Rückens eine stärkere Südströmung vorherrscht.

Ähnliches gilt für den Punkt Wetterschiff C, den SPETH (1978) untersuchte und an dem ebenfalls ein südwärts gerichteter Wärmetransport durch die Jahreswelle in allen Niveaus auftritt.

In 850 mb ist bei Punkt B für den meridionalen Transport kein Jahrespeak erkennbar, weil die jährliche Schwankung von v_g in dieser Fläche zu gering ist.

Dagegen ist die jährliche Schwankung von u_g in 850 mb derart, daß im Sommer ($T' > 0$, $u'_g > 0$) der Westwind stärker ist als im Winter ($T' < 0$, $u'_g < 0$), (s. Abb. 12).

Ein Wärme fluß durch die Halbjahreswelle in 500 und 850 mb scheint gesichert zu sein, obwohl die Energiespektralwerte für die Halbjahresperiode nicht signifikant sind. Aber die hohe Kohärenz und das Auftreten in $Co_{T,u}$ und $Co_{T,v}$ sprechen für einen Transport durch diese Welle.

Warmluftvorstöße im Winter vom warmen Pazifik über die Beringstraße zum kalten Pol hin sowie Ausbrüche kälterer Luft im Frühjahr und Herbst von der Polgend nach Süden können diese Periodizität erklären.

Die Richtung des zonalen Transports im Halbjahresbereich entspricht der Tatsache, daß im Frühjahr und Herbst ($T' < 0$, $v'_g < 0$ (1/2 Jahr)) die Höhenströmung über dem Gebiet eine stärkere zonale Komponente ($u'_g > 0$ (1/2 Jahr)) hat als im Winter und Sommer.

In 850 und 500 mb trägt der "mittlere" Periodenbereich (ca. 15 bis 40 Tage) erheblich zum Transport bei. Hier spielen blockierende Hochs über der Beringsee eine bedeutendere Rolle.

Der Bereich um 3 Tage ist für beide Transportkomponenten kohärent. Darin zeigt sich der Einfluß der pazifischen Zyklonenserien, die gleichzeitig einen Wärmetransport nach Westen und nach Norden bewirken.

Der Tabelle der Mittelwerte (Tab. 3) entnimmt man, daß $\overline{u_g}$ für Punkt B relativ klein ist. Diese Aussage bestätigen auch die langfristig gemittelten Höhenkarten: Die Isohypsen sind dort weitabständig voneinander.

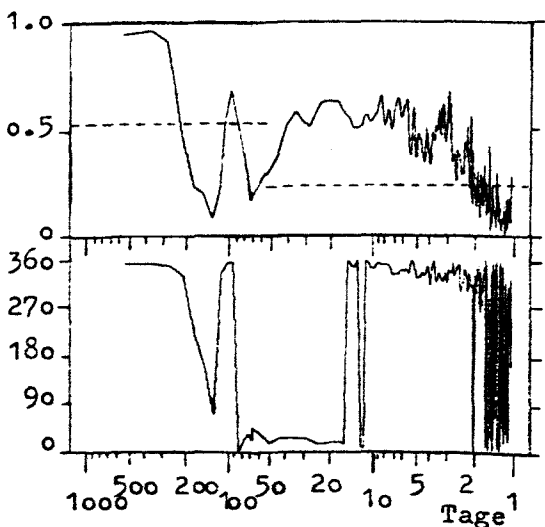
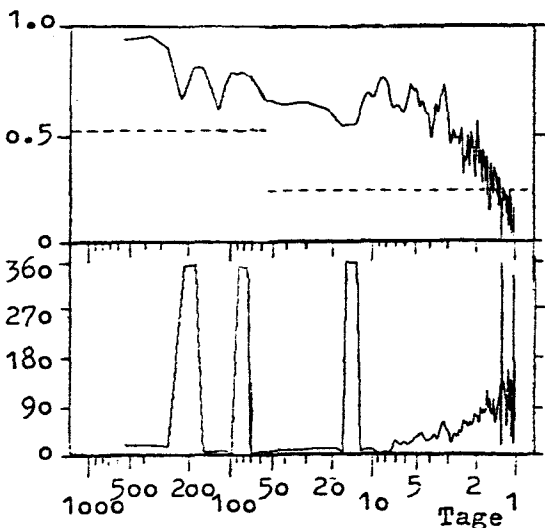
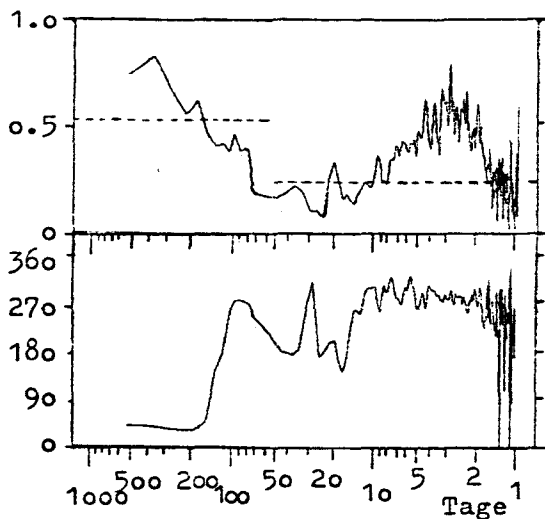
3.2.2 Punkt C, Ost-China ($35^{\circ}N$, $118^{\circ}E$)

Ost-China besitzt ein typisch kontinentales Klima mit großen jährlichen Temperaturschwankungen (s. HERRMANNSEN, 1979). Außerdem bedingt im Winter die Lage am Rand des asiatischen Troges eine besonders große Windgeschwindigkeit (s. Tab. 3), vor allem eine relativ intensive u_g -Komponente, die im Sommer schwächer wird, wenn sich der Trog zum Pazifik verlagert. Beide Tatsachen verursachen den feststellbaren, außergewöhnlich großen Wärmetransport durch die Jahreswelle (Abb. 13 u. 14), dessen Westkomponente die Jahrestransporte an den anderen Punkten um ein Vielfaches übertrifft. Lediglich Punkt A, Boston, zeigt vergleichbare $Co_{T,u}$ (Jahr) - Werte, weil auch dieser Punkt an der Ostflanke eines Troges (des amerikanischen) gelegen ist.

Daß auch in 200 mb trotz einer kleinen Temperaturwelle noch relativ große Jahrestransporte auftreten, ist darauf zurückzuführen, daß die an sich schon stärkere, winterliche Zirkulation noch durch den Subtropenjet unterstützt wird.

Da Punkt C im Einflußbereich sowohl des Polar- als auch des Subtropenjets liegt, kann damit der Transport durch die Halbjahreswelle in 200 mb erklärt werden.

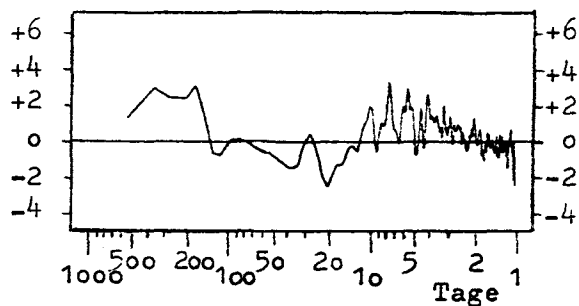
Kohärenz
Phase



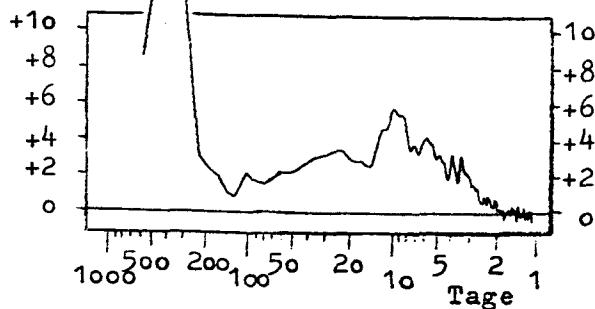
ν Co T, v

$$\left[\text{K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

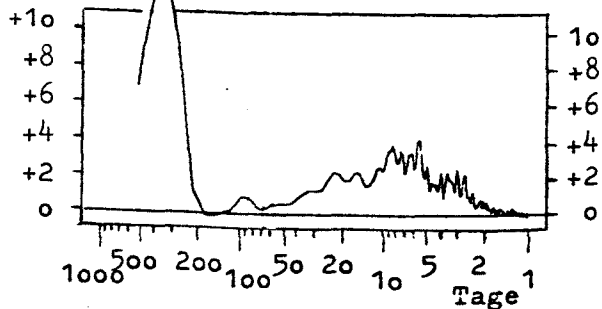


Abb.13: Punkt C , Ost - China 35°N , 118°E

Kohärenz
Phase

ν Co T, u

$$\left[\text{K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$$

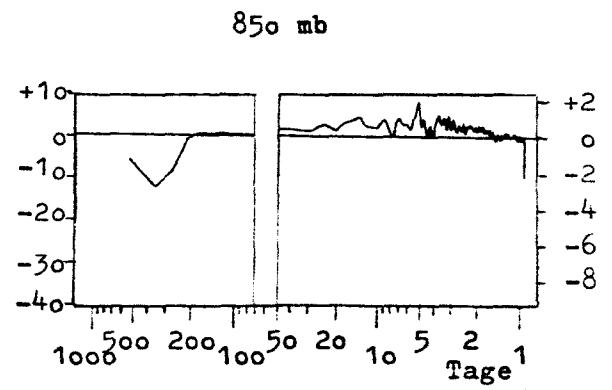
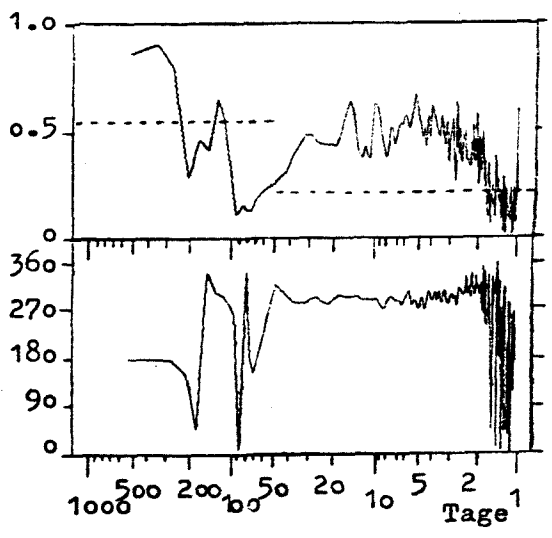
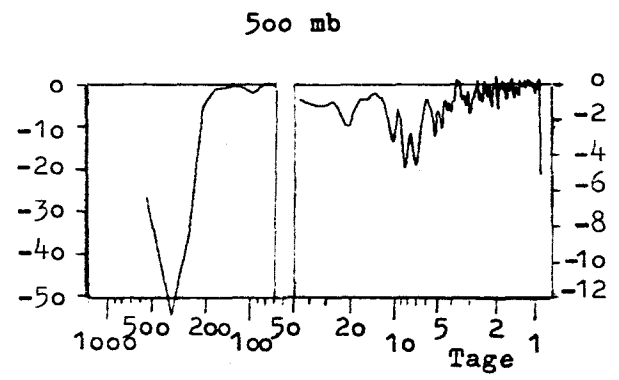
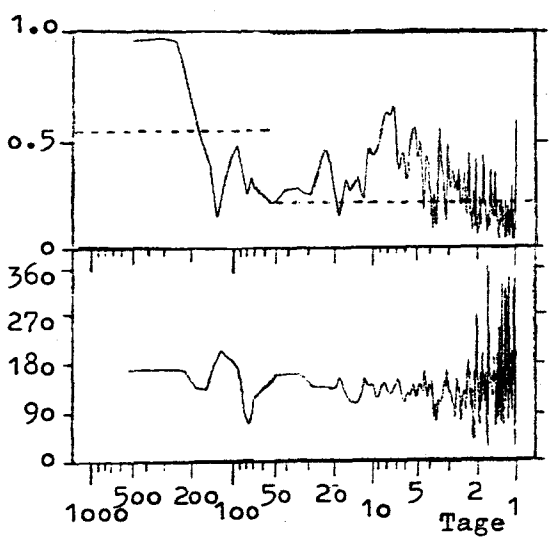
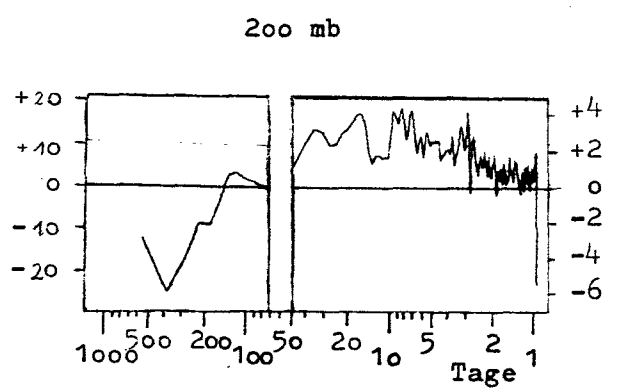
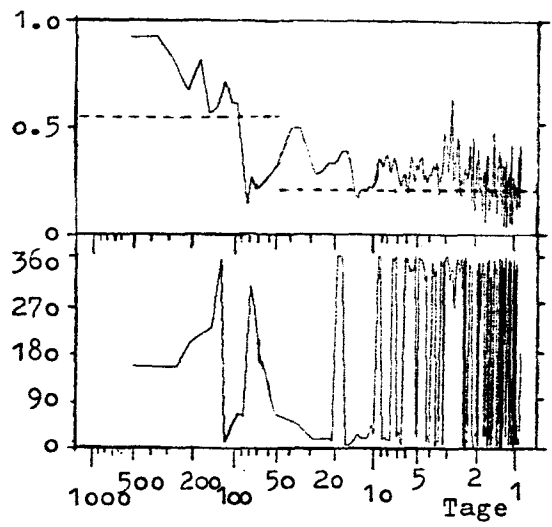


Abb.14: Punkt C, Ost - China 35° N, 118° E

! anderer Maßstab im langperiodischen Bereich !

Zonaler und meridionaler Wärmetransport erfolgen auch durch Wellen mit Perioden von 1 bis 7 Wochen. Blockierende Hochdruckgebiete über Ostasien können dafür verantwortlich gemacht werden.

Auch Zyklonen und Lange Wellen - gekoppelt an die Polarfront, die im Mittel nördlich von Punkt C verläuft - tragen etwas zum Transport bei.

3.2.3 Punkt D, Danzig ($55^{\circ}N$, $20^{\circ}E$)

Bisher wurden die 3 Punkte (A,B,C) besprochen, die nach SPETH (1974) hohe Nordwärtstransporte sensibler Energie im Januar Mittel aufweisen. An den folgenden 3 Punkten (D,E,F) sind nach seinen Ergebnissen relative Minima feststellbar.

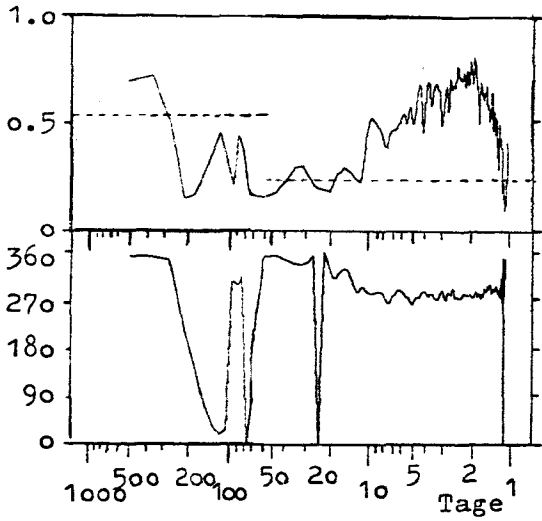
Tatsächlich zeigen die Cospektren von Punkt D ($Co_{T,v}$, Abb. 15) mit Ausnahme des 30-Tage-Peaks in 200 mb und der Jahrespeaks in 500 und 200 mb nur eine Größenordnung ≤ 2 [$^{\circ}K$ m/sec]. In 850 mb ist der Nordwärtstransport sensibler Wärme am stärksten, weil er kontinuierlich über einen relativ breiten Frequenzbereich verteilt stattfindet.

Das Cospektrum zeigt im Bereich 1 - ca. 10 Tage hohe Kohärenz. Die Langen Wellen bzw. Zyklonen-Störungen prägen den Charakter der Strömung in 500 und 200 mb, denn Punkt D liegt nahe der Polarfront. Dennoch bewirken diese Wellen keinen großen meridionalen Wärmetransport, weil die Phase (80° in 500 mb und 280° in 200 mb) zwischen T' und v'_g dafür ungünstig ist. (vgl. Formel (2.9)).

Die $Co_{T,u}$ -Kohärenzwerte sind bis auf den für den Jahrespeak sehr klein. In zonaler Richtung wird kaum Wärme transportiert (s. Abb. 16).

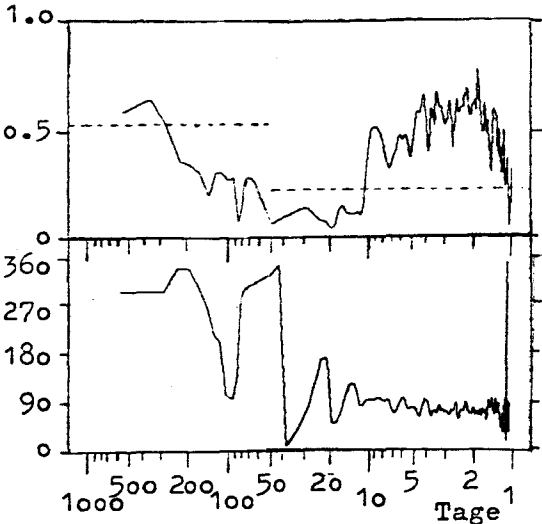
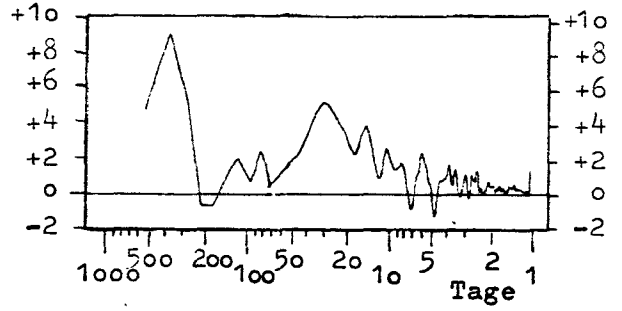
Kohärenz
Phase

ν Co T, v

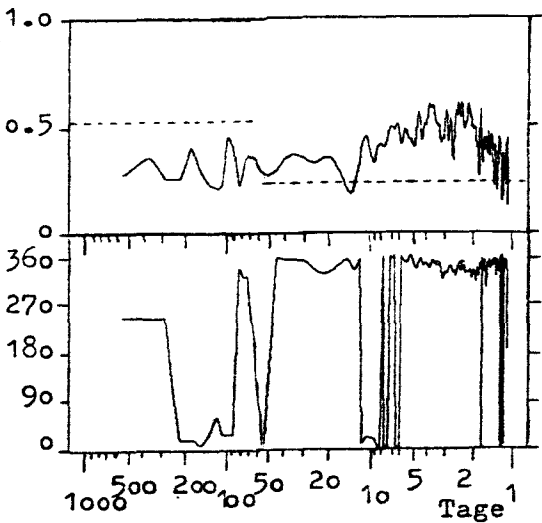
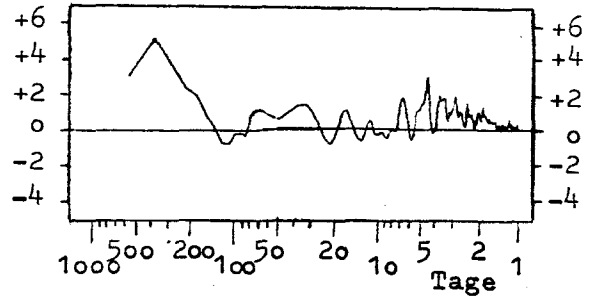


$[^{\circ}K m sec^{-1}]$ $[10^4 J sec^{-1} m^{-1} mb^{-1}]$

200 mb



500 mb



850 mb

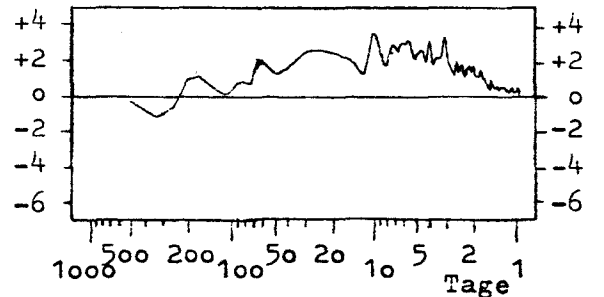
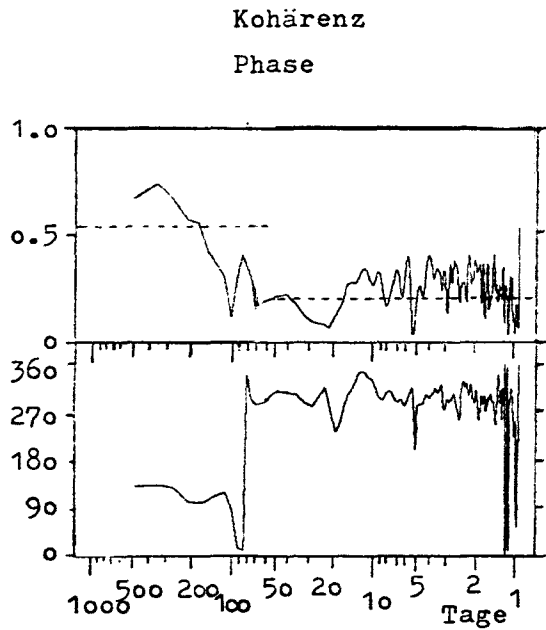


Abb.15: Punkt D, Danzig 55° N, 20° E



$\nu \text{ Co } T, u$

$\left[\text{K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$

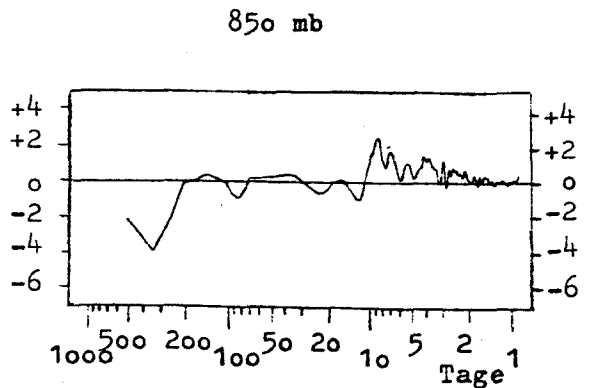
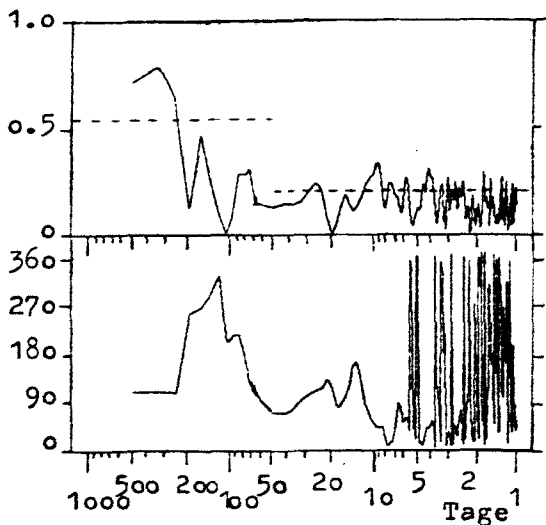
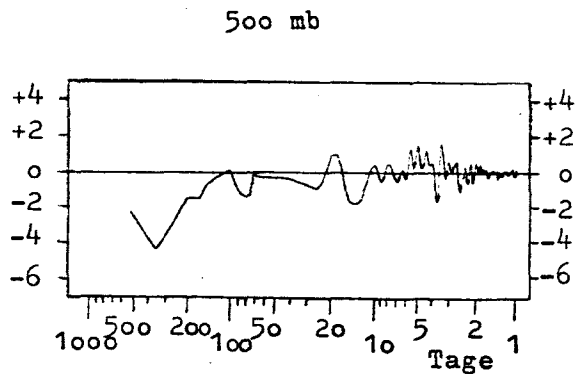
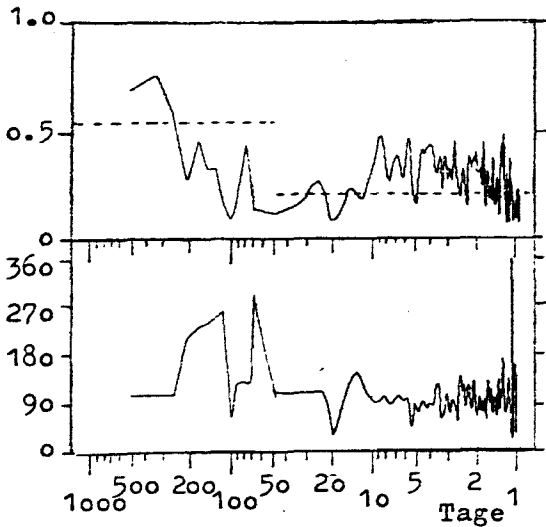
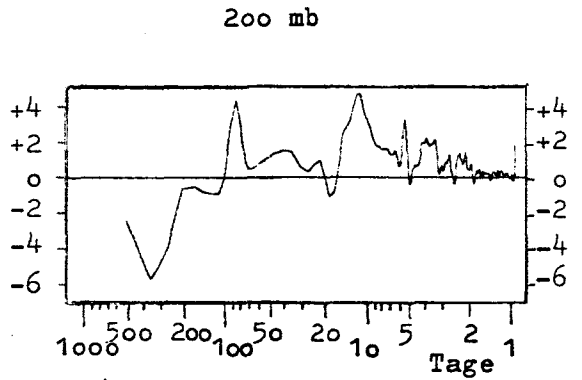


Abb.16: Punkt D , D a n z i g

55° N, 20° E

3.2.4 Punkt E, San Francisco ($40^{\circ}N$, $125^{\circ}W$)

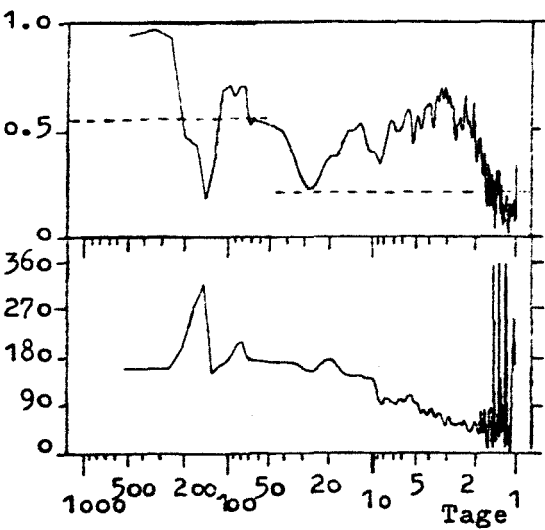
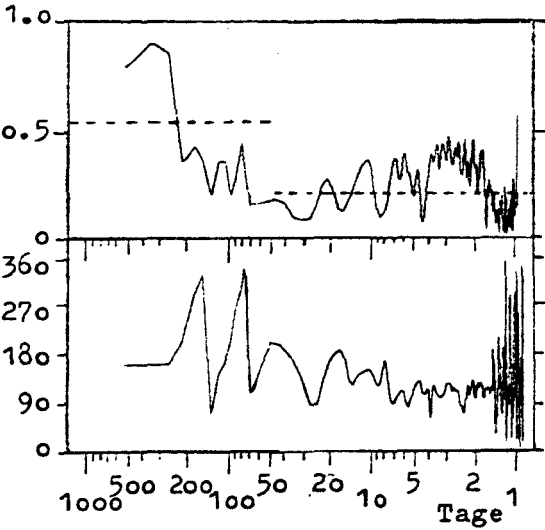
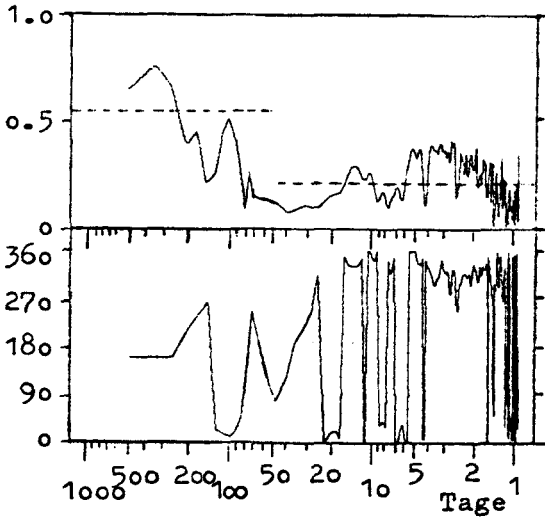
Punkt E weist zwar nach SPETHS Arbeit (1974) nur einen sehr kleinen Nordwärtstransport sensibler Energie im Januar-mittel auf, doch sind dort die Cospektren ganz anders geartet als die von Punkt D. An Punkt E kommt der kleine Gesamttransport durch Kompensation der verschiedenen Niveaus zustande: Während in 850 und 500 mb Wellen mit Perioden ≈ 30 Tage Wärme nach Norden transportieren, erfolgt der Fluß in 200 mb umgekehrt (Abb. 17). Diese Eigenheit wird an keinem der anderen fünf betrachteten Punkte beobachtet. Die Phase zwischen T' und v'_g in 200 mb beträgt ca. 260° , so daß zwar die Tröge zum größten Teil warm und die Rücken kalt sind, die Korrelation der beiden Wellen jedoch negativ ausfällt (s. Formel (2.9)). Entsprechend ändert auch der zonale Wärmetransport seine Richtung in 200 mb gegenüber den Troposphärenniveaus für den Periodenbereich ≈ 15 Tage.

In 850 und 500 mb treten Nordwärtstransporte bei Perioden zwischen 12 und 30 bzw. 20 Tagen auf, die von blockierenden Wetterlagen über dem nordamerikanischen Kontinent herrühren. Auch die $Co_{T,u}$ -Spektren (Abb.18) zeigen in diesem Bereich signifikante Transporte.

Ein Halbjahrespeak tritt in allen drei Niveaus bei $Co_{T,v}$ auf und ist kohärent. Allerdings sind T' und v'_g in den Energiespektren bei Perioden von ca. $1/2$ Jahr nicht signifikant, und zudem gibt es keinen entsprechenden Transport für die zonale Richtung. Es ist daher fraglich, ob der meridionale Wärmetransport für diese Periode statistisch abgesichert ist, da auch auf Anhieb keine plausible Erklärung für die halbjährige Periode gefunden werden kann.

Eine weitere Besonderheit des Punktes E ist der südwärts gerichtete Transport, den die Jahreswelle in 850 mb verursacht. Im Sommer ist die Nordwindkomponente stärker als im Winter, denn der Phase ($\approx 180^{\circ}$), den Mittelwerten (Tab. 3) und den Energiespektren (HERRMANNSEN, 1979) entnimmt man:

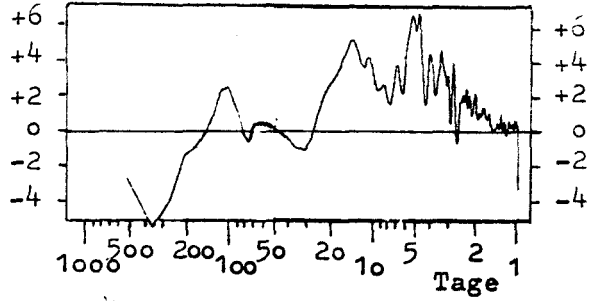
Kohärenz
Phase



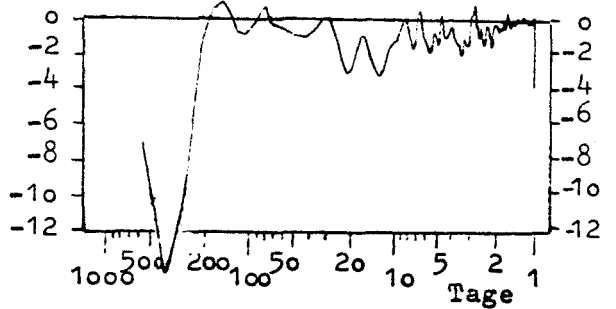
$\sqrt{Co_{T,u}}$

$$\left[\text{K m sec}^{-1} \right] \quad \left[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

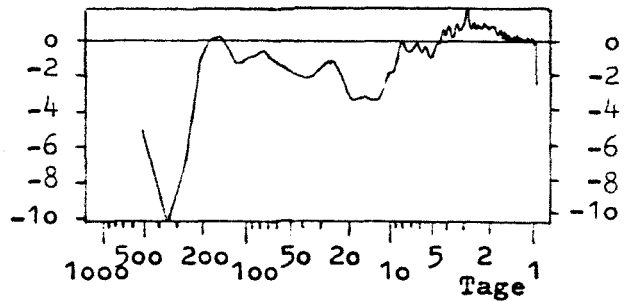


Abb.18: Punkt E, San Francisco 40° N , 125° W

$$|v'_g(\text{Jahr})| \approx 1.0 \text{ [m/sec]}, \quad \overline{v_g} \approx -1.9 \text{ [m/sec]}$$

$$\text{Sommer: } T' > 0, v'_g < 0 \Rightarrow v_g \approx -1.9 - 1.0 = -2.9 \text{ [m/sec]}$$

relativ starker Nordwind

$$\text{Winter: } T' < 0, v'_g > 0 \Rightarrow v_g \approx -1.9 + 1.0 = -0.9 \text{ [m/sec]}$$

relativ schwacher Nordwind

Diese Aussage entspricht der Tatsache, daß oft im Sommer im 850-mb-Niveau ein ausgedehntes Hoch über dem Ostpazifik vorhanden ist, welches in 500 mb von einer rein zonalen Strömung überweht wird.

Auch die stehenden Wellen scheinen an Punkt E in 850 mb sensible Wärme nach Süden zu transportieren: Eine für den Breitenkreis in 850 mb sehr hohe Mitteltemperatur von $+10.2^\circ\text{C}$ ist mit einer stark negativen mittleren Meridionalwindkomponente korreliert (s. Tab. 3). Die hohe Mitteltemperatur in diesem Gebiet ist bedingt durch die starke sommerliche Aufheizung des Wüstengebietes im Südwesten der USA.

3.2.5 Punkt F, Ostsibirien (60°N , 123°E)

In den Cospektren dieses speziellen Punktes dominiert der Jahrespeak, während die kürzeren Perioden nur wenig zum Transport beitragen. (s. Abb. 19 u. 20)

Die tiefe Mitteltemperatur von -8.7°C in 850 mb (Tab. 3) ist zurückzuführen auf die hohe Breite (60°N) und die damit verbundene starke Abkühlung im Winter innerhalb einer großen, flachen Kaltluft-Antizyklone über Nordost-Asien. Die extreme jährliche Temperaturschwankung (s. Energiespektrum) in diesem Niveau spiegelt das kontinentale Klima wieder und bewirkt entsprechend einen großen Wärmetransport durch die Jahreswelle.

Ungewöhnlich am zonalen Transport im Vergleich zu den anderen Punkten ist der ostwärts gerichtete Wärmefluß in 500 und in

Kohärenz
Phase

ν Co T, ν

$[^{\circ}\text{K m sec}^{-1}]$ $[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1}]$

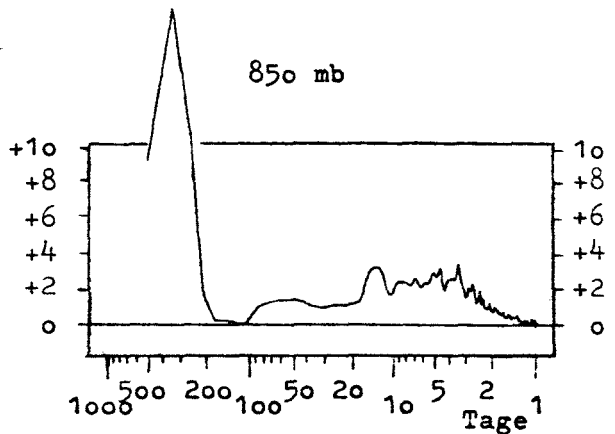
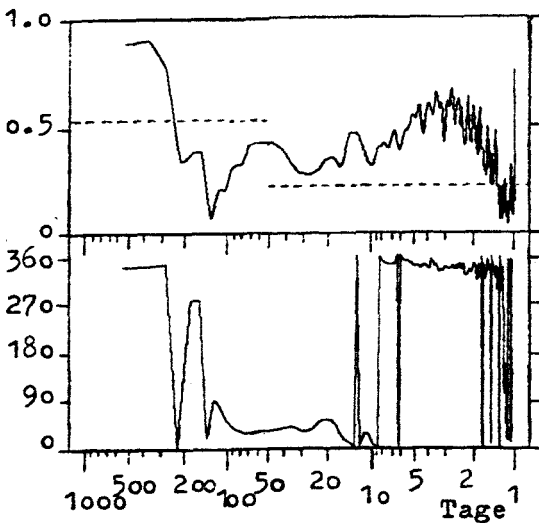
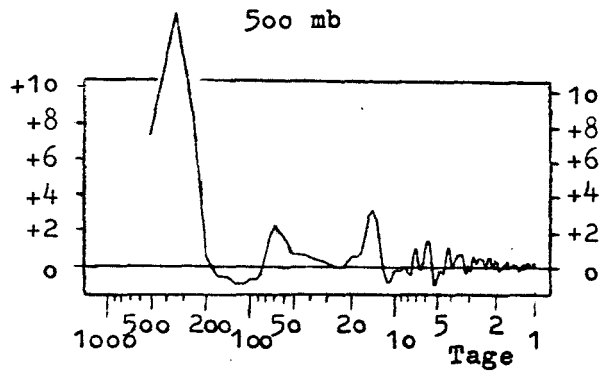
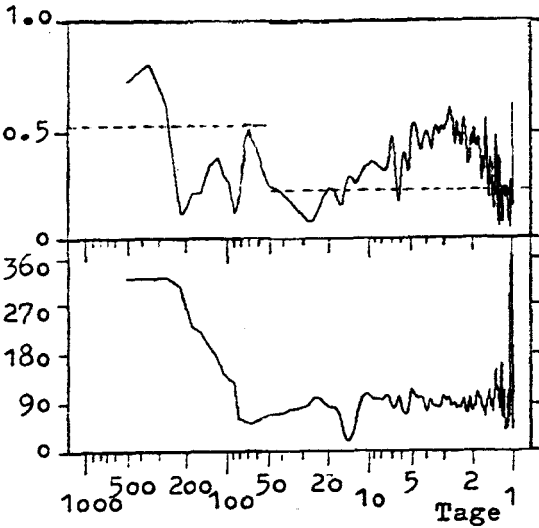
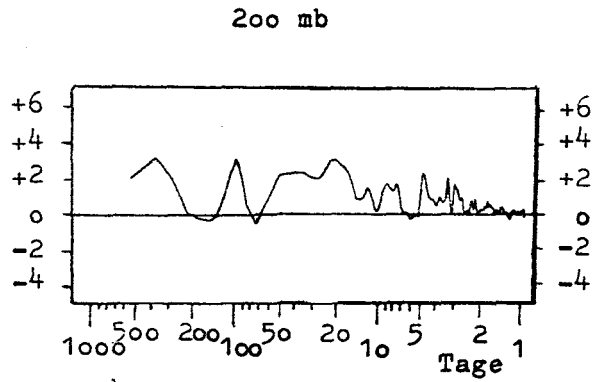
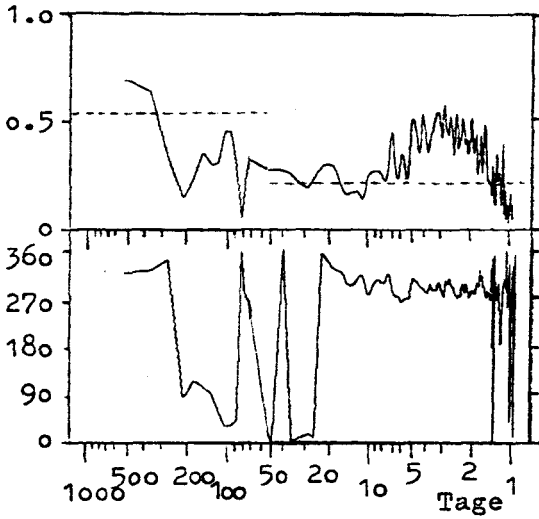
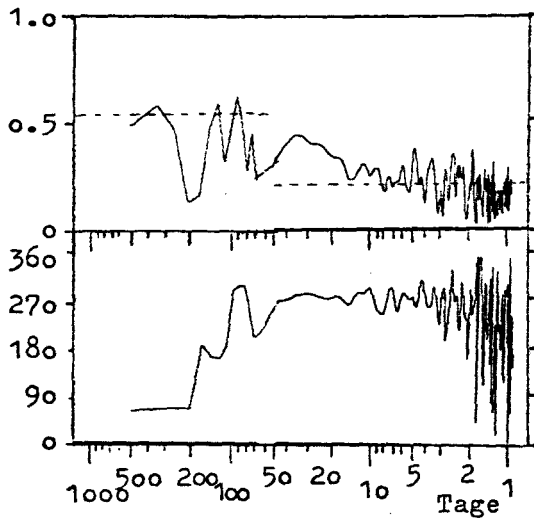


Abb.19: Punkt F, Ostsibirien 60° N , 123° E

ν Co T, u

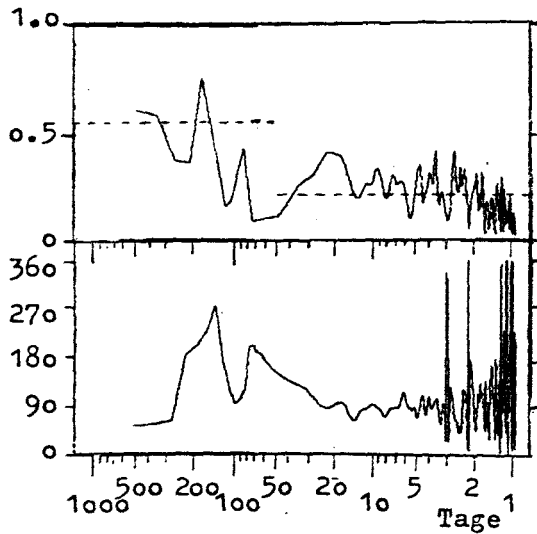
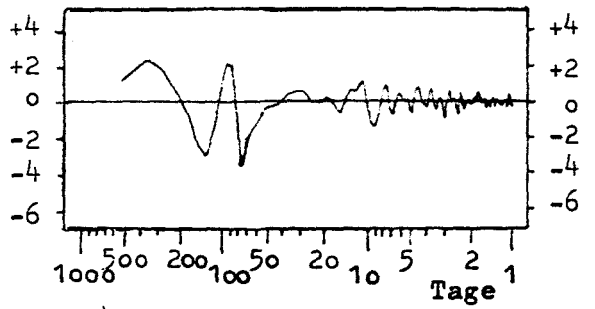
Kohärenz

Phase

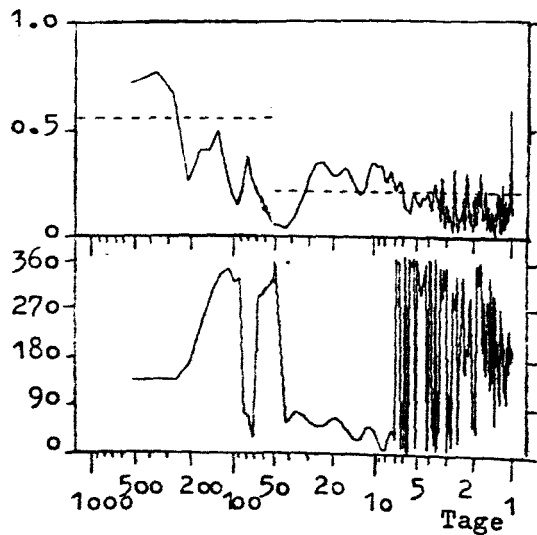
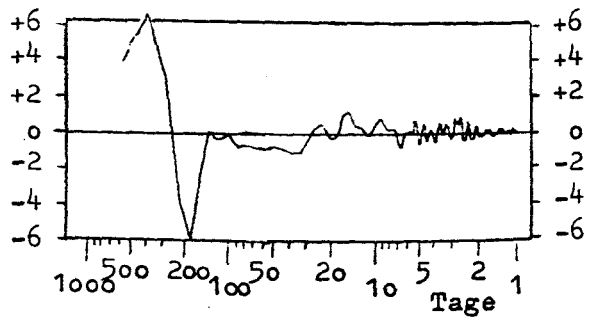


$[^{\circ}\text{K m sec}^{-1}]$ $[10^4 \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mb}^{-1}]$

200 mb



500 mb



850 mb

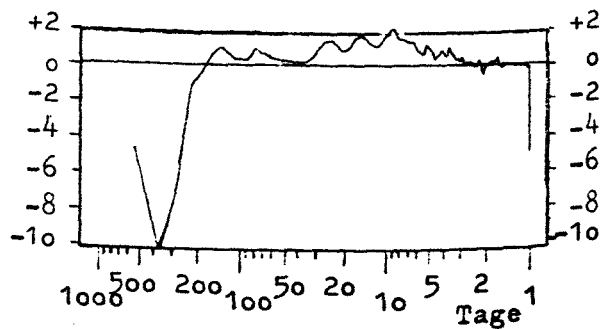


Abb.20: Punkt F, Ostsibirien 60°N , 123°E

200 mb. Er zeigt an, daß im Sommer stärkere Westwinde als im Winter auftreten. Polarfront und -jet verlaufen im Winter weit südlich dieses Punktes, während Ostsibirien im Sommer in den Einflußbereich der Polarfront gerät; damit sind kräftigere, westliche Winde verbunden.

Die statistische Absicherung des Halbjahrespeaks im $Co_{T,u}$ -Spektrum, 500 mb, ist fraglich, denn der Temperaturverlauf zeigt keine derartige Periodizität, und der Peak von u_g bei 1/2 Jahr ist nicht signifikant.

3.3 MERIDIONALE TRANSPORTE SENSIBLER ENERGIE - ÜBERSICHT UND VERGLEICH

Um einen Überblick über die mittleren Verhältnisse an den betrachteten Gitterpunkten zu geben, soll zunächst Tab. 3 betrachtet werden:

Art	p [mb]	A	B	C	D	E	F
		43°N 70°W	56°N 172°W	35°N 118°E	55°N 20°E	40°N 125°W	60°N 123°E
T [°C]	200	-55.5	-50.5	-52.5	-55.7	-56.9	-54.8
	500	-17.8	-26.5	-14.3	-22.8	-14.8	-30.1
	850	+ 3.9	- 4.0	+ 7.8	+ 1.3	+10.2	- 8.7
u_y [$\frac{m}{sec}$]	200	+30.9	+ 9.8	+41.4	+11.0	+20.7	+ 7.8
	500	+20.6	+ 5.1	+16.4	+ 8.1	+11.8	+ 5.2
	850	+ 8.0	+ 0.9	+ 2.2	+ 3.9	+ 2.3	+ 2.6
v_y [$\frac{m}{sec}$]	200	+ 1.0	+ 3.2	- 4.2	- 2.4	- 2.7	- 1.5
	500	- 0.2	+ 1.4	- 3.4	- 1.1	- 2.7	- 2.0
	850	- 1.3	- 0.1	- 0.7	+ 0.1	- 1.9	- 1.8

Tab. 3: Mittelwerte der Zeitreihen

Die Troposphärenniveaus 850 und 500 mb bei Punkt B und F sind besonders kalt, denn diese Punkte liegen meist im Bereich der polaren Luft (nördlich der Polarfront), während die hohen Mitteltemperaturen der Punkte A, C, E durch deren südlichere Lage begründet sind. In 200 mb sind die Temperaturverhältnisse ausgeglichener. Hier haben alle 6 Punkte eine Mitteltemperatur im Bereich zwischen -50.5°C und -56.9°C . Dagegen schwankt die Mitteltemperatur in 850 mb viel stärker.

Die zonale Windkomponente nimmt allgemein überall mit der Höhe zu. Die Punkte A und C weisen die höchsten u_g -Werte auf, weil beide an der Ostflanke je eines Höhentrog, des amerikanischen und des asiatischen, gelegen sind. An den Punkten B und F treten relativ kleine Windgeschwindigkeiten auf: Bei B auf Grund seiner Lage im Rücken der oberen Höhenströmung, bei F, weil dieser Punkt so weit im Norden ist, daß er nur im Winter zeitweilig von Polarfront oder -jet berührt wird.

3.3.1 Die Beiträge der verschiedenen Scales zum meridionalen Transport sensibler Energie

Tab. 4 soll eine Übersicht darüber geben, wieviel sensible Energie in den verschiedenen Periodenbereichen an den 6 Punkten transportiert wird. Folgende Periodenbereiche werden unterschieden:

- Jahr, 365 Tage
- Halbjahr, 187 Tage
- "mittlerer" Bereich, 7 - 50 Tage
- Bereich mit Langen Wellen und Zyklonen, 1 - 7 Tage

Über den Periodenbereich zwischen 50 Tagen und 1/2 Jahr werden keine Aussagen gemacht, weil in ihm die Kohärenz meist zu klein ist.

Die Zahlen in der Tab. 4 sind Mittelwerte für den jeweiligen Periodenbereich. Sie wurden nach den Cospektralbildern abgeschätzt. Im Bereich 7 - 50 Tage wird zusätzlich vermerkt, bis zu welcher Periode die Spektralwerte kohärent sind.

Punkt Periode Niveau	A Boston 43°N, 70°W	B Beringsee 56°N, 172°W	C Ost - China 35°N, 118°E	D Danzig 55°N, 20°E	E San Francisco 40°N, 125°W	F Ostsibirien 60°N, 123°E	
	ν Co _{Tv} Phase	ν Co _{Tv} Phase	ν Co _{Tv} Phase	ν Co _{Tv} Phase	ν Co _{Tv} Phase	ν Co _{Tv} Phase	
Jahr	200	+ 1 300	- 3 220	+ 3 40	+ 9 350	+ 6 350	+ 4 330
	500	- 6 140	- 9 160	+18 20	+ 5 310	+12 340	+14 330
	850	+ 3 50	-----	+14 350	-----	- 7 160	+18 340
Halbjahr	200	/	-----	+ 3 40	/	/	/
	500	/	+ 5 350	+ 2 360	/	/	/
	850	/	+ 4 350	-----	/	/	/
mittlerer Perioden- bereich 7 - 50 Tage	200	< 20 Tg. + 6 ~320	< 10 Tg. + 2 ~300	-----	< 20 Tg. + 2 ~310	< 25 Tg. - 1 260	-----
	500	< 24 Tg. + 4 80	< 50 Tg. + 6 ~360	< 50 Tg. + 3 ~360	< 10 Tg. ± 0 90	< 16 Tg. + 1 80	< 15 Tg. ± 0 90
	850	< 50 Tg. + 3 ~360	< 50 Tg. + 5 ~360	< 50 Tg. + 2 ~360	< 50 Tg. + 2 ~360	< 30 Tg. + 2 ~20	< 50 Tg. + 2 ~20
Zyklonen und Lange Wellen 1 - 7 Tage	200	+ 4 290	+ 1 280	< 1 290	< 1 280	- 1 260	< 1 280
	500	+ 5 70	+ 3 50	+ 2 40	+ 1 80	+ 1 80	± 0 90
	850	+ 6 350	+ 2 340	+ 2 340	+ 2 350	+ 1 30	+ 1 340

Tab.4: Meridionaler Wärmetransport

Beitrag der verschiedenen Scales

Die Zahlen geben die mit der Frequenz multiplizierte
Spektraldichte an: ν Co_{Tv} [°K m/sec]

Phase: T vor ν

Man erkennt anhand dieser Tabelle, daß Jahrespeaks und die Spektralwerte bei Perioden ≤ 7 Tage immer kohärent sind, daß Halbjahrespeaks an 2 Punkten auftreten und daß im mittleren Periodenbereich (7 - 50 Tage) weite Gebiete kohärent sind, sehr oft bis zu einer Periode von ca. 25 Tagen.

Die meridionalen Wärmetransporte durch die Jahreswellen sind an den betrachteten Punkten in allen 3 Niveaus im allgemeinen nach Norden gerichtet. Ausnahmen sind A(500 mb), B(500,200 mb), E(850 mb). Die Jahreswelle in 200 mb hat fast immer die kleinste Amplitude, weil die jährliche Temperaturschwankung in 200 mb sehr klein ist. Die beiden asiatischen Punkte C und F zeigen besonders hohe Jahrespeaks auf Grund ihres kontinentalen Klimas, und auch bei Punkt E drückt sich die Nähe zum Gebiet starker sommerlicher Aufheizung über dem südlichen Nordamerika durch einen hohen 500 mb - Wert von $12 \text{ [}^{\circ}\text{K m/sec]}$ aus. Bzgl. der Phase zwischen T' und v'_g im Jahrespeak können keine Gemeinsamkeiten der Punkte untereinander oder eine Gesetzmäßigkeit mit der Höhe erkannt werden.

Im Periodenbereich 7 - 50 Tage, dem Indexschwankungen zugeordnet werden, sind die Cospektralwerte im allgemeinen kleiner als im Bereich 1 - 7 Tage. In 850 mb und manchmal 500 mb sind die Werte des gesamten Bereichs kohärent mit einer Phase von ca. 360° , während in 200 mb die Kohärenz nur bis höchstens 25 Tage über der Kohärenzschwelle liegt. Indexschwankungen sind also bzgl. des Wärmetransportes in der Troposphäre effektiver als in 200 mb.

Die Langen Wellen und Zyklogen (ca. 1 - 7 Tage) zeigen das schon vorstehend erwähnte Phasenverhalten (3.1.2) und bewirken meistens einen Nordwärtstransport. Die Werte von Punkt A sind besonders herausragend, die nächstgrößeren Transporte durch Rossby-Wellen sind bei Punkt B und C zu verzeichnen. Diese Reihenfolge deckt sich mit den Ergebnissen von SPETH (1974). Der Transport durch die Langen Wellen ist in 850 mb bei fast allen Punkten größer als in 500 und 200 mb wegen der günstigeren Phasenbeziehung (s. 3.1.2).

3.3.2 Die integrierten Spektren

Beim Betrachten der integrierten Spektren sollte man bedenken, daß auch über solche Spektralwerte summiert wird, deren Kohärenz kleiner als C_{95} ist und die daher nicht signifikant sind. Kleine Kohärenz bewirkt allerdings auch einen kleinen Cospektralwert (s. Formel 2.9), so daß ihr Beitrag zum integrierten Spektrum nicht groß ist.

Tab. 5 und Abb. 33 (unter Berücksichtigung von Abb. 21,23, 25,27,29,31) zeigen, wieviel sensible Energie in meridionaler Richtung in 200, 500 und 850 mb durch Wellen mit Perioden von
 1 bis 30 Tagen
 und 1 bis 512 Tagen

transportiert wird. Der Bereich 1 - 30 Tage wurde gewählt, weil bis zu 30 Tagen die Kohärenz an allen Punkten relativ hoch ist und weil oft Monatsmittel (30 Tage !) betrachtet werden. Die Differenz der beiden Integrale gibt hauptsächlich den Einfluß des Jahres- und Halbjahrespeaks an, weil die integrierten Cospektren für den meridionalen Transport im Bereich von 30 Tagen bis zu 1/2 Jahr meistens ein Plateau zeigen.

	A Boston 43°N, 70°W	B Beringsee 56°N, 172°W	C O-China 35°N, 118°E	D Danzig 55°N, 20°E	E San Franc. 40°N, 125°W	F Ostsib. 60°N, 123°E
200 mb	15	0	3	12	3	7
	14	2	1	4	-3	3
500 mb	7	13	24	5	14	10
	9	12	8	1	3	1
850 mb	21	16	15	8	3	18
	17	10	6	6	6	6
vertik. Mittelwert	14.3	9.7	14	8.3	6.7	11.7
	13.3	8	5	3.7	2	3.3

Tab.5 : Meridionaler Transport sensibler Wärme [$^{\circ}\text{K m/sec}$] durch Wellen mit Perioden von 1-512 Tage (obere Zeile)
 1-30 Tage (untere Zeile)

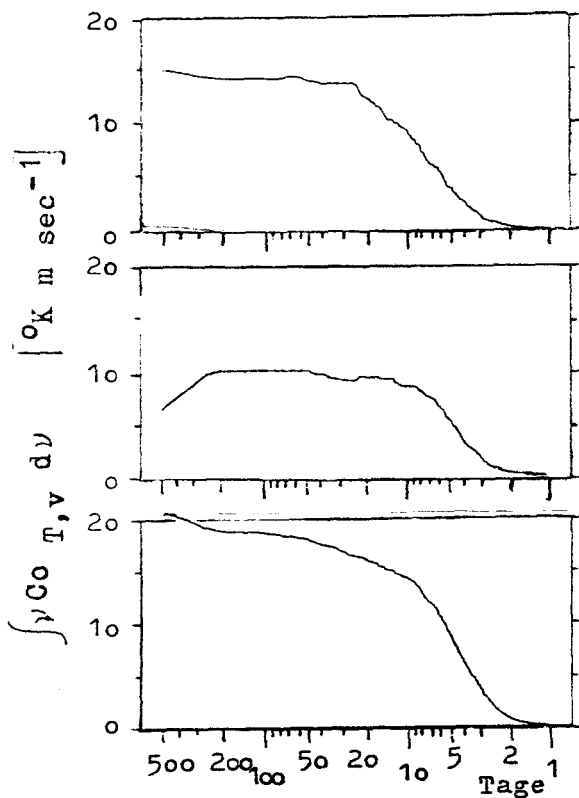


Abb.21: meridionale Komponente

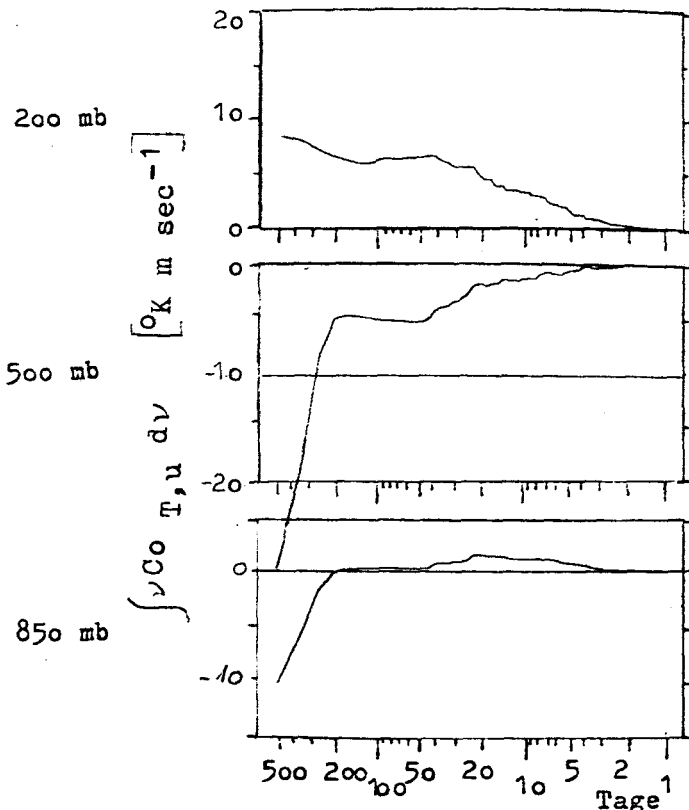


Abb.22: zonale Komponente

der integrierten Cospektren für
Punkt A, Boston (43°N, 70°W)

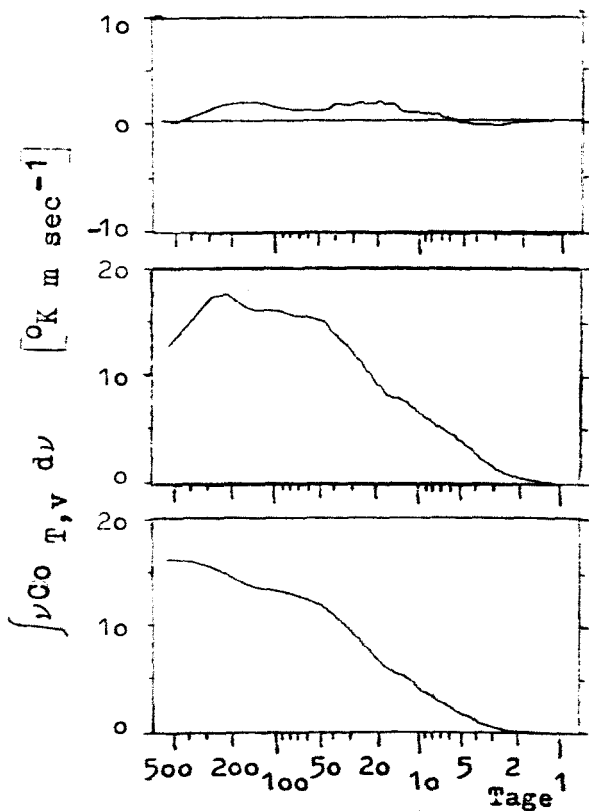


Abb.23: meridionale Komponente

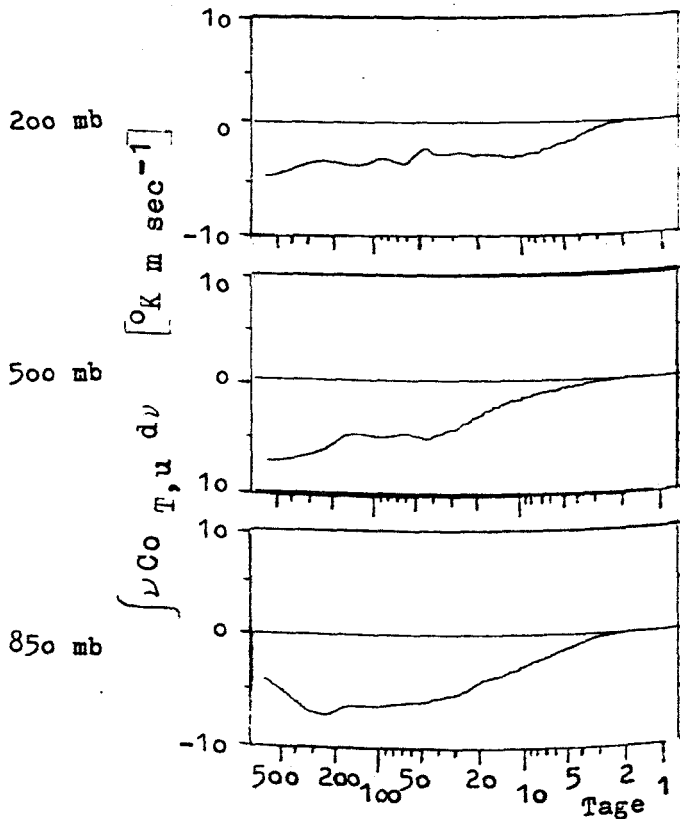


Abb.24: zonale Komponente

der integrierten Cospektren für
Punkt B, Beringsee (56°N, 172°W)

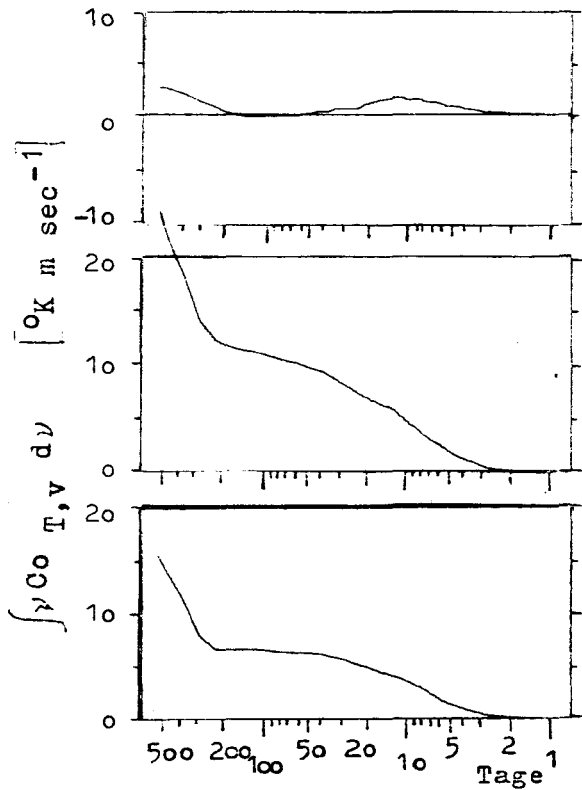


Abb.25: meridionale Komponente

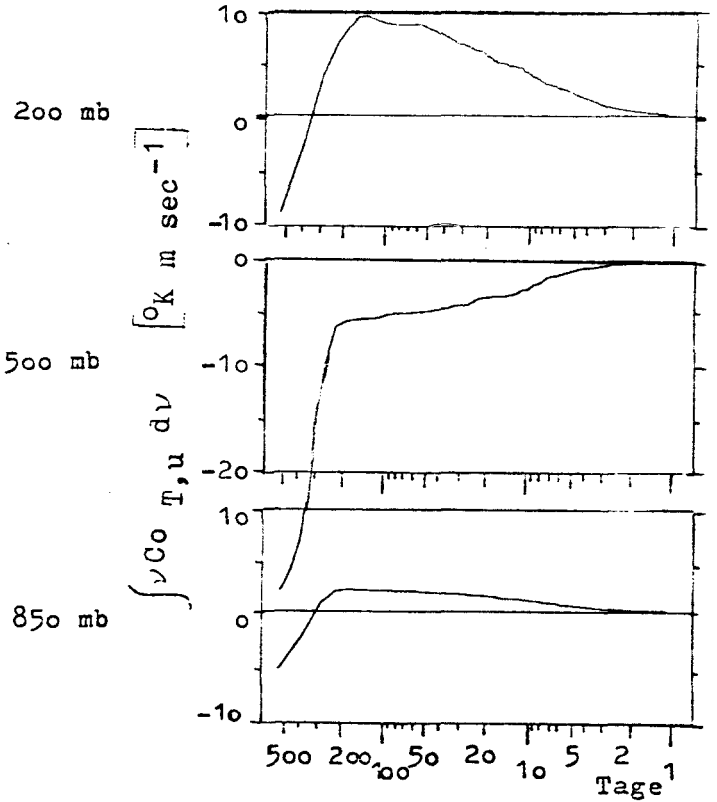


Abb. 26: zonale Komponente

der integrierten Cospektren für
 Punkt C, Ost-China ($35^{\circ}\text{N}, 118^{\circ}\text{E}$)

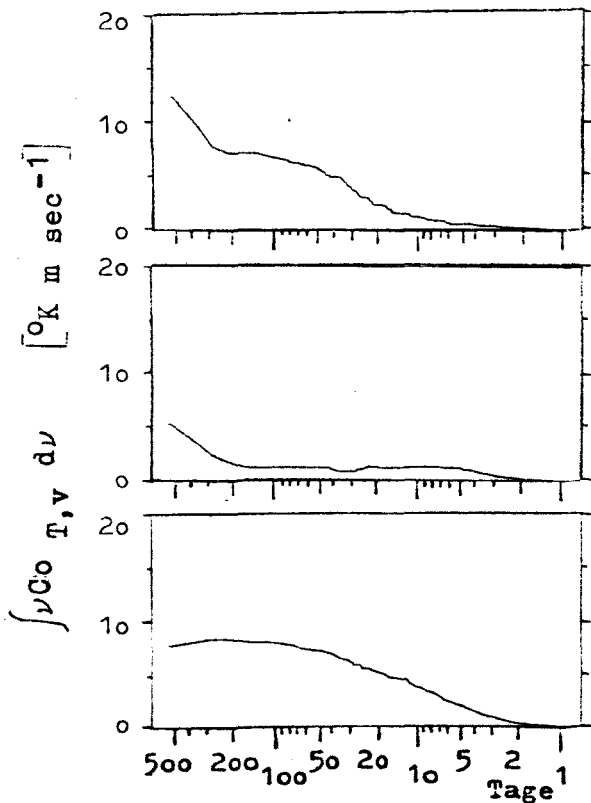


Abb.27: meridionale Komponente

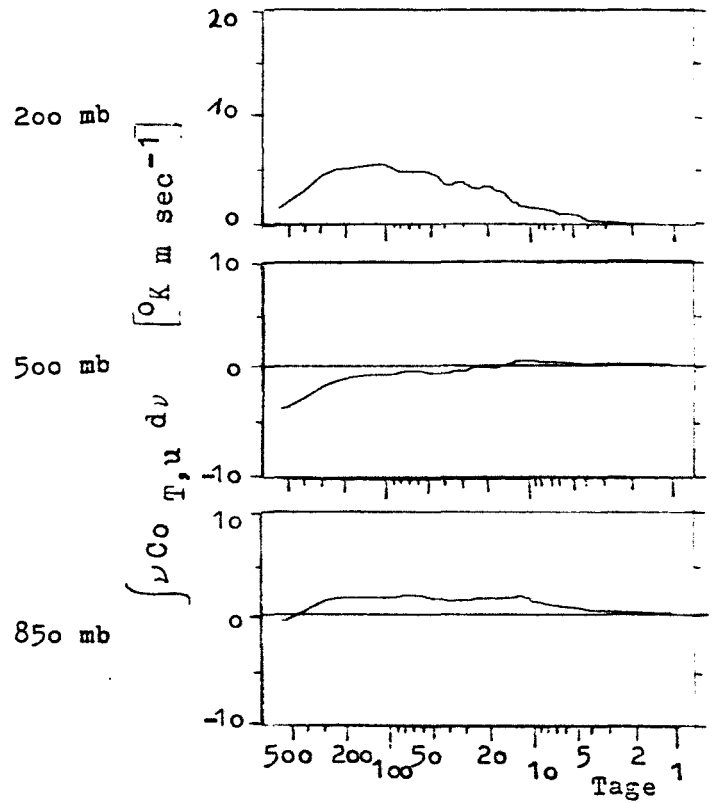


Abb.28: zonale Komponente

der integrierten Cospektren für
 Punkt D, Danzig ($55^{\circ}\text{N}, 20^{\circ}\text{E}$)

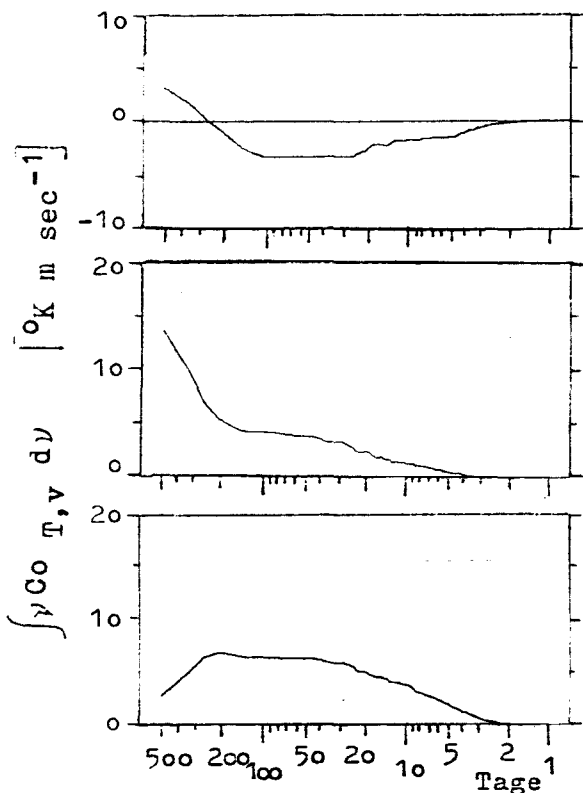


Abb.29: meridionale Komponente

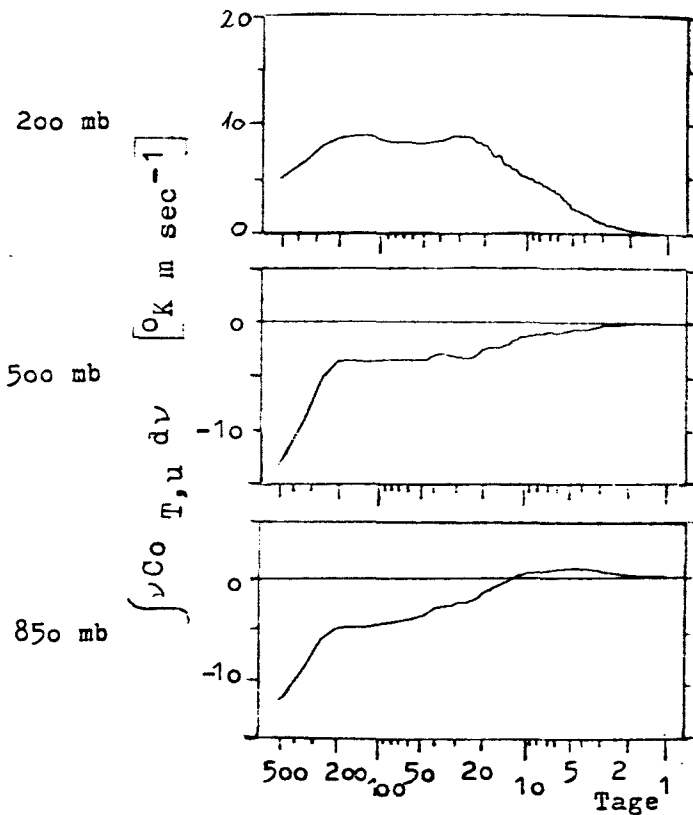


Abb.30: zonale Komponente

der integrierten Cospektren für
 Punkt E, San Francisco ($40^{\circ}N, 125^{\circ}W$)

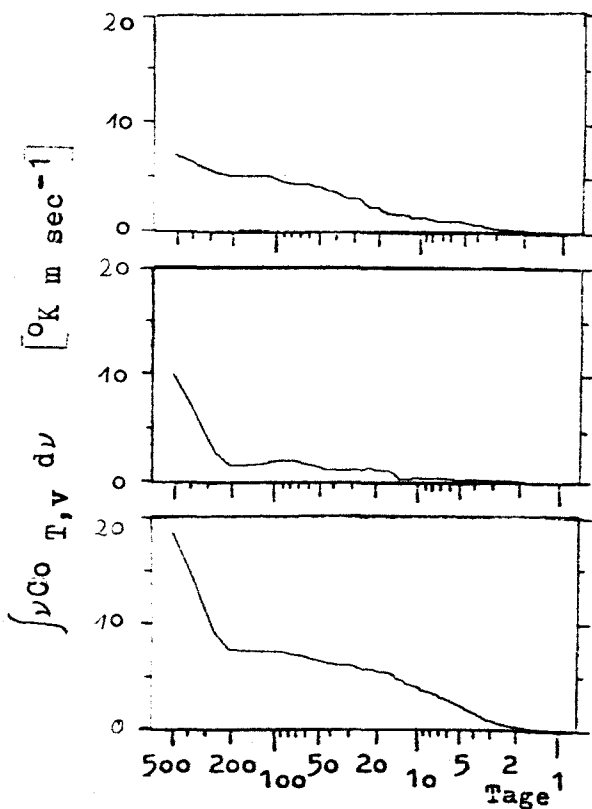


Abb.31: meridionale Komponente

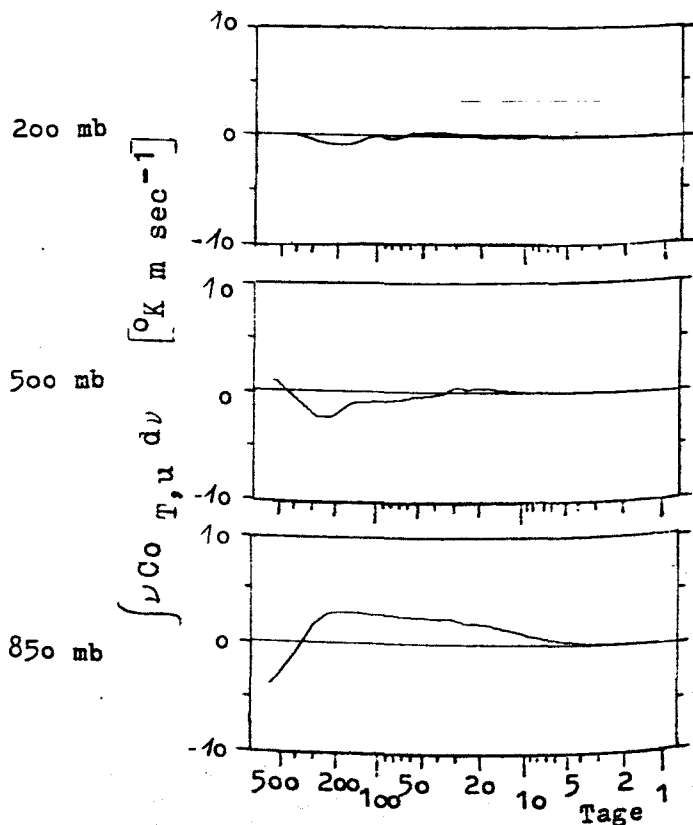


Abb.32: zonale Komponente

der integrierten Cospektren für
 Punkt F, Ostibirien ($60^{\circ}N, 123^{\circ}E$)

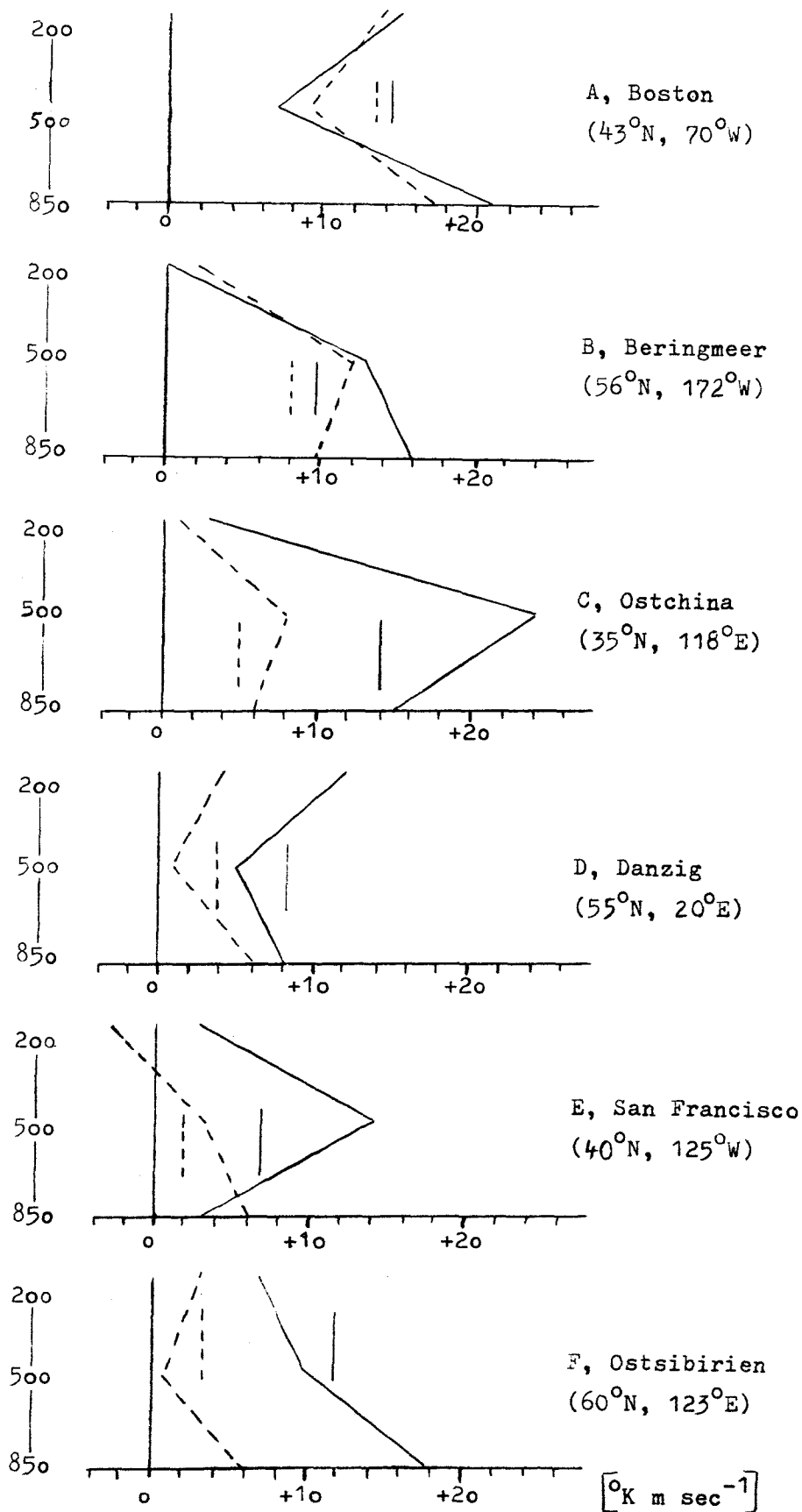


Abb. 33: Meridionaler Transport sensibler Energie durch

Wellen mit Perioden

von 1 - 30 Tage -----

1 - 512 Tage _____

senkrechte Striche = vertikale Mittelwerte

Die Abb. 33 im Zusammenhang mit Tabelle 5 läßt folgende Tendenzen erkennen:

- An allen betrachteten Punkten wird in allen Niveaus insgesamt, d.h. durch Wellen mit Perioden von 1 - 512 Tagen, Wärme nach Norden transportiert.
- Im vertikalen Mittel (senkrechte Striche in Abb. 33) transportieren alle Wellen (1 - 512 Tage) mehr Wärme nach Norden als die "kurzperiodischen" (1 - 30 Tage) allein.
- Nur bei Punkt A und Punkt B (mit Ausnahme von 850 mb) ist in allen Niveaus der Periodenbereich 1 - 30 Tage fast genauso effektiv wie der gesamte Bereich.
- Die Jahreswelle ist besonders in der unteren und mittleren Troposphäre wichtig.
- In 200 mb ist der meridionale Wärmetransport durch Jahres- oder Halbjahreswelle im allgemeinen unbedeutend.
- Der Jahrespeak dominiert bei den Asienpunkten C und F.
- Es ist nicht allgemein gültig, daß in 200 und 850 mb mehr sensible Wärme nach Norden transportiert wird als in 500 mb.
- Der vertikale Mittelwert des Flusses im 1 - 30 tägigen Intervall nimmt von Punkt A bis Punkt E kontinuierlich ab. Diese Reihenfolge stimmt mit den Ergebnissen von SPETH (1974) überein.

3.4 ZONALE TRANSPORTE SENSIBLER ENERGIE

- ÜBERSICHT UND VERGLEICH

3.4.1 *Die Beiträge der verschiedenen Scales zum zonalen Transport sensibler Energie*

Vergleicht man Tab.4 mit Tab.6, so ist ersichtlich, daß die T,u-Cospektren allgemein weniger kohärent sind als die T,v-Cospektren.

Die Jahrespeaks der zonalen Transporte sind immer kohärent und meistens negativ, d.h., es gibt schwache Westwinde im Sommer und starke im Winter (vergl. 3.1.3).

Im mittleren Periodenbereich (7 - 50 Tage) zeigt sich wieder eine Ähnlichkeit der beiden Asienpunkte C und F: Beide haben hier relativ hohe Kohärenzwerte.

Die zonalen Wärmetransporte durch Zyklonen und Rossby-Wellen sind an 4 der gesamten 6 Punkte signifikant. Eine Gesetzmäßigkeit für die vertikale Phasenänderung kann man nicht erkennen.

3.4.2 *Die integrierten Spektren*

Auf Grund der integrierten Spektren der zonalen Transporte sensibler Energie lassen sich die 6 Punkte in zwei Gruppen aufteilen (s.Abb.34, S.54 unter Berücksichtigung von Abb.22, 24,26,28,30,32, S.46 - 48):

1. B, D, F - nördlich von 55°N gelegen
2. A, C, E - südlich von 45°N gelegen

An den drei nördlicher gelegenen Punkten spielt die Jahreswelle für den zonalen Transport keine große Rolle, weil in hohen Breiten sowohl die Mittelwerte von u_g (Tab.3, S.41) als auch die Jahresschwankungen von u_g (s. HERBMANNSEN, 1979) klein sind. Die Punkte D und F zeigen zudem nur kleine

Punkt Periode Niveau	A Boston 43°N, 70°W		B Beringsee 56°N, 172°W		C Ost - China 35°N, 118°E		D Danzig 55°N, 20°E		E San Francisco 40°N, 125°W		F Ostsibirien 60°N, 123°E		
	ν Co _{Tu}	Phase	ν Co _{Tu}	Phase	ν Co _{Tu}	Phase	ν Co _{Tu}	Phase	ν Co _{Tu}	Phase	ν Co _{Tu}	Phase	
Jahr	200	+ 4	320	- 3	150	-26	160	- 6	150	- 5	160	+ 2	70
	500	-38	160	- 1	100	-55	170	- 4	120	-14	160	+ 7	70
	850	-16	160	+ 6	30	-13	180	- 4	120	-10	160	-10	130
Halbjahr	200	/				-10	220	/		/			
	500	/		- 5	150			/		/		- 6	200
	850	/		- 4	160			/		/			
mittlerer Perioden- bereich 7 - 50 Tage	200	/				< 50 Tg. + 3	360	< 16 Tg. + 2	~320			< 50 Tg. ± 0	270
	500	< 50 Tg. - 2	~150	/		< 50 Tg. - 2	140					< 40 Tg. ± 0	90
	850	/				< 50 Tg. + 1	300			< 50 Tg. - 2	170	< 30 Tg. + 1	60
Zyklonen und Lange Wellen 1 - 7 Tage	200	/		- 2	150	+ 2	~360	+ 1	300	+ 4	320	/	
	500	/		- 1	260	- 1	150	± 0	90	- 2	130	/	
	850	/		- 1	150	< 1	300			+ 1	80	/	

Tab.6: Zonaler Wärmetransport

Beitrag der verschiedenen Scales

Die Zahlen geben die mit der Frequenz multiplizierte
Spektraldichte an: ν Co_{Tu} [°K m/sec]

Phase: T vor u

Transporte in allen drei Niveaus für das Periodenintervall von 1 - 30 Tagen.

Anders verhält es sich an den Punkten A,C,E. Die Jahreswellen bringen in den beiden Troposphärenniveaus 850 und 500 mb eine erhebliche Vergrößerung im Betrag des zonalen Transports. Vor allem in 500 mb begünstigen sowohl große Temperatur- als auch Zonalwindchwankungen einen besonders großen Westwärtstransport durch die jährliche Welle.

In 500 mb ist der Transport sensibler Energie für beide Bereiche (1 - 30 Tage und 1 - 512 Tage) fast immer stärker nach Westen gerichtet als in 850 und 200 mb, wo sogar des öfteren der Gesamttransport nach Osten orientiert ist.

	A Boston 43°N, 70°W	B Beringsee 56°N, 172°W	C O-China 35°N, 118°E	D Danzig 55°N, 20°E	E San Franc. 40°N, 125°W	F Ostsib. 60°N, 123°E
200 mb	9	-5	-9	2	5	0
	6	-3	7	3	8	0
500 mb	-28	-7	-29	-3	-13	1
	- 3	-4	- 4	-1	- 3	0
850 mb	-11	-4	- 5	-1	-12	-4
	1	-6	2	1	- 3	2
vertik. Mittel- wert	-10	-5.3	-14.3	-0.7	- 6.7	-1
	3.3	-4.3	- 1.7	1	- 0.7	-0.7

Tab.7 : Zonaler Transport sensibler Wärme [$^{\circ}\text{K m/sec}$] durch Wellen
mit Perioden von 1 - 512 Tage (obere Zeile)
1 - 30 Tage (untere Zeile)

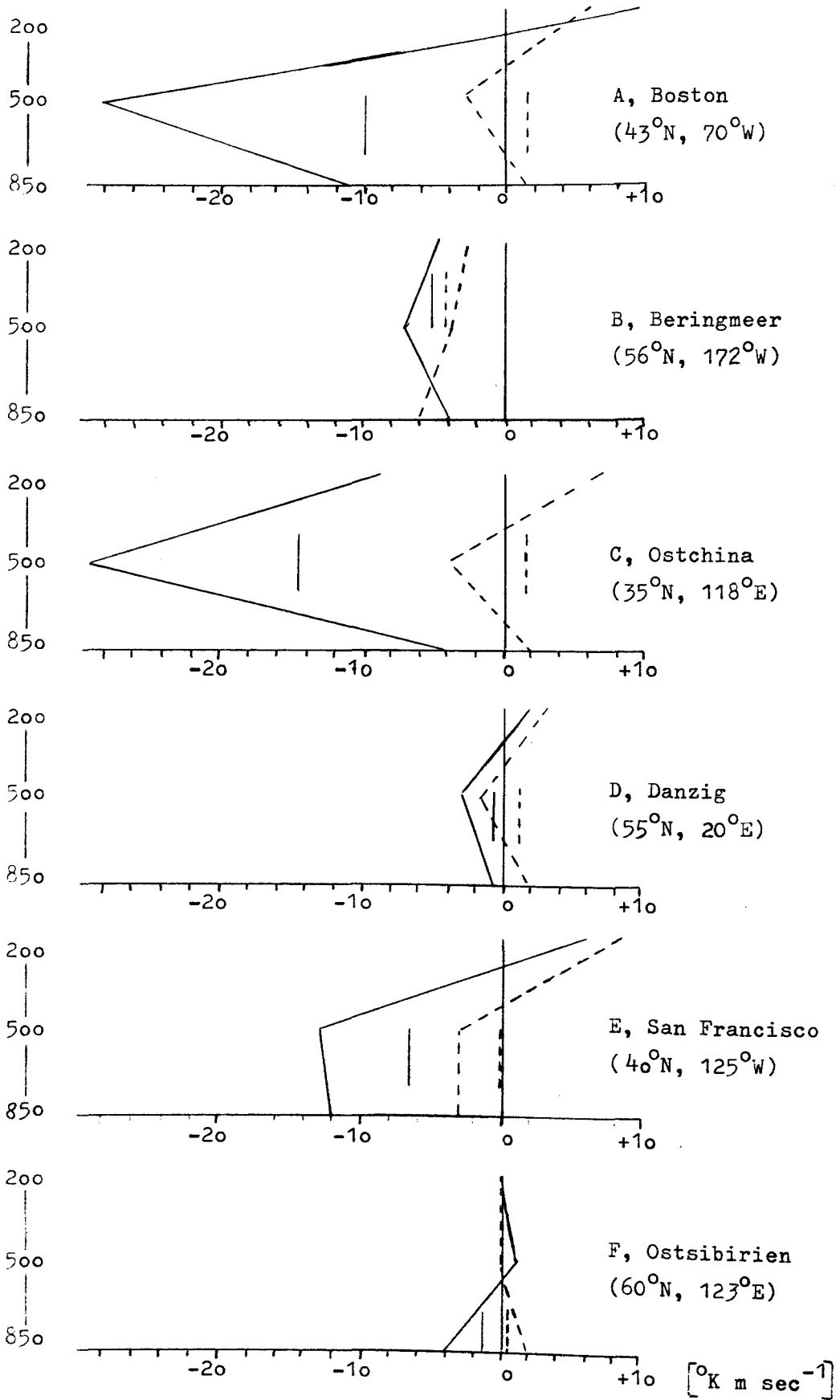


Abb.34 : Zonaler Transport sensibler Energie durch Wellen mit
Perioden von 1 - 30 Tage -----
1 - 512 Tage _____
senkrechte Striche = vertikale Mittelwerte

4. MERIDIONALER TRANSPORT VON DREHIMPULS

Der Transport von Drehimpuls durch wandernde Wellen wird in dieser Arbeit an 7 Punkten betrachtet. Dabei wird lediglich der meridional gerichtete Anteil dargestellt und interpretiert, denn die Größe des zonalen Transports $Co_{u,u}$ entspricht den Energiespektren von u , welche in der Arbeit von U. HERRMANNSEN (1979) bestimmt und diskutiert wurden.

4.1 BESONDERHEITEN DER EINZELNEN PUNKTE

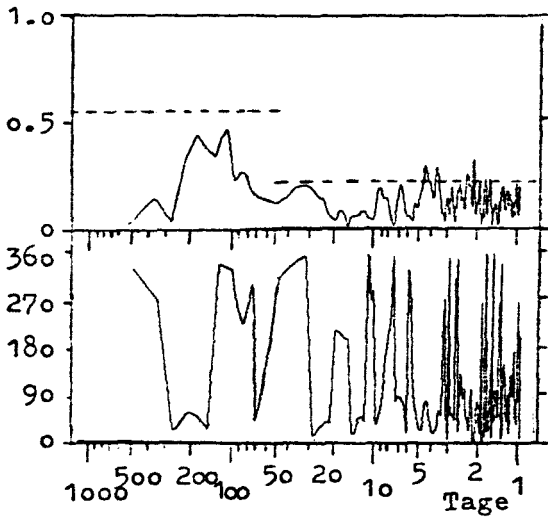
4.1.1 Punkt III, Ural ($58^{\circ}N$, $65^{\circ}W$) und Punkt VII, Shetland-Inseln ($63^{\circ}N$, 0°)

Beiden Punkten ist gemeinsam, daß ihre Cospektren $Co_{u,v}$ in allen Periodenbereichen eine so kleine Kohärenz haben, daß die Spektren als nicht signifikant zu bezeichnen sind (s. Abb. 35 und 36). Daher werden diese beiden Punkte in den weiteren Betrachtungen (4.2 und 4.3) nicht aufgeführt, und es wird darauf verzichtet, ihre integrierten Spektren abzubilden.

Die geringe Kohärenz, d.h. u'_g und v'_g sind nicht korreliert, ist durch die Nähe zur Polarfront bedingt. So sind z.B. auch die Cospektren $Co_{u,v}$ am Wetterschiff C ($53^{\circ}N$, $36^{\circ}W$) nicht kohärent (siehe dazu SPETH, 1978 b).

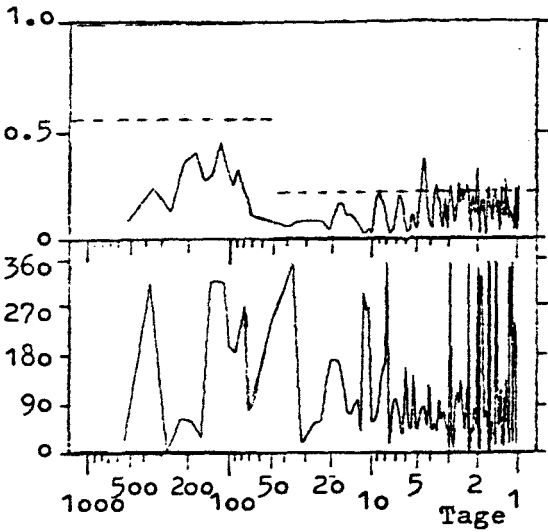
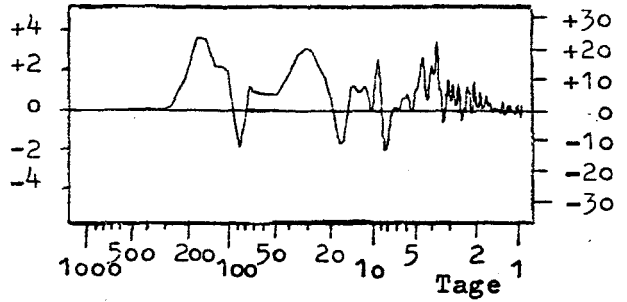
Kohärenz
Phase

$\nu \cos \varphi \text{ Co}_{u,v}$

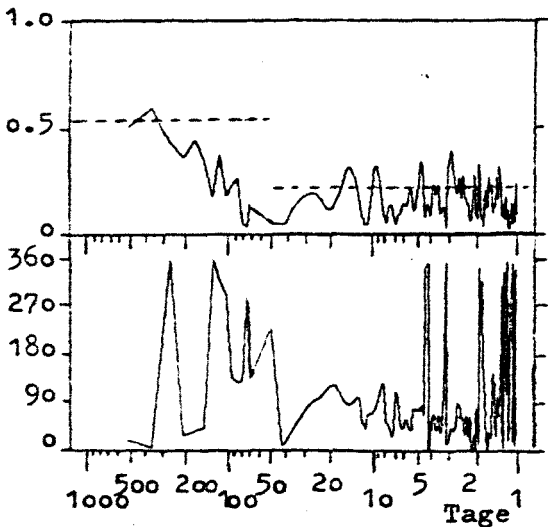
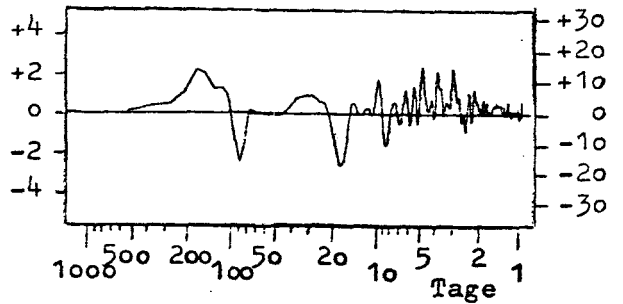


$$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{sec}^2} \right] \quad \left[10^7 \frac{\text{kg m}}{\text{sec mb}} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

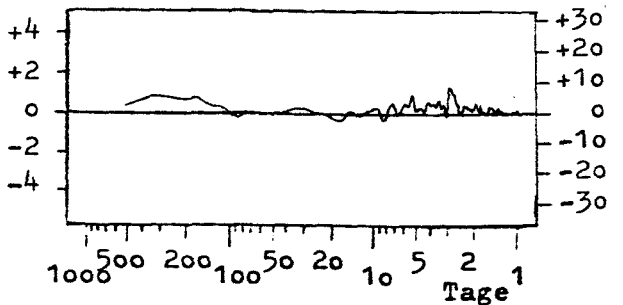
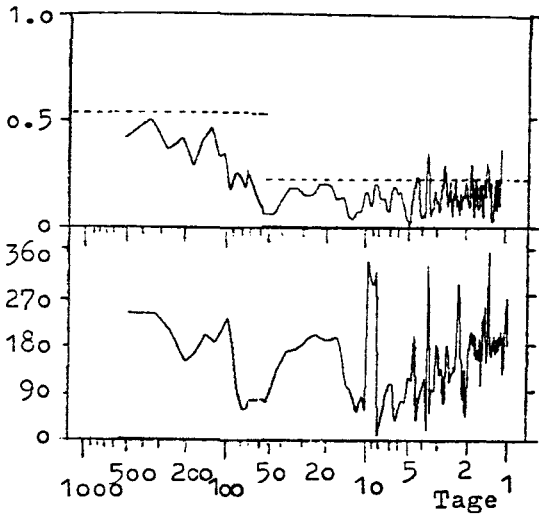


Abb.35: Punkt III, U r a l 58° N, 65° E

Kohärenz
Phase

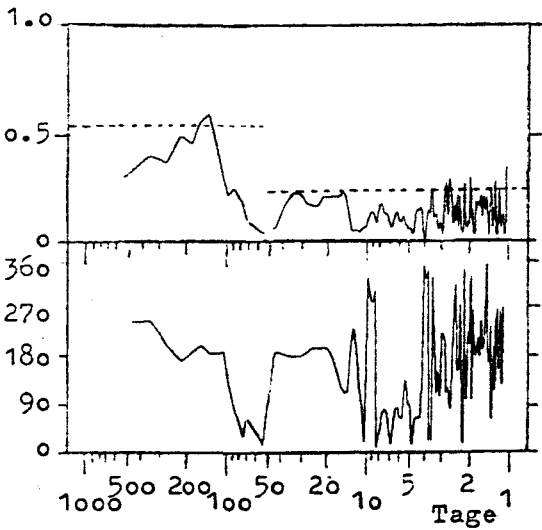
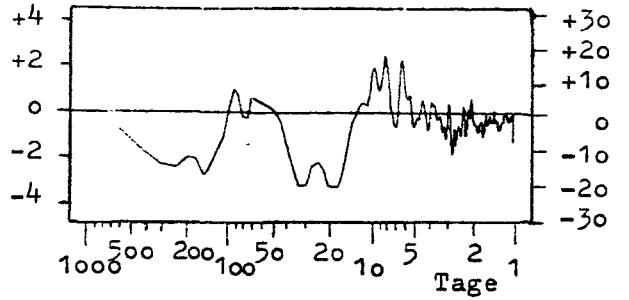
$\nu \cos \varphi \cdot C_{0,u,v}$



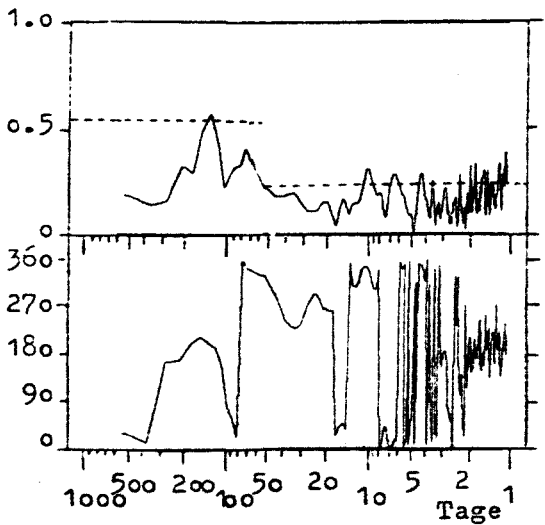
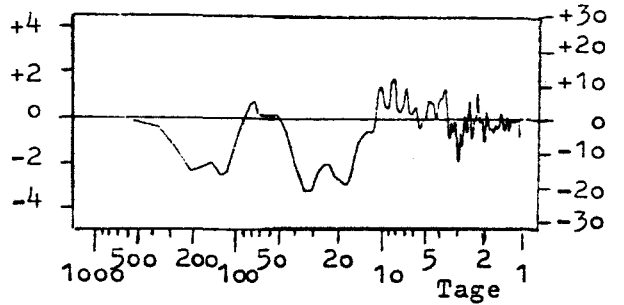
$$\left[\frac{m^2}{sec^2} \right]$$

$$\left[10^7 \frac{kg \cdot m}{sec \cdot mb} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

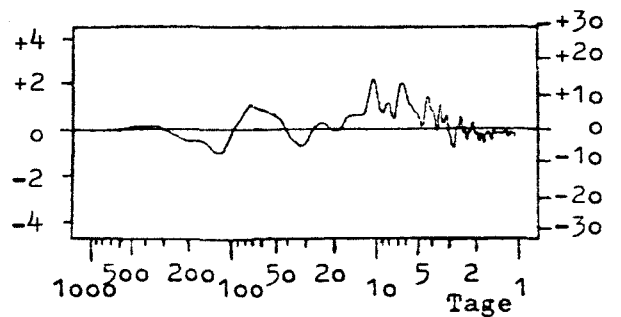


Abb.36: Punkt VII, Shetland-Inseln, 63° N, 0°

4.1.2 Punkt I, NE-Pazifik ($38^{\circ}N$, $140^{\circ}W$)

In allen 3 Niveaus ist der Bereich von 2 bis ca. 5 Tagen kohärent, in welchem u'_g und v'_g positiv korreliert sind, so daß der Drehimpulstransport durch die Langen Wellen nach Norden gerichtet ist (siehe Abb. 37).

Da die Varianzen von u_g und v_g (siehe HERRMANNSEN) an dieser Stelle mit der Höhe zunehmen, gilt dies auch für den meridionalen Drehimpulstransport, denn Kohärenz und Phase ändern sich im Periodenbereich 2 - 5 Tage kaum mit der Höhe. Aus der Phasenbeziehung zwischen u'_g und v'_g kann nichts über die Lage von Trögen und Rücken über dem Punkt ausgesagt werden, so wie es z.B. bei der Diskussion von T' und v'_g versucht wurde (s. 3.1.2).

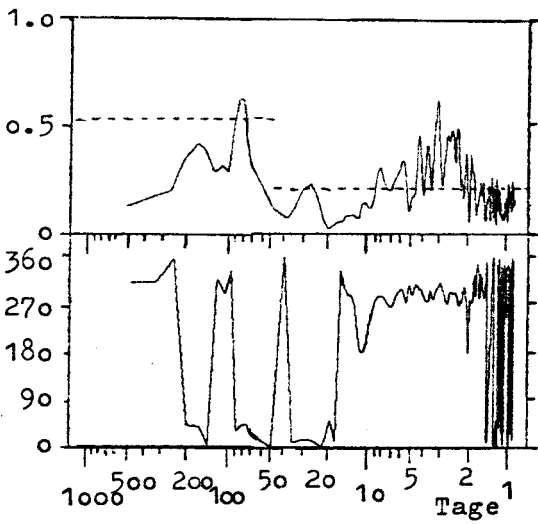
Im mittleren Periodenbereich ist der Peak bei 30 Tagen interessant, der auf den Einfluß blockierender Hochs über dem Ostpazifik zurückzuführen sein könnte.

Ein evtl. angezeigter Transport durch die Halbjahreswelle wird als nicht signifikant angesehen, da in den Energiespektren kein entsprechender Peak auftritt. Bei den Co-spektren liegt nur in 850 mb der Kohärenzwert knapp über der Kohärenzschwelle, und der Spektralwert bleibt trotz günstiger Phase gering.

Im 200 mb-Niveau ist ein Jahrespeak nicht vorhanden, weil keine jährliche v_g -Schwankung auftritt (s. HERRMANNSEN).

Kohärenz

Phase

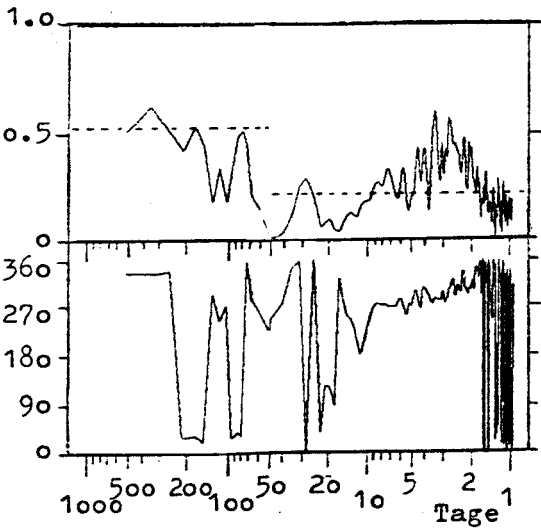
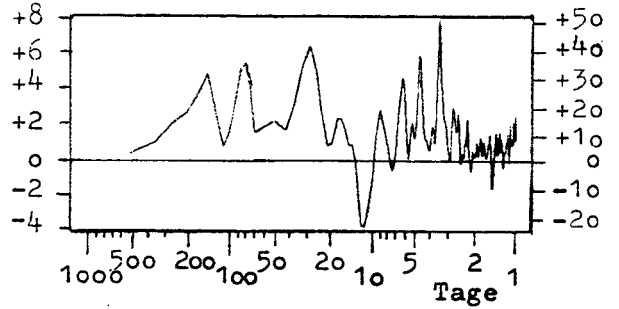


$\nu \cos \varphi \cdot C_{0,u,v}$

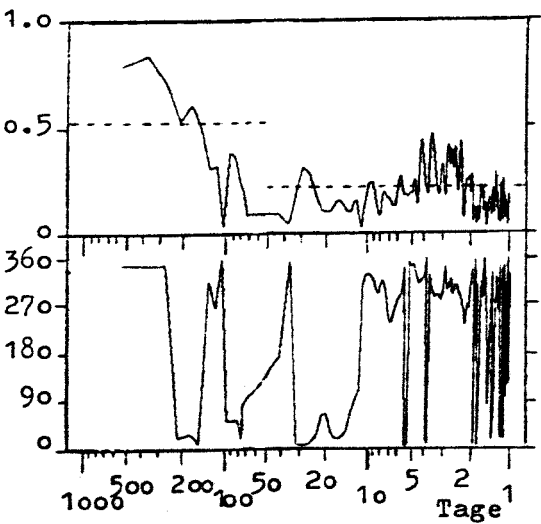
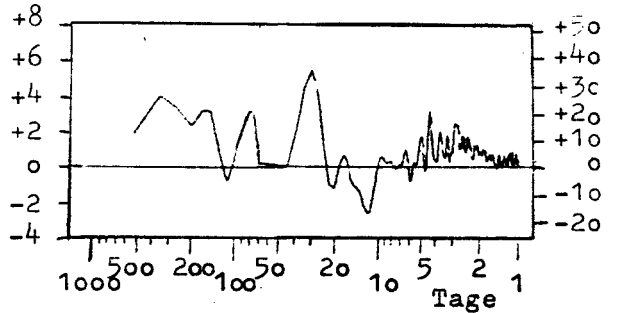
$$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{sec}^2} \right]$$

$$\left[10^7 \frac{\text{kg m}}{\text{sec mb}} \right]$$

200 mb



500 mb



850 mb

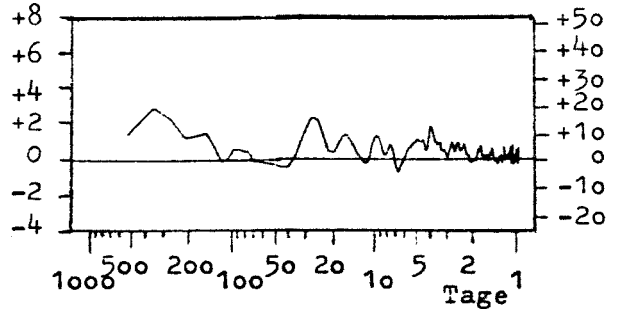


Abb.37: Punkt I, N E - P a z i f i k 38° N, 140° W

4.1.3 Punkt II, NW-Pazifik (47°N , 175°E)

An diesem Punkt im NW-Pazifik wird nach SPETH, 1974, (Abb.3) im Januarmittel Drehimpuls nach Süden transportiert. So treten auch im hier berechneten Cospektrum (s. Abb. 38) bevorzugt negative Werte auf, vor allem bei Perioden zwischen 1 und 5 Tagen sowie im Halbjahresbereich.

Von den Langen Wellen transportieren am meisten diejenigen mit Perioden von ca. 3 - 4 Tagen. Die Stelle, an welcher der Punkt II gelegen ist, wird oft von der Polarfront berührt. Bei den Punkten IV und VI dagegen, die hauptsächlich von der Subtropenfront beeinflusst werden, verschiebt sich das Maximum des meridionalen Drehimpulsflusses zu ca. 7 Tagen (s. Abb.19 und Abb.21). Das bedeutet, daß die Wellen, die am effektivsten Drehimpuls transportieren, kürzer und/oder schneller sind, wenn sie an die Polarfront gekoppelt sind, als wenn sie mit der Subtropenfront verbunden sind.

Der Halbjahrespeak ist für diesen Punkt bedeutender als die Jahreswelle. Auch die Energiespektren von u_g zeigen keine Jahrespeaks, aber einen signifikanten Halbjahrespeak in 200 mb, sowie relativ hohe Varianzen in 500 und 850 mb. Stärkste zonale Winde gibt es über dem nördlichen Pazifik im April/Mai und November, und entsprechend tritt bei der halbjährigen Periode ein signifikanter Drehimpulstransport auf (vergl. auch Punkt B, Beringsee, Kap. 3.2.1).

Obwohl Punkt II nahe dem System Polarfront/Polarjet liegt - ebenso wie die Punkte III (Ural) und VII (Shetland-Inseln) (s. 4.1.1) - sind hier dennoch einige Cospektralwerte kohärent. Ein meridionaler Drehimpulstransport ist verständlich und nötig an Punkt II, weil die stärkste westliche Höhenströmung im Mittel weiter südlich liegt (Maximum über dem west-Pazifik, s. DEFANT/MÖRTH, 1978) und daher von Norden über den Punkt II hinweg Drehimpuls nach Süden transportiert werden muß, während südlich der Punkte VII und III keine derartigen Maxima im Zonalwind auftreten.

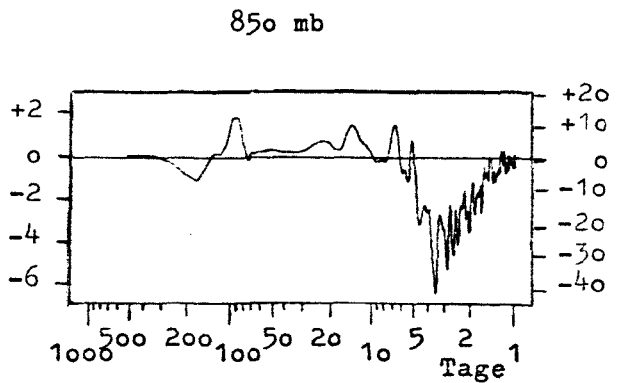
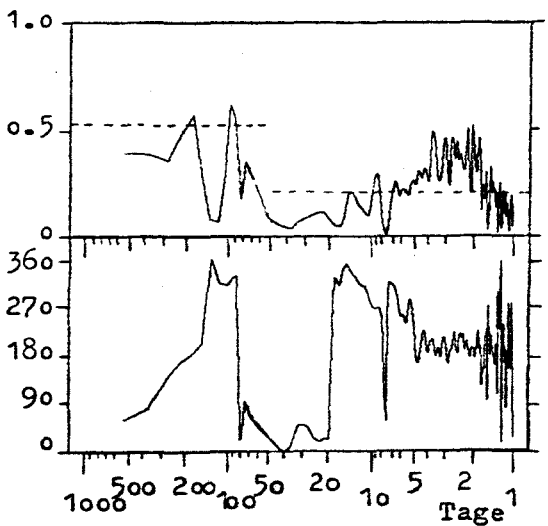
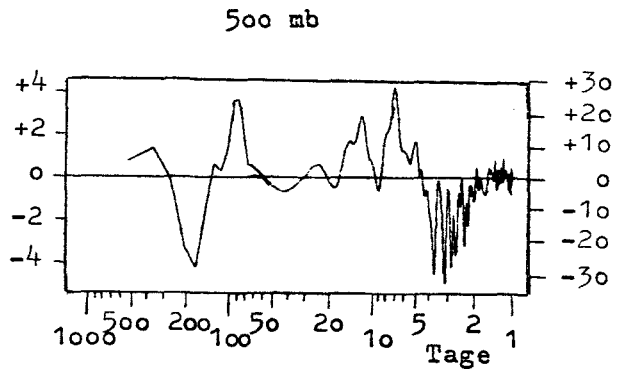
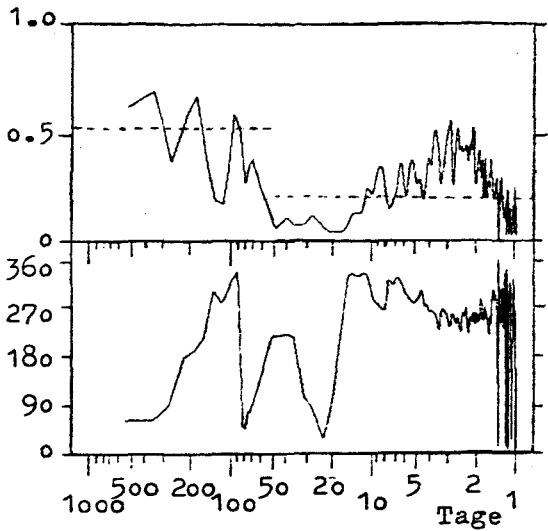
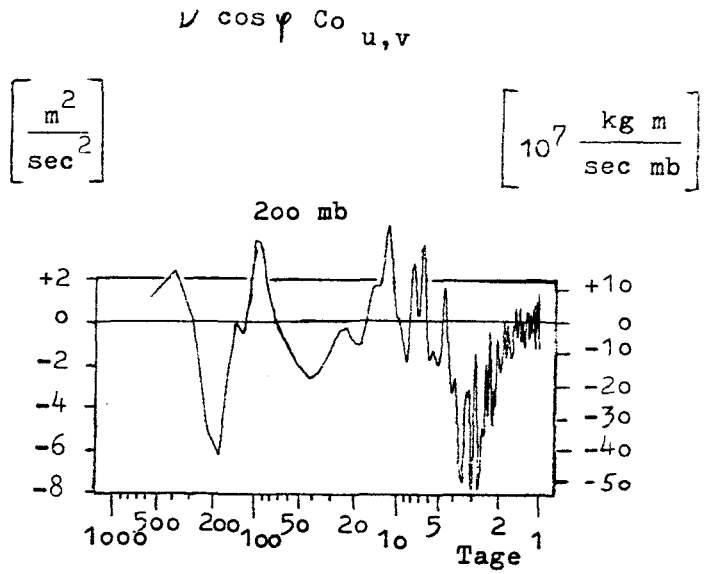
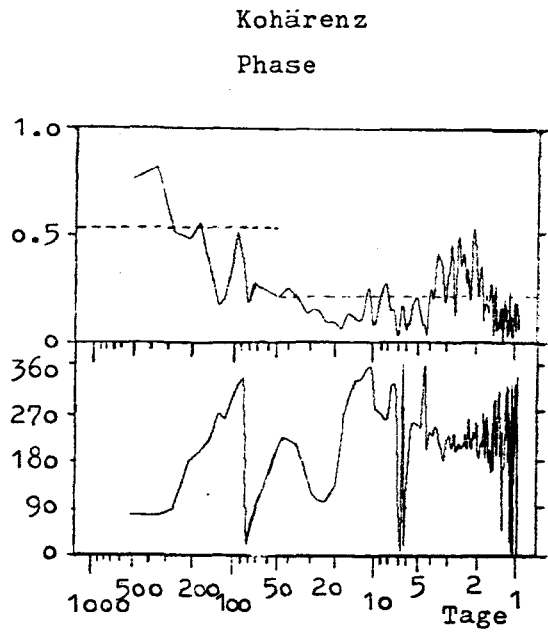


Abb. 38: Punkt II, NW - Pazifik, 47° N, 175° E

4.1.4 Punkt IV, Bermuda-Inseln ($35^{\circ}N$, $65^{\circ}W$)

An den Cospektren dieses Punktes (s. Abb. 39) fällt besonders auf, daß relativ weite Periodenbereiche kohärent sind und daß der meridionale Drehimpulstransport in allen Periodenbereichen kontinuierlich mit der Höhe zunimmt. Der Transport ist im Vergleich zu den anderen Punkten hier relativ groß und polwärts gerichtet, da die Zone der stärksten Westwinde dort zu finden ist.

Die hohen Cospektralwerte im Bereich 2 - 10 Tage rühren von der hohen Varianz von u_g her (s. HERRMANNSEN, 1979). Punkt IV liegt an der Südostseite des amerikanischen Trog, und hier bilden sich - vor allem im Winter - häufig Zyklonen, so daß die damit verbundenen Wellen einen erheblichen Beitrag zur Varianz von u_g und dem meridionalen Drehimpulsfluß leisten.

Der große Jahrespeak im Energiespektrum von u_g in 200 mb und im Cospektrum $Co_{u,v}$, 200 mb, ist auf den Einfluß des Subtropenjets zurückzuführen, der im Winter die schon an sich intensivere Zirkulation noch verstärkt. Im Sommer verläuft der Subtropenjet nördlich von Punkt IV, und der Zonalwind ist relativ schwach (s. DEFANT/MÖRTH, 1978). Im Winter kommt in 200 mb die Strömung von WSW her ($v'_g > 0$), im Sommer ist sie mehr zonal ($v'_g < 0$). Damit läßt sich die Richtung des meridionalen Drehimpulstransportes durch die Jahreswelle wie folgt erklären:

$$\begin{array}{l} \text{Winter: } u'_g > 0, \quad v'_g > 0 \\ \text{Sommer: } u'_g < 0, \quad v'_g < 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad Co_{u,v}(200 \text{ mb, Jahr}) > 0$$

In 850 mb dagegen hat die Höhenströmung im Sommer eine südliche Komponente, weil eine Antizyklone über dem mittleren Atlantik liegt:

$$\begin{array}{l} \text{Winter: } u'_g > 0, \quad v'_g < 0 \\ \text{Sommer: } u'_g < 0, \quad v'_g > 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad Co_{u,v}(850 \text{ mb, Jahr}) < 0$$

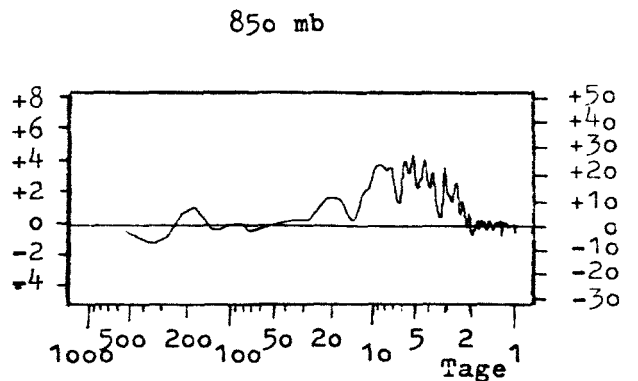
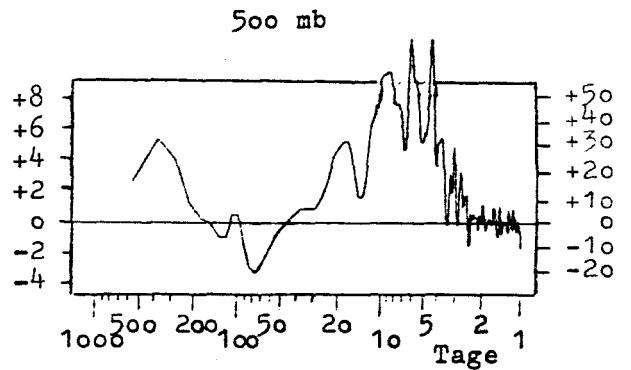
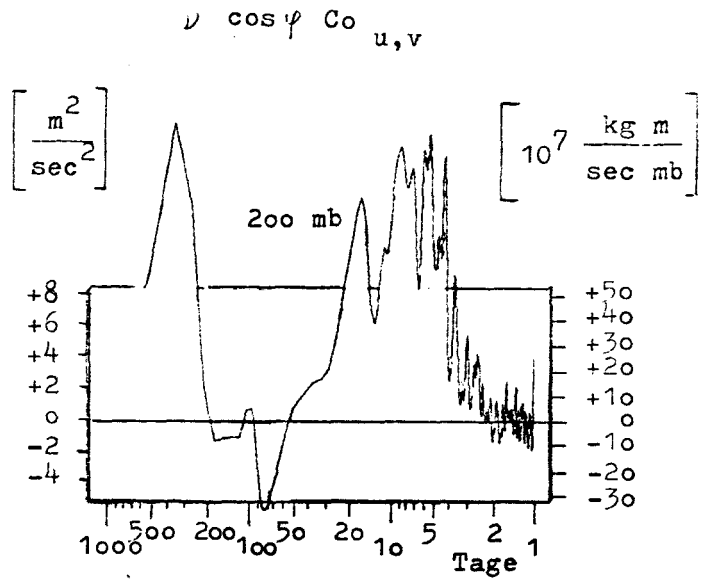
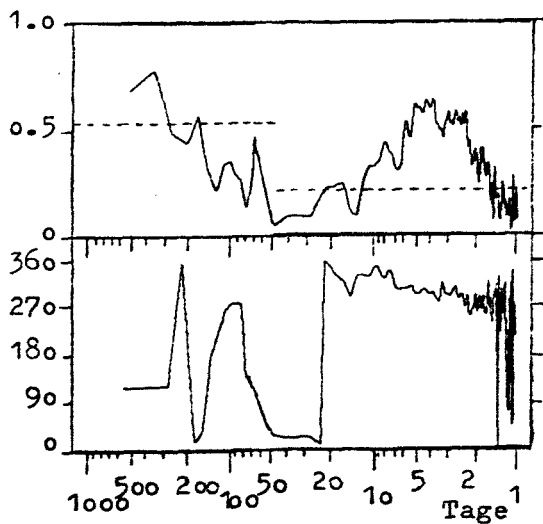
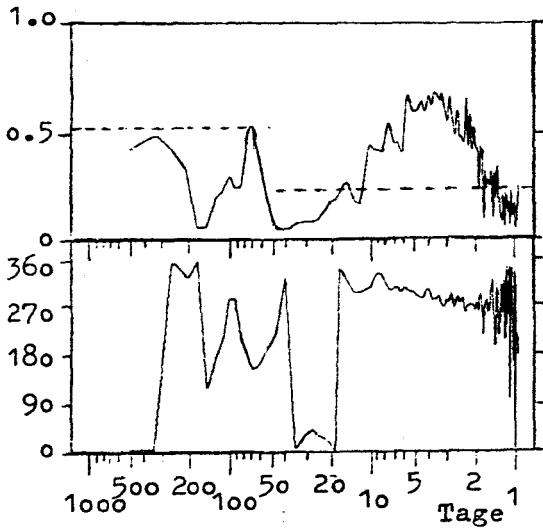
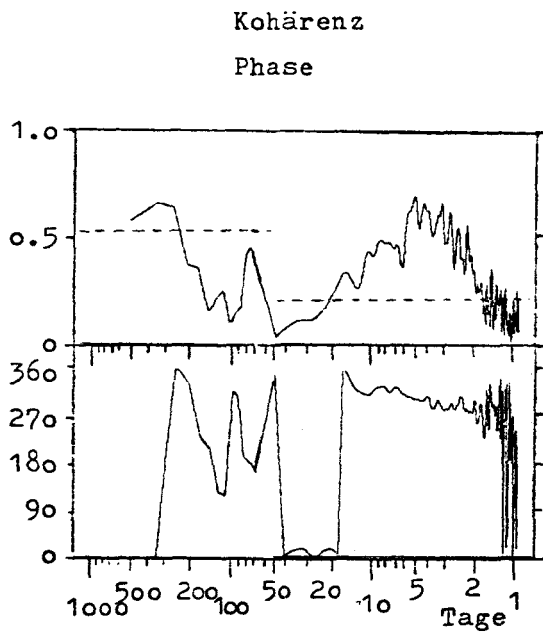


Abb.39: Punkt IV : Bermuda - Inseln 35° N, 65° W

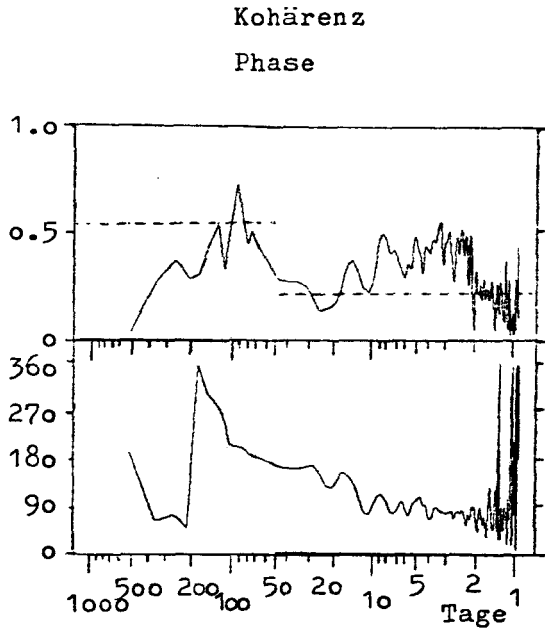
4.1.5 Punkt V, Hudson-Bay ($65^{\circ}N$, $80^{\circ}W$)

Der meridionale Drehimpulstransport ist an diesem Punkt gering (s. Abb. 40). Insgesamt erfolgt der Transport nach Süden, wie erwartet wegen der relativ nördlichen Lage des Punktes und wegen der Ergebnisse von SPETH (1974).

Jahrespeaks treten weder in den Energiespektren des Windes noch in den Cospektren auf, denn Punkt V liegt immer nahe der Achse des amerikanischen Troges, die sich kaum mit den Jahreszeiten verlagert. (vergl. Punkt A, Boston, Kap. 3.1.1).

Der Transport durch die Langen Wellen und Zyklonen bleibt trotz der hohen Kohärenz in entsprechenden Periodenbereich gering, weil die Zyklonen meistens südlich des Punktes V vorüberziehen.

Peaks bei 9 und 15 Tagen sind sowohl in den Energie- als auch in den Cospektren zu verzeichnen. Genauere Untersuchungen wären nötig, um diese Periodizität zu erklären. Eventuelle blockierende Wetterlagen über dem betrachteten Gebiet scheinen als Interpretation unzureichend. Ebenso wenig kann über die Periode von ca. 100 Tagen etwas ausgesagt werden.



$$\nu \cos \varphi C_{0,u,v}$$

$$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{sec}^2} \right] \quad \left[10^7 \frac{\text{kg m}}{\text{sec mb}} \right]$$

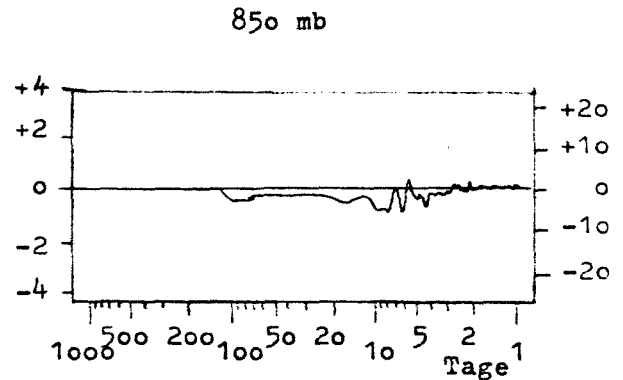
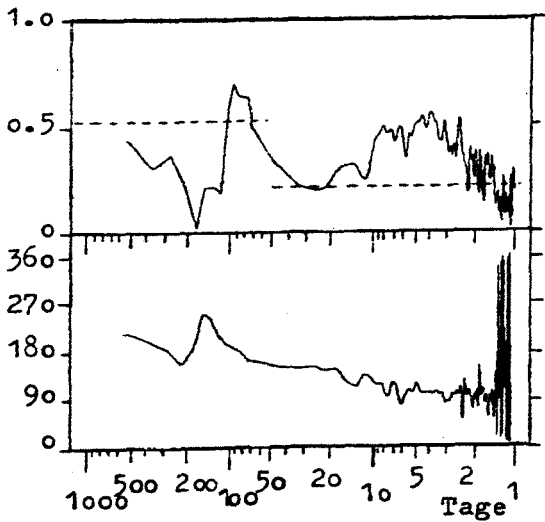
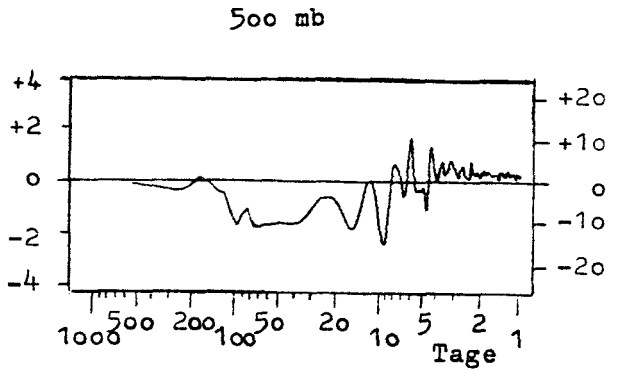
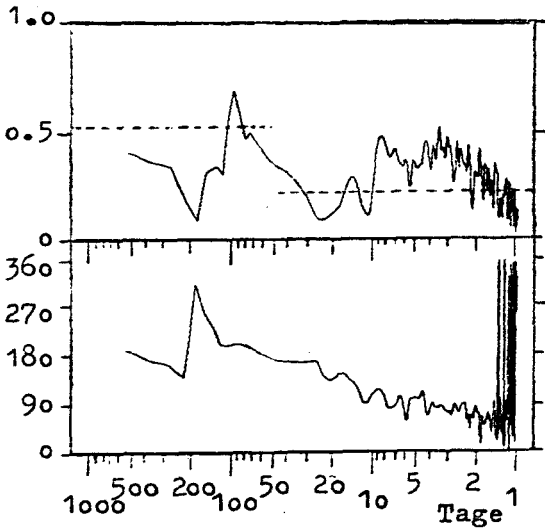
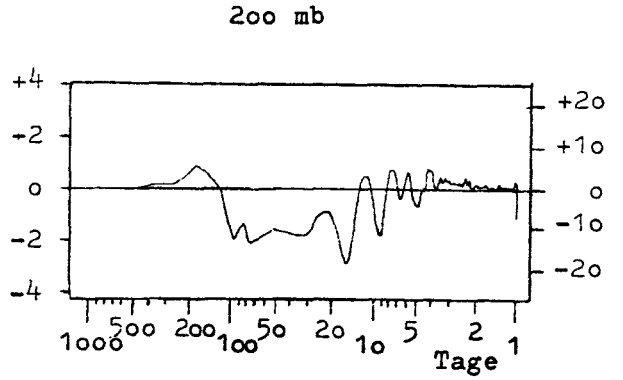


Abb.40: Punkt V, Hudson-Bay, 65° N, 80° W

4.1.6 Punkt VI, W-Pazifik ($30^{\circ}N$, $150^{\circ}E$)

Ebenso wie bei Punkt IV (Bermudas) zeigen die Cospektren für Punkt VI (siehe Abb. 41) relativ hohe Kohärenz und eine auffällige Zunahme des meridionalen Drehimpulstransports mit der Höhe. (Man beachte den anderen Maßstab bei der 200-mb - Darstellung !)

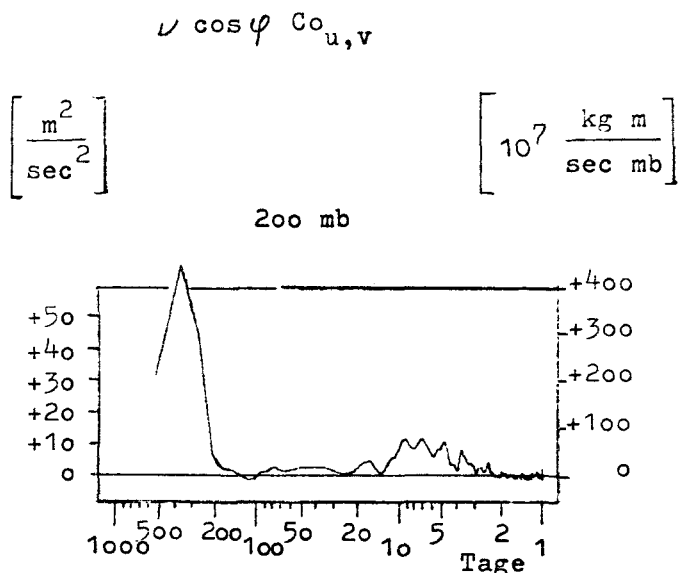
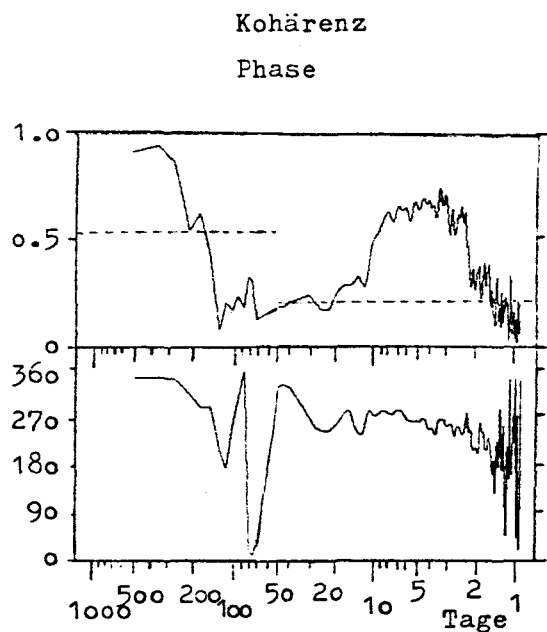
Der außergewöhnlich große Jahrespeak in 200 mb, der auch in den Energiespektren von u_g und v_g auftritt, beruht darauf, daß im Winter in 200 mb über dem West-Pazifik in Verbindung mit dem Subtropenjet das Gebiet stärkster zonaler Winde auftritt (ca. 100 kn, DEFANT/MÖRTH, 1978), während im Sommer nur ca. 10 kn zu verzeichnen sind.

Der nach Süden gerichtete Transport durch die jährliche Welle in 850 mb ist ähnlich zu erklären wie bei Punkt IV (Bermudas), der ebenfalls im Westteil eines Ozeans liegt: Im Sommer kommt die Strömung in 850 mb vorwiegend aus SW ($v'_g > 0$), da ein Hoch über dem Zentralpazifik liegt; im Winter ist die Strömung mehr zonal:

$$\begin{array}{l} \text{Winter: } u'_g > 0, \quad v'_g < 0 \\ \text{Sommer: } u'_g < 0, \quad v'_g > 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad Co_{u,v}(850\text{mb, Jahr}) < 0$$

Die Halbjahreswelle ist zwar kohärent, trägt aber nur gering zum Transport bei.

Eine weitere Ähnlichkeit der Punkte IV (Bermudas) und VI (W-Pazifik) ist ihre Lage an der Südostseite eines Troges, des amerikanischen oder des asiatischen. Hier entwickeln sich Zyklonen und längere Wellenstörungen, deren Beitrag zum Drehimpulstransport nach Norden erheblich ist. Siehe dazu das Maximum im Periodenbereich zwischen 10 und 5 Tagen, sowie in 850 mb zwischen 7 und 3 Tagen in Abb. 41.



! 200 mb anderer Maßstab !

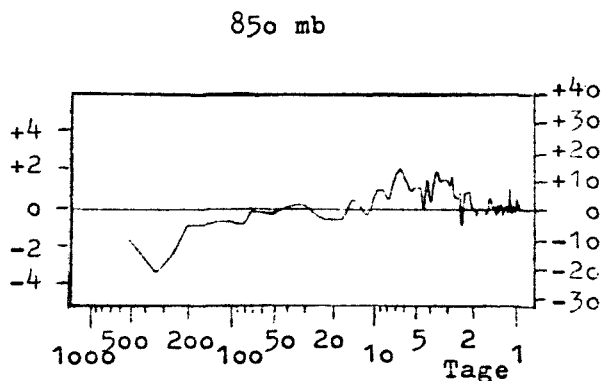
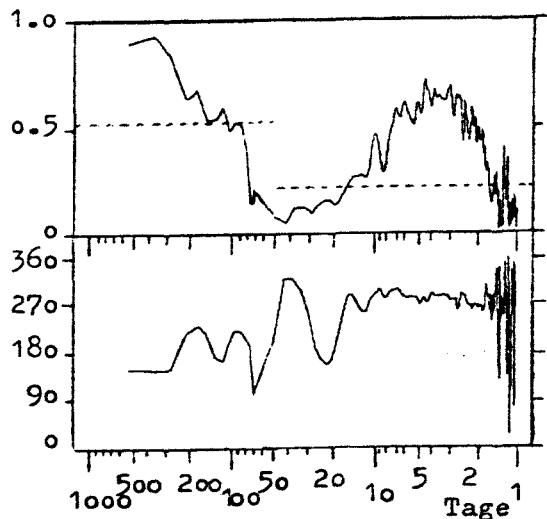
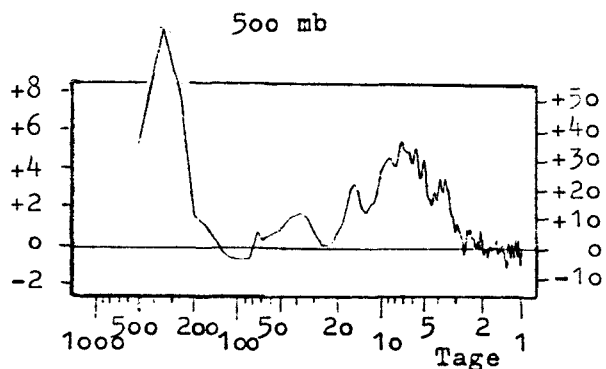
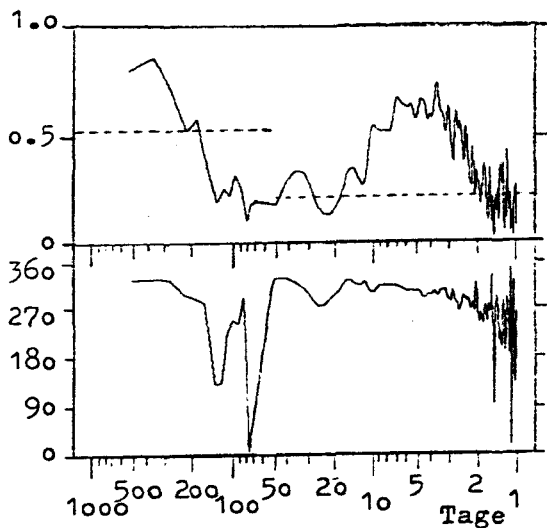


Abb.41: Punkt VI, W - P a z i f i k

30°N, 150°E

4.2 MERIDIONALE TRANSPORTE VON DREHIMPULS
- ÜBERSICHT UND VERGLEICH

Für eine erste zusammenfassende Orientierung wird die Tabelle der Mittelwerte (Tab. 8) präsentiert: Wie zu erwarten nimmt $\overline{u_g}$ an jedem Punkt mit der Höhe zu. In 200 mb treten die höchsten Geschwindigkeiten bei den Punkten IV (Bermudas) und VI (W-Pazifik) wegen des Einflusses des Suptropenjets auf. Punkt V, dem nördlichsten von den hier betrachteten Punkten, sind naturgemäß recht kleine Windgeschwindigkeiten eigen.

Die meridionale Windkomponente $\overline{v_g}$ ist viel schwächer als die zonale Windkomponente $\overline{u_g}$. Der Betrag von $\overline{v_g}$ ist an allen Punkten in allen Niveaus kleiner als 4 [m/sec], und das Vorzeichen ändert sich nie mit der Höhe.

An Punkt III (Ural) und Punkt V (Hudson-Bay) ist $\overline{v_g}$ negativ, d.h. die Strömung besitzt eine südwärts gerichtete Komponente, weil beide Punkte im Mittel an der Westflanke je eines Troges (des asiatischen bzw. amerikanischen) gelegen sind.

Art	p [mb]	I	II	III	IV	V	VI	VII
		38°N 140°W	47°N 175°E	58°N 65°E	35°N 65°W	65°N 80°W	30°N 150°E	63°N 0°W
u_g [m/sec]	200	+22.4	+24.9	+14.8	+27.7	+ 8.1	+38.0	+11.1
	500	+15.8	+15.2	+10.4	+17.8	+ 5.5	+21.3	+ 8.0
	850	+ 6.0	+ 6.4	+ 5.0	+ 7.4	+ 1.8	+ 6.1	+ 3.6
v_g [m/sec]	200	+ 0.7	+ 3.2	- 3.1	+ 1.3	- 2.1	+ 1.1	+ 1.3
	500	+ 2.3	+ 2.0	- 2.0	+ 1.3	- 1.9	+ 2.2	+ 2.7
	850	+ 1.1	+ 0.7	- 0.7	+ 1.1	- 1.4	+ 1.2	+ 2.3

Tab.8: Mittelwerte der Zeitreihen

4.2.1 Die Beiträge der verschiedenen Scales

Tab. 9 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Beiträge der verschiedenen Scales zum meridionalen Drehimpulstransport an den fünf betrachteten Punkten.

Die Zahlen in Tab. 9 sind Mittelwerte für den jeweiligen Periodenbereich. Sie wurden nach den Cospektralbildern $\nu \cos \varphi Co_{u,v}$ abgeschätzt. Im Bereich 7 - 50 Tage wird zusätzlich vermerkt, bis zu welcher Periode die Spektralwerte kohärent sind (vergl. auch Erläuterung in 3.3.1 zu Tab. 4, S. 42: meridionaler Wärmetransport).

Im Vergleich zum meridionalen Transport sensibler Energie (3.3.1) fällt auf, daß die $Co_{u,v}$ -Spektren häufiger nicht kohärent sind. Vor allem sind die Cospektralwerte im "mittleren" Periodenbereich (7 - 50 Tage) kaum signifikant. Kohärent sind meistens die Jahreswelle und der Bereich ≤ 7 Tage. An allen Punkten und in allen Periodenbereichen nimmt der Betrag des Drehimpulsflusses mit der Höhe zu.

Der Transport hervorgerufen durch die Jahreswelle ist an den drei südlich gelegenen Punkten (I,IV,VI) bedeutend und ist dort bevorzugt nach Norden gerichtet.

Im Bereich der Gruppe Zyklonen/Lange Wellen weisen die Punkte IV und VI größere Transporte auf als die nördlicher gelegenen Punkte I,II und V. Die effektivste Periode für die ersteren liegt bei ca. 7 Tagen, während an den Punkten I und II Wellen mit Perioden von 3 bis 5 Tagen am meisten zum Transport beitragen (s. 4.1.3, S.60).

Punkt Periode Niveau	I NE-Pazifik 38°N, 140°W	II NW-Pazifik 47°N, 175°E	IV Bermuda-Inseln 35°N, 65°W	V Hudson-Bay 65°N, 80°W	VI W-Pazifik 30°N, 150°E	
	$\nu \cos \varphi Co_{uv}$ Phase	$\nu \cos \varphi Co_{uv}$ Phase	$\nu \cos \varphi Co_{uv}$ Phase	$\nu \cos \varphi Co_{uv}$ Phase	$\nu \cos \varphi Co_{uv}$ Phase	
Jahr	200	-----	+ 2 80	+19 0	/	+70 350
	500	+ 4 340	+ 1 70	-----	/	+11 340
	850	+ 3 350	-----	- 1 120	/	- 4 150
Halbjahr	200	-----	- 6 200	-----	/	(+ 2) 300
	500	-----	- 4 200	-----	/	(+ 1) 300
	850	+ 1 40	- 1 190	+ 1 20	/	(- 1) 240
mittlerer Perioden- bereich 7 - 50 Tage	200	/	/	≤20 Tg. +11 330	≤18 Tg. - 1 150	≤20 Tg. + 7 290
	500	/	/	≤20 Tg. + 6 330	≤18 Tg. - 1 150	≤20 Tg. + 3 320
	850	/	/	≤20 Tg. + 2 340	≤18 Tg. - 1 150	≤16 Tg. + 1 300
Zyklonen und Lange Wellen 1 - 7 Tage	200	+ 2 300	- 3 200	+ 5 330	± 0 90	+ 5 290
	500	+ 1 300	- 2 200	+ 4 330	± 0 90	+ 2 310
	850	+ 1 300	- 3 200	+ 2 330	± 0 90	+ 1 300

Tab.9: Meridionaler Transport von Drehimpuls

Beitrag der verschiedenen Scales

Die Zahlen geben die mit der Frequenz multiplizierte Spektraldichte an: $\nu Co_{u,v}$ [m^2/sec^2]

Phase: u vor v

4.2.2 Die integrierten Spektren

Tab. 10 und Abb. 47 zeigen, wie groß der Anteil des Drehimpulstransportes in meridionaler Richtung hervorgerufen durch Perioden von 1 - 30 Tagen und 1 - 512 Tagen ausfällt. Die Werte wurden den integrierten Cospektren (Abb. 42, 43, 44, 45, 46, S. 72 u. 73) entnommen.

Die 5 betrachteten Punkte lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. An den nördlicher gelegenen Punkten II und V ist der Drehimpulstransport negativ, d.h. äquatorwärts gerichtet. Die Transportbeträge bleiben relativ klein.
2. An den Punkten I, IV und VI wird eindeutig Drehimpuls polwärts transportiert und dies sowohl durch wellen mit Perioden \approx 30 Tage als auch durch solche mit langen Perioden (ca. 1 Jahr). Der Transport nimmt an den drei Punkten mit der Höhe zu, da auch die Windgeschwindigkeit (\bar{u}_g, u'_g) mit der Höhe wächst. Besonders bei Punkt VI fällt der gewaltige Anteil hervorgerufen durch die Jahresperiode in 200 und auch in 500 mb auf (s.4.1.6, S.66).

	I NO-Pazifik 38°N, 140°W	II NW-Pazifik 47°N, 175°E	IV Bermudas 35°N, 65°W	V Hudson-Bay 65°N, 80°W	VI W-Pazifik 30°N, 150°E
200 mb	14	-5	37	-3	58
	6	-3	25	-1	12
500 mb	7	0	15	-3	15
	2	1	13	-1	7
850 mb	5	-3	5	-1.5	-2
	2	-3	5	-1.5	-1
vertik. Mittelwert	8.7	-2.7	19	-2.5	24
	3.3	-0.3	14.3	-1	6

Tab.10 : Meridionaler Transport von Drehimpuls $[m^2/sec^2]$ durch Wellen mit Perioden von

1 - 512 Tage (obere Zeile)

1 - 30 Tage (untere Zeile)

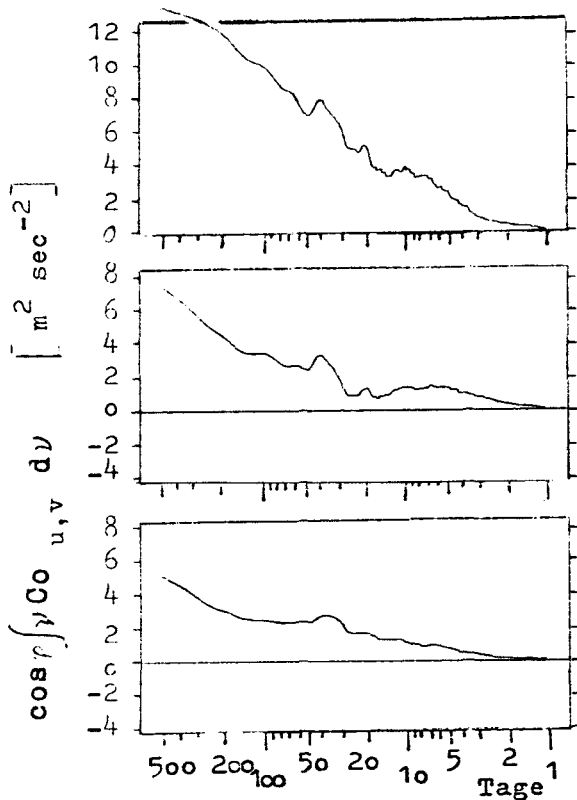


Abb.42: I, NE-Pazifik (38°N, 140°W)

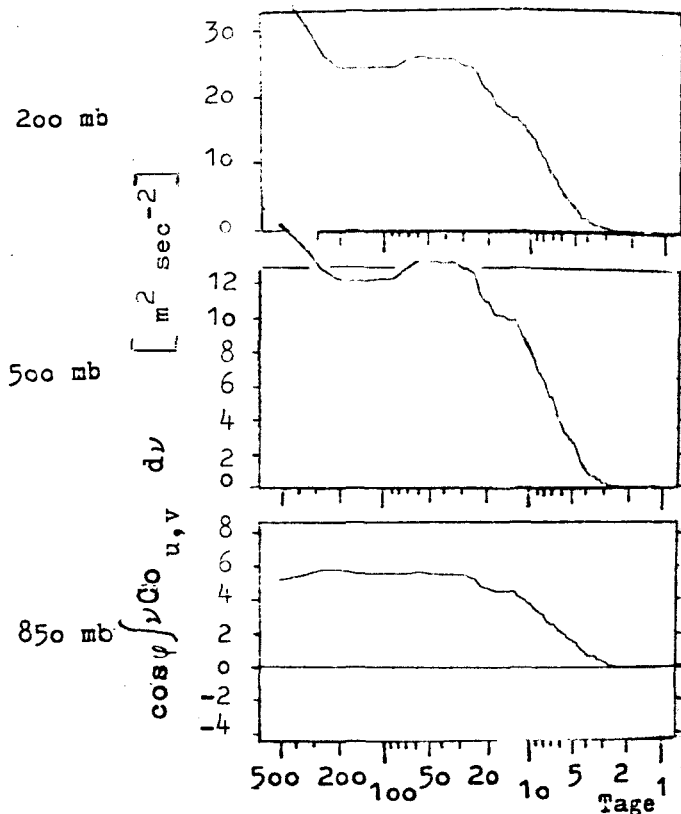


Abb.43: IV, Bermudas (35°N, 65°W)

! 200 mb anderer Maßstab !

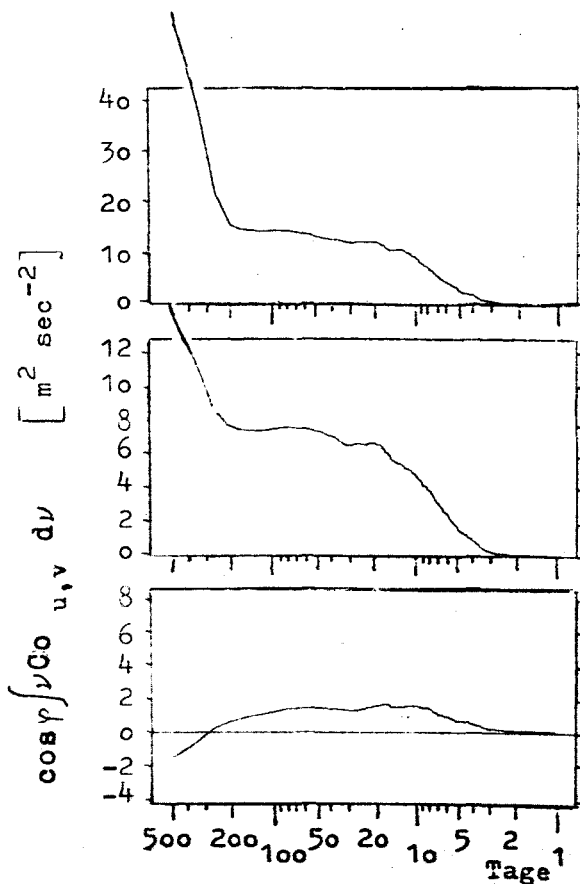


Abb.44: VI, W-Pazifik (30°N, 150°E)

! 200 mb anderer Maßstab !

200 mb Integrierte Cospektren
für die Punkte

I - Abb. 42

IV - Abb. 43

VI - Abb. 44

500 mb

850 mb

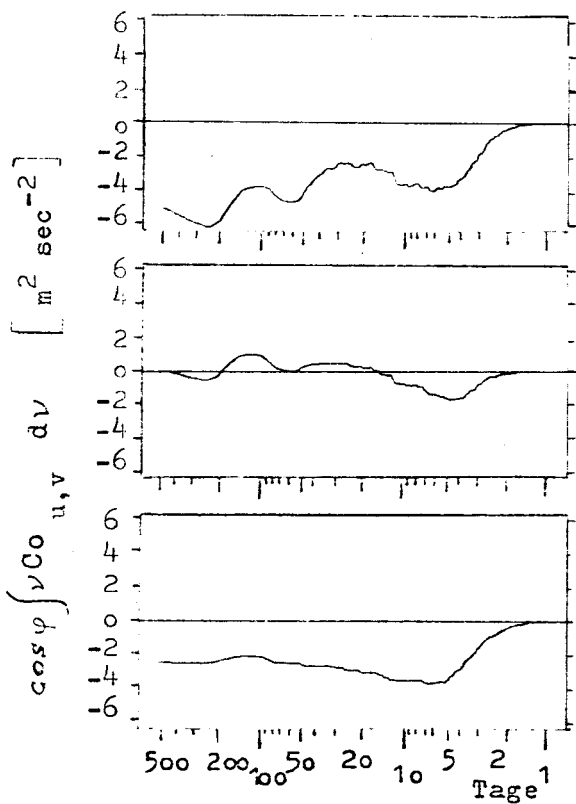


Abb.45: Integrierte Cospektren für Punkt II, NW-Pazifik (47°N, 175°E)

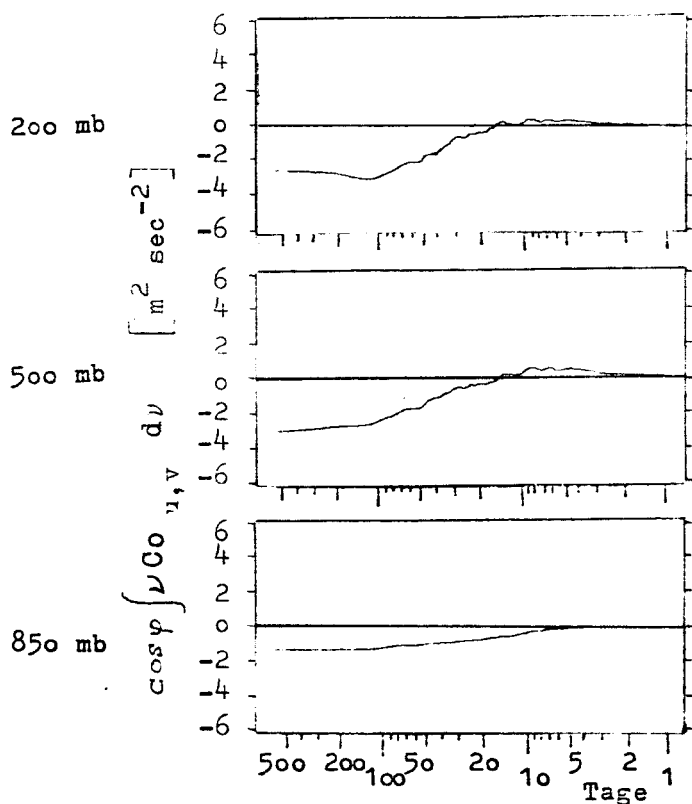


Abb.46: Integrierte Cospektren für Punkt V, Hudson-Bay (65°N, 80°W)

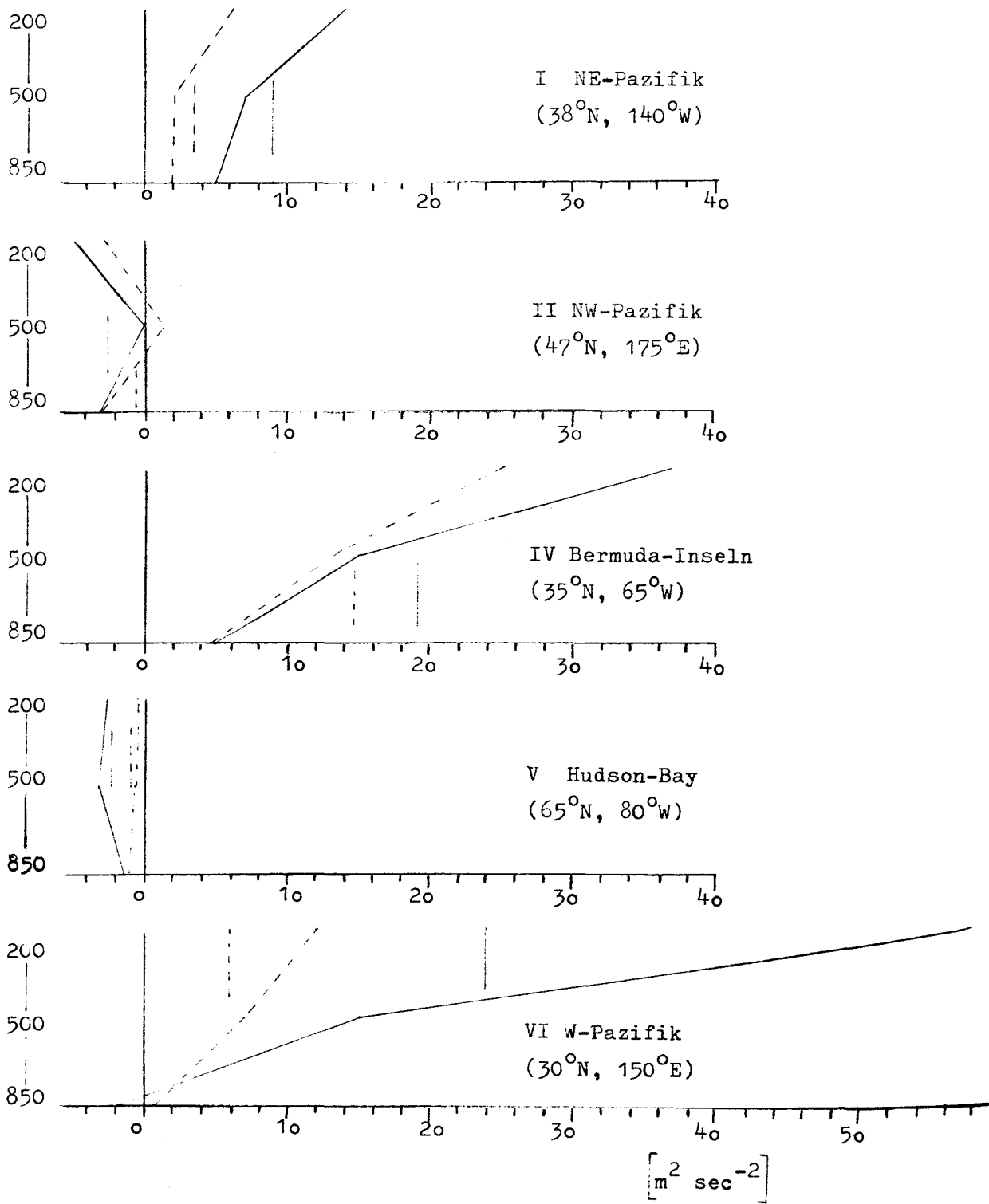


Abb. 47 : Meridionaler Transport von Drehimpuls
durch Wellen mit Perioden von
1 - 30 Tage - - - - -
1 - 512 Tage - - - - -

senkrechte Striche = vertikale Mittelwerte

Im vertikalen Mittel (als senkrechter durchgezogener Strich eingetragen in Abb. 47) wird durch den gesamten Periodenbereich am meisten bei Punkt VI ($\varphi = 30^{\circ}\text{N}$), etwas weniger bei Punkt IV ($\varphi = 35^{\circ}\text{N}$) und erneut geringer bei Punkt I ($\varphi = 38^{\circ}\text{N}$) nach Norden transportiert. So scheint die Tendenz erkennbar, daß zwischen 30° und 40° mit zunehmender Breite die Größe des meridionalen Drehimpulsflusses abnimmt. Allerdings darf man von den Spektren von nur drei Punkten nicht unbedingt auf die Verhältnisse innerhalb einer ganzen Breitenzone - hier 30° bis 40°N - schließen, da es gewiß markante Unterschiede längs der geographischen Breite gibt und da diese drei betrachteten Punkte gerade deshalb für eine Berechnung ausgewählt wurden, weil sie extreme Werte (im Januarmittel, s. Abb. IV) aufweisen.

CHIU (1966) schließt aus den integrierten Spektren des Drehimpulsflusses an verschiedenen Stationen in Nordamerika, daß nördlich von 40°N überall Drehimpuls entweder kaum nordwärts oder aber sogar nach Süden transportiert werde, im Bereich 18° - 40°N dagegen ein Nordwärtsfluß von Drehimpuls vorherrsche. Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit stimmen damit überein, doch sollte nicht geschlossen werden, daß der meridionale Drehimpulstransport gleichmäßig über die Breitenkreise erfolgt, denn es bestehen sicher starke regionale Unterschiede (Maxima und Minima, s. Abb. IV).

Die vertikalen Mittelwerte für den Periodenbereich 1 - 30 Tage an den fünf Punkten (Abb. 47) nehmen dem Betrag nach nicht kontinuierlich von Punkt I bis Punkt VI ab, wie man nach dem Resultat von SPETH, 1974 (s. auch Tab. I b) erwarten könnte. SPETH hatte Januarmittel berechnet, während in dieser Arbeit Daten des ganzen Jahres eingehen und damit ein anderes Bild liefern.

5. SCHLUSSBETRACHTUNG

In dieser Arbeit werden die großturbulenten Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls durch wandernde Wellen spektral untersucht. Für 13 ausgewählte Gitterpunkte der Nordhalbkugel werden Cospektren im Periodenbereich von 1 bis 512 Tage für das 200, 500 und 850 mb-Niveau erstellt und interpretiert.

Der meridionale und zonale Transport von sensibler Energie wird für 6 Punkte zwischen 30°N und 60°N berechnet. Kohärent sind meistens der Jahresbereich sowie Perioden ≤ 30 Tage. Über den Bereich zwischen 50 Tagen und 1/2 Jahr werden keine Aussagen gemacht, weil die Kohärenz hier fast immer kleiner als die 95%ige Kohärenzschwelle ist. Der Gesamtfluß sensibler Energie durch alle betrachteten Wellen ist immer polwärts gerichtet.

Abb. 48 (S.77) gibt einen Überblick darüber, wieviel sensible Energie an den 6 betrachteten Gitterpunkten einerseits durch die langen Perioden, d.h. Jahres- und Halbjahreswelle, und andererseits durch die Langen Wellen (1 - 7 Tage) in meridionaler Richtung transportiert wird. Die Werte, die durch die Länge der Pfeile wiedergegeben werden, wurden den integrierten Spektren entnommen. Natürlich ist das Bild mit nur 6 Punkten sehr grob, aber dennoch sind markante regionale Unterschiede erkennbar, wie z.B. der große Transport durch die Langen Wellen an Punkt A (Boston).

Bei den Perioden von 1 - 7 Tagen wird an allen Punkten und in allen Niveaus (einzige Ausnahme Punkt E, 200 mb) Wärme polwärts transportiert; in 850 mb stets mehr als in 200 mb. An den Punkten A, B, C und F bringen der Jahres- und evtl. Halbjahrespeak einen erheblichen Zusatz zum kurzperiodischen Bereich in 500 und 850 mb.

Die Punkte zeigen jeder für sich spezielle Eigenarten in den Cospektren, so daß eine Gruppeneinteilung, etwa nach Land- oder Seepunkten, nicht gelingt. Eine diesbezügliche

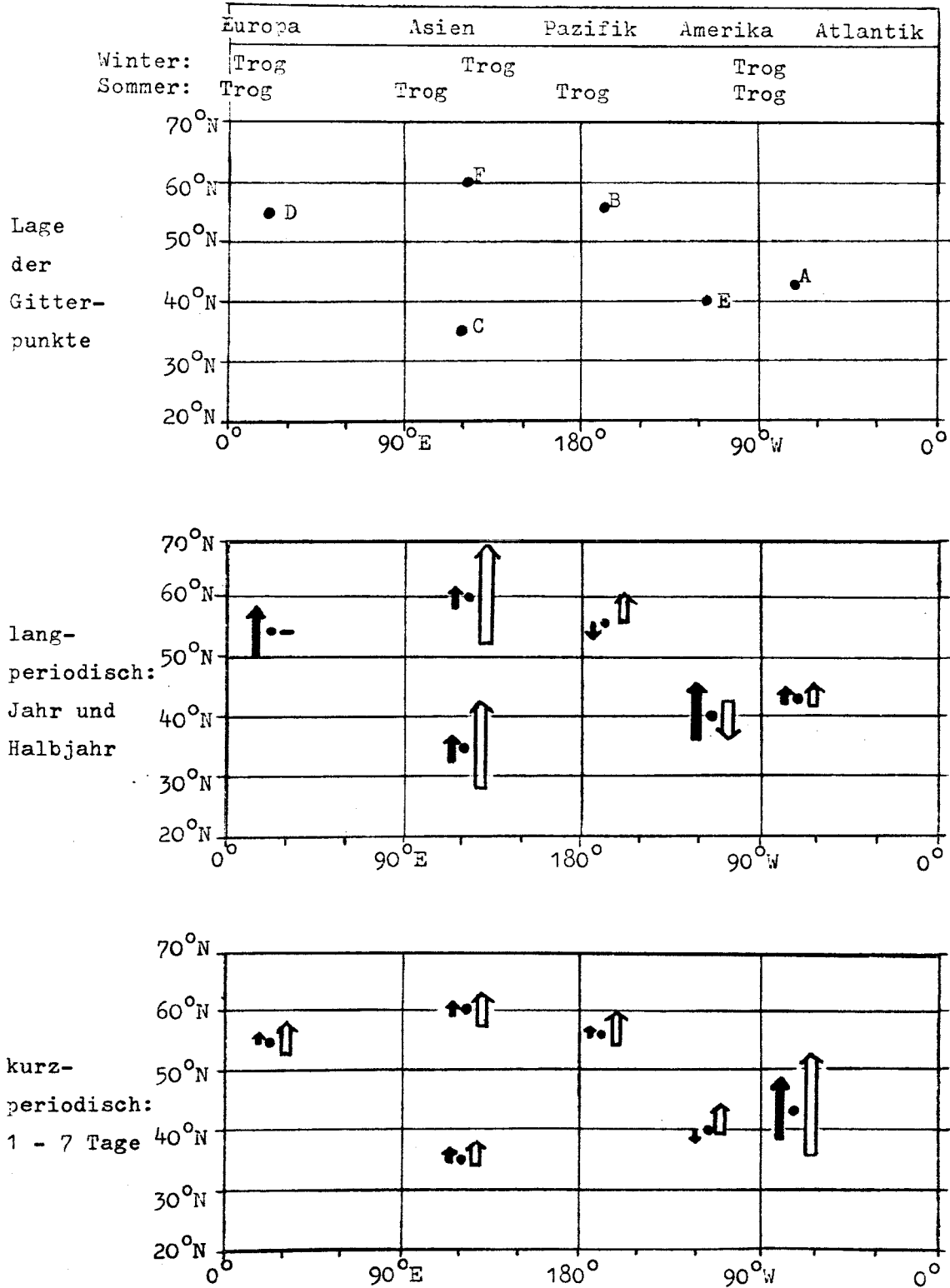


Abb. 48: meridionaler Transport sensibler Energie an den 6 betrachteten Gitterpunkten in 200 mb (\longrightarrow) und in 850 mb (\Longrightarrow) durch Wellen mit Perioden von
 160 - 512 Tagen (mittlere Abbildung)
 und 1 - 7 Tagen (untere - " -)

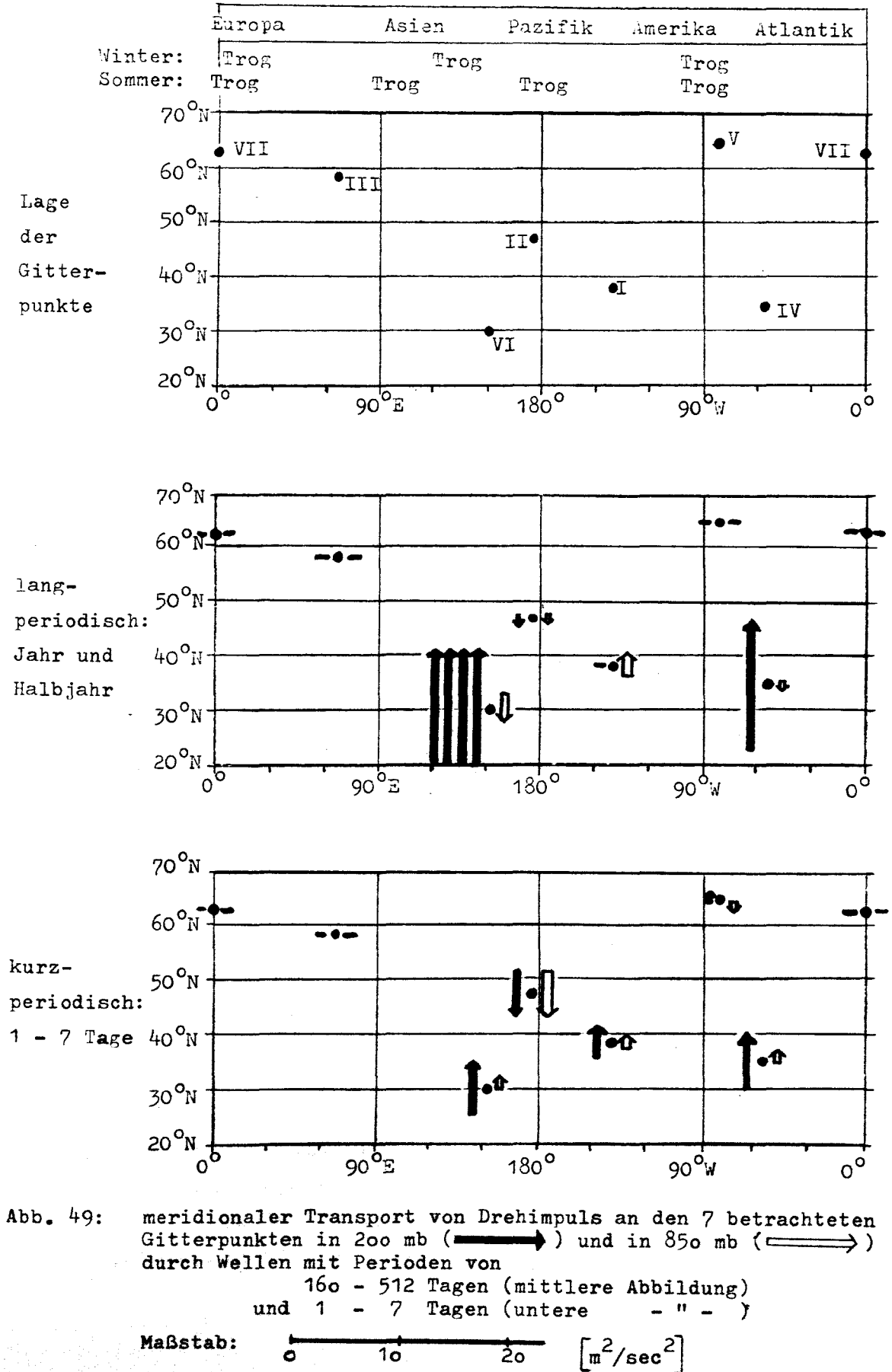
Maßstab: \longrightarrow 0 10 20 [°K m/sec]

Gemeinsamkeit ist lediglich bei den beiden Asienpunkten in ihren ihnen eigenen hohen Jahrespeaks, die die Kontinentalität widerspiegeln, zu erkennen.

Es kann nicht gesagt werden, daß generell in 500 mb weniger Wärme durch die wandernden Wellen transportiert wird als in 850 und 200 mb.

Für 7 Punkte werden die Cospektren des meridionalen Drehimpulstransportes berechnet (s. Abb. 49, S.78). Während sich die Cospektren zweier Punkte (III, Ural und VII, Shetland-Inseln), die in der Nähe der Polarfront gelegen sind, als insignifikant erweisen, zeigen die der anderen Punkte relativ hohe Kohärenz im Jahresbereich und bei Perioden ≈ 10 Tage, also in insgesamt weniger Bereichen als die Cospektren für den meridionalen Transport sensibler Energie. An den drei Punkten, die zwischen 30°N und 40°N liegen, wird Drehimpuls stets nach Norden transportiert, wobei ein erheblicher Teil durch die Jahreswelle getragen wird. Dagegen ist der Betrag an Punkt II in $\varphi = 47^{\circ}\text{N}$ und Punkt V in $\varphi = 65^{\circ}\text{N}$ geringer, und der Gesamttransport ist nach Süden gerichtet; ein Jahresbeitrag ist dort nicht zu verzeichnen, wohl aber eine Halbjahreswelle an Punkt II.

Es ist zu bedenken, daß die Spektren für die hier betrachteten Punkte sicher nicht als repräsentativ für die jeweilige Breite anzusehen sind, da gerade an diesen Punkten vermutlich Extremwerte auftreten. Interessant wäre eine detailliertere Untersuchung an wesentlich mehr Punkten, auch eine separate Berechnung für Jahreszeiten, um die Eigenarten im kurzperiodischen Bereich (1 - 30 Tage) besser erfassen und deuten zu können, denn Zyklonenbahnen ändern ihre Lage und Intensität mit den Jahreszeiten, und das gleiche gilt für Blocking-Aktivitäten. 300 mb ist ein weiteres wichtiges Niveau, für das Spektren erstellt werden könnten, weil auch in dieser Höhe sehr große Windstärken auftreten. Aber eine solche Ausweitung der Untersuchung übersteigt den Rahmen einer Diplomarbeit bei weitem.



L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- BARRY, R.G. and A.H. PERRY, 1973: Synoptic climatology,
Methuen & Co. Ltd., London
- CHANG, J.-H., 1972: Atmospheric circulation systems and
climates, The Oriental Publishing Company,
Honolulu, Hawaii
- CHIU, W.C., 1960: The spectra of large-scale turbulent
transfer of momentum and heat, J. Meteorol. 17,
pp. 435 - 441
- CHIU, W.C., and H.L. CRUTCHER, 1966: The spectrums of angular
momentum transfer in the atmosphere,
J. Geophys. Res. 71
- DEFANT, A., F., 1958: Physikalische Dynamik der Atmosphäre,
Akademische Verlagsgesellschaft mbH,
Frankfurt/M.
- DEFANT, F., 1974: Das Anfangsstadium der Entwicklung einer
baroklinen Wellenstörung in einem baroklinen
Grundstrom, Berichte Inst. f. Meereskunde, Kiel,
Nr. 4
- DEFANT, F., 1976: Die Energetik der Allgemeinen Zirkulation
der Atmosphäre, Promet 4, 6. Jahrgang
- DEFANT, F. with H.T. MÖRTH, 1978: Compendium of meteorology,
Vol. I, Part 3 - Synoptic meteorology,
in Wiin-Nielsen, A. (Ed.), WMO-No. 364, Genf
- DZERDZEEVSKII, B.L. and Kh.P. POSOSYAN (Ed.), 1971:
General circulation of the atmosphere,
(Obshchaya tsirkulyatsiya atmosfery),
Israel Program for scientific translations,
Jerusalem

- ESTOQUE, M.A., 1955: The spectrum of large-scale turbulent transfer of momentum and heat, *Tellus* 7, pp. 177 - 185
- HALTNER, G.J. and F.L. MARTIN, 1957: Dynamical and physical meteorology, McGraw-Hill, New York
- HARTMANN, D.L., 1974: Time spectral analysis of mid-latitude disturbances, *Monthly Weather Rev.* 102
- HERRMANNSEN, U., 1979: Energiespektren von Temperatur, Geopotential und Wind an ausgewählten DWD-Gitterpunkten der Nordhalbkugel, Ber. Inst.f. Meereskunde, Kiel, in Vorbereitung
- JENKINS, G.M. and D.G. WATTS, 1968: Spectral analysis and its application, Holden Day, San Francisco
- JULIAN, P.R. 1966: Comments on paper by Wan-Cheng Chiu and Harold L. Crutcher, "The spectrums of angular momentum transfer in the atmosphere", *J. Geophys. Res.* 71, pp.5001 - 5004
- JULIAN, P.R., 1971: Some aspects of variance spectra of synoptic scale tropospheric wind components in midlatitudes and in the tropics, *Monthly Weather Rev.* 99
- KRAUSS, W. 1966: Methoden und Ergebnisse der Theoretischen Ozeanographie II, Interne Wellen, Bornträger, Berlin
- LANDSBERG, H.E. (Ed. in Chief):
World survey of climatology, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York
Vol. 4, 1969: Climate of the free atmosphere,
Ed.: D.F. REX

- Vol. 7, 1977: Climates of the Soviet Union,
Ed.: P.E. LYDOLPH
- Vol. 8, 1969: Climates of Northern and Eastern
Asia, Ed.: A. ARAKAWA
- Vol. 11, 1974; Climates of North America,
Ed.: R.A. BRYSON and F.A. HARE
- NUTTAL, A.H., 1971: Spectral estimation by means of overlapped
Fast Fourier Transform processing of windowed
data, Naval Underwater Systems Center Report
No. 4196, New London, Connecticut 06320
- SCHERHAG, R. und Mitarbeiter, 1969: Meteorologische Abhand-
lungen, Bd. 100/Heft 1, Klimatologische Karten
der Nordhemisphäre, Verlag Dietrich Reimer,
Berlin
- SPETH, P., 1974: Horizontale Flüsse von sensibler und
latenter Energie und von Impuls für die
Atmosphäre der Nordhalbkugel,
Meteorol. Rdsch. 27, pp. 65. - 90
- SPETH, P., 1978a: Mean horizontal fields of temperature and
geopotential height for each January, April,
July and October for the period 1967 - 1976,
Ber. Inst.f.Meereskunde, Kiel, Nr. 53
- SPETH, P., 1978b: Time spectral analysis of large-scale
eddy transport of sensible heat and momentum,
Contr. Atm. Phys. 51, pp. 153 - 165
- WIIN-NIELSEN, A. (Ed.), 1978 : s. DEFANT, F. with H.T.MÖRTH

Danksagung

Besonders erwähnt werden soll, daß die in der vorliegenden Diplomarbeit verwendeten Grundlagendaten durch die freundliche Bereitstellung des Deutschen Wetterdienstes der Abteilung Meteorologie des Instituts für Meereskunde zur Verfügung standen. Die Verwendung dieses umfangreichen Datensatzes hat die vorliegende Arbeit im Grundsatz erst möglich gemacht. Dem Deutschen Wetterdienst sei für diese Hilfe besonders gedankt.

Die Verfasserin dankt auch allen Mitgliedern der Abteilungen Meteorologie und Theoretische Ozeanographie für die vielfache Unterstützung, die sie während der Abwicklung der Diplomarbeit erfahren hat, und für die Betreuung der Arbeit durch die Professoren Defant und Speth.