



# Wellenerzeugung und Wellenvorhersage:

## Definitionen:

Wellen: Schwingungen der Wasseroberfläche (Wasspiegelauslenkungen), die durch meteorologische Wirkungen im Seegebiet erzeugt werden. Wind bzw. Sturm (bewegte Luft) übt Schubspannungen (Reibung) an der Meeresoberfläche aus mit der Folge, dass örtlich durch Zerrungen und Stauchungen Wasserspiegelauslenkungen gebildet werden, die sich als Wellen fortbewegen. Windenergie wird auf die Wasseroberfläche übertragen, solange die Windgeschwindigkeit *größer* als die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit ist. Es werden *gleichzeitig* Wellen unterschiedlicher Höhe, Periode und Länge erzeugt.

*Einflussgrößen* für die Beträge der Höhe, Länge und Periode sind:

1. Die Streichlänge = Einwirkungsdistanz des Windes an der Wasseroberfläche bei der Erzeugung der Wellen (Fetch)  $F$ ,
2. die Windgeschwindigkeit  $U$ ,
3. die Winddauer als sog. Ausreifzeit  $D_{\min}$ .



## Allgemeine Zusammenhänge:

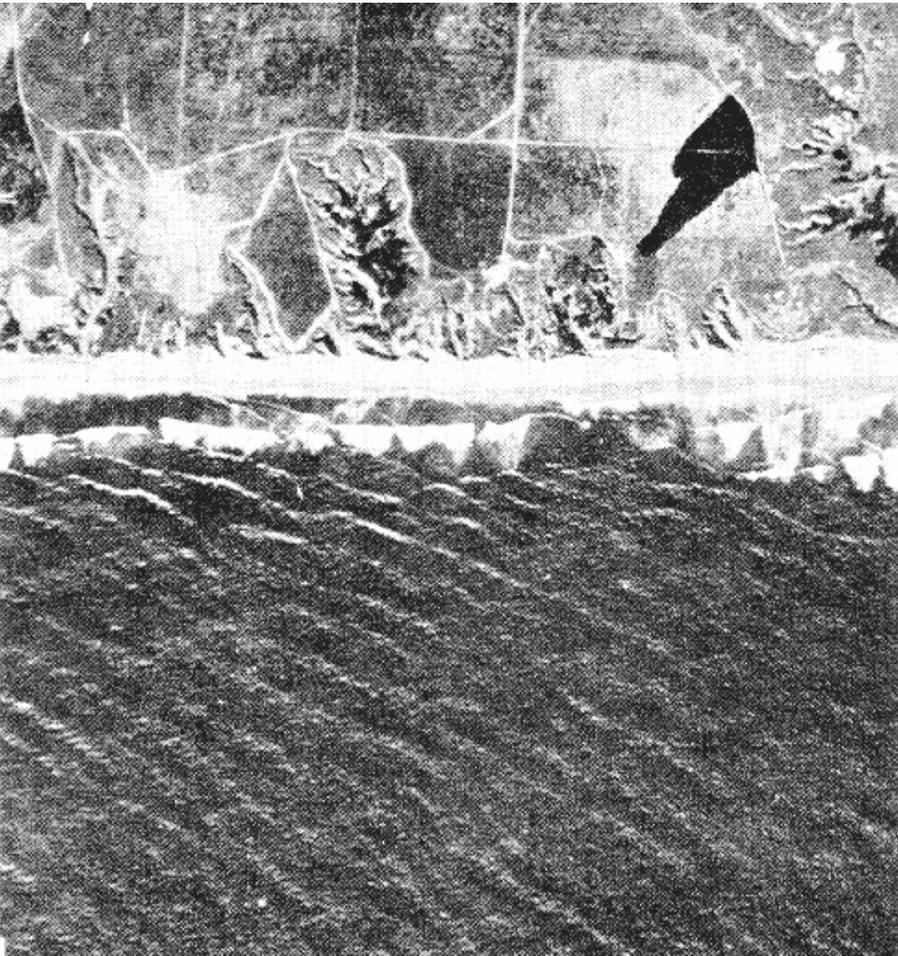
Je größer die Streichlänge (Fetch), desto stärker die Windwirkung.  
Je länger der Wind weht, desto höher werden die Wellen.

Die Wassertiefe (Übergangsgebiet) hat begrenzenden Einfluss auf die entstehenden Wellen.

Windwellen, Windsee: Im betrachteten örtlichen Seegebiet (als *erzwungene Schwingungen*) entstehende Wellen erreichen die Küste wenig verformt. Steile Wellen ( $1/10 \leq S \leq 1/20$ ) mit relativ kleinen Perioden.

Nordsee-Küstengebiet:  $6 \leq T \leq 8\text{s}$ ,  $H \leq 10\text{m}$ ,  $L \leq 100\text{m}$ .

Dünungswellen (Swell): Wellen (als freie Schwingungen), die einem fernen Erzeugungsgebiet entstammen (Hunderte oder Tausende km entfernt). Auf ihrem Wege bleiben kurze steile Wellen zurück (normale Dispersion) oder verschwinden anderweitig. Nur relativ lange, niedrige Wellen erreichen die Küste mit Steilheiten  $1/30 \leq S \leq 1/500$ . Nordsee:  $T \approx 9\text{ s}$ . Nord-Atlantik:  $7 \leq T \leq 23\text{s}$ . Cornwall:  $T \leq 26\text{s}$ .



Überlagerung von *Windwellen* aus 2 Richtungen führt zu unregelmäßigen kurzkämmigen Wellen.  
→ Kabbelsee.



Überlagerung von *Windwellen* und *Dünung* aus unterschiedlichen Richtungen.



Seegang: Zusammenwirken von Windwellen und Dünung.

Ein stochastischer Prozess, d.h., die ihn kennzeichnenden Größen (Wellenhöhen, Wellenperioden) beinhalten sowohl deterministische (mathematisch exakt beschreibbare) als auch probabilistische (wahrscheinlichkeitstheoretische) Elemente.

Repräsentative Größen sind die „Signifikante Wellenhöhe  $H_S$ “ und die „Signifikante Wellenperiode  $T_S$ “ .

Beide stellen selbst statistische Parameter dar. Diese lassen sich aber aus den Seegangursachen berechnen.

Fetch  $F$  [1 nautical mile (nm) = 1,855 km]

oder  $F$  [1 statute mile (sm) = 1,6039 km]

Windgeschwindigkeit  $U$  [1 knot = 1 nm/h = 0,515 m/s]

oder in statute miles/h [1 sm/h = 1,6093 km/h]

$D_{\min}$  [h] = minimal erforderliche Zeit, in der asymptotisch der Seegang erreicht wird, der mit der Windgeschwindigkeit im Gleichgewicht steht.



## A. Seegang im Tiefwasser ( $d > L/2$ )

$$H_S = f(F, U, D_{\min})$$

$$T_S = f(F, U, D_{\min})$$

Vergleiche nachfolgendes Diagramm nach Bretschneider.

A.1 Gegeben: Streichlänge  $F = 550\text{km}$  ( $\approx 300 \text{ nm}$ )

Windgeschwindigkeit  $U = 50 \text{ knots}$  ( $\approx 25 \text{ m/s}$ )

Ablesungen:

$$30 \leq H_S \leq 35 \text{ ft} \rightarrow H_S = 32,5 \cdot 0,3048 = 9,906 \approx 10 \text{ m}$$

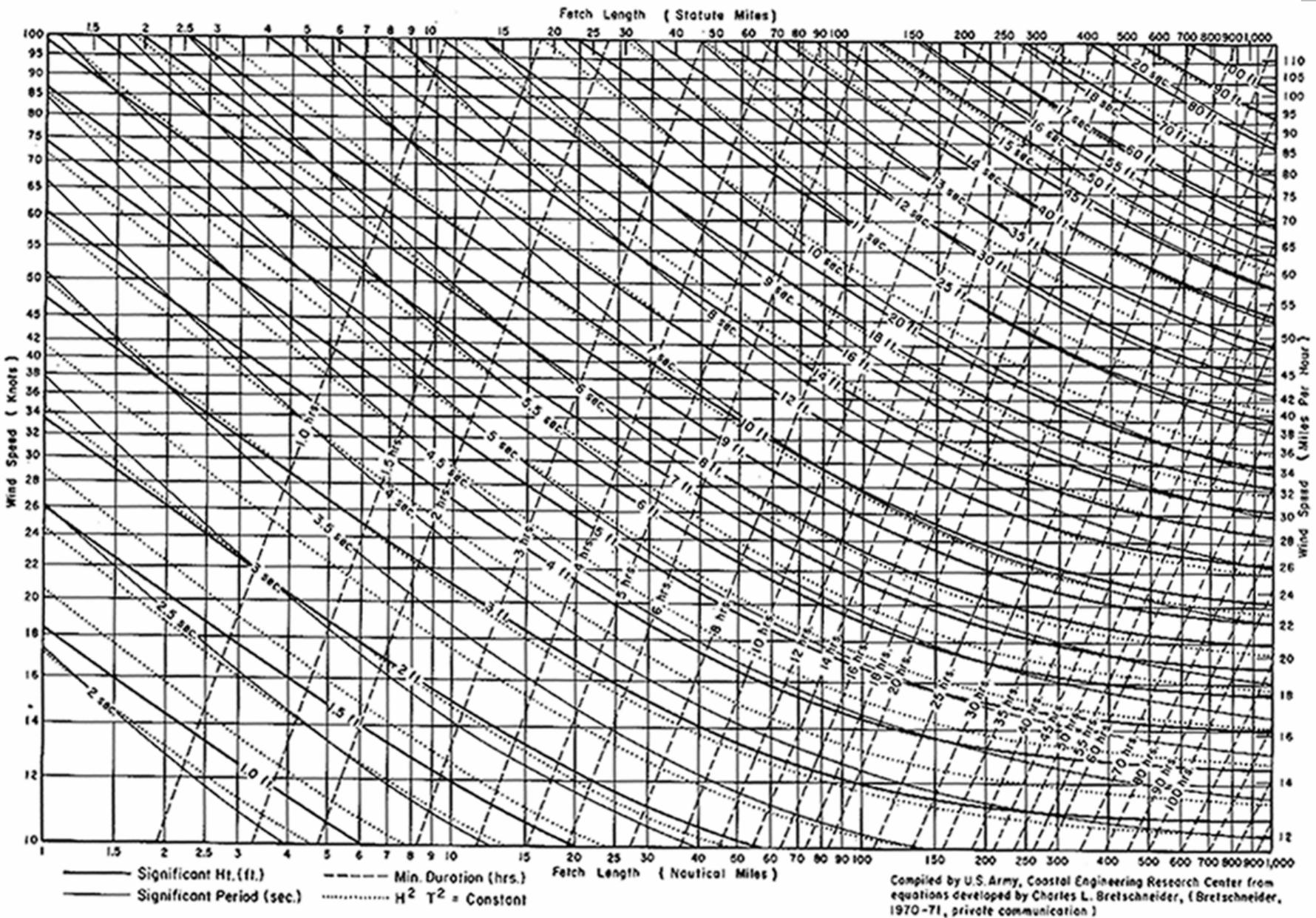
$$12 \leq T_S \leq 13 \text{ s} \rightarrow T_S = 12,5 \text{ s}$$

$$D_{\min} \approx 21\text{h}$$

$$L_0 = 1,56 \cdot T^2 = 243,75 \text{ m} \approx 250 \text{ m}$$

$$S_0 = 10/245 = 1 : 24,5 < 1 : 7$$

Die Grenzsteilheit wird nicht erreicht, da  $H_S = H_{1/3}$  nicht  $H_{\max}$ .





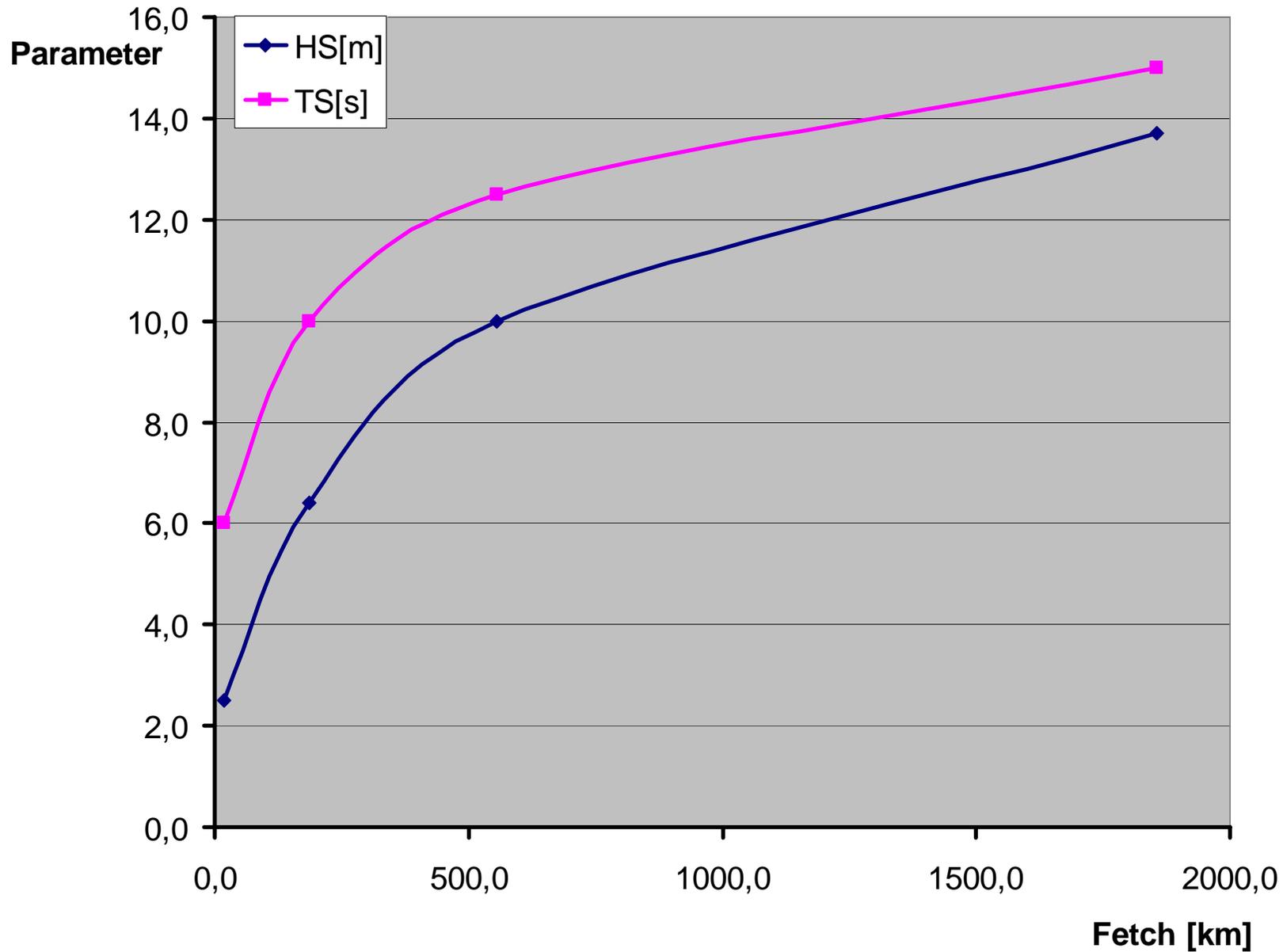
## A.2 Wellenvorhersageparameter als Funktion der Streichlänge:

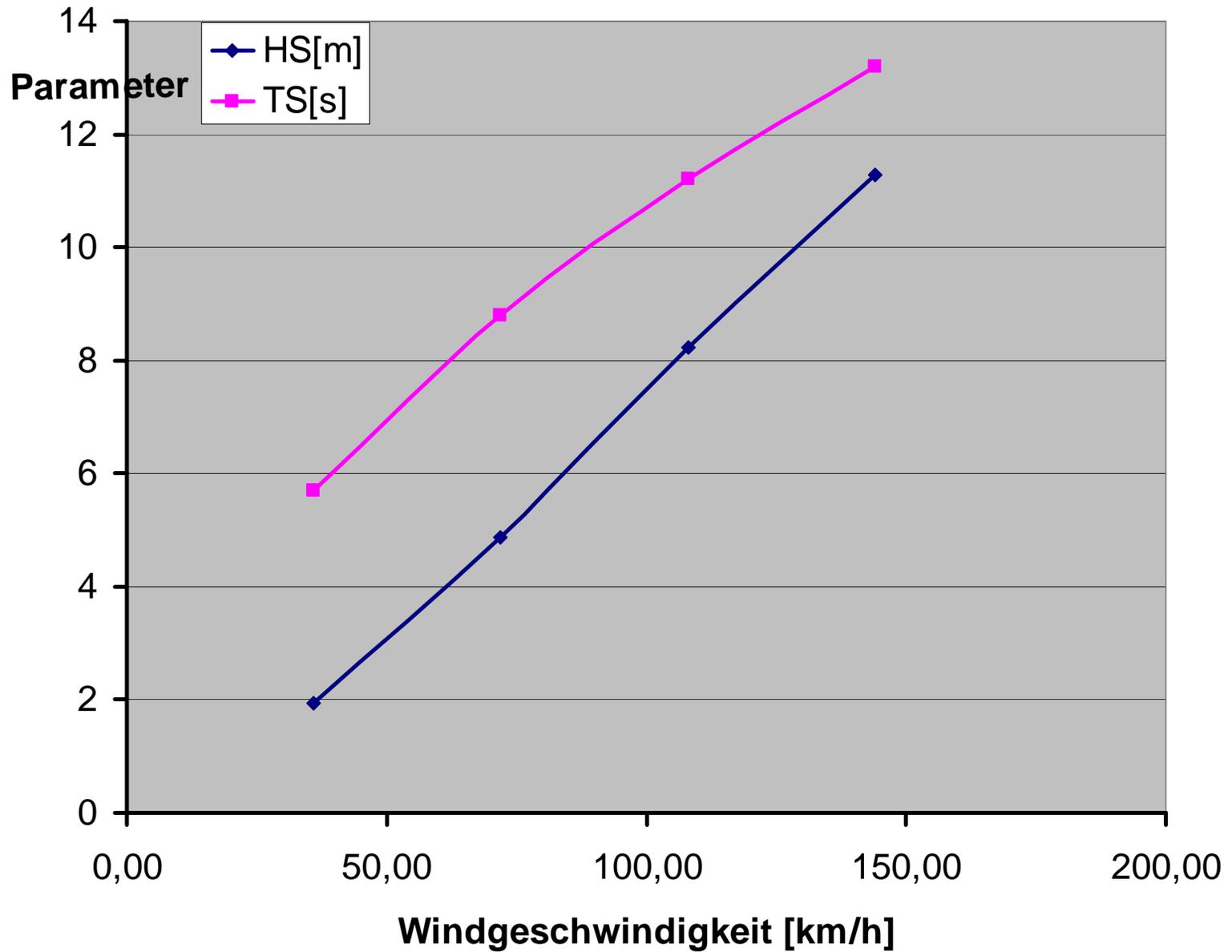
$U = 50 \text{ knots} \approx 25 \text{ m/s} = \text{konst.}$

F[nm]	F[km]	H <sub>s</sub> [ft]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>s</sub> [s]	D <sub>min</sub> [h]
10	18,6	8,2	2,5	6,0	1,5
100	185,5	21,0	6,4	10,0	9,0
300	556,5	32,5	10,0	12,5	21,0
1000	1855,0	45,0	13,7	15,0	55,0

## A.3 Wellenvorhersageparameter als Funktion der Windgeschwindigkeit. $F = 100 \text{ nm} = 185,5 \text{ m} = \text{konst.}$

U[knots]	U[km/h]	H <sub>s</sub> [ft]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>s</sub> [s]	D <sub>min</sub> [h]
20	36	6,4	1,95	5,7	15
40	72	16	4,88	8,8	10
60	108	27	8,23	11,2	8
80	144	37	11,28	13,2	7







## B. Seegang im Übergangsgebiet und im Flachwasser

$$H_S = f(F, U, d)$$

$$T_S = f(F, U, d)$$

Hier sind die Eingangswerte dimensionslose Parameter:

$$\frac{g \cdot F}{U^2} \text{ (Abszisse)}$$

$$\frac{g \cdot d}{U^2} \text{ (Parameter)}$$

Vergleiche nachfolgende Diagramme  
getrennt für  $H_S$  und  $T_S$ .

Diese Parameter-Kurven sind gekrümmt,  
solange noch keine stationären Verhält-  
nisse erreicht sind .

### B.1 Überprüfung der unter A.1 gefundenen Ablesungen

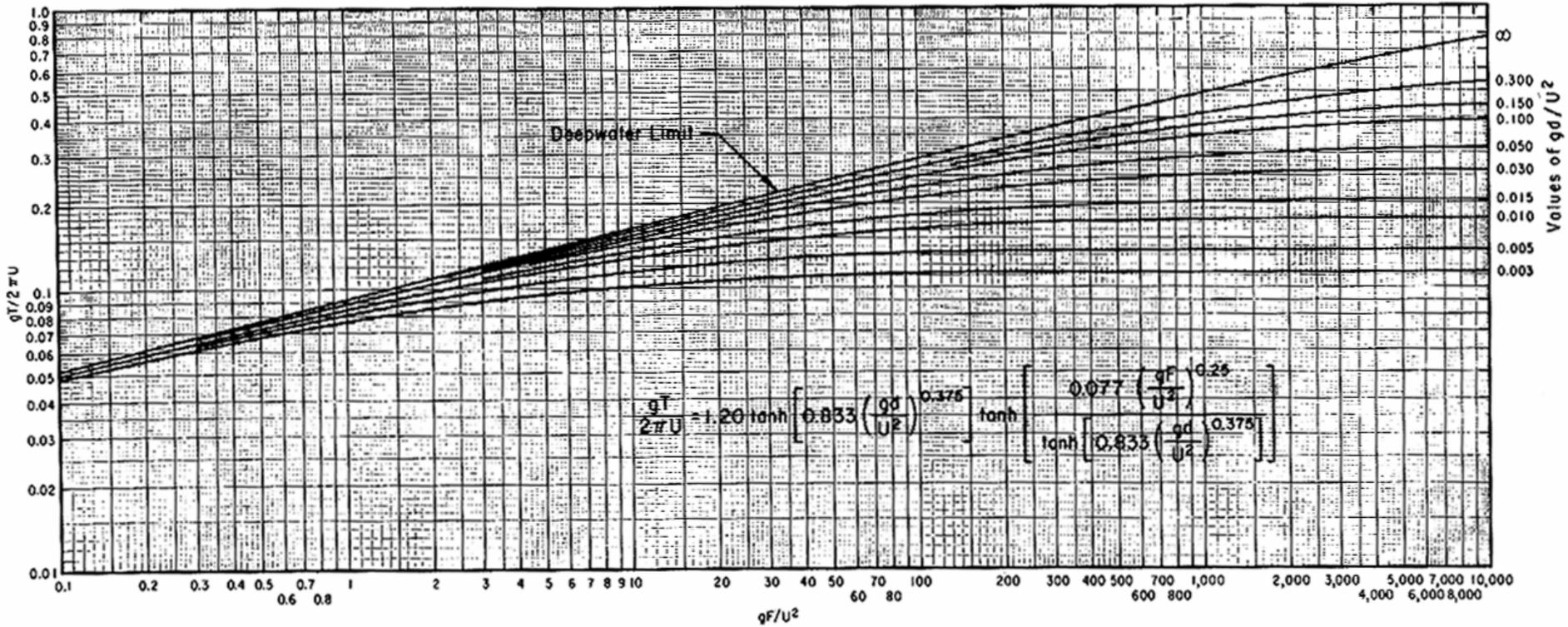
Parameterkurve  
für Tiefwasser:

$$\frac{g \cdot d}{U^2} = \infty$$

$$\frac{g \cdot F}{U^2} = \frac{9,81 \cdot 550000}{25,76^2} = 8,1 \cdot 10^3$$

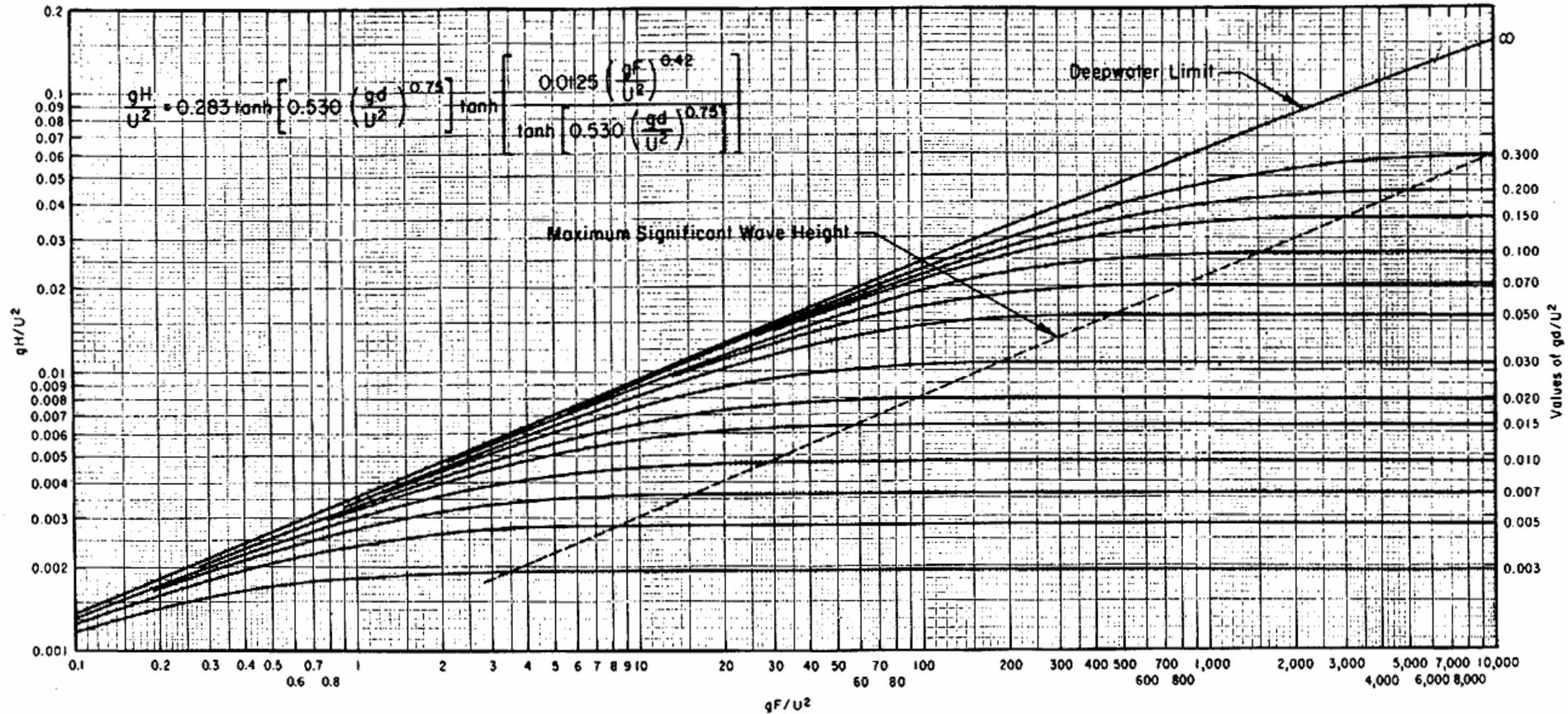
$$\frac{g \cdot H}{U^2} = 0,14 \rightarrow H_S = 9,5m$$

$$\frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot U} = 0,75 \rightarrow T_S = 12,4s$$



$$\frac{g \cdot F}{U^2} \rightarrow \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot U} \rightarrow T_s$$

$$\frac{g \cdot d}{U^2}$$



$$\frac{g \cdot F}{U^2} \rightarrow \frac{g \cdot H}{U^2} \rightarrow H_s$$

$$\frac{g \cdot d}{U^2}$$



## B.2 Wellenvorhersageparameter als Funktion der Wassertiefe d:

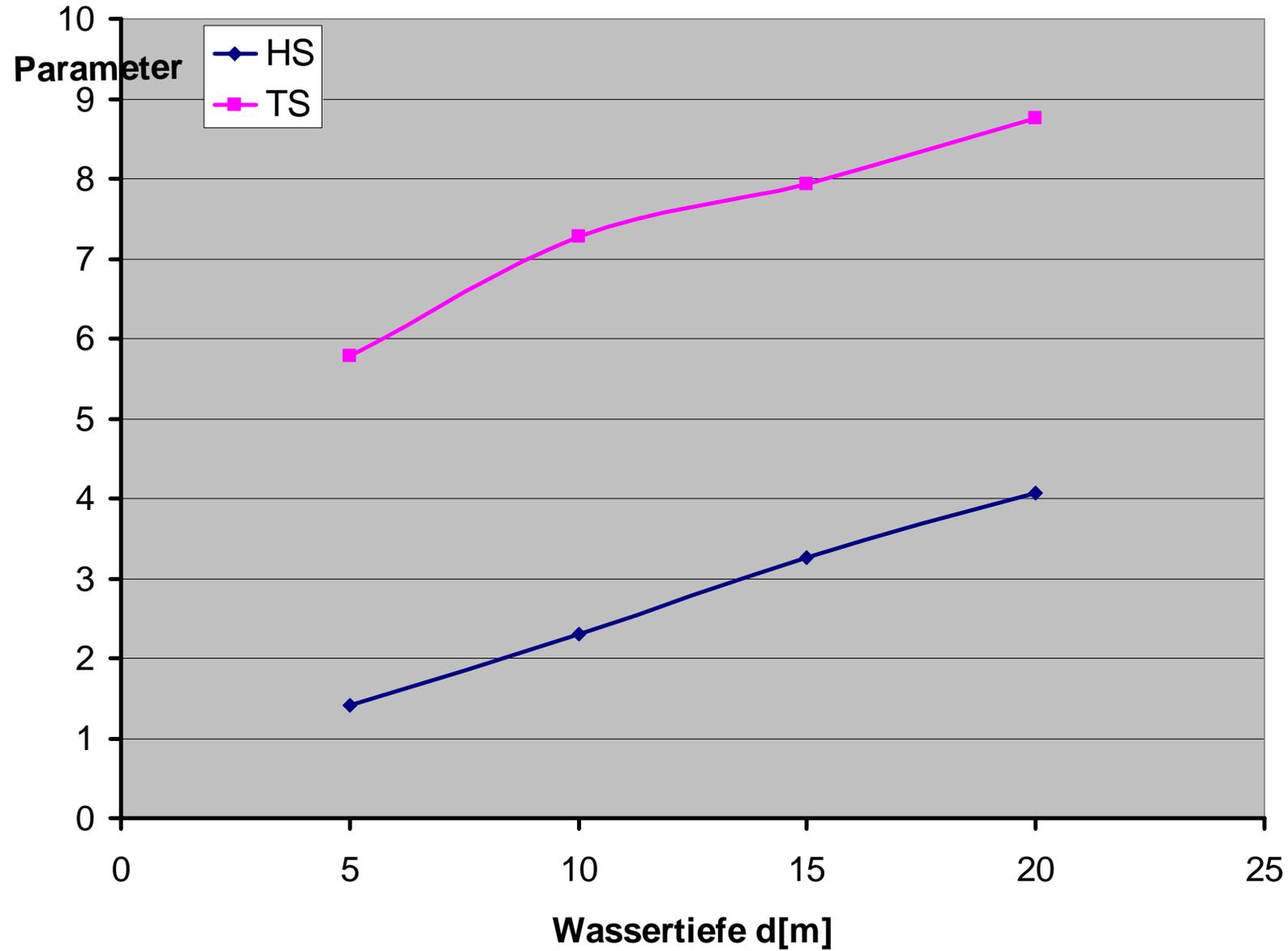
Eingangswerte:  $F = 550\text{km} = 550 \cdot 10^3\text{m}$

$U = 50\text{knots} = 25,8\text{m/s}$

$$\frac{g \cdot F}{U^2} = \frac{9,81 \cdot 550 \cdot 10^3}{25,8^2} = 8,1 \cdot 10^3 = \textit{konst.}$$

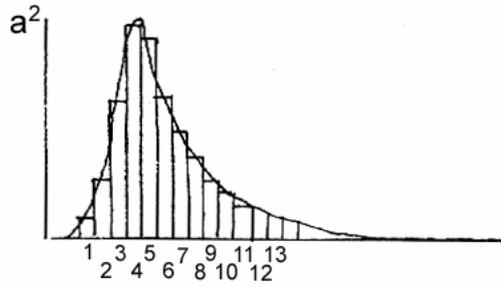
d[m]	$g \cdot d / U^2$	$g \cdot H / U^2$	$H_s$	$g \cdot T / 2\pi U$	$T_s$
20	0,2947	0,06	4,07	0,53	8,76
15	0,2211	0,048	3,26	0,48	7,93
10	0,1474	0,034	2,31	0,44	7,27
5	0,074	0,021	1,42	0,35	5,78

$F = 550\text{km}$ ,  $U = 50\text{knots} = 25,8\text{m/s}$

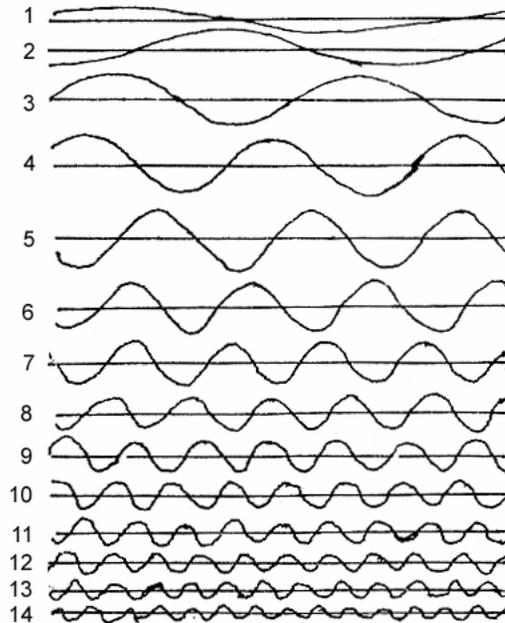




# Wellenspektrum

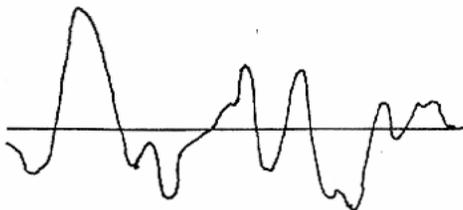


Spektrum der Amplitudenquadrate repräsentiert die insgesamt im Seegang enthaltene Energie .

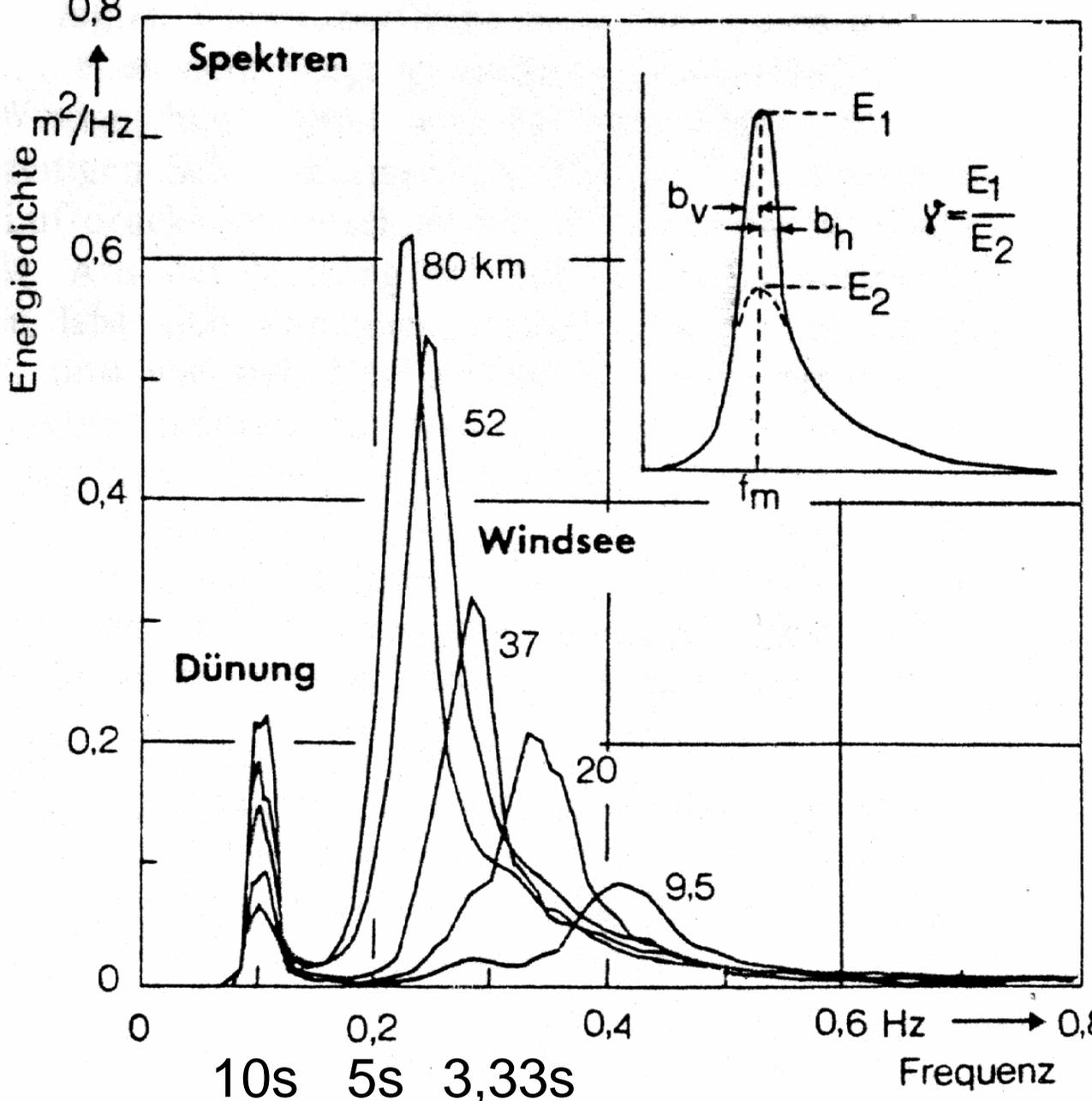


Sinus- bzw. Cosinus-komponenten unterschiedlicher Wellenlänge und unterschiedlicher Wellenamplitude  $a$  überlagern sich zu einer resultierenden Wellenform → *Fourier-Synthese*

Umgekehrt können die unregelmäßigen Wasserspiegelauslenkungen des natürlichen Seeganges durch eine *Fourier-Analyse* beschrieben werden.



Tatsächliches unregelmäßiges Wellenprofil



Joint North Sea Wave Project vor Sylt.

Unterschiedliche Entwicklung der Energiespektren bei ablandigem Wind.

Messstationen in einem Profil see-wärtig zunehmender Wassertiefe. Küstenentfernungen: 9,5; 20; 37; 52; 80 km.



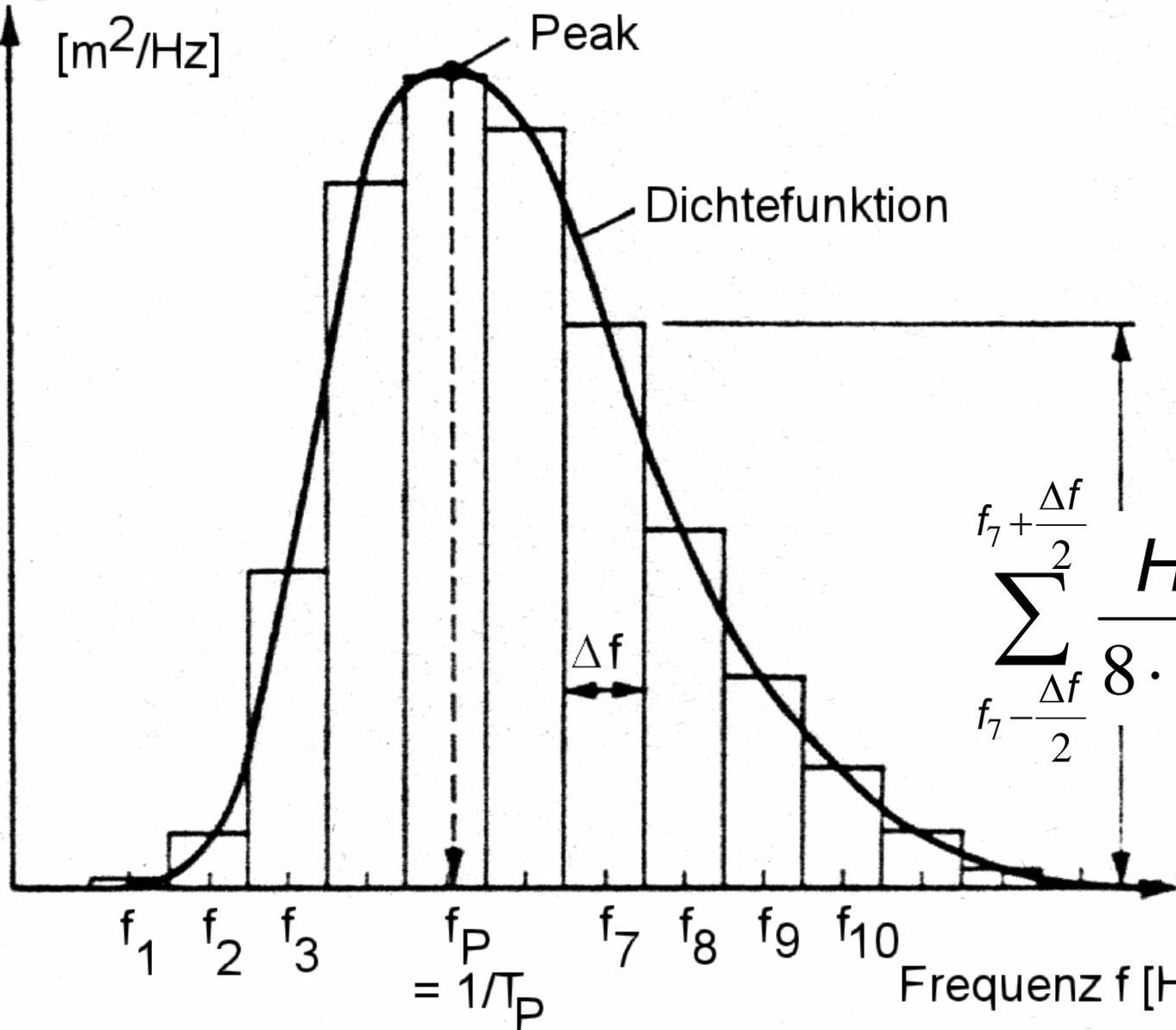
## Windsee:

1. Zunahme der Energie am Spektrum-Peak mit zunehmendem Fetch (hier: Küstenentfernung bei ablandigem Wind).
2. Verlagerung der Energie in den längereriodischen Bereich.

## Dünung:

Abnahme der Dünungsenergie (bei  $f = 1\text{Hz}$ ,  $T = 10\text{s}$ ) mit abnehmender Wassertiefe.

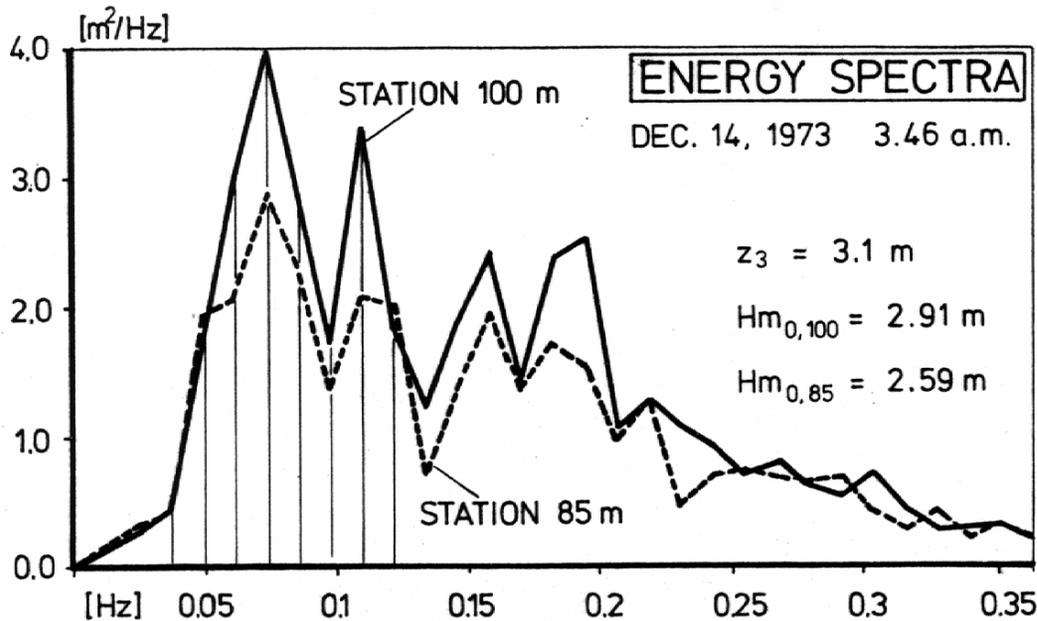
Energiedichte  
[m<sup>2</sup>/Hz]



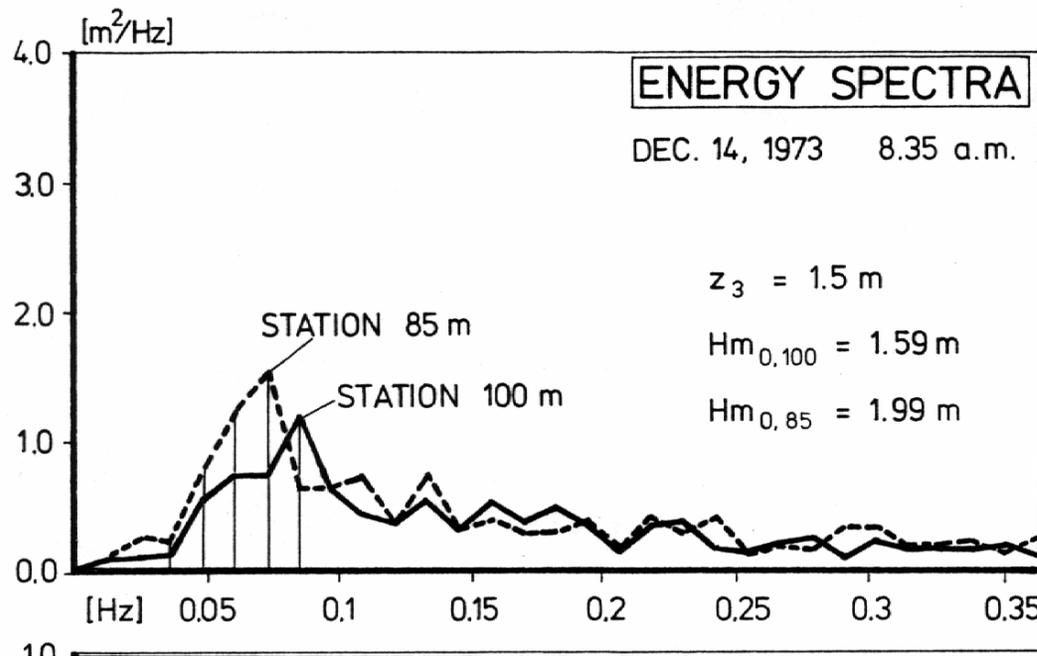
$$\sum_{f_7 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_7 + \frac{\Delta f}{2}} \frac{H^2}{8 \cdot \Delta f}$$



# Spektren von Brandungswellen vor Sylt.

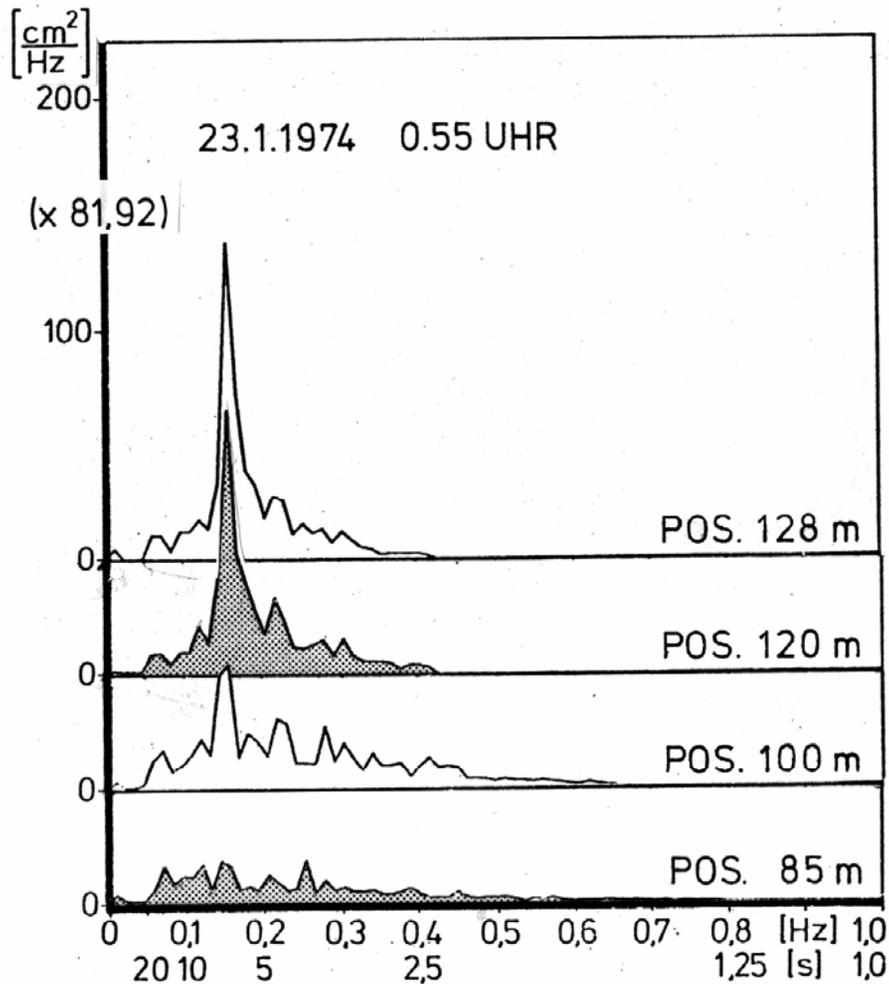


A. Wassertiefe im Mittel größer als die Wellenhöhe: *Abnahme* der Energie bei fast allen Frequenzen.

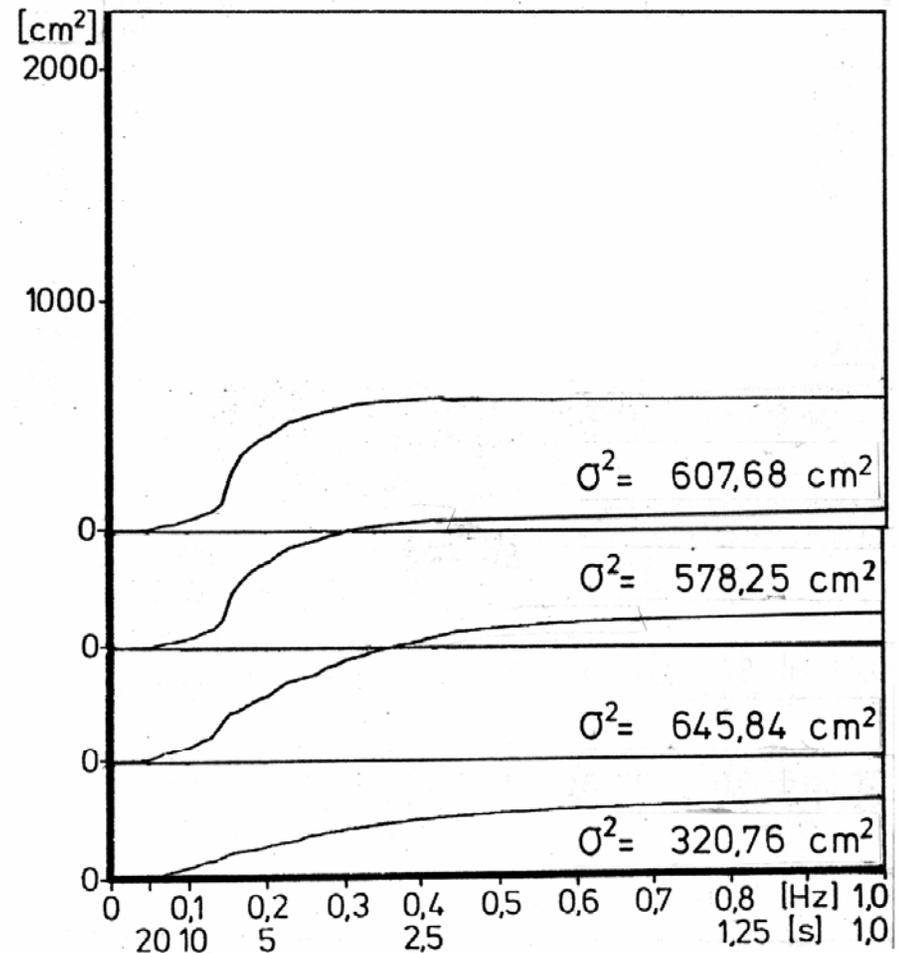


B. Wassertiefe im Mittel kleiner als die Wellenhöhe: Verlagerung der Energiedichte im Bereich des Spektrum-Peaks zu niedrigeren Frequenzen.

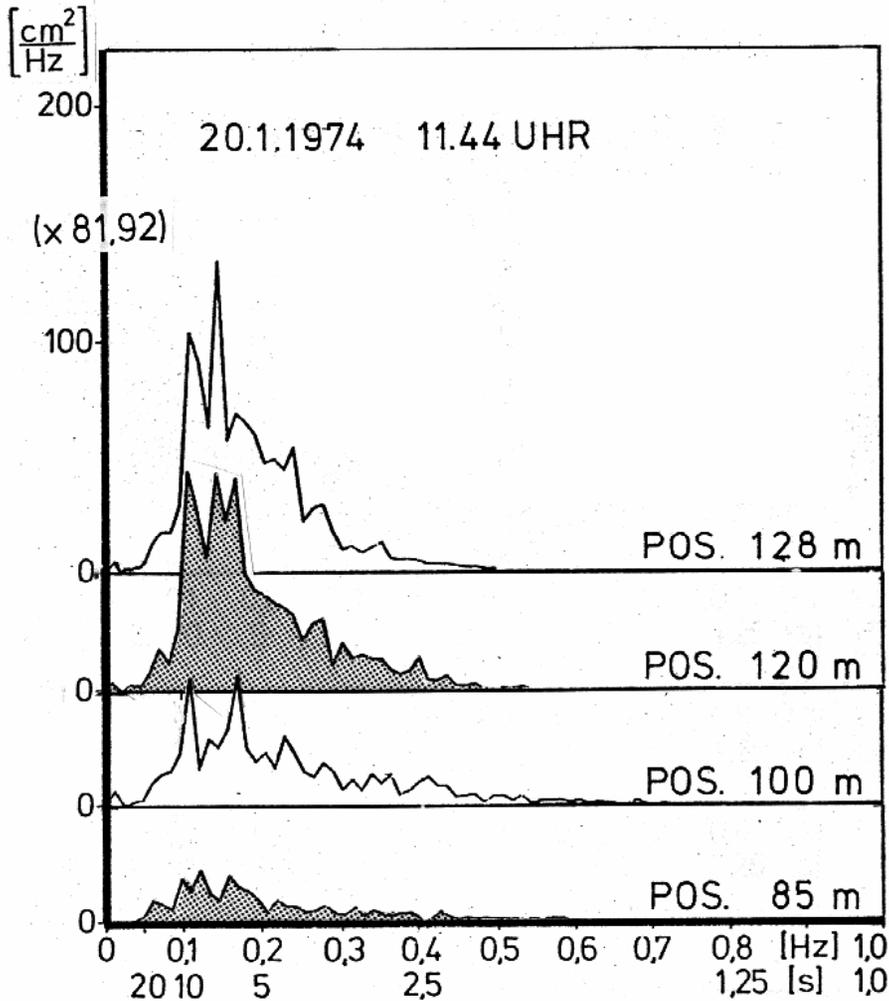
Ursache: Doppler-Effekt infolge beschleunigter Strömung entgegen dem Wellenfortschritt  $c$ .



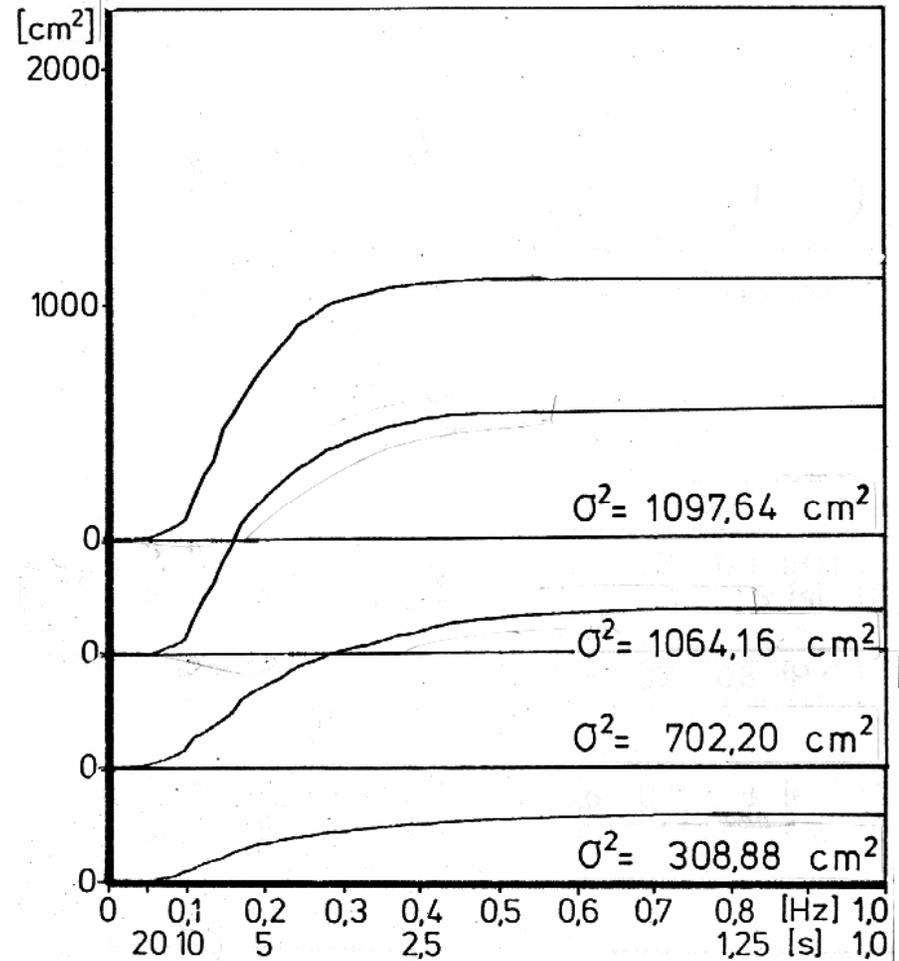
Energiespektren an 4 Messpositionen im Messprofil vor Westerland



Zugehörige Co-Cumulative Spektren



Energiespektren an 4 Messpositionen im Messprofil vor Westerland



Zugehörige Co-Cumulative Spektren