

303 | November 1974

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

P. Schenzle, P. Boese und P. Blume

### Ein Programmsystem zur Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit unter Dienstbedingungen

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

**Ein Programmsystem zur Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit unter Dienstbedingungen**

P. Schenzle, P.Boese, P. Blume

Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1974,

© Technische Universität Hamburg-Harburg

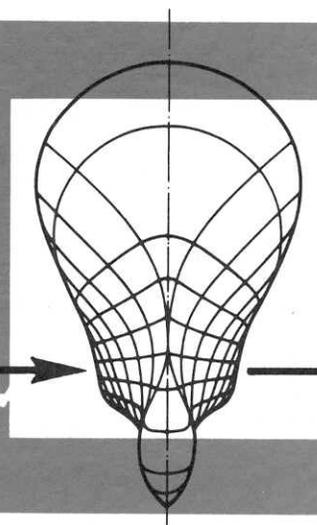
Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU  
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



EIN PROGRAMMSYSTEM  
ZUR BERECHNUNG DER SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT  
UNTER DIENSTBEDINGUNGEN

P. SCHENZLE  
P. BOESE  
P. BLUME

Nov. 1974

Bericht Nr. 303

Aufbauend auf einer vorher entstandenen Konzeption wurde diese Arbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 98 "Schiffstechnik und Schiffbau" abgeschlossen und unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel gedruckt.

1. EINLEITUNG	1
1.1. EINSATZ UND BETRIEB DES SCHIFFES	2
1.2. SYSTEM SCHIFF	4
1.3. AUFBAU DES PROGRAMMS	5
2. UMWELTBEDINGUNGEN	6
2.1. WIND	6
2.2. SEEGANG	8
2.3. BEWUCHS	13
3. EIGENSCHAFTEN DES SCHIFFES	16
3.1. EIGENSCHAFTEN DES RUMPFES	16
3.1.1. WIDERSTAND IM GLATTEN WASSER	16
3.1.2. WINDKRÄFTE	20
3.1.3. BEWEGUNGEN IM SEEGANG	25
3.1.4. WIDERSTANDSZUWACHS IM SEEGANG	29
3.2. EIGENSCHAFTEN DER ANTRIEBSANLAGE	31
3.3. EIGENSCHAFTEN DES PROPELLERS	32
4. VERHALTEN DES SCHIFFES	34
4.1. GESCHWINDIGKEIT UND LEISTUNG	34
4.2. GEFÄHRDENDE SEEGANGSEFFEKTE	36
4.2.1. WASSER AN DECK	37
4.2.2. SLAMMING	40
4.2.3. PROPELLERDURCHGEHEN	43

4.2.4. BESCHLEUNIGUNG	45
4.2.5. ROLLRESONANZ	46
4.3. GESCHWINDIGKEITSGRENZEN	47
4.4. LANGZEITVERHALTEN	48
4.4.1. VERTEILUNG DER SEEGÄNGE	48
4.4.2. VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT UND LEISTUNG ÜBER GROSSE ZEITRÄUME	49
5. ERGEBNISSE	51
5.1. DIREKTE AUSWIRKUNGEN VON UMWELTEINFLOSSEN AUF DIE GESCHWINDIGKEIT	51
5.2. GEFÄHRDENDE SEEGANGSEFFEKTE	56
5.3. LANGZEITAUSSAGEN	64
LITERATUR	68
ANHANG: BLOCKDIAGRAMM ZUM PROGRAMMSYSTEM	71

## 1. EINLEITUNG

Eine der wichtigsten Kenngrößen eines Schiffes ist seine Dienstgeschwindigkeit. Sie ist ein Faktor der Transportleistung und damit der Wirtschaftlichkeit eines Frachtschiffes. Hinzu kommt der Effekt, daß ein schnelles Schiff mehr Ladung "anzieht".

Die Dienstgeschwindigkeit ist nicht allein als Mittelwert aus einer Anzahl von Reisen wichtig, auch die Streuung der Reisedauer ist als Maß für die Pünktlichkeit von Bedeutung.

Eine Vorhersage der Geschwindigkeit unter Dienstbedingungen wird benötigt für:

- + INVESTITIONSENTSCHEIDUNGEN
- + ENTWURF DES SCHIFFES
- + EINSATZ UND BETRIEB DES SCHIFFES

Daß an eine Vorhersage der Dienstgeschwindigkeit große Genauigkeitsforderungen gestellt werden müssen, ist schon daraus zu ersehen, daß sich der wirtschaftliche Erfolg (oder Mißerfolg) aus der kleinen Differenz großer Beträge ergibt.

### 1.1. EINSATZ UND BETRIEB DES SCHIFFES

Zur Vorhersage der Dienstgeschwindigkeit müssen die Bedingungen, unter denen sich der Dienst eines Schiffes abspielt, bekannt sein. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge soll folgendes Blockschemadiagramm dienen:

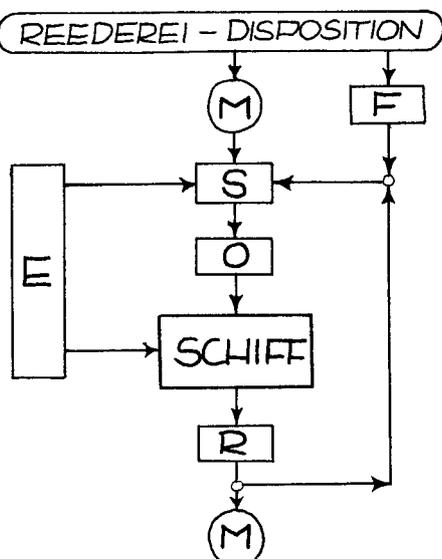


ABB. 1

Aus der Dispositionsplanung der Reederei resultiert die Aufgabe oder MISSION für ein vorhandenes oder zu bauendes Schiff (z.B. "Stückgutladung von A nach B transportieren"). Hieraus wird die STRATEGIE S zur Durchführung der Mission entwickelt. Die STRATEGIE kann langfristiger Art (z.B. Wahl der Reiseroute) oder kurzfristiger Art sein (z.B. Wahl des Kurses in einem Sturmgebiet). In beiden Fällen ist die Wahl der STRATEGIE Aufgabe der Schiffsführung. Die Strategie wird unter Kenntnis der vorhergesagten oder herrschenden UMWELTBEDINGUNGEN (ENVIRONMENTAL CONDITIONS E) entwickelt. Ferner steht diese Entscheidung unter gewissen FORDERUNGEN F, die ausgesprochen oder unausgesprochen an die Durchführung der Mission gestellt werden. Zu den UMWELTEINFLÜSSEN E zählen Wind, Seegang, Strömung, Bewuchs, Eis und Nebel. Die FORDERUNGEN F bestehen vor allem aus zwei Komponenten:

$$F = \begin{cases} F_R \\ F_S \end{cases} \begin{array}{l} \text{Wirtschaftlichkeitsforderung (Rentability)} \\ \text{Sicherheitsforderung} \end{array}$$

Beide Komponenten sind vielfach miteinander verknüpft, z.B. kann ein Schaden durch Seeschlag zugleich eine Gefährdung als auch eine wirtschaftliche Einbuße bedeuten. Sie führen aber z.T. auch zu konträren Forderungen. Z.B. kann eine Route ('Optimal Weather Routing') nicht allein unter dem Gesichtspunkt der kürzesten Reisezeit ohne Berücksichtigung der Sicherheit gewählt werden.

Nach Festlegung der STRATEGIE **S** wählt die Schiffsführung die OPERATIONS-PARAMETER **O** (Sollkurs und Drehzahl bzw. Sollgeschwindigkeit). Unter dem Einfluß der herrschenden UMWELTBEDINGUNGEN **E** bei gewählten OPERATIONSPARAMETERN **O** steht das System SCHIFF.

Seine "ANTWORT" (RESPONSE **R**), die aus einer Vielzahl von Komponenten besteht, kann nach dem jeweiligen Aspekt unter dem sie betrachtet wird, in folgende Gruppen eingeteilt werden:

$$R = \left\{ \begin{array}{l} R_N \\ R_S \\ R_R \\ R_H \end{array} \right\}$$

$R_N$  sind die Antworten, die im Hinblick auf die **N**avigation, d.h. zur Einhaltung der Route, wichtig sind (Istkurs und Istgeschwindigkeit).

$R_S$  sind Antworten, die für die **S**icherheit wichtig sind, also die Bewegungen und Belastungen.

$R_R$  sind Antworten, die zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit (**R**entability) nötig sind. Dies sind Geschwindigkeit und Brennstoffverbrauch (Drehzahl und Leistung).

$R_H$  bezieht sich auf das Wohlbefinden (**H**abitability) von Mensch und Ladung, also vor allem auf die Beschleunigungen.

Da sich die Umweltbedingungen anders als vorhergesagt entwickeln können und da das Verhalten des Schiffes nicht genau genug vorherbestimmt werden kann, kann der Betrieb des Schiffes nicht ohne Rückkopplung auskommen. **R** wird also von der Schiffsführung in Bezug auf ihre Verträglichkeit mit **F** überprüft, und **S** wird gegebenenfalls abgewandelt.

## 1.2. SYSTEM SCHIFF

Aufgabe dieser Arbeit soll sein, den wichtigsten Baustein des eben beschriebenen Prozesses, das System SCHIFF und seine unmittelbaren Einflußgrößen **E** und **O** zu beschreiben, um damit seine Antworten **R** vorhersagen zu können.

Von den Umwelteinflüssen **E** sollen hier nur diejenigen behandelt werden, die ein bestimmtes Schiff spezifisch beeinflussen. Es bleiben also Wind, Seegang und Bewuchs.

Die Operationsparameter **O** sind Drehzahl und Kurs, wobei unter Kurs die Richtung des Schiffes zur Wind- und Seegangsrichtung verstanden werden soll. Die Umrechnung auf eine geographisch feste Richtung ist für jeden konkreten Fall bei Angabe der Wind- und Seegangsrichtung möglich.

Von den erwähnten Gruppen von Systemantworten **R** sollen nur die Antworten im Hinblick auf die Sicherheit **R<sub>S</sub>** und die Wirtschaftlichkeit **R<sub>R</sub>** betrachtet werden. Wie bereits erwähnt, sind beide Aspekte miteinander gekoppelt. Man kommt aber zu einer einfachen brauchbaren Formulierung, wenn man beide Aspekte trennt und in Bezug auf die Sicherheit eine Mindestforderung und in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit eine Optimalforderung stellt. Also: Möglichst wirtschaftlich bei bestimmter Mindestsicherheit.

Auf die Wirtschaftlichkeit selbst soll hier nicht eingegangen werden, sondern es sollen nur die Daten ermittelt werden, die für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen erforderlich sind:

Geschwindigkeit unter Einhaltung bestimmter Sicherheitsforderungen und dazugehörige Drehzahl und Leistung.

Zur übersichtlichen Darstellung der Eigenschaften des Schiffes sei das System SCHIFF in Untersysteme aufgeteilt, deren Eigenschaften und Zusammenwirken vorgegeben oder berechnet werden. Die hier interessierenden Untersysteme des Schiffes sind:

RUMPF mit seinem Widerstands- und Bewegungsverhalten, sowie seinen aerodynamischen Eigenschaften

ANTRIEBSANLAGE gekennzeichnet durch ihre Moment/Drehzahl-Charakteristik

PROPELLER gekennzeichnet durch seine Schub- und Moment-Charakteristik

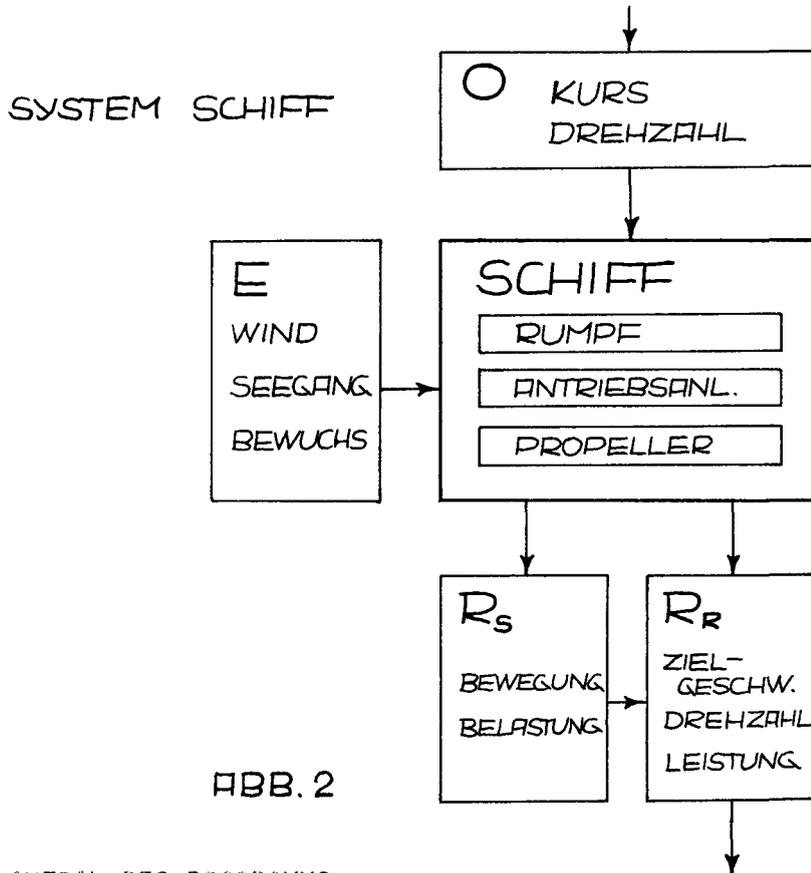


ABB. 2

### 1.3. AUFBAU DES PROGRAMMS

wenn an ein Verfahren zur Vorausberechnung einer komplexen Größe wie die Dienstgeschwindigkeit hohe Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit des Ergebnisses gestellt werden, so läßt sich ein hoher Rechenaufwand nicht vermeiden. Dank der heutigen Rechentechnik besteht jedoch die Aussicht, daß derartige Verfahren nicht mehr nur bei rein-wissenschaftlichen Untersuchungen, sondern als Routine-Rechnungen durchgeführt werden.

Um ein derartiges Rechenprogramm in seinem Aufbau nicht einfürallemal festzulegen, sodaß neue Erkenntnisse und Erfahrungen nur schwer einzufügen sind, sollte es baukastenartig aus selbständigen Einheiten zusammengesetzt sein. Jeder dieser Bausteine kann dann ohne Schwierigkeiten ausgewechselt oder mit anderen zu neuen Kombinationen zusammengestellt werden. Die Bezeichnung "Programmsystem" soll auf dieses bauprinzip hinweisen. (Siehe Anhang "Blockdiagramm".)

## 2. UMWELTBEDINGUNGEN

Da der Zusammenhang zwischen Wind und Seegang von der Geographie des Gewässers und von der Vorgeschichte des Windfeldes abhängt, sollen hier einfachheitshalber Wind und Seegang getrennt vorgegeben werden. Um die Berechnungsmethode flexibel zu halten, sollen jedoch Möglichkeiten vorgesehen werden, sowohl nur die Windstärke als auch nur den Seegang vorzugeben.

### 2.1. WIND

Nach der Konvention von 1946 (s.z.B. [1]) bezieht sich die Beaufort-Skala auf die Windgeschwindigkeit in H=10m Höhe. Folgende Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und Beaufort-Grad ist festgelegt worden: (s. Abb.3):

$$V_{10} = 0.836 B_N^{3/2} \quad [m/s]$$

Zur Bestimmung der Windkräfte muß die Geschwindigkeitsverteilung des Windes über der Wasseroberfläche bekannt sein.

Von Pierson [2] wird zur Untersuchung der Beziehung zwischen Wind und Seegang folgendes logarithmische Profil benutzt:

$$\frac{V(H)}{V_{10}} = 1 + \frac{\sqrt{C_{10}}}{k} \ln\left(\frac{H}{10}\right)$$

Nach Brocks ist der Wert für den Widerstandskoeffizienten:

$$C_{10} = 1.5 \cdot 10^{-3} = \text{konst}$$

Für  $k$  wird in [2] der Wert 0,4 angegeben.

Abb.4 zeigt das Windprofil in der Form  $V(H)/V_{10}$ .

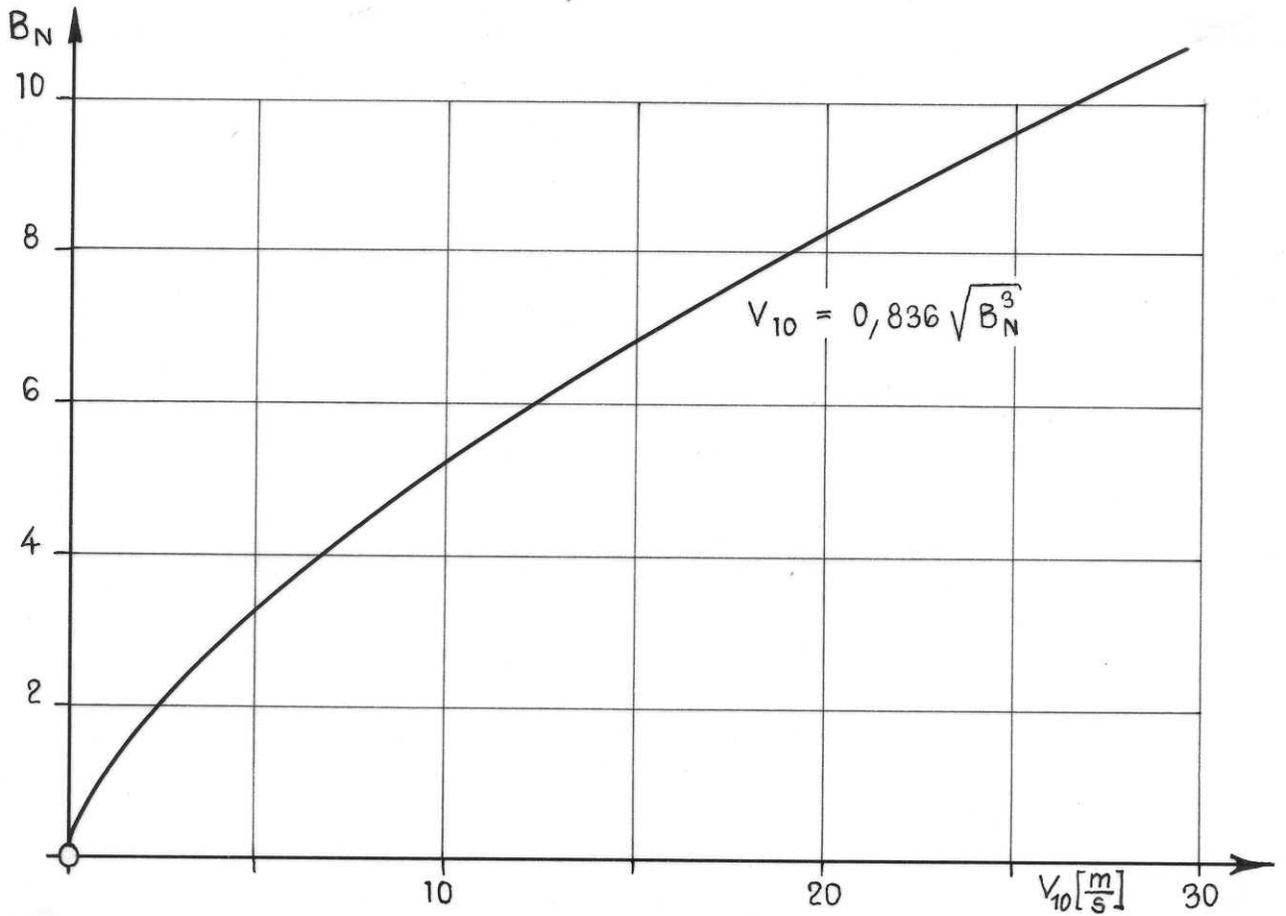


ABB. 3 BEAUFORT - WINDGESCHW. - KORRELATION 1946

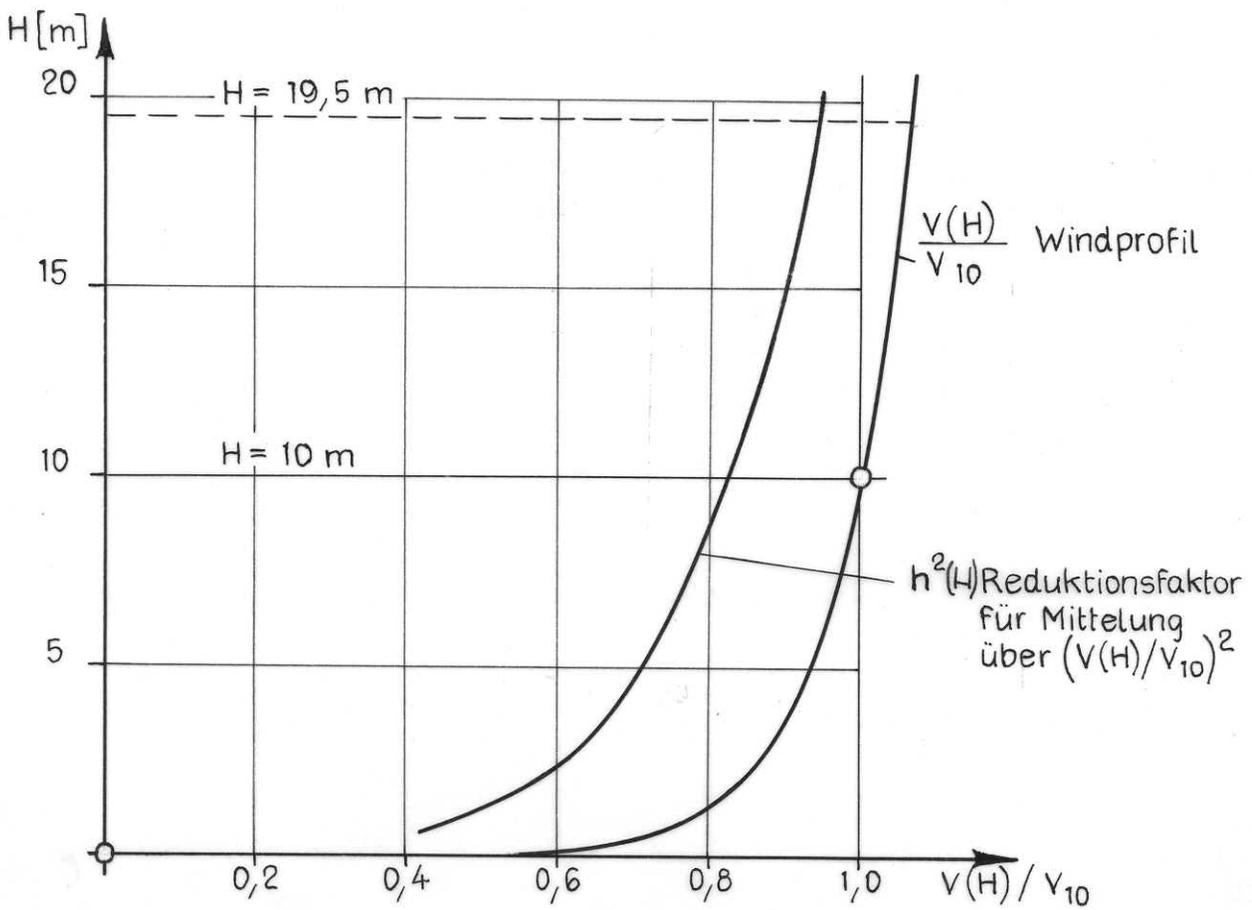


ABB. 4 WINDPROFIL UND REDUKTIONSFAKTOR

## 2.2. SEEGANG

Der natürliche kurzkämmige Seegang wird durch das Seegangsrichtungsspektrum  $S_{\xi}(\omega, \mu)$  dargestellt:

$$\xi(t) = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_0^{\infty} \sqrt{2 S_{\xi}(\omega, \mu)} d\omega d(\Delta\mu) \cos(\omega t + \varepsilon(\omega))$$

$\Delta\mu = \mu - \tilde{\mu}$  ist die Laufrichtung der Elementarwellen, bezogen auf die mittlere Laufrichtung  $\tilde{\mu}$  des Seeganges.

Das Seegangsspektrum wird vereinfachend durch das Produkt aus einem skalaren Frequenzspektrum  $S_{\xi}(\omega)$  und einer Richtungsverteilung  $f(\Delta\mu)$  dargestellt:

$$S_{\xi}(\omega, \Delta\mu) = S_{\xi}(\omega) \cdot f(\Delta\mu)$$

Solange noch keine ausreichende Erfahrung mit eingehenderen Verteilungsformen vorliegt, kann eine einfache  $\cos^4$  Verteilung benutzt werden:

$$f(\Delta\mu) = \frac{8}{3\pi} \cos^4(\Delta\mu) \quad \left| -\frac{\pi}{2} < \Delta\mu < +\frac{\pi}{2} \right.$$

wobei 
$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} f(\Delta\mu) d(\Delta\mu) = 1 ,$$

was zur Folge hat, daß die Gesamtenergie des Richtungsspektrums gegenüber der des skalaren Spektrums unverändert bleibt.

Als Grundform für das Frequenzspektrum hat sich die Bretschneidersche Formel durchgesetzt:

$$S_{\xi}(\omega) = A \cdot \omega^{-5} \cdot \exp(-B \omega^{-4})$$

Für die ausgereifte Windsee hat sich speziell die entsprechende Formel von Moskowitz und Pierson bewährt:

$$S_{\xi}(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp\left(-\beta \left(\frac{g}{\sqrt{19,5} \omega}\right)^4\right) \quad \left| \begin{array}{l} \alpha = 8,1 \cdot 10^{-3} \\ \beta = 0,74 \end{array} \right.$$

$V_{19,5}$  ist die Windgeschwindigkeit in 19,5m Höhe über der Wasseroberfläche.

Nach dem im vorigen Abschnitt angegebenen Windprofil ergibt sich folgender Umrechnungsfaktor zwischen der Windgeschwindigkeit in 10 m und in 19,5m Höhe:

$$V_{19,5} = 1.065 \cdot V_{10}$$

Aus den Momenten n-ter Ordnung des Spektrums

$$\begin{aligned} m_{n_E} &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \omega^n S_E(\omega, \mu) d\omega d\mu \\ &= \int_0^{\infty} \omega^n S_E(\omega) d\omega \quad | n=0,1,2,\dots \end{aligned}$$

können statistische Angaben über die Seegangserhebung gemacht werden:

mittlere Höhe der  $\frac{1}{3}$ -höchsten Wellen:

$$\zeta_{w1/3} = 4.0 \sqrt{m_{0E}}$$

Dieser kennzeichnende Wert stimmt erfahrungsgemäß recht gut mit der ("visuell") beobachteten Wellenhöhe  $\tilde{\zeta}_w$  überein. Für das Moskowitz-Pierson-Spektrum ergibt sich folgende Beziehung zwischen Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit:

$$\zeta_{w1/3} = \frac{0.209}{g} V_{19,5}^2$$

Für die mittlere Periode gibt es entsprechend den Momenten des Spektrums verschiedene Definitionen:

$$\bar{T}_n = 2\pi \left( \frac{m_{0E}}{m_{nE}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

In der Literatur findet man davon:

	<u>Bretschneider</u>	<u>Moskowitz-Pierson</u>
$\bar{T}_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$	$= 4.71 B^{-1/4}$	$= 0.810 \frac{2\pi}{g} V_{19,5}$
$\bar{T}_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1}$	$= 5.12 B^{-1/4}$	$= 0.880 \frac{2\pi}{g} V_{19,5}$
$\bar{T}_{-1} = 2\pi \frac{m_{-1}}{m_0}$	$= 5.69 B^{-1/4}$	$= 0.978 \frac{2\pi}{g} V_{19,5}$

Von der ITTC und ISSC wird empfohlen, die mittlere Periode aus Beobachtungen  $\bar{T}$  dem Wert  $\bar{T}_1$  gleichzusetzen.

Demgegenüber scheint aus dem Vergleich zwischen Schätzungen und Messungen [3] hervorzugehen, daß die beobachtete Periode näher an der Periode des Modalwertes  $T_M = \frac{2\pi}{\omega_M}$  des Seegangsspektrums (Frequenz maximaler Energie) liegt:

$$T_M = \frac{2\pi}{\omega(S_{\xi_{MAX}})} = 6,63 B^{-1/4} = 1,14 \frac{2\pi}{g} V_{19,5}$$

Die neueste Information [29] spricht für  $\bar{T}_{-1}$  als beste Näherung für die visuell beobachtete Periode  $\bar{T}$ . Um auch in Fällen, in denen der Seegang nicht ausgereift ist, aus beobachteten Daten ein Seegangsspektrum angeben zu können, ist es erforderlich, nicht die Windgeschwindigkeit, sondern Wellenhöhe und -periode als Parameter des Spektrums zu benutzen. Mit der Definition  $\bar{T} = \bar{T}_{-1}$  (Abb.5):

$$S_{\xi}(\omega) = 173 \xi_{w^{1/3}}^2 \bar{T}_{-1}^{-4} \omega^{-5} \exp(-692 \bar{T}_{-1}^{-4} \omega^{-4})$$

Diese Vorgehensweise stellt natürlich insbesondere dann, wenn Seegänge aus verschiedenen Windfeldern überlagert sind, eine grobe Näherung dar. Andererseits ist dies bisher die einzige Möglichkeit, um aus die umfangreichen Sammlungen von Seegangsbeobachtungen (s.z.B. [3]) die Seegangsspektren zu rekonstruieren.

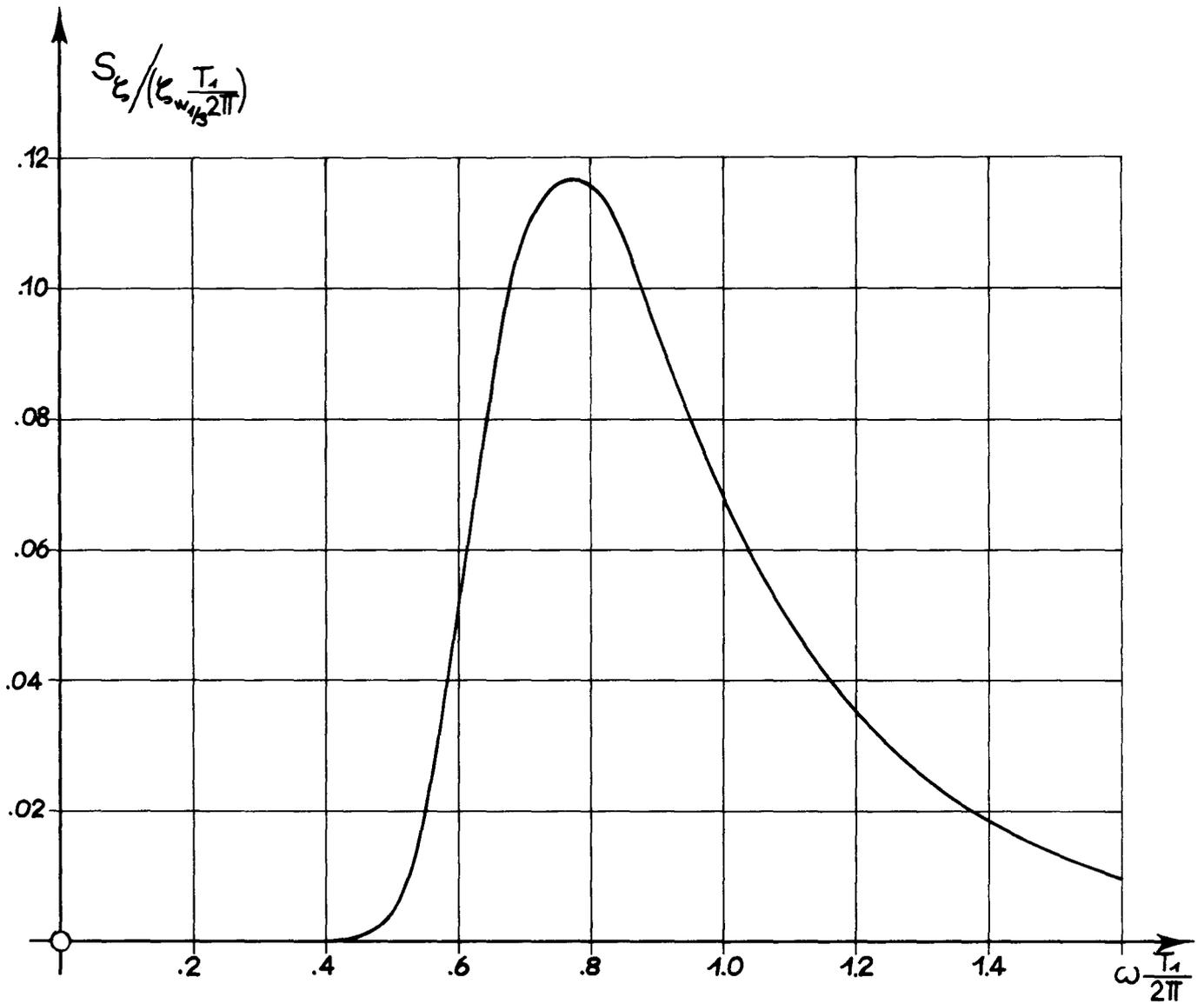


ABB. 5 DIMENSIONSLOSES ZWEIPARAMETRIGES  
BREITSCHNEIDER - SEEGANGSSPEKTRUM

Um das Programmsystem flexibel zu halten, werden folgende drei Möglichkeiten zur Kennzeichnung des Seegangszustandes vorgesehen. Die Laufrichtung des Seeganges muß bei allen drei Darstellungen als bekannt vorausgesetzt werden. Näherungsweise wird angenommen, daß die Windrichtung immer mit der Seegangslaufrichtung übereinstimmt.

- a) Einparametrische Kennzeichnung: Beaufort-Grad ( $B_n$ )  
(Statt des Bf-Grades kann auch die beobachtete Wellenhöhe  $\tilde{\xi}_w$  benutzt werden).

Dies ist die häufigste Darstellungsweise. Sie wird z.B. für Optimal-Weather-Routing verwendet [4]. Ihr Nachteil ist, daß praktisch nur ausgereifte Windsee dargestellt werden kann.

Die Windgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Bf-Grad  $V_{10} = .836 B_n^{3/2}$ . Aus der entsprechenden Geschwindigkeit für 19,5m Höhe  $V_{19,5} = 1.065 V_{10}$  kann das Moskowitz-Pierson-Spektrum bestimmt werden.

- b) Zweiparametrische Kennzeichnung: Kennzeichnende Wellenhöhe  $\tilde{\xi}_w$  und Periode  $\tilde{T}$ .

Hiermit können die umfangreichen Seegangsbeobachtungen [3] z.B. zur Ermittlung statistischer Langzeitwerte benutzt werden. Im Gegensatz zu a) kann auch nicht-ausgereifter Seegang dargestellt werden. Aus  $\tilde{\xi}_w$  und  $\tilde{T}$  ergeben sich die zur Berechnung des Spektrums notwendigen Parameter  $\xi_{w1/3} \approx \tilde{\xi}_w$  und  $T_1 \approx \tilde{T}$ .

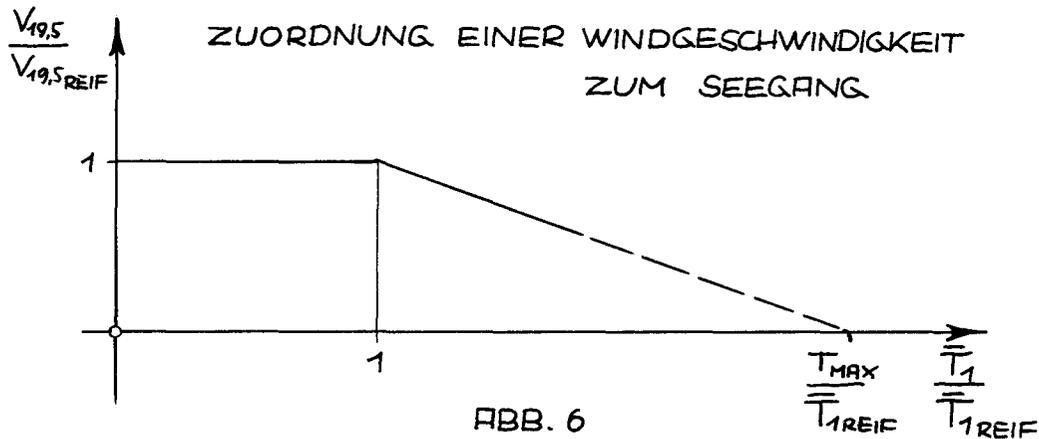
Die zu dem Seegang gehörige Windgeschwindigkeit muß abgeschätzt werden. Hierzu wird zunächst anhand der gegebenen Periode untersucht, ob es sich um eine "junge", d.h. noch nicht ausgereifte, oder "alte" See handelt. Aus der Beziehung zwischen Höhe und Periode zu Windgeschwindigkeit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Höhe und Periode für ausgereifte See:

$$\tilde{T}_{1\text{REIF}} = 12.1 \sqrt{\frac{\xi_{w1/3\text{REIF}}}{g}}$$

Ist  $\tilde{T}_1 \leq \tilde{T}_{1\text{REIF}}$ , so ist die See "jung" und die Windgeschwindigkeit ist wahrscheinlich mindestens so groß, wie für ausgereifte See:

$$V_{19,5} \approx V_{19,5\text{REIF}} = 2.19 \sqrt{\xi_{w1/3} \cdot g}$$

Ist  $\bar{T}_1 > \bar{T}_{1\text{ REIF}}$ , so ist die See "alt" und die Windgeschwindigkeit ist wahrscheinlich geringer als für ausgereifte See. Als Abschätzung soll für diesen Bereich ein linearer Verlauf zwischen  $\bar{T}_{1\text{ REIF}}$  und einer gewählten maximalen Periode  $T_{\text{MAX}} = 30\text{s}$  angenommen werden:



Da der Windeinfluß gegenüber dem Seegang in schwerem Wetter eine untergeordnete Rolle spielt, dürften Ungenauigkeiten dieser Abschätzung keinen gravierenden Einfluß auf das Endergebnis haben.

- c) Dreiparametrische Kennzeichnung: Kennzeichnende Wellenhöhe  $\tilde{\epsilon}_w$  und Periode  $\tilde{T}$  sowie Beaufort-Grad  $B_n$ .

bei dieser Darstellungsart ist keine Abschätzung für die Windgeschwindigkeit notwendig. Es ist denkbar, daß in dieser Form Schiffsbeobachtungen oder Wettervorhersagen angegeben werden, die für Optimal-Weather-Routing verwendet werden.

### 2.3. BEWUCHS

Unter diese Rubrik könnten alle alterungsbedingten Einflüsse auf die Eigenschaften des Systems Schiff fallen. Hierzu zählt neben der Verschlechterung des Widerstandsverhaltens des Schiffes durch Bewuchs, die Verschlechterung der Eigenschaften des Propellers und der Antrieb-anlage. Aus Mangel an Daten soll allerdings hier nur die Widerstands-erhöhung durch Bewuchs berücksichtigt werden.

Der Bewuchs ist im wesentlichen abhängig von den Fahrtgebieten des Schiffes, von der Zeit, in der es diesen Einflüssen ausgesetzt ist und von den Zeitintervallen in denen der Boden gereinigt wird.

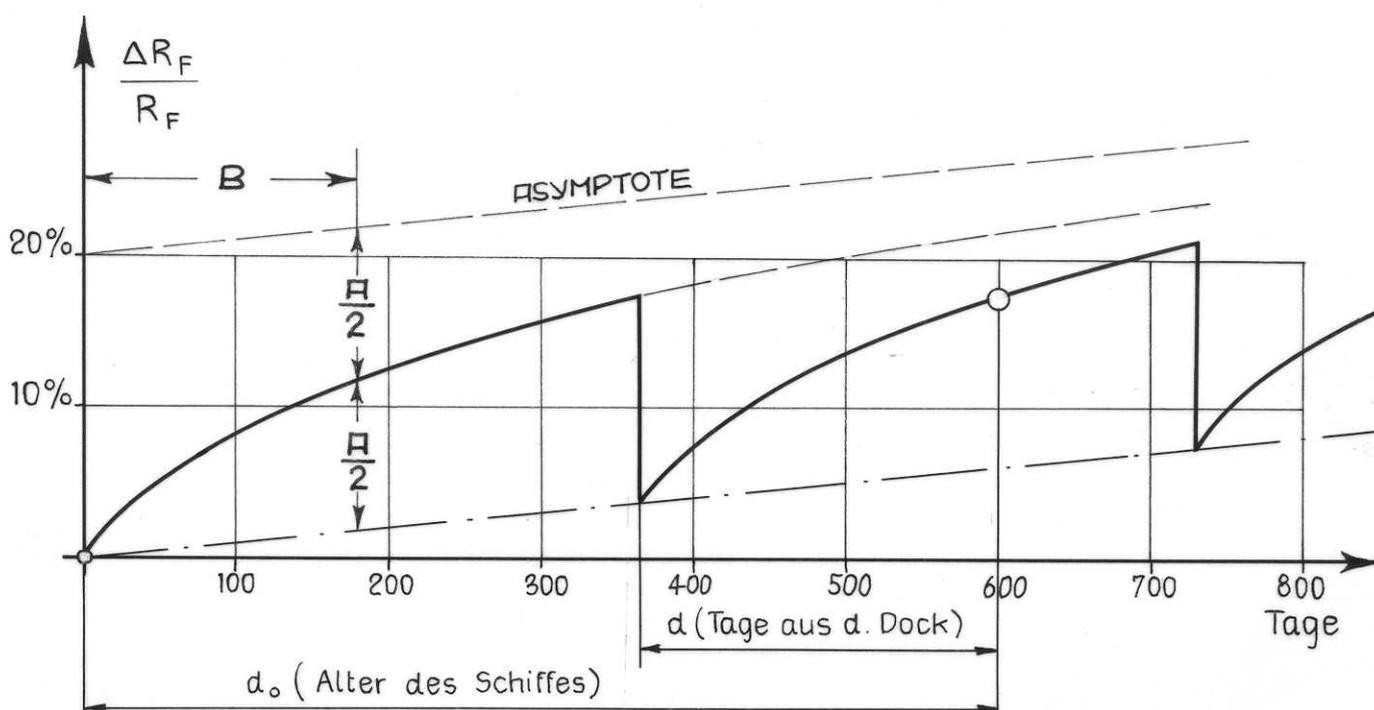
Aertssen gibt für eine Reihe von Schiffen mit verschiedenen Fahrtgebieten eine empirische Funktion für den Verlauf des Zuwachses an Reibungswiderstand über der Zeit an [5] :

$$\frac{\Delta R_F}{R_{F_0}} = \frac{A d}{B+d} + \frac{d_0}{C} \quad [\%]$$

$d$  sind die Tage, die seit der letzten Dockung vergangen sind und  $d_0$  ist das Alter des Schiffes ebenfalls in Tagen.

Für ein Schiff im Atlantikdienst kann man der Arbeit von Aertssen folgende Werte für die Konstanten entnehmen:

$$A = 20\% \quad B = 180 \text{ Tage} \quad C = 100 \text{ Tage}$$



**ABB. 7 ZUWACHS AN REIBUNGSWIDERSTAND DURCH BEWUCHS (JÄHRLICHE DOCKUNG)**

Für einen gegebenen Zustand des Schiffes, gekennzeichnet durch die Werte  $d$  und  $d_0$ , kann hiernach die Widerstandserhöhung angegeben werden (Abb. 7).

Sollen demgegenüber statistische Langzeitwerte berechnet werden, so kann man näherungsweise mit einem über eine längere Periode von  $j_0$  Jahren gemittelten Zuwachs an Reibungswiderstand rechnen:

$$\left(\frac{\Delta R_F}{R_{FO\text{ MITTEL}}}\right) \approx 3.6 j_0 + 9 [\%] \text{ (Dockung alle Jahre)}$$

$$\left(\frac{\Delta R_F}{R_{FO\text{ MITTEL}}}\right) \approx 3.6 j_0 + 12 [\%] \text{ (Dockung alle 2 Jahre)}$$

### 3. EIGENSCHAFTEN DES SCHIFFES

In der Einführung war gezeigt worden, daß von den Eigenschaften des Schiffes seine Reaktion auf die Umwelteinflüsse bei bestimmter Wahl der Operationsparameter interessiert. Das System Schiff wird zweckmäßigerweise in die Untersysteme RUMPF, ANTRIEBSANLAGE und PROPELLER unterteilt, deren Eigenschaften zunächst getrennt und danach in ihrem Zusammenwirken behandelt werden.

#### 3.1. EIGENSCHAFTEN DES RUMPFES

Von den Eigenschaften des Rumpfes sollen die Widerstands- und die Bewegungseigenschaften ermittelt werden.

Der Widerstand, dem das Schiff unter Betriebsbedingungen begegnet, denkt man sich aus folgenden Anteilen zusammengesetzt:

- Widerstand im glatten Wasser
- Widerstandszuwachs durch Wind
- Widerstandszuwachs durch Seegang

##### 3.1.1. WIDERSTAND IM GLATTEN WASSER

Für den Fall, daß keine Modellversuchsergebnisse von dem zu untersuchenden Schiff vorliegen, muß in dem Programmsystem ein Verfahren zur Berechnung des Widerstandes im glatten Wasser aus empirischen Daten vorgesehen werden. Dies bringt den Vorteil mit sich, daß mit dem Programmsystem ohne weiteres Schiffe mit systematisch variierten Abmessungen durchgerechnet werden können. Dies ist z.B. bei Aufgaben der Entwurfsoptimierung notwendig.

Bei der Wahl von empirischen Ausgangsdaten bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Entweder man benutzt systematische Modellserien (z.B. Taylor-Serie [6] oder Series-60 [7] ) oder beliebige Modellversuche (z.B. Verfahren von Joust O'Brien [8] oder N.C. Astrup [9] ). Im ersten Fall muß zur Ermittlung des Widerstandes für das gegebene Schiff zwischen Daten mit äquidistanten Stützstellen interpoliert werden. Im zweiten Fall muß der Wert nach Methoden der Regressionsanalyse zwischen beliebig gegebenen Daten gefunden werden.

Um das Verfahren nicht zu aufwendig werden zu lassen, wird hier die erste Methode benutzt. Als Grundlage für die Ausgangsdaten dienen die Diagramme von Gulddammer und Harvald [10], die ein Konzentrat aus der Taylor-Serie, der Series-60 und anderen Versuchsdaten darstellt. Der Vorteil dieser Daten ist, daß sie einen weiten Bereich möglicher Schiffsformen umfassen. In den Diagrammen ist der Restwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von

$L/V^{1/3}$  Schlankheitskoeffizient

$C_P$  Schärfegrad

$F_N$  Froudezahl  $V/\sqrt{gL}$

angegeben:

$$C_{R_0} (L/V^{1/3}, C_P, F_N)$$

Für das  $B/T$ -Verhältnis wird eine Korrektur vorgenommen, sodaß sich der Restwiderstandsbeiwert folgendermaßen ergibt:

$$C_R = C_{R_0} (L/V^{1/3}, C_P, F_N) + \Delta C_R (B/T)$$

Um  $C_R$  für beliebige Parameterkombinationen  $L/V^{1/3}$ ,  $C_P$  und  $F_N$  zu ermitteln, muß zwischen den gegebenen Werten in drei Richtungen interpoliert werden. Da auch Verläufe mit Wendepunkten genau genug erfaßt werden sollen, wird ein kubisches Interpolationspolynom benutzt.

Liegt die gegebene Parameterkombination außerhalb des vorhandenen Bereichs, so muß extrapoliert werden, um wenigstens einen groben Näherungswert für den Widerstand zu erhalten, oder die Restwiderstandsdaten werden gegen die spezieller Versuchsserien ausgetauscht ([30][31]).

Der Beiwert für den Reibungswiderstand wird aus der Reynoldszahl

$$R_N = \frac{VL}{\nu} \quad \text{nach der ITTC - Linie ermittelt:}$$

$$C_{F_0} = \frac{0.075}{(\log R_N - 2)^2}$$

Für den "Rauhigkeitszuschlag"  $C_R$  kann aus den in [10] gegebenen Erfahrungswerten der in Abb. 8 gezeigte Verlauf konstruiert werden:

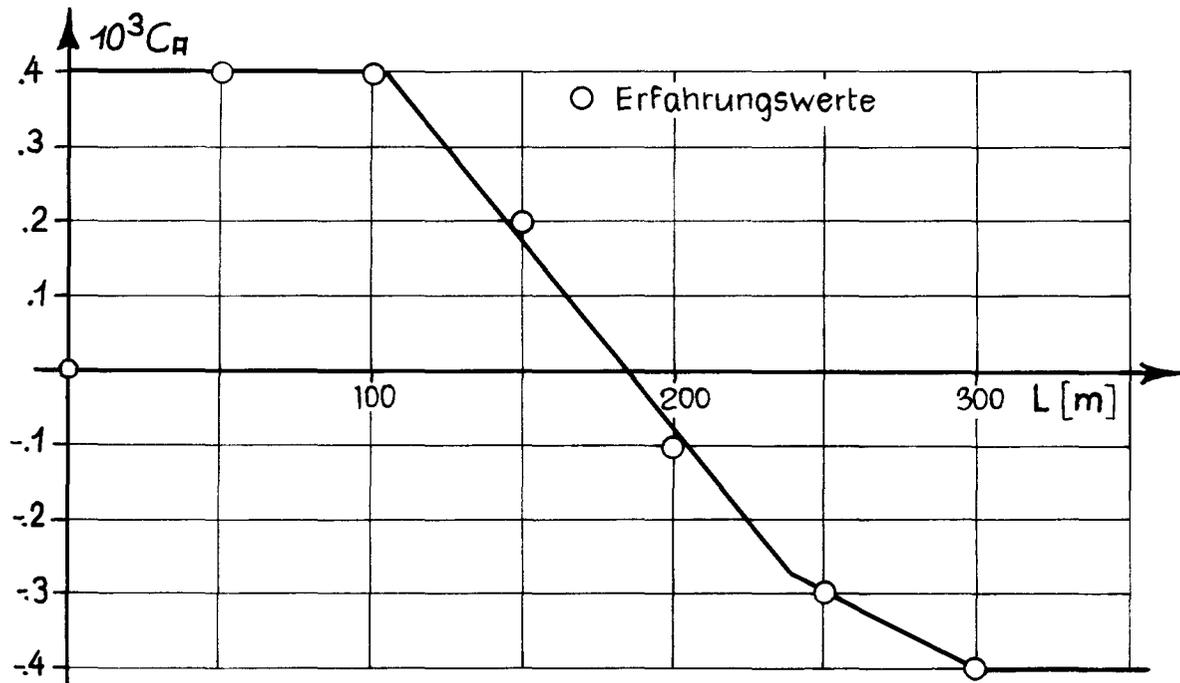


ABB. 8 "RAUHIGKEITSZUSCHLAG" ÜBER DER SCHIFFSLÄNGE

Der Gesamtwiderstand für das "neue" Schiff lautet somit:

$$R_{T_0} = C_T \frac{\rho}{2} V^2 S$$

mit

$$C_T = C_{F_0} + C_R + C_R$$

Die benetzte Oberfläche  $S$  muß entweder eingegeben oder mit Hilfe einer Überschlagsrechnung, die möglichst alle für den Restwiderstand benutzten Formparameter berücksichtigt, ermittelt werden.

Für den Ansatz:

$$\begin{aligned} S &= 2A_L + C_1 A_{wL} + C_2 A_x \\ &= 2LT + C_1 \left( \frac{C_B}{C_w}, C_w \frac{B}{T} \right) C_w LB + C_2 \left( \frac{C_B}{C_M}, C_M \frac{L}{B} \right) C_M BT \\ &= S(L, B, T, C_B, C_w, C_M) \end{aligned}$$

wurden folgende Koeffizienten ermittelt:

$$C_1 = 1 - a_1 \sqrt{1 - \left(2 \frac{C_B}{C_w} - 1\right)^{n_1}} \quad n_1 = 0.8 + 0.2 b$$

$$C_2 = 1 - a_2 \sqrt{1 - \left(2 \frac{C_B}{C_M} - 1\right)^{n_2}} \quad n_2 = 1.15 + 0.2833 L$$

$$a_1 = \frac{2}{b} \left( 1 + \frac{b}{2} - \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \quad b = C_w \frac{B}{T}$$

$$a_2 = 1 + L - \sqrt{1 + L^2} \quad L = \frac{1}{C_M} \frac{L}{B}$$

Soll der Glattwasserwiderstand im Betriebszustand  $R_{T_{CALM}}$  angegeben werden, so ist noch der im Abschn. 2.3. behandelte Zuwachs an Reibungswiderstand durch Bewuchs zu berücksichtigen:

$$R_{T_{CALM}} = R_{T_0} + \frac{\Delta R_F}{R_{F_0}} R_{F_0}$$

### 3.1.2. WINDKRAFTE

Bei der Ermittlung der Windkräfte ist man ähnlich wie beim Restwiderstand auf Modellversuchsergebnisse angewiesen.

Durch die umfangreichen Windkanaluntersuchungen von Wagner [11] stehen Werte für eine relativ große Zahl von Schiffstypen zur Verfügung, sodaß es in der Regel nicht schwer fallen sollte, für das gegebene Schiff ein Modell mit ähnlicher Überwasserform zu finden.

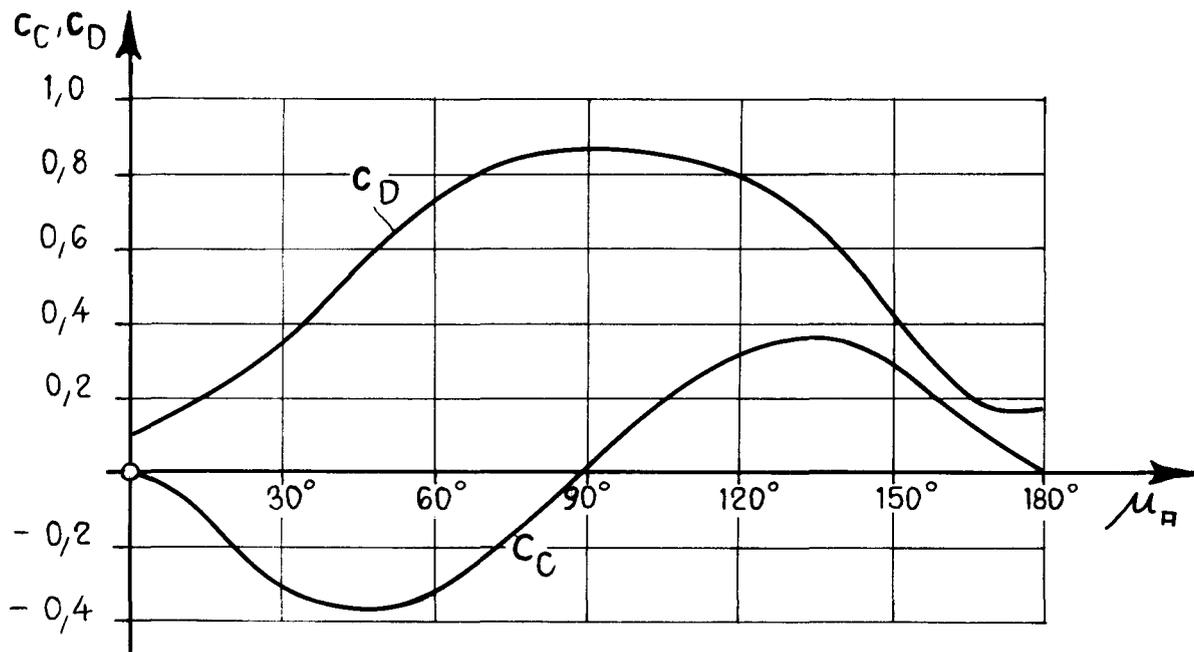


ABB. 9 LUFT-WIDERSTANDS-UND QUERKRAFTBEIWERT  
"ÜBER DER ANSTRÖMRICHTUNG.

Die Windkräfte liegen in der Regel in einem auf die Anströmrichtung bezogenen Koordinatensystem, als Funktion der Anströmrichtung vor (s. Abb. 9):

$C_D$  Widerstandsbeiwert

$C_C$  Auftriebsbeiwert

$C_N$  Giermomentbeiwert

$$C_{\text{KRAFT}} = \frac{\text{KRAFT}}{\rho_{\text{A}}/2 V_{\text{A}}^2 A_L}$$

$V_{\text{A}}$  ist die relative Anströmgeschwindigkeit und  $\mu_{\text{A}}$  die relative Anströmrichtung bezogen auf die Schiffslängsachse (in [11] ist  $\varepsilon = 180^\circ - \mu_{\text{A}}$ ). Als Bezugsfläche wird die Überwasserlateralfäche  $A_L$  gewählt.

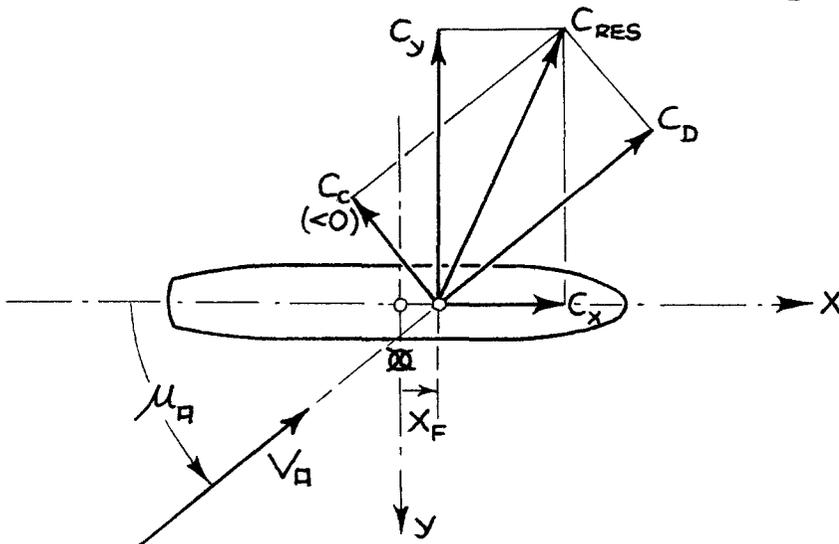


ABB. 10 DEFINITION DER WINDKRAFTBEIWERTE

(für  $\mu_{\text{A}} < \frac{\pi}{2}$  ist in der Regel  $C_C < 0$ )

Im schiffsfesten Koordinatensystem lauten die Kraftbeiwerte:

$$C_x = C_D \cos \mu_{\text{A}} + C_C \sin \mu_{\text{A}}$$

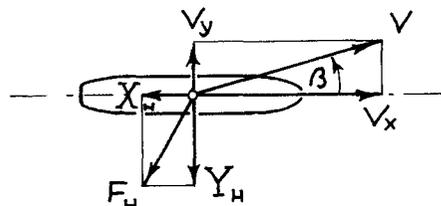
$$C_y = -C_D \sin \mu_{\text{A}} + C_C \cos \mu_{\text{A}}$$

Die am Überwasserschiff angreifenden Luftkräfte müssen durch Wasserkräfte am Unterwasserschiff im Gleichgewicht gehalten werden.

Die Längskraft  $-X = \rho_{\text{fl}}/2 V_{\text{fl}}^2 \Pi_L C_x$  kommt einer Widerstandserhöhung gleich und muß durch zusätzlichen Propellerschub überwunden werden. Die Querkraft  $Y = \rho_{\text{fl}}/2 V_{\text{fl}}^2 \Pi_L C_y$  muß durch eine Unterwasserquerkraft, die durch Schräganströmung des Rumpfes (Drift) und des Ruders entsteht, ausgeglichen werden. Das Momentengleichgewicht bleibt in diesem Rahmen unberücksichtigt. Es wird angenommen, daß das Schiff ohne erhebliches Ruderlegen auf Kurs zu halten ist.

Die Rumpfquerkraft  $Y_H$  setzt sich zusammen aus einer Querkraft infolge Zirkulation und einem Widerstand gegen Querumströmung. Der zweite Anteil gewinnt vor allem bei größerem Anströmwinkel an Bedeutung. Mit dem Ansatz

$$Y_H = Y_i + Y_D = m_y^{**} V_x V_y + \rho/2 C_{Dy} L T V_y^2$$



läßt sich nach Abschätzung des Widerstandsbeiwertes  $C_{Dy}$  und der hydrodynamischen Masse des Endquerschnitts  $m_y^{**}$  ein Näherungswert für die Quergeschwindigkeit  $V_y$ , den Driftwinkel  $\beta = \arctan \frac{V_y}{V_x}$  und damit auch für die induzierte Querkraft  $Y_i$  angeben.

$$V_y = (\sqrt{m_y^{**2} V_x^2 + 2 Y_H \rho C_{Dy} L T} - m_y^{**} V_x) / (\rho C_{Dy} L T)$$

$$Y_i = m_y^{**} V_x V_y$$

Die Auftriebserzeugung ist mit einem induzierten Widerstand verbunden, dabei kann die resultierende sowohl eine positive, als auch eine negative Längsschiffskomponente haben, in Anlehnung an die übliche Gleitzahl  $\epsilon = C_D / C_C$  läßt sich eine entsprechende Zahl definieren:

$$\epsilon_y = C_{x_i} / C_{y_i} = X_i / Y_i = f(\beta)$$

Wagner gibt in [13] aus der Auswertung von Schrägschleppversuchen z.B. für den MARINER an:

$$\epsilon_y = 1.58 \beta - 6.85 \beta^2$$

Mit dem oben abgeschätzten Driftwinkel  $\beta$  ergibt sich eine zusätzliche Längskraft:

$$X_i = \epsilon_y \cdot Y_i$$

und damit die effektive durch den Wind verursachte Längskraft:

$$X_{\text{EFF}} = X + X_i$$

Im Folgenden wird die Wirkung des Windes als Widerstand, d.h. in negativer  $X$ -Richtung wirkend, benutzt:

$$R_{\text{AW}}(V_x, \mu_w) = -X_{\text{EFF}}(V_x, \mu_w)$$

Die relative Anströmung des Schiffes ergibt sich durch vektorielle Addition des "wahren" Windes  $V_w$  und der "Fahrt"-Windes  $-V \approx -V_x$ :

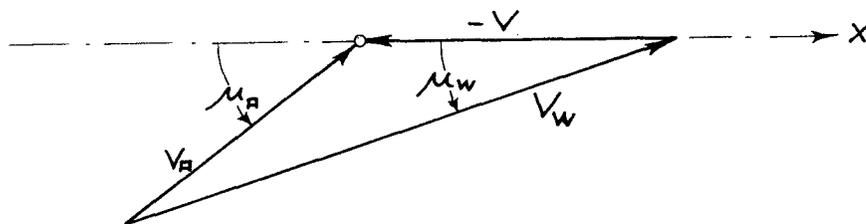


ABB. 11 ANSTRÖMUNG DES FAHRENDEN SCHIFFES DURCH WIND

$$V_R^2 = V^2 + V_w^2 - 2VV_w \cos \mu_w$$

$$\cos \mu_R = \frac{V_w \cos \mu_w - V}{V_R} = \frac{V_w^2 - V_R^2 - V^2}{2VV_R}$$

Zur näherungsweise Berücksichtigung des Windprofils wird mit einer quasi-homogenen Anströmung gerechnet, deren Geschwindigkeit sich durch Mittelung der Geschwindigkeitsverteilung über die Höhe des Überwasserschiffes ergibt. Da die Windkräfte proportional dem Quadrat der Windgeschwindigkeit sind, wird diese Mittelung für das Quadrat der Geschwindigkeitsverteilung durchgeführt.

Bezogen auf die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe  $V_{10}$  kann mit Hilfe dieses Reduktionsfaktors  $h$  die mittlere Geschwindigkeit des "wahren" Windes angegeben werden:

$$\bar{V}_w(H) = h(H) V_{10} \quad h^2(H) = \frac{1}{H} \int_0^H \left( \frac{V_w}{V_{10}} \right)^2(H_1) dH_1$$

Somit ergibt sich die mittlere relative Anströmgeschwindigkeit:

$$\bar{V}_a^2 = V^2 + h^2 V_{10}^2 - 2h V V_{10} \cos \mu_w$$

Für die Anströmrichtung ist diese Mittelung nicht ganz korrekt, sie soll hier aber trotzdem benutzt werden:

$$\bar{\mu}_a = \arccos \left( \frac{h^2 V_{10}^2 - \bar{V}_a^2 - V^2}{2 \bar{V}_a V} \right)$$

Als Höhe des Überwasserschiffes wird eine mittlere Höhe definiert, die sich aus einer mittleren Höhe des Lateralplanes  $A_L$  und des Lufthauptspantes  $A_x$  zusammensetzt:

$$H_m = \frac{1}{2} \left( \frac{A_L}{L_{ora}} + \frac{A_x}{B} \right)$$

Abhängig von der Höhe, über die das Windprofil gemittelt wird, ergibt sich folgende Näherungsformel für den Reduktionsfaktor (s. Abb. 4):

$$h^2(H_m) = 0.825 + .175 \ln \left( \frac{H_m}{10} \right)$$

### 3.1.3. BEWEGUNGEN IM SEEGANG

Von den möglichen Freiheitsgraden eines Schiffes sollen hier nur die vertikalen Bewegungen in der Symmetrieebene betrachtet werden, weil sie in der Regel für das Verhalten im Seegang bestimmend sind. Zwar kann ein Mangel an Stabilität der Gierbewegung und vor allem der Rollbewegung ebenfalls eine Gefährdung des Schiffes bedeuten, da es sich hierbei aber um nichtlineare Vorgänge handelt, können diese Effekte z.Zt. nur sehr grob berücksichtigt werden.

Wie in [14] gezeigt wurde, ist die Gierbewegung und damit die Kursstabilität vor allem im Zusammenhang mit der Längsbewegung im Seegang zu sehen. Danach könnte z.B. die Sicherheitsforderung erhoben werden, daß Fahrtzustände, bei denen extreme Längsbewegungen auftreten, gemieden werden. Da dieser Effekt jedoch nur bei relativ schnellen Fahrzeugen in Erscheinung tritt, soll die Gier- bzw. Längsbewegung hier nicht berücksichtigt werden.

Für die Rollbewegung wird die Forderung aufgestellt, daß starke Resonanzbewegungen vermieden werden sollen.

Die beiden Freiheitsgrade der Bewegungen in der vertikalen Ebene sind die Tauchbewegung  $z_0$  (Bewegung am Hauptspant nach oben positiv) und die Stampfbewegung  $\Theta$  (Bug nach oben positiv). Hieraus können alle weiteren interessierenden Bewegungsgrößen, wie lokale Vertikalbewegungen, Vertikalbeschleunigungen, und Relativbewegungen zwischen Schiff und Wasseroberfläche abgeleitet werden.

Zur Berechnung der Vertikalbewegungen hat sich die Streifenmethode bewährt. Eine Beschreibung der Grim'schen Methode zur Berechnung der hydrodynamischen Kräfte, wie sie für die Berechnung der Bewegungen gebraucht werden, findet sich u.a. in [15] und [34].

In dem hier beschriebenen Programmsystem werden die Tauch- und Stampfbewegungen in einer gesonderten Rechnung ermittelt. Dies bietet die Möglichkeit einer Zwischenkontrolle, außerdem können die Bewegungsdaten ggfs. auch aus einer anderen Quelle z.B. aus Versuchen entnommen werden.

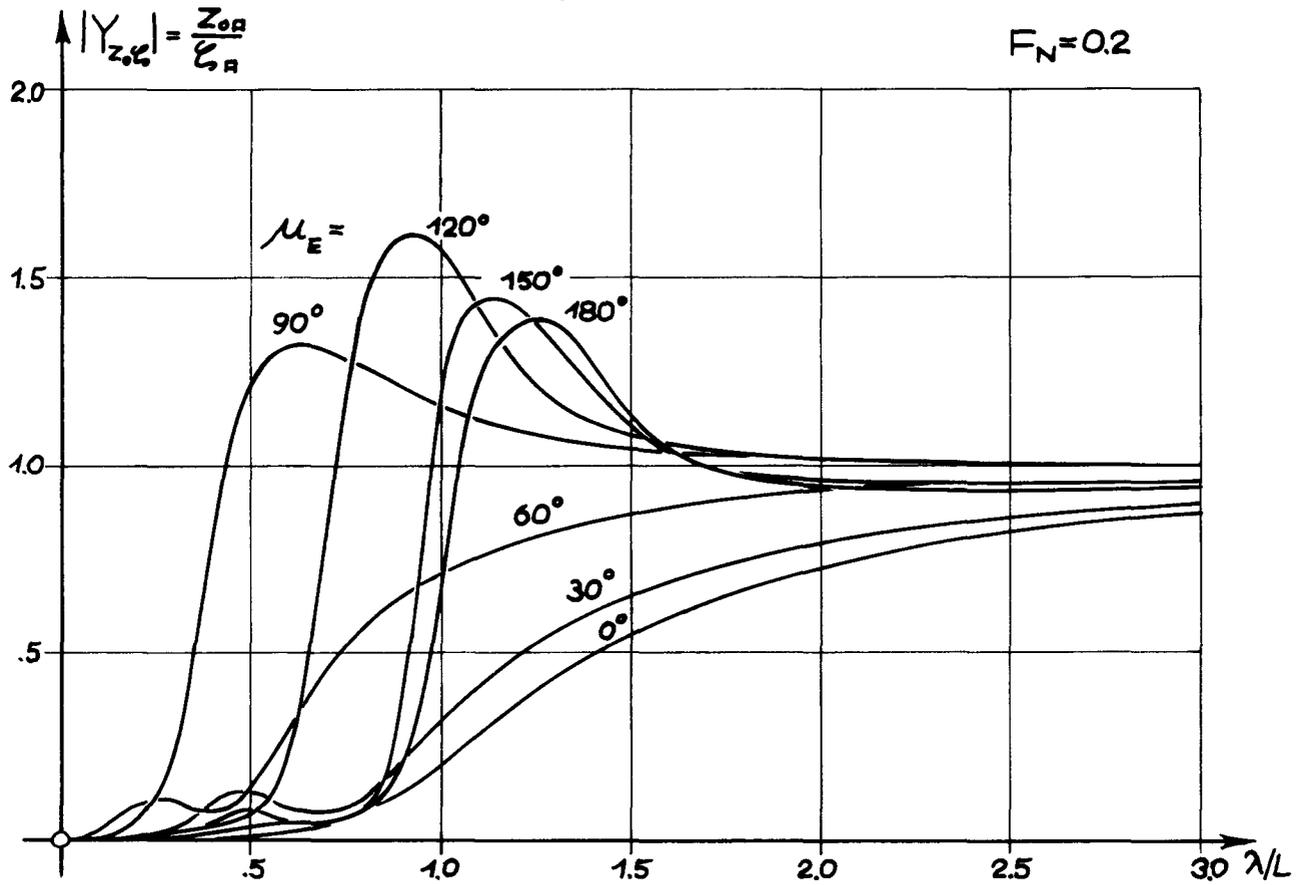


ABB. 12 ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DER TAUCHBEWEGUNG.

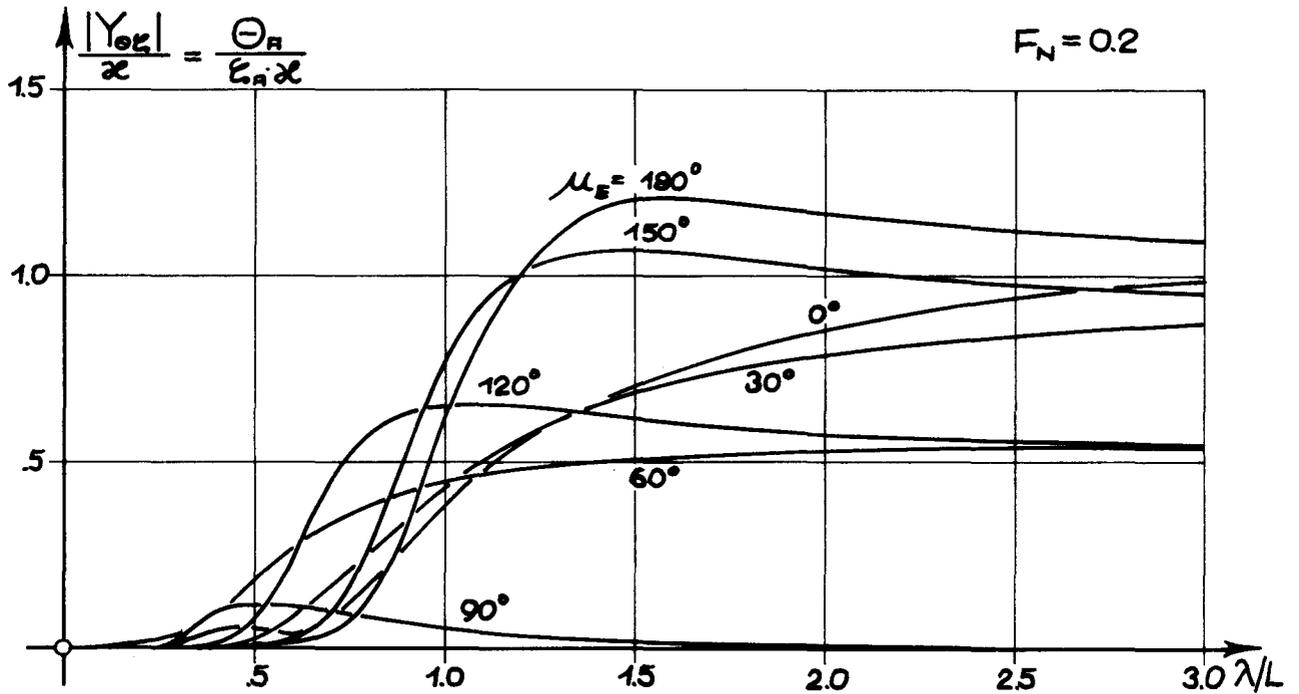


ABB. 13 ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DER STAMPFBEWEGUNG.

die Bewegungsdaten werden in Form von zwei Komponenten der komplexen Amplitude benutzt:

$$z_o(t) = (z_{or} + iz_{oi}) e^{i\omega_E t}$$

$$\Theta(t) = (\Theta_r + i\Theta_i) e^{i\omega_E t}$$

$\omega_E$  ist die Begegnungsfrequenz:

$$\omega_E = \omega - \mathcal{R} V \cos \mu_E = \omega - \frac{\omega^2}{g} V \cos \mu_E$$

Das Hamburger Streifenprogramm liefert die Bewegungsamplituden für beliebige Wellenlängen und Richtungswinkel des regelmäßigen Seegangs sowie für beliebige Geschwindigkeiten. Die Amplitudenwerte werden auf die Wellenamplitude  $\zeta_a$  bzw. Wellenschräge  $\mathcal{R} \zeta_a$  bezogen, als Übertragungsfunktionen angegeben:

$$Y_{r_{z_o \zeta}}(\lambda/L, \mu_E, F_N) \quad Y_{i_{z_o \zeta}}(\lambda/L, \mu_E, F_N)$$

$$Y_{r_{\Theta \zeta}}(\lambda/L, \mu_E, F_N) \quad Y_{i_{\Theta \zeta}}(\lambda/L, \mu_E, F_N)$$

Durch dieses Datenfeld von mindestens 2000 Daten sind die Seegangseigenschaften des Schiffes ausreichend festgelegt. Die weiteren Bewegungseffekte können hieraus abgeleitet werden. Die resultierenden Übertragungsfunktionen für Tauchen und Stampfen

$$|Y_{z_o \zeta}| = \sqrt{Y_{r_{z_o \zeta}}^2 + Y_{i_{z_o \zeta}}^2}$$

$$|Y_{\Theta \zeta}| = \sqrt{Y_{r_{\Theta \zeta}}^2 + Y_{i_{\Theta \zeta}}^2}$$

sind für  $F_N = 2$  in Abb. 12 u. 13 dargestellt.

Z.B. kann eine wichtige Größe, die Übertragungsfunktionen für die Relativbewegung  $S$  zwischen Schiff und Wasser an beliebiger Stelle  $X$ , berechnet werden:

$$Y_{r_{S \zeta}} = Y_{r_{z_o \zeta}} + \mathcal{R} X Y_{r_{\Theta \zeta}} \mp \frac{\cos(\mathcal{R} X \cos \mu_E)}{\sin(\mathcal{R} X \cos \mu_E)}$$

$$|Y_{S \zeta}| = \sqrt{Y_{r_{S \zeta}}^2 + Y_{i_{S \zeta}}^2}$$

Hierbei wird eine Deformation der Wellenkontur durch das Schiff vernachlässigt.

Da die hier betrachteten Bewegungen weitgehend linear sind, können ihre Spektren für den in Abschn. 2.2. beschriebenen kurzkämmigen Seegang berechnet werden. Für die Relativbewegung  $S$  gilt zum Beispiel:

$$S_S(\omega, \mu_E) = Y_{SE}^2(\omega, \mu_E) S_E(\omega, \mu_E)$$

$\mu_E$  ist die Laufrichtung einer Elementarwelle des kurzkämmigen Seeganges ( $\mu_E = \tilde{\mu}_E + \Delta\mu_E$ ) bezogen auf den Kurs des Schiffes.

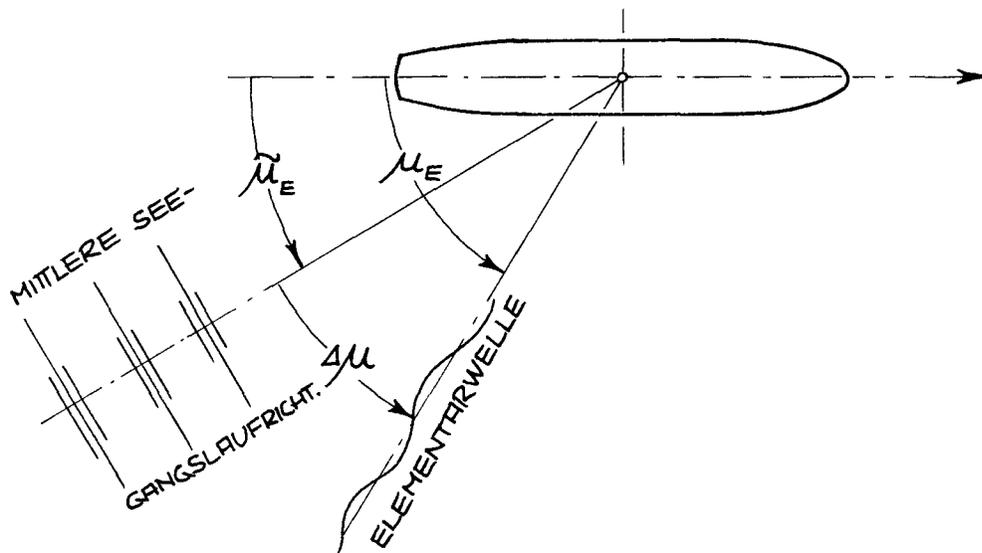


ABB. 14 BEGEGNUNGSWINKEL

Wie beim Seegangsspektrum ergeben sich die Momente des Bewegungsspektrums durch Integration über Frequenz und Richtung:

$$m_{nS}(\tilde{\mu}_E) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \omega_E^n(\omega, \mu_E) S_S(\omega, \mu_E) d\omega d(\Delta\mu)$$

Für beliebige statistische Aussagen über die Bewegungen genügen allein die Momente der Bewegungsspektren.

### 3.1.4. WIDERSTANDSZUWACHS IM SEEGANG

Obwohlesich beim Widerstandszuwachs um einen nichtlinearen Effekt handelt, ist es möglich, die für regelmäßige Wellen gemessenen oder berechneten Werte ähnlich wie die Bewegungen auf den unregelmäßigen Seegang umzurechnen. Das liegt daran, daß es hierbei im wesentlichen um einen Effekt zweiter Ordnung geht, und daß nur der Mittelwert der Längskraft (der mittlere Widerstand) interessiert.

Zur Berechnung des Widerstandszuwachses soll eine wenig aufwendige Methode benutzt werden, die in [16] u. [34] beschrieben ist, und deren Brauchbarkeit durch Vergleich mit Modellversuchen bestätigt wurde [32].

Die Methode basiert auf der Vorstellung [34], daß ein Längskraftanteil aus der Berücksichtigung aller Druckkräfte an der Schiffsoberfläche bis zur Ruhewasserlinie  $\overline{F_{0x_0}}$  und ein zweiter Anteil  $\overline{F_{1x}}$  aus der nur zeitweisen Benetzung im Bereich der Wasserlinie resultiert:

$$\overline{F_x} = \overline{F_{0x_0}} + \overline{F_{1x}}$$

$$\begin{aligned} \overline{F_{0x_0}} &= \frac{1}{2} M \omega_E^2 Z_{M\pi} \Theta_\pi \cos(\epsilon_{z\pi} - \epsilon_\Theta) \\ &= \frac{1}{2} \rho \forall \omega_E^2 [(z_{0r} + x_s \Theta_r) \Theta_r + (z_{0i} + x_s \Theta_i) \Theta_i] \end{aligned}$$

$$\overline{F_{1x}} = \frac{1}{4} \rho g \int_L S_\pi^2(x) \frac{\partial B_{wl}}{\partial x} dx$$

hierin ist

$\forall$  Verdrängung

$x_s$  Schwerpunktabstand vom Hauptspant

$S_\pi$  Amplitude der Relativbewegung (s. Abschn. 3.1.3.)

$\frac{1}{2} \frac{\partial B_{wl}}{\partial x}$  Tangens des Winkels zwischen der Wasserlinienkontur und der Schiffslängsachse

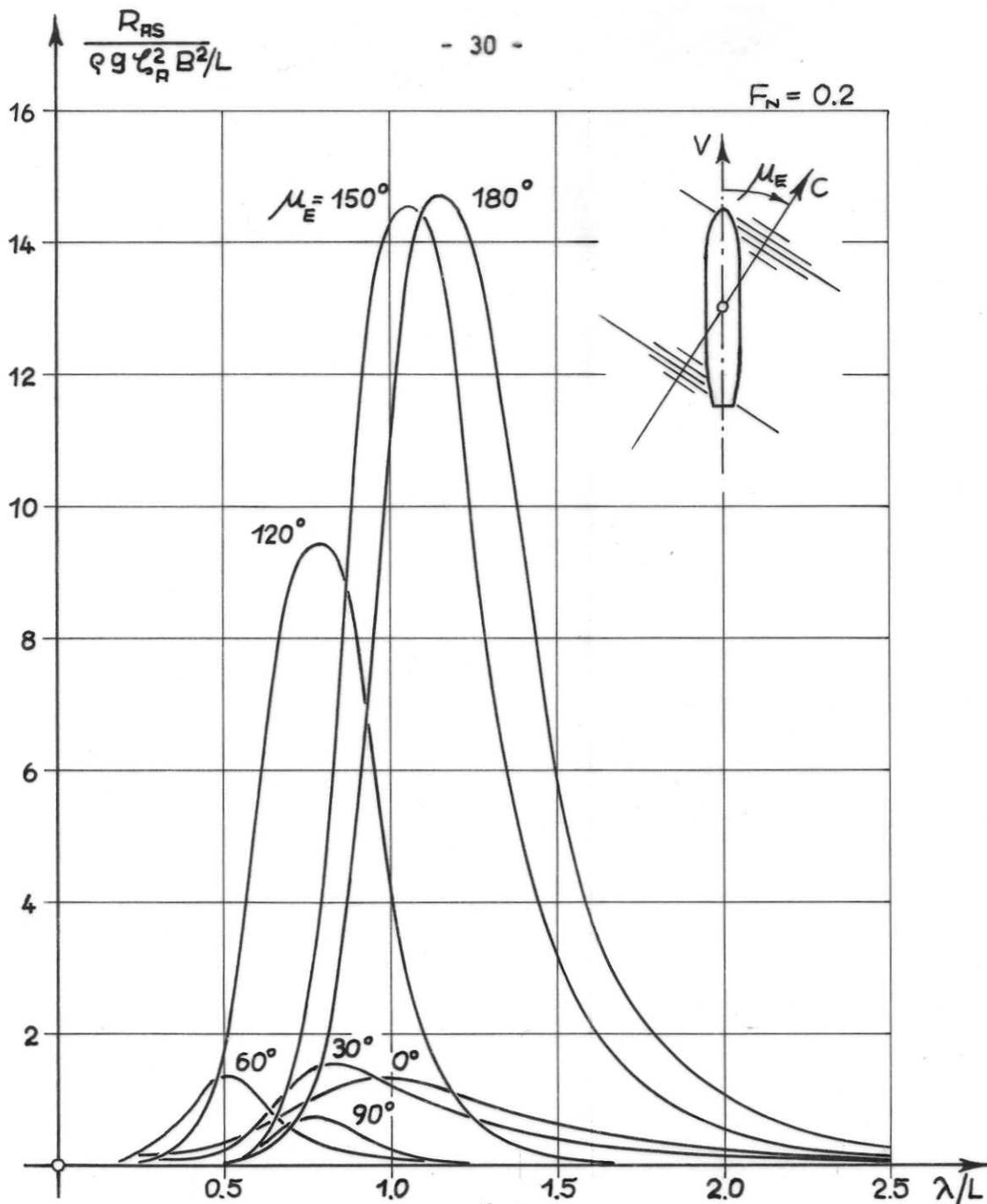


ABB. 15 WIDERSTANDSERHÖHUNG IN REGELM. WELLEN

Abb. 15 zeigt die Abhängigkeit des zusätzlichen Widerstandes von der Wellenlänge und vom Begegnungswinkel. Um die mittlere Widerstandserhöhung im unregelmäßigen Seegang zu berechnen, sind die für den regelmäßigen Seegang ermittelten Werte wie das Quadrat einer Übertragungsfunktion zu behandeln:

$$\frac{R_{RS}}{\epsilon_R^2}(\omega, \mu_E, F_N) = -\bar{F}_X(\omega, \mu_E, F_N) / \epsilon_R^2$$

Die mittlere Widerstandserhöhung wird dann ähnlich wie das 0-te Moment eines Spektrums berechnet:

$$\bar{R}_{RS}(\bar{\mu}_E, F_N) = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \left( \frac{R_{RS}}{\epsilon_R^2}(\omega, \mu_E, F_N) \right) \cdot S_{\xi}(\omega, \mu_E) d\omega d(\Delta\mu)$$

### 3.2. EIGENSCHAFTEN DER ANTRIEBSANLAGE

Die Propulsionseigenschaften des Schiffes hängen entscheidend von dem Moment- (bzw. Leistungs-) Drehzahl-Verhalten der Antriebsanlage ab. Insbesondere muß beachtet werden, ob es sich um einen Dieselmotor oder eine Dampfturbine handelt.

Für den Dieselmotor wird meistens eine gerade Leistungs-Drehzahl-Kennlinie angenommen. Dies ist selbst für hochaufgeladene Motoren mit guter Genauigkeit möglich. Sollte eine bessere Näherung erwünscht sein, so kann die Kennlinie z.B. durch 3 Punkte maximaler Leistung über Drehzahl vorgegeben werden.

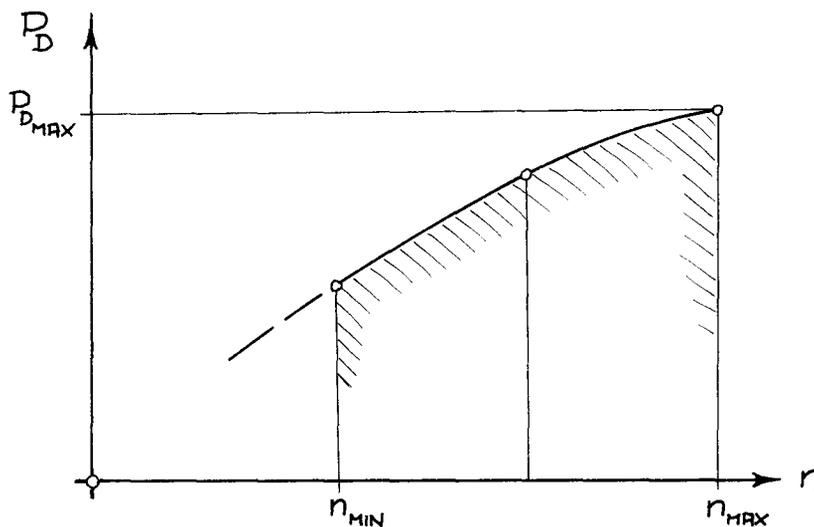


ABB. 16 ANTRIEBSKENNLINIE

Die maximale Drehzahl ist meist durch einen Drehzahlregler begrenzt. Die maximale Leistung ergibt sich bei maximaler Füllung. Bei der Vorgabe dieser Werte ist vor allem die Überlegung wichtig, welche maximale Leistung (bzw. Füllung) von der Leitung der Maschine oder von der Inspektion der Reederei her als zulässig erachtet wird, da in den seltensten Fällen die volle Nennleistung ausgefahren wird.

Im Verlauf der Berechnung der Propulsion wird die Drehzahl beginnend mit der kleinst möglichen Drehzahl (z.B. 40% Nenndrehzahl) bis zum größtmöglichen Wert stufenweise varriert. Auf diese Weise kann man nicht nur die maximal erreichbare Geschwindigkeit (für maximale Füllung) sondern auch die Geschwindigkeiten im Teillastbereich ermitteln.

### 3.3. EIGENSCHAFTEN DES PROPELLERS

Unter den Eigenschaften des Propellers soll hier die Propellercharakteristik des freifahrenden Propellers im glatten Wasser, sowie sein Verhalten hinter dem Schiff, verstanden werden. Eine Änderung dieser Eigenschaften im Seegang kann leider zur Zeit noch nicht berücksichtigt werden, da hierüber noch keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen. Aus Messungen der Propulsionsdaten im Seegang z.B. [17] ist nicht eindeutig zu erkennen, ob sich der Propulsionswirkungsgrad im Seegang verschlechtert. Je nach Aufgabenstellung können folgende Fälle auftreten:

- a) Propellerdaten und Propellercharakteristik gegeben
- b) Propellerdaten gegeben, Propellercharakteristik muß berechnet werden
- c) Auslegungsbedingungen für Propeller gegeben, Optimalpropeller muß entworfen und Propellercharakteristik berechnet werden.

In den Fällen b) und c) erforderliche Rechnung erfolgt entweder mit Hilfe eines Auswahlprogramms auf der Grundlage systematischer Propellerserien (z.B. Wageningen Serie) oder mit Hilfe eines Programms zur Propellerberechnung nach der Traglinientheorie.

Die Propellerkennlinien im sog. Freifahrtendiagramm

$$K_T(J) \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4}$$
$$K_Q(J) \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D_p^5} \quad J = \frac{V_B}{n D_p}$$

können genau genug durch ein quadratisches Polynom angenähert werden:

$$K_T(J) = a_T + b_T J + c_T J^2$$

$$K_Q(J) = a_Q + b_Q J + c_Q J^2$$

Die Kennlinien brauchen also nur in 3 Punkten vorgegeben zu werden:

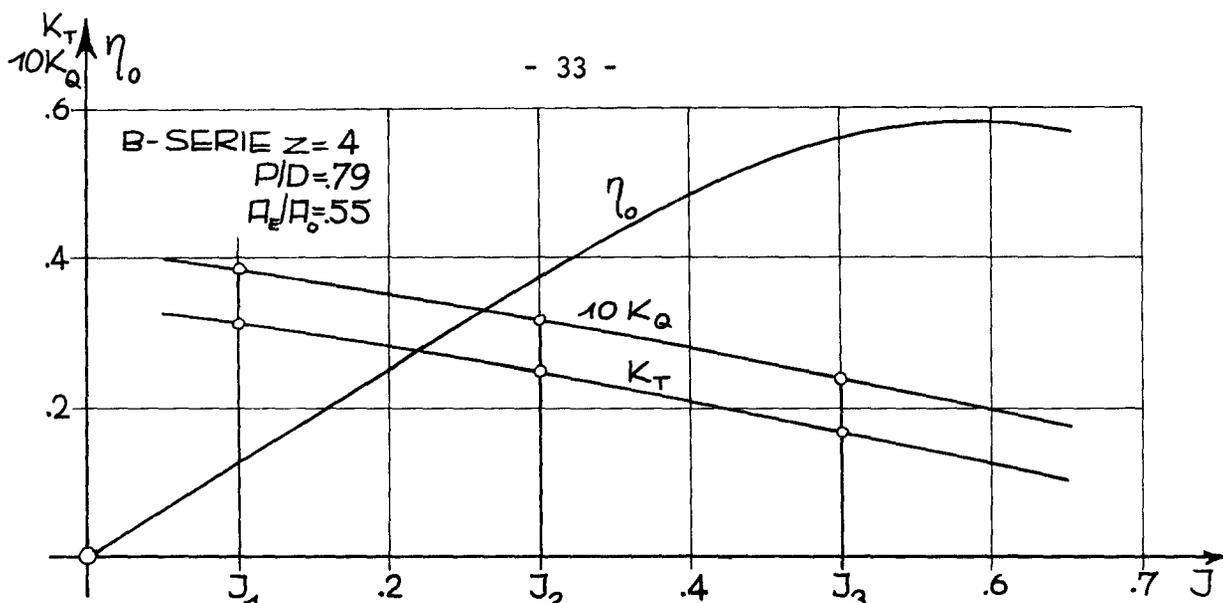


ABB. 17 PROPELLER - FREIFAHRTDIAGRAMM

wie bereits erwähnt (Abschn. 2.3.) wird hier keine zeitabhängige Verschlechterung der Motor- und Propellereigenschaften berücksichtigt. Sie kann mit zunehmendem Alter des Schiffes spürbare Werte erreichen [18] und sollte daher in die Rechnung aufgenommen werden, sobald ausreichende Daten zur Verfügung stehen.

Um die Eigenschaften des hinter dem Schiff arbeitenden Propellers und sein Zusammenwirken mit dem Schiff zu berechnen, müssen die Nachstromziffer  $w$ , die Sogziffer  $t$  und der Anordnungsgütegrad  $\eta_R$  bekannt sein. Diese Werte können entweder durch Interpolation zwischen Erfahrungswerten, ähnlich wie für die Restwiderstand, intern berechnet oder von außen eingegeben werden. Als Erfahrungswerte eignen sich die Diagramme von Harvald [19], die Nachstrom- und Sogziffer in Abhängigkeit von  $C_B$  und  $B/L$  darstellen. Für das  $D_p/L$ -Verhältnis wird eine Korrektur angegeben:

$$w(C_B, B/L, D_p/L) = w_0(C_B, B/L) + \Delta w(D_p/L)$$

$$t(C_B, B/L, D_p/L) = t_0(C_B, B/L) + \Delta t(D_p/L)$$

$$\Delta w(D_p/L) = .39 - 14.25(D_p/L) + 112.5(D_p/L)^2$$

$$\Delta t(D_p/L) = D_p/L - .04$$

Diese Werte werden als unabhängig von der Geschwindigkeit und den Dienstbedingungen angesehen.

#### 4. VERHALTEN DES SCHIFFES

Nachdem die Eigenschaften des Schiffes bzw. seiner Untersysteme bekannt sind, kann das Verhalten des Schiffes unter den herrschenden Umweltbedingungen bei Vorgabe beliebiger Werte für die Operationsparameter Kurs und Drehzahl berechnet werden. Zunächst wird das Zusammenwirken der Untersysteme im Hinblick auf die Propulsion betrachtet; wobei nach Geschwindigkeit und Leistung gefragt ist. Anschließend soll das Auftreten der wichtigsten die Sicherheit beeinträchtigenden Seegangseffekte vorausberechnet werden.

##### 4.1. GESCHWINDIGKEIT UND LEISTUNG

Für gegebene Umweltbedingungen und für einen bestimmten Kurs ist die Eigenschaft des Schiffes bestimmt durch die Gesamtwiderstand als Summe der Teilwiderstände über der Geschwindigkeit:

$$R_{TS} = R_{TC}(V) + R_{RW}(V, \mu_w) + R_{RS}(V, \tilde{\mu}_E)$$

SERVICE      CALM      WIND      SEA

Die Eigenschaft des Propellers war durch die Freifahrt-Kennlinien gegeben:

$$K_T(J) = a_T + b_T J + c_T J^2$$

$$K_Q(J) = a_Q + b_Q J + c_Q J^2$$

Zunächst werden die Wirkungen von Schiff und Propeller zusammengebracht. Hierzu wird der Schiffswiderstand in die Form des Schubbeiwerts gebracht:

$$K_{TS} = \frac{R_{TS}(V)/(1-t)}{\rho n^2 D_p^4}$$
$$= \frac{R_{TS}(V)}{V^2} \frac{1}{(1-t)\rho D_p^4} \left(\frac{V}{n}\right)^2$$

Der Schubbeiwert für Schiff und Propeller müssen gleich sein:

$$K_{TS} = \frac{R_{TS}(V)}{V^2} \frac{1}{(1-t)\rho D_p^4} \left(\frac{V}{n}\right)^2 = a_T + b_T J + c_T J^2$$

$$\left[ \frac{R_{TS}(V)}{V^2 (1-t)\rho D_p^4} - c_T \left(\frac{1-w}{D_p}\right)^2 \right] \left(\frac{V}{n}\right)^2 - b_T \frac{1-w}{D_p} \left(\frac{V}{n}\right) - a_T = 0$$

Für vorgegebene Werte  $V$  ist  $R_{TS}/V^2$  gegeben und damit kann die quadratische Gleichung in  $\left(\frac{V}{n}\right)$  gelöst werden. Das Ergebnis  $\left(\frac{V}{n}\right)_T$  über  $V$  erfüllt die Gleichgewichtsbedingung zwischen Schiff und Propeller. Der Kurvenverlauf ist sehr flach, da der Widerstand des Schiffes im wesentlichen quadratisch ansteigt.

Für jede Drehzahlstufe der Maschine  $n_R$  kann über  $V$  die Gerade  $\left(\frac{V}{n_R}\right)(V)$  gezeichnet werden, die mit der Kurve  $\left(\frac{V}{n}\right)_T$  zum Schnitt gebracht werden muß, damit auch das Zusammenwirken von Schiff, Propeller und Maschine gewährleistet ist.

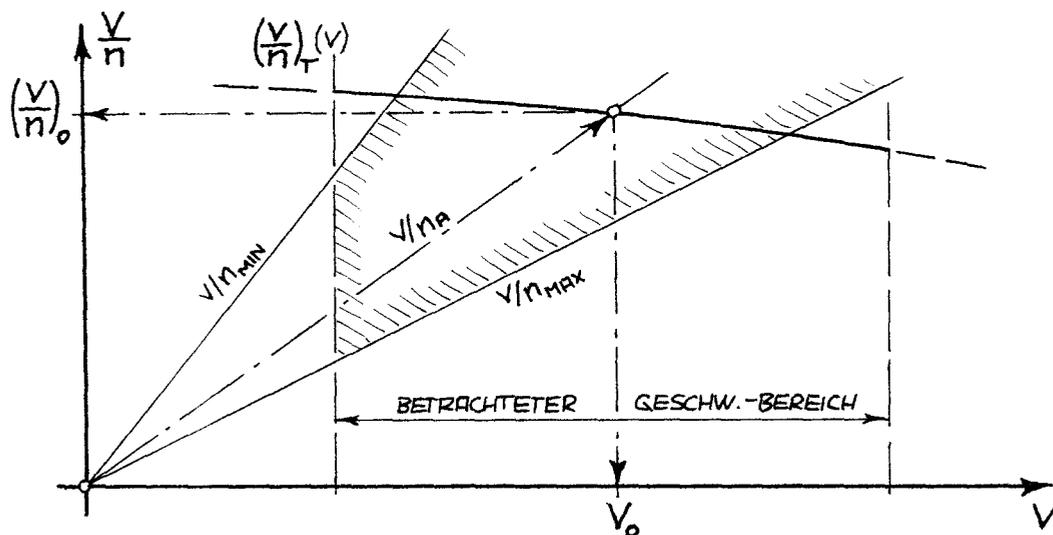


ABB. 18 BETRIEBSPUNKT  $V_0(n_R)$

Der Betriebspunkt  $V_0$  wird durch lineare Interpolation zwischen den  $\left(\frac{V}{n}\right)_T$  -werten zweier benachbarter Geschwindigkeiten berechnet.

Für  $\left(\frac{V}{n}\right)_0$  kann das Drehmoment aus der Propellerkennlinie ermittelt werden, dabei ist der Anordnungsgütegrad  $\eta_R$  zu berücksichtigen:

$$Q_0 = \frac{\rho n_R^2 D_p^5}{\eta_R} \left[ a_Q + b_Q \frac{1-w}{D_p} \left(\frac{V}{n}\right)_0 + c_Q \left(\frac{1-w}{D_p}\right)^2 \left(\frac{V}{n}\right)_0^2 \right]$$

Die Antriebsleistung am Propeller ist:

$$P_{D_0} = Q_0 2\pi n_R$$

und an der Maschine:

$$P_{S_0} = P_{D_0} / \eta_S$$

wenn der vorgegebene Geschwindigkeitsbereich nicht ausreicht, so muß für die höheren Drehzahlstufen der Betriebspunkt nicht durch Interpolation, sondern durch Extrapolation der Kurve  $(\frac{V}{n})_T(V)$  bestimmt werden, damit man in diesem Fall wenigstens eine grobe Näherung erhält.

wenn auf diese Weise ein Betriebspunkt gefunden worden ist, so muß geprüft werden, ob das erforderliche Motormoment  $Q_0$  vom Motor aufgebracht werden kann. Ist das nicht der Fall ( $Q_0 > Q_{MAX}(n)$ ), so kann durch lineare Interpolation zwischen den bereits berechneten Drehzahlstufen die maximal erreichbare Geschwindigkeit  $V_e$ , Drehzahl  $n_e$  und Leistung  $P_{S_e}$  über die Bedingung  $Q_0 = Q_{MAX}(n)$  gefunden werden.

Für die maximal erreichbare Geschwindigkeit muß man also zwei Bereiche unterscheiden:

1. Solange der Widerstandszuwachs gegenüber den Bedingungen im glatten Wasser klein ist (niedrige Windstärken oder See von achtern) ist die Geschwindigkeit durch die maximal zulässige Drehzahl  $n_{MAX}$  begrenzt ("drehzahlbegrenzter Bereich").
2. Bei größerem Widerstandszuwachs ist demgegenüber die Geschwindigkeit durch das maximal zulässige Motormoment begrenzt. Die Drehzahl fällt gegen Fall 1. ab ("drehmoment-begrenzter Bereich").

#### 4.2. GEFÄHRDENDE SEEGANGSEFFEKTE

Wie in der Einleitung angedeutet soll bei der Berechnung und Beurteilung gefährdender Seegangseffekte folgende halbempirische Methode angewandt werden. Aus den Bewegungseigenschaften des Schiffes werden für gegebene Seegangsbedingungen (Spektrum) und Operationsparameter (kurs, Geschwindigkeit) Häufigkeitswerte für das Eintreten gewisser gefährdender Ereignisse berechnet. Ohne die Auswirkungen dieser Ereignisse auf das Schiff näher zu untersuchen, wird eine Erträglichkeitsgrenze für diese Häufigkeiten vorgeschrieben, die nicht überschritten werden darf. Diese Häufigkeitsgrenzen können aus

beobachtungen oder Befragungen der Schiffsführung bei gleichzeitiger Registrierung der Bewegungen gewonnen werden.

Die im Seegang auftretenden Beanspruchungen der Struktur des Schiffskörpers sollen hier nicht in Betracht gezogen werden, da sie in der Regel beim Bau des Schiffes berücksichtigt sind und da sie nicht unmittelbar für die Schiffsführung in Erscheinung treten, auch nicht Anlaß zu einer Änderung der Operationsparameter sind.

#### 4.2.1. WASSER AN DECK

In Abschn. 3.1.3. war gezeigt worden, wie aus den Übertragungsfunktionen für Tauchen und Stampfen die Übertragungsfunktion für die Relativbewegung zwischen Wasser und Schiff berechnet wird. Hieraus kann die Frage beantwortet werden, wann die Relativbewegung die Größe des Freibords im Vorschiff erreicht, d.h. wann das Deck eintaucht, und damit "grünes Wasser" an Deck kommt.

Wie Tasai nachgewiesen hat [20], müssen für eine realistische Vorhersage des Ereignisses "Wasser an Deck" noch zwei Effekte berücksichtigt werden:

- a) durch die Bugwelle, wird der effektive Freibord verringert.
- b) Beim Eintauchen des Vorschiffes wölbt sich die Wasseroberfläche auf.

Die Bedingung für "Wasser an Deck" lautet hiernach:

$$S(t) > F_B - \zeta_0 - \zeta^*(t)$$

$S(t)$  ist die Relativbewegung zwischen Schiff und ungestörter Seegangskontur an einer kritischen Stelle im Vorschiff.

$F_B$  ist der Freibord an dieser Stelle

$\zeta_0$  ist die Höhe der Bugwelle.

Sie kann nach einer Näherungsformel von Kajitani [21], die auf einer theoretischen Berechnung des Wellenbildes für ein Mitchell-Schiff beruht, abgeschätzt werden:

$$\frac{\zeta_0}{L} = 0.7 F_N^2 \left(1 - e^{-1.4 \frac{T/L}{F_N^2}}\right) (\alpha_E + 1.25)$$

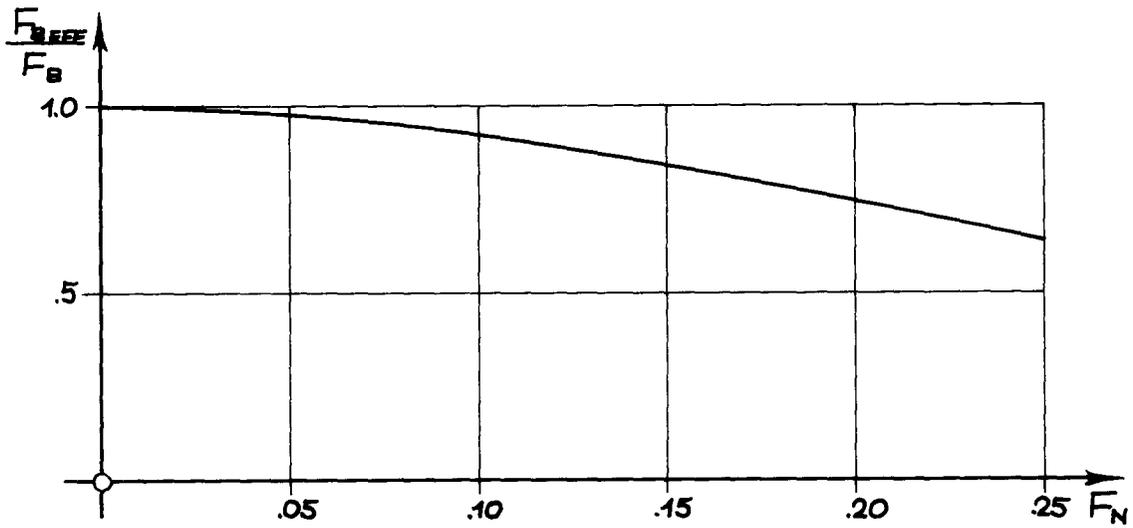


ABB. 19 VERRINGERUNG DES FREIBORDS DURCH DIE BUGWELLE [21]

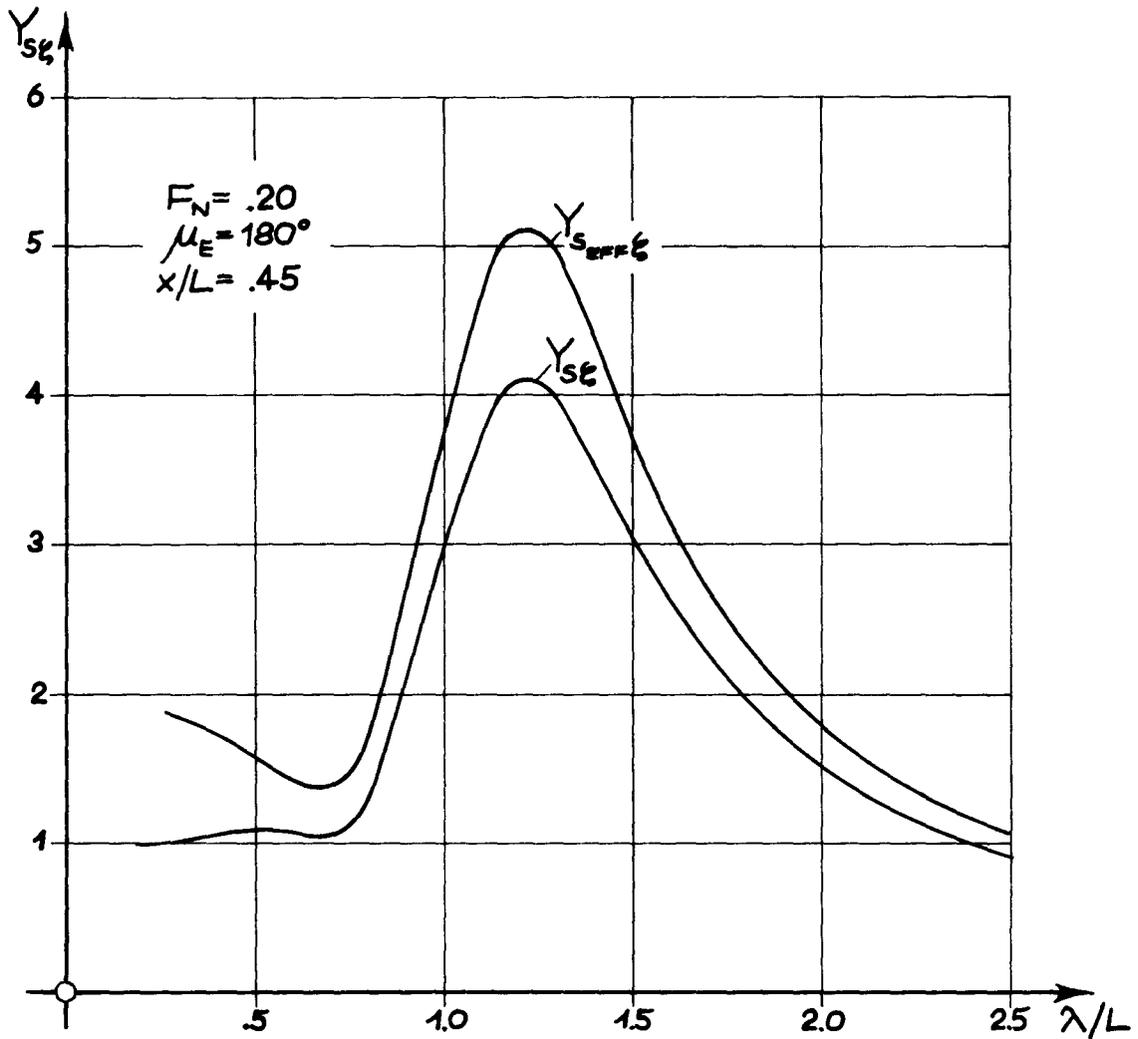


ABB. 20 RELATIVBEWEGUNG AM VORSCHIFF MIT UND OHNE AUFWÖLBUNG DER WASSEROBERFLÄCHE [20]

$\xi_0$  ist also von  $T/L$ ,  $\alpha_E$  (Eintrittswinkel der Wasserlinie) und  $F_n$  abhängig, die wichtigsten Einflußgrößen werden also erfaßt. Der angegebene Wert gibt für das Maximum der Bugwelle, das etwa  $L/20$  hinter  $FP$ , also etwa in dem für "Wasser an Deck" betrachteten Bereich liegt. Abb. 19 zeigt den Einfluß der Bugwellenhöhe über der Froudezahl.

$\xi^*(t)$ , die bewegungsabhängige Aufwölbung der Wasseroberfläche ist von Tasai [20] aus Messungen als Funktion der relativgeschwindigkeit ermittelt worden:

$$\xi^*(t) = k \omega_e S(t)$$

$$k = \frac{1}{3} (C_B - 0.45) \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Somit kann die Bedingung für "Wasser an Deck" folgendermaßen geschrieben werden:

$$S(t) [1 + k \omega_e] > F_B - \xi_0$$

$$S_{EFF}(t) > F_{B EFF}$$

Den Einfluß der Aufwölbung auf die Übertragungsfunktion der Relativbewegung  $Y_{s\ell}$  zeigt Abb. 20.

Um dieses Kriterium auf den unregelmäßigen Seegang anwenden zu können, muß das Spektrum für  $S_{EFF}$  nach der in Abschn. 3.1.3. beschriebenen Methode berechnet, und zur Bestimmung der Momente integriert werden. Soll die Häufigkeit für "Wasser an Deck" bestimmt werden, so bieten sich mehrere Möglichkeiten:

- a) Bestimmung des Zeitanteils an der Gesamtzeit, für die  $S_{EFF}(t) > F_{B EFF}$ . Dieser Wert könnte ein Maß für die Menge des an Bord kommenden Wassers bilden. Er ergibt sich durch Integration der Normalverteilung der Zeitfunktion  $S_{EFF}(t)$ .
- b) Bestimmung des Anteils der Maxima von  $S_{EFF}(t)$  die größer als  $F_{B EFF}$  sind, an der Gesamtzahl der Maxima von  $S_{EFF}(t)$ . Diese ergibt sich durch Integration der Rayleigh-Verteilung.

- c) Bestimmung der mittleren Frequenz mit der das unter b) gekennzeichnete Ereignis eintritt.

Hier soll die mittlere Frequenz nach c) benutzt werden, da sie ein anschauliches Maß darstellt, und da hierfür bereits einige Erfahrungswerte aus der Literatur bekannt sind.

Die Häufigkeit der Maxima nach b) hat den Wert

$$p_{WET} = e^{-\frac{F_{B\text{EFF}}^2}{2m_{0\text{SEFF}}}}$$

Mit der mittleren Frequenz für die Relativbewegung  $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2\text{SEFF}}}{m_{0\text{SEFF}}}}$  kann die mittlere Frequenz für das Ereignis  $S_{\text{EFF\_MAX}} > F_{B\text{EFF}}$  bestimmt werden:

$$n_{WET} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2\text{SEFF}}}{m_{0\text{SEFF}}}} e^{-\frac{F_{B\text{EFF}}^2}{2m_{0\text{SEFF}}}}$$

Die Anzahl der Ereignisse "Wasser an Deck" die von der Schiffsführung toleriert wird, hängt -von subjektiven Einflüssen abgesehen- vor allem von der Art des Schiffes (Art der Verschlüsse von Decksöffnungen, Aufbauten ect.) ab. Die Grenze zwischen Gischt und "Grünem Wasser" an Deck liegt nach Aertssen [22] bei  $n_{WET}/n_{PITCH} = 2/100$  und die Grenze über der schwere Brecher an Deck kommen bei  $n_{WET}/n_{PITCH} = 5/100$

#### 4.2.2. SLAMMING

Unter Slamming sollen hier nur die schweren Bodenstöße verstanden werden. Nach Aertssen [22] kann zwischen leichteren Schlägen (pounding), - die wie fernes Gewitter klingen- und schweren Stößen (slams) - die wie Kanonenschüsse klingen- unterschieden werden.

Für die Definition eines Bodenstoßes liegen eine Reihe von Vorschlägen vor, die in zwei Gruppen geteilt werden können. Eine Gruppe betrachtet die Auswirkung eines Stoßes:

- a) Beschleunigungsspitze im Vorschiff.
- b) Druckspitze am Vorschiffboden
- c) Spannungsspitze (whipping-stress) im Hauptspant.

Die zweite Gruppe befaßt sich nur mit der Kinematik der Bewegungen, und definiert die Bedingungen, die zu einem Stoß führen:

- d) Boden im Vorschiffsbereich taucht aus.
- e) Vorschiffsboden taucht zunächst aus und schlägt mit einer gewissen überkritischen Relativgeschwindigkeit auf der Wasseroberfläche auf.
- f) Vorschiffsboden taucht zunächst aus und der Relativwinkel zwischen Kiel und Wasseroberfläche ist beim Wiedereintauchen kleiner/gleich Null.

Da die dynamischen Auswirkungen eines Bodenstoßes noch nicht ausreichend geklärt sind, kommt hier nur ein Kriterium der zweiten Gruppe in Betracht.

Das Kriterium d) reicht im allgemeinen nicht aus. Von Ochi [23] stammt der Vorschlag, eine weitere einschränkende Bedingung für die Relativgeschwindigkeit hinzuzunehmen. Hierfür wird von Ochi der Wert  $|\dot{S}_{\text{KRIT}}| = 3.7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  genannt. Allerdings stellt Aertssen [22] durch Vergleich mit Bordmessungen fest, daß die Rechnung nach Ochi zu große Slam-Häufigkeiten liefert. Er schlägt vor, die kritische Geschwindigkeit zu erhöhen.

Dagegen hat das Kriterium f) [24] den Vorteil, ohne Definition einer kritischen Relativgeschwindigkeit auszukommen. Die Bedingung für den Relativwinkel  $S' \leq 0$  beim Wiedereintauchen  $\dot{S} < 0$  impliziert die Beschränkung auf große Relativgeschwindigkeiten. Außerdem kann aus dieser Bedingung geschlossen werden, daß während des Eintauchvorgangs hinter der betrachteten Stelle  $X_{\text{SLAM}}$  der Boden die gleiche Richtung wie die Wasseroberfläche erreicht, ein Vorgang, der wahrscheinlich zu schweren Stößen führt. Das Kriterium f) führt zu einer geringeren Slam-Häufigkeit als das von Ochi. Es soll daher hier benutzt werden.

Die Übertragungsfunktionen für die Komponenten der Relativbewegung waren in Abschn. 3.1.3. angegeben worden.

$$Y_{rSE} = Y_{rZ_0E} + X_{\text{SLAM}} Y_{r\theta E} - \cos(\alpha X_{\text{SLAM}} \cos \mu_E)$$

$$Y_{iSE} = Y_{iZ_0E} + X_{\text{SLAM}} Y_{i\theta E} + \sin(\alpha X_{\text{SLAM}} \cos \mu_E)$$

Die Übertragungsfunktionen für die Relativgeschwindigkeit lauten:

$$Y_{r\dot{s}_E} = -\omega_E Y_{i\dot{s}_E}$$

$$Y_{i\dot{s}_E} = +\omega_E Y_{r\dot{s}_E}$$

Für den Relativwinkel lauten sie:

$$Y_{r\dot{s}'_E} = Y_{r\dot{s}_E} + (\alpha \cos \mu_E) \sin(\alpha x_{SLAM} \cos \mu_E)$$

$$Y_{i\dot{s}'_E} = Y_{i\dot{s}_E} + (\alpha \cos \mu_E) \cos(\alpha x_{SLAM} \cos \mu_E)$$

Um Häufigkeitsaussagen für den unregelmäßigen Seegang machen zu können, müssen die Momente der Spektren  $S_s, S_{\dot{s}}, S_{s'}$  und der Kreuzspektren  $S_{s's}, S_{\dot{s}s}, S_{s's'}$  ermittelt werden (Tick [33]).

Durch Integration der dreidimensionalen Verteilungsdichte  $f$  für den Bewegungszustand:

$$\begin{pmatrix} s \\ \dot{s} \\ s' \end{pmatrix} \text{ über das Gebiet: } \begin{pmatrix} s = T_{SLAM} \\ \dot{s} \leq 0 \\ s' \leq -\Delta\theta \end{pmatrix} \text{ ergibt sich}$$

schließlich die mittlere Frequenz für das Eintreten des Ereignisses "schwerer Stoß":

$$\begin{aligned} n_{SLAM} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{o\dot{s}}}{m_{os}}} e^{-\frac{T_s^2}{2m_{os}}} \phi \left[ -\sqrt{\frac{D_{m's's'}}{D_m}} \left( \Delta\theta + T_s \frac{m_{o's's'}}{m_{os}} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{2\pi} \frac{m_{o\dot{s}s'}}{\sqrt{D_{m\dot{s}s}}} e^{-\frac{1}{2D_{m\dot{s}s}} (\Delta\theta^2 m_{os} + 2\Delta\theta T_s m_{o's's'} + T_s^2 m_{o's'})} \\ &\cdot \phi \left[ \frac{m_{o\dot{s}s'}}{\sqrt{D_{m\dot{s}s} D_m}} (\Delta\theta m_{os} + T_s m_{o's's'}) \right] \end{aligned}$$

mit den Determinanten:

$$D_m = m_{os} m_{o\dot{s}} m_{o's'} - m_{o\dot{s}} m_{o's's'}^2 - m_{os} m_{o's'}^2 \dot{s}$$

$$D_{m_{\dot{s}s}} = m_{os} m_{o's'} - m_{o's's'}^2$$

$$D_{m_{s's'}} = m_{os} m_{o\dot{s}}$$

und ferner:

- $\Phi$  Gauß'sche Fehlerfunktion
- $T_S$  Tiefgang an der betrachteten Stelle  $X_{SLAM}$   
im Vorschiff ( $X_{SLAM} = (0.4 \div 0.5)L$ )
- $\Delta\Theta$  Trimwinkel des Schiffes am Kiel

Die maximale Anzahl von Slam-Stößen, die von einem "Durchschnitts"-Kapitän toleriert werden, beträgt nach Aertssen:

$$\frac{n_{SLAM,MAX}}{n_{PITCH}} = \frac{1 \div 3}{100} \left( \approx \frac{1}{200} \text{ Schwere Stöße} \right)$$

Ein "waghalsiger" Kapitän nimmt demgegenüber

$$\frac{n_{SLAM,MAX}}{n_{PITCH}} = \frac{3 \div 5}{100} \left( \approx \frac{1}{100} \text{ Schwere Stöße} \right)$$

an.

Diese Werte sind auf die mittlere Stampffrequenz bezogen:

$$n_{PITCH} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2\theta}}{m_{0\theta}}}$$

#### 4.2.3. PROPELLERDURCHGANGEN

Unter Propellerdurchgängen (racing) soll die im Seegang auftretende plötzliche Entlastung des Propellers verstanden werden, die dazu führt, daß sich die Drehzahl erhöht, bzw. daß der Drehzahlregler stark beansprucht wird. Tritt dieser Effekt zu häufig auf, so veranlaßt die Leitung der Maschinenanlage eine Geschwindigkeitsreduzierung. Aertssen [22] definiert Racing für die Fälle, in denen kurzzeitig das Drehmoment um mehr als ca. 25 % abfällt.

Die Verhältnisse eines nahe an der Oberfläche freifahrenden Propellers sind von Gutsche untersucht worden [25]. Hieraus ist zu entnehmen, daß ein starker Wirkungsgrad- bzw. Leistungsabfall (verbunden mit einem Drehmomentabfall) etwa dann eintritt, wenn die Propellerblattspitzen an die Oberfläche kommen ( $h/D_p \leq 0.5$ ).

Aus Abb. 21 ist zu erkennen, daß dieser Effekt nur geringfügig vom Schubbelastungsgrad abhängt. Eine Untersuchung dieses Einflusses am hinter dem Schiff arbeitenden Propeller [26] führt auf ähnliche Werte. Hier muß angenommen werden, daß die Verhältnisse bei der Vertikalbewegung des Hecks im Seegang ähnlich sind. Eine Berücksichtigung solcher Einflüsse wie die Höhe der Heckwelle würde sich nur lohnen, wenn man auch die Deformation des Seeganges durch das Schiff beachten würde (van Sluijs [35]).

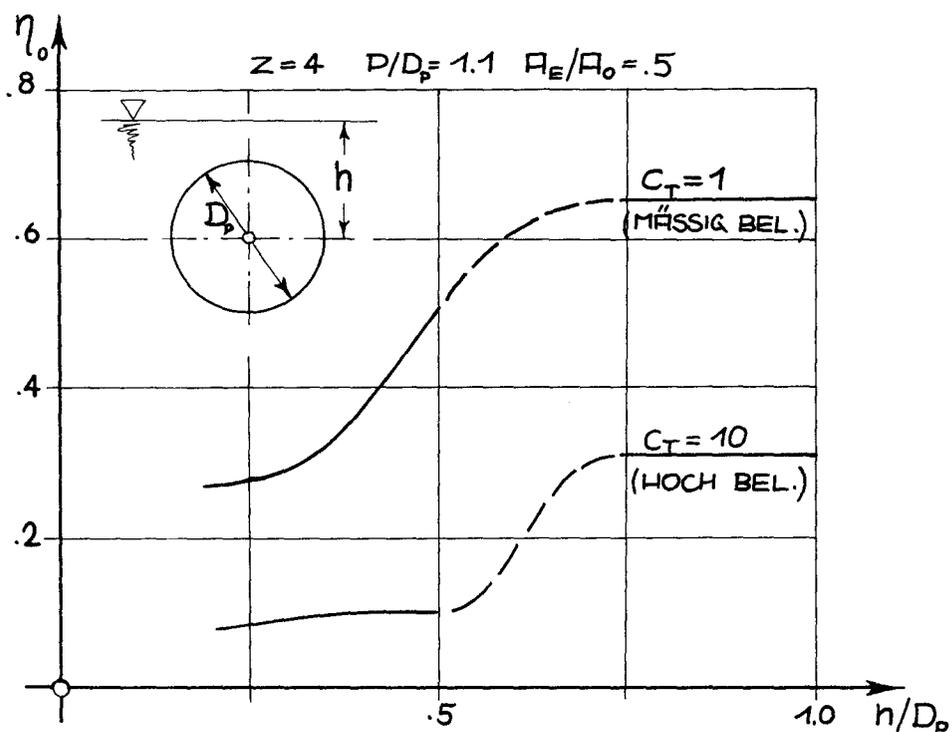


ABB. 21 PROPELLERWIRKUNGSGRAD ABHÄNGIG VON DER TAUCHUNG [25]

Aus der Übertragungsfunktion für die Relativbewegung am Ort des Propellers können wie beim Problem "Wasser an Deck" das Bewegungsspektrum und seine Momente berechnet werden. Die mittlere Frequenz für das Ereignis "Propeller taucht aus" ist dann:

$$\eta_{RACE} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2 s}{m_0 s}} e^{-\frac{T_{PEFF}^2}{2m_0 s}}$$

$T_{PEFF}$  wird also gleich dem Abstand zwischen Wasseroberfläche und Propellerkreis gesetzt:

$$T_{PEFF} = h - \frac{D_p}{2}$$

#### 4.2.4. BESCHLEUNIGUNG

Für das Schiff und vor allem die Ladung kann eine Gefährdung durch zu große Vertikalbeschleunigungen eintreten. Zur Berechnung werden wieder nur die Funktionen  $Y_{rz\epsilon}$  und  $Y_{iz\epsilon}$  für Taugen und Stampfen benötigt. Die Übertragungs-

$$Y_{rz\epsilon}(x) = Y_{rz_0\epsilon} + \alpha \times Y_{r0\epsilon}$$

$$Y_{iz\epsilon}(x) = Y_{iz_0\epsilon} + \alpha \times Y_{i0\epsilon}$$

$$|Y_{z\epsilon}(x)| = \sqrt{Y_{rz\epsilon}^2 + Y_{iz\epsilon}^2}(x)$$

diejenigen für die Beschleunigung lauten:

$$|Y_{\ddot{z}\epsilon}(x)| = \omega_E^2 |Y_{z\epsilon}(x)|$$

mit  $\omega_E = \omega - \frac{\omega^2}{2} V \cos \mu_E$  (Begegnungsfrequenz)

Damit läßt sich das Beschleunigungsspektrum und dessen Moment  $m_{0\ddot{z}}$  berechnen. Legt man eine Rayleigh-Verteilung für die Maxima zugrunde, so ist die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten einer Beschleunigung  $\ddot{z}^*$

$$p(\ddot{z} > \ddot{z}^*) = e^{-\frac{\ddot{z}^{*2}}{2m_{0\ddot{z}}}}$$

Hier soll aber, der Anschaulichkeit wegen, umgekehrt unter Vorgabe der Wahrscheinlichkeit  $p$  die Beschleunigung errechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit wird z.B. mit  $p=10^{-5}$  gewählt. Der zugehörige Grenzwert der Beschleunigung ist dann:

$$\ddot{z}^* = \sqrt{-2m_{0\ddot{z}} \ln(p)}$$

#### 4.2.5. ROLLRESONANZ

Das Problem Rollbewegung im Hinblick auf die Schiffssicherheit ist, wie bereits erwähnt, vor allem ein Stabilitätsproblem. Eine Einbuße an Bewegungsvermögen wirkt sich aber in der Regel erst dann aus, wenn die Bewegungen durch die Anfachung des Seeganges sehr groß sind. Im Rahmen dieser Aufgabenstellung genügt es daher, zu untersuchen, wann große Rollamplituden auftreten können. Diese Bedingung ist gegeben, wenn die Begegnungsperiode maximaler Seegangsenergie innerhalb einer Toleranz  $\Delta T$  mit der Rolleigenperiode des Schiffes zusammenfällt. Wegen der in achterlicher See auftretenden periodischen Stabilitätsschwankung [27] kann auch in Fällen, in denen die Begegnungsperiode ein ganzzahliges Vielfaches der halben Eigenperiode beträgt, Resonanz eintreten:

$$T_{EM} = \frac{n}{2} T_{0\varphi} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

mit  $T_{EM} = 2\pi / \omega_{EM}$  (Begegnungsperiode)

$$\omega_{EM} = \omega_M - \frac{\omega}{g} M V \cos \tilde{\mu}_E$$

$\omega_{EM}$  = Begegnungsfrequenz  
 entsprechend der Seegangsfrequenz  $\omega_M$   
 maximaler Energie (Modalwert des Spektrums)

Die Beziehung zwischen Modalwert  $T_M = \omega_M / (2\pi)$  des Spektrums und Windgeschwindigkeit, bzw. beobachteter Seegangsperiode war in Abschn. 2.2. behandelt worden.

Die Rolleigenperiode kann nach der bekannten Formel abgeschätzt werden:

$$T_{0\varphi} = \frac{2\pi}{\omega_{0\varphi}} = \frac{i_B}{\sqrt{gGM}} \quad \frac{i_B}{B} = (.35) \cdot 38 \div .42 (.45)$$

Die Sicherheitsforderung wird derart formuliert, daß in einem Seegang ausreichender Stärke alle Fahrtzustände (Kurs, Geschwindigkeit) bei denen "Resonanz" auftreten kann, gemieden werden sollen [Abb 22].

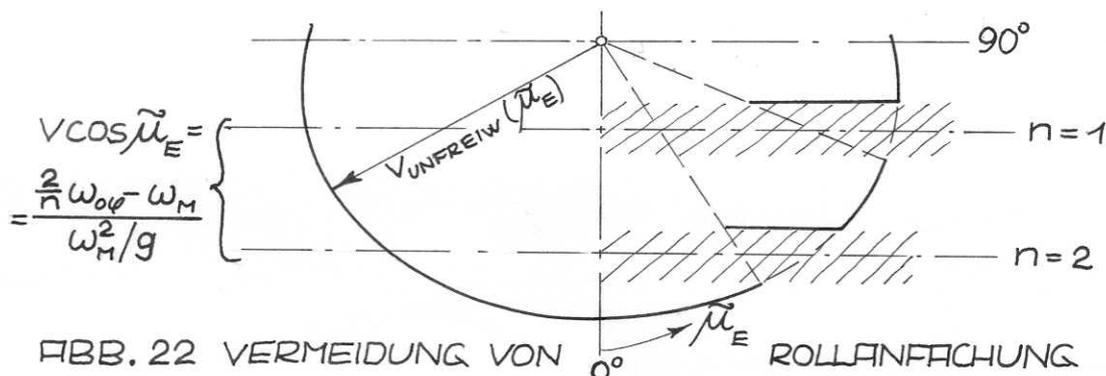


ABB. 22 VERMEIDUNG VON ROLLANFACHUNG

### 4.3. GESCHWINDIGKEITSGRENZEN

Die Grenze der zulässigen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Kurs und Seegangstärke ergibt sich aus der Einhüllenden der Linien gleicher vorgeschriebener Häufigkeiten für "Wasser an Deck", "Slamming" und "Propellerdurchgehen" bzw. gleicher vorgegebener Beschleunigung. Diese Linien können durch Interpolation zwischen den für die vorgegebenen Geschwindigkeitsstufen berechneten Häufigkeitswerten gefunden werden. Auf die gleiche Weise kann man eine Grenze zulässiger Kurse bei gegebener Geschwindigkeit festlegen.

Dort, wo diese Begrenzung eine strengere Bedingung als die durch die Propulsion gegebene darstellt, liegt der "bewegungs-begrenzte" Bereich.

Aus den in Abschn. 4.1. berechneten Propulsionswerten können die zu der Geschwindigkeitsgrenze gehörenden Werte für Drehzahl und Leistung ermittelt werden.

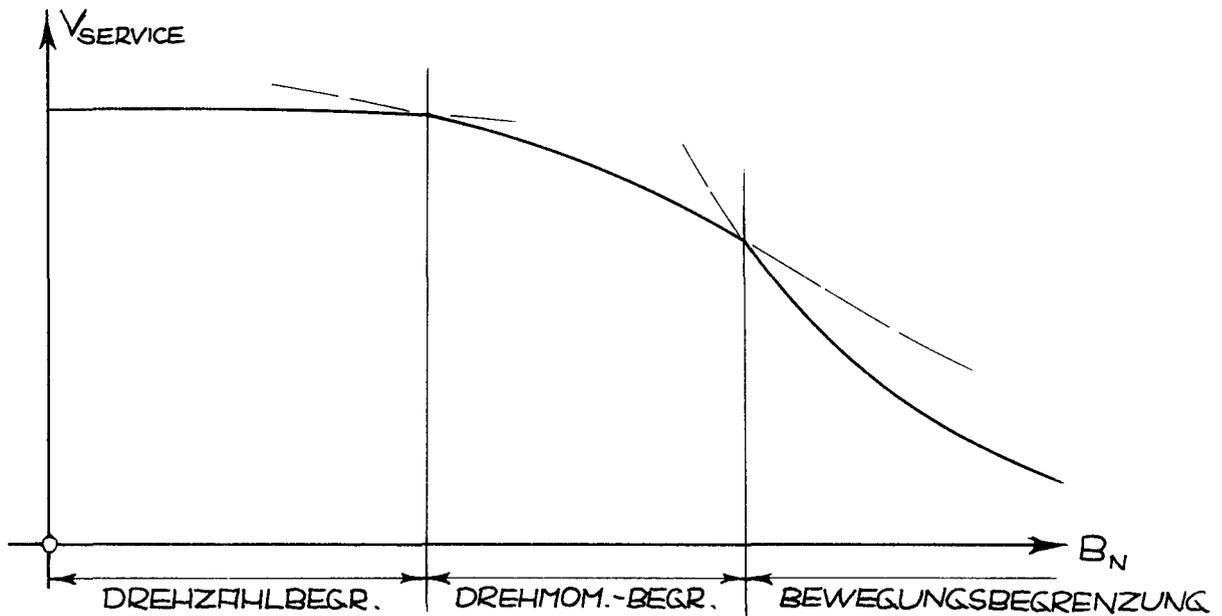


ABB. 23 BEREICHE DER GESCHWINDIGKEITS-BEGRENZUNG

#### 4.4. LANGZEITVERHALTEN

Die bisher beschriebenen Ergebnisse für Geschwindigkeit und zugehörige Leistung sind Funktionen der Seegangsstärke und des Kurses relativ zur See. Sie enthalten noch keine Aussage über das Verhalten in einem bestimmten Seegebiet bei vorgegebenen rechtweisenden Kursen des Schiffes ; es sind kurzeitaussagen für stationäre Seegänge abhängig vom Kurs zur See.

Um zum Langzeitverhalten zu kommen, werden zusätzlich statistische Angaben über die Häufigkeitsverteilung der Seegänge und ihrer mittleren Laufrichtung im betrachteten Seegebiet und die Verteilung der Kurse auf der Route des Schiffes benötigt.

##### 4.4.1. VERTEILUNG DER SEEGANGE

In den meisten Seegebieten ist die Verteilung der beobachteten Seegangslaufrichtungen  $f_{\mu}(\tilde{\mu})$  statistisch kaum abhängig von der Verteilung  $f_2(\tilde{E}_w, \tilde{T})$  der beobachteten Seegangsperioden  $\tilde{T}$  und Wellenhöhen  $\tilde{E}_w$ . Unter dieser Voraussetzung läßt sich die dreidimensionale Verteilung  $f_3(\tilde{E}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu})$  mit guter Näherung darstellen durch das Produkt der zweidimensionalen Verteilung mit der eindimensionalen Richtungsverteilung:

$$f_3(\tilde{E}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu}) = f_2(\tilde{E}_w, \tilde{T}) \cdot f_{\mu}(\tilde{\mu})$$

Für das Seeverhalten des Schiffes muß dabei nur noch die Seegangslaufrichtung  $\tilde{\mu}$  auf das schiffsfeste Koordinatensystem unter dem Kurswinkel  $\psi$  transformiert werden und erscheint dann als mittlerer Begegnungswinkel  $\tilde{\mu}_E$ .

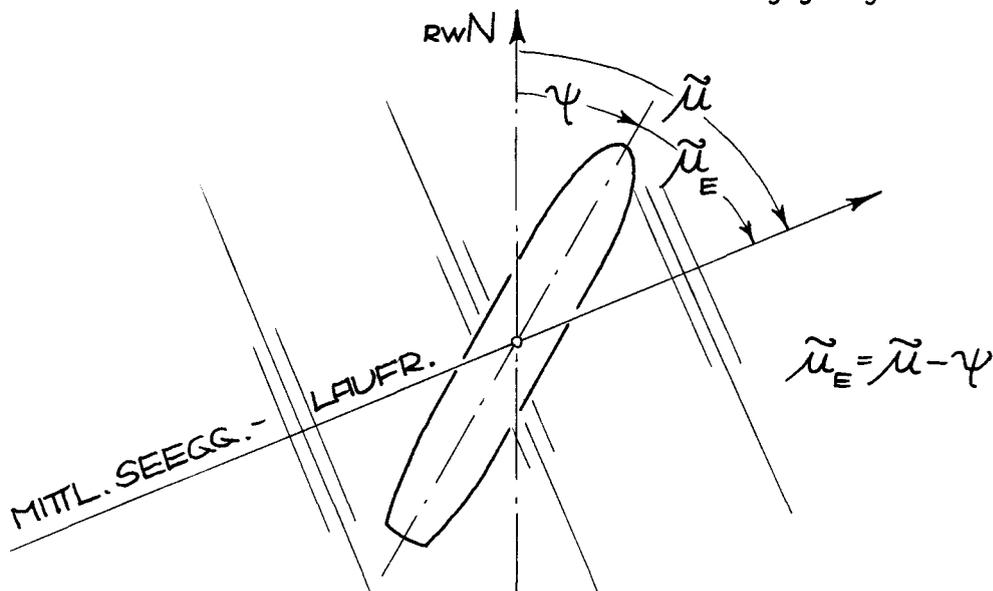


ABB. 24 WINKELDEFINITION

Der Schiffskurs in einem Seegebiet wird dabei durch eine Kursverteilung  $f_{\psi}(\psi)$  dargestellt. Unter der Voraussetzung, daß Kurs  $\psi$  unabhängig von der Seegangslaufrichtung  $\tilde{\mu}$  gewählt wird, entsteht die Verteilung der Begegnungswinkel  $\tilde{\mu}_E$  durch Faltung der Verteilung von  $\psi$  und  $\tilde{\mu}$  :

$$f_1(\tilde{\mu}_E) = \int_{-\pi}^{\pi} f_{\mu}(\tilde{\mu}) [f_{\psi}(\tilde{\mu} - \tilde{\mu}_E) + f_{\psi}(\tilde{\mu} + \tilde{\mu}_E)] d\tilde{\mu} \quad | \quad 0 < \tilde{\mu}_E < \pi$$

dabei ist berücksichtigt, daß die Antwort des Schiffes unabhängig davon ist, ob es von Backbord oder von Steuerbord durch die See getroffen wird.

Damit wird die dreidimensionale Verteilung der Seegangparameter die ein Schiff auf einer Route antrifft angenähert durch:

$$f_3(\tilde{\mathcal{E}}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu}_E) = f_2(\tilde{\mathcal{E}}, \tilde{T}) \cdot f_1(\tilde{\mu}_E)$$

#### 4.4.2. VERTEILUNG VON GESCHWINDIGKEIT UND LEISTUNG ÜBER GROSSE ZEITRÄUME

Die mittlere Geschwindigkeit und entsprechend auch die mittlere Leistung läßt sich dadurch errechnen, daß die vorher ermittelten seegangsabhängigen Kurzzeitwerte mit den Wahrscheinlichkeiten gewichtet werden, mit denen die jeweils zugehörigen Seegangparameter  $\tilde{\mathcal{E}}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu}_E$  im zugrundegelegten Seegebiet beobachtet wurden. Das Integral ( oder die Summe) über alle zu erwartenden Seegangparameter ist dann der Mittelwert über lange Zeit:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} v(\tilde{\mathcal{E}}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu}_E) \cdot f_3(\tilde{\mathcal{E}}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu}_E) d\tilde{\mu}_E d\tilde{T} d\tilde{\mathcal{E}}$$

$$\bar{P} = \int \int \int P(\tilde{\mathcal{E}}_w, \tilde{T}, \tilde{\mu}_E) \cdot f_3(\tilde{\mathcal{E}}, \tilde{T}, \tilde{\mu}_E) d\tilde{\mu}_E d\tilde{T} d\tilde{\mathcal{E}}$$

Bisher ist vorausgesetzt, daß immer der Sollkurs gefahren wird und eventuelle freiwillige Maßnahmen nur in Geschwindigkeitsverringerungen bestehen. Besonders bei Fahrt gegen die See können aber Kursänderungen günstig sein, Das kann dadurch berücksichtigt werden, daß statt mit der erreichbaren (oder zulässigen) Geschwindigkeit auf dem Sollkurs mit der Zielgeschwindigkeit für "Kreuzen" um den Sollkurs gerechnet wird.

diese Zielgeschwindigkeit ergibt sich aus einer Tangente an die Polaren-  
darstellung der erreichbaren Geschwindigkeit, die die Einbuchtung für  
vorlichen Seegang abschneidet.

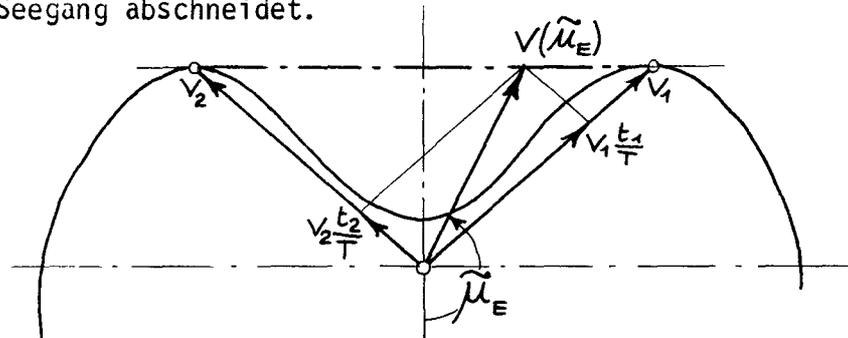


ABB. 25 KREUZEN GEGEN DIE SEE

So sind die Mittelwerte von Geschwindigkeit und Antriebsleistung abzuschätzen,  
mit denen über lange Zeiträume in einem bestimmten Seegebiet und bei der  
zugrundegelegten Kursverteilung zu rechnen ist.

Die Langzeitverteilungen für die Geschwindigkeit und die Leistung wie  
auch die zugehörige zweidimensionale Verteilung wird durch eine Klassierung  
ermittelt.

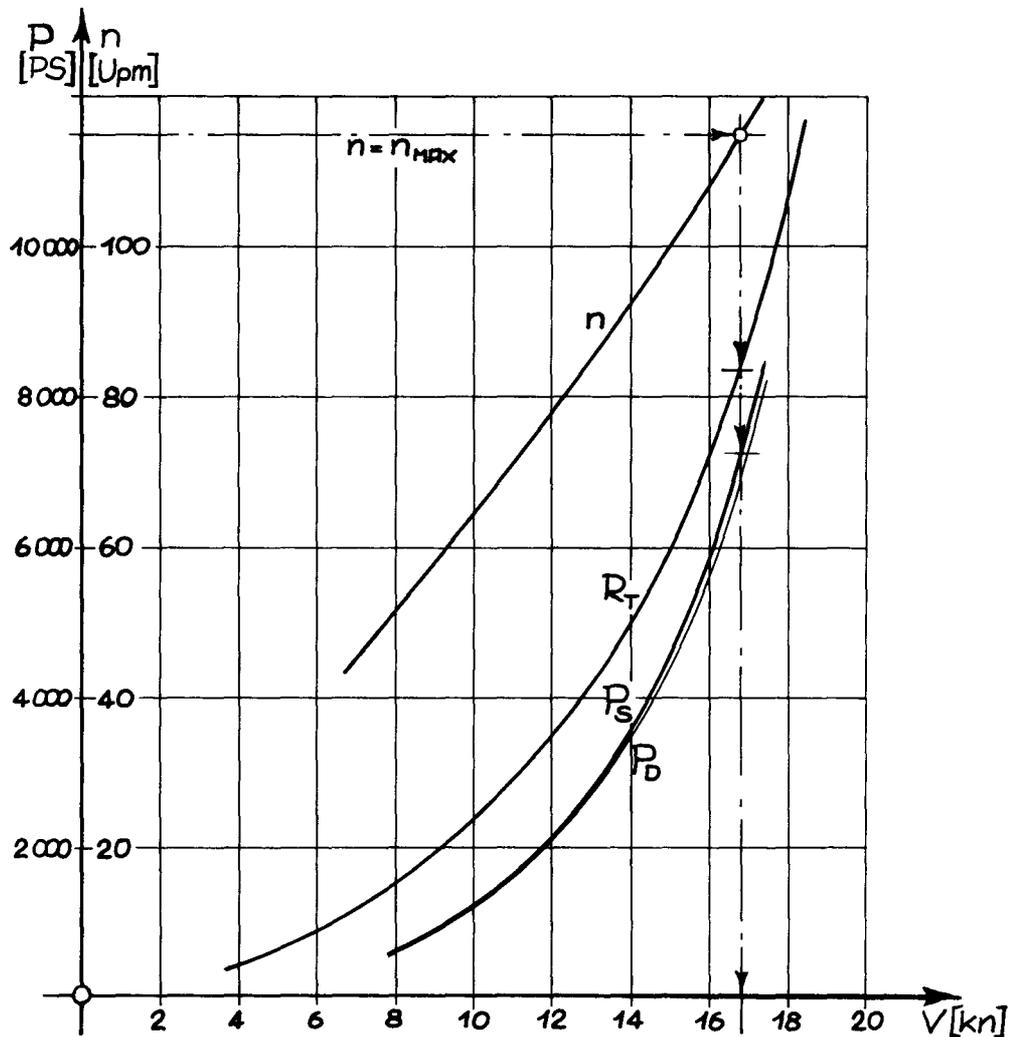


ABB. 26 WIDERSTAND, DREHZAH, LEISTUNG UND  
GESCHWINDIGK. UNTER PROBEFAHRTSBED.

## 5. ERGEBNISSE

Für ein Beispielschiff werden Ergebnisse dargestellt, die mit dem geschilderten Programm gewonnen wurden. Bei dem gewählten Schiff handelt es sich um das Motorschiff "Jordaens", welches auch der Untersuchung von Aertssen [28] zugrunde liegt. Die beiden Ergebnisse beziehen sich, soweit sie schiffsabhängig sind, auch auf dieses Motorschiff mit folgenden Hauptabmessungen:

$L_{pp}$	=	146.15 m
$B$	=	20.10 m
$D$	=	12.35 m
$T$	=	8.50 m

### 5.1. DIREKTE AUSWIRKUNGEN VON UMWELTEINFLÜSSEN AUF DIE GESCHWINDIGKEIT

In diesem Abschnitt sollen die geschwindigkeitshemmenden Einflüsse behandelt werden, die unvermeidlich sind, sie führen zu einer "unfreiwilligen" Geschwindigkeitsreduktion.

In Abb. 26 werden zunächst die Verhältnisse unter Probefahrtbedingungen dargestellt. Das Bild zeigt den Gesamtwiderstand  $R_T$  einschließlich Fahrtwindeinfluß, die Drehzahl  $n$  sowie die Leistung  $P_D$  am Propeller, bzw.  $P_S$  an der Maschine, über der Geschwindigkeit. Für die Maschine wurde eine maximale Leistung  $P_{S\text{MAX}} = 8100\text{PS}$  bei  $n_{\text{MAX}} = 115\text{ Upm}$  zugrunde gelegt. Weitere benutzte Daten neben dem in Abb. 17 gezeigten Propellerfreifahrtprogramm sind:

Nachstromziffer	$w$	=	0.308
Sogziffer	$t$	=	0.205
Gütegrad der Anordnung	$R$	=	1.035
Wirkungsgrad der Wellenleitung	$S$	=	0.98

Diese Werte wurden für alle folgenden Rechnungen konstant gehalten. Als Betriebspunkt unter Probefahrtbedingungen ergibt sich für eine Leistung  $P_S = 7200\text{ PS}$  bei  $V = 16.8\text{ kn}$ .

Die folgende Abb. 27 zeigt wie Abb.15, aber in anderer Form, die Übertragungsfunktionen für die Widerstandserhöhung bei einer Geschwindigkeit von  $V = 7,57 \text{ m/s} \cong 14,7 \text{ kn}$  entsprechend einer Froude-Zahl  $F_N = 0,2$ . Sie ist durch Höhenlinien als "Gebirge" über den als Polarkoordinaten aufgetragenen Parametern Wellenlänge  $\lambda/L$  und Begegnungswinkel  $\mu_E$  dargestellt. Die Abb.15 enthält also die radialen Schnitte durch dieses "Gebirge".

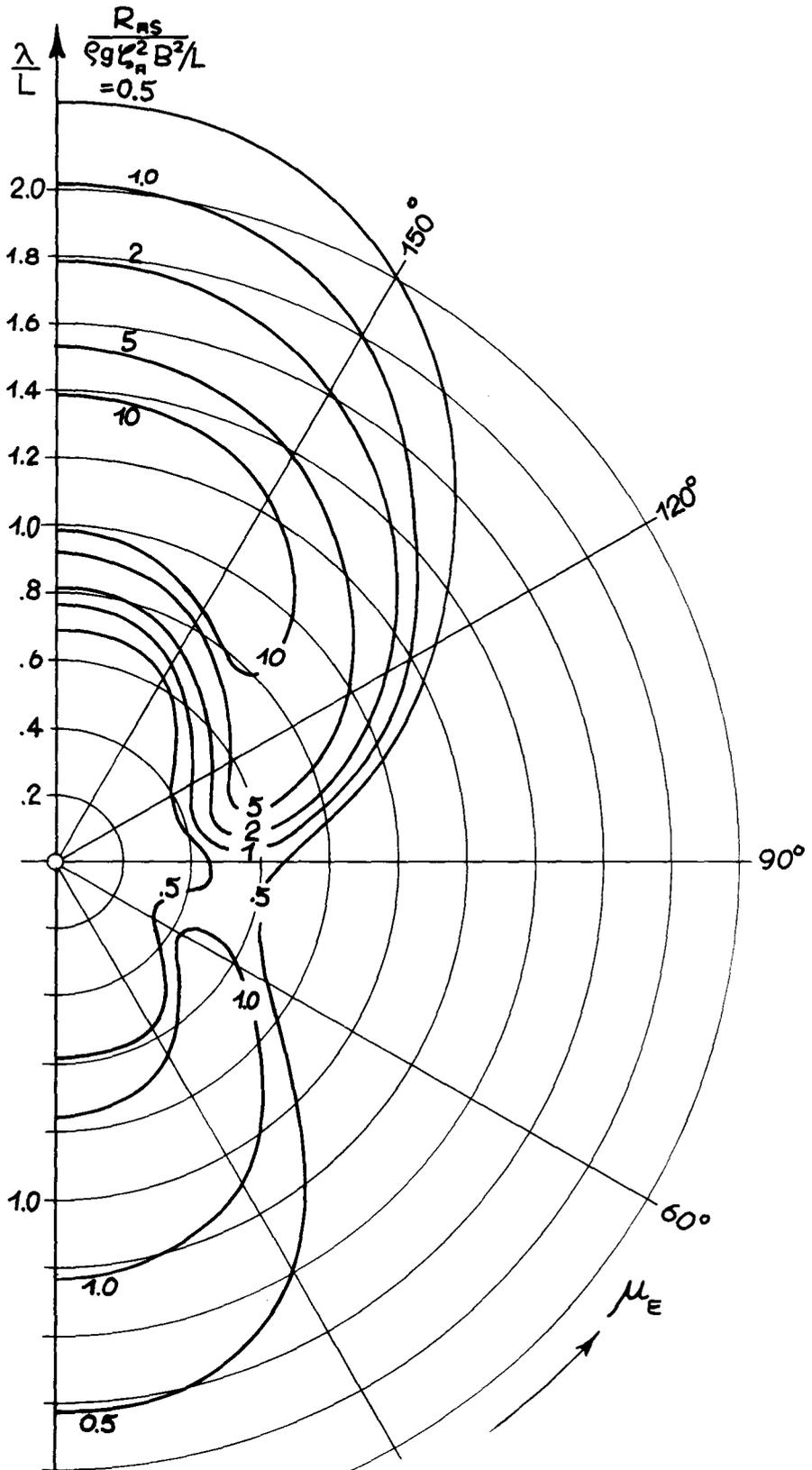


ABB. 27  
WIDERSTANDS-  
ERHÖHUNG IM  
REGELMÄSSIGEN  
SEEGANG.

Abb. 28 soll einen Eindruck vermitteln von der mit Hilfe obiger Übertragungsfunktionen gewonnenen Widerstandserhöhung bei Beaufort 7 in Abhängigkeit vom mittleren Begegnungswinkel  $\tilde{\mu}_E$ . Außerdem ist die durch Wind verursachte Widerstandserhöhung eingetragen.

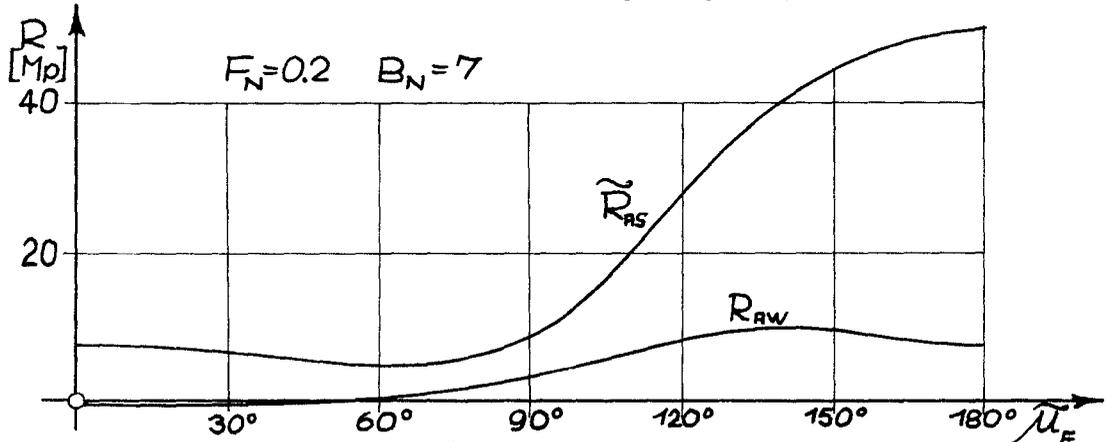


ABB. 28 WIDERSTANDSERHÖHUNG DURCH SEEANGANG UND WIND

Abb. 29 zeigt dieselben Größen, hier als Funktion der Geschwindigkeit für See von vorne. Außerdem sind zwei weitere Widerstandskurven dargestellt;  $R_{T_0}$  bezeichnet den reinen hydrodynamischen Widerstand des glatten Schiffes im glatten Wasser,  $R_{TCALM}$  beinhaltet zusätzlich die Widerstandserhöhung infolge Bewuchs. Hierfür ist ein Schiffsalter von 500 Tagen und ein 70 tägiger Dienst im Nordatlantik seit der letzten Dockung angesetzt worden.

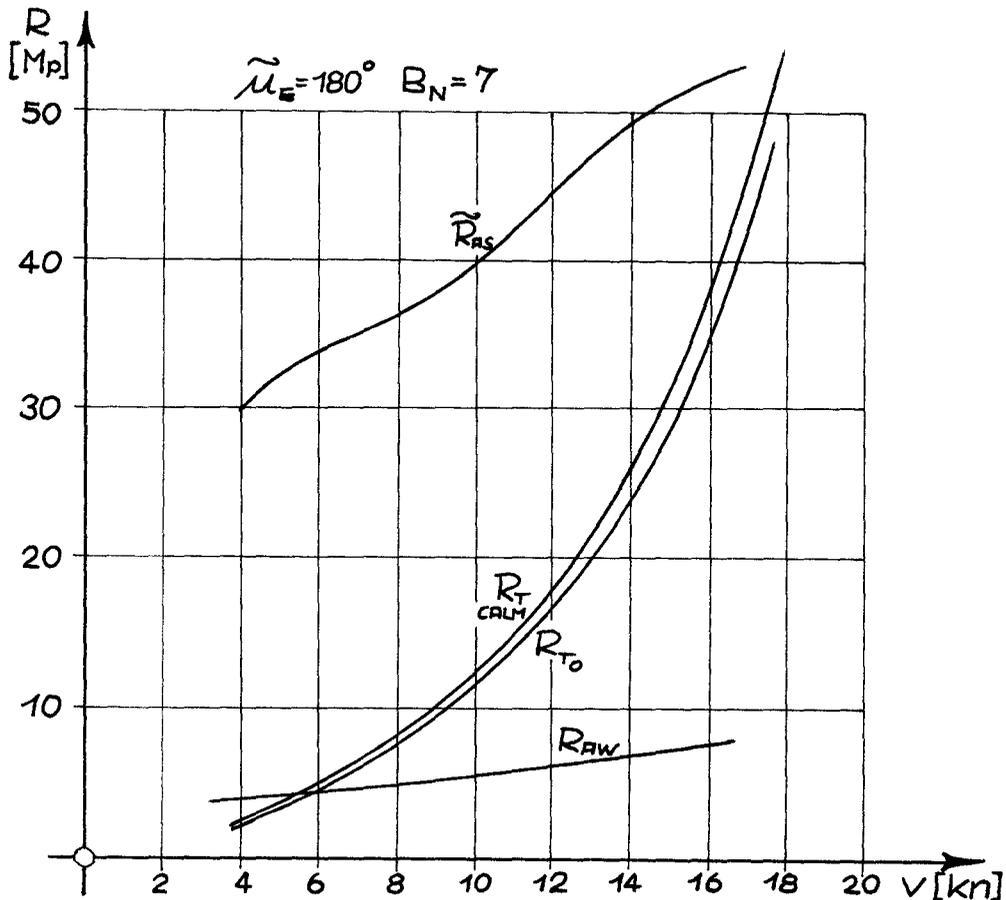


ABB. 29 WIDERSTANDSANTEILE ABH. VON DER GESCHWINDIGK.

Drehzahl, Leistung und Drehmoment in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für denselben Fahrzustand verdeutlicht die Abb. 30. Im Gegensatz zu der Abb. 26 bei Probefahrtsbedingungen wird hier der Betriebspunkt durch das maximale Motormoment bestimmt, das Schiff erreicht nur noch  $9.4 \text{ kn}$  gegenüber  $16.8 \text{ kn}$ . Diese maximal erreichbaren Werte für Geschwindigkeit, Drehzahl, Moment und Leistung sind in Abb. 31 als Funktion des mittleren Begegnungswinkel aufgetragen, der Umweltzustand ist wie bei den bisherigen Abbildungen durch Beaufort 7 gekennzeichnet. Deutlich sind die Bereiche zu erkennen, in denen die Werte entweder durch die maximal zulässige Drehzahl oder aber durch das maximale Moment bestimmt werden. Nur an der Grenze beider Bereiche, dort wo Maximalwerte von Drehzahl und Moment gleichzeitig erreicht werden, läßt sich die installierte Leistung tatsächlich einsetzen.

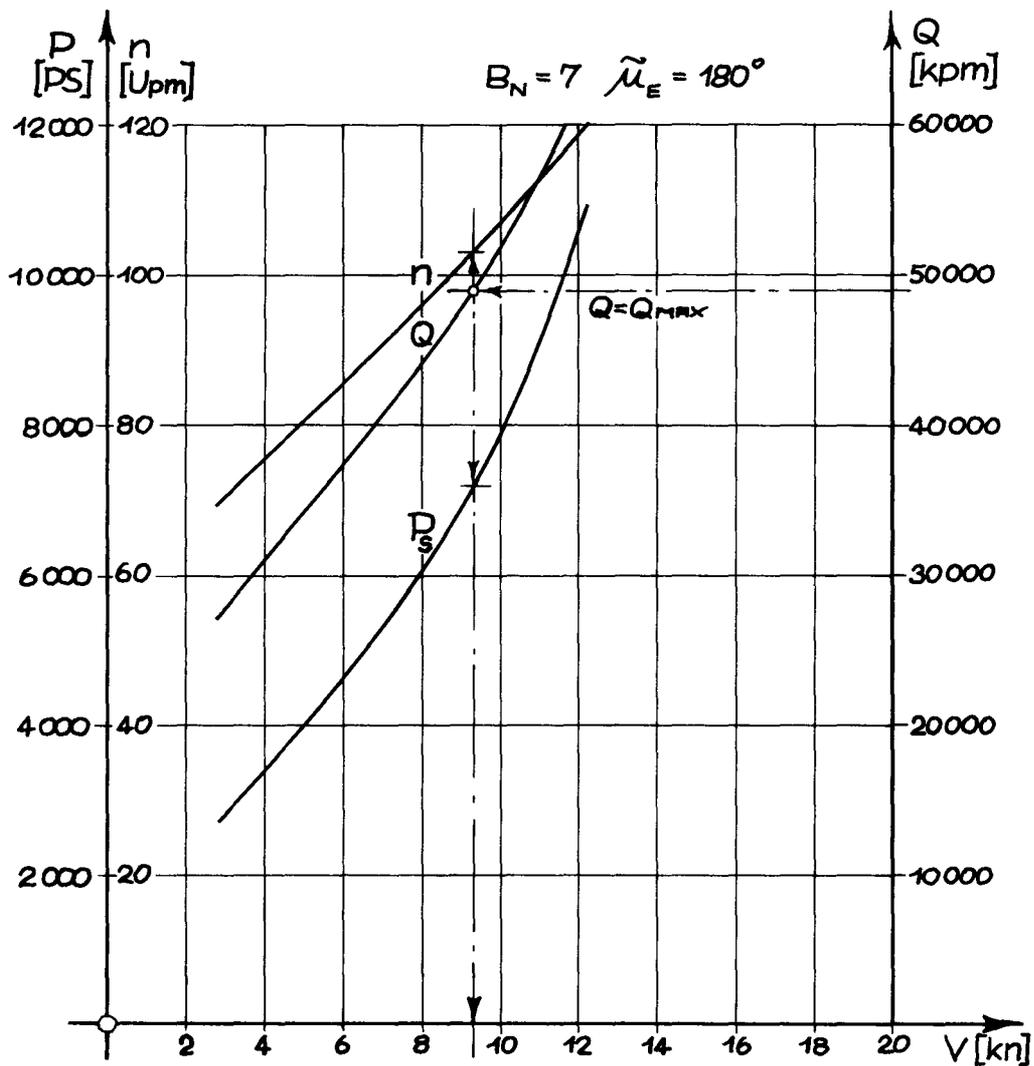


ABB. 30 DREHZAHl, LEISTUNG UND DREHMOM. IM SEEANG.

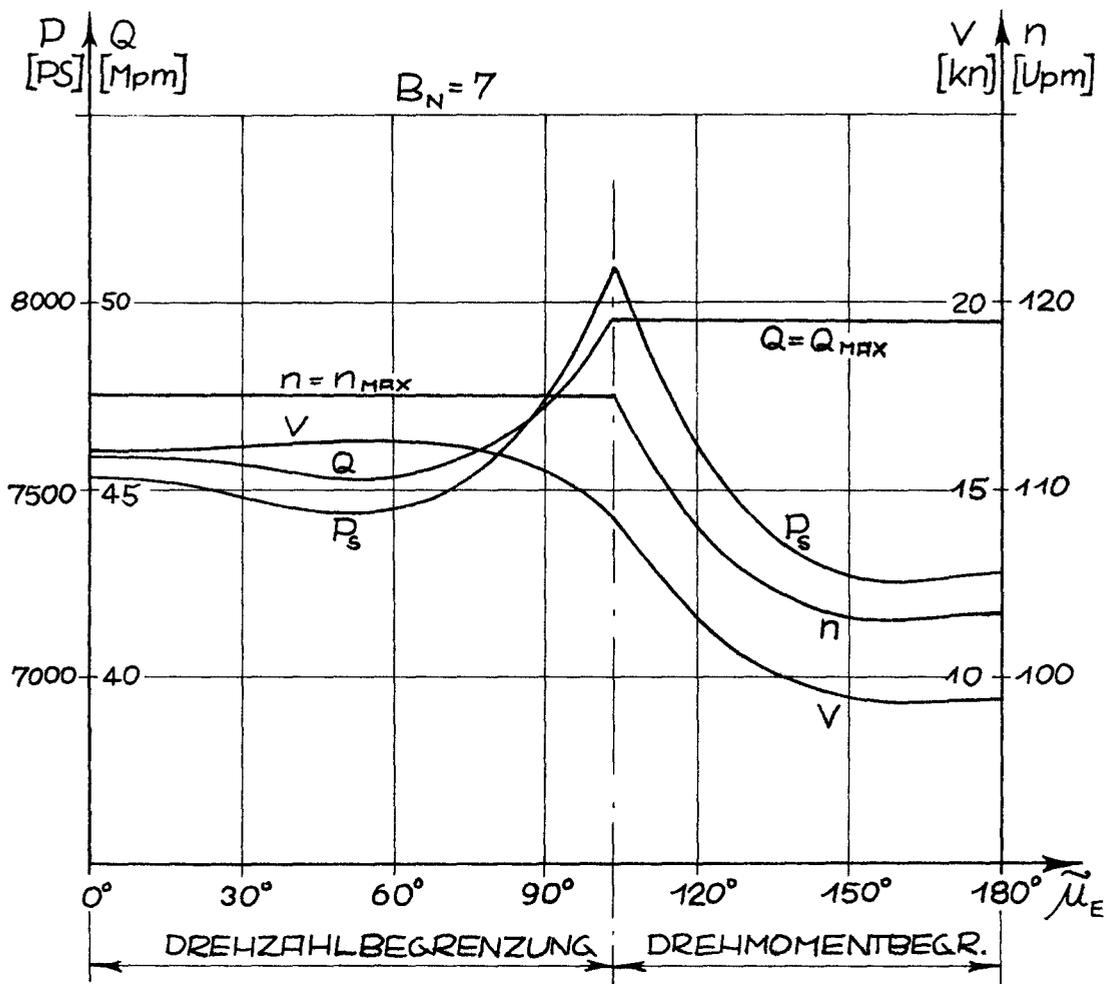


ABB. 31 ERREICHBARE WERTE FÜR GESCHWINDIGKEIT, DREHZAHL UND LEISTUNG ABHÄNGIG VOM MITLEREN BEGEGNUNGSWINKEL

Schließlich zeigt Abb. 41 in ihrer linken Hälfte zusammenfassend die erreichbare Geschwindigkeit bei Glattwasser und für die Beaufortstufen 5 bis 10 in Polarkoordinaten-Darstellung. Deutlich erscheint der Geschwindigkeitseinbruch bei vorlicher See, der noch durch die im nächsten Abschnitt behandelten und auf der rechten Seite gezeigten Einflüsse verstärkt wird.

## 5.2. GEFÄHRDENDE SEEGANGSEFFEKTE

In stärkeren Seegängen wird die Schiffsführung häufig gezwungen sein, gegenüber der durch höheren Widerstand bedingten "unfreiwilligen" Geschwindigkeitsreduktion die Geschwindigkeit freiwillig weiter zurückzunehmen, um Schiff und Ladung nicht zu gefährden, oder aber den Kurs zu ändern.

Bei den ersten drei der hier betrachteten Kriterien "Slamming", "Wetness" (grünes Wasser an Deck) "Racing" (Durchgehen des Propellers) und Vertikalbeschleunigungen spielt die Relativbewegung eine wichtige Rolle. Deshalb wird in Abb. 32 und Abb. 33 für eine Stelle  $x=.05L$  hinter dem vorderen Lot das kennzeichnende Amplitudenverhältnis der Relativbewegung gezeigt, wie der Funktion der Geschwindigkeit und des mittleren Begegnungswinkels. (Das kennzeichnende Amplitudenverhältnis ist das Verhältnis der Mittelwerte der 1/3 höchsten Amplituden der Schiffsantwort und des Seegangs.)

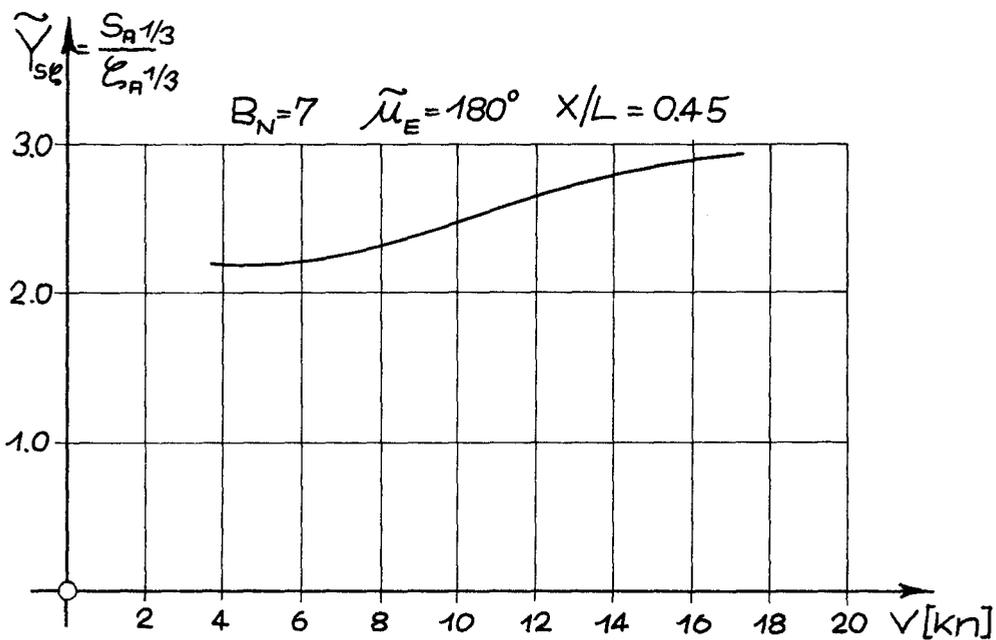


ABB. 32 RELATIVBEWEGUNG IM UNREGELM. SEEGANG ABHÄNGIG VON DER GESCHWINDIGKEIT

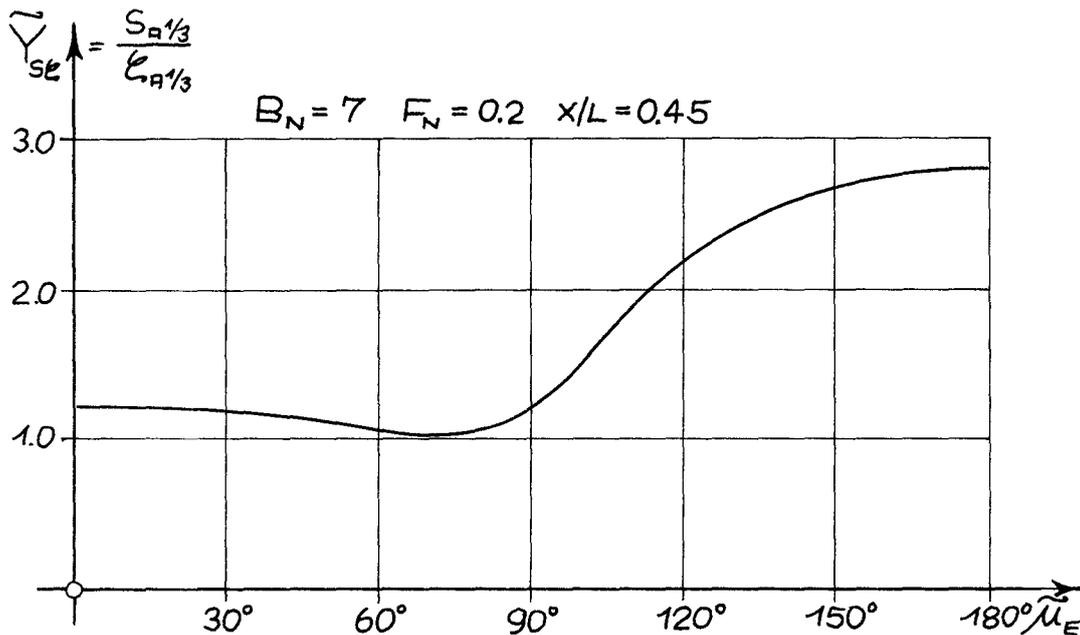


ABB. 33 RELATIVBEWEGUNG IM UNREGELMÄSSIGE SEEGANG ABHÄNGIG VOM MITLEREN BEGEGNUNGSWINKEL

Die folgenden Abbildungen 34 bis 37 zeigen den Verlauf der zulässigen Geschwindigkeit über der Windstärke für verschiedene Grenzwerte der vier untersuchten Kriterien. Zusätzlich ist die maximal erreichbare Geschwindigkeit mit einer gestrichelten Linie eingetragen.

Abb. 37 läßt einen praktisch senkrechten Verlauf der Linien für konstante Grenzen erkennen. Das bedeutet, daß das Erreichen dieser Grenzwerte praktisch unabhängig von der Geschwindigkeit nur durch den Seegang bestimmt wird. Man kann also das Propeller-Durchgehen nicht durch Zurücknahme der Geschwindigkeit vermeiden, sondern <sup>nur</sup> durch Kursänderung.

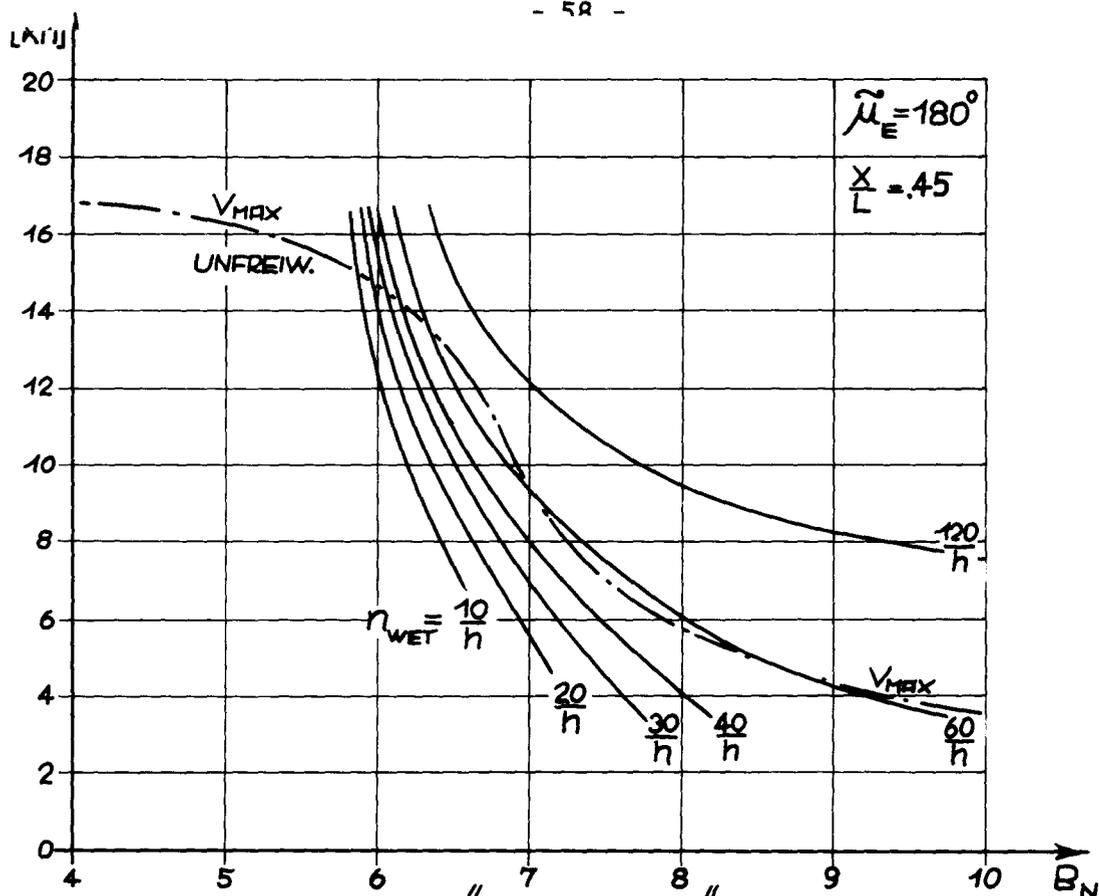


ABB. 34 LINIEN GLEICHER HÄUFIGKEIT FÜR WASSER AN DECK

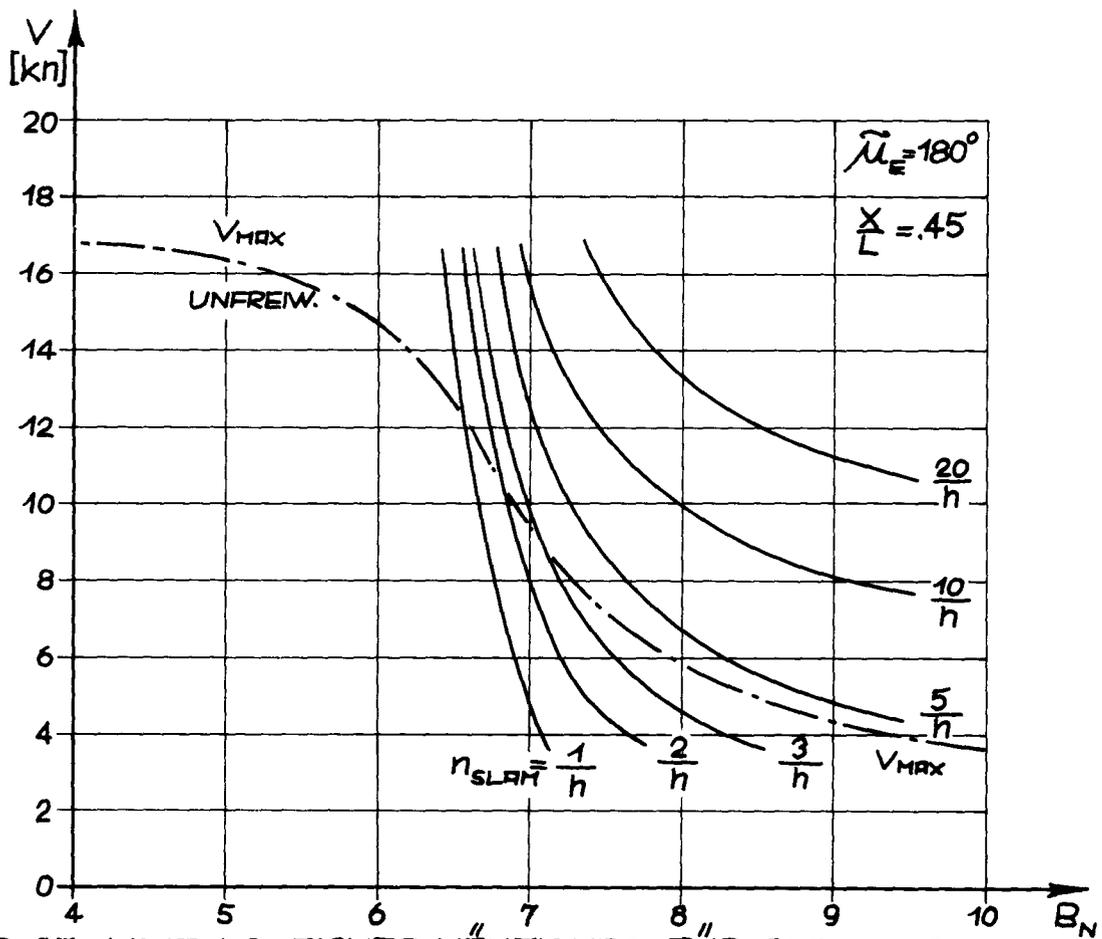


ABB. 35 LINIEN GLEICHER HÄUFIGKEIT FÜR SLAMMING

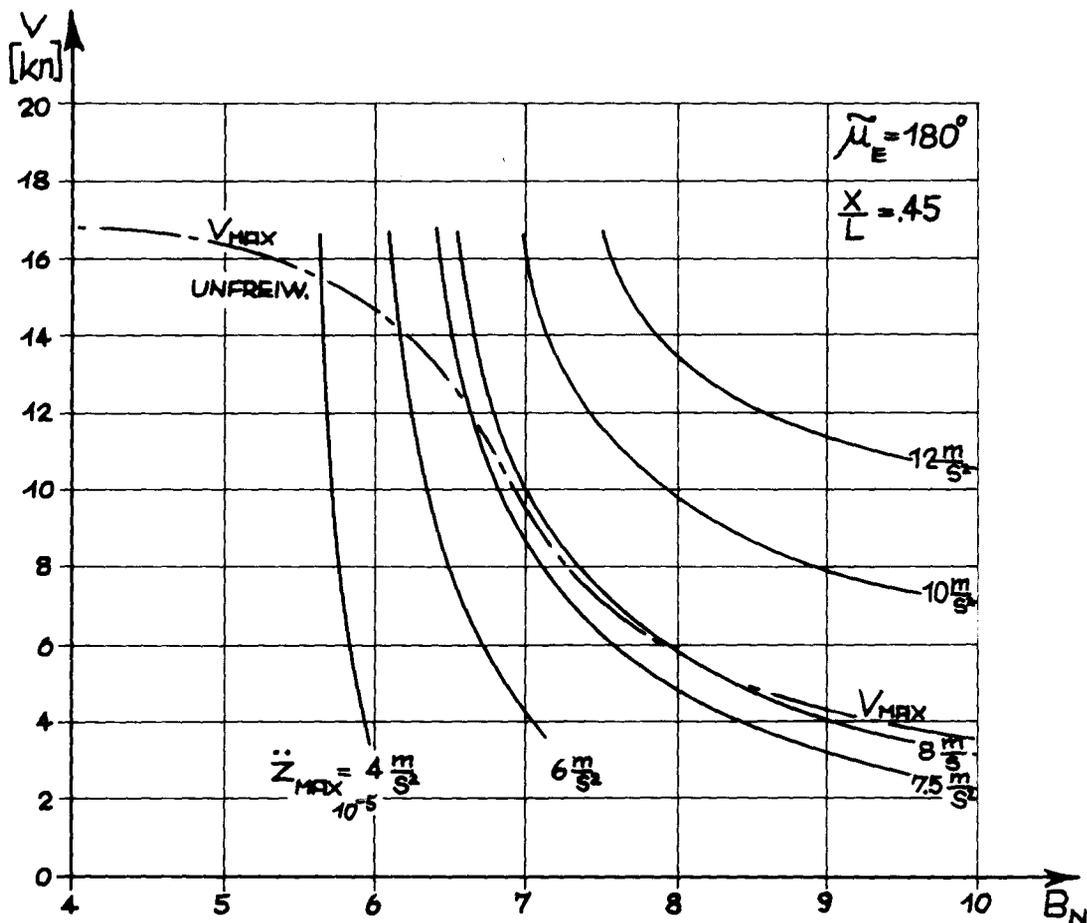


ABB. 36 LINIEN GLEICHER MAXIMALER VERTIKALBESCHLEUNIGUNG

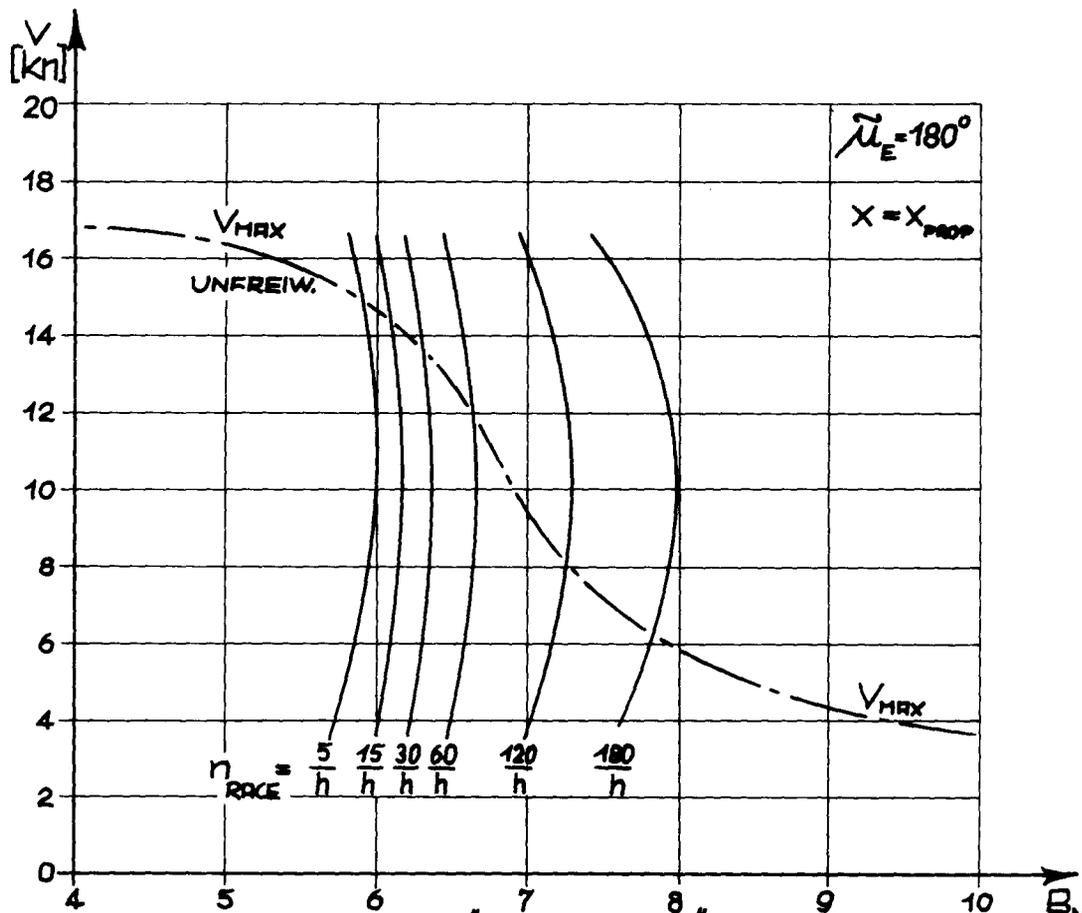


ABB. 37 LINIEN GLEICHER HÄUFIGKEIT FÜR PROPELLER-AUSTAUCHEN

Deshalb sind in die nächsten Darstellungen auch nur die übrigen drei Kriterien aufgenommen. Die Abbildungen 38 bis 40 zeigen den Geschwindigkeitsverlauf über dem mittleren Begegnungswinkel für konstante Häufigkeit bzw. Beschleunigung, Parameter an den Kurven ist die Windstärke.

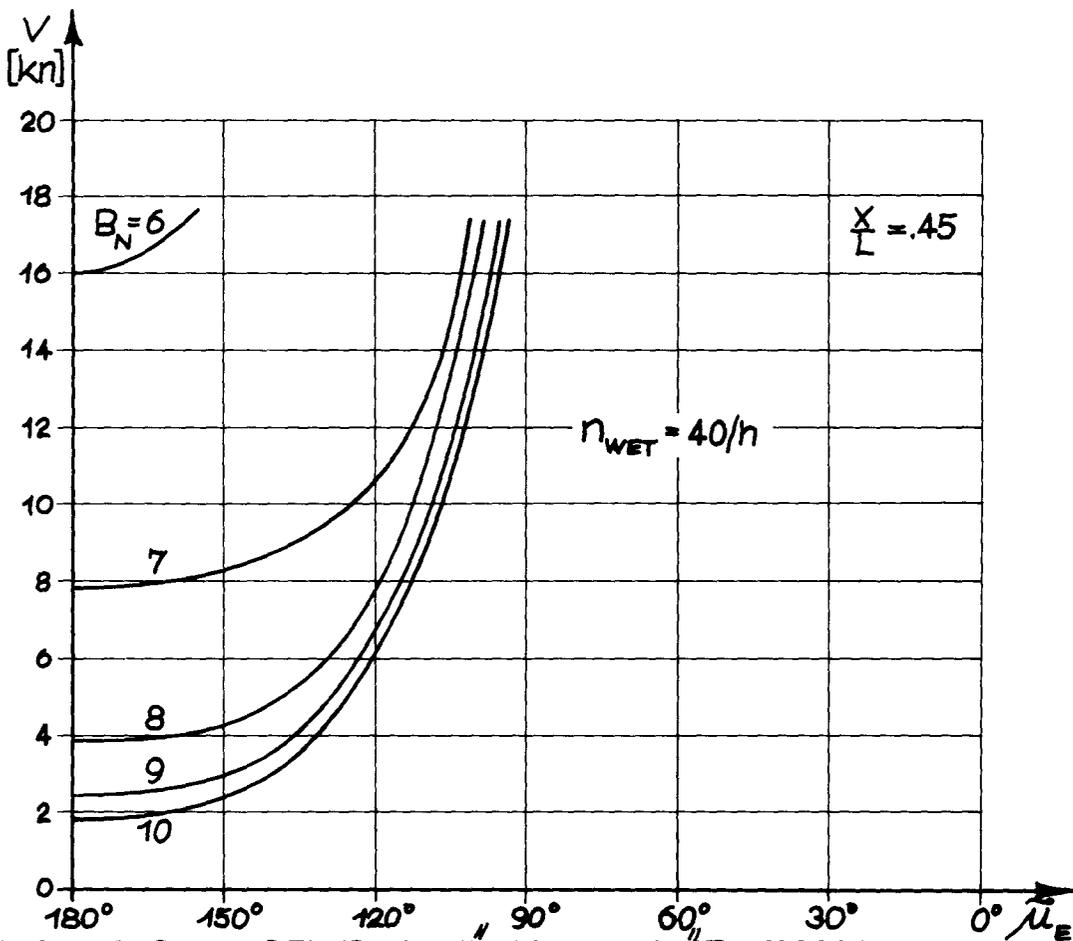


ABB. 38 GESCHW. BEI KONST. HÄUFIGKEIT FÜR WASSER AN DECK

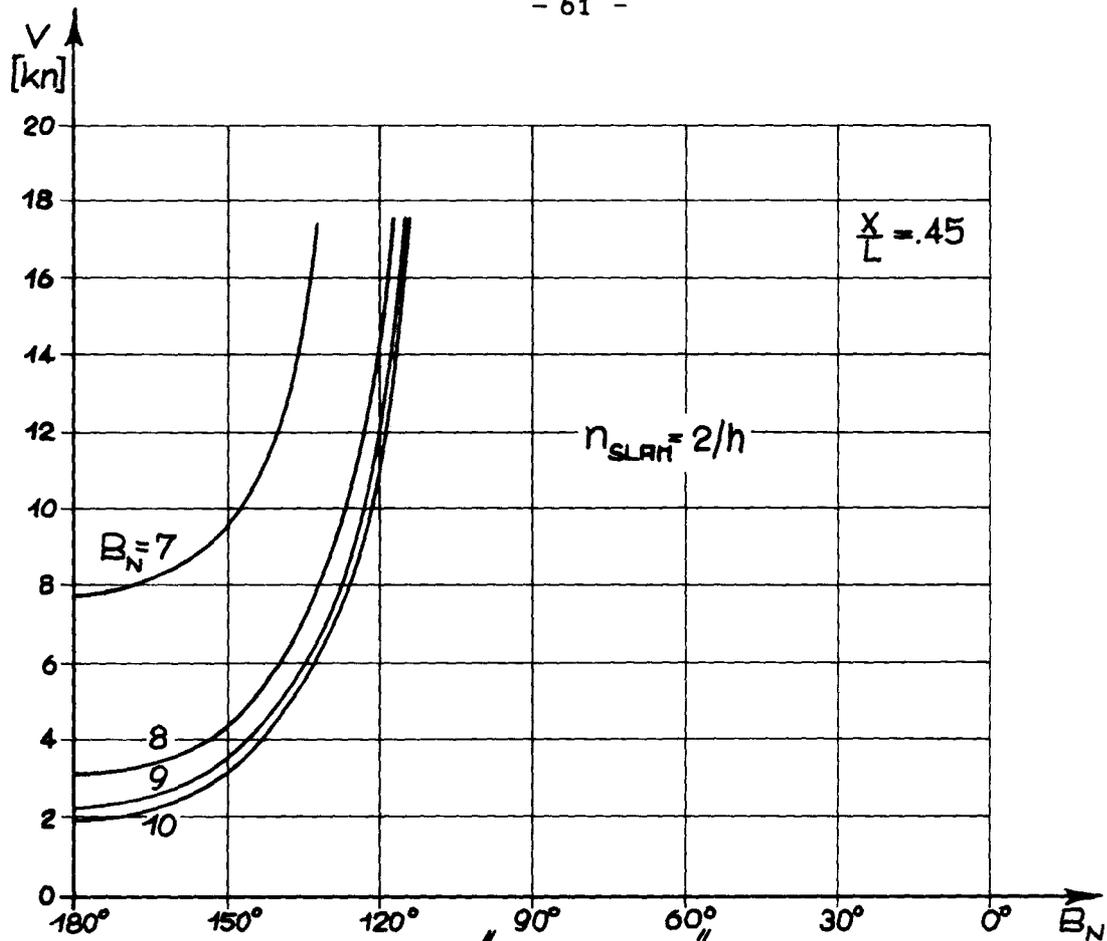


ABB. 39 GESCHW. BEI KONST. HÄUFIGKEIT FÜR SLAMMING.

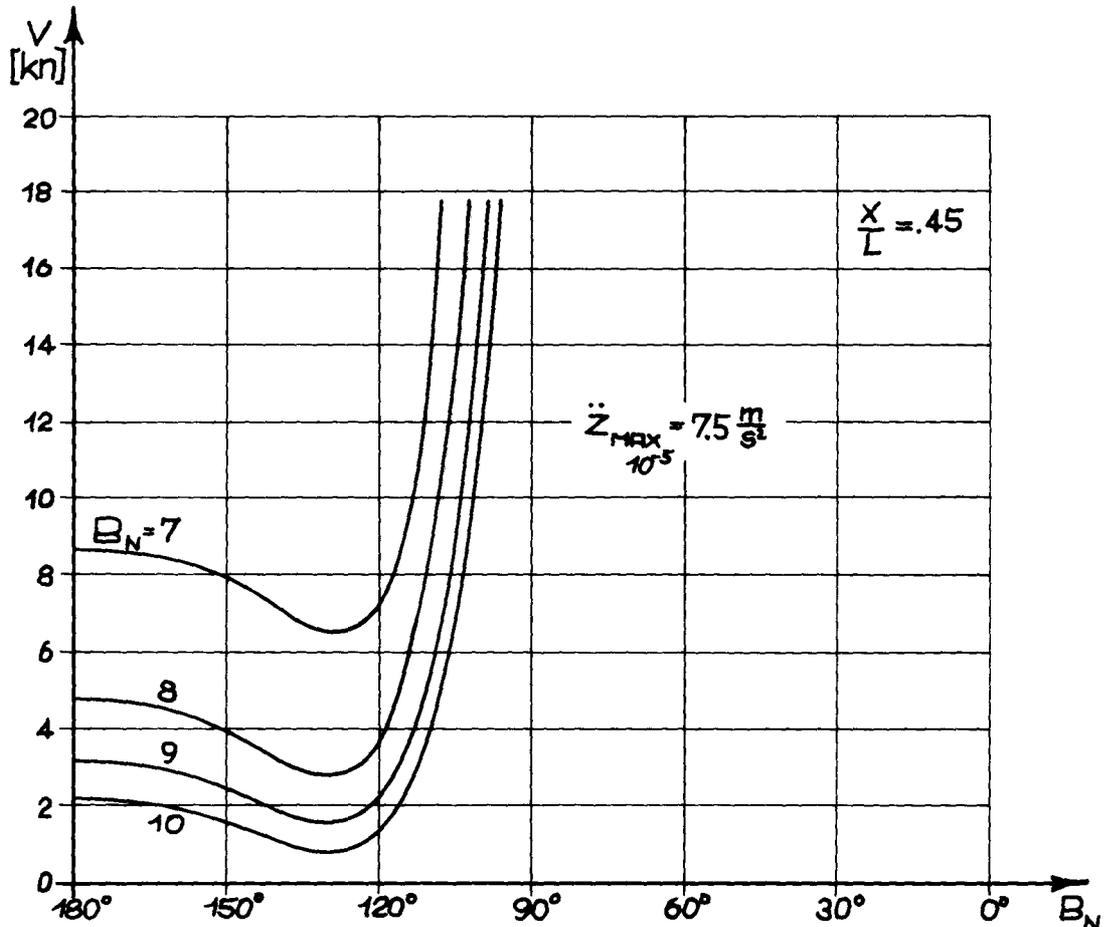


ABB. 40 GESCHW. BEI KONST. MAXIMALER VERTIKALBESCHLEUNIGUNG.

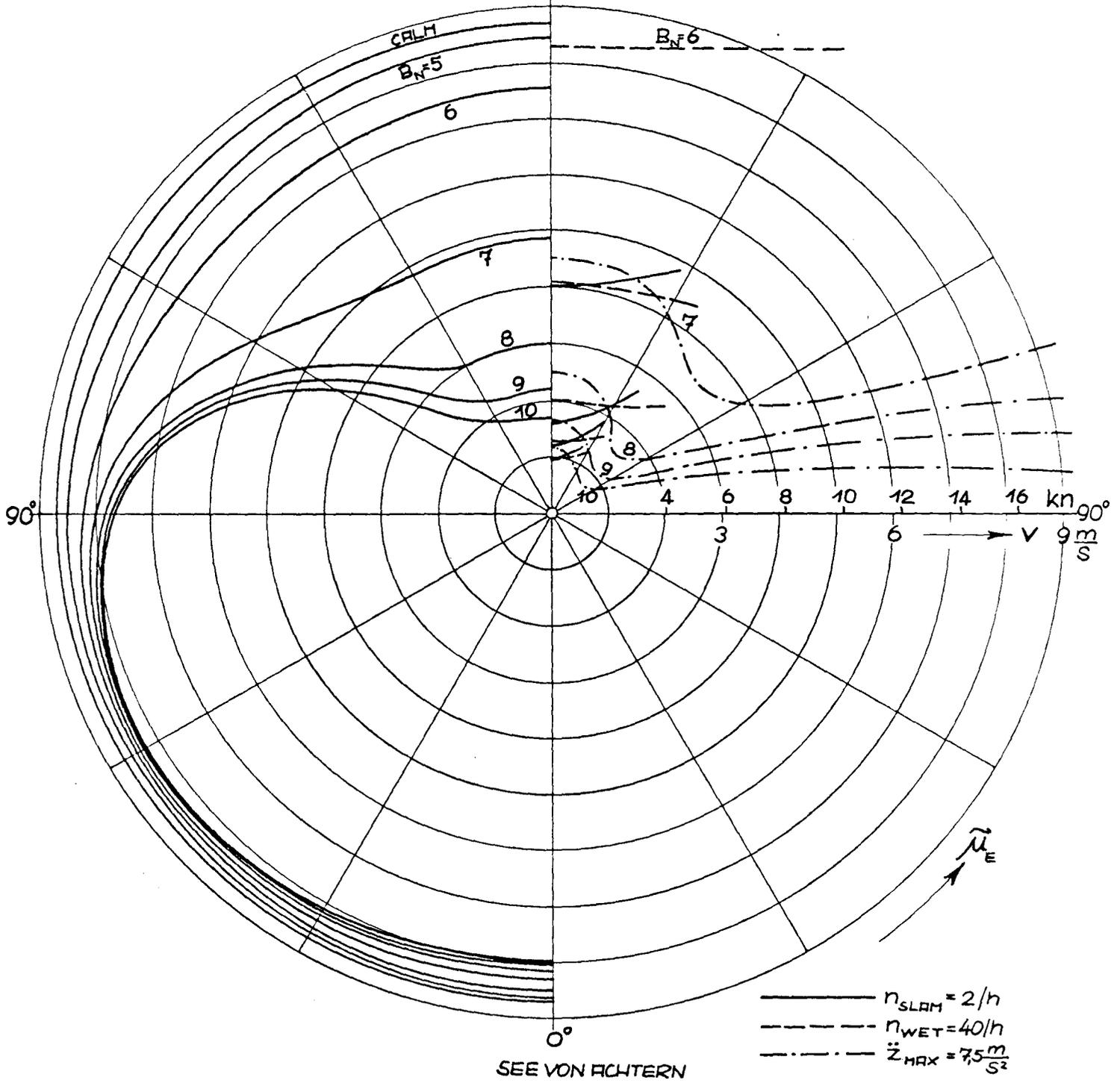
Die zusammenfassende Darstellung dieser "freiwilligen" Geschwindigkeitsgrenzen ist in Polarkoordinatenform auf der rechten Seite in Abb. 41 aufgetragen. Für die gewählten Grenzwerte ergibt sich, daß für Kurs gegen die See "Slamming" die stärkste Einschränkung in der Geschwindigkeit bringt; im Bereich ungefähr  $120^{\circ}$ - $150^{\circ}$  ist das schärfste Kriterium "Wetness", und schließlich im angrenzenden Winkelbereich bis ca.  $100^{\circ}$  ist die Beschleunigung maßgebend für die zulässige Geschwindigkeit.

Bei achterlicher See, und bei Windstärken kleiner als Beaufort 7 bei vorlicher See, ist keine freiwillige Geschwindigkeitsreduktion unter Voraussetzung dieser Grenzwerte erforderlich, sieht man einmal von der zusätzlichen Bedingung ab, daß die mittlere Begegnungsperiode nicht in der Nähe eines ganzzahligen Vielfachen der halben Rollperiode des Schiffes liegen soll.

Diese Bedingung wird im Programm zusätzlich untersucht bei der Bestimmung der endgültigen Geschwindigkeit, doch der Einfluß wird hier nicht dargestellt. Er führt zum Ausschluß gewisser Geschwindigkeitsbereiche abhängig von Seegang und Begegnungsrichtung.

SEE VON VORN

180°



ERREICHBARE  
GESCHWINDIGKEIT

GESCHWINDIGKEITSGRENZEN  
INFOLGE GEFÄHRDENDER  
SEEGANGSEFFEKTE

FÜR AUSGEREIFTE SEEGÄNGE ABHÄNGIG  
VON BEGEGNUNGSWINKEL  
UND BEAUFORT-GRAD

ABB. 41

### 5.3. LANGZEITAUSSAGEN

Die bisherigen Ergebnisse gelten für stationäre Seegänge und bestimmte mittlere Begegnungsrichtungen. Unter Benutzung der in Abb. 43 aufgelisteten Verteilung der kennzeichnenden Wellenhöhen und -perioden für den Nordatlantik, sowie der in Abb. 42 gezeigten Richtungsverteilung des Seeganges und Kursverteilung des Schiffes wurden die Verteilungen und die Mittelwerte für Geschwindigkeit und Leistung über lange Zeiträume berechnet. Dabei wurde wieder unterschieden zwischen "unfreiwilligen" und "unfreiwilligen plus freiwilligen" Geschwindigkeitsbeschränkungen.

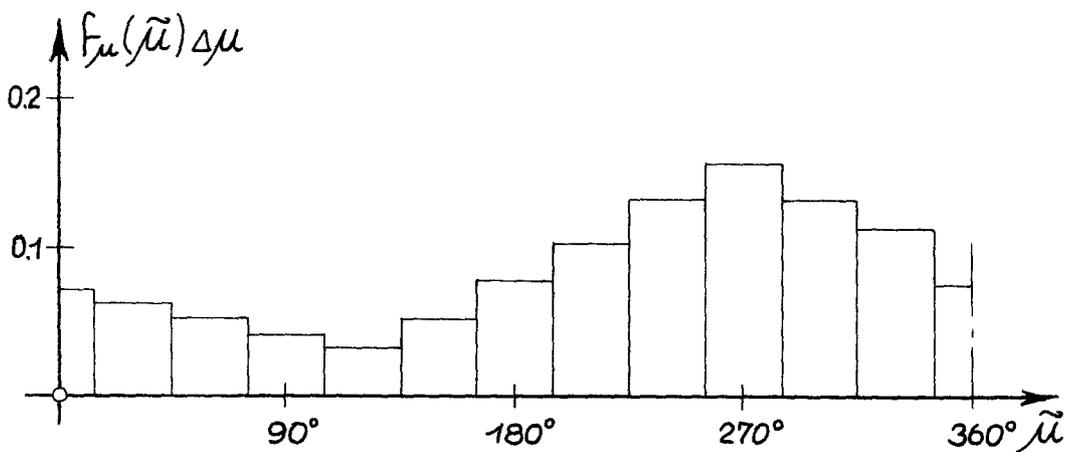
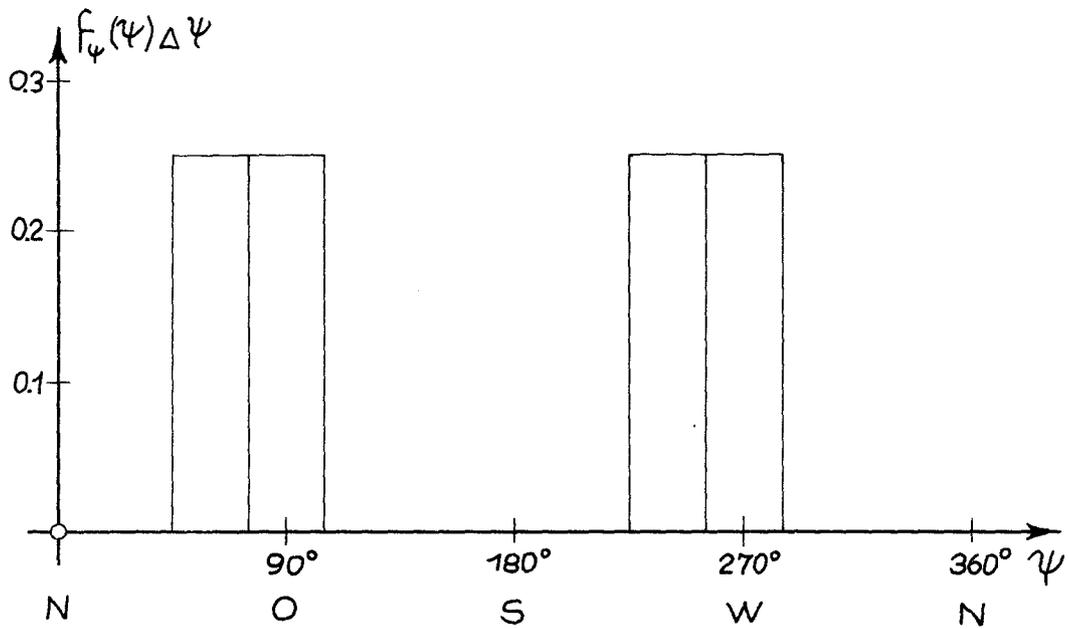
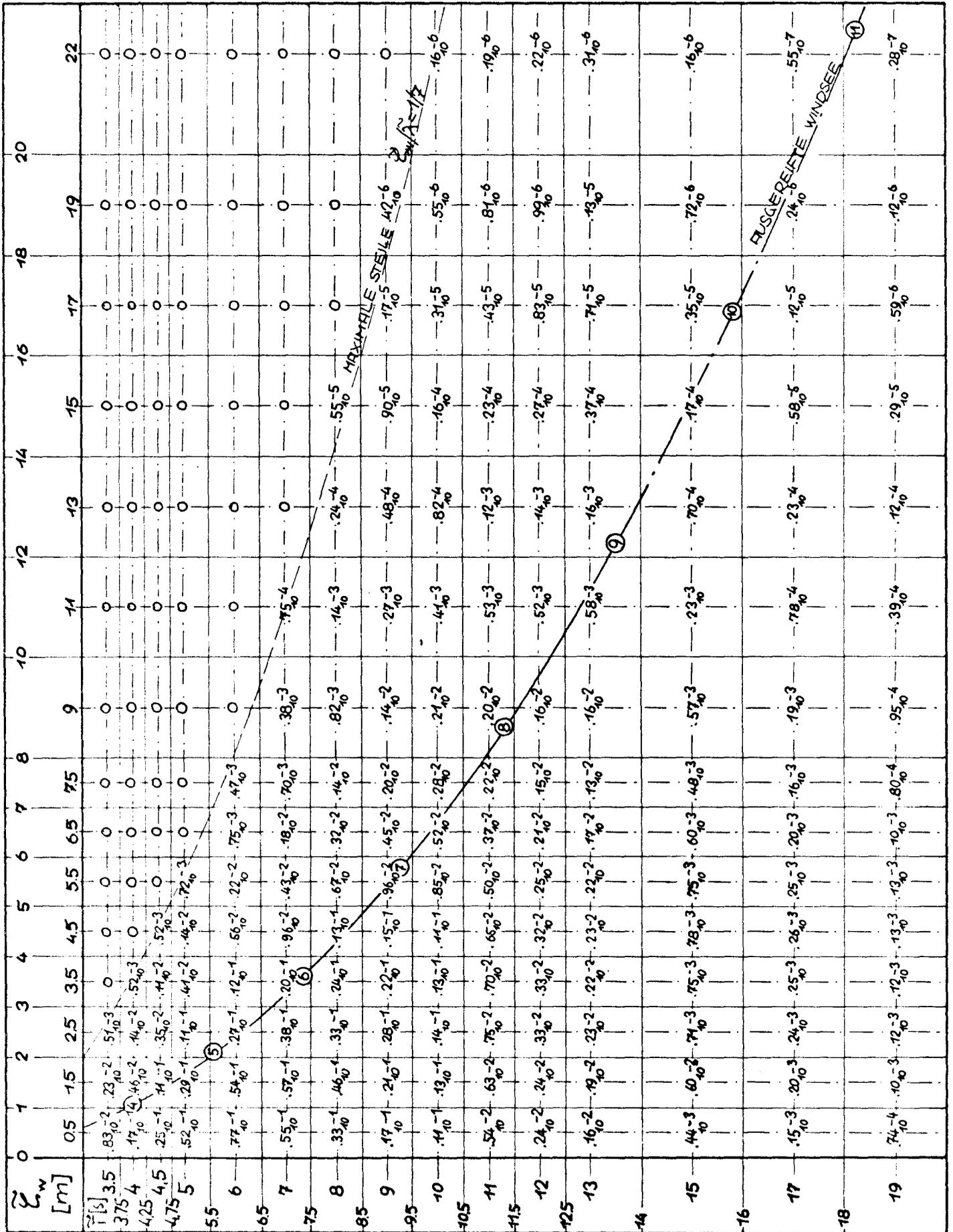


ABB. 42 RICHTUNGSVERTEILUNGEN FÜR KURS UND SEEGANG IM NORDATLANTIK

GANZJÄHRIGE KLASSIERUNG DER SCHEINBAREN WELLENHÖHEN  $\bar{z}_w$  UND -PERIODEN  $\bar{T}$  IM NORDATLANTIK

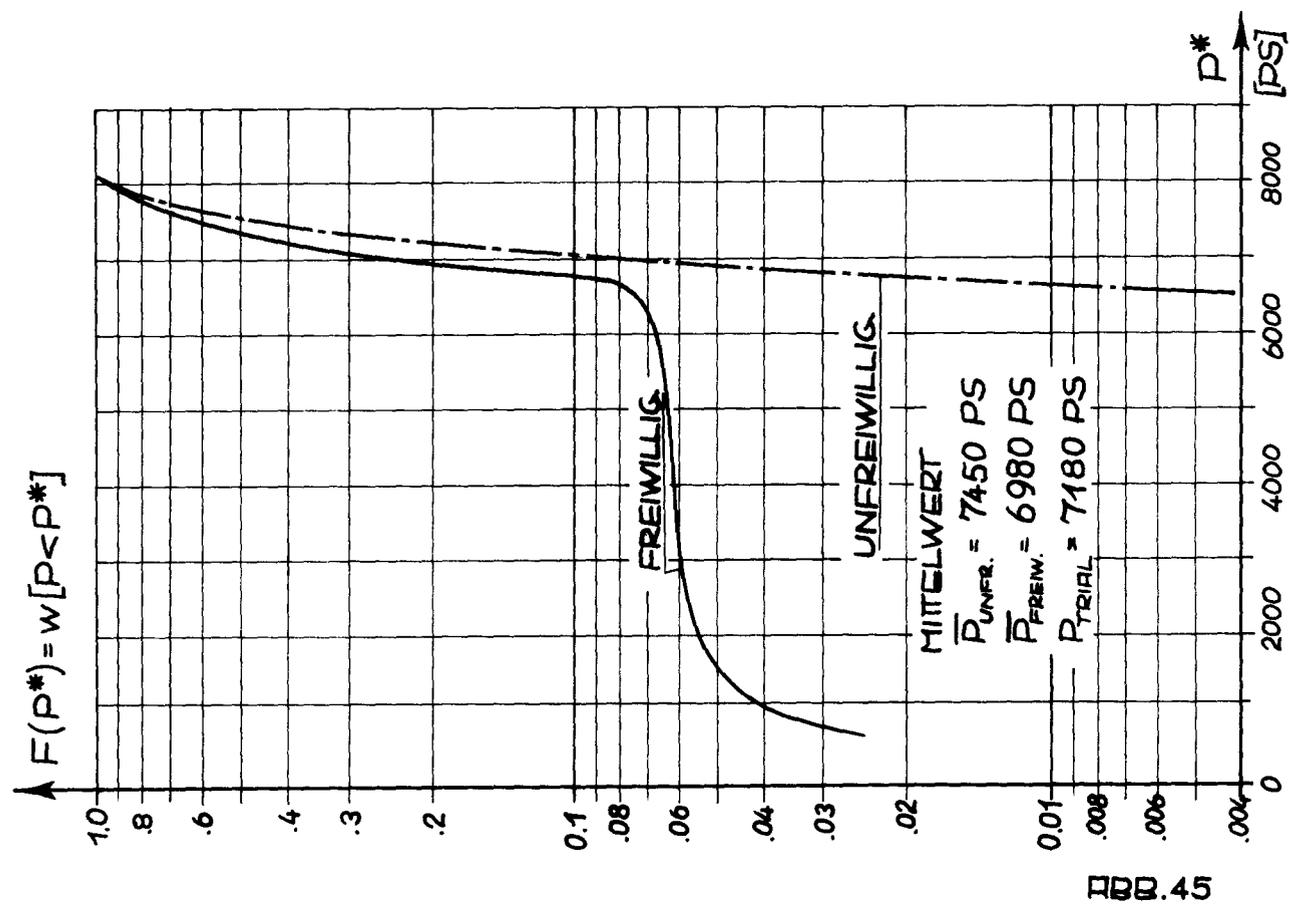
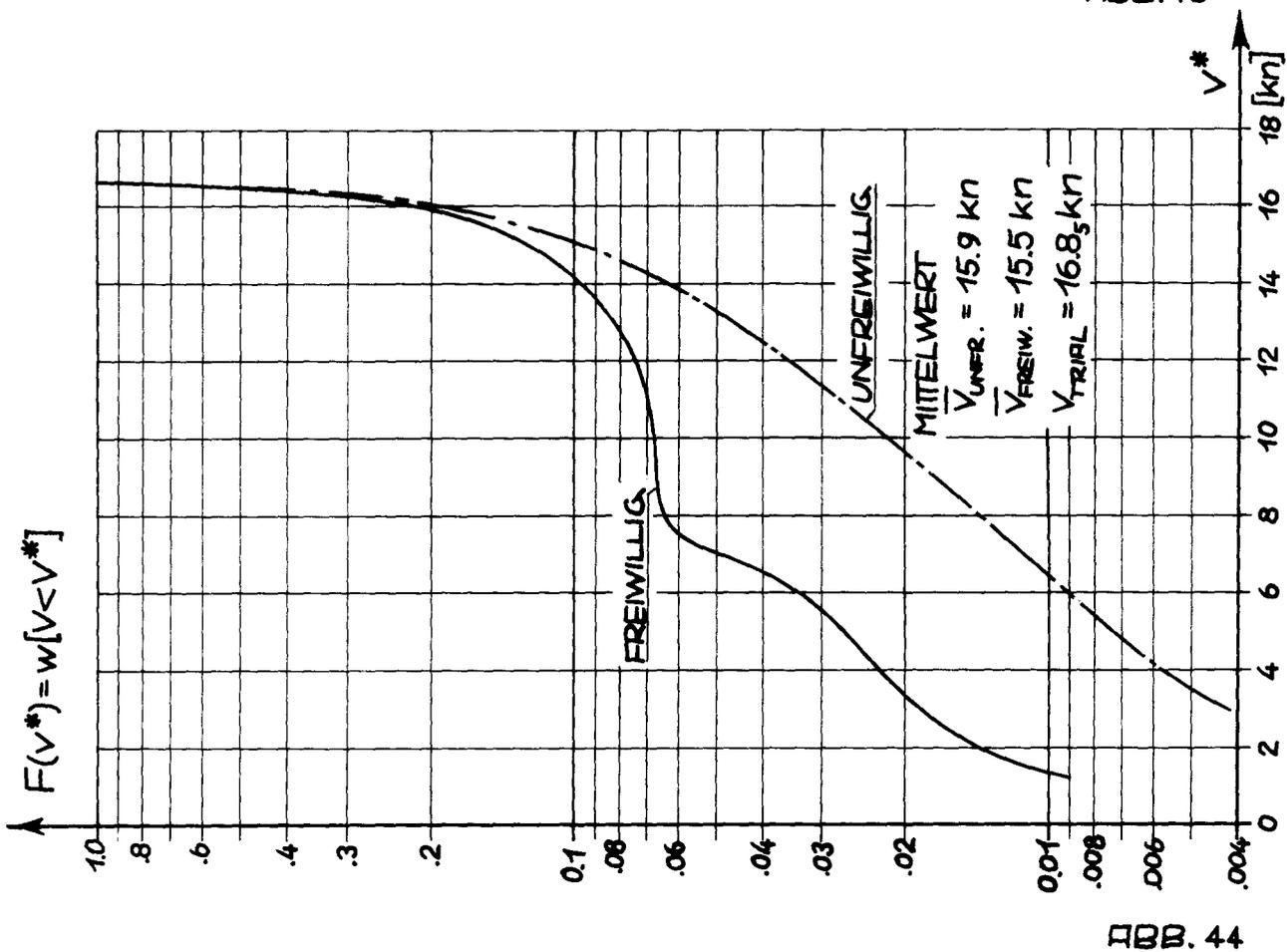


NACH WALDEN: 'DIE EIGENSCHAFTEN DER MEERESWELLEN IM NORDATL. OZEAN', SEEWETERAMT 41, (WETERSCHIFFE C, D, K) 1964  
 GEGLÄTTET, EXTRAPOLIERT UND NEU KLASSIERT VON H. SÖDING  
 ABB. 43

Die Abb. 44 und 45 zeigen die Verteilungsfunktionen für Geschwindigkeit und Leistung, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß die Geschwindigkeit bzw. Leistung kleiner als ein Grenzwert ist, aufgetragen über der Geschwindigkeits- bzw. Leistungsgrenze. Auffällig ist neben dem deutlichen Einfluß der gefährdenden Seegangseffekte die ausgeprägte Stufe in diesen Kurven. Sie zeigt, daß innerhalb des Geschwindigkeitsbereichs 8 - 14 kn und des Leistungsbereiches 2000 - 6000 PS nur selten gefahren wird. Dagegen tritt bei der Geschwindigkeit 7 kn eine Häufung auf. Sie ist bedingt durch die untere Drehzahlgrenze von 50 U/min. Weiter kann die Geschwindigkeit trotz noch bestehender Gefahren nicht zurückgenommen werden, es bleibt nur die Möglichkeit der Kursänderung. Die Wahrscheinlichkeit, daß nur noch wesentlich kleinere Geschwindigkeiten erreicht werden fällt dann stark ab, weil die dann notwendigen großen Seegangsstärken nur noch sehr selten auftreten.

Zusätzlich zu den Kurven sind die jeweiligen Mittelwerte und die Werte für Probefahrtsbedingungen eingetragen. Danach ist bei diesem Schiff mit einer durch Widerstandserhöhungen im Seebetrieb verursachten mittleren Geschwindigkeitsverringerung um 5.5% gegenüber der Probefahrtgeschwindigkeit zu rechnen. Die Vermeidung gefährdender Seegangseffekte führt zu einem weiteren mittleren Fahrtverlust von ca. 2.5%.

Diese Ergebnisse sollen nur zur Veranschaulichung der Aussagen des Programmsystems dienen. Sie gelten nur für dieses spezielle Beispiel und können nicht verallgemeinert werden. Das wird schon dadurch klar, daß die unfreiwillige Geschwindigkeitsbegrenzung nicht nur von Form und Größe des Schiffes, sondern auch von der Auslegung von Maschine und Propeller abhängt. Der freiwillige Fahrtverlust wird außer von den Kriterien für die Maßnahmen der Schiffsführung auch ganz entscheidend durch den gefahrenen Tiefgang und damit durch den Ladezustand bestimmt.



LANGZEITVERTEILUNG VON GESCHWINDIGKEIT UND LEISTUNG IM NORDATLANTIK

LITERATUR

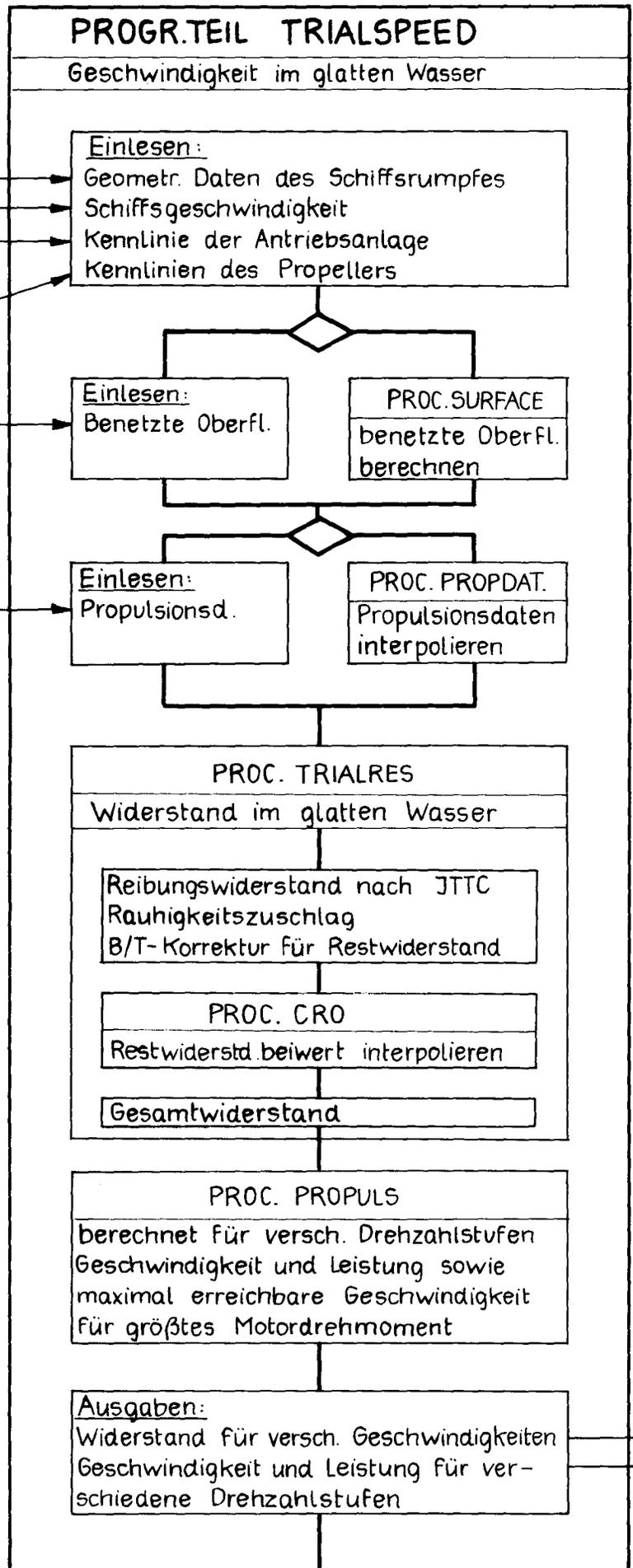
- [1] I. Petkovic: Beaufort Wind Scale and Calculated Numerical Values of Wind Speed and Wind Pressure Curves above Sea Level. ISP Vol.II No. 117, 1964
- [2] W.J. Pierson: The Interpretation of Wave Spectrums in Terms of the Wind Profile instead of the Wind Measured at a Constant Height. J. of Geoph.Res. Vol.69 No. 24,1964
- [3] Hogben,N., Lumb,F.E.: Ocean Waves Statistics, National Physical Laboratory, Teddington, 1966
- [4] Marks, Goodman u.a.: An Automated System for Optimum Ship Routing. SNAME Trans. Vol. 76,1968
- [5] Aertssen,G.: Service Performance and Trials at Sea. Rep. of Performance Committee, 12<sup>th</sup> ITTC, Rome 1969
- [6] Gertler, H.: A Reanalysis of the Original Test Data for the Taylor Standard Series, DTMB Report No. 806, March 1954
- [7] Todd, F.H.: Series 60, Methodical Experiments with Models of Single-Screw Merchant Ships, DTMB Report No. 1712, July 1963
- [8] Doust, D.J.,O'Brien,T.P.: Resistance and Propulsion of Trawlers. Transactions NEC Inst. of Engineers and Shipbuilders-1958/59
- [9] N.C. Astrup: Statistik analyse av fremdrifts data fra forsök med skipsmodeller. Norges Teknisk Högskole, Trondheim 1967
- [10] Gulddammer and Harvald: Ship Resistance, Effect of Form and Principal Dimensions. Akademisk Forlag, Copenhagen 1974
- [11] Wagner, B.: Windkräfte an Überwasserschiffen. STG Jahrb. Bd. 61, 1967
- [12] Böese, P.: Bestimmung der stationären vom Wind verursachten Drift eines Schiffes. IfS-Schrift Nr. 2113, 1968
- [13] Wagner,B.: Untersuchung zur Frage des effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind auf der Grundlage von Modellversuchen für Unter- und Überwasserschiffe (Forschungsschiff Meteor und andere Schiffstypen) IfS-Bericht Nr. 286, 1972

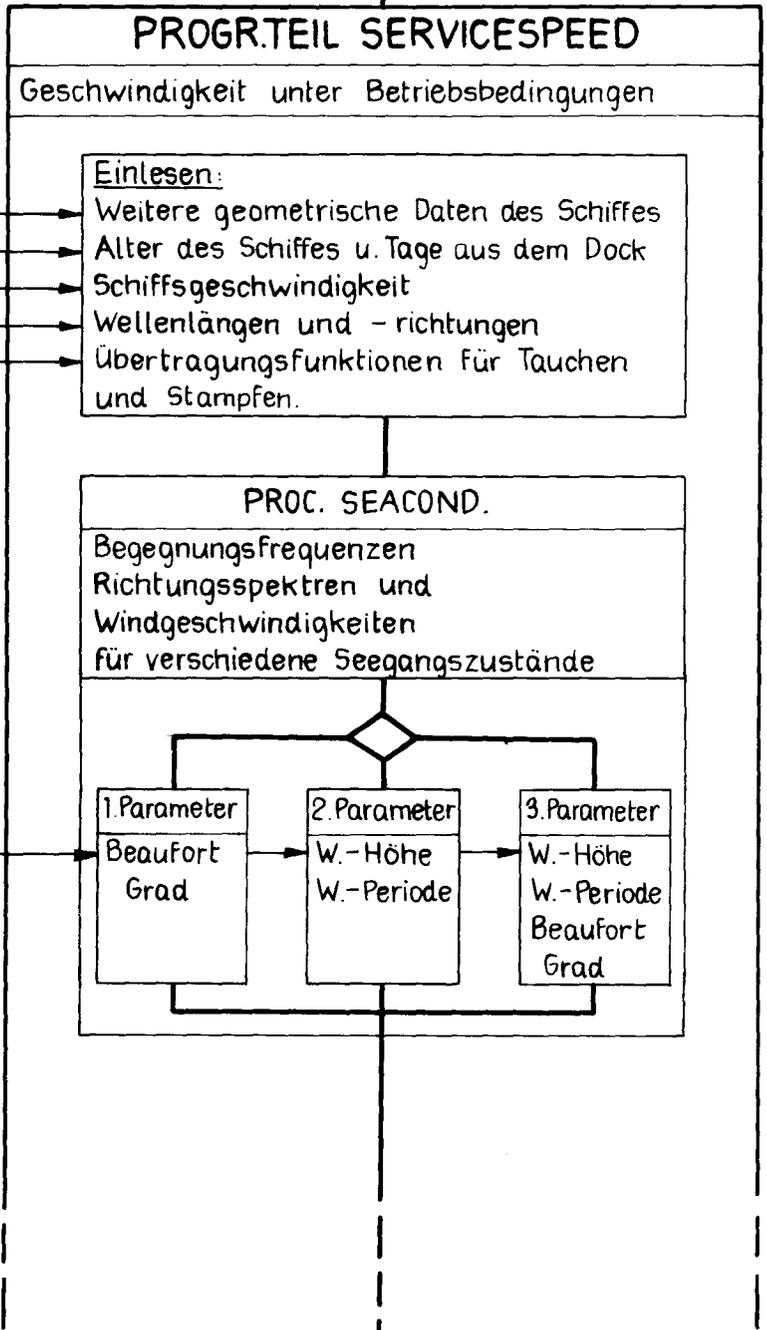
- [14] Boese, P.: Das Steuern eines Schiffes in schwerer achterlicher See. STG Jahrb. Bd. 63, 1969
- [15] Kirsch, M.: Die Berechnung der Bewegungsgrößen der gekoppelten Tauch- und Stampfbewegung..., IfS-Bericht Nr. 241, Mai 1969
- [16] Boese, P.: Eine einfache Methode zur Berechnung der Widerstandserhöhung eines Schiffes im Seegang. IfS-Bericht Nr. 258, 1970
- [17] Nakamura, S. Shintani, A.: Propulsive Performance of a Series 60  $C_B=0,70$  Ship Model in Regular Head Waves. 12<sup>th</sup> ITTC Rome, 1969
- [18] Brehme, H.: Ursachen der Drehzahlabnahme eines Propellers bei konstanter Leistung im Laufe der Betriebszeit. Schiff + Hafen 11, 1969
- [19] Harvald, S.A.: Gegevens Ter Bepaling Van Het Volgstroom En Zoggetal Bij Het Voorontwerp Van Zeegande Enkelschroefschepen. Schip en Werf Bd. 16, 1949
- [20] Tasai, F.: On the Deck Wetness and Slamming of Full Ship Forms. 12<sup>th</sup> ITTC, Rome, 1969
- [21] Kajitani: Überschlägliche Methode zur Bestimmung der Bugwellenhöhe. (Private Kommunikation im IfS 1970)
- [22] Aertssen, G.: Laboring of Ships in Rough Seas. SNAME Trans. Vol.76, 1968.
- [23] Ochi, M.K.: Extreme Behaviour of a Ship in Rough Seas Transactions SNAME, Vol.72, 1964
- [24] Schenzle, P.: Über die Vorhersage von Slam-Stößen. IfS-Ber. Nr. 190, 1967.
- [25] Gutsche, F.: Einfluß der Tauchung auf Schub und Wirkungsgrad von Schiffspropellern. Schiff und Hafen, Heft 12, 1967
- [26] Janssen, V., Kerlen, H., und Petershagen H.: Beitrag zur Frage des Einflusses der Tauchung auf die Leistungsaufnahme des Propellers. Hansa, Nov. 1968, 105. Jahrgang

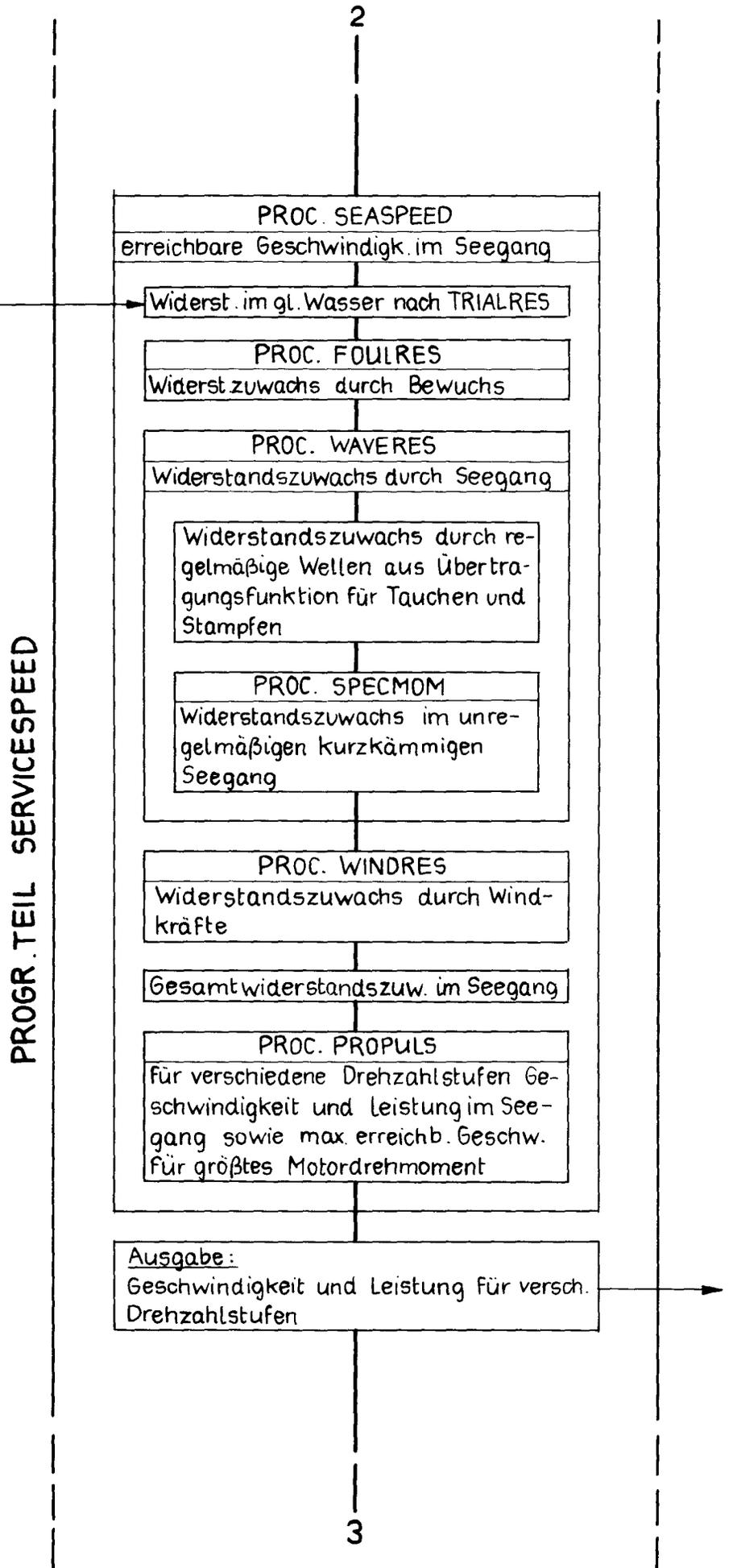
- [27] Grim, O.: Rollschwingung, Stabilität und Sicherheit im Seegang. Schiffstechnik 1952/53, s. 10/20.
- [28] Aertssen, G.: Service- Performance and Seakeeping Trials on M.V. Jordaens. RINA Trans. Vol. 106, 1966.
- [29] Mathews, S.T.: A Critical Review of the 12<sup>th</sup> ITTC Wave Spectrum Recommendations, 13<sup>th</sup> ITTC Seakeeping Session Appendix IX, Berlin Hamburg 1972
- [30] Tsuchida, K., ...: Systematic Resistance and Propulsion Tests with Models of Single Screw, Full-bodied Oil Tankers, Jap. Min. of Transp. Ship Res. Inst. Rep. Vol. 1 No. 6 Transl. Univ. of Mich. Dept. Nav. Arch. Mar. Eng. No. 039, 1969
- [31] Yeh, H.Y.H.: Series 64. Resistance Experiments on High Speed Displacement Forms. Marine Technology, July 1965
- [32] Blume, P., Keil, U., Schenzle, P.,: Widerstandserhöhung im Seegang. IfS-Bericht Nr. 297, Nov. 1973
- [33] Tick, J.L.: Certain Probabilities Associated with Bow Submergence and Ship Slamming in Irregular Seas. Journal of Ship Research 2.1, 1958
- [34] Grim, O.: Bewegungen und Belastungen eines Schiffes im Seegang. IfS-Vorlesungsmanuskript Nr. 3 1973
- [35] van Sluijs, M.F.: Ship Relative Motions and Related Phenomena. Intern. Symp. on The dynamics of marine vehicles and structures in waves, University College London, April 1974

ANHANG :  
BLOCKDIAGRAMM  
ZUM PROGRAMMSYSTEM

**PROGR. PROP-SERIES**  
Auswahlprogramm  
für Propeller nach der  
B-Serie (oder andere)  
Ergebnis:  
Propellerfreif. werte







3

PROGR. TEIL SERVICESPEED

