

Über Formgebung und Widerstand von Katamaranen

Aus dem Institut für Schiffbau, Rostock

Direktor: Dipl.-Ing. S. Kruppa

53. Mitteilung der Schiffbau-Versuchsanstalt*)

Leiter: Dr.-Ing. e. h. W. Henschke

Von Dr.-Ing. R. Vollheim

HAZIRAN 1996

1. Einleitung

Im Verlauf der Weiterentwicklung der Wasserfahrzeuge ist wiederholt die Frage aufgetaucht, ob in diesem oder jenem Fall der Katamaran gegenüber dem Einrumpfschiff zu bevorzugen sei. In einigen Fällen hat das Katamaranprinzip seine Zweckmäßigkeit in der Praxis bereits bewiesen:

- kleine seegehende Boote (Sport, Fischerei u. ä.)
- Fahrgastschiffe und Fähren auf Flüssen
- Schiffe für Spezialzwecke, besonders solche mit Spezialausrüstungen, wie Krane, Bohrtürme usw.

Hierbei wird die große Querstabilität der Doppelrumpfanordnung ausgenutzt. Für Fall a) besteht in erster Linie Sicherheit im hohen Seegang, bei Fall b) und c) sind überwiegend Lasten oben auf dem Schiffskörper angebracht.

In neuerer Zeit wird international der Einsatz des Katamarans als größeres seegehendes Fahrzeug erwogen. Einige Schiffe werden bereits im praktischen Einsatz erprobt, besonders als Fischereifahrzeuge [8] [14] [24] [28] u. [29].

Der Einsatz als Containerschiff wird vorbereitet [26] u. [27].

Eine Bewertung der Gebrauchseigenschaften im Zusammenhang mit konstruktiven Möglichkeiten ist für Fischereifahrzeuge durchgeführt worden [15] [16] [17] [18] [23] u. [25].

Wird von den Katamaranen für spezielle Zwecke abgesehen, so ist zu prüfen, für welche Aufgaben bei größeren Einsatzgebieten die Katamarane eine wirtschaftlichere Lösung ermöglichen als das Einrumpfschiff. Die bisherige Praxis zeigt, daß die an die Stabilität gestellten Forderungen sich prinzipiell auch mit Einrumpfschiffen bei Wahl einer hinreichend großen relativen Breite erfüllen lassen. Die erforderliche Festigkeit des Schiffsverbandes kann sicher erreicht werden; jedoch ist beim Katamaran der größere Bauaufwand nachteilig. Die Herstellungskosten liegen für den Katamaran höher als für das Einrumpfschiff. Der gewünschte Vorteil muß demzufolge durch ein besseres wirtschaftliches Gesamtergebnis, resultierend aus der Differenz von erwirtschaftetem Nutzen und erforderlichem Betriebsaufwand gewonnen werden. Den erreichbaren Nutzen bestimmt die Technologie, beispielsweise des Fischfangs oder des Containertransportes. Dazu kann festgestellt werden, daß sich die besonderen Möglichkeiten, die für den Katamaran geeignet sind, noch im Entwicklungsstadium befinden. Gegenstand dieser Arbeit ist der Entwurf von Katamaranformen, die eine minimale Antriebsleistung erfordern, um günstig auf die Betriebskosten einzuwirken.

Ein einfacher Vergleich gestattet die technischen Möglichkeiten abzugrenzen.

Zunächst werden die für das Einrumpfschiff und den Katamaran erforderlichen Wasserverdrängungen verglichen. Um eine vorgegebene Zuladung zu erreichen, beträgt bisher in der Praxis die Verdrängung des Katamarans das 1,1- bis 1,2fache von derjenigen des Einrumpfschiffes. Es sei jedoch vereinfachend angenommen, daß für beide Schiffstypen die erforderliche Verdrängung zur Erfüllung derselben technischen Aufgabenstellung gleich groß ist. Das bedeutet für die nachfolgenden Betrachtungen eine gewisse Einschränkung, doch können die Zahlenrechnungen im besonderen Fall mit einem beliebigen Verhältniswert für die Verdrängungen wiederholt werden.

Bei der Aufteilung der Verdrängung eines Einrumpfschiffes auf zwei Rümpfe erhält man je nach Definition des Vergleiches — geometrische Ähnlichkeit oder halbe Breite des Schiffskörpers, siehe Bild 1 — eine Vergrößerung der benetzten Oberfläche auf das 1,26- bis etwa 1,5fache. Für die später in dieser Arbeit betrachteten Fischereifahrzeuge von etwa 20 bis 60 m Länge beträgt die Oberflächenvergrößerung $2 S_2/S_1 \approx 1,4$.

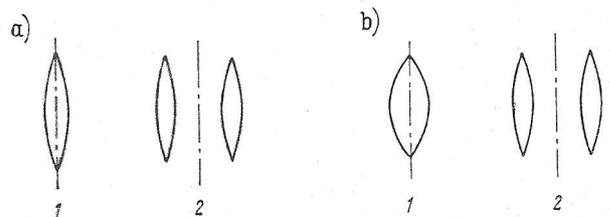


Bild 1. Vergleich der benetzten Oberfläche von Einrumpfschiff und Katamaran

a) Geometrisch ähnliche Schiffskörper

$$2 S_2/S_1 = \sqrt[3]{2} \approx 1,26$$

b) Einrumpfschiff doppelter Breite (Formel von *Munford*)

$$C_{B1} = C_{B2} = 0,6; (B/T)_1 = 3,2; (B/T)_2 = 1,6$$

$$\frac{2 S_2}{S_1} = \frac{2 \cdot [1,7 + C_{B2} \cdot (B/T)_2]}{1,7 + C_{B1} \cdot (B/T)_1} = 1,47$$

Die unvermeidliche Vergrößerung des Reibungswiderstandes muß mit einer Verringerung des Restwiderstandes einhergehen, falls der Gesamtwiderstand gleich groß oder kleiner werden soll. Die Notwendigkeit zu einem geringeren Restwiderstand beeinflusst die Formgebung der Katamaranrümpfe in zwei Richtungen:

- schlanke Formgebung, ohne besondere Rücksicht auf die Stabilität des Einzelrumpfes zu nehmen;
- spezielle Ausbildung der Rümpfe und ihre optimale Zuordnung, damit durch Oberflächenwellen-Interferenz die Verringerung des Widerstandes der Doppelrumpfanordnung gegenüber der Summe der beiden Einzelkörper erreicht wird.

*) Erweiterte Fassung der 52. Mitteilung der Schiffbau-Versuchsanstalt „Untersuchungen zur Formgebung von Katamaranen“, veröffentlicht in der Zeitschrift „Schiffbautechnik“, 18 (1968) 8.

Von Interesse ist der Einfluß des B/T-Verhältnisses auf die Größe der benetzten Oberfläche. Die Betrachtung einer üblichen U-Spantform zeigt, daß das Oberflächenminimum bei B/T-Werten erreicht wird, die für Einrumpffahrzeuge durchschnittlich sind. Im Beispiel von Schimke [16] liegt das Minimum bei $B/T \approx 2,6$ und die Verringerung auf $B/T = 1,6$ hat eine Oberflächenvergrößerung von 3,6% zur Folge. Im Prinzip kommt also die Variation von B/T nicht als Mittel zur Erreichung niedriger Katamaranwiderstände in Betracht.

Die Widerstandsverringerung ist bei dem Katamaran nur durch Verringerung des wellenbedingten Anteils zu erreichen. Der Verringerung der relativen Breite des Katamaranrumpfes gegenüber derjenigen des Einzelrumpfschiffes sind konstruktive Grenzen gesetzt. Wird beispielsweise für die Katamaranrumpfe $L/B = 8,0$ angenommen, um die Schiffsenden nicht zu scharf werden zu lassen, so könnte damit ein Einzelrumpf von $L/B = 4,0$ bis $6,0$ ersetzt werden, falls eine wirksame Verringerung des Wellenwiderstandes erhofft werden soll. Beide Rumpfformen sind technisch real, so daß es aussichtsreich erscheint, für bestimmte Anwendungsfälle Katamaranfahrzeuge vorteilhaft zum Einsatz zu bringen. Die hydrodynamisch gegebenen Möglichkeiten sollen im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden.

2. Literaturstudium

Als erstes sei die Möglichkeit zur Formgebung an Hand bestehender Entwurfsunterlagen für Einrumpfschiffe betrachtet. Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Serienversuche erlauben eine erste Auswahl der Formparameter für den Katamaranentwurf zu treffen. Dabei wird der Katamaranwiderstand aus den Widerständen der beiden Einzelrumpfe zusammengesetzt, ohne die gegenseitige Beeinflussung zu berücksichtigen. Die Auswahl aus den vorhandenen Serienversuchen richtet sich nach den einzusetzenden Schiffstypen, wobei der Mangel hinzunehmen ist, daß bisher keine Serienversuche für ausgesprochene Katamaranformen durchgeführt worden sind und zunächst die Formen in Anlehnung an bekannte Schiffstypen ausgewählt werden müssen. Unter Zugrundelegung von normierten Schiffstypen geben *Guldhammer* und *Harvald* [10] ausgewählte Restwiderstandsbeiwerte an, die aus den bekannten Serienversuchen gewonnen worden sind. Mit diesen Werten, die auszugsweise in Bild 2 wiedergegeben sind, soll im Abschnitt über den Entwurf eine Betrachtung zur Auslese günstiger Formen aus der Vielzahl der möglichen Formen durchgeführt werden.

Im beschränkten Umfang gestatten die bekannten Unterlagen der Versuchsserien auch Rückschlüsse auf die Wahl der Hauptspantform, insbesondere des B/T-Verhältnisses. Nach Werten von *Gertler* [9] ist der Einfluß von B/T auf den Restwiderstandsbeiwert in Bild 3 dargestellt. *Guldhammer* und *Harvald* geben für die in Bild 2 gezeigten Restwiderstandsbeiwerte, die auf

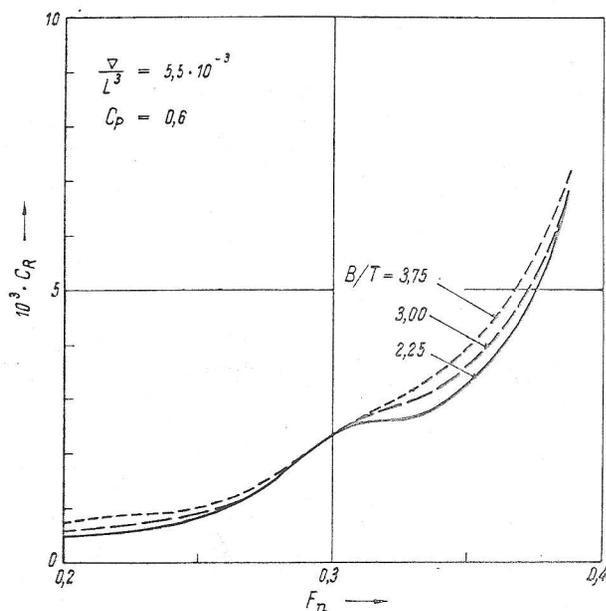


Bild 3. Restwiderstandsbeiwerte in Abhängigkeit von B/T nach Gertler [9]

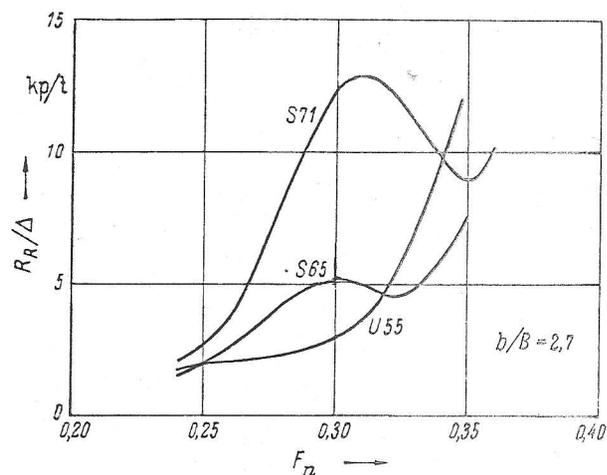


Bild 4. Spezifischer Restwiderstand der Katamaran-Modelle von Schimke und Puchstein [19]

B/T = 2,5 bezogen sind, folgende Korrekturformel zur Berücksichtigung des B/T-Einflusses an

$$\frac{\partial(C_R)}{\partial(B/T)} = 0,12 \cdot 10^{-3}$$

Der zahlenmäßige Einfluß von der B/T-Variation auf den Widerstand ist gering.

Der Einfluß des Spantcharakters auf den Widerstand

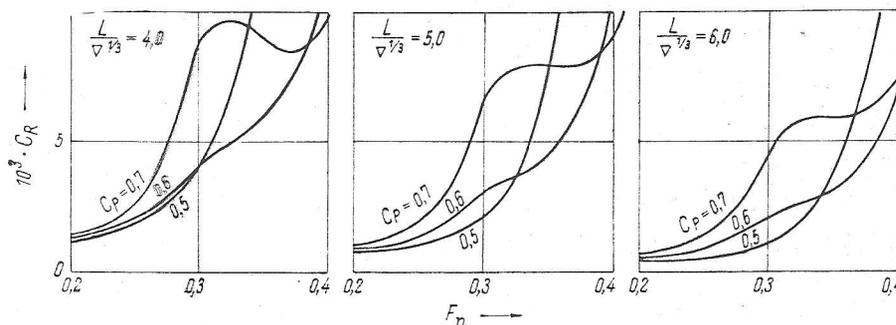


Bild 2. Restwiderstandsbeiwerte in Abhängigkeit von der Völligkeit nach Guldhammer und Harvald [10]

des Katamarans ist über den bisher bekannten Rahmen hinaus nicht eindeutig bewiesen. Meßergebnisse von Katamaranmodellen mit unterschiedlichem Spantcharakter und gleichzeitig variiertes Völligkeit, s. Tafel 1, teilen Schimke und Puchstein [19] mit. Bild 4 zeigt den Verlauf des spezifischen Restwiderstandes der 3 Modelle

- U 55: U-Spant, $C_B = 0,550$
- S 65: S-Spant, $C_B = 0,654$
- S 71: S-Spant, $C_B = 0,706$

Die Minima im Kurvenverlauf sind typisch für schlanke, völlige Schiffe im Bereich $0,3 < F_n < 0,4$ und können unter Zugrundelegung von Bild 2 auch durch eine Variation von C_P gedeutet werden, so daß die Rückschlüsse auf den Einfluß des Spantcharakters nicht eindeutig sind.

Tafel 1. Modellabmessungen von früheren Untersuchungen

	Schimke — Puchstein [19]			Eggers [6]		Chiang Wei-chong [2]
	U 55	S 65	S 71	(schmal)	(dick)	
L in m	3,067	3,067	3,067	2,0	2,0	2,25
C_B —	0,55	0,654	0,706	0,6	0,6	0,611
C_P —	0,577	0,682	0,733	0,667	0,667	0,645
L/B —	6,48	7,67	7,67	16,0	8,0	8,18
B/T —	1,09	0,909	0,909	1,25	2,5	1,67
$L/\sqrt[3]{\Delta}$ —	4,35	4,33	4,22	7,05	5,73	5,67

Als zweites ist die Senkung des Katamaranwiderstandes durch günstige gegenseitige Beeinflussung der Wellenbildung an den Schiffsrümpfen zu betrachten. Die Beeinflussung zweier auf der Wasseroberfläche parallel geführter Körper ist Gegenstand einer Reihe prinzipieller Untersuchungen gewesen.

Im Jahre 1926 hat Barillon [1] Schleppversuche mit Anordnungen von zwei und mehr Modellen durchgeführt. Der Einfluß der Transversal- und Longitudinalwellen eines Modelles auf den Widerstand des anderen sind gemessen worden.

Im Jahre 1936 hat Havelock [11] die potentialtheoretische Berechnung des Wellenwiderstandes von zwei parallel im Abstand $2k$ und in einer Entfernung f unter der Wasseroberfläche geführten Dipolen angegeben.

Das Dipolmoment ist $M = \frac{1}{2} \cdot b^3 \cdot c$, mit b als Kugelradius und c als Anströmgeschwindigkeit. Bei Variation des Abstandes $2k$ ergibt sich folgende Widerstandsvergrößerung R/R_∞ gegenüber den unendlich weit voneinander entfernten Kugeln, bei $c/\sqrt{g \cdot f} = 1$:

$2k/f$	1	2	4	∞
R/R_∞	1,73	1,29	1,05	1

Auf R/R_∞ haben b und M keinen Einfluß. Der rechnerisch gefundene Einfluß der Froudezahl auf R/R_∞ ist im Bereich $0,6 < F_n < 1,4$ vernachlässigbar.

Eggers [6] führt 1955 die Berechnung des Wellenwiderstandes für schiffsähnliche Körper der Oberflächenform $\eta = (1 - \xi^2) \cdot (1 - \xi^9)$ durch und vergleicht die Ergebnisse mit denen von Modellversuchen. Bild 5 zeigt den Einfluß des relativen Abstandes b/L und der Schiffsproportionen L/B und B/T auf den Widerstand bei der Froudezahl $F_n = 0,316$, die günstig bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung ist. Bei $F_n = 0,5$ ist ausschließlich $R/R_\infty > 1$. Tafel 1 enthält ebenfalls die Daten der von Eggers und der von dem folgenden Autor untersuchten Modelle.

Chiang Wei-chong [2] setzt 1965 diese Arbeit fort, indem er zu einem Schiff mit technischer Formgebung den

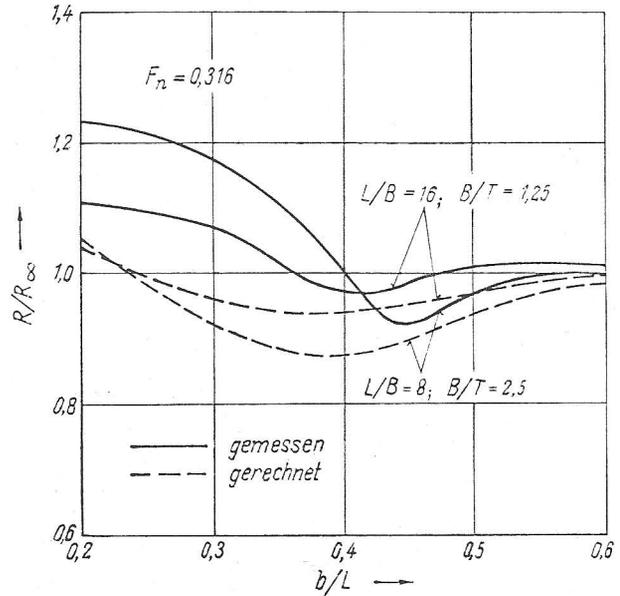


Bild 5. Widerstandsverringerng beim Katamaran nach Eggers [6]

Tafel 2. Widerstandsverringerng beim Katamaran nach Chiang Wei-chong [2]. Der Bereich mit $R/R_\infty < 1$ ist gestrichelt eingegrenzt

$\frac{b}{L}$	$\frac{b}{B}$	$F_n =$	0,298	0,320	0,341	0,362	0,384
Berechnung nach Michell — Havelock							
0,21	1,75	$\frac{R}{R_\infty} =$	1,26	0,90	0,75	0,97	1,27
0,24	2,0		1,15	0,82	0,74	1,02	1,31
0,28	2,25		1,07	0,78	0,77	1,11	1,35
0,31	2,5		1,01	0,77	0,84	1,17	1,36
0,34	2,75		0,97	0,79	0,91	1,20	1,35
0,40	3,25		0,93	0,86	1,00	1,21	1,29
0,49	4,0		0,93	0,94	1,05	1,17	1,21
0,58	4,75		0,95	0,98	1,04	1,12	1,15
Modellversuche							
0,21	1,75		1,12	1,22	1,32	1,37	—
0,24	2,0		1,12	1,21	1,23	1,20	1,23
0,28	2,25		1,11	1,19	1,13	1,11	1,10
0,31	2,5		1,11	1,16	1,08	1,04	1,06
0,34	2,75		1,10	1,11	1,03	1,00	1,04
0,40	3,25		1,08	1,04	0,95	0,97	1,09
0,49	4,0		1,04	0,94	0,89	1,00	1,15
0,58	4,75		0,99	0,95	0,95	1,07	1,20

Wellenwiderstand nach der linearisierten Theorie berechnet und auch Modellversuche durchführt. Den Vergleich der sich in beiden Fällen ergebenden Gesamtwiderstände zeigt Tafel 2. Wie auch bei Eggers sind Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Werten festzustellen. Gegenüber den theoretischen Werten für die Widerstandsverringerng treten die experimentell erreichten Verhältnisse $R/R_\infty < 1$ in einem Bereich größerer Rumpfabstände auf, etwa $b/L = 0,45$ bis $0,5$. Auch ist die im Versuch zu $R/R_\infty \approx 0,9$ erreichte Widerstandsverringerng kleiner als die errechnete.

Die bisher aufgeführten Autoren führten die Untersuchung des Widerstandes basierend auf der empirischen Methode der Aufteilung in Plattenreibung und Restwiderstand durch. Diese Methode hat bekanntlich ihre Grenzen und gewährleistet die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Modell auf die Großausführung, soweit keine besonderen, von der Reynoldszahl abhängigen Effekte auftreten.

Dubrowskij [5] unterteilt empirisch den Restwiderstand in einen Form- und einen Wellenanteil und gibt für beide Anteile getrennte Faktoren zur Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Katamarankörper an. Es wird für das Einrumpfschiff

$$C_{R1} = C_{Form} + C_{Welle}$$

und für das Doppelrumpfschiff

$$C_{R2} = k_f \cdot C_{Form} + k_w \cdot C_{Welle}$$

gesetzt, wobei Durchschnittswerte für die Koeffizienten

$$k_f, k_w = f \left\{ \frac{(b - B/2)}{L_{PP}}, F_n \right\}$$

gelten. Der Anwendungsbereich liegt im Bereich $9,0 < L/B < 25$.

Durch Messungen von Dellefs [4] und die Analogieversuche von Friedrichs [7] wird auf die Erscheinung der „Wasserschwallbildung“ zwischen den Rümpfen hingewiesen, wenn auch keine Schlußfolgerungen auf den Einfluß der Widerstandsentstehung gezogen werden. Über Besonderheiten des zähigkeitsbedingten Widerstandsanteiles bei Katamaranen liegen keine Untersuchungen vor.

Die Wirkung von 2 parallel fahrenden Schiffen aufeinander beim Überholvorgang bietet Parallelen zum Katamaran. Quell-Senken-Oberflächenverteilungen und Kraftwirkungen für 2 parallel bewegte elliptische Zylinder im unendlich ausgedehnten Medium, d. h., ohne Wellenbildung, teilt Collatz [3] mit und vergleicht die Ergebnisse mit aus der Praxis gewonnenen Werten.

Die analysierten Arbeiten betreffen nur den Widerstand im glatten Wasser, herrührend von der Feststellung, daß für größere Fahrzeuge eine Widerstandsverringernug notwendig ist. Auch über die anderen hydrodynamischen Eigenschaften, wie Seegangs- und Manövrierverhalten, liegen bereits allgemeine Betrachtungen vor, worauf nicht eingegangen wird.

3. Modellentwürfe und Versuchseinrichtungen

Den Formentwürfen hat die Aufgabenstellung für ein Katamaran-Erprobungsschiff der Länge $L_{PP} = 55$ m und der Dienstgeschwindigkeit $V = 15,5$ kn zugrunde gelegen. Das erste Modell, Nr. 480, ist vorwiegend nach hydrodynamischen Gesichtspunkten entworfen worden. Die Konstruktion dieses Schiffsrumpfes im Rahmen eines technischen Entwurfes von Puchstein [15] zeigt Besonderheiten für die bauliche Ausführung der scharfen Schiffsenden. Mit einer Serie von 3 Modellen, Nr. 487, 488, 489, wird die Möglichkeit zur Verbreiterung der Rumpfe geprüft.

Die Spantflächenkurven sind nach Taylor gewählt worden, s. Bild 6. Für den Auslegungszustand ist $F_{n_{PP}} = 0,343$. Dem entsprechen im Hinblick auf Katamaranentwürfe kürzerer Länge folgende Dienstgeschwindigkeiten:

L_{PP} in m	20	30	40
V in kn	9,3	11,4	13,2.

Den Linienschnitt des Modells Nr. 480 zeigt Bild 7. Die Modelle Nr. 487 und 489 werden durch geometrische Verzerrung von Modell Nr. 488 gewonnen, s. Bild 8. Die Abmessungen der vier Modelle enthält Tafel 3.

Die Modellrumpfe Nr. 480 sind aus Paraffin gefertigt, die Rumpfe Nr. 487, 488, 489 aus Holz mit lackierter Oberfläche. Bei allen Modellen ist auf Spant 19 ein Draht von 0,9 mm Durchmesser zur Turbulenzerzeugung angebracht.

Mit den Modellen werden eine Reihe von Versuchen zur Beobachtung des Umströmungszustandes durchgeführt. Der Trimmzustand wird mittels Meßplatten an Modell und Wagen bestimmt. Die Wellenbildung wird am Raster auf der Schiffsoberfläche von $\Delta z = 60$ mm und $\Delta y = 200$ mm abgelesen, s. Bild 9.

Zur Messung der statischen Drucke sind Löcher von 2 mm Innendurchmesser im Rumpf angebracht, die sich am Modell Nr. 480 185 mm unter der Wasserlinie des ruhenden Modells und am Modell 488 entsprechend bei 164 mm befinden. Am Modell Nr. 480 wird die Geschwindigkeitsverteilung mittels Prandtlrohr gemessen, an den Modellen Nr. 487, 488 und 489 mit Gesamtdruckrohren, die im Abstand von 50 mm gegenüberliegend zu den statischen Druckbohrungen angebracht sind.

Zur Messung des Nachstromfeldes werden Sonden für den gesamten und den statischen Druck eingesetzt. Aus bis zu 20 Stück dieser Einzelsonden wird eine Kammer-sonde aufgebaut, die den Tiefenbereich von 1 m überstreicht. Zur Druckanzeige ist ein 20fach Manometer eingesetzt. Sonden und Manometer sind Sonderanfertigungen und in ihren Abmessungen rechnerisch so aufeinander abgestimmt, daß eine Einstellzeit der Anzeige von maximal 10 Sekunden erreicht wird. Eine Übersicht des Versuchsaufbaus für Trimm-, Wellenkontur- und Nachstrommessung gibt Bild 10.

Die Aufnahmen der Schaumbildung sind mit einer mit dem Wagen mitbewegten Kamera angefertigt worden.

Der Widerstand des Modells wird mechanisch mittels Wägung bestimmt.

Bei den Propulsionsversuchen mit Modell Nr. 488 (mit Ruder) werden folgende Propeller eingesetzt:

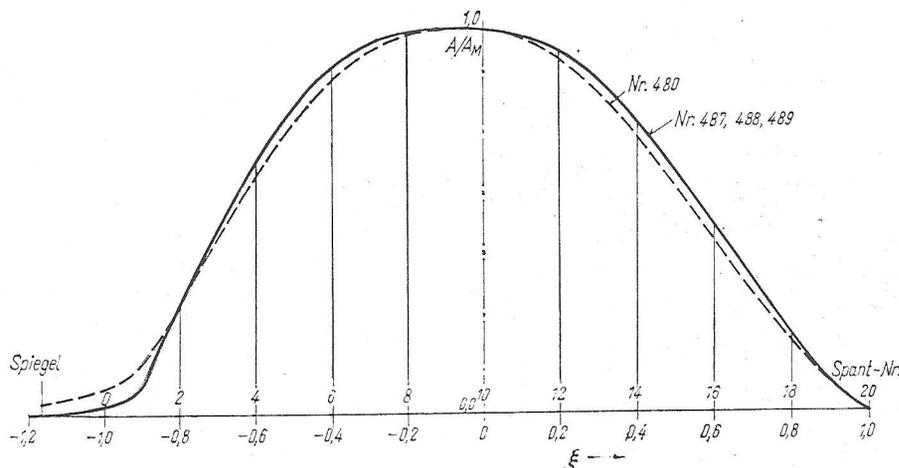


Bild 6
Dimensionslose Spantflächenverteilung
der Modelle Nr. 480, 487, 488, 489

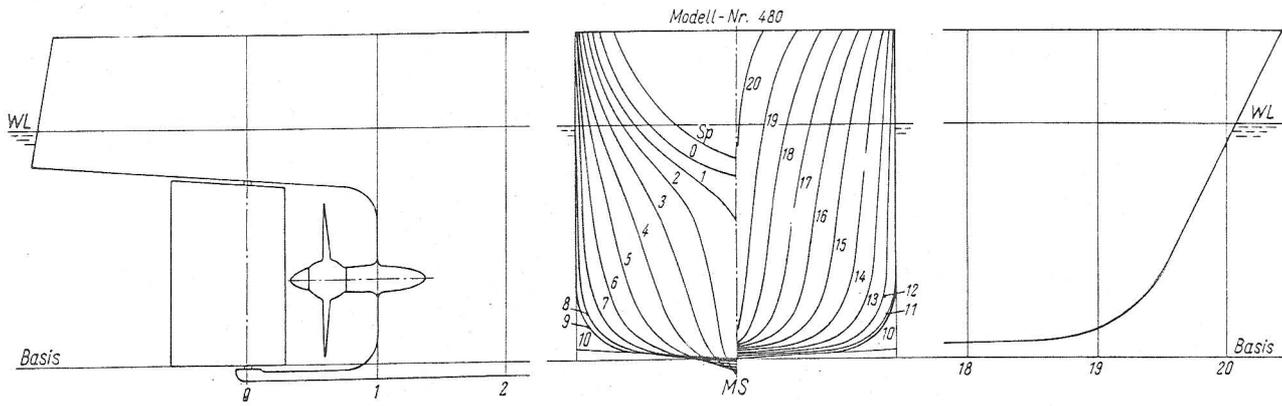


Bild 7. Spanriß, Bug- und Heckkontur des Modells Nr. 480

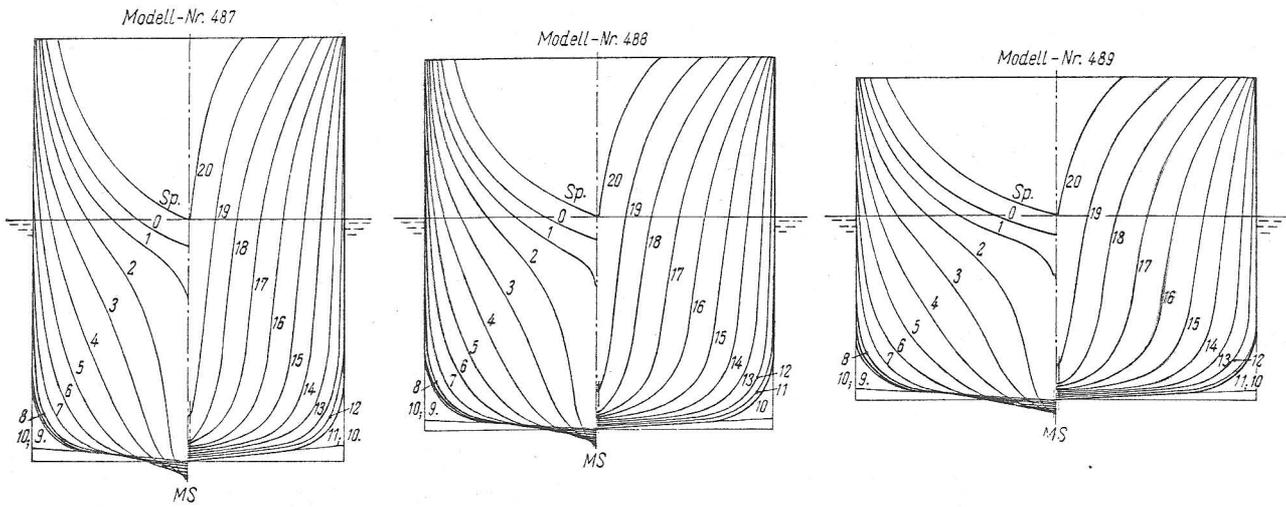


Bild 8. Gegenüberstellung der systematisch verzerrten Spanrisse der Modelle Nr. 487, 488 und 489

Tafel 3. Modellsreihe

Modell Nr.	480	487	488	489
L _{PP} m	4,074	4,0	4,0	4,0
L _{WL} m	4,423	4,327	4,327	4,327
B m	0,4960	0,4706	0,5333	0,6154
T m	0,3700*)	0,3712	0,3275	0,2838
S ₂ m ²	3,790	3,582	3,425	3,363
∇ ₂ m ³	0,4434	0,4172	0,4172	0,4172
LCB vor AP				
bezogen auf L _{PP}	0,485	0,480	0,480	0,480
αEintritt °	20,4	20,7	23,3	26,7
C _{BPP}	0,5931	0,5972	0,5972	0,5972
C _M	0,9590	0,9513	0,9513	0,9513
L _{PP} /B	8,214	8,5	7,5	6,5
B/T	1,341	1,268	1,628	2,168
C _{PWL}	0,5696	0,5803	0,5803	0,5803
10 ³ · ∇ ₂ /L _{WL} ³	5,12	5,15	5,15	5,15
L _{WL} /∇ ₂ ^{1/3}	5,80	5,79	5,79	5,79

*) Dieser Tiefgang entspricht dem Beladungsfall nach [15]

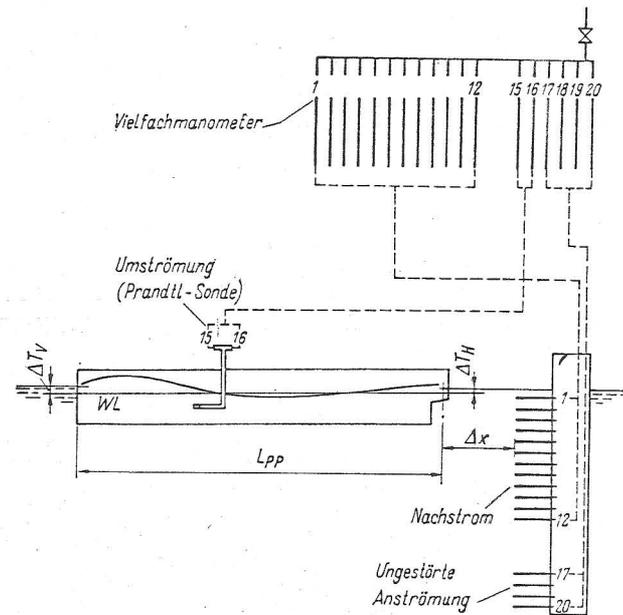
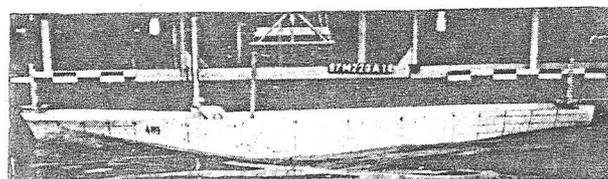


Bild 10. Versuchsaufbau für die Nachstrommessung am Katamaranmodell Nr. 480

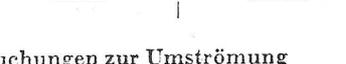
Bild 9. Messung der Wellenkontur am Einzelmodell Nr. 489;
V = 2,3 m/s; F_{NWL} = 0,353

Modellschrauben Nr. VP 1090 R und VP 1090 L,
 $D = 0.240$ m, Typ SVA-GAWN, verstellbar
 Drehsinn: Steuerbord rechts und Backbord links,
 3 Flügel, Steigungsverhältnis $P/D = 0.7$
 Flächenverhältnis $A_D/A_0 = 0.50$.

In jedem Rumpf ist ein Innenantriebsgerät angebracht.
 Beide besitzen einen gemeinsamen Antrieb. Die Messung
 von Schub und Drehmoment geschieht für jede Schraube
 getrennt.

Der Einfluß des B/T -Verhältnisses wird nur im Wider-
 standsversuch mit den Einzelmodellen Nr. 487, 488, 489
 bestimmt.

Folgende Rumpfabstände werden gewählt:

Modell	$\frac{b}{L_{PP}}$	$\frac{b}{B}$	Darstellung
Nr. 480	0,30	2,464	
Nr. 488	0,20	1,500	
Nr. 488	0,25	1,875	
Nr. 488	0,30	2,250	
Nr. 488	0,35	2,625	

4. Physikalische Untersuchungen zur Umströmung des Katamarans

Ziel dieser Untersuchungen sind die hydrodynamischen
 Kraftwirkungen auf den Katamaran. Wie die Analyse
 der Ergebnisse von *Eggers* [6] und *Chiang Wei-chong* [2]
 zeigte, weichen die in Rechnung und Modellversuch ge-
 wonnenen Empfehlungen über die günstigste Wahl des
 Rumpfabstandes sehr voneinander ab. Während zum
 Entwurf von Einzelrumpfschiffen die Vorausbestim-
 mung der Kraftwirkungen mittels Modellversuch in be-
 stimmten Grenzen ohne genaue Kenntnis der Einzelvor-
 gänge genügend genau gelöst ist, soll zur Anwendung
 dieser Methodik für Katamarane der Umströmungszu-
 stand im einzelnen untersucht werden. Von Interesse
 sind dabei diejenigen Erscheinungen, die gegenüber dem
 Einrumpfschiff andersartig sind und Schlußfolgerungen
 für die Formgebung zulassen.

Unsymmetrie der Strömung

Die Beobachtung der bewegten Wasseroberfläche läßt
 deutlich die an den beiden Schiffsseiten unterschiedliche
 Wellenbildung und die nach innen gerichtete Umströ-
 mung an beiden Hecks erkennen. Die gegenseitige Be-
 einflussung der Schiffskörper hat eine Unsymmetrie des
 Druckfeldes am Einzelrumpf zur Folge.

Eine näherungsweise Abschätzung der gegenseitigen
 Beeinflussung der Stromlinienkrümmung gibt Aufschluß
 über die zu erwartenden Größenordnungen. Die Rei-
 bungseffekte am Schiffskörper beeinflussen die Strömung
 vorwiegend in seiner unmittelbaren Nähe und so ist es
 zulässig, den Einfluß der Verdrängungswirkung des einen
 Schiffskörpers auf das Strömungsfeld des anderen mittels
 der Potentialtheorie zu behandeln. Die Unterwasser-
 schiffe des Katamarans werden vereinfachend durch
 zwei tiefgetauchte, längliche Körper von doppelter
 Spantfläche mittels linienhaften Quell-Senken-Vertei-
 lungen nachgebildet. Die Quellenintensität folgt aus der
 Spantflächenkurve, dimensionslos dargestellt, zu

$$\frac{1}{V \cdot L} \cdot \frac{dQ}{dx_Q} = 2 \cdot \frac{d\left(\frac{A}{L^2}\right)}{d\left(\frac{x_Q}{L}\right)}$$

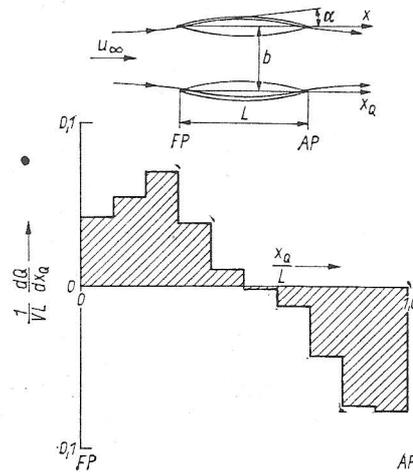


Bild 11. Angenäherte Darstellung der Schiffsförmung des Katamaranmodells
 Nr. 488 durch eine linienförmige Quell-Senken-Verteilung Q auf
 der Schiffsachse x_Q

siehe Bild 11, wobei Q in m^3/s die Quellstärke und x_Q in
 m die Koordinate der Quellanordnung auf der x -Achse
 ist. Die Neigung α der Stromlinie gegenüber der x -Achse
 errechnet sich unter Vernachlässigung der x -Kompo-
 nenten der induzierten Geschwindigkeiten zu

$$\alpha \approx \tan \alpha \approx \frac{\Delta u_y}{V} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{b}{L} \cdot \int_0^1 \frac{d\left(\frac{2A}{L^2}\right)}{d\left(\frac{x_Q}{L}\right)} \cdot d\left(\frac{x_Q}{L}\right) \frac{1}{\left[\left(\frac{x}{L} - \frac{x_Q}{L}\right)^2 + \left(\frac{b}{L}\right)^2\right]^{3/2}}$$

Die Koordinaten der Stromlinie $y(x)$ ergeben sich aus

$$y = \int_0^x \tan \alpha \cdot dx$$

Die Zahlenrechnung wird schrittweise durchgeführt,
 wie in Bild 11 bereits angedeutet worden ist. Bild 12
 zeigt die für das Modell Nr. 488 errechneten Stromlini-
 neigungen. Da es sich um eine räumliche Strömung
 handelt, sind die Neigungen relativ gering. Der gekrüm-
 mte Stromlinienverlauf in unmittelbarer Um-
 gebung der Schiffsachse kann in erster Näherung durch
 Schiffskörper mit gekrümmter Mittelachse oder durch
 solche mit unsymmetrischer Spantform nachgebildet
 werden.

Für das Modell Nr. 488 mit $b/L_{PP} = 0.3$, $B/L_{PP} =$
 0.1332 würde sich bei der letzteren Methode der in
 Bild 13 gezeigte Spantriß vom Vorschiff mit einer
 relativen Mittenverschiebung von $\Delta y/L_{PP} = 0.0055$
 ergeben, d. h. die eine Schiffshälfte würde 8.6% breiter
 sein, als die andere.

Die Modellversuche sind bei dieser Arbeit zunächst nur
 mit geraden, symmetrischen Rumpfen durchgeführt
 worden.

Trimm und Wellenbildung

Die gemessene Vertrimmung der Modelle Nr. 487, 488,
 489 mit Variation des Rumpfabstandes zeigt Bild 14.
 Die Ablesungsgenauigkeit beträgt 1 mm. Im Rahmen
 dieser Genauigkeit können die Meßwerte für die 3 Ein-
 zelmodelle zu einer Kurve zusammengefaßt werden.
 Ebenfalls fallen die Meßwerte der Katamarane nach Mo-
 dell Nr. 488 mit $b/L = 0.25$; 0.30 und 0.35 zusammen.

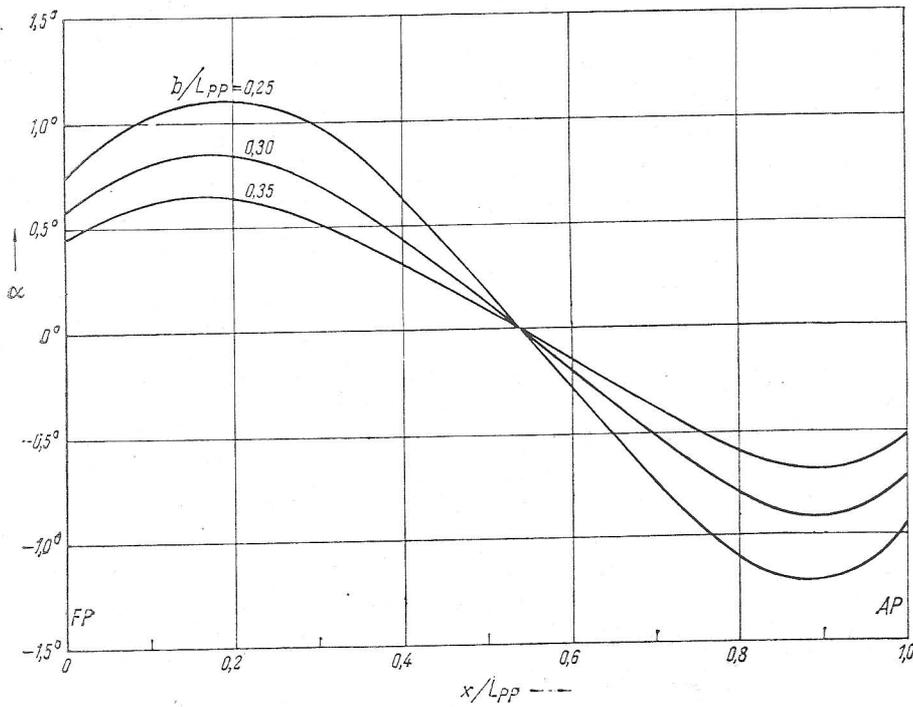


Bild 12

Die Neigung der Stromlinien gegen die Mittelachsen der Katamaranrümpfe in Abhängigkeit vom relativen Rumpfabstand b/L_{PP}

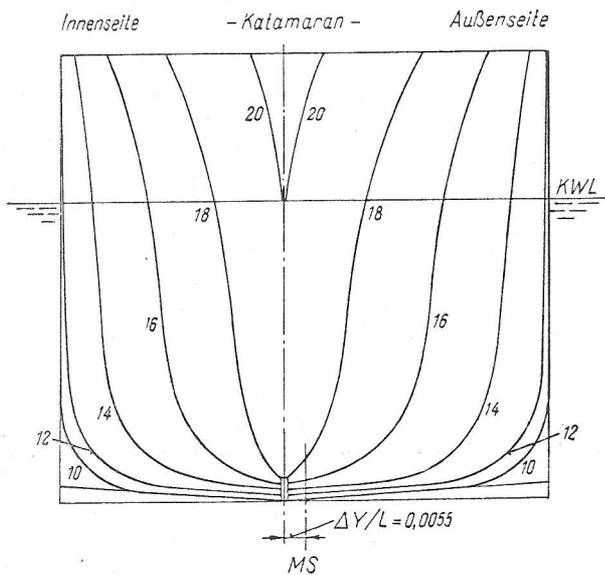


Bild 13. Ersatz der Schiffsförm mit gekrümmtem Wasserlinienverlauf durch eine Förm mit geradem Kiel und unsymmetrischem Spantriß für das Katamaranmodell Nr. 488, $b/L_{PP} = 0,3$, $B/L_{PP} = 0,1332$

Der Trimmzustand ist sowohl bei den Widerstands- als auch bei den Propulsionsversuchen der gleiche.

Die Anordnung der Einzelrümpfe zu einem Katamaran hat demzufolge eine Veränderung des Trimmzustandes zur Folge, die Eintauchung wird größer.

Die Wellenkonturen an Schiffsinnen- und -außenseite sind für das Katamaranmodell Nr. 488 bei variiertem b/L_{PP} beim Widerstands- und beim Propulsionsversuch gemessen und in Bild 15 maßstäblich aufgezeichnet worden. Die Ablesegenauigkeit beträgt ± 3 mm. Es zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Wellenverläufen bei Widerstands- und Propulsionsversuch, auch die später diskutierte Schaumbildung ist in beiden Fällen gleich.

Während die Wellenbilder an der Schiffsaußenseite nur geringfügig voneinander abweichen, zeigt sich an den Schiffsinnenseiten deutlich der Einfluß des Rumpfabstandes.

Die Gleichheit der Ergebnisse von Widerstands- und Propulsionsversuch deutet darauf hin, daß auch die Katamaranumströmung nicht wesentlich durch die Schraubenwirkung beeinflusst wird.

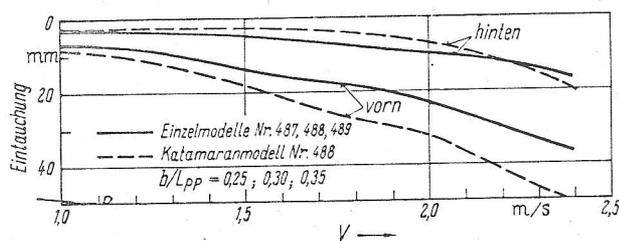


Bild 14. Trimmzustand der Einzelmodelle und der Katamarane, der Modelle Nr. 487, 488, 489. Die im Widerstandsversuch und mit dem selbstangetriebenen Katamaranmodell Nr. 488 gemessenen Eintauchungen sind zu einer Kurve zusammengefaßt worden

Geschwindigkeits- und Druckverteilung bei Widerstandsversuchen

Systematische Meßergebnisse über Druck und Geschwindigkeit zeigt Bild 16. Diese Messungen sollen den Einfluß des Rumpfabstandes beim Katamaranmodell Nr. 488 zeigen. Die Sonden sind nur an 4 Spanten angeordnet. Die Zahl der Meßpunkte genügt nicht, um eine Integration der Druckverteilung vornehmen zu können. Die einzelnen Punkte werden durch Geraden verbunden. Der auf diese Weise angenähert dargestellte Druckverlauf gestattet jedoch eine Deutung der später im Widerstandsversuch erhaltenen Widerstandsbeiwerte.

Die Druckverläufe an der Außenseite des Rumpfes lassen sich für alle Rumpfabstände zu einer Kurve zusammenfassen, ähnlich wie es auch für die Wellenbilder an der Schiffsaußenseite möglich gewesen ist. Das Abfallen der Gesamtdrucke mit wachsender Lauflänge hängt mit der

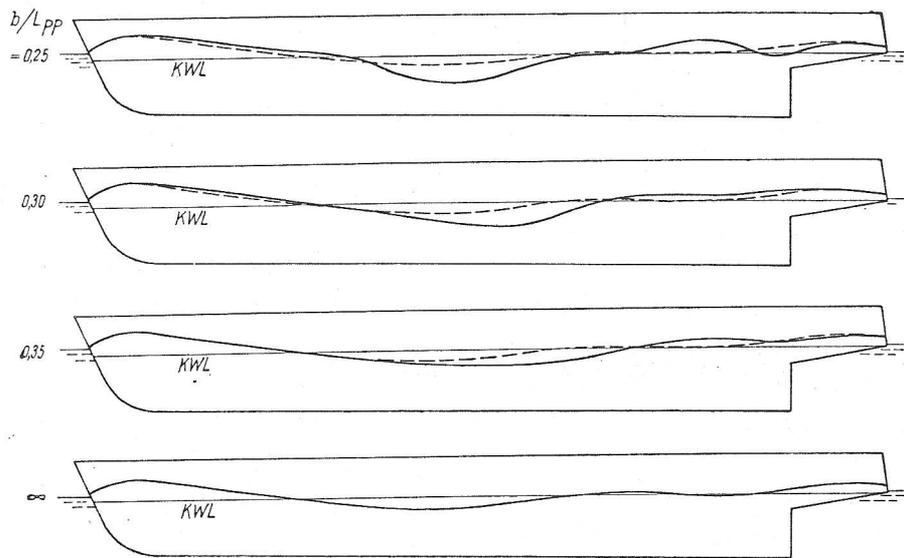


Bild 15

Wellenkonturen an der Innen- und Außenseite der Katamaranrümpfe, Modell Nr. 488, bei variiertem Rumpfabstand $b/L_{PP} = 0,25$ bis ∞ und der Froudezahl $F_{nWL} = 0,322$

— Wellenkontur an der Rumpfinnenseite
 - - - Wellenkontur an der Rumpfaußenseite

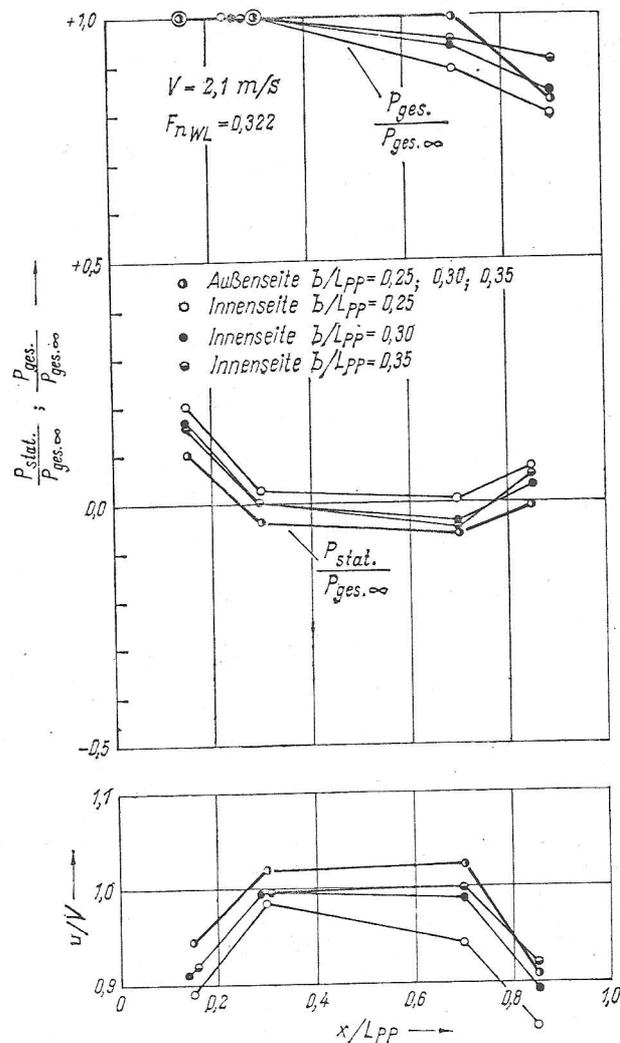


Bild 16. Druck- und Geschwindigkeitsverteilung an Rumpfinnen- und -außenseite am geschleppten Katamaranmodell Nr. 488 bei variiertem Rumpfabstand $b/L_{PP} = 0,25$ bis $0,35$ und der Froudezahl $F_{nWL} = 0,322$. Die an der Schiffsaußenseite gemessenen Werte sind für die drei Abstände b/L_{PP} zu einer Kurve zusammengefaßt worden

Grenzschichtausbildung und dem besonderen Ort, an dem die Gesamtdrucksonden angeordnet sind, zusammen. Die Unterschiede rühren von dreidimensionalen Grenzschichteffekten her.

Die für den Entwurf sehr wichtige Frage der Widerstandsverringerung durch gegenseitige Beeinflussung der Rümpfe muß erwartungsgemäß durch den Druckverlauf beantwortet werden können. Dieser Effekt tritt, wie Bild 16 zeigt, nur sehr schwach in Erscheinung. Der entsprechende Druckverlauf liegt in Bild 16 bei $V = 2,1 \text{ m/s}$ und $b/L_{PP} = 0,35$ vor. Dieser Zustand zeichnet sich durch hohen statischen Druck an der Innenseite des Hinterschiffes aus und weist die geringsten Geschwindigkeitsgradienten bei der Verzögerung auf.

Die Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Rümpfen wird mit abnehmendem Rumpfabstand merklich kleiner.

Nachstrommessung

Hinter dem Katamaranmodell Nr. 480 ist bei 3 Geschwindigkeiten im Abstand von $0,14 \cdot L_{PP}$ hinter Spant 0 in einer zur Schiffslängsachse senkrechten Ebene die Verteilung vom statischen und gesamten Druck gemessen worden.

Die Strömung weist Oberflächenwellen auf, ist dreidimensional und verlustbehaftet. Bild 17 zeigt die mittels des ungestörten Staudrucks dimensionslos dargestellten Gesamtdruckanzeigen und statische Druckanzeigen. Während am Manometer der örtliche Gesamtdruck nahezu unbeeinflusst von den Oberflächenwellen angezeigt wird, tritt bei der statischen Druckanzeige in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe der Sonde ein Fehler auf, wie in Bild 18 demonstriert wird. Diese Erscheinung ist auch bei den Meßergebnissen von Sharma [21] zu beobachten. In der Strömung mit Wellenbewegung beträgt der statische Druck

$$p = p_0 + g \cdot \rho \cdot (\zeta - \zeta_0) + \int_{\zeta_0}^{\zeta} \left(\frac{\partial p}{\partial \zeta} \right) \cdot d\zeta$$

Dicht unter der Wasseroberfläche herrscht an der Sonde I der Druck

$$p_1 \approx p_0 + g \cdot \rho \cdot (\zeta_1 - \zeta_0)$$

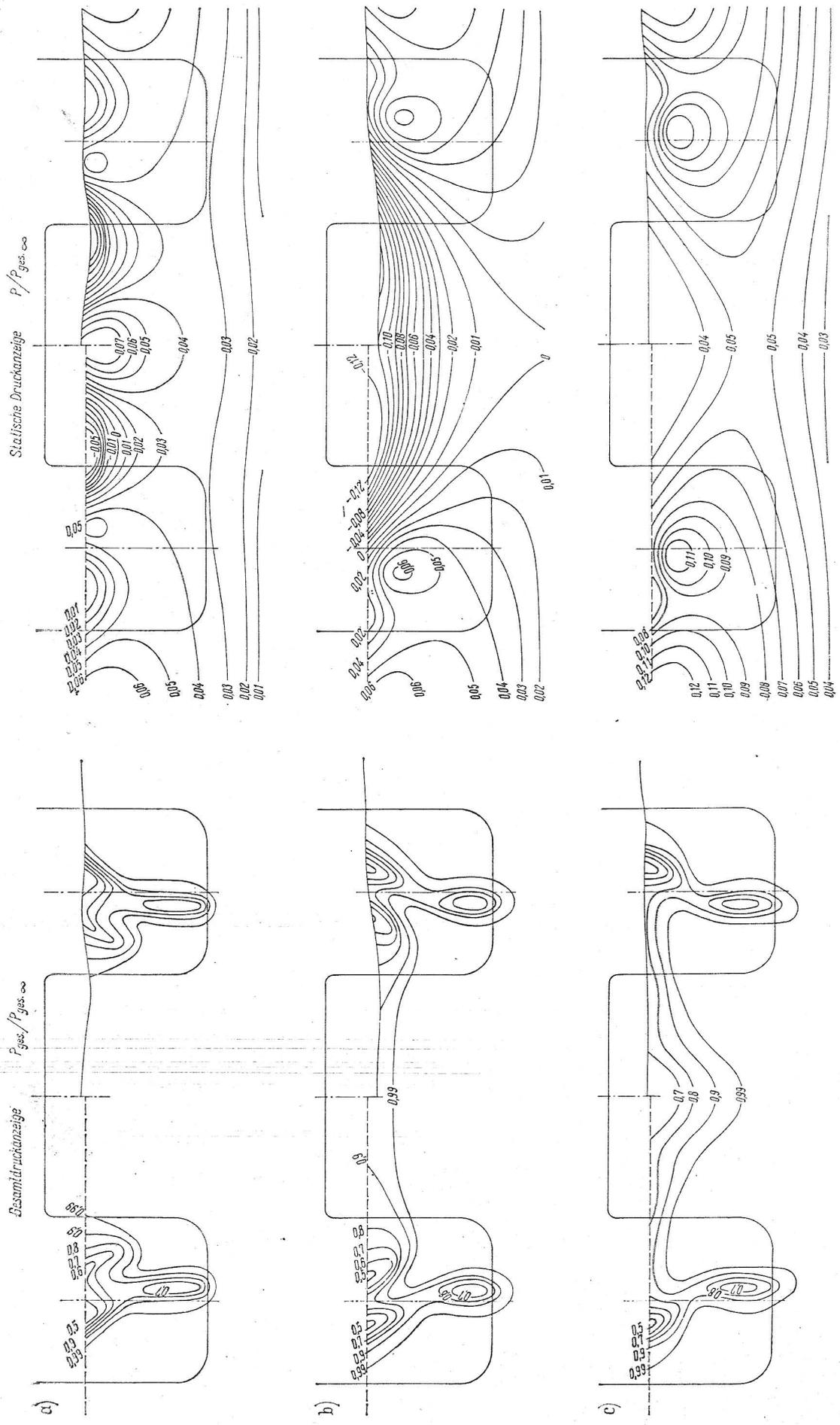


Bild 17. Gesamte und statische Druckverteilung ohne Fehlerkorrektur hinter dem Katamaranmodell Nr. 480, b/L_{pp} = 0.3, im Abstand von 0.14 · L_{pp} hinter Spant 0, bei den 3 Fahrtzuständen:
 a) $V = 2.0$ m/s, $F_{nWL} = 0.303$; b) $V = 2.2$ m/s, $F_{nWL} = 0.334$; c) $V = 2.4$ m/s, $F_{nWL} = 0.364$

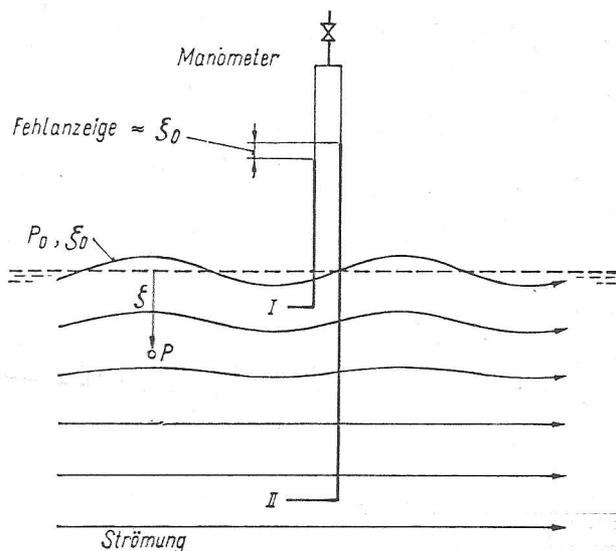


Bild 18. Erklärung der Fehlanzeige am Manometer bei der Messung des statischen Druckes in einer dreidimensionalen, reibungsbehafteten Strömung mit Oberflächenwellen

und in hinreichender Tiefe, wo der Einfluß der Wellenbewegung nicht mehr spürbar ist

$$p_{II} = p_0 + g \cdot \rho \cdot \xi_{II}$$

Bei Bezug der Drucke p_I und p_{II} auf ein Höhenniveau kommt die in Bild 18 gezeigte Fehlanzeige zustande. So kann erklärt werden, daß die Linien konstanter statischer Drucke in Bild 17 die Wasseroberfläche durchstoßen, obwohl bekanntlich an der Wasseroberfläche überall der atmosphärische Druck herrscht.

Die nachträgliche exakte Korrektur ist nicht möglich.

In Bild 17 ist an der linken Katamaranhälfte als obere Begrenzung des Strömungsfeldes das Niveau der ruhenden Wasseroberfläche eingetragen. Die rechte Seite zeigt die rechnerisch bestimmte Wellenoberfläche. Bei der nachfolgenden Auswertung wird die vereinfachte Feldbegrenzung mittels der ruhenden Wasseroberfläche gewählt. Der Fehler beträgt im Endresultat ca. $\pm 5\%$.

Nach Betz [20] sowie Landweber und Wu [13] kann mit einigen vereinfachenden Annahmen aus dem Druckfeld ein Widerstandsbeiwert C_F^* errechnet werden, der aus der Wirkung der Zähigkeitskräfte am Schiffskörper resultiert:

$$C_F^* = \frac{R_F^*}{\rho/2 \cdot V^2 \cdot S} = 2 \cdot \left(\frac{L^2}{S} \right) \cdot \int \int \left(\frac{p_{ges\infty} - p_{ges}}{q_\infty} - \sqrt{\frac{p_{ges\infty} - p}{q_\infty}} + \sqrt{\frac{p_{ges} - p}{q_\infty}} \right) \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \cdot d\left(\frac{z}{L}\right)$$

$p_{ges\infty}$ und q_∞ gelten in der ungestörten Anströmung.

In Bild 19 sind die errechneten C_F^* -Werte und diejenigen Reibungsbeiwerte C_F , die Schoenherr angibt, gegenübergestellt. Bei $F_{nWL} < 0.3$ ist $C_F \approx C_F^*$, während bei größeren F_{nWL} eine etwa 30%ige Vergrößerung des Reibungsbeiwertes beobachtet wird. Die Festlegung einer charakteristischen Froudezahl ist im Hinblick auf die noch unkorrigierte statische Druckmessung unangebracht.

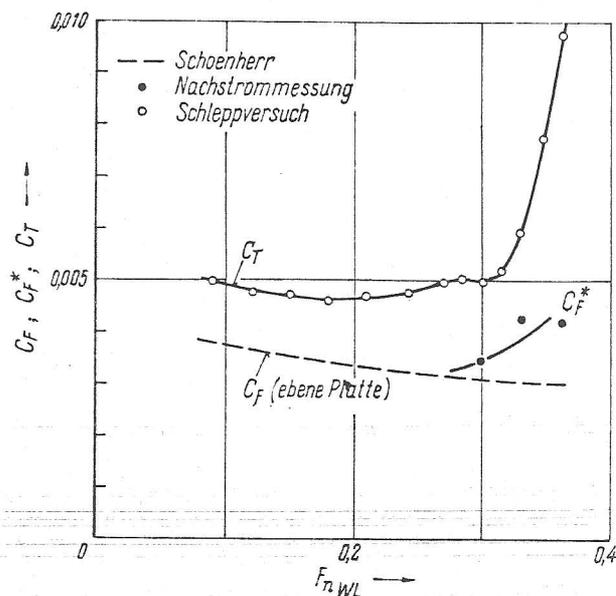


Bild 19. Vergleich der Reibungsbeiwerte aus der Nachstrommessung mit den Werten nach Schoenherr. Zur Orientierung sind auch die Meßergebnisse aus dem Widerstandsversuch dargestellt. Die angegebenen Werte gelten für das Katamaranmodell Nr. 480, $b/L_{pp} = 0,3$

Die Nachstromverteilung weist folgende Merkmale auf:

- Seitliche Verschiebung der Verteilung infolge schräger Umströmung der Schiffsenden.
- Mit zunehmender Froudezahl bildet sich eine stärkere Unsymmetrie des Nachstromes aus, welche auf Sekundärströmungen hinweist. Ein Teil des Grenzschichtmaterials wandert zur Katamaranmitte.
- Mit einer kritischen Zahl $F_{nWL} = 0,33$ bis $0,34$ beginnend tritt im Zusammenhang mit der Schaumbildung ein ausgeprägtes Gebiet von erhöhtem Gesamtdruckverlust in Katamaranmitte hervor. Der Schaum gleitet auf der schrägen Wellenvorderseite zwischen den Rümpfen nach unten, wobei er sich mit dem Schiff mitbewegt. Dabei tritt ein Energieaustausch mit der darunter liegenden Strömung auf. Eine Trennung der Verlustanteile, die durch Grenzschicht- und Schaumwirkung hervorgerufen werden, ist erforderlich, aber noch nicht vorgenommen worden.
- Größere Ablösungsgebiete am Schiffsrumpf liegen nicht vor.

Schaumbildung

Bild 20 zeigt Aufnahmen von der Wasseroberfläche zwischen beiden Rümpfen im Hinterschiffsbereich bei Modell Nr. 488 mit $b/L = 0,3$.

Es ist deutlich erkennbar, daß beginnend vom Anfangspunkt der Welle hinter Spant 7 am Hinterschiff verzögertes Material nach oben gelangt. Bei der kleinsten Geschwindigkeit $V = 1,9$ m/s, Aufnahme a), ist eine geringe Schaumbildung am Schiffsrumpf im Schulterbereich vorhanden, die mit steigender Geschwindigkeit nicht mehr auftritt.

Die Wellen beider Rümpfe treffen in der Mitte zusammen und überlagern sich.

An der Stelle des Zusammentreffens tritt ein örtlicher Wasserbuckel auf, der mit steigender Geschwindigkeit anwächst, bis er bei c) und d) in Schaum zerfällt. Dieser Schaum gleitet gegen die Strömungsrichtung in das Wellental und bildet dort eine „Schaumwalze“. Beim Gleiten entzieht der Schaum der Strömung Energie, was im Nachstrombild feststellbar ist.

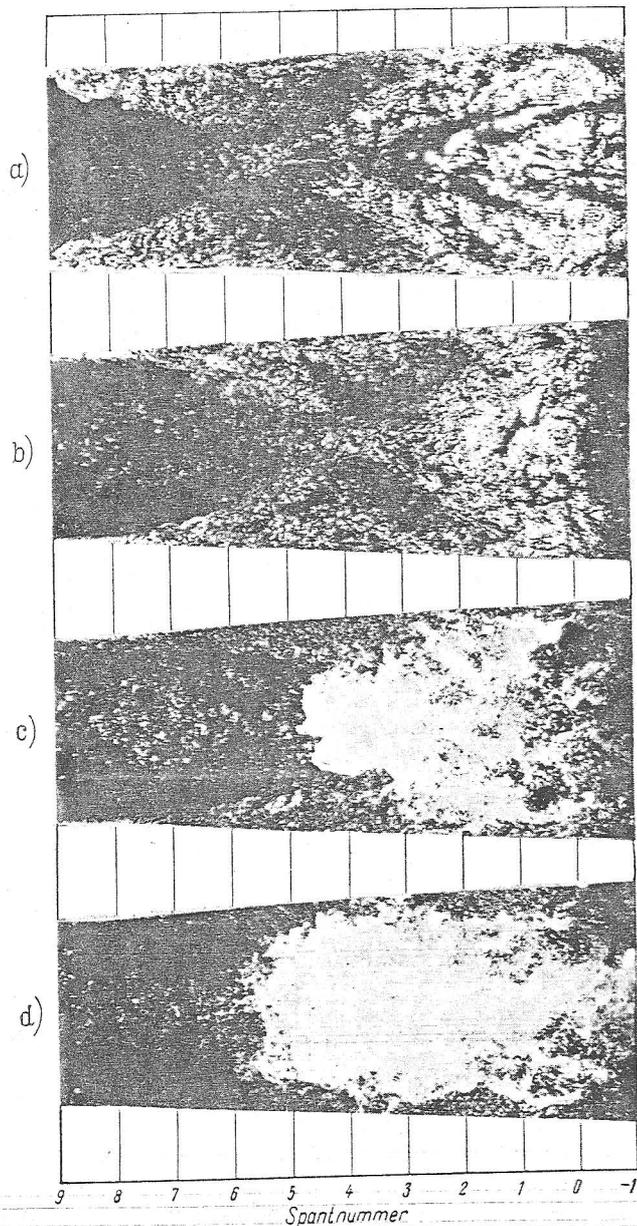
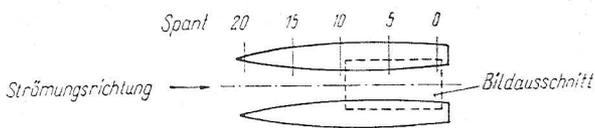


Bild 20. Die Ausbildung der „Schaumwalze“ zwischen den Rumpfen des Katamarans, Modell Nr. 488, $b/L_{PP} = 0,3$ bei steigender Geschwindigkeit

Es ist nicht nachweisbar, daß durch den Schaum eine wesentliche Beeinflussung der Strömung am Schiff, wie z. B. Ablösung, auftritt. Zur näheren Beschreibung des durch die Schaumwalze hervorgerufenen Energieumsatzes Wellenenergie—Reibung müßte das Druckfeld in unmittelbarer Nähe des Schaumes gemessen werden. Eine weitere Bestätigung für das Fehlen plötzlich auftretender Ablösung bringen die Propulsionsversuche.

5. Systematische Widerstands- und Propulsionsversuche

Die Ergebnisse der Widerstandsversuche sind in den Bildern 21, 22 und 23 für die untersuchten Fälle dargestellt. Es sind der spezifische Restwiderstand

$$\frac{R_R}{g \cdot \rho \cdot \nabla} [-] \cong \frac{R_R}{\Delta} \left[\frac{\text{kp}}{\text{t}} \right]$$

der Gesamtwiderstandsbeiwert

$$C_T = \frac{R_T}{\rho/2 \cdot V^2 \cdot S}$$

der Reibungsbeiwert nach *Schoenherr*

$$C_F = f\{R_n\}$$

sowie der Restwiderstandsbeiwert

$$C_R = C_T - C_F.$$

Der Einfluß des Rumpfabstandes auf die Beiwerte des Restwiderstandes tritt bei Modell Nr. 488, s. Bild 21, ab $b/L < 0,30$ größer werdend in Erscheinung. Im Bereich $0,3 < F_n < 0,325$ ist für $b/L_{PP} = 0,35$ der gewünschte Effekt der Widerstandsverringering durch den gegenseitigen Einfluß der Schiffskörper vorhanden, d. h., es wird $R_T/R_{T\infty} < 1$.

Der Einfluß der Formgebung bei den Modellen Nr. 487, 488, 489 auf die Beiwerte des Restwiderstandes, s. Bild 22 und 23, tritt in seiner Tendenz in Übereinstimmung mit den in Bild 3 gezeigten Werten nach *Gerthler* [9] auf. Der Vergleich der Restwiderstandsbeiwerte der untersuchten Einzelmodelle mit den Werten früherer Versuchsserien [9] u. [10] zeigt prinzipielle Übereinstimmung bis auf Abweichungen, die durch die Besonderheiten der Formgestaltung bedingt sind. Der im Experiment beobachtete Einfluß von B/T auf den Restwider-

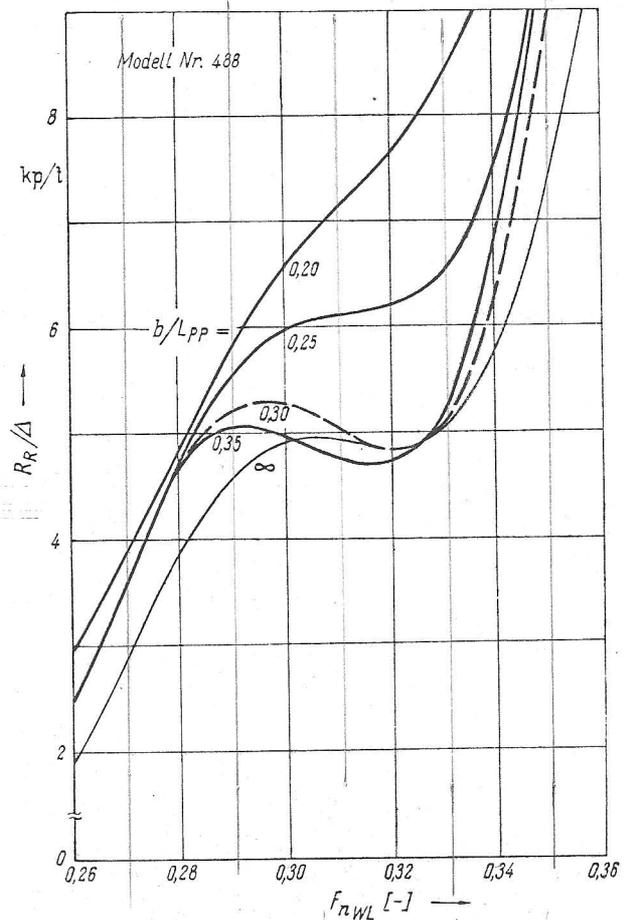


Bild 21. Einfluß des relativen Rumpfabstandes auf den spezifischen Restwiderstand des Katamarans

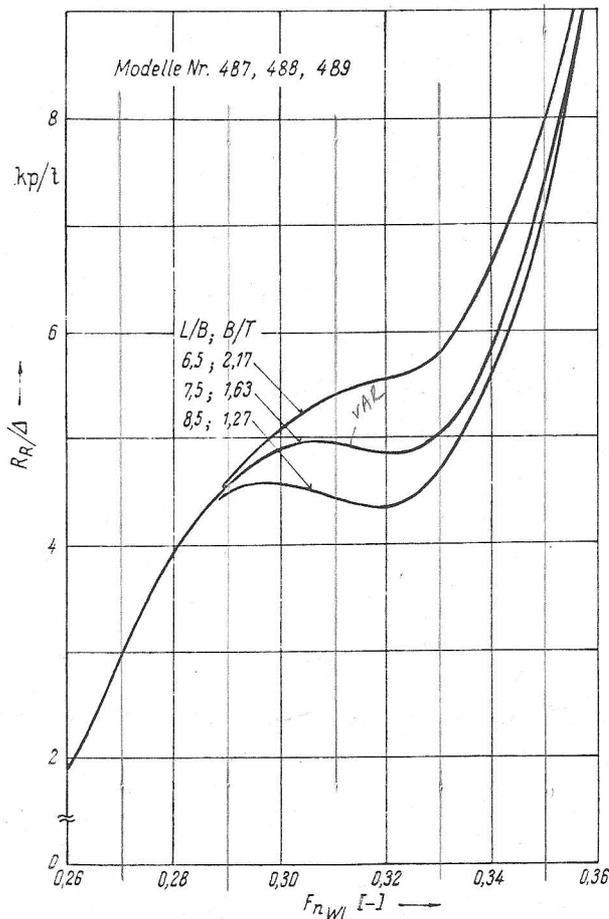


Bild 22. Einfluß der Formgebung der Einzelrumpfe auf den spezifischen Restwiderstand

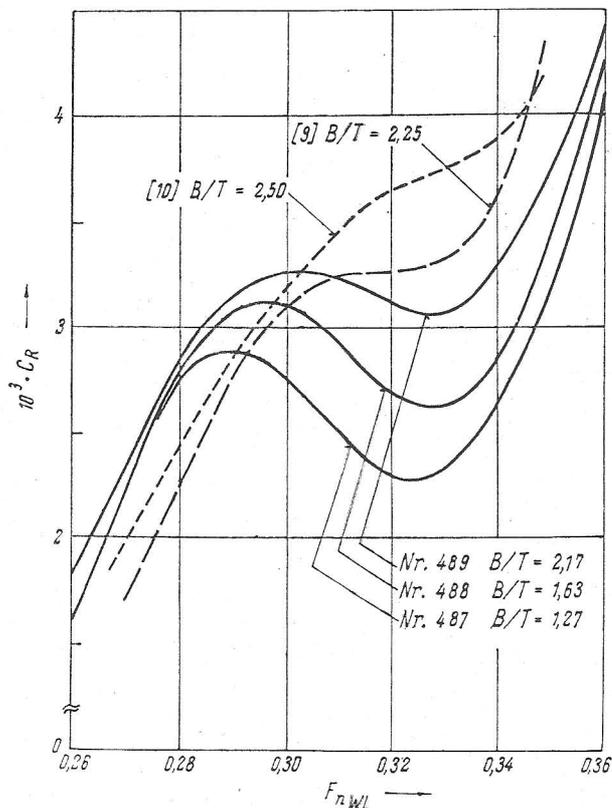


Bild 23. Einfluß der Formgebung der Einzelrumpfe auf den Restwiderstandsbeiwert. Zum Vergleich sind die Werte nach Gerler [9] sowie Gudhammer und Harvald [10] eingetragen

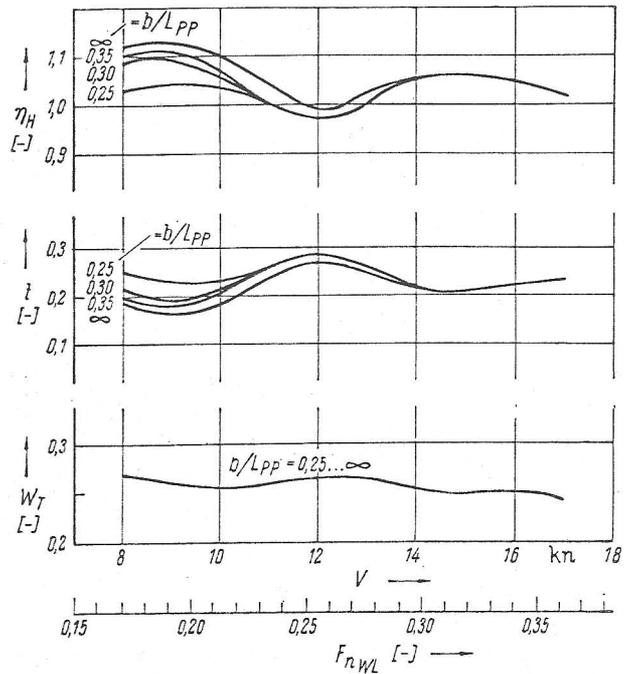


Bild 24. Einfluß des relativen Rumpfabstandes auf die Sog- und Nachstromziffern für einen Katamaran der Länge $L_{PP} = 40$ m und der Formgebung nach Modell Nr. 488. Die Länge des Versuchsmodells beträgt $L_{PP} = 4$ m, der Reibungszuschlag $\Delta C_F = 0,4 \cdot 10^{-3}$

standsbeiwert wird z. T. bei der Berechnung des Gesamtwiderstandes durch die unterschiedlichen benetzten Oberflächen der Modelle wieder aufgehoben. Hierüber gibt der später durchgeführte Vergleich der Schleppleistungen für ein Schiff der Länge $L_{PP} = 40$ m, s. Bild 28, Aufschluß. Der Verlauf des Restwiderstandsbeiwertes von Modell Nr. 488 und auch der Modelle 487 und 489 ist noch nicht ausgeglichen und kann durch Formkorrektur im Hinterschiff verbessert werden.

Für Durchführung und Auswertung der Propulsionsversuche gelten die Reibungsbeiwerte nach Schoenherr mit einem Zuschlag für die Großausführung von $\Delta C_F = 0,4 \cdot 10^{-3}$ und die Schiffslänge von $L_{PP} = 40$ m. Diese angenommene Schiffslänge stellt den Mittelwert des gesamten interessierenden Längenbereiches von $L_{PP} = 20$ bis 60 m dar.

Die in Bild 24 dargestellten Ergebnisse

$$w_T, t, \eta_H = f(V, F_{nWL})$$

für den Katamaran nach Modell Nr. 488 zeigen den summarischen Einfluß des Rumpfabstandes auf die Vortriebeigenschaften. Die Nachstromziffer w_T ist unabhängig von b/L_{PP} , ein Beweis dafür, daß die Grenzschichtausbildung am Schiff nicht wesentlich von der gegenseitigen Beeinflussung der Rumpfe abhängt. Dagegen nimmt erwartungsgemäß die Sogziffer mit enger werdendem Rumpfabstand zu.

6. Entwurfsrichtlinien

Der Katamaran wird als alternative Lösung zu einem Einrumpfschiff für die vorgegebene Aufgabenstellung behandelt. Zur rechnerischen Gegenüberstellung werden Gesamtverdrängung und Geschwindigkeit für beide Typen gleich groß gewählt

$$\nabla_1 = 2 \cdot \nabla_2$$

$$V_1 = V_2$$

wobei ∇_1, V_1 für das Einrumpfschiff und ∇_2, V_2 für den Katamaran gelten.

Die Schiffsformen sind im Entwurfsfall durch die Formparameter wie folgt festgelegt:

Einrumpfschiff: $C_{B1}, C_{F1}, \nabla_1/L_1^3, B_1/T_1$ usw.

Katamaran: $C_{B2}, C_{F2}, \nabla_2/L_2^3, B_2/T_2$ usw.

Aus den bekannten Serienversuchen folgen zu den Formparametern die Restwiderstandsbeiwerte

$$C_{R1} \text{ und } C_{R2}.$$

Mittels der Reynoldszahlen ergeben sich die Reibungsbeiwerte

$$C_{F1} \text{ und } C_{F2},$$

woraus die Gesamtwiderstandsbeiwerte

$$C_{T1} = C_{F1} + C_{R1}$$

$$C_{T2} = C_{F2} + C_{R2} \text{ folgen.}$$

Der Vergleich der Schleppeleistungen ist:

$$\frac{2 \cdot P_{E2}}{P_{E1}} = \frac{2 \cdot C_{T2} \cdot S_2 \cdot \rho / 2 \cdot V_2^3}{C_{T1} \cdot S_1 \cdot \rho / 2 \cdot V_1^3} = \frac{C_{T2}}{C_{T1}} \cdot \left(\frac{2 \cdot S_2}{S_1} \right)$$

Das Oberflächenverhältnis ist nach Lap

$$\frac{2 S_2}{S_1} = 1,26 \cdot \frac{3,4 + 0,5 \cdot L_2 / \nabla_2^{1/3}}{3,4 + 0,5 \cdot L_1 / \nabla_1^{1/3}},$$

nach Mumford

$$\frac{2 S_2}{S_1} = 2 \cdot \frac{(1,7 \cdot T_2 + C_{B2} \cdot B_2) L_2}{(1,7 T_1 + C_{B1} \cdot B_1) L_1}$$

oder nach Taylor

$$\frac{2 S_2}{S_1} = \sqrt{2} \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

mit $k = f(C_P, B/T)$ [12].

Der Vergleich der Antriebsleistungen schließt die Betrachtung der Schraubenbelastungen beider Fahrzeuge-

arten ein. Der Katamaran ermöglicht bei gleichem Tiefgang wie das Einrumpfschiff eine geringere Schraubenbelastung und somit auch bessere Propellerwirkungsgrade η_{02} . Es gilt dann

$$\frac{2 P_{D2}}{P_{D1}} = \frac{2 P_{E2}}{P_{E1}} \cdot \frac{\eta_{01} \eta_{H1} \eta_{R1}}{\eta_{02} \eta_{H2} \eta_{R2}}.$$

Um eine vereinfachte zahlenmäßige Abschätzung der erreichbaren Leistungsverhältnisse zu erhalten, sei eine Berechnung mit den Unterlagen von *Guldhammer* und *Harvard* [10] vorgenommen. Durch die Beschränkung auf eine normierte Schiffsform sind die maßgeblichen Formparameter auf $L/\nabla^{1/3}$ und C_P reduziert.

Als Beispiel werden zunächst zu einem Einrumpfschiff mit $L_1/\nabla_1^{1/3} = 4,0$ zwei Varianten von Katamaranfahrzeugen mit $L_2/\nabla_2^{1/3} = 5,0$ und $6,0$ je Einzelrumpf berechnet. Es sei für das Einrumpfschiff weiterhin vorgegeben $F_{n1} = 0,32$ und $R_{n1} = 10^8$. Um den Einfluß von C_P zu demonstrieren seien die Vergleiche für $C_P = 0,5$ und $0,6$ durchgeführt. Die gewählten Zahlengrößen treffen näherungsweise für einen Kutter zu. Das Oberflächenverhältnis $2 S_2/S_1$ wird nach Taylor berechnet. Den Rechnungsgang und die Ergebnisse zeigt Tafel 4.

Der in Tafel 4 beschriebene Leistungsvergleich wird, um einen größeren Anwendungsbereich zu übersehen, zur Gegenüberstellung von Einrumpfschiffen mit $4 < L_1/\nabla_1^{1/3} < 6$ und Katamaranen mit $5 < L_2/\nabla_2^{1/3} < 8$ bei den Froudezahlen $F_{n1} = 0,35$ und $F_{n1} = 0,4$ durchgeführt. Es werden dazu vorgegeben: $C_{P1} = C_{P2} = 0,6$, $\nabla_1 = 2 \nabla_2$, $V_1 = V_2$, $R_{n1} = 10^8$, C_F nach *Schoenherr*. Die Auftragung der Rechenergebnisse in Bild 25 gestattet eine Aussage darüber, welche Typen von Einrumpfschiffen vorteilhaft durch Katamarane ersetzt werden könnten.

Im Rahmen der Genauigkeit dieser Übersichtsrechnungen läßt sich auch angeben, welche Formgebung des Katamarans erforderlich ist, um im Vergleich zum Einrumpfschiff keine größere Antriebsleistung einsetzen zu müssen. In Bild 25 ist diese Grenze durch die Linie $2 P_{E2}/P_{E1} = 1$ angegeben, die näherungsweise der Gleichung

$$L_2/\nabla_2^{1/3} = 1,5 + L_1/\nabla_1^{1/3}$$

genügt.

Tafel 4. Beispiel zur Berechnung des Leistungsverhältnisses

	Einrumpfschiff	Katamaran	
		1. Variante	2. Variante
Verdrängung	∇_1	$\nabla_2 = \frac{\nabla_1}{2}$	$= \frac{\nabla_1}{2}$
Geschwindigkeit	V_1	$V_2 = V_1$	$= V_1$
Schlankheitsgrad	$L_1/\nabla_1^{1/3} = 4,0$	$L_2/\nabla_2^{1/3} = 5,0$	$= 6,0$
Längenverhältnis		$\frac{L_2}{L_1} = \frac{5,0}{\sqrt[3]{2 \cdot 4,0}} = 0,992$	$= \frac{6,0}{\sqrt[3]{2 \cdot 4,0}} = 1,190$
Froudezahl	$F_{n1} = \frac{V_1}{\sqrt{L_1 \cdot g}} = 0,32$	$F_{n2} = F_{n1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = 0,321$	$= 0,293$
Reynoldszahl	$R_{n1} = \frac{V_1 \cdot L_1}{\nu} = 10^8$	$R_{n2} = R_{n1} \cdot \frac{L_2}{L_1} = 0,992 \cdot 10^8$	$= 1,190 \cdot 10^8$
Prismatischer Koeffizient (Variation)	$C_{P1} = 0,6$	$C_{P2} = 0,5$ $C_{P2} = 0,6$	$= 0,5$ $= 0,6$
Widerstandsbeiwerte	$C_R = 4,60 \cdot 10^{-3}$ $C_F = 2,07 \cdot 10^{-3}$ $C_T = C_R + C_F = 6,67 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$ $3,65 \cdot 10^{-3}$ $2,07 \cdot 10^{-3}$ $2,07 \cdot 10^{-3}$ $5,37 \cdot 10^{-3}$ $5,72 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$ $1,90 \cdot 10^{-3}$ $2,02 \cdot 10^{-3}$ $2,02 \cdot 10^{-3}$ $3,07 \cdot 10^{-3}$ $3,92 \cdot 10^{-3}$
Oberflächenverhältnis nach Taylor für $k_1 \approx k_2$	$\frac{2 S_2}{S_1} \approx \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} =$	1,409	1,542
Verhältnis der Schleppeleistungen	$\frac{2 P_{E2}}{P_{E1}} = \frac{C_{T2}}{C_{T1}} \cdot \left(\frac{2 S_2}{S_1} \right) =$	1,134	0,710
		1,208	0,907

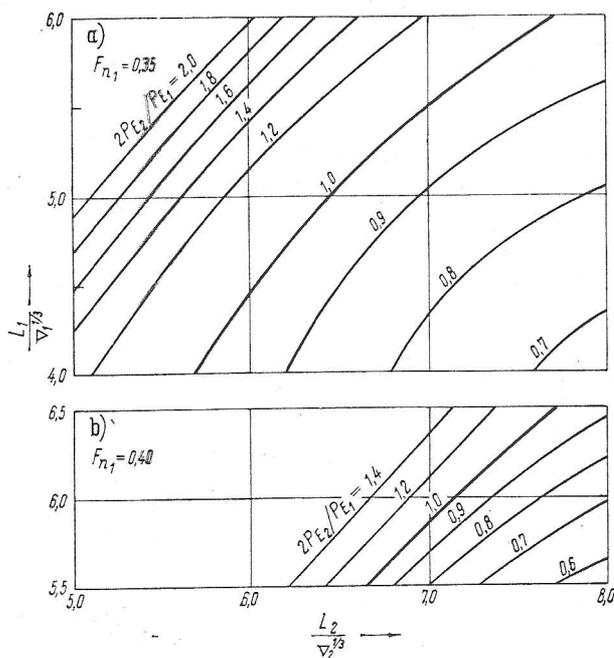


Bild 25. Veränderung der Schleppleistung bei Ersatz von Einrumpfschiffen durch Katamarane gleicher Verdrängung, dargestellt durch das Verhältnis der Schleppleistungen vom Katamaran zu der des Einrumpfschiffes $2P_{E2}/P_{E1}$. Es betragen $C_{P1} = C_{P2} = 0,6$, $R_{n1} = 10^6$, im Fall a) $F_{n1} = 0,35$ und im Fall b) $F_{n1} = 0,40$

Eine weitere für den entwerfenden Ingenieur wichtige Aufgabenstellung liegt vor, wenn ein spezielles Einrumpfschiff vorgegeben ist und dazu die geeignete Katamaranform ausgewählt werden soll, die eine weitestgehende Leistungseinsparung ermöglicht.

Auch diese Betrachtung soll mit den erwähnten Einschränkungen nach *Guldhammer* und *Harvald* durchgeführt werden, obgleich im Anwendungsfall in der Praxis ein detailliertes Verfahren unbedingt erforderlich ist. Als Beispiel wird ein Einrumpfschiff mit $C_{P1} = 0,58$, $L_1/\nabla_1^{1/3} = 4,0$, $B_1/T_1 = 2,5$, $F_{n1} = 0,365$ und $R_{n1} = 10^8$ gewählt. Dazu wird für eine Vielzahl von Katamarantypen mit variiertem $L_2/\nabla_2^{1/3}$ und C_{P2} das Leistungsverhältnis berechnet. Die Ausgangsdaten treffen ungefähr bei dem Kutter HZ 400 von $L_{PP} = 21$ m des VEB Roßlauer Schiffswerft zu. Der Verlauf der Kurven $2P_{E2}/P_{E1} = \text{konst.}$ zeigt Optimalwerte im Hinblick auf eine möglichst völlige Gestaltung der Katamaranrümpfe. Diese Optimalwerte sind in Bild 26 mittels einer gestrichelten Linie verbunden und stellen solche Werte dar, die beim Entwurf bevorzugt werden sollten. Weiterhin ist das Katamaranmodell Nr. 480 als Punkt K eingetragen. Bei dem ausgewählten Entwurfsfall erfüllt diese Katamaranform die Forderung nach einer 16prozentigen Leistungseinsparung und einer optimal völligen Gestaltung.

Die bisherigen Überlegungen gestatten eine Vorauswahl von Schiffskörpern für die Katamarane auf Grund von bekannten Formparametern der Einrumpfschiffe.

Die genauere Berechnung im besonderen Entwurfsfall erfordert es, daß derartige Schiffskörper ausgewählt werden, für die die Schleppversuchsergebnisse bekannt sind.

So gestattet die Auswertung der Modellversuche in dieser Arbeit die Einsatzmöglichkeit der Katamaranentwürfe Nr. 480, 487, 488 und 489 für den Längenbereich $L_{PP} = 20$ bis 60 m zu beurteilen.

Für Katamarane nach Modell Nr. 488 mit dem Rumpf-Abstand $b/L_{PP} = 0,3$ wird die Propellerantriebsleistung

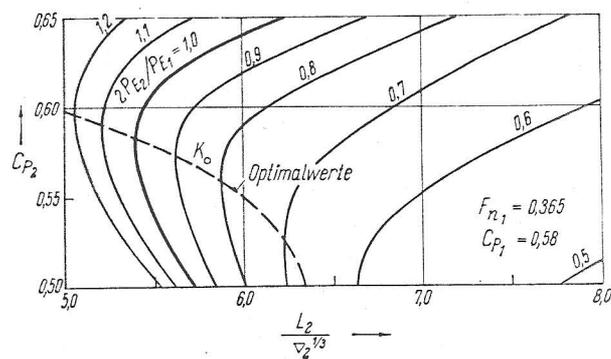


Bild 26. Veränderung der Schleppleistung bei Ersatz des Einrumpfschiffes mit den Daten $C_{P1} = 0,58$, $L_1/\nabla_1^{1/3} = 4,0$, $F_{n1} = 0,365$, $R_{n1} = 10^8$ durch eine Vielzahl von Katamaranen gleicher Verdrängung bei Parametervariationen $C_{P2} = 0,5$ bis $0,65$ und $L_2/\nabla_2^{1/3} = 5,0$ bis $8,0$

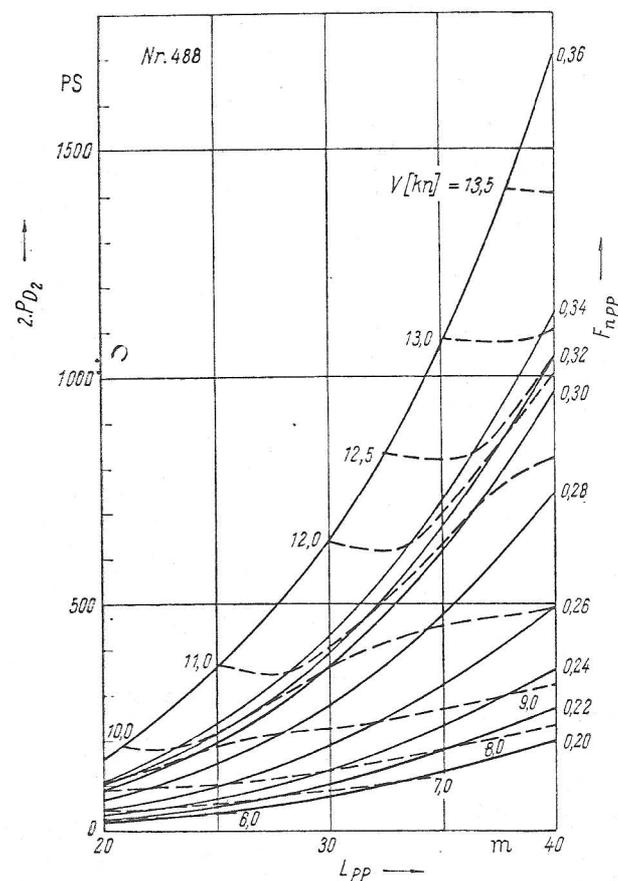


Bild 27. Gesamte Antriebsleistung der beiden Propeller von Katamaranen der Länge von 20 bis 40 m entsprechend Modell Nr. 488 mit $b/L_{PP} = 0,3$

für die zwei Schrauben $2P_{D2}$ berechnet, siehe Bild 27. Parameter sind V in kn und F_{nPP} .

Den Einfluß der Formänderung des Rumpfes mittels L/B - B/T -Variation auf die Schleppleistung eines Katamarans der mittleren Länge von $L_{PP} = 40$ m zeigt Bild 28. Der Rechnung liegen die Messungen mit den Einzelmodellen Nr. 487, 488, 489 zugrunde, so daß das Diagramm nur für $b/L_{PP} \rightarrow \infty$ zutrifft, aber die Tendenz des kombinierten L/B - B/T -Einflusses hinreichend genau wiedergibt. Beim Auslegungszustand, $F_{nPP} \approx 0,34$, ergibt sich durch schlankere Formgebung gegenüber dem

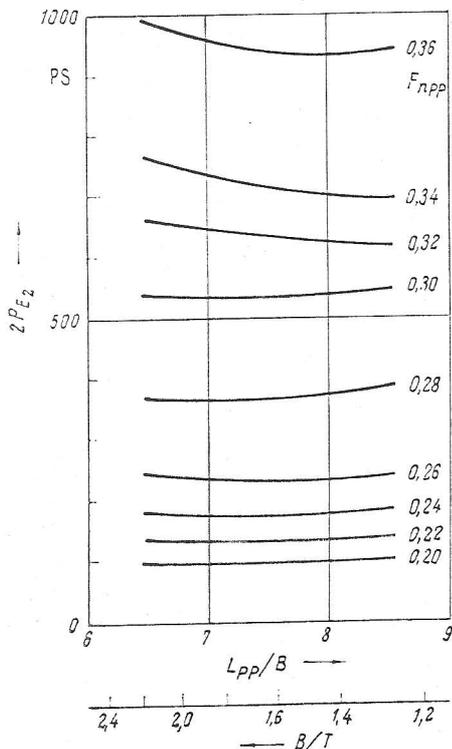


Bild 28. Einfluß der Formparameter L_{PP}/B und B/T auf die Schleppleistung für Katamarane der Länge $L_{PP} = 40$ m, bei Vernachlässigung der gegenseitigen Beeinflussung der Einzelrumpfe, d. h. $b/L_{PP} \rightarrow \infty$

breitesten Rumpf folgende Einsparung an Schleppleistung:

Formgebung		Schleppleistung	Einsparung
$L/B = 6,5$	$B/T = 2,17$	100,0%	0%
7,5	1,63	93,4%	6,6%
8,5	1,27	91,2%	8,8%

Für den Katamaran nach Modell Nr. 488 von $L_{PP} = 40$ m wird der Einfluß von Rumpfabstand auf die Propellerantriebsleistung in Bild 29 dargestellt. Die Leistungen werden auf diejenigen Werte bezogen, die sich aus der Summierung der Leistungen zweier Einzelrumpfe ergeben.

Es wird eine Einsparung der Propellerleistung im Auslegungsbereich von 3 bis 4% erreicht. Es ist wichtig festzustellen, daß sich die Antriebsleistungen bei den Rumpfabständen $b/L_{PP} = 0,3$ und $0,35$ wenig unterscheiden. Bei der Konstruktion eines Katamarans wäre daher der Abstand $b/L = 0,3$ vorzuziehen, da der Bauaufwand geringer wäre.

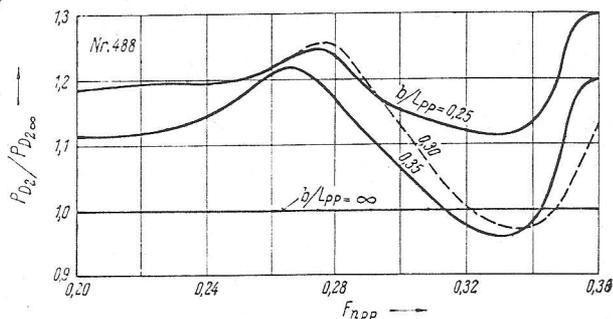


Bild 29. Einfluß des Rumpfabstandes b/L_{PP} auf die Antriebsleistung des Katamarans der Länge $L_{PP} = 40$ m nach Modell Nr. 488

7. Vergleich von Katamaranentwürfen zu ausgeführten Einrumpf-Fischereifahrzeugen

Nachdem über die Untersuchungsergebnisse vom Katamaran und ihre Anwendung auf die praktische Projektierung berichtet worden ist, soll der Vergleich zu ausgeführten Fischerei-Einrumpffahrzeugen gezogen werden, von denen jedes für seine Länge günstige Eigenschaften bezüglich Widerstand und Seeverhalten besitzt. Die Abmessungen gibt Tafel 5 wieder. Zum Vergleich soll der Katamaran nach Modell Nr. 480 gewählt werden, welcher das günstigste Widerstandsverhalten im Geschwindigkeitsbereich von Null bis zur Auslegungsgeschwindigkeit hat.

Tafel 5. Vergleich Einrumpfschiff — Katamaran Nr. 480; $b/L_{PP} = 0,3$

	L_{PP}	S	$\nabla_1, 2 \nabla_2$	L_{WL}/B	$L_{WL1}/\nabla_1^{1/3}$	$L_{WL2}/\nabla_2^{1/3}$
	m	m ²	m ³			
Kutter (21 m)	21,0	171,8	170,0	3,75	4,06	
Vergleichs-Katamaran	23,5	252,5	170,0	8,92	5,80	
Kutter (28 m)	28,0	285,2	311,7	4,12	4,50	
Vergleichs-Katamaran	28,7	377,0	311,7	8,92	5,80	
Trawler (43,6 m)	43,6	504,8	825,0	4,82	4,88	
Vergleichs-Katamaran	39,8	723,5	825,0	8,92	5,80	
Trawler (54 m)	54,0	796,8	1518	5,56	5,13	
Vergleichs-Katamaran	48,7	1085	1518	8,92	5,80	

Sämtliche angeführten Fischereifahrzeuge sind als Modell in der Schiffbauversuchsanstalt geschleppt worden, so daß die Widerstandsrechnung auf den jeweiligen Restwiderstandskurven

$$\frac{R_R}{\Delta} = f\{F_N\}$$

aufbaut. Bild 30 zeigt den Vergleich der Schleppleistungen von 4 Fischereifahrzeugen und von den jeweiligen Katamaranen gleicher Verdrängung. Bei Ersatz der Trawler von 54 m und 43,6 m Länge durch Katamarane wird eine Vergrößerung der Antriebsleistung erforderlich, wohingegen im Falle der Kutter mit Leistungseinsparungen gerechnet werden kann.

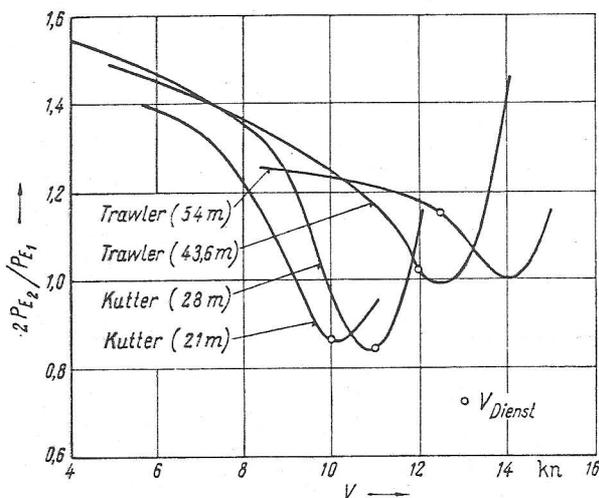


Bild 30. Veränderung der Schleppleistung beim Ersatz herkömmlicher Fischereifahrzeuge durch Katamarane gleicher Verdrängung der Form entsprechend Modell Nr. 480. Die Abmessungen dieser Fahrzeuge zeigt Tafel 5. Die Punkte kennzeichnen die Dienstgeschwindigkeiten der Fischereifahrzeuge in Einrumpfausführung

8. Zusammenfassung

In der Arbeit werden die Ergebnisse von hydrodynamischen Versuchen mit Katamaranmodellen behandelt und für die Widerstandsabschätzung von Katamaranen ein Berechnungsverfahren ermittelt.

Die nähere Untersuchung der Umströmung der Katamaranrümpfe zeigt bemerkenswerte Besonderheiten im Nachstrom und in der Wellenbildung, die auf die gegenseitige Beeinflussung der Rümpfe zurückzuführen sind. Die möglicherweise erforderliche Unsymmetrie der Schiffsform wird theoretisch abgeschätzt.

Die unsymmetrische Umströmung des einzelnen Katamaranrumpfes wirkt sich auf den Widerstand und die Zuströmung zur Schraube gering aus, solange die konstruktiven Grenzen $b/L > 0,3$ bzw. $b/B > 2,25$ eingehalten werden. Es wird empfohlen, $B/T > 1,4$ zu wählen. Diese Aussagen sind nur mit einer besonderen Typenfamilie von $C_B \approx 0,6$ gewonnen werden und können sich bei Neuentwürfen etwas verschieben.

Wenn es das Ziel dieser Arbeit gewesen ist, einen Katamaran aus zwei Rümpfen konventioneller Formgebung aufzubauen, so stehen Untersuchungen mit speziellen Formen noch aus.

Der Vergleich der Katamaranentwürfe mit ausgeführten Fischereifahrzeugen läßt erkennen, daß bei Katamaranen als Ersatz von Fahrzeugen mit einer Länge kleiner als etwa 30 bis 40 m Leistungsverringerungen möglich sind.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Barillon: Comptes Rendues, Acad. Sci. Paris, 182 (1926), S. 46.
- [2] Chiang Wei-chong: Catamaran Resistance — A Comparison of Mathematical Theory and Experimental Results. Journal of Shipbuilding of China, 59 (1965) 3, S. 21 bis 35.
- [3] Collatz, G.: Potentialtheoretische Untersuchung der hydrodynamischen Wechselschwärzung zweier Schiffskörper. Dissertation TH Hannover 1963.
- [4] Dellefs, H.: Widerstands-, Propulsions-, Trossenzug- und Seegangversuche mit dem Modell eines Fischerei-Katamarans Modell Nr. 480. SVA-Bericht Nr. 599 vom 12. 12. 1966 (unveröffentlicht).
- [5] Dubrowsky, V. A.: Ingenieur-Methode zur Berechnung des Restwiderstandes des Katamarans (Russ.). Rybnoje Chozjaistvo 43 (1967) 12, Moskau, S. 36 bis 39.
- [6] Eggers, K.: Über Widerstandsverhältnisse von Zweikörperschiffen. Jahrbuch der STG 49 (1955), S. 516 bis 539.
- [7] Friedrichs, K.: Experimentelle Untersuchungen im Gerinne über die Schwallbildung bei seitlicher Einschnürung. Diplomarbeit am Institut für Strömungslehre der Universität Rostock 1965 (unveröffentlicht).
- [8] Mac Lear, F. R.: Catamarans as Commercial Fishing Vessels. Third FAO Technical Meeting on Fishing Boats Göteborg, 23. bis 29. Oct. 1965.
- [9] Gertler, Morton: A Reanalysis of the Original Test Data for the Taylor Standard Series. Report 806 (1954), D. W. Taylor Model Basin, Washington.
- [10] Gulddammer, H. E., Harvald, S. A.: Ship Resistance. Effect of Form and Principal Dimensions. Akademisk Forlag, Copenhagen, 1965.
- [11] Havelock, T. H.: Wave Resistance: The Mutual Action of two Bodies. Proc. Roy. Soc. London, Series A, 155 (1936) 886, S. 460 bis 471.
- [12] Henschke, W.: Schiffbautechnisches Handbuch, Bd. 2. Verlag Technik Berlin, 1965.
- [13] Landweber, L., Wu, J.: The Determination of the Viscous Drag of Submerged and Floating Bodies by Wake Surveys. Journal of Ship Research 7 (1963) 1, S. 1 bis 6.
- [14] Mann, J. W.: World Fishing, London 15 (1966) 11, S. 37 u. 38.
- [15] Puchstein, K.: Erprobungsschiff Katamaran, Technische Aufgabenstel-

lung für ein Fischereifahrzeug in Katamaranbauweise. Bericht vom 31. 12. 66 des IS Rostock (unveröffentlicht).

- [16] Schinke, A.: Zur Wahl des B/T-Verhältnisses für zwei Katamaran-spantformen. Schiffbautechnik 16 (1966) 6, S. 310 bis 312.
- [17] Schinke, A., Kusserow, P.: Zur Frage der Eignung der Katamaranbauweise für kleine Fahrgastschiffe und Schlepper. Schiffbautechnik 17 (1967) 6, S. 305 bis 308.
- [18] Schinke, A., Puchstein, K.: Der Katamaran und seine Eignung für die Fischerei. Schiffbautechnik 16 (1966) 1, S. 37 bis 41.
- [19] Schinke, A., Puchstein, K.: Ein Beitrag zum Problem des Katamaranwiderstandes. Schiffbauforschung 6 (1967) 1/2, S. 1 bis 14.
- [20] Schlichting, H.: Grenzschichttheorie, 3. Aufl., Verlag G. Braun, Karlsruhe 1958.
- [21] Sharma, S. D.: Zur Problematik der Aufteilung des Schiffswiderstandes in Zähigkeits- und wellenbedingte Anteile. Jahrbuch d. S. T. G. 59 (1965), S. 458 bis 508.
- [22] Taylor, D. W.: The speed and power of ships. US Government Printing Office, Washington, 1943.
- [23] . . . , The Sea-Going Catamaran Ship — Its Features and its Feasibility. Ship and Boat Builder, London, 14 (1961) 12, S. 44 bis 47, 15 (1962) 1, S. 68 bis 72.
- [24] . . . , Schiffbautechnik 17 (1967) 1, S. 50.
- [25] . . . , Catamaran Buoy Tender. Motor Ship London, 48, (1967) 563 S. 111.
- [26] . . . , US-Study of cargo-catamarans. Shipb. and Ship. Rec. 110 (1967) 8, S. 250.
- [27] . . . , Containership voor binnenscheepvaart. Schip en Werf 34 (1967) 19, S. 470.
- [28] . . . , Versatile cat design in steel. World Fishing 17 (1968) 3, S. 36 bis 38.
- [29] . . . , World Fishing 17 (1968) 3, S. 46.

10. Symbole

x, y, z	m	Koordinaten
ξ, η, ζ	—	Koordinaten, dimensionslos
L, B, T	m	Länge, Breite, Tiefgang
b	m	Abstand der Katamaranrumpffachsen
A	m ²	Spantfläche, Propellerfläche
S	m ²	benetzte Schiffsoberfläche
∇	m ³	Verdrängung
u	m/s	örtliche Strömungsgeschwindigkeit
V	kn, m/s	Schiffsgeschwindigkeit
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
Δ	kg, t	Masseverdrängung
ρ	kg/m ³	Dichte
R	N, kp	Widerstand
P _E	Nm/s, PS	Schleppleistung
P _D	Nm/s, PS	Propellerantriebsleistung
p	N/m ² , mmWS	Druck
q	N/m ² , mmWS	dynamischer Druck
C	—	Beiwert, allgemein
C _B	—	Blockkoeffizient
C _P	—	prismatischer Koeffizient
WT	—	Nachstromziffer
t	—	Sogziffer
η_H	—	Gütegrad des Schiffskörpers
η_R	—	Gütegrad der Anordnung
F _n	—	Froudezahl
R _n	—	Reynoldszahl
AP	—	hinteres Lot
FP	—	vorderes Lot

Indizes

T	Gesamt-
R	Rest-,
F	Reibungs-,
PP	zwischen den Loten gemessen
WL	in der Wasserlinie gemessen
1	Einrumpfschiff
2	Katamaranrumpf