

Potentialtheoretisches Entwurfsverfahren für widerstandsarme Vorschiffsformen

Reiner Vollheim

Es werden Arbeitsergebnisse zur Anwendung der potentialtheoretischen Gleichungen von Michell und Havelock bei der Entwicklung eines Entwurfsverfahrens für widerstandsarme Vorschiffsformen mitgeteilt. Die numerischen Lösungsverfahren werden beschrieben und die Berechnungsergebnisse experimentell gewonnenen Werten gegenübergestellt. Das Entwurfsverfahren wird bei der Bugwulstentwicklung für drei Schiffstypen des DDR-Schiffbaus eingesetzt. Zur Steigerung der numerischen Genauigkeit des Entwurfsverfahrens kann die dreidimensionale Grenzschicht mit schwacher Querströmung berücksichtigt werden.

1. Einleitung

Ausgehend von der linearen Theorie des Wellenwiderstandes wird ein Entwurfsverfahren für widerstandsarme Vorschiffsformen entwickelt.

Die Grundlage bilden die Potentiale für ein schmales Schiff nach Michell [1] und für eine Quelle nach Havelock [2]. Sie ergeben die Geschwindigkeitsverteilung um den Schiffskörper und weiterhin den Wellenwiderstand in reibungsfreier Flüssigkeit mit Oberflächenwellen.

Die allgemeinere Gleichung für den Wellenwiderstand nach Havelock kann unter Vereinfachungen in die speziellere von Michell umgeschrieben werden.

Nach Weinblum [3] wird das Michell'sche Integral mittels Potenzfunktionen zur Darstellung der Schiffsoberfläche exakt gelöst. Dieses Ergebnis stimmt zahlenmäßig mit Meßwerten noch nicht überein. Es wird beobachtet, daß vom Hinterschiff wesentlich niedrigere Wellen als vom Vorschiff erzeugt werden. Man berücksichtigt diesen Umstand mittels empirischer Korrekturfaktoren bei der Wellenwiderstandsberechnung. Es ist jetzt natürlich naheliegend, die Dämpfung der Wellenentstehung im Hinterschiffsbereich von der Grenzschichtentwicklung herleiten zu wollen.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen sind von der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) und dem Centrum Techniki Okretowej Gdansk (CTO) durchgeführt worden.

2. Theoretische Grundlagen

Das Schiff mit dem kartesischen Koordinatensystem x, y, z befindet sich an der Oberfläche einer unendlich tiefen Wasserströmung, deren Geschwindigkeit V in Richtung der negativen x -Achse weist, Bild 1. Das Strömungspotential ist $\phi = -V \cdot x + \varphi$. φ ist ein Störpotential. Die von ihm abgeleiteten Geschwindigkeitskomponenten seien wesentlich kleiner als V . Das bedeutet, daß die Wellenhöhen sehr klein sind und nur schlanke Schiffe nachgebildet werden. Die Druckver-

teilung auf der Schiffsoberfläche folgt aus der Bernoulligleichung. Die Integration dieser Druckverteilung ergibt den Wellenwiderstand. Werden bei dieser Ableitung die Glieder höherer Ordnung vernachlässigt, so ergibt sich der linearisierte Ausdruck (1) für den Wellenwiderstand nach Havelock:

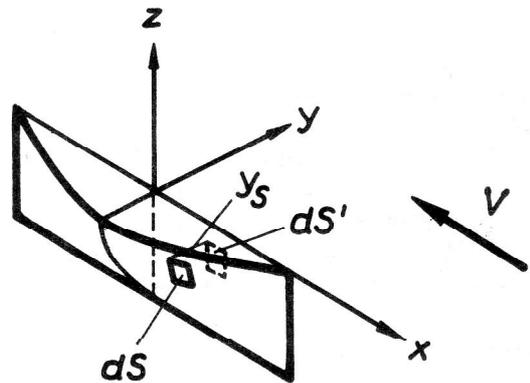


Bild 1
Schiff mit Koordinatensystem. Oberflächenelemente dS auf der Schiffsoberfläche und dS' auf der Symmetrieebene; Breitenmaß y_S

$$R_W = \frac{4 \cdot g^2 \cdot \rho}{\pi \cdot V^4} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} [(P_q + P_m)^2 + (Q_q + Q_m)^2] \cdot \cos^3 \Theta \cdot d\Theta \quad (1)$$

mit

$$P_q = \frac{1}{\cos^3 \Theta} \cdot \iint_{(s)} q \cdot \exp\left(\frac{g \cdot z}{V^2 \cdot \cos^2 \Theta}\right) \cdot \cos\left[\frac{g}{V^2} \cdot \left(\frac{x}{\cos \Theta} + \frac{y_S \cdot \sin \Theta}{\cos^2 \Theta}\right)\right] \cdot dx \cdot dz$$

$$Q_q = \frac{1}{\cos^3 \Theta} \cdot \iint_{(s)} q \cdot \exp\left(\frac{g \cdot z}{V^2 \cdot \cos^2 \Theta}\right) \cdot \sin\left[\frac{g}{V^2} \cdot \left(\frac{x}{\cos \Theta} + \frac{y_S \cdot \sin \Theta}{\cos^2 \Theta}\right)\right] \cdot dx \cdot dz$$

$$P_m = \frac{g}{V^2 \cdot \cos^4 \Theta} \cdot \iint_{(s)} m \cdot \exp\left(\frac{g \cdot z}{V^2 \cdot \cos^2 \Theta}\right) \cdot \cos\left[\frac{g}{V^2} \cdot \left(\frac{x}{\cos \Theta} + \frac{y_S \cdot \sin \Theta}{\cos^2 \Theta}\right)\right] \cdot dx \cdot dz$$

$$Q_m = \frac{g}{V^2 \cdot \cos^4 \Theta} \cdot \iint_{(s)} m \cdot \exp\left(\frac{g \cdot z}{V^2 \cdot \cos^2 \Theta}\right) \cdot \sin\left[\frac{g}{V^2} \cdot \left(\frac{x}{\cos \Theta} + \frac{y_S \cdot \sin \Theta}{\cos^2 \Theta}\right)\right] \cdot dx \cdot dz$$

Eine Übersicht dieser Theorie findet man in [4]. Es bedeuten q und m flächenhafte Quell- und Dipolintensitäten. Die Integrationen werden in x -Richtung und z -Richtung über die mit Singularitäten belegte Schiffsoberfläche S erstreckt, das bedeutet über den Bereich mit $q \neq 0$ und $m \neq 0$. Der Winkel Θ ist die Neigung der Ausbreitungsrichtung der seitlich weggehenden Wellen zur Fahrtrichtung des Schiffes im Wasser, Bild 2. Bei der Integration über den Bereich $0 \leq \Theta \leq \frac{\pi}{2}$ werden alle möglichen Wellenkomponenten, die zum Schiffswiderstand beitragen, erfasst. Aus V ergibt sich die Länge der Grundwelle mit $\Theta = 0$ zu $\lambda_0 = 2 \cdot \pi \cdot V^2/g$. Die Länge einer seitlich unter dem Winkel Θ sich ausbreitenden Welle ist $\lambda_n = \lambda_0 \cdot \cos^2 \Theta$, wobei der Abstand zweier Wellenberge in Schiffsrichtung $\lambda_x = \lambda_n / \cos \Theta = \lambda_0 \cdot \cos \Theta$ ist.

Die Wellenwiderstandsgleichung von Michell ergibt sich als Spezialfall von (1), wenn nur Flächenquellen berücksichtigt und diese auf der Symmetrieebene angeordnet werden. Ihre Intensität wird unter Voraussetzung eines schlanken Schiffes direkt mittels der Neigung der Oberfläche gegen die Symmetrieebene in der horizontalen Ebene bestimmt (2).

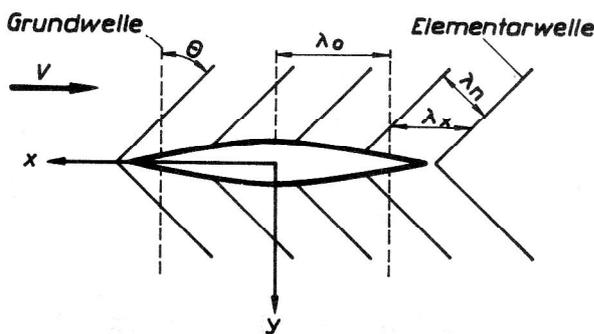


Bild 2
Grundwellen und Wellen, die sich unter dem Winkel Θ ausbreiten

$$q = -V \cdot \frac{\partial y_S}{\partial x} \quad (2)$$

Werden entsprechend (3)

$$\xi = \frac{2 \cdot x}{L}; \quad \eta = \frac{2 \cdot y}{B}; \quad \zeta = \frac{z}{T};$$

$$\beta = \frac{g \cdot T}{V^2 \cdot \cos^2 \Theta}; \quad \gamma = \frac{g \cdot L}{2 \cdot V^2 \cdot \cos \Theta} \quad (3)$$

die Koordinaten dimensionslos als ξ , η und ζ geschrieben, der Koeffizient β sowie weiterhin anstelle des Winkels Θ der Ausdruck γ zur Kennzeichnung der Periodenzahl eingeführt, so bekommt man die Michellsche Gleichung in dimensionsloser Form (4). Der Integrationsbereich von γ folgt aus demjenigen für Θ .

$$R_W = \frac{8 \cdot g \cdot \rho}{\pi} \cdot \frac{B^2 \cdot T^2}{L} \cdot \int_{\gamma_0}^{\infty} (I^{*2} + J^{*2}) \cdot \frac{(\gamma/\gamma_0)^2}{\sqrt{(\gamma/\gamma_0)^2 - 1}} \cdot d\gamma \quad (4)$$

mit

$$I^* = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\infty} \exp(\beta \cdot \zeta) \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \eta_S}{\partial \xi} \cdot \cos \gamma \xi \cdot d\xi \right) \cdot d\zeta$$

$$J^* = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\infty} \exp(\beta \cdot \zeta) \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \eta_S}{\partial \xi} \cdot \sin \gamma \xi \cdot d\xi \right) \cdot d\zeta$$

Das Schiff überträgt bei der Überwindung des Wellenwiderstandes Energie an das Wasser, welche durch das Wellensystem größtenteils seitlich transportiert wird. Dabei wird ein Impulsstrom gleich dem Wellenwiderstand erzeugt. Beschreibt man die bei einer Kanalfahrt durch ein Schiff erzeugten Oberflächenwellen durch ein Strömungspotential, so ergibt (5)

$$R_{WI} = \frac{g \cdot \rho}{2} \cdot \int_{-b/2}^{b/2} \zeta_W^2 \cdot dy + \frac{\rho}{2} \int_{-h}^0 \int_{-b/2}^{b/2} (\Phi_y^2 + \Phi_z^2 - \Phi_x^2) \cdot dy \cdot dz \quad (5)$$

den Wellenwiderstand. Diese Gleichung kann nach Eggers [5] in die Beziehung (6) übergeführt werden, die nur noch den Wellenhöhenverlauf $\zeta_W(x, y_0)$ als unbekannte Funktion enthält, der mittels Messung im Wellensystem eines Schiffes im seitlichen Abstand y_0 bestimmt werden kann. Die Kreisfrequenz ω_ν wird mittels (7) aus der Länge der Grundwelle λ_0 , der Kanalbreite b und der Periodenzahl $\nu = 0, 1, 2, \dots$ erhalten.

$$R_{WI} = \frac{g \cdot \rho \cdot b}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} (C_0^2 + S_0^2) + \sum_1^{\nu} \left(2 - \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \left(\frac{\nu \cdot \lambda_0}{2 \cdot b}\right)^2}} \right) \right]$$

$$\left. \cdot \frac{C_v^2 + S_v^2}{\left(\cos \frac{\nu \cdot \pi}{3}\right)^2} \right] \quad (6)$$

mit

$$C_v = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \zeta_w \cdot \cos(\omega_v \cdot x) \cdot dx$$

$$S_v = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \zeta_w \cdot \sin(\omega_v \cdot x) \cdot dx$$

$$\omega_v = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\nu \cdot \lambda_0}{2 \cdot b}\right)^2}} \quad (7)$$

Die Anwendung der dargelegten linearisierten Theorie des Wellenwiderstandes für reelle Schiffsförmungen ist nur mit Einschränkungen möglich. Die Übersicht der prinzipiell möglichen Formen von Verdrängungsschiffen zeigt Bild 3, in dem Durchschnittswerte der mit der Dienstgeschwindigkeit und der Schiffslänge gebildeten

Froudezahl $Fr = V/\sqrt{g \cdot L}$ sowie des Völligkeitsgrades $C_B = \nabla / (L \cdot B \cdot T)$ einander zugeordnet werden. Ebene, technologisch bedingte Flächen sind besonders gekennzeichnet. In Abhängigkeit von Fr bildet sich das Wellensystem am Schiff aus. Ist Fr niedrig, so treten mehrere Wellenberge an der Schiffseitenwand auf. Bei höheren Fr erstreckt sich die Bugwelle über die gesamte Schiffslänge. Eine Schiffsförmung wird demzufolge für eine ganz bestimmte Geschwindigkeit entworfen. Je größer der Völligkeitsgrad, um so stumpfer werden die Schiffsenden. Die Bedingung $\partial y_S / \partial x \ll 1$ setzt dem eine Grenze. Weiterhin können nur solche Schiffsförmungen berücksichtigt werden, bei denen Strömungsablösung und Wellenbrechen nicht auftritt. Die reale Strömung darf von der reibungsfreien möglichst nur wenig abweichen.

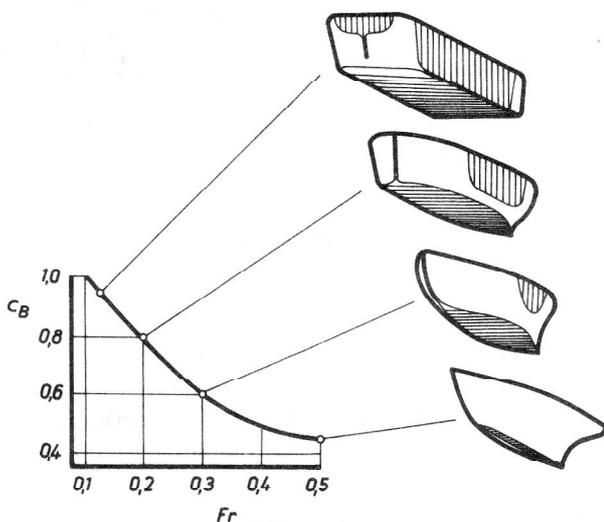


Bild 3
Zuordnung von Formgebung und der Kurve C_B (Fr) beim Schiffsentwurf

3. Lösungen für die 1. und die 2. Hauptaufgabe

Zum Entwurf von widerstandssarmen Schiffsförmungen können optimale Singularitätenverteilungen $q(x, y, z)$ und $m(x, y, z)$ gesucht (1. Hauptaufgabe) oder die Schiffsförmung $S(x, y, z) = 0$ direkt vorgegeben werden (2. Hauptaufgabe). In beiden Fällen ist der Wellenwiderstand zu berechnen. Es werden zwei numerische Lösungsverfahren vorgestellt, bei denen die Schiffsoberfläche entweder teilweise oder vollständig durch Aufpunkte dargestellt und die Integration über den Ausbreitungswinkel Θ beziehungsweise über die Periodengröße γ mittels Näherungsverfahren durchgeführt wird. Bei der Anwendung von Schrittverfahren für die Integration ist die Abhängigkeit der Schrittweite von der Froudezahl zu berücksichtigen. Die Schrittweite ist proportional zu Fr^2 . Mittels Bild 4 sollen die beiden Lösungsverfahren erläutert werden. Dabei wird als Entwurfsaufgabe die Entwicklung eines optimalen Bugwulstes zugrundegelegt. Im Verlauf der Aufgabenbearbeitung sind ebenfalls Spantflächenverläufe und Spantformen mit geringem Wellenwiderstand entwickelt worden.

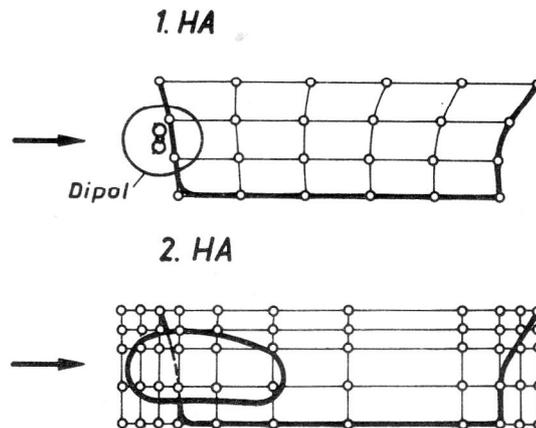


Bild 4

- a) Anordnung von Aufpunkten und eines Dipols nach Michalski [6] zur Lösung der 1. Hauptaufgabe und
b) von Aufpunkten zur 2. Hauptaufgabe [7]

1. Hauptaufgabe. Die Aufgabe ist vom CTO Gdansk gelöst worden. Michalski [6] erfasst die Form des wulstlosen Schiffes mittels Aufpunkte in einem „Wasserliniennetz“, bei dem eine gleichmäßige Unterteilung in Längsrichtung für jede Wasserlinie gewählt und der Bugwulst durch einen einzelnen Dipol mit dem Moment M_D nachgebildet wird, Bild 4. Gleichung (1) wird dementsprechend abgewandelt, die Quellverteilung mittels der Aufpunkte an dem Wasserliniennetz durch (2) berechnet und die Lage (x_D, z_D) sowie die Intensität M_D des Dipols für ein vorgegebenes Fr in Verbindung mit der Lösung einer Extremwertaufgabe für das Minimum des Wellenwiderstandes bestimmt. Die inneren Integrale von (1) werden unter Annahme einer linearen Approximation der Verteilungsfunktion sowie ebener Oberflächenelemente und das äußere Integral mittels des Gauss-Tschebyschew-Verfahrens gelöst. Aus dem Dipolmoment folgt der Kugelradius R_D entsprechend $M_D = 2 \cdot \pi \cdot V \cdot R_D^3$, so daß jetzt die Größe einer Kugel als erste Näherung für die Dipolform bei einem vorgegebenem Schiff berechnet werden kann.

2. Hauptaufgabe. Diese Aufgabe ist von der SVA Potsdam gelöst worden [7]. Als Ausgangsdaten zur Berechnung des Wellenwiderstandes nach (4) dienen nur die Aufmaße der Schiffsoberfläche, die durch ein orthogonales Netz von beliebig angeordneten Spanten und Wasserlinien bestimmt werden. Die inneren Integrale werden mittels der Trapezregel für mehrere vorgegebene γ gelöst und dann das äußere Integral mittels der Simpson-Regel bestimmt.

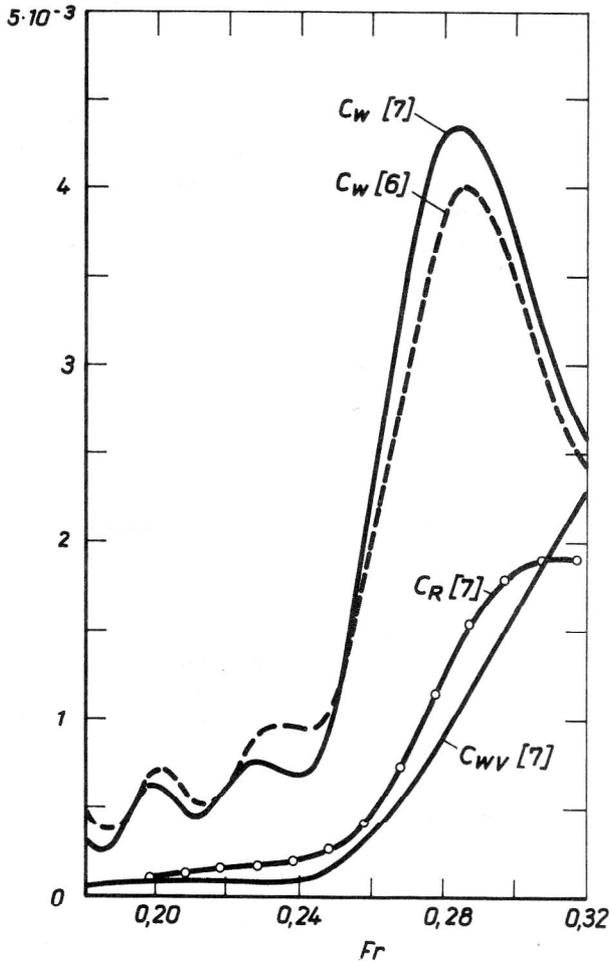


Bild 5
Beiwerte des Wellenwiderstandes nach unterschiedlichen Methoden

4. Numerische Berechnungen und vergleichende Modellversuche für Dipol-Bugwulste

Das Untersuchungsobjekt ist das Grundmodell der Serie 60, Nr. 4210, von $C_B = 0,6$. Von Michalski wurden dafür zu 3 vorgegebenen Fr die optimalen Dipol-Bugwulste berechnet. Tabelle 1 gibt dazu die Abmessung und die Volumenverdrängung der Dipolkugel sowie der halben Dipolkugel zusammen mit einem Zylinder als Übergangskörper zum Vorschiff wieder. Je größer die Froudezahl des Entwurfszustandes, um so größer ist der Kugelradius, um so tiefer liegt die Wulstspitze und um so kürzer ist der Bugwulst. Die Wasserverdrän-

Tabelle 1

Dipol-Bugwulst	1	2	3
$Fr = V/\sqrt{g \cdot L}$	0,20	0,24	0,28
R_D/T	0,229	0,255	0,361
x_D/T *)	0,216	0,109	0
z_D/T *)	0,430	0,490	0,630
A_B/A_M *)	6,8 %	8,4 %	16,8 %
Volumen der Dipolkugel bezogen auf ∇	0,19 %	0,39 %	1,07 %
Volumen des Halbkugel-Zylinder-Bugwulstes bezogen auf ∇	0,54 %	0,86 %	1,88 %

*) Bezeichnung analog Bild 7

gungen des Halbkugel-Zylinder-Bugwulstes sind etwa 3 bis 2mal so groß wie diejenigen der Dipolkugel. Das ist ein Umstand, der den Widerstand bereits merklich beeinflusst.

Der Wellenwiderstand wird zunächst ohne Bugwulst für 2 besondere Randbedingungen im Hinterschiffsbereich berechnet – für die reelle Schiffsförmung (C_w) und für das Vorschiff zusammen mit einem zylindrischen Hinterschiff (C_{wv}). Im Bild 5 sind die Wellenwiderstandsbeiwerte C_w nach Michalski [6] (wie bei 1. HA, 273 Aufpunkte) und Vollheim [7] (wie bei 2. HA, 1380 Aufpunkte) dargestellt. Beide Ergebnisse unterscheiden sich nur wenig voneinander. Demgegenüber ist der Verlauf von C_{wv} nach [7] völlig verändert. Die Oszillationen, hervorgerufen durch Interferenz von Bug- und Heckwellensystem, entfallen. Im Bereich niedriger Fr ist auch der Wellenwiderstand durch das Vorschiff allein niedriger als für die reelle Schiffsförmung. Zum Vergleich ist der experimentell in der SVA Potsdam mittels eines 5 m-Modells bestimmte Restwiderstandsbeiwert C_R dargestellt, der entsprechend (8) aus dem Schleppwiderstand R_T , dem Formfaktor k und dem Reibungsbeiwert C_{Fo}

$$C_R = C_T - (1 + k) \cdot C_{Fo} \quad (8)$$

mit

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot S} \quad \text{und} \quad C_{Fo} = f(Re)$$

der ebenen flächengleichen Platte derselben Länge gebildet wird. Der Verlauf von C_R deutet an, daß ein geringer Einfluß des Hinterschiffes auf die Wellenbildung vorhanden ist.

Der Einfluß der in Tabelle 1 angegebenen Bugwulste auf den Wellenwiderstand ist übereinstimmend mit Schleppversuchen und Wellenhöhenmessungen nachgewiesen worden. Bild 6 zeigt den Restwiderstandsbeiwert C_R und den Widerstandsbeiwert aus dem Wellenimpulsfluß C_{wI} für das wulstlose Serie 60-Modell sowie für

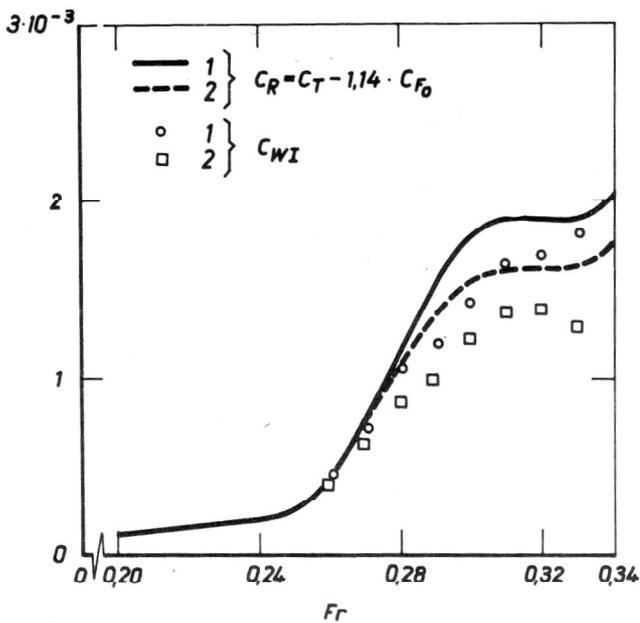


Bild 6
Einfluß des Bugwulstes auf C_R und C_{WI} . 1 – Schiff ohne Bugwulst; 2 – Schiff mit Bugwulst Nr. 1 nach Tabelle 1 (Halbkugel-Zylinder-Bugwulst)

dieses Modell mit Halbkugel-Zylinder-Bugwulst Nr. 1 entsprechend Tabelle 1. Obwohl der Einfluß des Bugwulstes auf die Verringerung des Widerstandes richtig wiedergegeben wird, zeigt sich hier, daß nicht die gesamte, dem Wasser mitgeteilte Energie sich in Form der Wellenenergie seitlich ausbreitet, sondern daß auch ein geringer Anteil verwirbelt und dissipiert. Die Gegenüberstellung der C_R - und C_{WI} -Beiwerte ist also im Schiffbau-Versuchswesen geeignet, auf experimentellem Wege unter Nutzung der Potentialtheorie das Wellenbrechen, welches die Ursache dieser Verwirbelung ist, aufzuzeigen.

5. Verzerrungsverfahren für Bugwulste

Die Untersuchung der Dipol-Bugwulste schaffte die Übersicht der wichtigsten Zusammenhänge der einzelnen Einflußgrößen mit dem Wellenwiderstand, doch erwies sich das Modell des einzelnen Dipols als unzureichend. Für praktische Entwurfsaufgaben wurde das Lösungsverfahren der 2. Hauptaufgabe mit einem Verfahren zur geometrischen Verzerrung von Bugwulsten verbunden [8].

Ein vorgegebenes Vorschiff mit Bugwulste ist nachträglich in einen Grundkörper, einen Wulstkopf und ein Übergangsteil unterteilbar, Bild 7. Zur Bugwulstverzerrung wird eine Verschiebung der Wulstspitze um Δx_B und Δz_B zugelassen sowie eine Veränderung der Querschnittsfläche des Bugwulstes am vorderen Lot ΔA_B . Die Oberflächen dieser Bereiche werden mittels vorgegebener Funktionen verzerrt. Dabei sind Koppelbedingungen an der Trennlinie und der Übergangslinie einzuhalten. Von Peters [9] wurde ein Programmsystem zur Bugwulstverzerrung vorgestellt.

Für drei Schiffstypen und ihre verzerrten Varianten sind vergleichende Wellenwiderstandsberechnungen und

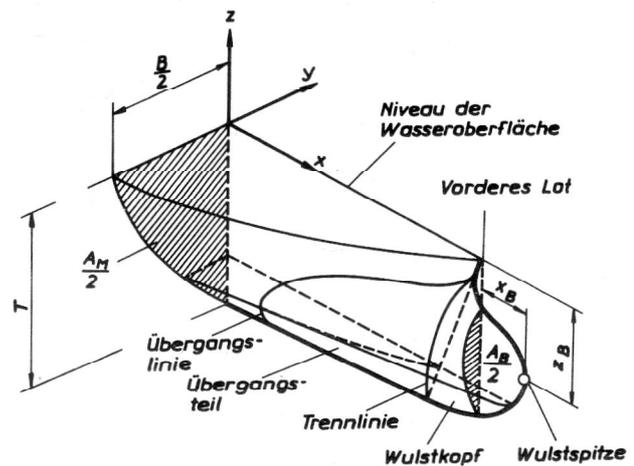


Bild 7
Untergliederung der Schiffs Oberfläche zur Bugwulstbeschreibung

Widerstandsmessungen durchgeführt worden. Es sind dies ein Frachtschiff mit Heckwulst und 1 Propeller (716), ein schlankes Ro-Ro-Schiff mit 2 Propellern (713) und ein Feuerlöschkreuzer mit scharfem Vorschiff und breitem, flachen Heck mit 3 Propellern an Wellenböcken (711). Die Froudezahlen überdecken den im Bild 3 angedeuteten Bereich von $Fr > 0,24$.

Von entscheidendem Einfluß auf den Widerstand ist die Breitenverzerrung, während die Längenverzerrung von geringer Bedeutung und die Tiefenverzerrung nahezu bedeutungslos ist.

In Bild 8 sind für die drei genannten Fahrzeuge mit systematisch in der Breite verzerrten Bugwulsten die Beiwerte C_{WV} und C_R aufgetragen worden, um die günstigste Querschnittsfläche A_B/A_M aufzufinden. Zahlenmäßig sind die Unterschiede zwischen den gemessenen und den berechneten Beiwerten noch so groß, daß für die Vorausberechnung der Schleppleistung des naturgroßen Schiffes nur der Beiwert C_R in Frage kommt. Beide Methoden der Bestimmung des Widerstandes geben jedoch die Tendenz richtig wieder. Es ist gerechtfertigt, das potentialtheoretische Entwurfsverfahren in Verbindung mit der Bugwulstverzerrung zur Ermittlung der optimalen Querschnittsfläche einzusetzen. Es zeigt sich, daß die C_R -Kurven gegenüber den C_W -Kurven zu größeren Fr verschoben sind. Demzufolge wirkt in der realen Strömung eine scheinbar größere Schiffslänge als die geometrische. Weiterhin wird für ein vorgegebenes Fr zu einem Entwurfszustand auf theoretischem Wege eine größere optimale Querschnittsfläche errechnet, als sich im Schleppversuch ergibt, Bild 8. Die Ursache dafür ist die beginnende Verwirbelung der Bugwelle. Beim Schiff 711 ist dieser Unterschied besonders ausgeprägt, da die Bugwulstform noch nicht ausgereift ist. In diesem Fall ist ein neuer Ausgangsbugwulst mit vergrößertem A_B/A_M und größeren Krümmungsradien zu entwerfen, um den im Modellversuch beobachteten Zerfall der Bugwelle in Spritzer und Wirbel zu vermeiden.

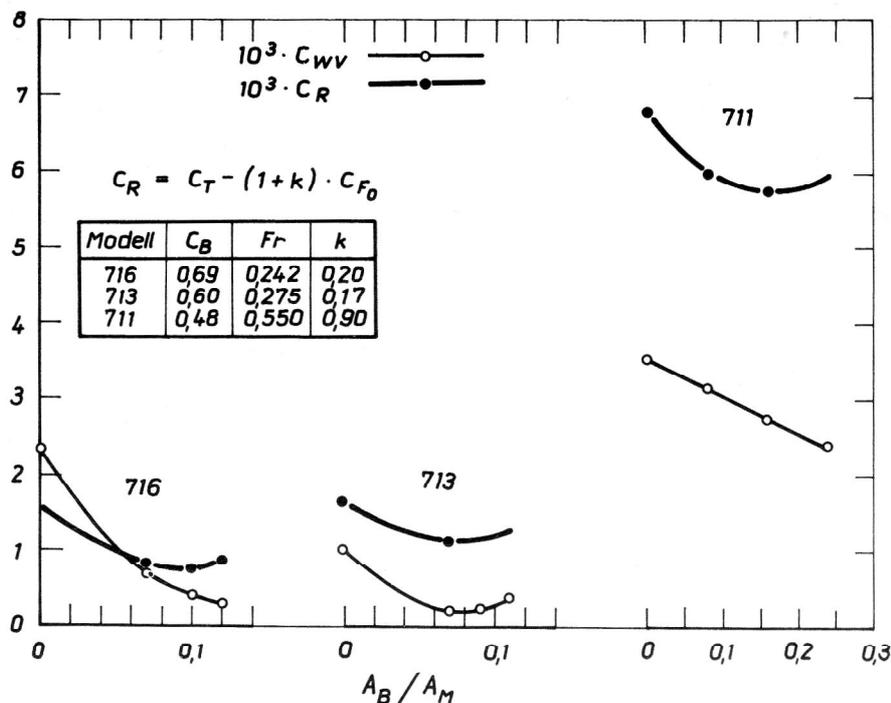


Bild 8

Gegenüberstellung gemessener und berechneter Widerstandsbeiwerte zum Auffinden des günstigsten Bugwulstquerschnittes für drei Schiffstypen

6. Grenzschichteinfluß

Setzt man eine ablösungsfreie Umströmung voraus, so bildet sich am Schiff eine turbulente Grenzschicht aus. An Doppelmodellen von Schiffen ist in Windkanälen die Grenzschichtentwicklung untersucht worden. Die Übertragung des Zusammenhanges der Form des turbulenten Geschwindigkeitsprofils und der Wandschubspannung mit den Ähnlichkeitskennzahlen $Re\delta^{**}$ und $Ha\delta^{**}$ für zweidimensionale Grenzschichten auf die dreidimensionale Schiffsgrenzschicht ist möglich, wenn nur sehr geringe Querströmungen zugelassen werden. Das ist über etwa 90 % der Schiffslänge der Fall. Beim Schiff mit freier Wasseroberfläche treten zusätzliche Effekte auf.

Nach den Beobachtungen in der Schlepprinne der SVA breitet sich verzögerte Flüssigkeit am Hinterschiff an der Wasseroberfläche aus. Sie ist an der Wirbelstruktur deutlich erkennbar und mittels Gesamtdrucksonden meßbar. Unter der empirischen Annahme, daß an der Wasseroberfläche die Grenzschicht derartig anwächst, daß die Strömung am Schiff in voller Schiffsbreite entlangfließt, in tiefen Bereichen aber jedoch nur entsprechend der Verdrängungsdicke vom Schiff abgelenkt wird, sind Wellenwiderstandsberechnungen mit scheinbar abgeänderten Hinterschiffsformen durchgeführt worden [7]. Es wird dabei eine bessere Annäherung der Wellenwiderstandsbeiwerte an die Restwiderstandsbeiwerte erreicht.

Der räumlichen Grenzschicht überlagern sich Längswirbel, die ihre Ursache im Wegströmen der Grenzschicht an stark gekrümmten Oberflächenbereichen haben. Diese Längswirbel führen ebenfalls zu Sekundärströmungen im hinteren Schiffsbereich.

7. Zusammenfassung

Aufbauend auf potentialtheoretischen Gleichungen für den Wellenwiderstand sind unter der Verwendung leistungsfähiger Rechenautomaten Entwurfsverfahren für widerstandsarme Schiffsförmungen entwickelt worden. Zur Berücksichtigung der Grenzschicht, die zur Wellendämpfung am Hinterschiff führt, sind erste Teilergebnisse erreicht worden.

LITERATUR:

- [1] Michell, J. H.: The Wave-Resistance of a Ship. Phil. Mag. Ser. 5, 45 (1898), 106–123.
- [2] Havelock, T. H.: Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders (Newcastle), Vol. 60 (1943), 47.
- [3] Weinblum, G.: Anwendungen der Michellschen Widerstandstheorie. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 31 (1930), 389–440.
- [4] Lunde, J. K.: On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion. Trans. SNAME 59 (1951), 25–76.
- [5] Eggers, K.: Über die Ermittlung des Wellenwiderstandes eines Schiffmodells durch Analyse seines Wellensystems. Schiffstechnik 9 (1962) 46, 79–84.
- [6] Michalski, J.: The Bulbous Bow Design Method Minimizing Wave Resistance. Diss. Polytechnika Gdansk, 1974.
- [7] Vollheim, R.: Wellenbildung und Reibungswirkung als Ursachen des Schiffswiderstandes. Schiffbauforschung (Rostock) Sonderheft 1975, 8–16.
- [8] Diesner, E., Vollheim, R.: Entwurfsmethode für widerstandsarme Schiffsförmungen mit Bugwulsten. Seewirtschaft 11 (1979) 7, 353–355.
- [9] Peters, E.: Programmsystem Bugwulstverzerrung. Unveröffentlichter Bericht des Zentralinstitut für Mathematik und Mechanik vom 6. 12. 1979, Berlin.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. habil. Reiner Vollheim
Technische Universität Dresden
Sektion Energieumwandlung, Bereich Strömungstechnik
8027 Dresden
Mommstr. 13