

1 | November 1953

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Prof.Dr.-Ing. G. Weinblum

Systematische Entwicklung von Schiffsformen

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT für SCHIFFBAU der UNIVERSITÄT HAMBURG

Prof. Dr.-Ing. G.WEINBLUM

Systematische Entwicklung von Schiffformen

von

Prof.Dr.-Ing. G.Weinblum

Hamburg, Nov.1953

zum

Vortrag vor der S T G

Systematische Entwicklung von Schiffssformen.

Prof. Dr. G. Weinblum, Hamburg.

Einleitung.

I. Beschreibung und Darstellung der Schiffssform. (Geometrie der Schiffssform)

1. Über den Begriff "Schiffssform".
2. Die Schiffslänge.
3. Beschreibung der Schiffssform durch Hauptlinien, Formparameter und Integralkurven.
4. Stetigkeitsforderungen und "Harmonie" des Verlaufs.
5. Abwickelbarkeit.

II. Die analytische Darstellung von Schiffslinien und Schiffsoberflächen.

1. Schiffslinien.
2. Schiffsoberflächen.

E i n l e i t u n g

Die Entwicklung günstiger Schiffsformen ist die wichtigste Aufgabe der Schiffbauwissenschaft. Es könnte deshalb wundernehmen, dass eine systematische Darstellung dieses Gebietes zur Zeit noch nicht existiert. Zwar gibt es einige Standardwerke, wie D.W.Taylor's "Speed and power of ships" [1], G.S.

Baker's "Ship design, resistance and screw propulsion" [2] und zahlreiche Abhandlungen, in denen der Zusammenhang zwischen Schiffsform und Widerstand untersucht wird. Man darf aber nicht erwarten, dass Arbeiten, die einem wichtigen Teilproblem gewidmet sind, eine erschöpfende Lösung des Gesamtproblems erbringen können, wenn auch heutzutage die stärksten Impulse für die Fortentwicklung der Schiffsformen aus den Bereichen von Widerstand und Antrieb stammen.

Man könnte nun weiter argumentieren:

Die Ermittlung von Rumpfformen, die den geringsten Widerstand besitzen und die günstigsten Antriebsbedingungen ermöglichen, stellt das eigentliche Problem dar. Hat man es einmal gelöst, so können alle anderen wesentlichen Bedingungen, die ein günstiges Schiff ausmachen, nachträglich erfüllt werden, ohne daß man die ursprünglich erzielten Ergebnisse weitgehend zu modifizieren braucht. Diese Überlegung hat manches für sich und spielt in der Praxis eine bedeutende Rolle, wird aber der Aufgabe nicht gerecht.

Der wahre Grund für das Fehlen einer wissenschaftlichen Zusammenfassung über Schiffsformen, einer Theorie der letzteren, liegt in unserer mangelnden wissenschaftlichen Erkenntnis.

Unter diesen Umständen erscheint es verständlich, dass man an unser Thema vorwiegend historisch-beschreibend herangeht, wie das z.B. Kloess getan hat [3]. Wir beabsichtigen hier trotz unserer Unwissenheit einen anderen Weg einzuschlagen. Ausgehend von einigen Grundbedingungen, die ein Schiff zu erfüllen hat, wollen wir untersuchen, wie sich die Verwirklichung dieser Bedingungen auf die Gestaltung der Schiffsformen auswirkt. Es ist augenscheinlich, dass es sich beim unzureichenden Stand unserer Erkenntnis zunächst mehr um ein Programm, um das Herausschälen einiger allgemeiner Gesichtspunkte, handeln kann.

Bei der Betrachtung der Grundeigenschaften des Schiffes muss man sich weitgehend Beschränkungen auferlegen. Wir schalten alle rein militärischen Gesichtspunkte aus, die allein den Inhalt zahlreicher Untersuchungen bilden. Wir sehen ferner von einer Diskussion aesthetischer Fragen ab und berühren nur kurz den Einfluss gesetzlicher Bestimmungen, obgleich diese Dinge eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Schiffformen spielen. Was uns verbleibt, sind im wesentlichen Überlegungen aus der Mechanik; im Hintergrund stehen natürlich wirtschaftliche Gesichtspunkte. Gesetzliche Bestimmungen sollten m.E. auf den technisch-wirtschaftlichen Gegebenheiten aufbauen. Dasselbe gilt z.T. auch für die aesthetischen Forderungen; doch werden durch letztere neue Gesichtspunkte hereingebracht, deren Diskussion wir Berufeneren überlassen.

Wir betrachten folgende Grundbedingungen, denen eine Schiffsform genügen muss:

1. Auftrieb) im unversehrten und im lecken Zustand.
2. Stabilität)
3. Räume und Decksflächen.
4. Günstige Leistung (Widerstand und Antrieb) im ruhigen Wasser und im Seegang.
5. Seefähigkeit und gutes Verhalten im Seegang.
6. Manövrierfähigkeit im ruhigen Wasser und im Seegang.
7. Festigkeit, das Schiff als Ganzes betrachtet und lokal.
8. Fehlen von Vibrationen.
9. Eignung für eine einfache Bauweise.

Daneben treten noch wichtige Sonderaufgaben auf, mit denen wir uns aber nicht abgeben können.

Die Schiffsbauwissenschaft hat nun, summarisch gesprochen, zwei Arten von Aufgaben zu erfüllen:

1. Die Lösungen der vorstehend aufgezählten Einzelprobleme herbeizuführen,
2. die erhaltenen Ergebnisse miteinander abzustimmen, indem man sie entsprechend ihrer Bedeutung mit "Gewichten" versieht.

Die Aufgabe 2) tritt immer bei der konkreten Entwurfsarbeit auf; sie bildet das Grundproblem der Lehre vom Schiffsentwurf, die als Wissenschaft noch nicht besteht. Die Vernachlässigung dieser angewandten Disziplin äussert sich u.a. in der eigentümlichen

Betonung des Gegensatzes von "Theorie und Praxis". Es besteht bei uns noch eine Verkennung der Bedeutung von Forschungsarbeiten, die man meist bei den Abnehmern, gelegentlich aber auch bei den Urhebern derselben findet. Die Lösung einer wissenschaftlich oder praktisch wichtigen Teilaufgabe ist eine notwendige und verdienstvolle Tätigkeit, selbst wenn sie eine weitgehende Abstraktion vorstellt. Es ist nicht nötig, wenn auch häufig erwünscht, dass der Wissenschaftler sein Ergebnis zur Abstimmung mit anderen technischen Forderungen bringt. Dies ist meist Sache des Entwurfsingenieurs, den der Mann der Forschung weder ersetzen kann noch soll.

Wir zeigen an einem einfachen Beispiel, wie wirtschaftliche Überlegungen die Bewertung der Grundeigenschaften von Schiffen verschieben. Vergleicht man Formen von See- und Küstenschiffen, so fällt auf, dass letztere für gleiche Froude'sche Zahlen in der Regel erheblich völliger gebaut werden. Dieser Unterschied ist keineswegs in den grundsätzlichen Widerstandseigenschaften der beiden Schiffstypen zu suchen; im Gegenteil, diese ähneln sich, trotz gewisser Unterschiede in den Verhältnissen der Hauptabmessungen, weitgehend. Man würde also zu ähnlichen Lösungen für die Völligkeiten gelangen, legte man dem Widerstand in beiden Fällen das gleiche Gewicht bei. Man nimmt aber bei Küstenschiffen eine Erhöhung des Widerstandes aus anderen Gesichtspunkten in Kauf.

Hieraus ergibt sich in Handbüchern die Gepflogenheit, die Untersuchung der Widerstandseigenschaften und Bemessung der Leistung von Küstenfahrzeugen gesondert zu behandeln [4]. Zweifellos kann man damit wichtigen praktischen Bedürfnissen genügen, aber der Zusammenhang des Gebiets der Schiffsförmungen geht dabei leicht verloren.

Es wäre z.Zt. ein törichtes Unterfangen, Schiffsförmungen ab ovo aus der Bedingung abzuleiten, dass sie die aufgezählten Grundeigenschaften des Schiffes in bestimmter Weise erfüllen. Wir betrachten deshalb den vorliegenden Erfahrungsschatz als gegeben und sehen zu, welche Lösungen vom gerade vorliegenden Gesichtspunkt zweckmässig sind bzw. in welcher Richtung Änderungen wünschenswert erscheinen können.

Wir sind von der überragenden, häufig sogar zu einseitig betonten Bedeutung des Widerstandes (und Antriebs) für unsere Betrachtungen ausgegangen. Als Eigenschaft, die dem Widerstand von unserem gegenwärtigen engen Gesichtspunkt an Bedeutung gleich kommt, sehen wir das Verhalten im Seegang an. Auftrieb und Stabilität lassen sich leichter behandeln; die Manövrierfähigkeit tritt an Bedeutung etwas zurück. Die Probleme der Festigkeit werden wir trotz ihrer grundlegenden allgemeinen Bedeutung nur am Rande erwähnen.

Gegenüber der angedeuteten schiffstheoretischen Betrachtungsweise hat auch eine andere ihre Berechtigung. Man fasst alle für das Schiff massgeblichen hydrodynamischen und hydrostatischen Probleme einheitlich zusammen. Neben Auftrieb und Widerstand erscheinen als weitere Kraftwirkungen Querkräfte, Momente usw. Ihr Studium führt dann zu den erwünschten Erkenntnissen über die Schiffsform. Bei der Schwierigkeit der vorliegenden Aufgabe bedeutet diese Betrachtungsweise z.Zt. nur ein Programm, dessen in die Zukunft weisende Bedeutung jedoch jetzt schon berücksichtigt werden sollte.

Bis vor kurzem konzentrierte sich die wissenschaftliche Behandlung des Problems "Schiffsform" ziemlich weitgehend auf das Unterwasserschiff; die wichtige Gestaltung des Überwasserschiffs wurde in der Regel nebenbei abgetan und dem freien Ermessen überlassen. Die französische Terminologie "oeuvres mortes" ist bezeichnend. Dieses Vorgehen ist natürlich ungesund, wie die elementarsten Überlegungen über Stabilität, Verhalten im Seegang usw. unmittelbar lehren. Bei der Aufstellung praktischer Bestimmungen und Berechnungsverfahren für Freibad (einschliesslich Sprung und Aufbauten), Schottenunterteilung usw. ist man in diesen Fehler nie verfallen.

Unser Vortrag stellt den ersten Teil einer umfangreicheren Arbeit vor. Er enthält Erörterungen über die Darstellung und Kennzeichnung der Schiffsformen, die auf geometrischen Überlegungen elementaren Charakters beruhen. Daneben sind einige Beobachtungen aus der Mechanik eingeschaltet, doch sollen letztere im wesentlichen einer späteren Veröffentlichung vorbehalten werden. Diese Trennung erwies sich als notwendig, da die Ergebnisse z.T. einer Gemeinschaftsarbeit entstammen und ihre Ver-

Wertung erst abgestimmt werden muss.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, schon hier der Deutschen Forschungsgemeinschaft meinen aufrichtigen Dank für die grosszügige Förderung unseres Vorhabens zu erstatten.

I. Beschreibung und Darstellung der Schiffsform.

(Geometrie der Schiffsform)

I, 1) Über den Begriff "Schiffsform".

Offensichtlich ist das Problem der zweckmässigen Darstellung von Schiffsformen grundlegend für alle weiteren Überlegungen. Trotz verschiedener Bemühungen um eine analytische Beschreibung, auf die wir zu sprechen kommen werden, wird der Linienriss meist graphisch festgelegt. Entwurf und Analyse der Schiffsform beruht auf einer Anzahl wohlbekannter Begriffe, Grössen und Funktionen (Kurven). Um eine Übersicht über die unendliche Mannigfaltigkeit von möglichen Rumpfformen zu gewinnen, spaltet man heutzutage häufig die Hauptabmessung $L B T$ in einer zweckmässig erscheinenden Weise ab und arbeitet mit dimensionslosen Aufmassen.

Es erhebt sich die Frage: was versteht man unter gleichen Schiffsformen. Die Antwort hierauf ist gar nicht so einfach, da man das Wort "Schiffsform" in verschiedenen Bedeutungen gebraucht. Allgemein wird man sagen, dass alle geometrisch ähnlichen Schiffsrümpfe die gleiche Form besitzen. Das gilt z.B. insbesondere für eine Grossausführung und das dazugehörige "Schleppmodell". Dieser Sprachgebrauch befindet sich im Einklang mit dem in der Mathematik üblichen: Auf das Beispiel einer analytisch definierten Oberfläche übertragen, würden demnach alle Ellipsoide mit gleichen Achsenverhältnissen b/a c/a dieselbe Form besitzen. Formal lässt sich das sehr einfach beschreiben.

Die Gleichung einer gegebenen Schiffsoberfläche sei

$$y = f(x, z) \quad (1).$$

Wir spalten jetzt eine Längendimension, vorzugsweise die Länge L , ab, indem wir

$$x = Lx' \quad y = Ly' \quad z = Lz' \quad \text{setzen.} \quad (2).$$

Dann ist $y' = f(x', z')$ (3)
eine dimensionslose Beziehung, welche die Oberfläche nach Gleichung (1) und alle geometrisch ähnlichen Gebilde kennzeichnet.

Häufig fasst man aber den Begriff "(gleiche Schiffsform" viel weiter. Gleichung (1) gilt für feste Verhältnisse der Hauptabmessungen L/B und B/T , die wir auch Proportionen nennen wollen. Ändert man nun eines von diesen beiden oder beide Verhältnisse, mathematisch ausgedrückt, führt man eine affine Verzerrung des Linienrisses durch, so ist das so erhaltene "Schiff" dem Prototyp nicht mehr ähnlich; trotzdem wird man (besonders bei kleiner Änderung der Verhältnisse L/B und B/T) häufig die Antwort erhalten, dass beide Risse die gleiche Form aufweisen. Auf das Ellipsoid angewandt, würde das im Grenzfall z.B. heissen, dass ein langgestrecktes Ellipsoid und eine Kugel dieselbe Form besitzen, da sie durch affine Verzerrungen ineinander überführt werden können. Man sieht an diesem Beispiel, dass unsere Verallgemeinerung zu einer Verwässerung des Begriffes "gleiche Form" führt. Will man sich einer präzisen Ausdrucksweise befleißigen, so ist es zweckmässig, den Begriff "gleiche Form" nur für ähnliche Rumpfe beizubehalten und für affine Oberflächen eine genauere Bezeichnung "gleiche dimensionslose Form" einzuführen.

Auch damit wird man bei der Vieldeutigkeit des Begriffes "Schiffsform" nicht alle Verwechslungsmöglichkeiten ausschalten; im Zweifelsfall sollte man auf die Definition ähnlich und affin zurückgreifen.

Der Begriff "dimensionslose Form" wird in der Schiffsbaupraxis ohne Gebrauch dieser Bezeichnung ständig angewandt; wir legen ihn in Anlehnung an die Gepflogenheiten der Praxis fest, indem wir aus verschiedenen Möglichkeiten eine bestimmte herausgreifen.

Es ist üblich, die Ordinaten der Schiffsoberfläche $y = f(x, z)$ und von Kurven $y = f(x)$ usw. durch Division mit der halben Breite $b = B/2$ (allgemeine maximale Ordinate) dimensionslos zu machen. Dies entspricht einer Transformation

$$y = b \cdot \eta \quad (4).$$

Machen wir, was ebenso üblich ist, noch die Länge und den Tiefgang dimensionslos, d.h. setzen wir

$$x = l \cdot \xi \quad \text{bzw.} \quad z = T \cdot \zeta \quad (4a), \text{ so ist}$$

$$\gamma = f(\xi; \zeta) \quad (5)$$

die dimensionslose Gleichung einer Oberfläche, in der die Verhältnisse der Hauptabmessungen nicht mehr erscheinen. Das durch Gleichung (5) oder entsprechende Risse dargestellte Gebilde wollen wir die "dimensionslose Form" des Schiffskörpers nennen; alle aus einem Prototyp affin abgeleiteten Oberflächen besitzen die gleiche "dimensionslose Form". Um eine bestimmte Oberfläche zu kennzeichnen, benötigen wir die Gleichung der dimensionslosen Form und die Hauptabmessungen (bzw. eine Hauptabmessung und 2 Proportionen). Mit dieser in der Praxis weitgehend benutzten Darstellungsweise haben wir die Hauptabmessungen abgespaltet und damit den ersten Schritt zu einer Systematik der Schiffsförmern gemacht.

Wir wollen uns überlegen, was man sonst noch mit dem Begriff "dimensionslose Form" anfangen kann und dabei auf einige selbstverständliche Grenzen hinweisen.

Die Abtrennung der Hauptabmessungen erweist sich als nützlich bei verschiedenen geometrischen Berechnungen. Hiervon wird z.Zt. noch nicht genügend Gebrauch gemacht; das gilt besonders für die Stabilitätslehre, Etwas verwickelter können die Dinge bei der Untersuchung anderer mechanischer Eigenschaften des Schiffes liegen.

Bei der Ermittlung des Wellenwiderstandes z.B. geht man zweckmässigerweise ebenfalls von der dimensionslosen Form aus. Es stellen sich jedoch hierbei Komplikationen ein, weil das Verhältnis L/T mitberücksichtigt werden muss. Ganz allgemein lassen sich die hydrodynamischen Vorgänge um das Schiff nicht an dem Schema einer dimensionslosen Form behandeln; man braucht nur an die Bedeutung der absoluten Winkelgrössen, die eine Körperform aufweist, für Reflexion von Wellen, Druckwiderstand usw. zu denken.

Wenn die Änderungen massgeblicher mechanischer Eigenschaften bei Variation der Proportionen sich leicht überblicken lassen, wird man jedoch den Begriff "dimensionslose Form" mit

Nutzen verwenden und damit Vereinfachung der Rechenverfahren und grössere Allgemeingültigkeit der Ergebnisse erzielen.

Von letzterem Standpunkt hat natürlich die "dimensionale" Darstellung nach Gl. (3) Vorzüge [5]. In der genannten Arbeit von Landweber ist ein System der dimensionslosen Beiwerte, die in der Mechanik des Schiffes auftreten, konsequent auf Gl.(3) aufgebaut. Es zeigt sich jedoch, dass die Wahl der Bezugsgrößen für die dimensionslose Darstellung häufig zweckmässiger - weise nicht nur nach geometrischen, sondern auch nach mechanischen Gesichtspunkten zu erfolgen hat. Für unsere gegenwärtigen Zwecke erscheint mir daher die Gl. (4,5) ausreichend und günstiger.

Schliesslich wird das Wort "Schiffsförm" noch zur Beschreibung des allgemeinen Charakters von Schiffsoberflächen, besonders auch von solchen, die nach bestimmten Konstruktionsprinzipien und patentierten Ideen entwickelt sind, benutzt. Z.B. erlaubt die allgemein übliche Einteilung der Schiffsförm nach dem Charakter der Spanten, U oder V - Form, eine ganze Reihe von summarischen Schlüssen über Stabilität, Widerstand und Seefähigkeit zu ziehen. Dies ist u.a. auf folgende Tatsachen zurückzuführen:

- 1) Der Einfluss der Spantform auf die Anfangsstabilität lässt sich ohne grundsätzliche Schwierigkeiten feststellen.
- 2) Die Abhängigkeit des Wellenwiderstandes von der Spantform, anders ausgedrückt, von der Verteilung der Verdrängung über die Tiefe, ist relativ einfach zu überblicken.
- 3) Unsere Kenntnis über die Abhängigkeit des zähigkeitsbedingten Widerstandes von der Querschnittsform eines Körpers ist zwar gering. Experimentelle Erfahrungen gestatten aber in einigen Fällen einige Aussagen, so z.B. dass ein V-förmiges Hinterschiff besser ist als ein U-förmiges.
- 4) Die Spantform ist kennzeichnend für die Dämpfungseigenschaften, die ein Schiff bei Bewegungen im Seegang erfährt.

Andererseits vermittelt die Kenntnis des Charakters der Spantform natürlich nur unzureichende Aufschlüsse über die Längsverteilung des Displacements und der daraus resultierenden hydrodynamischen Eigenschaften des Schiffes, (z.B. des Wellenwiderstandes).

Der Ausdruck "ähnliche Schiffformen" wird häufig sehr vage gebraucht; man denkt dabei keineswegs an geometrische Ähnlichkeit. Bezieht man ihn nur auf den Charakter der Spanten, so hat er im Sinne des oben Ausgeführten eine Bedeutung und kann mit Nutzen verwandt werden. Grössere Vorsicht ist gegenüber dem Ausdruck "Ähnlichkeit" am Platze, wenn Aussagen über die Längsverteilung des Deplacements gemacht werden sollen.

Gelegentlich wird in der Literatur mit reine Form ("pure form") das bezeichnet, was nach Abspaltung der Hauptabmessungen und des Völligkeitsgrades übrigbleibt. Der Ausdruck hat sich nicht eingebürgert, obgleich ihm eine gewisse Bedeutung zukommt.

Seit langem hat man versucht, ideale Schiffformen aus Analogien mit Fischformen und aus primitiven hydrodynamischen Vorstellungen oder Spekulationen über einfache mathematische Kurven und Körper herzuleiten. Zwar haben solche Bemühungen gelegentlich anregend gewirkt - man denke nur an Rankine's Vorschlag, Wasserlinien aus Quell-Senkensystemen abzuleiten - im allgemeinen jedoch nicht zu positiven Resultaten geführt. Analogiebetrachtungen über Fisch- und Schiffsform ("pisciform") leiden an dem Fehler, dass der Fisch normalerweise tiefe - taucht schwimmt, die Natur ihn also nicht auf geringen Wellenwiderstand zu konstruieren braucht.

Gedanken über Vorzüge der Trochoidenform, der selbst ein Mann wie R.E. Froude besondere Eigenschaften zuzuschreiben geneigt war, bleiben reichlich unklar. Die seinerzeit propagierte Tetraederform beruhte auf unzulänglichen Vorstellungen [7].

Das Problem der mathematisch definierten Schiffslinien hat die Gemüter, besonders seit Chapman, [34] beschäftigt. Solange damit mystische Vorstellungen verbunden waren, haben die Erörterungen wenig Positives gezeitigt. Erst unter der Meisterhand von D.W. Taylor, der mit der Aufstellung von mathematischen Gleichungen nüchterne Ziele verband, wurden die Bemühungen fruchtbar.

Es ist wenig bekannt, dass die USA-Marine unter dem Einfluss D.W. Taylor's zu Beginn dieses Jahrhunderts weitgehend "mathematische" Linien mit gutem Erfolg für den Entwurf ihrer

Fahrzeuge angewandt hat. Ich betrachte es als einen Verlust für den Schiffbau und insbesondere unsere Versuchstechnik, dass Taylor seine grundlegende Arbeit an einer wenig zugänglichen Stelle veröffentlicht hat [6] und sie deshalb lange unbeachtet geblieben ist. Taylor hat es in der Neuauflage seines Standardwerkes [1] unterlassen, sowohl diese Arbeit, wie zahlreiche seiner wertvollen experimentellen Untersuchungen zu berücksichtigen.

Das Problem der mathematischen Linien wird uns noch eingehender beschäftigen.

I, 2) Die Schiffslänge.

Eigentümlicherweise setzen schon bei den einfachsten Dingen Schwierigkeiten ein, wie z.B. bei der Definition der Schiffslänge. Von der Festlegung dieser Grösse L hängen die Zahlenwerte verschiedener wichtiger Parameter, wie des Völligkeitsgrades, der Froude'schen Zahl usw. ab. Eine präzise Definition der Länge ist deswegen unerlässlich.

Begriffe, wie Länge über Alles, Länge in der Schwimmlinie und Länge zwischen den Perpendikeln, brauchen als bekannt hier nicht festgelegt zu werden. Bei uns handelt es sich um die Definition geeigneter Längen für schiffstheoretische Probleme; hierzu gehört z.B. die Verdrängungslänge (displacement length), vergl. [4] S.89. Man ist gelegentlich dazu übergegangen, für Ein- und Mehrschraubenschiffe verschiedene Verdrängungslängen einzuführen. So ist vorgeschlagen worden, für das Zweischraubenschiff die Länge in der Schwimmlinie zu benutzen. Dieses entspricht z.B. den amerikanischen Gepflogenheiten. Für das Einschraubenschiff verwendet man dagegen lieber die Länge zwischen den Perpendikeln, wobei jedoch dieser Begriff nicht immer eindeutig erscheint. Man weicht heutzutage auch gelegentlich davon ab. Ich verweise auf die ausgezeichnete Abhandlung über die Mariner Class Schiffe [35]. Bei diesen ist wegen der grossen Länge des Schraubenbrunnens die Definitionslänge nur bis Hinterkante Schraubensteven gerechnet.

Unvollständige oder fehlende Angaben über die benutzte

Länge entwerfen häufig Angaben über Völligkeitsgrade usw. in der Literatur. Vorbildlich sind die neuen amerikanischen Veröffentlichungen über Modellversuchsergebnisse (Model Data Sheets) [10], bei denen die Längen, wenn nötig, durch eine Skizze festgelegt erscheinen.

Wir befassen uns im Folgenden mit einigen geometrischen Eigenschaften der Schiffsoberfläche und der sie kennzeichnenden Elemente.

I, 3) Beschreibung der Schiffsförm durch Hauptlinien, Formparameter und Integralkurven.

Das übliche Entwurfsverfahren basiert auf der Verwendung einer Reihe von Formparametern und Kurven. Wir wollen einige wohlbekanntere Dinge in ein mathematisches Gewand hüllen, das sich als billig und vorteilhaft erweist und den Nutzen der dimensionslosen Darstellung hervorhebt.

Wir wählen ein Koordinatensystem nach Abb.1. Der Ursprung wird nach Mitte Schiff verlegt (nachdem die Definition der Länge feststeht), wie es häufig für die Berechnung einzelner Elemente des Kurvenblattes geschieht. Als Nebenprodukt dieser Achsenanordnung ergibt sich die Erkenntnis, dass mit Bezug auf das Hauptspant der Rumpf in einen symmetrischen Haupt- und antisymmetrischen zusätzlichen Teil zerlegt werden kann,

d.h.

$$y = y(x, z) = y_s(x, z) + y_a(x, z) \quad (6)$$

und für die dimensionslose Form

$$\eta = \eta(\xi, \zeta) = \eta_s(\xi, \zeta) + \eta_a(\xi, \zeta) \quad (7).$$

Ebenso setzen wir für eine Kurve, z.B. eine Wasserlinie

$$y(x) = y_s(x) + y_a(x) \quad (8)$$

$$\eta(\xi) = \eta_s(\xi) + \eta_a(\xi) \quad (9).$$

Dieses bedeutet nicht, dass man eine ideale Schiffsförm symmetrisch zum Hauptspant ausführen soll - eine Folgerung, die sich bekanntlich aus der Theorie des Wellenwiderstands von Körpern in reibungsloser Flüssigkeit ergibt. Ein solches Vor-

gehen würde im Lichte einer interessanten Bemerkung von Kloess, derzufolge die Differenzierung des Vor- und Hinterschiffes eine recht neue Errungenschaft vorstellt, Atavismus bedeuten. Im Gegenteil soll durch eine Aufteilung nach (1) angeregt werden, die Gründe für die Abweichung von der Symmetrie und die Bedeutung für Unsymmetrie zu untersuchen.

Von den Hauptlinien ist die CWL mit der Gleichung

$$y(x, 0) = X(x) \quad \eta(\xi, 0) = X(\xi) \quad (10)$$

und das Hauptspant

$$y(0, z) = Z(z) \quad \eta(0, \xi) = Z(\xi) \quad (11)$$

schon immer gebührend gewürdigt worden, während die Bedeutung der Längskontur für die Gestaltung der Oberfläche grosser Schiffe zeitweise wenig beachtet und erst neuerdings, vornehmlich durch die Arbeiten der "Maierform", voll erkannt worden ist. Die Gleichung der Längskontur kann in der Form:

$$x_c = R(z) \quad (12) \quad \xi_c = R(\xi) \quad (13)$$

oder

$$z_c = K(x) \quad (14) \quad \xi_c = K(\xi) \quad (15)$$

eingesetzt werden. Um das Überwasserschiff zu berücksichtigen, denken wir uns diese Kurven bis zum obersten Deck durchgeführt und durch die Projektion der Deckslinie auf die Mittelschiffsebene ergänzt.

Eine gute Zusammenstellung kennzeichnender Formparameter und Linien findet man z.B. in den Model data sheets. [10]. Wir brauchen uns mit ihrer Aufzählung nicht aufzuhalten.

Als weitere wichtige Kurve wird in Zusammenstellungen, die die Schiffsform charakterisieren sollen, häufig die Kimmsente aufgeführt. [10].

Wir diskutieren jetzt verschiedene Grössen, die für die einfache Kennzeichnung von Schiffslinien und Oberflächen besonders geeignet erscheinen.

Von den zahlreichen geometrischen Bedingungen, die man zur Beschreibung und der angenäherten Konstruktion von solchen Linien verwenden kann, wählt man möglichst solche aus, die unmittelbare Aussagen über gewisse mechanische Eigen-

schaften wie Stabilität, Widerstand usw. gestatten. Als Beispiel erinnern wir an den Schärfegrad φ , der, aus rein geometrischen Vorstellungen eingeführt, sich als wichtiges Kriterium insbesondere für den Wellenwiderstand erwiesen hat.

Bei unseren Betrachtungen ergibt sich der Nutzen der dimensionslosen Darstellung von selbst. Weiter führt die Untersuchung geeigneter Parameter der dimensionslosen Form zwanglos zur analytischen Darstellung der Schiffsoberfläche. Eine befriedigende "Theorie der Formkoeffizienten" baut sich deshalb am einfachsten auf einer Verwendung der exakten Schiffsgleichungen auf, worauf wir später kurz zurückkommen werden.

Zunächst sind Bedingungen zu nennen, die sich unmittelbar auf die Gleichung der Kurve beziehen. Eine solche ist z. B. die Stevendicke oder eine entsprechende ideelle Grösse, wie sie Taylor für den Wulststegen durch das Verhältnis f - extrapolierte Wulstbreite zur Hauptspantordinate - angegeben hat. Ferner erwähnen wir als grundlegende Grösse die Länge des parallelen Mittelschiffs.

Weiterhin lassen sich Formkoeffizienten aus Differential- und Integralbedingungen ableiten. Wir beginnen mit den Integralparametern, die vor allem in der Gestalt ihrer einfachsten Vertreter, der Völligkeitsgrade, besonders beliebt sind.

Die konsequente Entwicklung des Systems der Völligkeitsgrade ist eine elementare, aber erfreuliche Leistung der Schiffstheorie. Ihre stolze jüngere Schwester, die Aerodynamik, hat es bis jetzt nicht einmal so weit gebracht, diese nützlichen schiffbaulichen Begriffe zu übernehmen und anzuwenden.

Die Völligkeitsgrade sind Beiwerte von Flächeninhalten oder Volumina. Man kann nun weitere zur Beschreibung von Kurven oder Oberflächen geeignete Koeffizienten aus Momenten verschiedener Ordnung ableiten, indem man letztere zweckentsprechend dimensionslos macht.

Die Völligkeitsgrade und ganz allgemein alle Integralparameter sind invariant gegenüber affinen Transformationen

einer gegebenen Schiffslinie oder -oberfläche; schlicht ausgedrückt, sie hängen nicht von den Verhältnissen der Hauptabmessungen ab und lassen sich deshalb direkt aus den dimensionslosen Formen berechnen.

Wir erläutern unsere einfachen Gedankengänge am Beispiel einer Wasserlinie. Die Übertragung auf andere Kurven und auf Oberflächen ergibt sich von selbst, insbesondere da die weitgehende Verwendung von Integralkurven einen anschaulichen Übergang bietet. Die nachfolgenden Überlegungen sind im wesentlichen auf normale Verdrängungsschiffe zugeschnitten. Sie sind natürlich ganz allgemein anwendbar; aber bei extrem schnellen Fahrzeugen treten noch zusätzliche Gesichtspunkte für die Einführung von Formgrössen in den Vordergrund.

Nächst dem Inhalt der Fläche, die wir als ein Moment nullter Ordnung deuten können, haben ihr statisches und ihr Trägheitsmoment eine unmittelbare mechanische Bedeutung. Da diese Grössen sowieso bei den üblichen schiffstheoretischen Berechnungen ermittelt werden, sind sie für die Kennzeichnung der Kurvenform von Natur prädestiniert. Man könnte ähnlich wie in der mathematischen Statistik auch Momente höherer Ordnung berechnen, doch liegt dafür keine praktische Notwendigkeit vor.

Etwas abweichend vom üblichen Verfahren berechnen wir die genannten Momente nullter bis zweiter Ordnung unserer Wasserlinie zunächst getrennt für das Vor- und Hinterschiff und ermitteln daraufhin die entsprechenden Grössen für die gesamte Kurve. Dies hat den Vorzug, dass wir direkt oder nach einfachsten Rechenoperationen Abschätzungen für die Kennzeichnung der Verschiedenheit des Vor- und Hinterschiffs erhalten. Jede einzelne Momentbeziehung gestattet, eine unabhängige Aussage über die Art der Unsymmetrie der Kurve zu gewinnen.

Die für das Vorschiff geltenden Werte erhalten den Index v , die für das Hinterschiff den Index h . Wir benutzen die Aufteilung der Kurvengleichungen in einen zum Hauptspant symmetrischen und antimetrischen Teil gemäss den Beziehungen Gl(6-9).

Wie früher ist $L = 2, l$ und $B = 2, b$; im Folgenden wird Symmetrie von Backbord und Steuerbord angenommen.

a) Aus den Flächeninhalten

$$F_v = 2 \cdot \int_0^l y dx = 2 \cdot l \cdot b \cdot \int_0^1 \eta d\xi \quad (16)$$

$$F_h = 2 \cdot \int_{-l}^0 y dx = 2 \cdot l \cdot b \cdot \int_{-1}^0 \eta d\xi \quad (16a)$$

folgen die Teilvölligkeitsgrade

$$d_v = \int_0^1 \eta d\xi = \int_0^1 (\eta_s + \eta_a) d\xi \quad (17)$$

$$d_h = \int_{-1}^0 \eta d\xi = \int_{-1}^0 (\eta_s + \eta_a) d\xi \quad (17a)$$

Der Gesamtvölligkeitsgrad d ist bekanntlich

$$d = \frac{d_v + d_h}{2} = \int_0^1 \eta_s d\xi \quad (17b)$$

da der antimetrische Teil

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 \eta_a \cdot d\xi = 0 \quad (18)$$

wird.

Die Differenz aus (17) und 17a) ergibt

$$d_v - d_h = 2 \cdot \int_0^1 \eta_a \cdot d\xi \quad (18a)$$

diese Differenz oder ihre Hälfte

$$\frac{d_v - d_h}{2} = \int_0^1 \eta_a \cdot d\xi \quad (18b)$$

ist eine erste brauchbare, vorläufig noch zu selten angewandte Beziehung zur Kennzeichnung der Unsymmetrie von Vor- und Hinterschiff.

b) die statischen Momente bezogen auf die Hauptspant-(y)

Achse der getrennt betrachteten Vorschiffs- und Hinterschiffsflächen sind

$$S_v = 2 \cdot \int_0^l x y dx = 2 \cdot l^2 \cdot b \cdot \int_0^1 \xi \eta d\xi = 2 l^2 b \cdot \sigma_v = \frac{B \cdot L^2}{4} \cdot \sigma_v \quad (19)$$

$$S_h = 2 \cdot \int_{-l}^0 x y dx = 2 \cdot l^2 \cdot b \cdot \int_{-1}^0 \xi \eta d\xi = 2 \cdot l^2 \cdot b \cdot \sigma_h = \frac{B \cdot L^2}{4} \cdot \sigma_h \quad (19a)$$

Tutin hat m.W. als erster vorgeschlagen, die Schwerpunktsabstände der Flächen F_v und F_h

$$\text{also } \bar{x}_v = \frac{S_v}{F_v} = \frac{\sigma_v}{\alpha_v} \cdot l \quad ; \quad \bar{x}_h = \frac{S_h}{F_h} = \frac{\sigma_h}{\alpha_h} \cdot l \quad (20)$$

als zusätzliche Parameter für die Kennzeichnung von Kurven zu benutzen [12].

Das statische Moment der Gesamtflächen wird

$$S = S_v + S_h = 2 \int_{-l}^l x y dx = 2 \cdot \int_{-l}^l x (y_s + y_a) dx = 2 \int_{-l}^l x y_a \cdot dx = 4 \int_{-l}^l x y_a \cdot dx = 4 l^2 b \int_{-1}^1 \xi \eta_a \cdot d\xi = 4 l^2 \cdot b \cdot \sigma = B \cdot L^2 \cdot 2 \cdot \sigma / 4 \quad (21)$$

Nur

$$\text{mit } \sigma = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \quad (22)$$

Nur der antisymmetrische Teil trägt zum Gesamtmoment bei.

Die Schwerpunktskoordinate $\bar{x} = \frac{S}{F} = \frac{\sigma}{\alpha} \cdot l$ (23)

wird allgemein zur Beschreibung der Verschiedenheit von Vor- und Hinterschiff herangezogen.

Anstatt $\bar{x} = \sigma/\alpha$ benutzt man in der Praxis als dimensionslosen Wert $e = \frac{\bar{x}}{L} = \frac{\sigma}{\alpha} / 2$ (24)

Tatsächlich ist der Abstand des Schwerpunkts vom α ein nützlicher aber bei weitem nicht ausreichender Parameter. Weinblum [40]. Völker [41].

Dies gilt insbesondere für die weit verbreitete Anschauung, man könne durch Angabe des Abstandes des Verdrängungsschwerpunktes von Formvarianten $\bar{x} = M_V/V$ ihre Widerstandseigenschaften genügend genau beschreiben. Hierdurch können Trugschlüsse entstehen.

Es wird dabei übersehen, dass (18) eine zusätzliche unabhängige Beziehung für die Kennzeichnung der Unsymmetrie ergibt. Zumindest sollte man bei der Entwicklung von systematischen Modellserien (18) neben (23) benutzen.

c) Sinngemäß bildet man die Teil-Längenträgheitsmomente I_v und I_h $\int_0^l x^2 y dx = I_v$ (25); $\int_{-l}^0 x^2 y dx = I_h$ (25a)

Wir gehen jedoch hierauf nicht weiter ein und begnügen uns mit dem Hinweis, dass man in Zusammenstellungen über Schiffsformen die Beiwerte der Gesamträgheitsmomente I_L und I_B

$$c_L = \frac{I_L}{B \cdot L^3} \quad (26) \quad ; \quad c_B = \frac{I_B}{B^3 \cdot L} \quad (27)$$

neben dem Völligkeitsgrad α regelmässig angeben sollte [10,35].

Die ausgedehnte Anwendung von Integralkurven bildet ein Charakteristikum schiffstheoretischer Verfahren. Hierin steckt grosse handwerkliche Weisheit.

Wir schreiben die Gleichung der wichtigsten Integralkurve, der Spantarealkurve, in der Form

$$A(x) = \int_0^{K(x)} y(x, z) dz \quad (28)$$

oder dimensionslos

$$A^+(\xi) = \frac{1}{B} \int_0^{K(\xi)} \gamma(\xi, \zeta) d\zeta \quad (29)$$

Im letzteren Fall haben wir durch den Völligkeitsgrad β des Hauptspants dividiert, um die maximale Ordinate 1 zu erhalten.

Der Entwurf baut fast ausnahmslos auf der Spanarealkurve auf. Dies Verfahren hat sich zunächst aus konstruktiven Gesichtspunkten ergeben; es erhält aber einen erhöhten Wert durch die Bedeutung, die der Spantflächenkurve als Kriterium für Widerstandseigenschaften zukommt.

Wir werden später sehen, dass man bei der Entwicklung "exakter" Schiffslinien gelegentlich vorgeschlagen hat, von der Kurve der Wasserlinienflächen auszugehen;

$$W(x) = \int_0^{R(z)} y(x,z) \cdot dx$$

dies bringt jedoch Nachteile mit sich.

Wir konnten uns bei den Erörterungen über die Integralparameter u.a. deshalb nur auf Momente niedriger Ordnung beschränken, weil zur Kennzeichnung der Schiffsförm ausserdem zweckmässige Differentialbeziehungen zur Verfügung stehen. Mehr als insgesamt 3 Parameter wird man für die Beschreibung des Verlaufs einer Schiffslinie in einem Quadranten selten brauchen.

Es wurde hervorgehoben, dass in der Praxis Differentialbeziehungen weniger beliebt sind als Integralbeziehungen, obgleich schon Richter [11] auf den Wert der ersten Ableitung von Wasserlinien und Spantflächenkurven als Mittel zur Kontrolle und Verbesserung der Strakeigenschaften hingewiesen hat. Immerhin bürgert sich z.Zt. die Gewohnheit ein, den ersten Differentialquotienten der Spantarealkurve graphisch darzustellen oder zu tabellieren [10]. Dies ist u.a. empfehlenswert wegen seiner Bedeutung für das Studium des Wellenwiderstandes.

Man kann im Prinzip analog zu den Integralbeiwerten ein System von Differentialparametern aufbauen, das eine vollständige Beschreibung von Oberflächen und Linien gestattet. Das ist aber im Hinblick auf die spezifische Bedeutung der besprochenen Integralbeiwerte praktisch unzweckmässig.

Wir beschränken uns daher nur auf die wichtigsten Differentialbeziehungen.

- a) Der die Endtangente kennzeichnende Wert (Tangens der dimensionslosen Form)

$$t = - \left| \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right|_{\xi = \pm 1} = - \frac{L}{B} \left| \frac{dy}{dx} \right|_{x = \pm l} \quad (30)$$

hat sich besonders zur Beschreibung von Spantflächenkurven durchgesetzt dank den Arbeiten von Taylor auf den Gebieten des Widerstandes [1] und der Darstellung der Schiffsförm [6]. t erscheint gewöhnlich als massgebende Grösse im Aufbau mathematischer Linien, worüber später noch manches zu sagen sein wird. Die Neigung im Hauptspant ist im allgemeinen gleich Null, deswegen gehen wir auf sie nicht ein.

Aus der zweiten Ableitung $\frac{d^2y}{dx^2}$, die bei flachen Kurven bekanntlich mit guter Annäherung die Krümmung ergibt, lassen sich ebenfalls brauchbare "Formkoeffizienten" gewinnen.

- b) D.W. Taylor hat als weiteren Parameter die Krümmung κ einer dimensionslos dargestellten Schiffslinie im Hauptspant (oder im Übergang zum parallelen Mittelschiff) eingeführt.

$$\kappa = - \left| \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} \right|_{\xi = 0} \quad (31)$$

Der Verfasser konnte zeigen, dass diese Grösse κ in einigen Fällen recht kennzeichnend für die Widerstandseigenschaften sein kann; eine weitere Verbreitung hat sie jedoch noch nicht gefunden.

- c) Es ist ferner denkbar, die dimensionslose Krümmung an den Enden $\xi = \pm 1$ einer Kurve vorzuschreiben; dies ist bei mathematisch bestimmten Linien naheliegend [13], stösst aber bei graphisch gegebenen Kurven leicht auf Schwierigkeiten.

Mit Recht hat man der Lage des (oder der) Wendepunktes (gegeben durch $\frac{d^2y}{dx^2} = 0$) einer Schiffslinie besondere Bedeutung beigemessen; ich erinnere nur an das bekannte Patent von Yourkewitsch [32], das die Abszisse des Wendepunktes als Funktion der Froudezahl festlegt.

Die genannten Differentialparameter werden für die dimensionslose Form festgelegt und sind deshalb invariant gegenüber affinen Verzerrungen; letzteres gilt natürlich nicht für die absoluten Winkel und Krümmungsgrössen von Schiffslinien.

Da man bei verschiedenen Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften des Schiffes mit der dimensionslosen Form und den sie kennzeichnenden Grössen nicht auskommt, ist es naheliegend, Beiwerte abzuleiten, in denen die Proportionen L/B und B/T mitberücksichtigt werden.

Der beliebte Begriff des Schlankheitsgrades

$$\psi = L/V^{2/3} = \textcircled{M} = \sqrt[3]{\frac{1}{\delta} \cdot \frac{L}{B} \cdot \frac{L}{T}} \quad (32)$$

stellt eine Zusammenwürfelung von drei wichtigen Parametern vor, welche getrennt gegeben natürlich mehr über die Schiffsförm besagen als die eine Grösse ψ .

Wir entdecken hier das früher sehr beliebte, aber unzweckmässige Bestreben, möglichst viel Angaben durch eine Grösse auszudrücken.

Trotzdem besitzt der Begriff "Schlankheitsgrad" Bedeutung für eine erste Orientierung über die Schiffsförm. Da er zudem durch das Standardwerk von Taylor eine weite Verbreitung erlangt hat, ist er aus der Schiffstheorie nicht mehr wegzu-denken.

Das Taylor'sche displacement-length ratio (im wesentlichen der Quotient aus Schiffsvolumen durch das Volumen des Würfels der Kantenlänge L)

$$\nabla = \frac{\Delta}{(L'/100)^3}$$

hängt mit ψ wie folgt zusammen:

$$\psi \approx 30,5 / \sqrt[3]{\nabla} \quad (33)$$

Die Kubikwurzel in (7) hat die "magische Eigenschaft", die Variationsbreite von ψ gegenüber ∇ stark zu reduzieren.

Wir können jetzt eine überschlägliche Unterteilung der Schiffsförmn vornehmen:

- 1) nach dem Schärfegrad scharfe und völlige Schiffe
- 2) nach dem Schlankheitsgrad schlanke und gedrungene Schiffe
- 3) nach B/L schmale und breite Schiffe
- 4) nach B/T flache und tiefe Schiffe
- 5) kleines B/L und relativ dünne Schiffe
kleines B/T

Die Variante 5) spielt eine Rolle in theoretischen Untersuchungen, ist aber für die Praxis nicht besonders bedeutungsvoll. Der Name "thin ships" stammt von Sir Havelock.

Es ist oft nicht einfach, an Flächen (und räumlichen Kurven) geometrische Operationen durchzuführen; noch sehr viel schwieriger ist die Ermittlung der Strömung um solche Flächen. Es ist deshalb naheliegend, in wissenschaftlichen Untersuchungen den Schiffsrumpf (insbesondere das Unterwasserschiff) durch vereinfachte Gebilde zu ersetzen. Als solche kommen Zylinder, z.B. mit der CWL als Basis, und "äquivalente" Rotationskörper, deren Spantflächenkurve $A(x)$ mit der des Schiffes übereinstimmt, in Frage. Über diese groben Annäherungen wird später noch einiges zu sagen sein. Bekanntlich hat man auch eine rotationssymmetrische Formgebung für das Hinterschiff vorgeschlagen mit dem Zwecke, die Propulsion zu verbessern.

I,4. Stetigkeitsforderungen und "Harmonie" des Verlaufs.

Die Forderung einer geometrisch glatten Oberfläche ergibt sich als eine notwendige Bedingung zur Vermeidung von Ablösungserscheinungen. Das "streamlining" des Schiffsrumpfs und besonders auch der Anhänge hat entscheidende Fortschritte gezeitigt; es ist nicht überflüssig rückblickend festzustellen, welche Vergeudung an Brennstoff jahrzehntelang aus geistiger Trägheit getrieben worden ist, und sich den Stand der Erkenntnis auf diesem Gebiet zu vergegenwärtigen, den die Erbauer der "Great Eastern" schon besessen haben.

Vergleichsversuche mit normalen Displacementschiffen haben jedoch das zunächst überraschende Ergebnis gezeigt, dass vereinfachte Formen mit Knickspanten auch bei geringen Froude'schen Zahlen ganz vernünftige Widerstandseigenschaften aufweisen können und, was zunächst noch erstaunlicher erscheint, auch Knicke in den Wasserlinien gelegentlich nur unbedeutende Widerstandserhöhungen gegenüber glatten Formen nach sich ziehen. Die Erklärung liegt in der eingangs betonten Tatsache, dass Glattheit nur zwecks Vermeidung von Ablösungen erforderlich ist. Die Forderung nach einem geringen Wellenwiderstand führt nicht unbedingt auf glatte Formen. Günstige Interferenzwirkungen zwischen den vom Schiff erzeugten Wellen lassen sich im Prinzip auch mit geknickten Formen erreichen. Bei hohen Geschwindigkeiten kommen ausgesprochene Vorzüge der unstehtigen und geknickten Formen zur Geltung, z.B. verhindern Knicke in der Spantform oder Leisten das Ansteigen von Spritzern und u.U. auch die Entstehung von steilen Wellen bei hoher Fahrt; solche Massnahmen erhöhen also die Trockenheit des Schiffes und setzen u.U. sogar den Widerstand herab.

Bei hohen Froude'schen Zahlen bleibt die einseitige Betrachtung der Widerstandskraft ohne Berücksichtigung der übrigen Kraftkomponenten völlig unzureichend. Man muss auf die gesamte Druckverteilung über das Fahrzeug und die daraus resultierenden Kräfte eingehen, die eine Änderung der Lage des Schiffes herbeiführen und dadurch den Widerstand beeinflussen können. Eine ganze Reihe wichtiger konstruktiver Massnahmen, wie Spiegelhecks, Hacken usw. lassen sich nur aufgrund von Überlegungen erklären, die nichts mit den Ablösungserscheinungen zu tun haben.

Wir schalten jedoch alle diese interessanten Sondererscheinungen aus und befassen uns hier nur mit dem normalen Verdrängungsschiff bei mässigen Froude'schen Zahlen. Auf Knicke und Stufen bei extrem schnellen Schiffen gehen wir später ein.

Beim Entwurf des Liniendrisses spielen die Begriffe des harmonischen Verlaufs der Linien und ihres guten Strakens eine wichtige Rolle. Sie sind aus baulichen, ästhetischen und

hydrodynamischen Erwägungen entstanden; letztere waren jedoch recht vage und z.T. sogar anfechtbar.

Beide Begriffe - Straaken und Harmonie - sind nicht scharf formuliert; trotzdem verkörpern sie einen wertvollen Erfahrungsschatz. Wir wollen versuchen, einige Gesichtspunkte für ihre kritische Wertung aufzustellen.

Der Entwurf des Linienrisses basiert weitgehend auf der Straakplatte. Die Eigenschaften der so erzeugten Kurven verdienen ein ernsthaftes Studium. Mathematiker haben sich mit der Theorie dieser "spline curves" vom Standpunkt der Ausgleichsrechnung befasst. Wir gehen an sie zweckmässig vom Standpunkt ihrer Stetigkeitseigenschaften heran, obgleich damit das Problem nur teilweise erfasst wird.

Zunächst erläutern wir einige elementare Dinge an einer einfachen Skizze (Abb. 2):

1) Der Geradenzug $a + b$ mit der Gleichung $\eta = 1$ für $-1 \leq \xi \leq 0$
 $\eta = 1 - \xi$ für $0 \leq \xi \leq 1$

hat an der Stelle A ($\xi = 0, \eta = 1$) einen Knick; er ist stetig, die erste Ableitung $\frac{d\eta}{d\xi}$ wird jedoch in A unstetig.

2) Fügen wir an die horizontale Gerade a einen Kreis oder eine Parabel zweiten Grades c an, $\eta = 1 - \xi^2$

so ist η und $\frac{d\eta}{d\xi}$ im ganzen Bereich stetig.

Wir nennen eine solche Kurve (oder Kombination aus Kurven) glatt

$\frac{d\eta}{d\xi}$ weist für $\xi = 0$ einen Knick auf
 $\frac{d^2\eta}{d\xi^2}$ wird bei $\xi = 0$ unstetig.

Im allgemeinen sind Kurven, die man als Schiffslinien anspricht, mindestens glatt. Wir können die Stetigkeit von Kurven nach der höchsten Ableitung, die gerade noch stetig ist, klassifizieren. Die soeben behandelte Kurve ist danach als stetig erster Ordnung zu bezeichnen.

Zahlreiche Schiffslinien wie z.B. die Spanten im Mittelschiff, die aus zwei Geraden und einem sie tangential verbindenden

Kreis bestehen, gehören diesem Typus an. Die Krümmung springt bei ihnen plötzlich von Null auf einen endlichen Wert.

Über die Zulässigkeit der Verwendung von glatten Schiffslinien mit unstetiger Krümmung ist viel diskutiert worden. Gewöhnlich wird angenommen, dass für Linien, die nicht in der Hauptströmungsrichtung liegen, z.B. für die besprochenen Spanten im Mittelschiff, eine Stetigkeit erster Ordnung genügt; es gibt aber Werften, die sie als unzureichend ansehen. Für Wasserlinien, Senten usw. wird in der Praxis allgemein eine Stetigkeit höherer Ordnung angestrebt.

Die Hydrodynamik gibt auf diese Frage noch keine erschöpfende Antwort. In idealer Flüssigkeit zeigt die Geschwindigkeitsverteilung (zweidimensionaler Fall) an Konturpunkten, in denen die Krümmung einen Sprung erfährt, Absonderlichkeiten, wie eine vertikale Wendetangente [14]. Welche Vorgänge sich jedoch in der Grenzschicht abspielen, ist unbekannt. Man nimmt an, dass letztere einen ausgleichenden Effekt ausübt [15]. Unter diesen Umständen ist es angebracht, die alte Schiffbaupraxis bestehen zu lassen, d.h. Unstetigkeit der Krümmung bei Spanten im Mittelschiff zu dulden, keineswegs aber in Wasserlinien usw.

3) Fügen wir jetzt an a eine Parabel 3. Grades $\eta = 1 - \xi^3$ an, d, so sind auch die Krümmungen bei $\xi = 0$ stetig, d.h. wir haben hier eine Stetigkeit zweiter Ordnung. Die erste Ableitung $d\eta/d\xi$ ist glatt, $d^2\eta/d\xi^2$ weist einen Knick bei $\xi = 0$ auf. Wir wollen als notwendige Voraussetzung für das gute oder "reine" Straaken einer Kurve ansehen, dass letztere überall mindestens stetig zweiter Ordnung ist, d.h. eine glatte erste Ableitung besitzt.

Mit der Latte gezogene Kurven sind mindestens zweiter Ordnung stetig. Sieht man nämlich die Latte als Biegungsträger an, so weisen die gestraakten Linien auch dann noch stetige Krümmungen auf, wenn die Gewichte konzentrierte Kräfte auf die Latte ausüben. Da man ein solches "Quälen" der Latte tunlichst vermeidet, werden selten Punkte auftauchen, in denen

die Kurve nur zweiter Ordnung ist ^(stetig) [16].

An eine strakende Schiffslinie stellt man jedoch sehr viel weitgehendere Forderungen als nur bestimmte Stetigkeitseigenschaften. Sie sind schwer zu formulieren. Es handelt sich im wesentlichen um den Verlauf und die Grösse der Krümmung. Früher galt z.B. die Vorschrift, dass eine Wasserlinie innerhalb eines Quadranten nicht mehr als einen Wendepunkt aufweisen soll. Diese Forderung ist z.B. bei Schwanenhalsformen nicht erfüllt; das ist ein Grund, weswegen man letztere trotz gewisser Vorzüge nicht verwendet (Erschwerend für den Schwanenhals tritt hinzu, dass der Wulst ähnliches leistet und konstruktiv günstiger ist). Bei Anordnung eines Wulstes lässt man in Wasserlinien und im Spantenriss unbedenklich zwei Wendepunkte zu.

Beim Entwerfen von Schiffslinien vermeidet man sorgfältig flache Stellen und Beulen. Die hiermit verfolgten baulichen Gesichtspunkte liegen auf der Hand. Hydrodynamische Untersuchungen (ideale Flüssigkeit) haben ergeben, dass flache Stellen und Beulen zu "Unregelmässigkeiten" in der Druckverteilung führen können [17]. Wie weit solche aber die Widerstandseigenschaften beeinflussen, ist unklar, obgleich die jetzt vorhandenen Methoden ausreichen sollten, wenigstens für die ebene und achsensymmetrische Strömung einige Aussagen zu machen.

Vom praktischen Gesichtspunkt ist die Frage naheliegend, wieweit es Sinn hat, sich mit den Feinheiten des Krümmungsverlaufes usw. der geometrischen Form zu befassen, wenn man die mögliche Genauigkeit der Ausführung des Schiffsrumpfs und u.U. das Vorhandensein von Unstetigkeiten in Plattenstössen und Nähten berücksichtigt. Diese Frage ist berechtigt; sie wird erst zufriedenstellend zu beantworten sein, wenn unsere hydrodynamischen Kenntnisse wesentlich weiter gediehen sind. Erfahrungsgemäss soll man jedoch grundsätzlich Untersuchungen nicht zu weitgehend vom gegenwärtigen Stand der Technik abhängig machen. Konsequenzen, für den Widerstand, die sich aus dem Übergang von genieteten Fahrzeugen zu geschweissten ergeben, er-

läutern die Bedeutung der genannten allgemeinen Regel.

Beim Straaken spielen ästhetische Gesichtspunkte eine Rolle. Man soll ihre Bedeutung nicht unterschätzen; ein gut Teil handwerklicher Weisheit kann in ihnen verborgen sein. Man soll sie aber auch nicht über Gebühr bewerten, worauf wir weiter unten zu sprechen kommen.

Die Forderung nach einer Harmonie der Linien schließt gewöhnlich die Bedingung des Straakens ein. Sie bezieht sich gelegentlich auf die "Schönheit" einer einzelnen Linie, noch häufiger jedoch auf die eines Linienkomplexes. Ästhetische Gesichtspunkte, die sich einer exakten Formulierung entziehen, sind entscheidend. Da der harmonische Verlauf von Linien als *conditio sine qua non* zur Genüge gepredigt worden ist, wollen wir uns um die Schwierigkeit der Definition des Begriffes drücken, und nur seine Unzulänglichkeit hervorheben.

Wesentliche mechanische Eigenschaften des Schiffes lassen sich nicht einfach nach dem Kriterium beurteilen, daß die Linien für das Auge gefällig sein sollen. Das gilt z.B. insbesondere für den Wellenwiderstand. Der Bugwulst, der in zahlreichen Fällen sehr nützlich ist, wurde ursprünglich als "pervers" empfunden; ganz allgemein können "perverse" Formen ausgezeichnete Widerstandseigenschaften aufweisen. Als klassisch wird heutzutage folgendes Beispiel angesehen: von den zwei in Abb.3 gezeigten Spantarealkurven, die sich wenig unterscheiden, insbesondere ein gleiches φ und t aufweisen, ist A zweifellos "harmonischer" als B, gleichzeitig ist der Wellenwiderstand einer auf A beruhenden Schiffsförm in wichtigen Gebieten von Froudezahlen bis 30% höher als der zu B gehöri- gen. [18]. Sinn für Schönheit der Form bedeutet eine für den Schiffbauer notwendige aber nicht hinreichende Begabung.

I,5. Abwickelbarkeit.

Die Differentialgeometrie ist zu Anfang des vorigen Jahrhunderts durch einen bedeutenden Schiffbauer, den Kapitän DUPIN, wesentlich gefördert worden [19]. Auf ihn geht die Einführung der "Dupin'schen Indicatrix" zurück, die in der Flächentheorie eine wichtige Rolle spielt. Es handelt sich hierbei um Folgendes:

Schneidet man eine gegebene Oberfläche mit einer Ebene, die

parallel zur Tangentialebene in einem Punkt der ersteren ist und um einen infinitesimalen Betrag von ihr entfernt ist, so erhält man Kegelschnitte. Sie geben uns Aufschluß über den Charakter der Oberfläche in der Nähe des gegebenen Punktes.

Später ist die gegenseitige Befruchtung zwischen der Schiffstheorie und der Flächentheorie versiegt. Das ist bedauerlich, weil der Mathematiker manche Anregung von uns beziehen könnte und manches Nützliche zum vorliegenden Problem zu sagen hat. Die Brauchbarkeit der Mathematik wollen wir an einem trivialen Beispiel - dem Problem der Abwickelbarkeit - exemplifizieren. Legen wir durch die Flächennormale, die senkrecht zur Tangentialebene in einem Punkt P steht, Ebenen, so schneiden diese unsere Oberfläche in Kurven s, die man bekanntlich Normalenschnitte nennt. Im allgemeinen werden die bekannten Krümmungsradien der Normalenschnitte bei der Drehung der Normalebene ein Maximum r_{\max} und Minimum r_{\min} annehmen und aufeinander senkrecht stehen; die Krümmung eines jeden Normalenschnittes ist durch die Hauptkrümmungen $K_1 = \frac{1}{r_{\max}}$ und $K_2 = \frac{1}{r_{\min}}$ und die Orientierung des Normalenschnittes vollständig bestimmt. Das Produkt $K = K_1 \cdot K_2$ nennt man die Gauss'sche Krümmung. Flächen der Gauss'schen Krümmung $K = 0$ lassen sich abwickeln. Man kann diesen Tatbestand anschaulicher ausdrücken: alle abwickelbaren Flächen sind Regelflächen, d.h. Flächen, die aus der Wanderung einer beweglichen Geraden entlang einer Führung entstehen. Umgekehrt sind Regelflächen abwickelbar.

Von Zeit zu Zeit sind Vorschläge für vereinfachte Schiffsförmungen gemacht worden, [20] [21], besonders im ersten Weltkrieg, als es sich darum handelte, Schiffsraum schnell und ohne besondere Sachkenntnis zu bauen. Hierbei spielte die Abwickelbarkeit eine gewichtige Rolle; man ging deshalb darauf aus, die Spanten aus Geradenstrecken mit Kreisverbindungen zusammenzusetzen. Die Widerstandseigenschaften dieser Schiffsgestalten können, wie erwähnt, durchaus diskutabel sein. Die Tatsache jedoch, daß die vereinfachten Formen schnell sang- und klanglos verschollen sind und überdies im II. Weltkrieg kaum Versuche gemacht worden sind, die Sache wieder aufleben zu lassen, weist darauf hin, daß die Vorteile nicht so beträchtlich gewesen sind, wie ursprünglich angenommen. Wir wollen daher auf

die vereinfachten Formen erst später zurückkommen. Der Ungeist, der die Eisenbetonschiffe heraufbeschwor, hat wenigstens etwas Gutes gezeitigt - die Idee der Schalenbauweise [22].

II. Die analytische Darstellung von Schiffslinien und Schiffsoberflächen.

II,1 Schiffslinien

Die Darstellung von Schiffslinien und Schiffsoberflächen durch Gleichungen war ein Wunschtraum zahlreicher Schiffbauer über mehrere Generationen. Der praktische Erfolg dieser Bemühungen ist nicht besonders hoch gewesen, mit Ausnahme der erwähnten Tatsache, daß die US Navy "exakte" Schiffslinien über ein Jahrzehnt weitgehend verwandt hat, was später in Vergessenheit geraten ist. Das Problem der exakten Darstellung ist jetzt im Ausland und bei uns wieder aufgelebt; wir wollen uns mit ihm befassen, ohne auf Einzelheiten einzugehen, die den Rahmen dieses Vortrages überschreiten würden.

Im Prinzip sind zwei Wege denkbar. Erstens kann man gegebene Schiffformen direkt durch geeignete Funktionen approximieren; hierfür bestehen wohlbekanntere Verfahren, vor allem die Methode der kleinsten Quadrate [23]. Zweitens kann man schiffsähnliche und "schiffsmäßige" Körper aus gegebenen Funktionen aufbauen. Der zweite (indirekte) Weg setzt ein völliges Beherrschen des üblichen graphischen Verfahrens voraus; er erfordert dafür in der Regel nur die Diskussion relativ einfacher mathematischer Ausdrücke. Wir schlagen hier den zweiten Weg ein. Tatsächlich ergänzen sich die beiden Methoden; man hat zahlreiche Vergleiche zwischen "exakten" ab ovo entwickelten und empirischen Linien durchgeführt und für bestimmte Kurvenarten (s.w.u.) ausgezeichnete Übereinstimmung festgestellt. Der Unterschied im Vorgehen ist mehr eine formale als eine grundsätzliche Angelegenheit.

Wir haben im Vorhergehenden bei der Besprechung verschiedener Aufgaben häufig mathematische Formulierungen gebraucht. Dies ist fast immer zweckmäßig, unabhängig davon, ob die tatsächliche Konstruktion der Linien graphisch oder analytisch geschieht. Wir wollen jetzt abwägen, welche Vorteile von einer analytischen Konstruktion zu erwarten sind.

Der Vorzug der üblichen graphischen Methode liegt in ihrer fast unbegrenzten Elastizität. Ohne übermäßigen Zeitaufwand kann man Gebilde darstellen, die bestimmten einfachen geometrischen Bedingungen (Volumen, Schwerpunkte, Inhalt, Oberfläche usw.) genügen. Es wird bemängelt, daß das zeichnerische Verfahren nicht zwangsläufig ist und auf Probieren basiert. Dieser Einwand kann selbst von einem prinzipiellen Standpunkt nicht mehr als wesentlich angesehen werden, da Verfahren der schrittweisen Näherung die ganze Mathematik beherrschen. Ein graphisches Lösungsverfahren ist angebracht, wenn es zu einer Lösung der gestellten Aufgabe mit ausreichender Genauigkeit bei gemessenem Zeitaufwand (schnelle Konvergenz) führt.

Bei der Anfertigung des Linienrisses wird die erforderliche Genauigkeit meist in zwei Schritten - im Büro und auf dem Schnürboden - erzielt; der letztere wird mit Recht als teuer und nicht elegant kritisiert. Deshalb erscheint ein Ersatz des graphischen Entwerfens durch ein analytisches berechtigt, wenn man dadurch den Schnürboden überflüssig machen kann. Gerade in dieser Beziehung jedoch haben die bisher bekannten analytischen Verfahren noch wenig gebracht.

Die Ansprüche gewisser mathematischer Kurven auf besonders günstige Widerstandseigenschaften lassen sich, wie schon betont, ebenfalls nicht aufrecht erhalten. Welchen Sinn haben dann Bemühungen um eine exakte Darstellung? Eine Antwort hierauf gab D.W.Taylor, der hervorhob, er entwickelte mathematische Formen "nicht in der Absicht, daß sie Linien geringsten Widerstandes ergäben, sondern einfach Linien, die eine erwünschte Form besitzen" [6]. Alle magischen Spekulationen werden damit ausgeschaltet und als maßgeblich das Prinzip aufgestellt, System in die Lehre von der Schiffsförmigkeit zu bringen. Die Aufstellung eines ordnenden Prinzips für Schiffslinien und Formen, wie es D.W.Taylor vorgeschwebt hat, ist an sich schon recht wesentlich. Experimentelle wie theoretische Untersuchungen erhalten ihre volle Bedeutung nur, wenn die Ergebnisse genügend verallgemeinert werden können; eine Voraussetzung dafür in der Schiffbauwissenschaft ist, daß man von systematisch variierten Formen ausgeht. Ein negativer Beweis hierfür ist auch schon leider erbracht: Zahlreiche Veröffent-

lichungen über Widerstandsversuche an unsystematisch vorgenommenen Variationen von Schiffsmoellen haben sich nachgerade zu einer Plage entwickelt.

Es besteht die Neigung, die exakte Darstellung der Schiff Formen in zwei Etappen vorzunehmen. Zunächst ist es naheliegend, die einzelnen Schiffslinien durch Gleichungen auszudrücken. Für Wasserlinien und Spantflächenkurven ist das weitgehend geglückt. Große Schwierigkeiten bereitet noch die Darstellung von völligen Spanten durch eine Gleichung.

Anfangen mit Chapman hat man als mathematische Schiffslinien Parabeln mit ganzen und gebrochenen Exponenten benutzt. Daneben sind andere Kurven wie die Progressica usw. vorgeschlagen worden [25]. Grundsätzlich ist es nach einem berühmten Satz von Weierstraß möglich, eine beliebige im interessierenden Bereich stetige Kurve durch Polynome darzustellen; dieser Weg wird z.Bt. als der wissenschaftlich aussichtsreichste verfolgt.

D.W.Taylor hat in seiner grundlegenden Arbeit [6] Wasserlinien und Spantflächenkurven durch ein Polynom fünften Grades dargestellt.[†]) Er erhielt damit unter Berücksichtigung der Bedingung am Steven $y(x) = 0$ und mittschiffs $y(x) = 1$ eine Kurvenfamilie mit drei willkürlichen Parametern. Als letztere wurden der Völligkeitsgrad (α, φ) , t und \mathcal{K} (Krümmungsradius im Hauptspant) benutzt; vorgegebene Werte von α , t und \mathcal{K} legen eine bestimmte Schiffslinie fest. D.W.Taylor hat die Diskussion der Eigenschaften seiner Kurvenfamilie in klassischem Stil durchgeführt [6]. Auch über die Darstellung der Spanten ist bei ihm manches zu finden, (sie beruht auf hyperbolischen Kurven). Trotzdem wollen wir hier auf die bedeutende Arbeit nicht näher eingehen, da ihre Ergebnisse in mancher Beziehung überholt sind. So müssen z.B. die Linien im Vor- und Hinterschiff getrennt behandelt werden; sie lassen sich nicht durch eine gemeinsame Formel ausdrücken. Ferner fehlt noch eine exakte Methode der Verknüpfung von Wasserlinien- und Spantengleichungen zu der Gleichung einer Oberfläche.

Benson hat später versucht, auf Grund der Taylor'schen Linie ein exaktes Entwurfsverfahren aufzubauen, das im Gegensatz zum üb

[†]) Das D.W.Taylor Model Basin hat kürzlich die Abhandlung neu herausgegeben.

lichen Vorgehen auf der Kurve der Wasserlinienareale basiert [26]. Sparks hat die Gleichungen benutzt, um verschiedene Annäherungsformeln, u.a. für Trägheitsmomente, abzuleiten [27]. Diese nahe-
liegende Verwendung der exakten Schiffslinien ist interessant und nützlich. Man erhält ein vollständiges System von wichtigen Annäherungsformeln, die allgemeiner in der Anwendung und genauer als die zahlreichen bekannten sind. Übrigens gingen schon Bauers Bemühungen in dieser Richtung.

Der Verfasser hat unter Benutzung eines Koordinatensystems nach Abb.1 die Ergebnisse von Taylor verallgemeinert [32]. H.Thieme hat ein vollständiges System von Parametern eingeführt [13]. Landweber hat eine Systematik der Formen von Rotationskörpern nach ähnlichen Gesichtspunkten wie Taylor und der Verfasser aufgestellt [5].

Wir können uns mit der Wiedergabe des einfachen formalen Apparates nicht aufhalten. Die Benutzung der dimensionslosen Aufmasse bildet eine natürliche Überleitung zur mathematischen Darstellung. Ein Beispiel einer einfachen zweiparametrischen Familie (eine einzelne Linie ist darin durch zwei Größen, vorzugsweise φ oder α und t , bestimmt), zeigt Abb.4. Eingehende Untersuchungen haben erbracht, daß zwei Parameter in der Regel zur Beschreibung der Widerstandseigenschaften einer halben Spantflächenkurve nicht genügen; dagegen kann man mit je drei Parametern für das Vor- und Hinterschiff, wenigstens in manchen Gebieten von Völligkeitsgraden und Froudezahlen, schon viel erreichen. Durch Einführung eines parallelen Mittelschiffs für völligere Fahrzeuge läßt sich das Verfahren recht elastisch und allgemein gestalten.

Als Spantgleichungen kann man im Prinzip ebenfalls Polynome wählen. Solange der lokale Völligkeitsgrad eines Spants:

$$\beta(x) = \frac{A(x)}{y_0(x) \cdot K(x)}$$

etwa 0,9 nicht überschreitet, kommt man mit einfachen Ausdrücken zum Ziel. Bei höheren Völligkeitsgraden treten jedoch scharfe Krümmungsradien an der Kimme und "weiche" (stark gekrümmte) Partien im Boden auf, die zu beseitigen erhebliche Schwierigkeiten bereitet.

II,2 Schiffsoberflächen

Bei diesem Stand der Dinge hinsichtlich der Schiffslinien kann von einer befriedigenden Lösung des allgemeinen und komplizierten Problems der mathematischen Konstruktion der Schiffsoberfläche noch nicht die Rede sein.

Neben einem auf Polynomen aufgebauten Verfahren, auf das wir gleich kommen, gibt es verschiedene Spezialverfahren, die z.B. - zum Teil mit eleganten Tricks - eine zwangsläufige Konstruktion der Oberfläche anstreben. Ich begnüge mich mit der Aufzählung einiger Namen: Pophanken schlug ein Verfahren des "Polaren Straakens" vor, das graphische Konstruktionen benutzt, z.T. aber analytisch beschrieben werden kann. Es ist zu befürchten, daß kein Exemplar der ideenreichen Arbeit mehr vorhanden ist [16]. Pavlenko veröffentlichte ebenfalls eine graphische Methode ("Der Strahlenlinienriß") [36] und schließlich ist die Methode Carpentier [37] zu nennen. Meines Wissens haben alle diese Vorschläge keinen Eingang in die Praxis gefunden. Da ihre Anwendung für systematische Untersuchungen überdies wegen der Künstlichkeit der angewandten Darstellungsmethoden kaum Vorteile bringt, brauchen wir uns mit ihnen weiter nicht zu befassen.

Es existiert jedoch schon ein weit verbreitetes Verfahren für eine systematische Variation von Schiffformen, das in diesen Zusammenhang hineingehört, weil es in gewissen Umfange zu einer exakten Darstellung ausgebaut werden kann. Meines Wissens geht es, wie so viele andere gute Dinge, auf D.W.Taylor zurück. Es basiert auf einer getrennten Behandlung der Spantflächenkurve (Längsverteilung des Displacements) und der Querschiffformen und einer darauf folgenden Verknüpfung der so erzielten Ergebnisse zu einer Schiffsoberfläche. Wir erläutern es hier kurz und verweisen auf die Darstellung in [1].

Wir erwähnten schon, daß die Spantflächenkurve in den meisten Fällen bequem analytisch dargestellt werden kann. Sie ist als gegeben zu betrachten. Weiter wird die Schiffform durch einen kennzeichnenden Spantenriß, den wir das Spantenbild nen-

nen wollen, festgelegt. Das Spantenbild kann auf verschiedene Weise gewonnen werden, z.B. als Riß einer konkreten Schiffsform, wie das D.W.Taylor für die Entwicklung seiner Standardserien getan hat oder auf Grund besonderer geometrischer Konstruktionen. Wesentlich ist nur, daß es die Vertikalschnitte eines strakenden Körpers vorstellt. Wählt man die Spantabstände nach einem bestimmten Gesetz, z.B. wie gewöhnlich äquidistant, so entspricht dem Bild eine bestimmte Spantarealkurve. Nehmen wir nun eine andere Spantflächenkurve an, so ergibt sich aus dem Bild ein neuer Linienriß, in dem die Lage der ursprünglichen Bildspanten durch die jeweilig vorgeschriebenen Inhalte ihrer Flächen festgelegt ist. Ein einfaches Beispiel stellt die Ableitung eines Risses mit einem parallelen Mittelteil aus einem vorgegebenen ohne einen solchen dar, wobei die Spantabstände affin verzerrt werden. Lackenby hat auch allgemeinere Transformationen untersucht [39].

Dieses Aufreihen von Spantformen auf eine Spantarealkurve erfreut sich z.Zt. einer beträchtlichen Beliebtheit. Läßt sich nun das Spantenbild nach einer geeigneten Vorschrift exakt konstruieren - z.B. aus Geraden, Kreisen, Hyperbeln usw. - so ergibt die Verknüpfung dieser Spanten mit einer analytisch definierten Spantflächenkurve eine exakt definierte Oberfläche.

Die Beschränkungen, die in diesem Verfahren liegen, sind offenkundig. Ob es allgemein geeignet erscheint, die mechanischen Eigenschaften des Schiffes als Funktion seiner Form systematisch zu untersuchen, möchte ich dahingestellt sein lassen, doch spricht der große Erfolg der Standardserien von Taylor dafür, daß das Verfahren in gewissen Fällen von Nutzen ist.

Wir versuchen jetzt, uns an eine Systematik der Schiffsoberfläche durch Betrachtung vereinfachter Körper heranzutasten.

1. Die erste Annäherung an die Form des Schiffsrumpfes er-

gibt ein Zylinder, dessen Basis die Schwimmwasserlinie, die Spantarealkurve oder eine mittlere Wasserlinie des Schiffes bildet. Obgleich dieser Ersatz denkbar grob ist, wendet man es auch heutzutage bei theoretischen Untersuchungen verschiedener Art und häufig nicht ohne Nutzen an, solange man sich der Vernachlässigungen und der daraus resultierenden großen Fehlermöglichkeiten bewußt ist. Die Probleme der exakten Darstellung der Zylinderfläche ist mit dem über die Schiffslinien Gesagten erschöpft.

2. In vielen Fällen kommt man mit dem Ersatz der tatsächlichen Rumpfform durch einen Rotationskörper weiter.

Die Gleichung der Oberfläche eines Rotationskörpers lautet bekanntlich

$$y^2 + z^2 = f(x) \quad (34)$$

in Zylinderkoordinaten $r^2 = f(x)$ (34a)

Die letzte Formel bedeutet die Gleichung der Spantflächenkurve ($\pi \cdot r^2$ ist der Inhalt des jeweiligen Querschnitts).

Für das Rotationsellipsoid (Sphäroid)

$$\frac{y^2 + z^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} = 1 \quad \text{oder} \quad r^2 = b^2 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \quad (35)$$

Mit den dimensionslosen Koordinaten

$$\varrho = \frac{r}{b} \quad \xi = \frac{x}{a} \quad \text{wird} \quad \varrho^2 = f(\xi) \quad (34b)$$

speziell für das Sphäroid oder Rotationsellipsoid

$$\varrho^2 = 1 - \xi^2 \quad (35a)$$

Die Gleichung der Spantarealkurve des Sphäroids ist eine Parabel. Der Schärfegrad und der Völligkeitsgrad sind

$$\varphi = \frac{2}{3} \quad \text{und} \quad \delta = \frac{\pi}{6}$$

Dieselben Beziehungen gelten auch für die Spantflächenkurve und die Formkoeffizienten beim allgemeinen Ellipsoid.

Eine eingehendere Diskussion der Formen von Rotationskörpern findet man in [5] und [38].

3. Eine weitere Klasse von Körpern, die einfachen Schiffsförmern schon recht nahe kommen, ergibt sich aus dem naheliegenden Gedanken, die Oberfläche aus der CWL $X(\xi)$ und dem $Z(\xi)$ aufzubauen, und zwar durch Multiplikation der Maßzahlen $X(\xi)$ und $Z(\xi)$. Die Gleichung (dimensionslos)

$$\gamma = \pm X(\xi) \cdot Z(\xi) \quad (36)$$

in der die Vorzeichen \pm die Symmetrie von Steuer- und Backbord anzeigen, stellt eine Oberfläche mit folgenden Eigenschaften dar:

1. Die Längskontur ist ein Rechteck
2. Die dimensionslose Spantflächenkurve

$$A^+(\xi) = X(\xi) \quad (37)$$

ist identisch mit der CWL oder die Spantflächenkurve $A(x) = \int_0^T y dz$ ist der CWL proportional. Hieraus folgt sofort, daß der Schärfegrad gleich dem Völligkeitsgrad der CWL ist. $\varphi = \alpha$

$$3. \text{ Alle Wasserlinien } \gamma(\xi, \xi_i) = X(\xi) \cdot Z(\xi_i) \quad (38)$$

sind affin und ebensp alle Spanten.

Für die Völligkeitsgrade gilt

$$\alpha(\xi_i) = \alpha \text{ und } \beta(\xi_j) = \beta \quad (39)$$

$$4. \delta = \alpha\beta \quad \chi = \frac{\delta}{\alpha \cdot \beta} = 1$$

Wir nennen solche Oberflächenformen kurz "Elementarschiffe". Für Körper mit scharfen Hauptspanten $Z(\xi)$ ergibt die einfache Gleichung (36) schon recht vernünftige Risse mit U-Spant-Charakter. Für völligere $Z(\xi)$ werden dagegen die Krümmungsradien der Endspanten so klein, daß die erhaltenen Formen nicht als schiffsmäßig zu bezeichnen sind.

Ein einfaches Beispiel eines Elementarschiffes ist der Gleichung

$$\gamma = (1 - \xi^2) (1 - \xi^2) \quad (40)$$

zeigt Abb.5.

~~Der Aufbau der Gleichungen gilt zunächst für das Un-~~

Der Aufbau der Gleichungen gilt zunächst für das Unterwasserschiff. Es bereitet in diesem einfachen Fall keine Schwierigkeiten, das Überwasserschiff mit einem gewünschten Ausfall der Spanten glatt an das Unterwasserschiff anzuschließen.

4. Man kann sich nun in (36) zunächst von der lästigen Bedingung/^{der}rechteckigen Kontur freimachen. Es sei die Gleichung der Längskontur in der Form:

$$\xi_K = K(\xi)$$

gegeben, d.h. wir stellen die Ordinaten der Längskontur als eine Funktion der Länge dar.

Es sei beispielsweise: $\xi_K = 1 - \xi^2$ (40a)

d.h. eine gewöhnliche Parabel.

Untersuchen wir die Gleichung:

$$\eta = X(\xi) [1 - f(\xi/\xi_K)] = X(\xi) [1 - f(\xi/K(\xi))] \quad (41)$$

Hierin ist f eine zweckmäßig zu wählende Funktion, für die $f(1) = 1$ sein soll.

An der Kontur $\xi = K(\xi)$ werden die Ordinaten $\eta = 0$, das ist der Effekt, den wir mit Einführung der Gleichung (41) anstreben; für $\xi > K(\xi)$ verliert die Gleichung ihren Sinn.

Man kann auch umgekehrt die Abszissen der Kontur als Funktion der Höhenkoordinate ξ ausdrücken $\xi_R = R(\xi)$

und eine Gleichung ansetzen

$$\eta = [1 - F(\xi/\xi_R)] Z(\xi) = [1 - F(\xi/R(\xi))] Z(\xi) \quad (42)$$

wenn F wieder eine passende Funktion ist, die $F(1) = 1$ genügt.

Wir wollen uns nun über die Gestalt der resultierenden Körper an einigen Beispielen ein Bild verschaffen und verzeichnen zunächst einige einfache Typen der Gleichungen (41) (42)

1. CWL und Kontur sind affin $K(\xi) = X(\xi)$

$$y = X(\xi) \left[1 - \left(\frac{\xi}{X(\xi)} \right)^n \right] \quad (43)$$

$$2. \quad K^n(\xi) = X(\xi) \quad K(\xi) = \sqrt[n]{X(\xi)}$$

$$\eta = X(\xi) \left[1 - \frac{\xi^n}{X(\xi)} \right] = X(\xi) - \xi^n \quad (44)$$

$$3. \quad \mathcal{K} \text{ und Kontur sind affin} \quad R(\xi) = Z(\xi)$$

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{\xi}{Z(\xi)} \right)^m \right] \cdot Z(\xi) \quad (45)$$

$$4. \quad R^m(\xi) = Z(\xi) \quad R(\xi) = \sqrt[m]{Z(\xi)}$$

$$\eta = \left[1 - \frac{\xi^m}{Z(\xi)} \right] Z(\xi) = Z(\xi) - \xi^m \quad (46)$$

Als Beispiel zu 4. wählen wir:

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{\xi}{R(\xi)} \right)^2 \right] (1 - \xi^2) \quad (47)$$

mit $R(\xi) = \sqrt{1 - \xi^2}$ (elliptische Längskontur)

$$\eta = 1 - \xi^2 - \xi^2 \quad (47a)$$

Der jeweilige Spant ξ_i ergibt sich durch Abzug von ξ_i^2 vom Hauptspant.

Den gleichen Riß erhalten wir offenbar aus: (Beispiel zu 2)

$$\eta = (1 - \xi^2) \left[1 - \frac{\xi^2}{1 - \xi^2} \right] = 1 - \xi^2 - \xi^2$$

mit der gleichen elliptischen Kontur $K(\xi) = \sqrt{1 - \xi^2}$

Betrachten wir ferner denselben Gleichungstyp, setzen jedoch für die Kontur $R(\xi) = 1 - \xi^2$

$$\text{bzw.} \quad K(\xi) = \sqrt{1 - \xi^2}$$

d.h. eine Parabel mit dem Scheitel im "Bugpunkt" der CWL. Wir erhalten dann:

$$\eta = 1 - \xi^2 - \frac{\xi^2}{1 - \xi^2} \quad (47b)$$

bzw.

$$\eta = 1 - \xi^2 - \xi^2(1 + \xi) \quad (47c)$$

Trotz der identischen Kontur sind die resultierenden Oberflächen nicht mehr gleich, wie die Skizze in Abb.6 veranschaulicht.

Gl.(47b) ergibt einen glatten Körper, dagegen führt

Gl.(47c) zu einem Knick im Hauptspant, d.h. zu einer unbrauchbaren Form.

Nehmen wir jetzt einen Fall, in dem CWL und Kontur gleich sind $\xi_K = K(\xi) = 1 - \xi^2$

Die Oberflächengleichung lautet:

$$\eta = (1 - \xi^2) \left[1 - \left(\frac{\xi}{1 - \xi^2} \right)^2 \right] = 1 - \xi^2 - \frac{\xi^2}{1 - \xi^2} \quad (47d)$$

Eine Skizze des Rumpfes zeigt Abb.7.

Die Spanten sind ähnliche Parabeln.

Ein orthodoxer Maierbug wird z.B. durch

$$\eta = (1 - \xi^2) \left(1 - \frac{\xi}{1 - \xi^2} \right) = 1 - \xi^2 - \xi \quad (48a)$$

wiedergegeben, allgemeiner durch

$$\eta = X(\xi) \left[1 - \frac{\xi}{K(\xi)} \right] \quad (48)$$

Man kann den Aufbau der Oberfläche auch in allgemeinerer Weise durchführen, indem man neben der Gleichung des Hauptspants einen besonderen Faktor einführt, der die Randbedingung auf der Kontur zu erfüllen gestattet.

Die Frage ob man die Randbedingung auf der Kontur über die Gleichung der Wasserlinie oder die des Hauptspants befriedigen (d.h. $R(\xi)$ oder $K(\xi)$ einführen) soll, wird hier nicht weiter behandelt. Sehr oft werden Stetigkeitseigenschaften hierüber entscheiden.

Es kam mir hier nur darauf an, zu zeigen, daß man durch eine zweckentsprechende Berücksichtigung der Kontur eine neue Klasse von Oberflächen erhält, mit deren Hilfe das exakte Darstellungsverfahren erheblich elastischer gestaltet werden kann. Ohne Mühe läßt sich auf diese Weise eine Vorstellung gewinnen, wieweit Variationen der Kontur den Gesamtverlauf der Schiffsoberfläche beeinflussen.

5. Als nächste Gleichung einer Oberfläche in dimensionsloser Darstellung wählen wir den Ausdruck

$$\eta = [X(\xi) - v(\xi) v_1(\xi)] \cdot Z(\xi) \quad (49)$$

Er stellt eine Verallgemeinerung der Gl.(40) des Elementarschiffes dar.

Wie letzteres besitzt die Oberfläche nach Gl.(49) eine rechteckige Kontur, stellt also in dieser Beziehung eine Beschränkung gegenüber den unter 4. gewonnenen Formen dar.

Die Gleichung (49) führen wir aus folgenden Überlegungen ein:

Das Elementarschiff unterscheidet sich von üblichen Schiffen zunächst dadurch, daß nach Gl.(40) CWL und Spantarealkurve affin sind, also dieselbe Form und damit dieselbe Volligkeit $\alpha = \varphi$ besitzen, während bekanntlich für Schiffe in der Regel $\alpha > \varphi$ gilt. Durch Einführen des Ausdrucks $v(\xi)$ $v_L(\xi)$ läßt sich dieser Schönheitsfehler beheben.

Multiplizieren wir die rechte Seite von (49) aus

$$\gamma = X(\xi) Z(\xi) - v(\xi) v_L(\xi) Z(\xi)$$

so ergibt sich ohne weiteres folgende geometrische Deutung für die neue Gleichung: Von einem gegebenen Elementarschiff

$$A(\xi) Z(\xi)$$

ziehen wir eine Schicht $v(\xi) v_L(\xi) Z(\xi)$ ab, was durch das Vorzeichen minus explicit ausgedrückt worden ist. Aus der angegebenen Kontur, der CWL und dem Hauptspant ergeben sich für die Funktion $v(\xi)$ die Bedingungen

$$v(1) = v(-1) = v(0) = 0 \quad (50)$$

d.h. die Funktion verschwindet an den Steven und im Hauptspant, $v_L(\xi)$ muß in der CWL verschwinden

$$v_L(0) = 0 \quad (51)$$

Die einfache geometrische Vorstellung einer abgezogenen Schicht trifft in der Mehrzahl der Fälle zu. $v(\xi)$ sowohl wie $v_L(\xi)$ müssen dann in den uns interessierenden Bereichen von

$$-1 \leq \xi \leq 1 \quad \text{und} \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

gewissen einfachen Bedingungen genügen, z.B. beide positiv sein.

Grundsätzlich können jedoch beide Funktionen auch negative Werte annehmen, was dann auf die Addition eines Volumens in dem fraglichen Bereich führt.

Die zu (49) gehörige Spantflächenkurve ist

$$A^+(\xi) = X(\xi) - \frac{\beta_1}{\beta} v(\xi) \quad (52)$$

und der Schärfegrad

$$\varphi = \alpha - \frac{\beta_1}{\beta} \cdot \alpha_1 \quad (53)$$

wenn wir die Bezeichnungen

$$\beta_1 = \int_0^1 Z(\xi) v(\xi) d\xi$$
$$\alpha_1 = \int_0^1 v(\xi) d\xi$$

einführen. (Ist $v(\xi)$ nicht symmetrisch zum Hauptspant, so müssen wir die Mittelwerte für das Vor- und Hinterschiff bilden).

Sind $\beta_1 > 0$ und $\alpha_1 > 0$ gewählt, so ist der gewünschte Zweck $\varphi < \alpha$ erreicht.

Betrachten wir ferner den "lokalen Völligkeitsgrad" der Spanten nach Gl. (49)

$$\beta(\xi) = \beta - \beta_1 \frac{v(\xi)}{X(\xi)} \quad (54)$$

Hieraus erhellt eine weitere nützliche Eigenschaft der Gl. (49) gegenüber dem Elementarschiff.

Für letzteres ist $\beta(\xi) = \beta$; schiffsmäßige Formen genügen jedoch in der Regel der Beziehung $\beta(\xi) < \beta$, d.h. der lokale Koeffizient ist kleiner als der des Hauptspants. Wir sehen aus (54), daß diese Bedingung leicht zu erfüllen ist.

Schließlich erlaubt uns (49) eine unerträgliche Schwäche des Elementarschiffs auszuschalten, die darin besteht, daß die Neigung aller Spanten durch die des Hauptspants bestimmt ist. Betrachten wir die Neigung des Spantes in der CWL als kennzeichnende Größe, so gilt für das Elementarschiff

$$\frac{\partial \eta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = X(\xi) \frac{dZ(\xi)}{d\xi} \Big|_{\xi=0} \quad (55)$$

oder in anderer Schreibweise

$$\frac{\partial \eta(\xi, 0)}{\partial \xi} = X(\xi) \frac{dZ(0)}{d\xi} \quad (56)$$

Steht z.B. die Hauptspantlinie zur CWL senkrecht

$$\frac{dZ(0)}{d\xi} = 0 \quad (57)$$

so tun dies auch alle anderen Spantenlinien unseres Elementarschiffs.

Für eine Oberfläche nach Gl.(49) ~~die~~ der Bedingung (57) genügt, ergibt dann der Term $-v(\xi) \frac{dv_1(\xi)}{d\xi}$

die jeweilige Neigung zur CWL.

Als Beispiel betrachten wir die Gleichung (Abb.8):

$$\eta = [1 - \xi^2 - (\xi^2 - \xi^4) \cdot \xi] \cdot (1 - \xi^3) \quad (58)$$

mit

$$X(\xi) = 1 - \xi^2$$

$$\alpha = 2/3$$

$$v(\xi) = \xi^2 - \xi^4$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{3} - \frac{1}{5} = \frac{2}{15}$$

$$v_1(\xi) = \xi$$

$$Z(\xi) = 1 - \xi^3$$

$$\beta = 0,9; \beta_1 = \frac{9}{22}; \frac{\beta_1}{\beta} = \frac{5}{17}$$

Die Gleichung der Spantflächenkurve lautet:

$$A^+(\xi) = 1 - \xi^2 - \frac{\beta_1}{\beta} (\xi^2 - \xi^4) = 1 - \xi^2 - \frac{5}{17} (\xi^2 - \xi^4)$$

$$\text{mit } \varphi = \alpha \frac{\beta_1}{\beta} \alpha_1 = 0,6061$$

Gl.(49) ist der Spezialfall einer allgemeinen Beziehung, in der statt des Produkts $v(\xi) \cdot v_1(\xi)$ eine Funktion $V(\xi, \xi)$ erscheint. Gewöhnlich kommt man aber mit dem Produktansatz bei der Darstellung einfacher Formen gut aus.

6. Schließlich betrachten wir noch einen Ausdruck des Typs

$$\eta = X(\xi) \cdot W(\xi, \xi) \quad (59)$$

Ein Beispiel ist in Bild 9 gezeigt, der dargestellte RiB

entspricht der Gleichung

$$\eta = (1 - \xi^2) [1 - \xi^2 \xi^4 - (1 - \xi^2) \cdot \xi^9] \quad (60)$$

Für $\xi = 0$ ergibt $W(0, \xi)$ die Hauptspantgleichung

$$Z(\xi) = 1 - \xi^9$$

Dieser Gleichungstyp ermöglicht einen zweckmäßigen Übergang aus einem völligeren Hauptspant zu schärferen Endspanten.

Aus der Kombination von Faktoren, die den Gleichungen (41,49) entstammen, lassen sich recht allgemeine Oberflächenformen entwickeln.

Die hier skizzierten Ansätze hat der Bericht in mehr oder weniger rudimentärer Form in verschiedenen Abhandlungen benutzt. W. S. Childsky hat den unsystematischen Charakter dieser Betrachtungen nicht zu Unrecht gerügt und versucht die Ergebnisse in ein eleganteres Gewand zu hüllen, ohne jedoch damit zu wesentlich neuen Ergebnissen zu gelangen. Darüber hinaus hat er sich bemüht, mithilfe geeigneter Transformationen ein zwangsläufiges Straakverfahren zu entwickeln [29]. Er verwendet die hier besprochenen Gleichungen der CWL, des \mathcal{X} und der Kontur $R(\xi)$; die Gleichung der Wasserlinienarealkurve $W(\xi)$ oder $\alpha(\xi)$ wird wie bei Benson zur Erfüllung der Volumenbedingungen benutzt. Die Verwendung der $W(\xi)$ ist dem auf der Spantarealkurve $A^+(\xi)$ basierenden Verfahren unterlegen. Childsky ist sich dieses Nachteils bewußt und gibt deshalb eine Methode an, die aus der $W(\xi)$ abgeleiteten Oberfläche so zu ändern, daß sie einer vorgeschriebenen Spantflächenkurve genügt. Es ist aber anzunehmen, daß die tatsächliche Durchführung des Verfahrens auf Schwierigkeiten stoßen kann.

Als Kernstück seiner "Navoid-Methode" bezeichnet Childsky ein System von Transformationen für die er einige Beispiele angibt. Das Verfahren von Childsky hat sich nach Kenntnis des Verfassers nicht durchgesetzt; man wird aber seine Arbeit bei weiteren Bemühungen auf unserem Gebiet zu beachten haben.

Schließlich sei der Vollständigkeit halber auf eine russische Arbeit hingewiesen [30]. Der Verfasser behandelt darin folgende Aufgaben: eine Oberfläche sei durch i -Spanten und j -Wasserlinien festgelegt. Es ist eine neue Oberfläche zu konstruieren, für die zusätzlich je ein Spant und eine Wasserlinie vorgeschrieben sind. Eine besondere Bedeutung vermögen wir der Untersuchung nicht beizulegen.

Neben den Versuchen, eine Theorie der Schiffsoberfläche aus rein geometrischen Überlegungen zu entwickeln, müssen wir auf die schon erwähnte Bemühung eingehen, Schiffsförmigkeiten aus hydrodynamischen Elementen (Singularitäten) aufzubauen, da ja eine schöne Gleichung der Schiffsoberfläche zunächst nichts über die Strömung aussagt, die sich bei verschiedenen Bewegungsarten des Schiffes im Wasser ausbildet.

Eine Darstellung der Schiffsförmigkeit durch hydrodynamische Singularitäten erlaubt wenigstens im Prinzip Geschwindigkeiten, Druck- und damit Kraftwirkungen auf das Schiff im reibungslosen Medium zu berechnen.

Die Anwendung von Singularitäten hat auf verschiedenen Gebieten zu wichtigen Erfolgen geführt [5] [24], obgleich die mathematischen Schwierigkeiten im dreidimensionalen Fall noch so groß sind, daß Ergebnisse nur unter einschneidenden Voraussetzungen erbracht worden sind. Hier liegt ein lohnendes Gebiet vor, auf das wir noch zu sprechen kommen werden.

In Anwendung auf Schiffsförmigkeiten liegen wieder wie früher zwei Arten von Aufgaben vor: entweder man sucht für eine gegebene Schiffsförmigkeit die erzeugenden Singularitäten zu finden oder für gegebene Singularitäten die entsprechende Schiffsförmigkeit.

Die Darstellung von Schiffskörpern durch Quellsenken- oder Dipolsysteme allein bleibt nur bis zu mäßig hohen Froudeschen Zahlen fruchtbar, ungefähr solange wie die Schiffsförmigkeit mit einiger Genauigkeit durch die Spantflächenkurve beschrieben werden kann (mit einigen Vorbehalten hinsichtlich der Spantform). Bei hohen Froudeschen Zahlen, bei denen der hydrodynamische Druck nicht mehr klein gegen-

über dem hydrostatischen ist, tritt die Bedeutung der Spantarealkurve gegenüber der tatsächlichen Ausbildung mehr und mehr zurück. Damit verliert das auf Quellen und Senken beruhende hydrodynamische Modell an Brauchbarkeit und Vorstellungen, die der Tragflügeltheorie entnommen sind, gewinnen an Bedeutung.

Es ist denkbar, daß die Bedeutung der rein geometrischen Darstellungsweise bei der Lösung hydrodynamischer Aufgaben mit der Zeit zunimmt, denn für Rotationskörper und Zylinder läßt sich die Strömung ohne den Umweg über die Singularitäten schon direkt berechnen.

S c h r i f t t u m

=====

- [1] D.W.Taylor: Speed and power of ships
- [2] G.S.Baker: Ship design, resistance and screw propulsion
- [3] H.K.Kloeß: Jb.d.STG 1951, S.33
- [4] W.P.A.van Lammeren: Resistance, propulsion and steering of ships
- [5] Landweber:,Gertler: D.W.Taylor-Model-Basin, Rep.719
- [6] D.W.Taylor: Trans.Int.Eng.Congress, San Francisco 1915
- [7] M.H.Bauer: Jb.d.STG, 1914, S.257
- [8] Russel:,Chapman: Principles of naval architecture, New York 1939
- [9] E.H.Tennyson d'Eyncourt: T.I.N.A. 1919
- [10] Hydromechanics Subcommittee Soc.Nav.Arch.Mar.Eng.: Model and expanded resistance data sheets with explanatory notes
- [11] O.Richter: Schiffbau 1905, S.593,640,684,733
- [12] Tutin: T.I.N.A. 1924
- [13] H.Thieme: Schiff und Hafen 1952, S.241
- [14] F.Weinig: Z.A.M.M. 1933, S.224
- [15] W.v.Koppenfels: Luftfahrtforschung 1940, S.189
- [16] E.Pophanken: Dissertation, Danzig 1922
- [17] C.Schmieden: Jb.d.D.Luftfo 1942, I,S.106
- [18] G.Weinblum: Schiffbau 1939
- [19] Hilbert:,Cohn-Vossen: Anschauliche Geometrie
- [20] M.G.Cahen: Ass.Tech.Mar.Aeron. 1934

- [21] O.Lienau: Jb.d.STG 1921, S.197
- [22] H.Waas: Jb.d.STG 1952, S.205
- [23] A.v.Keil: Schiffbau 1928, S.356, 385
- [24] F.Riegels: Ingenieur-Archiv 1948, 1949
- [25] G.Weinblum: Jb.d.STG 1930, S.389
- [26] F.Benson: T.I.N.A. 1940, S.129
- [27] W.Sparks: T.I.N.A. 1943, S.104
- [28] G.Vedeler:
- [29] W.Childsky: Carènes exactes, Bruxelles 1941
- [30] Doklady L V No.2, 1947
- [31] J.M.Rankine: Phil.Trans. 1864
- [32] G.Weinblum: Schiffbau 1934
V.Yourkevitch: De Ingenieur 1935 No.11
- [33] G.Weinblum:
- [34] Johow-Foerster: Hilfsbuch für den Schiffbau, V.Aufl.
- [35] Russo:,Sullivan: Design of the Mariner-Type ship Soc.
N.A.M.E. 1953
- [36] G.Pavlenko: Schiffbau 1928
- [37] Charpentier: Mémoire à la Ass.Techn.Mar.Aeron.1934
- [38] G.Weinblum:,J.Blum: D.W.Taylor Mod.Basin Rep.758
- [39] H.Lackenby: T.I.N.A. 1950, S.289
- [40] G.Weinblum: Schiffbau 1938
- [41] Völker: Schiff und Hafen 1953, S.83