

5 | Juni 1954

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

H. Thieme

Schleppversuche bei Queranströmung

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Schleppversuche bei Queranströmung

283. Mitteilung der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt

von H. Thieme

jetzt im Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Vorsonderdruck aus der Fachzeitschrift „Schiff und Hafen“

Jahrgang 4, Heft 6, Juni 1954

Druck und Verlag: C. D. C. Meydorns Buchdruckerei, Uetersen bei Hamburg

Schleppversuche bei Queranströmung

283. Mitteilung der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt.

Von H. Thieme,

jetzt im Institut für Schiffbau der Universität Hamburg.

Nachstehend wird ein Überblick über das Ausmaß und den Anlaß bisher bekannt gewordener Schleppversuche mit unter 90 Grad quergestellten Schiffsmodellen gegeben. Die Zielsetzung und die Anwendungsmöglichkeiten derartiger Versuchsergebnisse werden näher beschrieben, wobei als wichtigstes Beispiel insbesondere der Zusammenhang zwischen Querwiderstand und Steuereigenschaften behandelt wird; Erhöhung des Querwiderstandes erweist sich als entscheidend wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Kursstetigkeit. Die aus theoretischen und systematischen Untersuchungen der physikalischen Gesetzmäßigkeiten sich ergebenden Grundlagen für die Beurteilung der Versuchsergebnisse von insgesamt 39 Modellvarianten werden besprochen. Die Beurteilung der Ergebnisse geschieht unter dem Gesichtspunkt der Übertragbarkeit auf das naturgroße Schiff. Danach kann zwar noch kein generell anwendbares und zugleich einfaches Verfahren angegeben werden, das diese Übertragung erleichtert; jedoch ist eine brauchbare Übertragung wohl möglich, wenn man unter Zuhilfenahme von Theorie und Systematik die Modellversuche analysiert und entsprechend den durch das Froudesche und Reynolds'sche Modellgesetz sich ergebenden Bedingungen auf die Großausführung umrechnet. So können auch die Besonderheiten der hier vorgelegten Ergebnisse sinngemäß erläutert werden. Eine Vereinfachung für die Übertragungsmethode ist durch weitere Arbeit auf experimenteller und theoretischer Basis zweifellos zu erwarten.

- I. Aufgabe und Sinn von Querschleppversuchen.
- II. Modelle und Versuchsanordnung.
- III. Ergebnisse.
- IV. Beurteilung der Ergebnisse.
- V. Quellennachweis.
- VI. Zeichnungen, Tabellen und Diagramme.

I. Aufgabe und Sinn von Querschleppversuchen.

Querschleppversuche — d. h. Schrägschleppversuche mit unter 90 Grad quer angeströmtem Schiffsmodell — sind bisher nur in verhältnismäßig geringer Zahl unternommen worden. Soweit bekannt, behandeln bisher nur zwei Veröffentlichungen [1] und [2] diese Aufgabe; dabei bezieht sich [1] auch nur auf Platten ohne Freibord und nicht auf wirkliche oder angenäherte Schiffsformen. Es ist somit wohl erklärlich, daß allgemeinere, quantitative oder auch nur qualitative Angaben über die Größe von Querwiderständen nur in sehr vager Form existieren. Bei aktuellen Anlässen wurden daher in letzter Zeit einige Versuche durchgeführt, um verlässlichere Aussagen über zu erwartende Querwiderstände von Schiffen machen zu können.

Im Falle der Modelle B und C (vgl. hierzu die Abb. 2 und 3) sollte aus den Ergebnissen der Querschleppversuche auf die Steuereigenschaften geschlossen werden; dies ist eine physikalisch durchaus sinnvolle Methode, da der Querwiderstand einer der entscheidenden Parameter bei der rechnerischen Bestimmung der für die Steuereigenschaften maßgebenden Kräfte am Schiff ist. An Stelle theoretischer Rechnungen wird man oft mit Vorteil einen Schrägschleppversuch durchführen können, wie er z. B. für das Modell A vorliegt [5]. Ebenfalls im Hinblick auf eine Aussage über seine Steuereigenschaften wurde das Modell E quergeschleppt. Beim Modell H sollte der Versuch mit schräg- und quergeschlepptem Modell Unterlagen über das Verhalten bei schräg und quer einkommendem Strom ergeben [4]. Ähnliche Gründe wiederum waren für die Untersuchung der Modelle J und K maßgebend [2]. Bei den Untersuchungen der Modelle L bis M handelte es sich um die Bestimmung des Trossenzuges von in starker Strömung verankerten Prähen.

Zur Bestimmung der Windabtrift von treibenden Fischdampfern wurden Modell- und Großversuche durchgeführt, über die in Kürze an dieser Stelle berichtet werden soll [9].

Vorstehende Aufzählung von Modellschleppversuchen bei Queranströmung, die als Zweckversuche aus mannigfadem Anlaß heraus durchgeführt worden sind, ist vielleicht nicht ganz vollständig und wäre noch durch den einen oder anderen bisher unbekannt gebliebenen Zweckversuch zu ergänzen. Für die zusammenfassende Darstellung solcher Ergebnisse in diesem Bericht wurden dann noch ohne besonderen experimentellen Aufwand einfache Querschleppversuche von den Modellen D, F, G, P und Q durchgeführt. Es mag darum an dieser Stelle noch etwas Allgemeineres über die Aufgaben und den Sinn von Querschleppversuchen ausgeführt werden.

Die Aufgaben des Querschleppversuches ergeben sich natürlicherweise aus den Anwendungsmöglichkeiten seiner Ergebnisse. Die unmittelbare Anwendung auf die Abtrift des Schiffes ohne Vorausfahrt bei Seitenwind liegt auf der Hand und stand wohl bei den meisten der bisher durchgeführten Auftragsversuche im Vordergrund. Die Quergeschwindigkeit v infolge von Seitenwind mit v_w ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen von Wasserkraft auf die Lateralfäche F_L , mit dem Widerstandsbeiwert c_{wQ} und der Luftkraft mit den entsprechenden Werten für das Überwasserschiff $F_{Lü}$ und $c_{wQü}$ zu

$$\frac{v}{v_w} = \frac{1}{1 + 28,6 \cdot \sqrt{\frac{F_L \cdot c_{wQ}}{F_{Lü} \cdot c_{wQü}}} \dots (1)$$

Da die Wurzel im allgemeinen die Größenordnung 1 besitzt, so hat also die Quergeschwindigkeit durchs Wasser die Größenordnung von 3 bis 4% der Windgeschwindigkeit. Nach einer solchen Abschätzung kann man die für einen entsprechenden Modellversuch erforderlichen korrespondierenden Modellgeschwindigkeiten festlegen.

Die für die Größe des Querwiderstandes maßgeblichen Geschwindigkeitskennzahlen sind die Froudesche Zahl, die wir hier zweckmäßig in der Form

$$Fr_T^2 = \frac{v^2}{g \cdot T}$$

verwenden wollen, und die Reynolds-Zahl, die wir hier natürlich auf die Schiffsbreite beziehen müssen:

$$Re_B = \frac{v \cdot B}{\nu}$$

Um diese Kennzahlen mit einer quantitativen Vorstellung verbinden zu können, wollen wir vermerken, daß wir bei Abtrift durch Seitenwind je nach den gegebenen Verhältnissen von Schiff und Wetter u. U. mit Kennzahlen Fr_T^2 bis zu annähernd 0,5 rechnen müssen und beim Schiff sich entsprechend für Re_B Werte bis zu $4 \cdot 10^7$ ergeben können, meist natürlich aber wesentlich kleinere Werte.

Seltener wurden bisher Querschleppversuche zur mittelbaren Anwendung auf das Verhalten eines Schiffes ausgeführt. Es sei hier genannt als einfaches Beispiel das Verhalten eines unter sehr großen Winkeln schräg zum Strom verankerten Schiffes, z. B. in Fluß- und Küstengebieten. In diesem Falle — also bei so großen Schräganströmungswinkeln, daß eine Kraft infolge einer Art „Tragflügelwirkung“ durch „Wasserlinienumströmung“ nicht mehr zustande kommt — lassen sich die Kraftwirkungen aus dem im Versuch ermittelten Querwiderstand ziemlich treffend berechnen. Das Moment läßt sich abschätzen, wenn der Spantcharakter von Vor- und Hinterschiff nicht zu unterschiedlich ist.

Ist α der Schräganströmungswinkel, W_Q der Widerstand bei Queranströmung und W_0 der Widerstand bei $\alpha = 0$, so erhält man bei sehr großen Werten α nach [6] für die Seitenkraft (Normalkraft \perp Lateralebene):

$$N = W_Q \cdot \sin^2 \alpha \dots \dots \dots (2)$$

und für die Längskraft (Tangentialkraft):

$$T = W_0 \cdot \cos^2 \alpha \dots \dots \dots (3)$$

Das Moment ergibt sich aus der Annahme, daß die Normalkraft im Schwerpunkt des Lateralplanes angreift, sofern der Spantcharakter einheitlich ist oder die Unterschiede symmetrisch zum Lateralschwerpunkt verteilt sind.

Ein weiteres Beispiel für die mittelbare Anwendung der Ergebnisse von Querschleppversuchen ist in seiner Anwendung nicht ganz so einfach und erfordert entweder doch noch weitere Unterlagen als nur einen einfachen Querschleppversuch, oder aber es bedarf eines gewissen „Fingerspitzengefühls“. Es handelt sich dabei um die Beurteilung der Steuereigenschaften auf Grund des Querwiderstandes. Bei der Berechnung der Kenngrößen der Steuereigenschaften [8] (z. B. Momentenänderung infolge Bahnkrümmung als Kenngröße der Kursstetigkeit und Verhältnis von Schiffslänge zu engstem Drehkreisradius als Kenngröße der Drehfähigkeit) spielen Querkraft und Moment infolge Schräganströmung und Drehung des Schiffes die ausschlaggebende Rolle. So ergibt sich z. B. dann eine hohe Kursstetigkeit, wenn relativ groß werden: die Querkraft infolge Schräganströmung, die Querkraft infolge Drehung, das gegensinnige Moment infolge Drehung, und wenn relativ klein wird: das im Sinne des Winkels wirkende Moment infolge Schräganströmung. Die genannten vier Komponenten werden nun wiederum beeinflusst durch die bereits erwähnte „Wasserlinienumströmung“ und die „Spantumströmung“ [6]. Der Anteil der Spantumströmung ist in seiner Größe ganz entscheidend von der Größe des Querwiderstandes bestimmt und wirkt sich in recht bedeutendem Maße auf die Größe der Querkraft infolge Schräganströmung aus, und für die Größe des Moments infolge Drehung ist er überhaupt allein bestimmend. (Entsprechend liefert die Wasserlinienumströmung den alleinigen Beitrag für die Querkraft infolge Drehung, einen gewissen Beitrag für die Querkraft infolge Schräganströmung und fast allein den Beitrag für das Moment infolge Schräganströmung.) Dieser Beschreibung der Einflußgrößen der Kursstetigkeit ist wohl deutlich genug zu entnehmen, daß der Querwiderstand eines Schiffes dessen Kursstetigkeit ganz entscheidend beeinflusst. Beachtet man ferner, daß, abgesehen von der Anbringung von Flossen und Ruder am Schiffsrumpf, sich die Beiträge für Kraft und Moment von der Wasserlinienumströmung her durch Formänderungen des Rumpfes nur kaum beeinflussen lassen, so kann man wohl sagen, daß bei gegebener Größe von Ruder bzw. Flossen die Kursstetigkeit (und entsprechend im meist umgekehrten Sinne auch die Drehfähigkeit) nur durch die Größe des Querwiderstandes bestimmt wird. Bei sonst gleichartigen Schiffen wird das mit dem höheren Querwiderstand (erzielbar z. B. durch scharfen Kiel, Schlingerkiele oder schärfere Spantfüße im Vor- und Hinterschiff) stets das kursstetigere und zugleich das weniger drehfähige Schiff sein.

Entsprechende Überlegungen waren z. B. für die Durchführung von Querschleppversuchen für die Modelle B und C maßgebend.

II. Modelle und Versuchsanordnung:

Spantenrisse und Stevenprofile der Modelle A bis M sind in den Abb. 1 bis 11 beigelegt. Bei den Modellen N und O (ebene querschleppte Platten) und P und Q (quer- und längsgeschleppte Quader) erübrigt sich eine zeichnerische Darstellung. Die Abmessungen und Maßverhältnisse sämtlicher Modelle und ihrer Varianten sind zum besseren Vergleich in einer Tabelle zusammengestellt. Die Modelle A bis H, M, P und Q sind Holzmodelle üblicher Bauweise, die Modelle A bis G und P und Q wurden nach dem HSVA-Drahtschleppverfahren mit Seilwinde geschleppt. Dabei konnte das für normale Schleppversuche gebräuchliche Verfahren auch ohne weiteres für den Querschleppversuch über-

nommen werden; lediglich bei den schmalen Modellen und den höheren Geschwindigkeiten wurde ein Ausgleich der durch den Seilzug auftretenden Modellkrümmung durch entsprechende Ballastverlagerung notwendig. Gierschwingungen traten dabei im allgemeinen nicht auf und konnten im Bedarfsfalle durch Verlagerung des Schleppzug-Angriffspunktes bzw. durch Dämpfungsflossen am hinteren Ende der Führungsstange beseitigt werden.

Die Modelle H bis O sind am Schleppwagen untersucht worden (vgl. das Schrifttum [4], [2], [3], [1]).

In den Tabellen der Versuchsergebnisse sind sämtliche Beizahlen des Querwiderstandes der in diesem Bericht erfaßten Untersuchungen zusammengestellt. Die Ergebnisse der neueren in Hamburg durchgeführten Versuche sind sämtlich ohne Korrekturen angegeben, wie es nach den Kanalabmessungen (6,5 m Breite, 2,1 m Tiefe) auch vertretbar erscheint. Für die anderen dem angegebenen Schrifttum entnommenen Versuchsergebnisse dürften die gleichen Voraussetzungen zu treffen. Die Diagrammdarstellung der Ergebnisse findet sich in den Abb. 12 bis 21. Der Querwiderstand W_Q ist mit dem Staudruck $v^2 \cdot \rho / 2$ und der Lateralfäche F_L (ohne Ruderfläche!) dimensionslos gemacht

$$c_{wQ} = \frac{W_Q}{\rho/2 \cdot v^2 \cdot F_L}$$

und über dem Quadrat der auf den Tiefgang bezogenen

Froudeschen Zahl $Fr_T^2 = \frac{v^2}{g \cdot T}$ aufgetragen. Die für die

Beurteilung der Ergebnisse ebenfalls wichtige Reynolds-Zahl

(hier auf die Breite bezogen) $Re_B = \frac{v \cdot B}{\nu}$ ist durch Skalen-

striche an den durch die Meßpunkte gezogenen Kurven bzw. an der Abszisse vermerkt. Für die Widerstandsbeizahl ist ein einheitlicher Maßstab für alle Diagramme verwendet; bei der Froudeschen Zahl war das im Interesse einer übersichtlichen Einzeichnung der Meßpunkte leider nicht möglich, was bei einem Vergleich der Diagramme untereinander zu beachten ist.

Die Theorie (vgl. Abb. 24) ergibt für kleine B/T bei kleinen Froudeschen Zahlen eine lineare Abhängigkeit der Widerstandsbeizahl vom Quadrat der Froudeschen Zahl. Praktische Abweichungen von dieser Gesetzmäßigkeit weisen auf Veränderungen im Grenzschichtzustand hin, so daß eine Darstellung der Ergebnisse über dem Quadrat der Froudeschen Zahl eine Beurteilung der Ergebnisse zu erleichtern verspricht. Im folgenden Abschnitt soll ein Beitrag zur Beurteilung von Querschleppversuchen gegeben werden, wie er sich nach dem Stande der hier vorgelegten experimentellen Erfahrung und der in Arbeit befindlichen allgemeineren und theoretischen Untersuchungen [6] ergibt.

IV. Beurteilung der Ergebnisse:

Um Versuchsergebnisse hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf Voraussagen für das Verhalten der entsprechenden Schiffe beurteilen zu können, ist es erwünscht, die für das Problem entscheidenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten etwas kennen zu lernen und dann die Ergebnisse des Versuchs mit den theoretischen Erwartungen zu vergleichen. Erst wenn für die Ergebnisse des Modellversuches quantitativ und qualitativ eine plausible theoretische Erklärung gegeben werden kann, wird man eine verlässliche Anwendung auf das naturgroße Schiff erwarten dürfen. Vor der eigentlichen Beurteilung der in den Abb. 12 bis 21 niedergelegten Meßkurven werden wir also zweckmäßig einen Blick auf die Grundlagen werfen, die uns einen Anhalt für die Vorausrechnung von Schiffs-Querwiderständen zu bieten vermögen.

Lassen wir zunächst einmal den Einfluß der Wellenbildung außer acht und betrachten den querangeströmten Schiffskörper als relativ unendlich lang, dann zeigt uns Abb. 22 — streng für etwa elliptische Spantformen —, daß die Beizahl des Querwiderstandes c_{wQ} von der auf die Schiffsbreite bezogenen Reynolds-Zahl Re_B und dem Verhältnis B/T (allgemeiner als Mittelwert das Verhältnis von Wasserlinienfläche zu Lateralfäche F_{WL}/F_L) in starkem Maße abhängig ist. Der starke Widerstandsabfall im Bereich der Reynolds-

Zahl von 10^5 bis 10^6 ist auf die Verminderung des Ablösungs-widerstandes infolge Änderung des Grenzschichtzustandes von laminar zu turbulent zurückzuführen und kann daher durch Änderung der in der Strömung vorhandenen Turbulenz, durch Anwendung von Turbulenzerzeugern, z. B. durch Rauigkeiten, und durch wirksame Formänderungen noch beeinflusst werden. Bei einem beliebigen Schiff braucht der Übergangsbereich also nicht notwendig immer bei den gleichen Reynolds-Zahlen aufzutreten wie hier in Abb. 22.

Wir wollen jetzt die einschränkende Voraussetzung der relativ unendlichen Länge fallen lassen (wir hatten das durch das Verhältnis von Quadrat des Lateralplanumfangs U_L zur Lateralfläche F_L in der Form $2 \cdot U_L^2 / F_L = \infty$ ausgedrückt; bei Körpern in unbegrenztem Medium entfällt die 2) und erkennen dann aus Abb. 23, daß das Umfangs-verhältnis ebenfalls einen ausgeprägten Einfluß auf die Größe der Querwiderstandsbeizahl hat. Und zwar hat der Einfluß einen so eindeutigen Charakter in der Zunahme von c_{wQ} mit $2 \cdot U_L^2 / F_L$, daß wir die im vorhergehenden Abschnitt getroffenen Feststellungen über den günstigen Einfluß eines großen Querwiderstandes auf die Kursstetigkeit nun konsequent weiter verfolgen können. Ein im Verhältnis zur Fläche großer Umfang des Lateralplanes wirkt im Sinne höherer Kursstetigkeit.

In Abb. 24 ist nun weiterhin ein theoretisches Ergebnis für den Querwiderstand von Rechteckplatten verschiedenen Umfangsverhältnisses bei Berücksichtigung des Wellen-einflusses gegeben. Als weiterer Parameter ist außerdem noch die relative Freibordhöhe f/T angegeben, die immer dann das Ergebnis beeinflussen muß, wenn der Wasserstau an der Luvseite den Freibord überschreitet und als Spritzer über Deck gehen würde. Im Bereich der für normale Schiffe interessierenden Froudeschen Zahlen Fr_T können wir je nach dem Umfangsverhältnis des Lateralplanes eine lineare Aboder Zunahme von c_{wQ} über Fr_T^2 feststellen.

Zusammenfassend und ergänzend zu den drei vorstehend als Beispiel betrachteten Diagrammen kann gesagt werden, daß Spantform und Grenzschichtzustand den Widerstand bei zweidimensionaler Strömung und verschwindender Wellenbildung bedingen, daß die linear darstellbaren Korrekturen für endliches Umfangsverhältnis und endliche Froudesche Zahlen wiederum von Form und Grenzschichtzustand abhängen. Bei dieser leider großen Zahl von das Ergebnis entscheidend bestimmenden Parametern muß also sicher mit einer recht vielfältigen Charakteristik der Meßkurven gerechnet werden, insbesondere dann, wenn die im Modellversuch erreichten Reynolds-Zahlen Re_B Laminareinflüsse nicht von vornherein ausschließen können. Nach vorstehender Darlegung der für die Beurteilung der Ergebnisse zur Verfügung stehenden Unterlagen wollen wir uns jetzt den einzelnen Meßkurven in den Abb. 12 bis 21 zuwenden.

Der Widerstandsanstieg über der Froudeschen Zahl bei Modell A weist auf Laminareinflüsse hin. Das gleiche gilt für Modell E ohne Schlingerkiele. Die Schlingerkiele reduzieren den Laminareinfluß weitgehend, ganz abgesehen von ihrer auch unmittelbar starken Wirkung auf den Widerstand. Frei von Laminareinflüssen ist offenbar das Modell B mit Balkenkiel, während beim entsprechenden Modell mit Flachkiel (C) noch ein auf Größe und Gradient des Querwiderstandes deutlich sich auswirkender Laminareinfluß vorhanden ist, so daß die Widerstandsdifferenz dieser beiden Formen in der Großausführung noch größer sein wird als im Modellversuch. Der große Einfluß von Schlingerkielen zeigt sich auch bei den Modellen F, die offenbar nur wenig unter Laminareinflüssen leiden. Bei der Untersuchung von Modell D wurden relativ große Reynolds- und Froudesche Zahlen erreicht, so daß praktisch kein Laminareinfluß mehr vorhanden ist und außerdem wegen des großen B/T bzw. F_{WL}/F_L auch schon recht ausgeprägte Interferenzbuckel in der durch den Welleneinfluß charakterisierten Widerstandskurve auftreten. Die Maxima und Minima entsprechen in ihrer Lage recht gut den theoretisch hierfür zu erwartenden Fr_T -Werten. Dasselbe gilt auch für das Modell G mit dem einzigen Unter-

schied, daß hier die erreichten Reynolds-Zahlen eine halbe Größenordnung geringer sind und sich demzufolge auch ein Laminareinfluß im unteren Bereich bemerkbar macht. Bei Modell H dürfte ein ähnliches Ergebnis vorliegen wie bei D; wegen der gegenüber D viel stärker gerundeten Spantform kommt jedoch ein etwas stärkerer Laminareinfluß in Betracht, was man bei gutem Willen auch aus dem Rudiment der Meßkurve herauslesen kann. Ebenfalls ein Laminareinfluß ist bei den Modellen J vorhanden, der jedoch den Widerstandsanstieg bei größeren Kennzahlen nicht unterdrücken kann. Bei den Modellen K deutet der geradlinige Verlauf der Widerstandskurve auf Fehlen von Laminareinflüssen hin. Bei den Modellen L und M ist nur im ersten Bereich der kleinsten Kennzahlen ein Laminareinfluß zu bemerken. Da bei diesen Modellen der Anteil des Normaldruckwiderstandes gegenüber dem Tangential-Reibungswiderstand zurücktritt, ergibt sich auch nur eine schwache Abhängigkeit von der Kennzahl. Die Kurven für die Modelle N und O werden durch die eingezeichnete theoretische Kurve erläutert. Selbstverständlich ist bei diesen Platten kein Einfluß der Reynolds-Zahl mehr zu erwarten. Aus den der Quelle dieser Messungen [1] zu entnehmenden Angaben muß jedoch mit einer Widerstandserhöhung durch Spritzwasserbeaufschlagung der Meßeinrichtung gerechnet werden. Wie in neuerer Zeit durchgeführte Messungen für Gleitschwimmer gezeigt haben, können die hierdurch entstehenden Zusatzwiderstände durchaus von der Größenordnung der hier zwischen Theorie und Versuch bestehenden Differenz sein. Bei den Quadermodellen P und Q ergibt die Extrapolation auf $Fr_T = 0$ einen so niedrigen Widerstandsbeiwert, daß auch bei diesen Modellen trotz der eckigen Spantform mit starkem Laminareinfluß gerechnet werden muß. Das Abbiegen der Kurven im oberen Bereich gibt einen Hinweis auf die bei voll turbulentem Grenzschichtzustand sicherlich wesentlich schwächere Neigung der Kurven und den somit entsprechend höheren Anfangswert bei $Fr_T = 0$.

Aus den vorstehend gemachten Bemerkungen ergibt sich leider, daß ein einfaches Verfahren zur Übertragung der Modellergebnisse auf das naturgroße Schiff — etwa in ähnlicher Weise wie beim normalen Widerstandsversuch bei Längsanströmung — hier für die Queranströmung nicht angewendet werden kann, jedenfalls nicht generell für alle praktisch vorkommenden Formen. Jedoch haben sich sämtliche Ergebnisse so weit erklären und erläutern lassen, daß man bei individueller Anwendung der im Prinzip bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten eine Abschätzung des Querwiderstandes für das Schiff auf Grund eines Modellversuches durchaus in Angriff nehmen kann. Da derartige Aufgaben bisher wenig gestellt und durchgeführt worden sind, ist es nicht weiter befremdend, daß noch kein durch die Routine geprägtes Verfahren erwünschter Einfachheit und Übersichtlichkeit vorliegt.

V. Quellennachweis.

(Die Reihenfolge entspricht etwa der textlichen Erwähnung.)

- [1] Engels und Gebers, Schiffbau 1907/08, S. 201 und 243.
- [2] Ambjörn, Chalmers Tekniska Högskolas Handlingar Nr. 123 (1952).
- [3] Helm, HSVA-Bericht Nr. 890 (1944).
- [4] Thieme, HSVA-Bericht Nr. 995 (1952).
- [5] Thieme, HSVA-Bericht Nr. 998 (1953).
- [6] Thieme, Bericht des Instituts für Schiffbau der Universität Hamburg (in Vorbereitung).
- [7] Hoerner, Aerodynamic drag, Midland Park N.Y. 1951.
- [8] Weinblum, Schiffbau 1937, S. 51, Horn, Jahrbuch STG 1951, S. 78, Thieme, Jahrbuch STG 1951, S. 103.
- [9] Möckel, 284. Mitteilung der HSVA (erscheint demnächst in „Schiff und Hafen“).

VI. Zeichnungen, Tabellen und Diagramme.

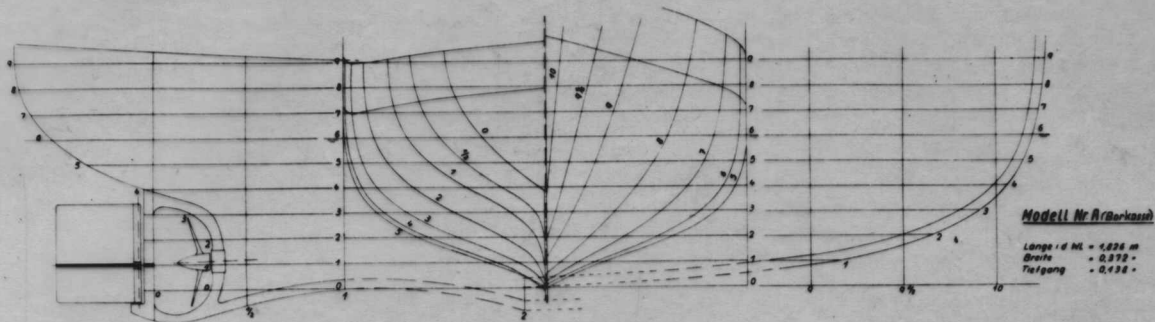


Abb. 1: Modell A (Barkasse)

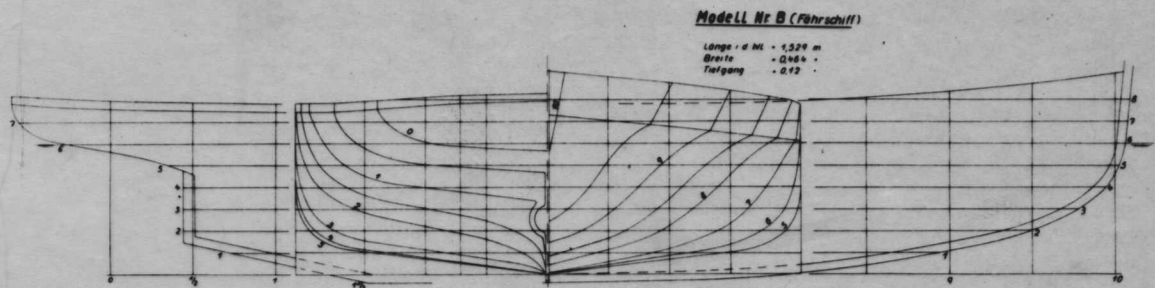


Abb. 2: Modell B (Fährschiff mit Balkenkiel)

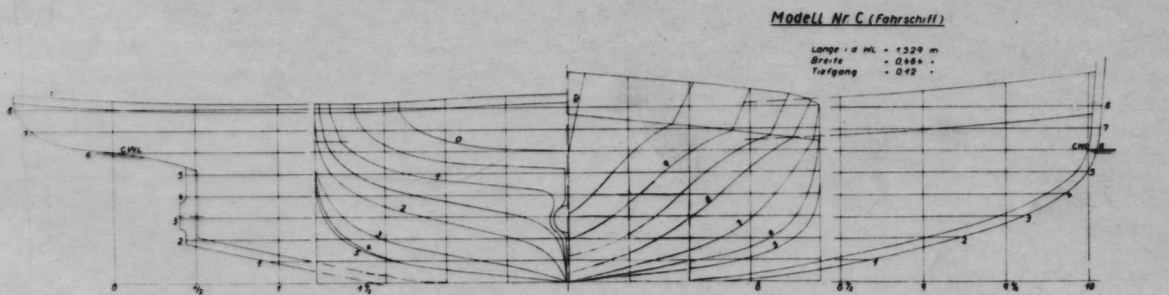


Abb. 3: Modell C (Fährschiff mit Flachkiel)

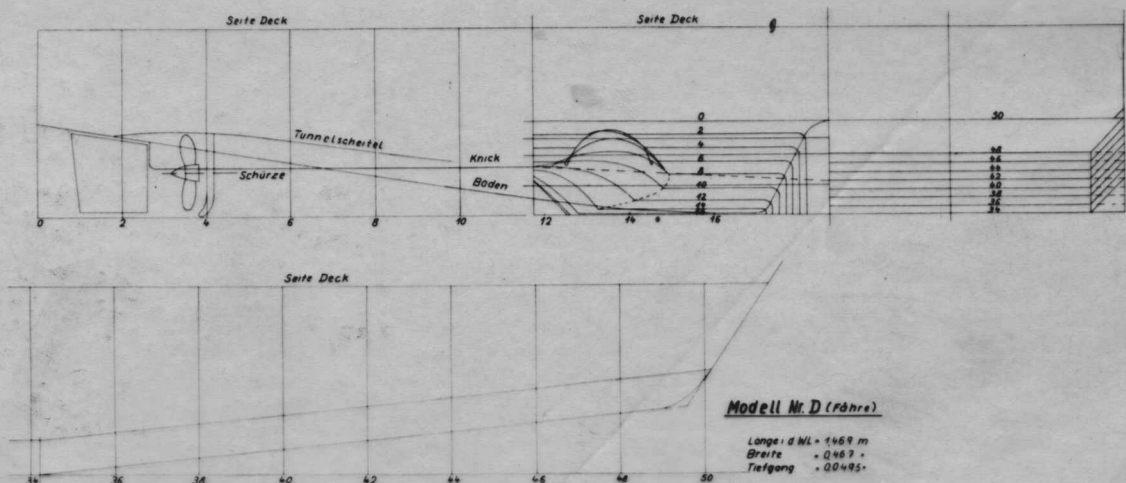


Abb. 4: Modell D (Fähre)

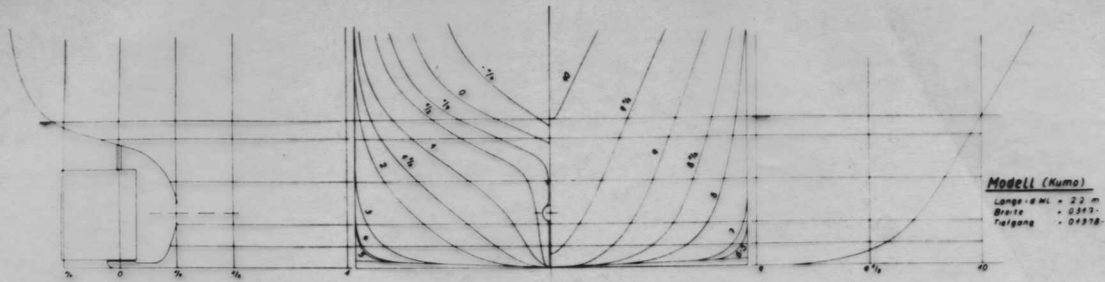


Abb. 5: Modell E (Küsten-Motorschiff)

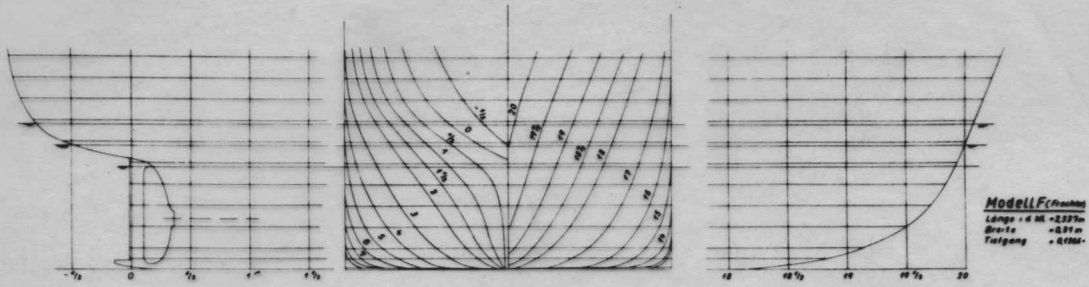


Abb. 6: Modell F (Frachtschiff)

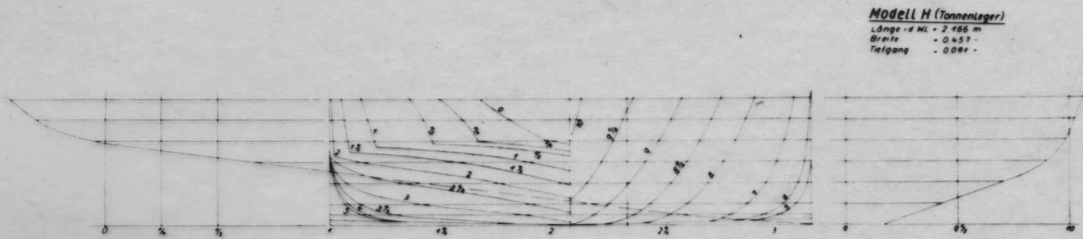


Abb. 8: Modell H (Tonnenleger)

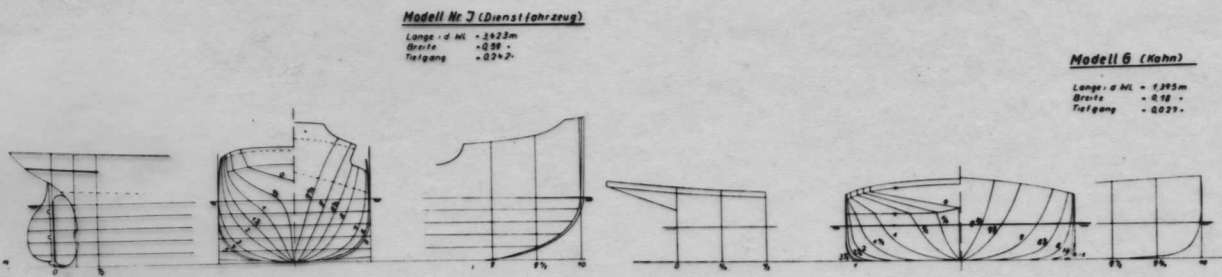


Abb. 9: Modell J (Dienstfahrzeug)

Abb. 7: Modell G (Schleppkahn)

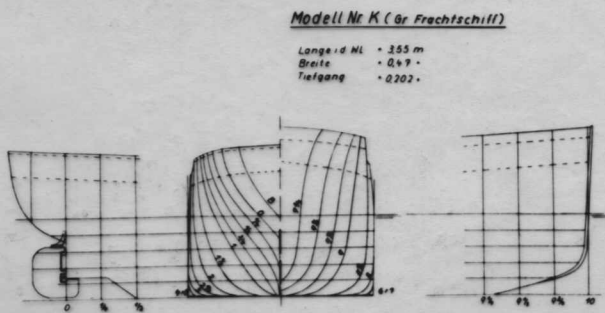


Abb. 10: Modell K (großes Frachtschiff)

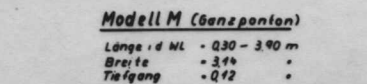
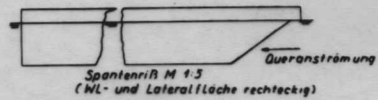
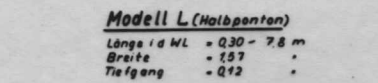


Abb. 11: Modell L (Halbponton), Modell M (Ganzponton)

Abmessungen und Maßverhältnisse der Modelle:

Modell	D m ³	L _{WL} m	B m	T m	F _L m ²	F _{WL} m ²	U _L m	$\frac{2 \cdot U_L^2}{F_L}$	B/T	$\frac{F_{WL}}{F_L}$	Bemerkungen:
A ₁	0,03365	1,826	0,372	0,137	0,234	0,472	2,27	44,1	2,695	2,018	ohne Ruder
A ₂	0,03365	1,826	0,372	0,137	0,234	0,472	2,27	44,1	2,695	2,018	mit Ruder $F_R/F_L = 0,0322$
B	0,0444	1,529	0,464	0,12	0,159	0,594	1,73	37,8	3,867	3,74	Balkenkiel
C	0,0445	1,529	0,464	0,12	0,159	0,587	1,76	39	3,867	3,69	
D	0,0243	1,469	0,467	0,0495	0,0524	0,651	1,78	121	9,43	12,43	
E ₁	0,0797	2,2	0,371	0,1378	0,282	0,681	2,41	41,2	2,695	2,414	ohne Anhänge
E ₂	0,0797	2,2	0,371	0,1378	0,282	0,681	2,41	41,2	2,695	2,414	mit Schlingerkielen $2 F_{SK}/F_L = 0,0302$ auf 24 % der Länge
E ₃	0,0797	2,2	0,371	0,1378	0,282	0,681	2,41	41,2	2,695	2,414	mit Schlingerkielen und Ruder $F_R/F_L = 0,0212$
F ₁	0,0712	2,337	0,31	0,1365	0,264	0,607	2,505	47,54	2,27	2,39	gr. Tiefgang ohne Schlingerkielen
F ₂	0,0712	2,337	0,31	0,1365	0,264	0,607	2,505	47,54	2,27	2,39	gr. Tg. mit Schlingerkielen $2 F_{SK}/F_L = 0,0346$ auf 28 % der Länge
F ₃	0,0478	2,218	0,31	0,0965	0,208	0,563	2,345	52,86	3,21	2,706	kleiner Tiefgang, ohne Schlingerkielen
F ₄	0,0478	2,218	0,31	0,0965	0,208	0,563	2,345	52,86	3,21	2,706	kl. Tg. mit Schlingerkielen $2 F_{SK}/F_L = 0,0437$ auf 28 % der Länge
G	0,0049	1,395	0,18	0,027	0,0359	0,211	1,449	117	6,67	5,86	
H	0,0523	2,166	0,457	0,091	0,1634	0,766	2,197	59,04	5,02	4,69	
J ₁		≈ 3,41	0,59	0,225	0,784	≈ 1,5	≈ 3,778	≈ 36,3	2,62	≈ 1,915	gr. Tg., 0,84° hecklastig
J ₂		≈ 3,363	0,59	0,169	0,588	≈ 1,5	≈ 3,662	≈ 45,5	3,48	≈ 2,55	kl. Tg., 0,84° hecklastig
J ₃		≈ 3,405	0,59	0,225	0,784	≈ 1,5	≈ 3,78	≈ 36,5	2,62	≈ 1,915	gr. Tiefgang, gleichlastig
K ₁		≈ 3,636	0,47	0,1963	0,697	≈ 1,4	≈ 3,972	≈ 45,4	2,4	≈ 2,01	gr. Tg., 0,04° hecklastig
K ₂		≈ 3,402	0,47	0,06625	0,235	≈ 1,4	≈ 3,580	≈ 109	7,1	≈ 5,96	kl. Tg., 2,46° hecklastig
K ₃		≈ 3,546	0,47	0,1225	0,433	≈ 1,4	≈ 3,785	≈ 66,3	3,84	≈ 3,24	mittlerer Tg., gleichlastig
K ₄		≈ 3,55	0,47	0,1225	0,433	≈ 1,4	≈ 3,780	≈ 66	3,84	≈ 3,24	mittl. Tg., 0,72° hecklastig
L ₁	0,054	0,30	1,57	0,12	0,036	0,479	0,54	16,18	13,08	13,08	
L ₂	0,108	0,60	1,57	0,12	0,072	0,942	0,84	19,6	13,08	13,08	
L ₃	0,162	0,90	1,57	0,12	0,108	1,413	1,14	24,06	13,08	13,08	
L ₄	0,216	1,20	1,57	0,12	0,144	1,884	1,44	28,8	13,08	13,08	
L ₆	0,324	1,80	1,57	0,12	0,216	2,826	2,04	38,6	13,08	13,08	
L ₁₂	0,648	3,60	1,57	0,12	0,432	5,652	3,84	68,2	13,08	13,08	
L ₂₆	1,404	7,80	1,57	0,12	0,936	12,246	8,04	138	13,08	13,08	
M ₁	0,108	0,30	3,14	0,12	0,036	0,942	0,54	16,18	26,16	26,16	
M ₃	0,324	0,90	3,14	0,12	0,108	2,826	1,14	24,06	26,16	26,16	
M ₄	0,432	1,20	3,14	0,12	0,144	3,768	1,44	28,8	26,16	26,16	
M ₆	0,648	1,80	3,14	0,12	0,216	5,652	2,04	38,6	26,16	26,16	
M ₁₃	1,404	3,90	3,14	0,12	0,468	12,246	4,14	73,4	26,16	26,16	
N		0,50	≈ 0	0,10	0,05	≈ 0	0,7	19,6	0	0	Rechteckplatte, bis Ober- kante getaucht
O ₁		0,10	≈ 0	0,10	0,01	≈ 0	0,3	18	0	0	Quadratplatte, bis Ober- kante getaucht
O ₂		0,20	≈ 0	0,20	0,04	≈ 0	0,6	18	0	0	"
O ₃		0,30	≈ 0	0,30	0,09	≈ 0	0,9	18	0	0	"
P	0,1293	2,01	0,932	0,0689	0,1386	1,873	2,148	66,6	13,51	13,51	Quader
Q	0,1293	0,932	2,01	0,0689	0,0642	1,873	1,070	35,6	29,2	29,2	"

Versuchsergebnisse von Querschleppversuchen:

Modell A: „Barkasse“ mit Ruder

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,01200	1,195	0,04132
0,01764	0,954	0,0501
0,02545	1,029	0,0602
0,03068	1,037	0,06605
0,03670	1,071	0,0722
0,05755	1,041	0,09045
0,08110	1,030	0,1073
0,1014	0,997	0,1200
0,1282	0,980	0,1350

Modell A: „Barkasse“ ohne Ruder

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,01365	1,104	0,0439
0,03938	0,990	0,0748
0,0706	0,940	0,1001
0,1205	0,934	0,1308

Modell B: „Fährschiff“ mit Balkenkiel

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0638	0,780	0,1110
0,0805	0,790	0,1248
0,1018	0,824	0,1402
0,1156	0,842	0,1495
0,1195	0,838	0,1520
0,1233	0,864	0,1544

Modell C: „Fährschiff“ mit Flachkiel

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0676	0,689	0,1143
0,0788	0,736	0,1234
0,1046	0,6975	0,1423
0,1313	0,6755	0,1593
0,1313	0,693	0,1593
0,1565	0,678	0,1739

Modell D: „Fähre“

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,01668	0,555	0,0368
0,0214	0,648	0,04172
0,0667	0,647	0,0736
0,1697	0,708	0,1174
0,2975	0,809	0,1555
0,601	1,014	0,221
0,953	1,21	0,278
0,973	1,296	0,281
1,175	0,966	0,3088
1,503	1,09	0,3492
1,783	1,242	0,3803
1,822	1,336	0,3845

Modell E: „Küstenmotorschiff“ ohne Anhänge

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,00474	0,5755	0,02773
0,03738	0,562	0,0766
0,0572	0,5695	0,0947
0,0745	0,5600	0,108
0,1184	0,568	0,1362
0,1435	0,578	0,1498
0,1728	0,583	0,1645
0,179	0,582	0,1675
0,2135	0,595	0,1828
0,2579	0,6182	0,2008
0,0182	0,593	0,0535
0,02342	0,593	0,0606

Modell E: „Küstenmotorschiff“ mit Schlingerkielen

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,01621	0,6345	0,0504
0,0648	0,734	0,1008
0,1093	0,880	0,1308
0,1421	0,847	0,1491
0,1720	0,890	0,1641
0,0961	0,811	0,1225
0,1435	0,871	0,1498

Modell E: „Küstenmotorschiff“ mit Schlingerkielen und Ruder

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,02112	0,6575	0,0576
0,0640	0,808	0,1001
0,1197	0,919	0,1369
0,148	0,931	0,1522
0,161	0,965	0,1587
0,0986	0,898	0,1243

Modell F: „Frachter“, großer Tiefgang, mit Schlingerkielen

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,00793	0,762	0,0281
0,01443	0,8295	0,0379
0,02207	0,849	0,0469
0,03092	0,9275	0,0554
0,0456	1,033	0,0673
0,0467	1,010	0,0681
0,0624	1,018	0,0788
0,085	1,068	0,0918
0,0916	1,070	0,0953
0,0979	1,11	0,0986
0,1287	1,119	0,113

Modell F: „Frachter“, großer Tiefgang, ohne Schlingerkielen

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0098	0,648	0,0312
0,02667	0,676	0,0515
0,0345	0,686	0,0586
0,05325	0,748	0,0728
0,0682	0,769	0,0823
0,0784	0,796	0,0888
0,0829	0,836	0,0907
0,1017	0,942	0,1005
0,1029	0,900	0,101
0,1097	0,965	0,1043
0,1115	0,991	0,1051
0,1185	1,005	0,1084
0,1239	0,9475	0,1109

Modell F: „Frachter“, kleiner Tiefgang, mit Schlingerkielen

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,01056	0,708	0,0272
0,02012	0,619	0,0376
0,02873	0,6245	0,0449
0,06035	0,724	0,0651
0,0933	0,841	0,0809
0,1402	0,9085	0,0992
0,1616	0,967	0,1065

Modell F: „Frachter“, kleiner Tiefgang, ohne Schlingerkielen

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,01234	0,646	0,0294
0,0327	0,4877	0,0479
0,0563	0,505	0,0629
0,0946	0,548	0,0815
0,1009	0,568	0,0842
0,1325	0,565	0,0965
0,1585	0,656	0,1054
0,1608	0,625	0,1062
0,1676	0,636	0,1084

Modell G: „Kahn“

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,1363	0,6055	0,0300
0,1862	0,576	0,0351
0,3112	0,5435	0,0454
0,434	0,536	0,0536
0,5745	0,5095	0,0616
0,693	0,518	0,0676
0,836	0,698	0,0743
0,8455	0,6875	0,0747
1,339	0,687	0,094
1,496	0,771	0,0994
1,53	0,977	0,1005

Modell H: „Tonnenleger“

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,3162	0,370	0,2105
0,3162	0,345	0,2105
0,420	0,368	0,2423

Modell J: „Dienstfahrzeug“, Trimmlage 1

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0300	0,730	0,1333
0,0675	0,8385	0,1998
0,1203	0,8205	0,2667
0,1876	0,992	0,3330

Modell J: „Dienstfahrzeug“, Trimmlage 2

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,03992	0,696	0,1333
0,0898	0,6645	0,1998
0,1602	0,74	0,2667
0,0221	0,622	0,0672

Modell J: „Dienstfahrzeug“, Trimmlage 3

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,030	0,726	0,1333
0,0675	0,753	0,1998
0,1203	0,779	0,2667
0,2498	0,821	0,330

Modell K: „Großes Frachtschiff“, Trimmlage 1

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0138	1,045	0,0672
0,0310	1,133	0,1008
0,0551	1,145	0,1345
0,0862	1,164	0,1680

Modell K: „Großes Frachtschiff“, Trimmlage 2

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0918	0,601	0,1008
0,1632	0,704	0,1345
0,255	0,828	0,1680

Modell K: „Großes Frachtschiff“, Trimmlage 3

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0221	1,091	0,0672
0,0497	0,853	0,1008
0,0884	0,981	0,1345
0,138	1,195	0,1680

Modell K: „Großes Frachtschiff“, Trimmlage 4

Fr_T^2	c_{wQ}	$Re_B \cdot 10^{-6}$
0,0221	0,622	0,0672
0,0497	0,720	0,1008
0,0884	0,848	0,1345
0,138	1,055	0,1680

Modell L „Halbponton“

Fr_T^2	c_{wQ}						
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_6	L_{12}	L_{26}
0,0523	0,505	0,492	0,487	0,483	0,481	0,455	0,470
0,1246	0,449	0,452	0,452	0,458	0,463	0,464	0,457
0,2097	0,474	0,485	0,482	0,481	0,472	0,470	0,483
0,328	0,471	0,494	0,487	0,480	0,473	0,487	0,489
0,4725	0,470	0,497	0,486	0,472	0,464	0,481	0,489
0,643	0,482	0,519	0,494	0,479	0,464	0,480	0,488
0,838	0,519	0,531	0,505	0,481	0,466	0,462	0,483
0,948	—	—	—	—	—	—	0,508
1,061	0,562	0,571	0,529	0,503	0,474	0,466	—
1,183	—	0,608	0,540	0,509	—	—	—
1,312	0,600	—	—	—	—	—	—
1,586	0,628	—	—	—	—	—	—

Modell M „Ganzponton“

Fr_T^2	c_{wQ}				
	M_1	M_3	M_4	M_6	M_{13}
0,0523	0,514	0,508	0,518	0,510	0,562
0,1246	0,524	0,494	0,485	0,475	0,529
0,2097	0,593	0,528	0,516	0,496	0,552
0,328	0,608	0,528	0,519	0,492	0,547
0,4725	0,612	0,527	0,517	0,492	0,540
0,643	0,616	0,535	0,526	0,493	0,537
0,838	0,634	0,551	0,536	0,500	0,527
1,061	0,658	0,566	0,548	0,500	0,519
1,183	—	—	0,555	0,504	—
1,312	0,685	0,578	—	—	—

Modell N „Platte“ 100×500 mm bis Oberkante getaucht

Fr_T^2	c_{wQ}	
0,255	1,13	1,29
1,02	1,29	1,38
2,3	1,38	1,38
4,08	1,38	1,38
6,37	1,45	1,45
9,18	1,55	1,546

Modell O₁ „Platte“ 100×100 mm bis Oberkante getaucht

Fr_T^2	c_{wQ}	
0,255	1,255	1,53
1,02	1,53	1,49
2,3	1,44	1,42
4,08	1,41	1,364
6,37	1,36	1,331
9,18	1,33	1,28
12,5	1,28	1,28

Modell O₂ „Platte“ 200×200 mm bis Oberkante getaucht

Fr_T^2	c_{wQ}	
0,1273	1,14	1,31
0,51	1,31	1,54
1,148	1,54	1,52
2,04	1,52	1,446
3,185	1,45	1,38
4,585	1,38	1,38

Modell O₃ „Platte“ 300×300 mm bis Oberkante getaucht

Fr_T^2	c_{wQ}	
0,085	1,220	1,270
0,34	1,270	1,442
0,765	1,445	1,59
1,360	1,59	1,52
2,125	1,514	1,52

Modell P „Quader“

Fr_T^2	c_{wQ}
0,162	0,716
0,124	0,696
0,205	0,781
0,329	0,836
0,465	1,000
0,580	1,016
0,518	1,014
0,277	0,851
0,413	0,970

Modell Q „Quader“

Fr_T^2	c_{wQ}
0,580	1,139
0,780	1,221
0,776	1,195
0,707	1,180
0,502	1,057
0,573	1,117
0,434	1,005
0,225	0,874
0,302	0,936
0,364	0,981

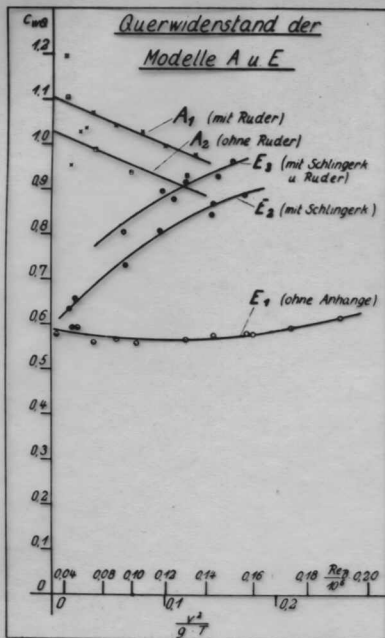


Abb. 12: Querwiderstand der Modelle A und E

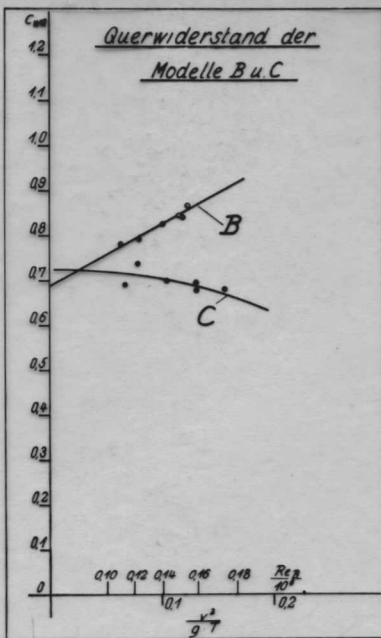


Abb. 13: Querwiderstand der Modelle B und C

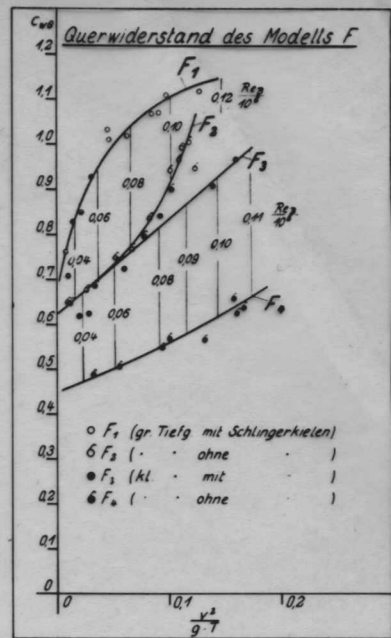


Abb. 14: Querwiderstand des Modells F

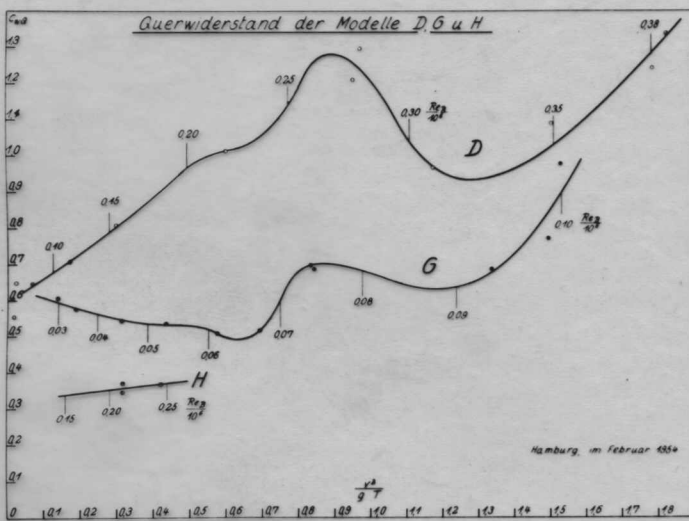


Abb. 15: Querwiderstand der Modelle D, G und H

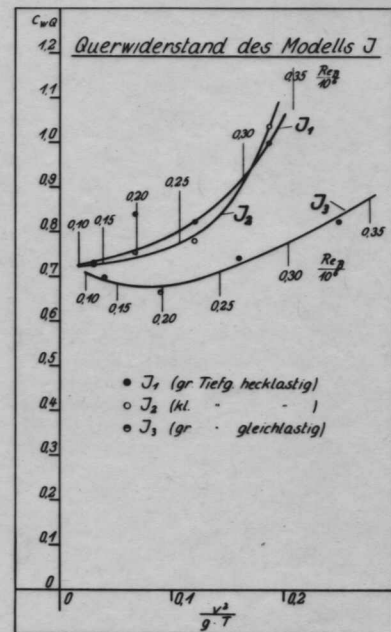


Abb. 16: Querwiderstand des Modells J

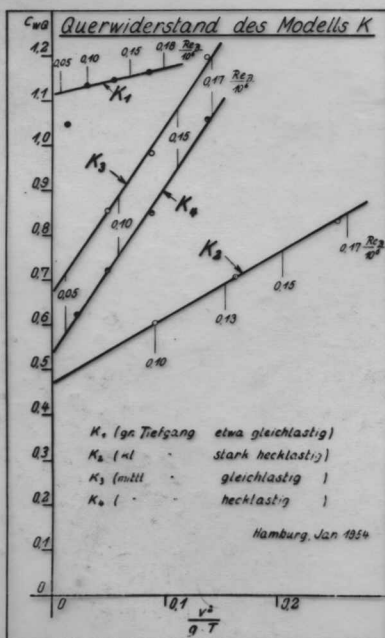


Abb. 17: Querwiderstand des Modells K

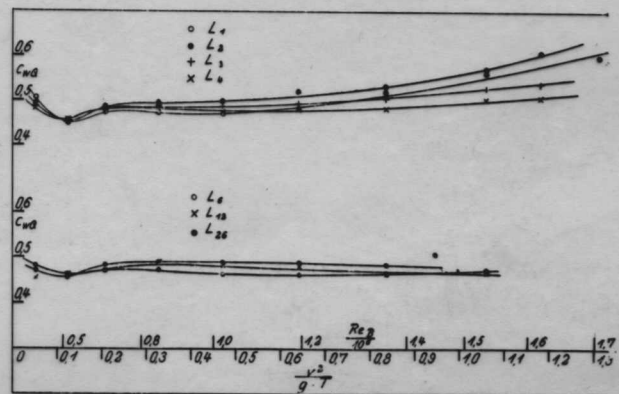


Abb. 18: Querwiderstand der Modelle L

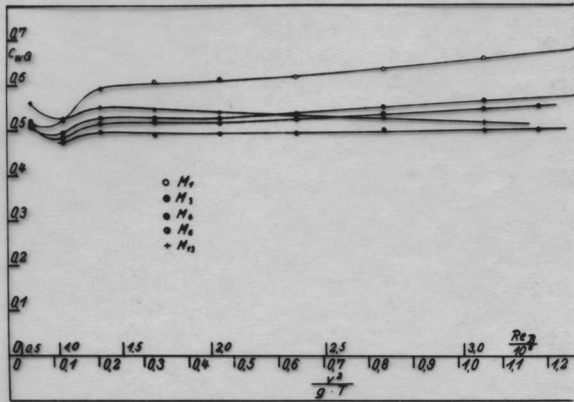


Abb. 19: Querwiderstand der Modelle M

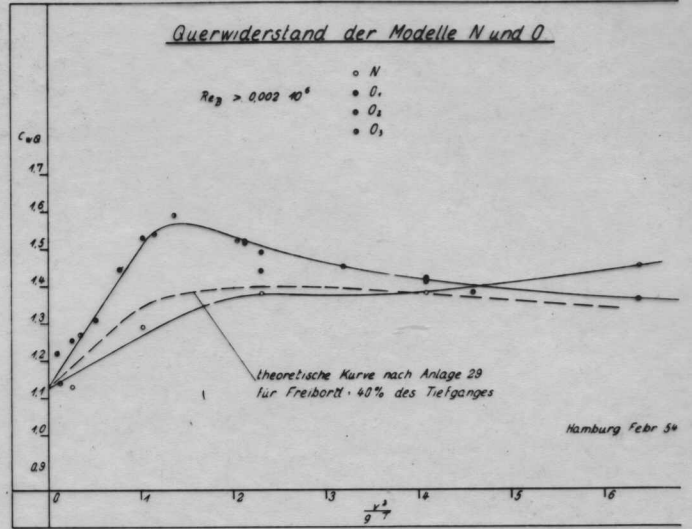


Abb. 20: Querwiderstand der Modelle N und O

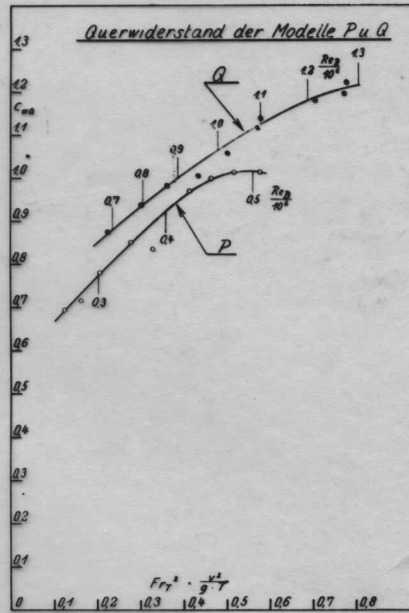


Abb. 21: Querwiderstand der Modelle P und Q

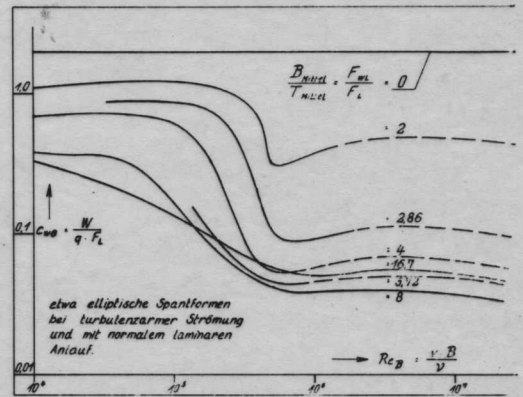


Abb. 22: Querwiderstand ohne Wellenbildung bei zwei-dimensionaler Strömung (nach [7])

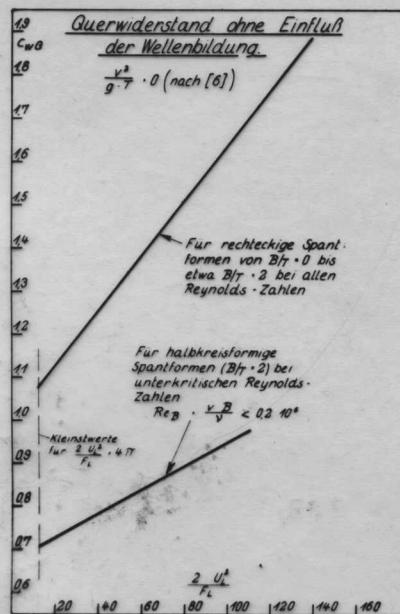


Abb. 23: Querwiderstand ohne Einfluß der Wellenbildung (nach [6])

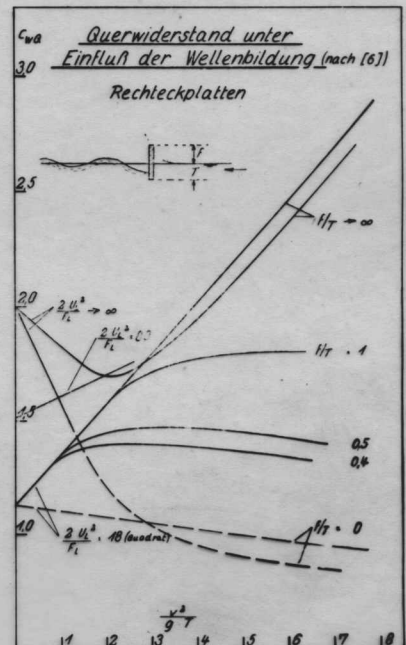


Abb. 24: Querwiderstand unter Einfluß der Wellenbildung (nach [6])