117 | 1962

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K.H. Kwik

Querschleppversuche mit Platten und Schiffsmodellen



INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 117

QUERSCHLEPPVERSUCHE MIT PLATTEN UND SCHIFFSMODELLEN

von

K. H. Kwik

Hamburg, im Frühjahr 1962

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Querwiderstand " wurden am Institut für Schiffbau der Universität Hamburg Schleppversuche mit quergestellten austauchenden Platten und Schiffsmodellen unternommen. Die Versuche haben außer ihrem Grundlagenwert für die Behandlung von Steuereigenschaften auch noch eine aktuelle Bedeutung für die Beurteilung des Seitenverhaltens der Schiffe unter Wirkung von Lateralkräften. Die Untersuchung erstreckte sich auf die Ermittlung des Querwiderstandes und des Rollmomentes in Abhängigkeit von der auf den Tiefgang bezogenen Froudezahl. Da eine allgemein zugängliche Sammlung des Schrifttums zum Thema Querwiderstand fehlt, ist eine ausführliche Literaturübersicht angefügt.

Inhaltsübersicht

Α.	Einführung	S . 3 – 4
Β.	Modelle	S. 5 - 6
с.	Durchführung der Versuche	s.7-9
D.	Ergebnisse	s. 10 - 16
		Tab. 1 - 9
		Abb. 7 - 25
Ε.	Schrifttum	S. 17 - 21
F.	Symbole	S. 22

A. Einführung

Soll ein Schiff unter Wirkung von Seitenwind möglichst wenig von seinem Steuerkurs abtreiben, so ist das Schiff so zu gestalten, daß der Uberwasserteil einen möglichst kleinen, der Unterwasserteil dagegen einen möglichst großen Querwiderstand besitzt. Wird andererseits verlangt, daß das Schiff bei quer oder schräg einkommendem Strom, wie z.B. in Fluß- oder Küstengebieten, seine Position möglichst beibehält, so wird man bestrebt sein, den Widerstand, den der Unterwasserteil durch den Strom quer zur Kielrichtung erfährt, klein zu halten. Die Rücksicht auf die Wechselwirkung zwischen Unterwasserteil und Wasser, Uberwasserteil und Luft ist daher von Bedeutung für die Formgebung und Gestaltung des Schiffes, und die Kenntnis des Wasser- und Luftwiderstandes bei Queranströmung ist eine der Grundlagen der Schiffstechnik. Es ist deshalb erstaunlich, daß Angaben über die Größe des Querwiderstandes von Schiffen nur selten und dann oft nur in vager Form existieren.

Verläßliche Querwiderstandsangaben sind in [1] zu finden. Es wird in Abschnitt E dieses Berichts versucht, in Erweiterung der Schrifttumsangaben von [1] eine möglichst umfassende Literaturübersicht zum Thema Querwiderstand won Platten und Körpern zu geben. Wo genaue Querwiderstandsangaben von Schiffskörpern nicht vorhanden sind, begnügt man sich für die meisten Zwecke mit Abschätzungen an Hand von Querwiderständen von Zylindern und Prismen, die als "schiffsähnlich" betrachtet werden und deren Widerstandsangaben aus Windkanaluntersuchungen (also für unbegrenztes Medium) in der Literatur in Überfülle zu finden sind, z.B. [3], [8], [9], [12], [13], [27], [34], [36], [38], [43], [44], [45], [53], [54], [55] Abgesehen von der Frage, wie weit man einen Schiffskörper mit einem Zylinder oder Prisma vergleichen kann, sind solche Abschätzungen nur mit Vorsicht vorzunehmen, da der Einfluß der Wasserwellen, die beim schwimmenden, geschleppten Schiff zur Ausbreitung kommen, bei der Beurteilung des Widerstandes oft von ausschlaggebender Bedeutung sein kann.

- 3 -

Die vorliegenden neuen Untersuchungen erstreckten sich auf die Ermittlung des Widerstandes und des Rollmomentes quergeschleppter Platten und Schiffsmodelle. Es soll vor allem der Einfluß des Tiefganges und der auf diesen Bezogenen Froudezahl gezeigt werden. In dieser Arbeit soll über den Querwiderstand des Unterwasserteils der Schiffsmodelle berichtet werden. Die Ermittlung des Querwiderstandes des Uberwasserteils sowie des Unterwasserteils bei Krängungswinkeln und ebener Strömung (wo also nur Spantumströmung und keine Wasserlinienumströmung stattfindet) soll späteren Untersuchungen vorbehalten werden. Die Versuchsergebnisse der quergeschleppten ebenen Platten haben Grundlagenwert für die Beurteilung des Welleneinflusses auf den Widerstand. Außerdem könnte die Platte als ein unend-Lich dünnes Schiff betrachtet werden. Querschleppversuche mit Rechteckplatten sowohl im getauchten als auch im austauchenden Zustand sind vor über 50 Jahren von Engels und Gebers durchgeführt worden. Eine Neuauswertung dieser alten aber keinesfalls überholten Untersuchungen ist vor kurzem veröffentlicht worden 2 . Ebenfalls zu Vergleichszwecken können die Untersuchungen an RechteckpLatten für unbegrenztes Medium herangeholt werden, [18], [19], [20], [30], [32], [33], [46], [48], [50], [51]

Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Verkehr großzügig unterstützt. Die Vorbereitung und die Durchführung der Versuche Lagen in Händen von Herrn Thiemann.

B. Modelle

Quergeschleppt wurden zwei Modelle mathematischer Schiffe (Modell Nr. 1.15 und 1.23), das Modell eines Tankschiffes (Modell Nr. 1.17), das Modell eines Frachtschiffes (Modell Nr. 1.10), ein Quader (Modell Nr. 1.22), mehrere Rechteckplatten und eine ebene Kreisscheibe (siehe Zusammenstellung auf der nächsten Seite). In Abb. 1 bis 4 sind Spantenrisse, Stevenprofile und zum Teil Längsschnitte der Schiffsmodelle zeichnerisch wiedergegeben. Für den Quader, die Rechteckplatten und die Kreisscheibe erübrigt sich eine zeichnerische Darstellung. In Abb. 1 und 2 sind die Konturgleichungen für die Wasserlinien und Spanten der mathematischen Modelle angegeben. Die Kennzeichnung der Konturgleichungen erfolgt nach Weinblum. Mehr hierüber findet man in den Arbeiten 58 oder 57 . Bei den mathematischen Modellen sind alle Wasserlinien affin und ebenso alle Spanten. Wird der Völligkeitsgrad der Verdrängung mit δ , der Völligkeitsgrad der Wasserlinienfläche mit α und der Völligkeitsgrad der Spantfläche mit ß bezeichnet, so gilt die Beziehung $\delta = \alpha \cdot \beta$.

Die Schiffsmodelle und der Quader sind aus Holz, die Platten aus Kunststoff angefertigt. Die Oberfläche aller Modelle war während der Messung glatt. Die Schiffsmodelle sind ohne Anhänge untersucht worden.

Auf der nächsten Seite wird eine Zusammenstellung der Modelle, ihrer Abmessungen und Maβverhältnisse gegeben. Für die Bezeichnungen siehe Abb. 5 und Abschnitt F.

C. Durchführung der Versuche

Um den Einfluß der Wasseroberfläche zu zeigen, wurden alle Modelle im austauchenden Zustand quergeschleppt. Die Versuche wurden am Schleppwagen im Tank der Hamburger Ingenieurschule (Tankbreite 6,5 m) gefahren. Die Wassertiefe betrug 2,1 m und die Wassertemperatur im Mittel 10° C. Jedes Modell wurde ohne Krängung und bei mehreren Tiefgängen untersucht. Gemessen wurden jeweils der Querwiderstand und das Rollmoment. Die für den Einfluß der freien Oberfläche maßgebliche Geschwindigkeitskennzahl ist die auf den Tiefgang bezogene Froudezahl, die in der Form

$$\operatorname{Fr}_{\mathrm{T}}^{2} = \frac{\mathrm{v}^{2}}{\mathrm{g} \cdot \mathrm{T}}$$

verwendet wird. Die auf die Breite bezogene Reynoldszahl wird mit

$$\operatorname{Re}_{\mathrm{B}} = \frac{\mathrm{v} \cdot \mathrm{B}}{\mathrm{v}}$$

angegeben.

Die Quergeschwindigkeit v eines Schiffes infolge von Seitenwind mit der Geschwindigkeit v_W ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen von Wasserkraft auf die Lateralfläche A_L des Unterwasserteils mit der Querwiderstandsbeizahl c_{DC} und der Luftkraft mit den entsprechenden Werten A_{Lü} und $c_{DCü}$ für den . Uberwasserteil.

$$\frac{\varrho}{2} \mathbf{v}^{2} \mathbf{c}_{\mathrm{DC}} \mathbf{A}_{\mathrm{L}} = \frac{\varrho_{\mathrm{U}}}{2} \mathbf{v}_{\mathrm{W}}^{2} \mathbf{c}_{\mathrm{DCU}} \mathbf{A}_{\mathrm{LU}}$$
$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\mathrm{W}} \sqrt{\frac{\varrho_{\mathrm{U}}}{\varrho} \frac{\mathbf{c}_{\mathrm{DCU}}}{\mathbf{c}_{\mathrm{DC}}} \frac{\mathbf{A}_{\mathrm{LU}}}{\mathbf{A}_{\mathrm{L}}}}$$

(q=Dichte des Wassers, q_{ij}=Dichte der Luft)

Das Verhältnis $\frac{Q_{ii}}{Q}$ beträgt bei 15° C und normalem Luftdruck ungefähr 0,001225. Nimmt man im Mittel c_{DCii} = 1,18 [28], c_{DC} = 0,9 [1] und das Verhältnis $\frac{A_{Lii}}{A_{L}}$ = 1 an, so Läßt sich die Formel für die Quergeschwindig-

$$v = 0,04 v_{W}$$

Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung:

genaue Messungen auf See an Tank-, Fracht- und Fahrgastschiffen ergeben eine Treibgeschwindigkeit von etwa 4 % der Windgeschwindigkeit 42 . Um die Froude- und Reynoldszahl für reelle Schiffe mit einer quantitativen Vorstellung verbinden zu können, sei Folgendes vermerkt. Bei einer Windgeschwindigkeit $v_{tr} = 50 \text{ m/s}$ (entspricht einem Orkan mit einer Geschwindigkeit von etwa 100 kn) beträgt die Quergeschwindigkeit eines Schiffes nach dem Vorhergesagten v = 2 m/s. Für ein Fahrzeug mit dem extrem kleinen Tiefgang T = 1 m ergibt dies mit der Erdbeschleunigung g = 9,81 m/s² etwa Fr_{π}^2 = 0,4 und für ein Fahrzeug mit einer Breite B = 30 m mit einer kinematischen Zähigkeit des Wassers $\nu = 1,3.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ etwa $\text{Re}_{R} = 4,6.10^7$. Diese Werte der Kennzahlen sind als maximale Werte aufzufassen, da Windgeschwindigkeiten von 50 m/s selten auftreten und normale Fahrzeuge einen größeren Tiefgang als 1 m und eine kleinere Breite als 30 m besitzen. Bei unseren Querschleppversuchen sind die Modellgeschwindigkeiten nach oben begrenzt durch die Forderung, daß die Modelle nicht von den Wellen überspült werden dürften. Diese Forderung entfiel natürlich bei den Platten, die bei einem Tiefgang gleich der Plattenhöhe quergeschleppt wurden.

Der Querwiderstand und das Rollmoment wurden zum Teil auf pneumatischem, zum Teil auf elektrischem Wege registriert. Die elektrische Registrierung hat sich für diesen Zweck als sehr geeignet erwiesen, da alle zu ermittelnden Größen in einer Fahrt auf einem Filmstreifen aufgeschrieben werden konnten. Abb. 6 zeigt ein Beispiel eines solchen Oszillogramms, das eine bequeme und sehr genaue Auswertung der Meßergebnisse gestattet. In dem Oszillogrammssind Geschwindigkeit, Querwiderstand und Rollmoment aufgezeichnet. Die obere Nullinie ist Bezugslinie für die Geschwindigkeit und das Rollmoment, die untere Nullinie für den Querwiderstand. Nach Eichung des Meßgerätes Lassen sich die gesuchten Größen als die mittleren Aufmaße der Kurven ermitteln, die entweder nach Augenmaß unmittelbar aus dem Oszillogramm abgegriffen oder nach Planimetrieren der Flächen berechnet werden. Eine Kontrolle der Geschwindigkeit ist außerdem mittels der Wegmarken möglich. Der Kontakt des Stromes wurde alle 2 m unterbrochen, und der Abstand zwischen zwei benachbarten, senkrechten Geraden im Oszillogramm entsprach einer Zeit von 0,1 s. Hieraus ergibt sich z.B. für das Oszillogramm in Abb. 6 eine Schleppgeschwindigkeit von 0,387 m/s.

D. Ergebnisse

 $\begin{array}{c} \underline{Darstellung:} \ \texttt{Um} \ \texttt{die} \ \texttt{Ergebnisse} \ \texttt{der} \ \texttt{Versuche} \ \texttt{besser} \ \texttt{verwenden} \\ \texttt{zu} \ \texttt{können, werden} \ \texttt{der} \ \texttt{Querwiderstand} \ \texttt{D}_{C} \ \texttt{und} \ \texttt{das} \ \texttt{Rollmoment} \ \texttt{M}_{SL} \\ \texttt{in} \ \texttt{Form} \ \texttt{ihrer} \ \texttt{dimensionslosen} \ \texttt{Beizahlen} \ \texttt{angegeben.} \ \texttt{Es} \ \texttt{ist} \end{array}$

die Querwiderstandsbeizahl
$$c_{DC} = \frac{D_C}{\frac{Q}{2} \cdot v^2 \cdot A_L}$$

und die Rollmomentenbeizahl $c_{MSL} = \frac{\frac{M_{SL}}{\frac{Q}{2} \cdot v^2 \cdot A_L}}{\frac{Q}{2} \cdot v^2 \cdot A_L \cdot T}$

wobei $\frac{0}{2}$.v² den Staudruck, A_T die Lateralfläche des Unterwasserteils und T den Tiefgang bedeutet. Bezugsachse für das Rollmoment ist die Längsachse durch den Lateralschwerpunkt: daher der Index "SL" . In diesem Bericht wird das Moment als positiv bezeichnet, wenn es das Modell zur Saugseite krängt. Bei den Platten wird das Moment praktisch nur von der horizontal gerichteten Kraft, nämlich der Querwiderstandskraft, verursacht. Hier gibt das Verhältnis ^CMSL also auch den Hebelarm der Resultierenden wieder. Bei den^CDC Schiffsmodellen tritt außer der horizontal gerichteten noch eine vertikal gerichtete Kraft am Schiffskörper auf. Beide Kräfte rufen zusammen das Rollmoment hervor. Die vertikal gerichtete Sogkraft kann, besonders wenn das Modell nicht ganz krängungsfrei geschleppt wird, sehr große Werte annehmen [38] . Nur wenn die horizontal und die vertikal gerichtete Kraft gemessen sind, kann man mit der daraus Resultierenden und dem gemessenen Rollmoment den Hebelarm der Resultierenden berechnen. Die Rollmomentenbeizahl bezogen auf Unterkante Kiel (UKK) läβt sich aus der Rollmomentenbeizahl bezogen auf die Achse durch den Lateralschwerpunkt nach folgender Formel berechnen:

 $\mathbf{c}_{\mathrm{MUKK}} = \mathbf{c}_{\mathrm{MSL}} + \mathbf{c}_{\mathrm{DC}} \cdot \frac{\mathrm{h}}{\mathrm{T}}$

wobei h = Höhe des Lateralschwerpunkts über UKK ist. Die Werte von h sind in der Zusammenstellung der Modelle in Abschnitt B angegeben. Bei den Rechteckplatten ist h = 0,5 T.

Die Beizahlen c_{DC} und c_{MSL} sind tabellarisch in den Tabellen 1 bis 9 und in Diagrammform in den Abbildungen 7 bis 25 in Abhängigkeit vom Quadrat der auf den Tiefgang bezogenen Froudezahl $\operatorname{Fr}_{T}^{2} = \frac{v^{2}}{g \cdot T}$ niedergelegt. Die Ergebnisse sind sämtlich ohne Korrekturen angegeben, wie es nach den Kanalabmessungen auch vertretbar ist. Die für die Beurteilung der Ergebnisse ebenfalls wichtige Reynoldszahl ist in den Diagrammen durch Skalenstriche an den durch die Meßpunkte gezogenen Kurven bezw. an der Abszisse vermerkt. Bei den Schiffsmodellen ist die Reynoldszahl auf die Breite: Re_B = $\frac{v \cdot B}{v}$, bei den Platten auf den Tiefgang: Re_T = $\frac{v \cdot 2T}{v}$ bezogen. Zwischen Re_B bezw. Re_T und Fr_T² besteht bei einer Wassertemperatur von 10° C folgende Beziehung:

> $Re_{B} = 2,4 B \sqrt[6]{Fr_{T}^{2}.T} \cdot 10^{6}$ $Re_{T} = 4,8 T \sqrt[6]{Fr_{T}^{2}.T} \cdot 10^{6}$

Dabei sind B und T in m einzusetzen. Um alle Meßwerte eintragen zu können und im Interesse der Übersichtlichkeit konnte sowohl für die Beizahlen als auch für die Froudezahlen leider kein einheitlicher Maßstab für alle Diagramme verwendet werden. Dies ist beim Vergleich der Diagramme untereinander zu beachten.

Folgerung: Bevor wir nun zur Beurteilung der Versuchsergebnisse übergehen, sei erst Folgendes vermerkt. Der Widerstand eines geschleppten, Wellen erzeugenden Körpers läßt sich bekanntlich aus Reibungswiderstand, Zähigkeitsdruckwiderstand und Wellenwiderstand zusammensetzen. Bei quergeschleppten Schiffsmodellen und Platten tritt der Reibungswiderstand gegenüber den beiden anderen Widerstandsanteilen an Bedeutung zurück. So beträgt der Reibungswiderstand eines querangeströmten, unendlich Langen Kreiszylinders bei den sogenannten unterkritischen Reynoldszahlen nur etwa $\frac{1}{120}$ und bei den sogenannten überkri-tischen Reynoldszahlen etwa $\frac{1}{30}$ des Zähigkeitsdruckwiderstandes [27] . Der Reibungswiderstand wird bei unseren Betrachtungen deshalb vernachlässigt. Den Zähigkeitsdruckwiderstand eines Schiffes bei Queranströmung kann man getrennt ermitteln, wenn man den um die Wasserlinienfläche gespiegelten Doppelkörper in unbegrenztem Medium quer anströmt. Solche Versuche mit Schiffsmodellen sind aber relativ kostspielig und bisher wenig durchgeführt worden. Man begnügt sich mit Abschätzungen an Hand von Querwiderständen schiffsähnlicher Körper wie Zylinder und sonstiger Rotationskörper. Die Widerstandsbeizahl solcher Körper ist stark von folgenden Faktoren abhängig:

- a) von der Reynoldszahl Re_R (hier auf die Breite bezogen)
- b) vom Höhen-Längen-Verhältnis $\frac{H}{L}$ (bezw. vom Seitenverhältnis \wedge) c) vom Breiten-Höhen-Werhältnis $\frac{B}{H}$ und
- d) von der Kantenabrundung.

Zu a): Eine Auftragung der Widerstandbeizahl über der Reynoldszahl zeigt für Körper mit abgerundeten Kanten einen einheitlichen Verlauf. Bei nicht zu kleinen Re-Zahlen, aber unterhalb der sogenannten kritischen Re-Zahl, verläuft die Kurve nahezu parallel zur Abszisse, im Bereich der kritischen Re-Zahl fällt sie steil ab um bei größeren Re-Zahlen wieder langsam anzusteigen. Der Widerstandsabfall im Bereich der kritischen Re-Zahl ist auf die Anderung des Grenzschichtzustandes von Laminar zu turbulent zurückzuführen. Bei Körpern, die scharfe Kanten quer zur Strömungsrichtung besitzen, wobei die Ablösung an diesen Kanten erfolgt, ist die Widerstandsbeizahl in weitem Bereich praktisch von der Re-Zahl unabhängig.

Zu b): Eine Auftragung der Widerstandsbeizahl über dem Seitenverhältnis Liefert im Bereich von A = 0 bis A = 1 eine abfallende, im Bereich von $h_{1} = 1$ bis $h_{2} = \infty$ eine ansteigende Kurve. Der größte Widerstandsabfall tritt im Bereich von $\Lambda = 0$ bis $\Lambda = 0,2$ auf. Es darf an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß für Schiffsrümpfe Seitenverhältnisse von 0,05 bis etwa 0,15 in Betracht kommen.

Zu c): Die Widerstandsbeizahl nimmt mit steigendem Breiten-Höhen-Verhältnis ab. Der Widerstandsabfall bei Vergrößerung des $\frac{B}{H}$ - Verhältnisses wird dadurch verursacht, daß die abgelöste Strömung nach einer bestimmten Strecke von der Körpervo**rde**rkante wieder am Körper anliegt. Bei Schiffen läßt sich eine Beeinflussung des effektiven Breiten-Höhen-Verhältnisses ($\frac{B}{2T}$ bezw. $\frac{A_{WL}}{2A_{L}}$ bei Anwendung des Spiegelungsprinzips) und damit des Quer-Anwendung des Spiegelungsprinzips) und damit des Querwiderstandes durch Anderung des Beladungszustandes erzielen: ein großer Tiefgang entspricht einem kleinen Breiten-Höhen-Verhältnis und damit einem großen Querwiderstand.

Zu d): Die Widerstandsbeizahl nimmt bei Vergrößerung der Kantenabrundung ab. Der Widerstand eines querangeströmten Quaders mit einer Kantenabrundung, deren Radius 20 % der Quaderhöhe beträgt, ist etwa halb so groβ wie der Widerstand des gleichen, scharfkantigen Quaders. Der Widerstandsabfall ist auf die weniger ausgeprägte Ablösung der Strömung an den Kanten zurückzuführen, die durch Abnahme des Druckanstiegs bei Vergrößerung des Kantenradius verursacht wird. Ein großer Querwiderstand ist bei Schiffen durch einen möglichst völligen Hauptspant mit einem kleinen Kimmradius zu erzielen. Durch Schlingerkiele wird der Querwiderstand bei völligen Spanten wenig, bei scharfen Spanten stark erhöht.

Bei der vereinfachten Ermittlung des Wellenwiderstandes erhält man zunächst eine Lineare Abhängigkeit der Wellenwiderstandsbeizahl vom Quadrat der auf den Tiefgang bezogenen Froudezahl. Betrachten wir den Widerstand einer quergeschleppten Platte etwas näher. Die Beizahl des zähen Druckwiderstandes ist wegen der Scharfen Kanten nahezu vom Quadrat der Froudezahl unabhängig. Die Wellenwiderstandsbeizahl ist dagegen linear vom Quadrat der Froudezahl abhängig. Tragen wir die Widerstandsbeizahl einer quergeschleppten Platte über dem Quadrat der Froudezahl auf, so erhalten wir nach dem Vorhergesagten eine Gerade, deren Anfangswert der Beizahl des zähen Druckwiderstandes entspricht. Genauere Untersuchungen ergaben für Rechteckplatten eine Lineare Abhängigkeit der Widerstandsbeizahl vom Quadrat der Froudezahl etwa für $\operatorname{Fr}_{m}^{2} < 1.([1] \text{ Abb.24})$ Praktische Abweichungen von dieser Gesetzmäßigkeit, insbesondere bei Schiffskörpern, weisen auf Veränderungen im Grenzschichtzustand bezw. Welleninterferenzen hin. Auf Grund dieser theoretischen Erkenntnis wurden die Versuchsergebnisse in diesem Bericht über dem Quadrat der Proudezahl dargestellt.

Wenden wir uns jetzt den einzelnen Meßkurven in den Abbildungen 7 bis 25 zu. Der unregelmäßige Verlauf der Querwiderstandsbeizahl bei sehr kleinen Froudezahlen in den Abb. 7 bis 9 ist sicherlich auf Laminareinflüsse infolge zu kleinen Reynoldszahlen und auf den bei kleinen Schleppgeschwindigkeiten überwiegenden Einfluß der Wasseroberflächenspannung zurückzuführen. Abgesehen von dieser Unregelmäßigkeit zeigen die Diagramme einen Anstieg der Widerstandsbeizahlen sowohl mit der Froudezahl als auch mit dem Tiefgang. Der Anstieg mit der Froudezahl ist mit der Wellenwiderstandszunahme zu erklären. Der Anstieg mit dem Tiefgang bedeutet, daß bei quergeschleppten Schiffskörpern offenbar der Einfluß des $rac{\mathrm{B}}{\mathrm{T}}$ - Verhältnisses über den Einflueta des Seitenverhältnisses der Lateralfläche überwiegt. Ein vergrößerter Tiefgang ruft nämlich nach c) (Seite 12) einen größeren, nach b) jedoch einen kleineren Querwiderstand hervor. Das Ergebnis steht mit früheren Versuchsergebnissen von Thieme und Ambjörn (1, Modelle F und K) in vollem Einklang. Da β ein tiefbeladenes Schiff bei gleichem Querwind weniger abtreibt als ein leeres, kommt also nicht allein durch Vergrößerung der Lateralfläche des Unterwasserteils bei dem größeren Tiefgang, sondern auch durch gleichzeitige Erhöhung der Querwiderstandsbeizahl. Versuche mit längsgeschleppten Kastenmodellen mit rechteckigem Querschnitt zeigten zunächst eine Abnahme der Widerstandsbeizahl mit steigendem Tiefgang [25] . Die Widerstandsbeizahl erreichte ihr Minimum bei einem Tiefgang, der einem Seitenverhältnis des Unterwasserteils von $\frac{2}{3}$ entsprach. Bei noch größeren Tiefgängen nahm die Widerstandsbeizahl wieder zu. Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß mit steigendem Tiefgang die Widerstandsbeizahl quergeschleppter Modelle zunimmt, die Widerstandsbeizahl längsgeschleppter Modelle dagegen zu- oder abnimmt je nach dem Seitenverhältnis des Unterwasserteils.

Abb. 10 zeigt die Widerstandsbeizahl des Frachtschiffsmodells, das offenbar frei von Laminareinflüssen ist. Der relativ hohe Querwiderstand ist auf das relativ niedrige $\frac{B}{T}$ - Verhältnis und auf die relativ geringe Kimmabrundung zurückzuführen.

In den Abb. 11 bis 14 sind die Rollmomentenbeizahlen der Schiffsmodelle grafisch dargestellt. Man kann einen ähnlichen Verlauf der Kurven in den Abb. 11 bis 13 feststellen. Man achte auf die Zunahme der Momentenbeizahl mit dem Tiefgang.

Abb. 15 zeigt die Querwiderstands- und Rollmomentenbeizahlen des Quaders. Zum Vergleich sind auch die Querwiderstandsbeizahlen eines Quaders nach [26] eingetragen: diese liegen wegen des viel größeren $\frac{B}{T}$ - Verhältnisses durchweg niedriger als unsere Werte.

In den Abb. 16 bis 21 sind die Querwiderstands- und Rollmomentenbeizahlen der Rechteckplatten graphisch niedergelegt. Sieht man vom Widerstandsabfall bei einigen Platten im Bereich kleiner Froudezahlen, ab, so kann man durchweg eine lineare Abhängigkeit der Widerstandsbeizahlen vom Quadrat der Froudezahl feststellen. Die Extrapolation auf $Fr_T^2 = 0$ ergibt ungefähr die gleichen Widerstandsbeizahlen wie man sie aus Windkanalversuchen für die entsprechenden Seitenverhältnisse erhalten würde. Die Kurven für die Momentenbeizahlen zeigen einen einheitlichen Ver-Lauf, solange die Plattenoberkante nicht von den Wellen überspült ist: sie gehen vom negativen Bereich mit wachsender Froudezahl zum positiven Bereich über. Bei einem Tiefgang gleich der Plattenhöhe verschwindet dieses Charakteristikum (Abb. 20). Um die Querwiderstandsbeizahlen der Rechteckplatten bequemer miteinander vergleichen zu können, sind sie in Abb. 26 in einem Diagramm zusammengestellt. Zum Vergleich sind auch die Werte nach Engels und Gebers, sowie eine theoretische Kurve nach Thieme mit eingetragen. Als Parameter wird außer dem Seitenverhältnis $\int = \frac{2T}{T}$ das Umfangsverhältnis $\Omega = \frac{2 U_L^2}{A_L}$ aufgeführt. Für Rechteckplatten besteht zwischen \wedge und $\bigcirc \Box$ die Beziehung: $\widehat{A} = \frac{4 \cdot (1 + \frac{1}{2})^2}{2}$

Die Meßpunkte für $\Lambda = 1$ und $\Omega = 16$ werden durch die theoretische Kurve für $\Omega = 16$ gut wiedergegeben.

Die Abb. 22 bis 25 zeigen die Ergebnisse der Versuche mit den Kreisscheiben. Man kann hier ebenfalls eine lineare Abhängigkeit der Widerstandsbeizahlen vom Quadrat der Froudezahl bei größeren Kennzahlen feststellen. Bei den Momentenbeizahlen ist auch ein Übergehen der Werte vom negativen zum positiven Bereich feststellbar. Die durch die Meßpunkte gezogenen Kurven zeigen also bei den Kreisscheiben einen ähnlichen Verlauf wie bei den Rechteckplatten. Eine Extrapolation auf ${\rm Fr}_{\rm T}^2 = 0$ der Widerstandsbeizahlen jener Scheibe, die bei einem Tiefgang gleich dem halben Scheibendurchmesser geschleppt wurde (Abb. 23), ergibt einen Wert, der ungefähr mit der Widerstandsbeizahl einer (im Windkanal untersuchten) Kreisscheibe übereinstimmt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Ergebnisse von Querschleppversuchen mit Platten und Schiffsmodellen außer von den beiden Geschwindigkeitskennzahlen stark von den Maßverhältnissen der Versuchskörper abhängen. Sowohl für die Platten als auch für die Schiffsmodelle läßt sich aber ein regelmäßiger Verlauf der Querwiderstands- und Rollmomentenbeizahlen über dem Quadrat der Froudezahl feststellen. Insbesondere ist für die meisten Modelle eine lineare Abhängigkeit der Querwiderstandsbeizahlen vom Quadrat der Froudezahl bei nicht zu kleinen Geschwindigkeitskennzahlen bestätigt worden. Bei den Schiffsmodellen ist außerdem eine Zunahme der Widerstandsbeizahlen mit wachsendem Tiefgang zu erkennen.

E. Schrifttum

In Erweiterung der Schrifttumsangaben in den Arbeiten [1] und [2] wird in diesem Abschnitt eine möglichst umfassende Literaturübersicht zum Thema Querwiderstand von Platten und Körpern gegeben ([3] bis [56]).

- 1 Thieme, H.: Schleppversuche bei Queranströmung. Schiff und Hafen, Juni 1954.
- [2] Fritzsche, E. und Thieme, H.: Neuauswertung der Untersuchungen von Engels, Gebers und Matthias an geschleppten Platten und Prismen. Schiff und Hafen, März 1958.
- [3] Ackeret, J.: (Querangeströmte Schornsteinmodelle). Schweizer Bauzeitung 108, 1936, S.25. (Ref. in _45)
- [4] Ambjörn,G.: Släpförsök med Fartygsmodeller i Sned och Tvär Ställning mot Körriktningen samt Resultatens Tillämpning på ett Intressant Sjörättsfall. Chalmers Tekniska Högskolas Handlingar Nr. 123, 1952.
- 5] Barth,W.: Bemerkenswerte Untersuchungsergebnisse aus der Arbeit des Windkanals der Dornier-Werke 1935-1945. Z. f. Flugwissenschaften 1954, S. 309.
- [6] Bauermeister, H.: Der Widerstand von Stahlleinen in Luft und Wasser. Schiffbau Bd.27, 1926, S.337.
- [7] Brevoort, M.J. und Joyner, U.T.: Experimental Investigation of the Robinson-Type Cup Anemometer. NACA Rep. 513, 1935.
- [8] Bursnall,W.J. und Loftin,L.K.Jr.: Experimental Investigation of the Pressure Distribution about a Yawed Circular Cylinder in the Critical Reynolds Number Range. NACA TN 2463, 1951.
- 9 DeLany, N.K. und Sorensen, N.E.: Low-Speed Drag of Cylinders of Various Shapes. NACA TN 3038, 1953.
- 10_ Diehl, W.S.: Engineering Aerodynamics. New York, 1936.

- [11] Doetsch, H.: Dreikomponentenmessung an Fallschirmkappen verschiedener Form. Luftfahrtforschung 1938, S.577.
- [12] Dryden,H.L.: Pressure Distribution of Circular Cylinders. Bureau of Stand. Journal of Research 1930, Rep.221.
- 13 Eiffel, G.: Der Luftwiderstand und der Flug. Berlin, 1912.
- [14] Eisner,F.: (Querangeströmte Zylinder und Prismen). Mitt. der Preuβ. Versuchsanstalt f.Wasserbau u.Schiffbau, Berlin, Heft 4, 1929. (Ref. in [27])
- [15] Engels, H. und Gebers, F.: Der Beiwert k in der Formel $W=k.\gamma.F.\frac{v^2}{2g}$ für den Wasserwiderstand bewegter plattenförmiger und prismatischer Körper. Schiffbau 1907/1908, S.201, 243. (Siehe Neuauswertung [2]).
- [16] Fage, A. und Johansen, F.C.: On the Flow of Air Behind an Inclined Flat Plate of Infinite Span. ARC RM 1104, 1927.
- [17] Fage, A. und Warsap, J.H.: Effects of Turbulence and Surface Roughness on Drag of Circular Cylinders. ARC RM 1283, 1930.
- [18] Finzi und Soldati: (Querwiderstand von Rechteckplatten und Kreisscheiben). Vortrag in Mailand, März 1902. (Ref. in [30])
- 19 Flachsbart, O.: Messungen an ebenen und gewölbten Platten. Ergebnisse der AVA zu Göttingen, IV.Lieferung, 1932.
- [20] Flachsbart, O.: Der Widerstand quer angeströmter Rechteckplatten bei Reynoldschen Zahlen 1000 bis 6000. ZAMM 1935, S.32.
- 21 Frey, K.: Verminderung des Strömungswiderstandes durch Leitflächen. Forschung Ing. Wesen, 1933, S.67.
- 22 Gawn, R.W.L.: Steering Experiments. TINA 1943, S.35.

- [23] Gebers, F.: Ein Beitrag zur experimentalen Ermittlung des Wasserwiderstandes gegen bewegte Körper. Schiffbau 1907/1908, S.435, 475. (Siehe Neuauswertung 2)
- 24 Hansen, M.: Untersuchung einer offenen und geschlossenen Halbkugel. Ergebnisse der AVA zu Göttingen, IV.Lieferung, 1932.
- [25] Hay, A.D.: Resistance of Barge Forms with Simple Geometrically-Shaped Ends. Marine Eng. and Shipping Review, August 1948.
- 26 HeLm,K.: Systematische Widerstandsversuche mit dem 50 t -Schwimmkranponton "VSP MaLmö". HSVA Ber.Nr.1034.
- 27 Hoerner, S.F.: FLuid-Dynamic Drag. 1958.
- [28] Hughes, G.: Model Experiments on the Wind Resistance of Ships. TINA 1930, S. 310.
- 29 Jacobs, E.N.: The Drag of StreamLine Wires. NACA TN 480, 1933.
- 30hnsJohns, A.W.: Normal Pressures on Thin Moving Plates. TINA 1904, S.232.
- [31] Kempf,G.: Kentergefahr für flachbodige Fahrzeuge bei Querbewegung. Hansa 1948, Nr.26, S.10.
- [32] Knight, M. und Loeser, O.Jr.: Pressure Distribution over a Rectangular Monoplane Wing Model up to 90⁰ Angle of Attack. NACA Rep. 288, 1927.
- [33] Lehnert,R.: (Querangeströmte Platten). Physikalische Zeitschrift 1937, S.476. (Ref. in 45)
- [34] Lindsey, W.F.: Drag of Cylinders of Simple Shapes. NACA Rep.619, 1938.
- [35] Matthias, F.: Untersuchungen über den Druck und Druckmittelpunkt an Lotrechten Platten, die recht- und spitzwinklig zur Fahrtrichtung durch Wasser geschleppt werden. Schiffbau 1911/1912, S. 249,

- [36] Mustert,R.: Auftrieb und Widerstand von schräg angeströmten zyLindrischen Körpern. ZWB FB 1690, 1942.
- 37] Pechstein: (Querangeströmte ZyLinder). VDI Z.1942, S.22. (Ref. in [27])
- [38] Polhamus,E.C.: Effect of Flow Incidence and Reynolds Number on Low-Speed Aerodynamic Characteristics of Several Noncircular Cylinders with Applications to Directional Stability and Spinning. NACA TN 4176, 1957.
- [39] Powell, C.H.: The Resistance of Inclined Struts. ARC RM 599, 1919.
- [40] Relf,E.F.: Discussion of the Results of Measurements of the Resistance of Wires, with some Additional Tests on the Resistance of Wires of Small Diameter. AEA RM 102, 1914.
- [41] Relf,E.F. (Querangeströmte Kreiszylinder). Journ. Roy. Aeronautical Soc. 1935, S.1. (Ref. in [45])
- [42] Rodewald, M.: Das Abtreiben von Schiffen durch den Wind. Der Seewart 1959, S.45.
- [43] Roshko, A.: On the Drag and Shedding Frequency of Bluff Cylinders. NACA TN 3169, 1954.
- [44] Roshko,A.: On the Wake and Drag of Bluff Bodies. Journal of the Aeronautical Sciences 1955, S.124.
- [45] Schiller,L.: Umströmung von Körpern bei zweidimensionaler Strömung. Umströmung von Körpern bei räum-Licher Strömung. "Landolt-Börnstein" 4.Band, 1.Teil.
- [46] Schubauer, G.B. und Dryden, H.L.: The Effect of TurbuLence on the Drag of Flat Plates. NACA Rep. 546, 1935.
- [47] Shoemaker, J.M.: Resistance of a Fifteen-Centimeter Disc. NACA TN 252, 1926.

- [48] Smith, A.: Bodies Moving Through Still Air. Journal of the Aeronautical Sciences 1936.
- [49] Stack, J.: Compressibility Effects in Aeronautical Engineering. NACA ACR 1941.
- [50] Stanton, T.E.: On the Resistance of Thin Plates and Models in a Current of Water. TINA 1909, S.164.
- [51] Thiemann, H. und Thieme, H.::Windkanaluntersuchung von Rechteckplattenrudern. Schiff und Hafen 1959, S.1071.
- [52] Wick, B.H.: Study of the Subsonic Forces and Moments on an IncLined Plate of Infinite Span. NACA TN 322, 1954.
- [53] Wieselsberger, C.: New Data on the Laws of Fluid Resistance. NACA TN 84, 1922.
- [54] Wieselsberger, C.: Versuche über den Luftwiderstand gerundeter und kantiger Körper. Ergebnisse der AVA zu Göttingen, II.Lieferung, 1923.
- [55] Wysocky: Sechskomponentenmessungen an Sperrballonen. ZWB FB 1414, 1941.
- [56] Zahm,A.F. und Smith,R.H. und Louden,F.A.: Forces on Elliptic Cylinder in Uniform Air Stream. NACA Rep. 289, 1928.
- [57] Thieme,H.: Über GrundLagen für den mathematischen Linienriβ eines Frachtschiffes. Schiffstechnik 1956, S.288.
- [58] Weinblum, G.: Exakte Wasserlinien und Spantflächenkurven. Schiffbau 1934, S.120, 135.

 A_{L} A_{Lii} A_{WL} D_{C} $Fr_{T} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot T}}$ H $L = L_{WL}$ M_{SL}

$$Re_{B} = \frac{v \cdot B}{v}$$

$$Re_{T} = \frac{v \cdot 2T}{v}$$

$$T$$

$$U_{L}$$

$$\mathbf{c}_{\mathrm{DC}} = \frac{\mathbf{D}_{\mathrm{C}}}{\frac{\mathrm{Q}}{2} \cdot \mathbf{v}^2 \cdot \mathbf{A}_{\mathrm{L}}}$$

 $\mathbf{c}_{\mathrm{DCU}}$

₹

$$\mathbf{c}_{\mathrm{MSL}} = \frac{\mathbf{M}_{\mathrm{SL}}}{\frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{2}} \cdot \mathbf{v}^2 \cdot \mathbf{A}_{\mathrm{L}} \cdot \mathbf{T}}$$
$$\mathbf{g} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

v

- v_W
- ∧ =
- \mathcal{O}
- ν
- .
- Q
- ٩_ü

Lateralfläche des Unterwasserteils Lateralflächeddes Überwasserteils Schwimmwasserlinienfläche Querwiderstand des Unterwasserteils Froudezahl, bezogen auf Tiefgang Höhe des Körpers Länge des Körpers in der Wasserlinie Rollmoment, bezogen auf Längsachse durch Lateralschwerpunkt. Positiv, wenn es das Modell zur Saugseite krängt. Reynoldszahl, bezogen auf Körperbreite Reynoldszahl, bezogen auf Tiefgang Tiefgang Lateralflächenumfang des Unterwasserteils Wasserverdrängung

Querwiderstandsbeizahl des Unterwasserteils

Querwiderstandsbeizahl des Überwasserteils

Rollmomentenbeizahl

Erdbeschleunigung Höhe des Lateralschwerpunktes über Unterkante Kiel Anströmgeschwindigkeit = Schleppgeschwindigkeit Seitenwindgeschwindigkeit

Seitenverhältnis Bei Rechteckplatten: $\Lambda = \frac{2}{L}$ Umfangsverhältnis Bei Rechteckplatten: $\Omega = \frac{4 (1+\Lambda)^2}{\Lambda}$ kinematische Zähigkeit des Wassers Bet 10° C : $\nu = 1,3.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ Dichte des Wassers Bei 10° C : $\varrho = 102 \text{ kg s}^2/\text{m}^4$ Dichte der Luft

Tabelle 1

Querwid	erstands- u	nd Rollmome:	ntenbeiza	hlen
(Aufgetragen	in Abb. 7	und 11)	
Modell	Nr. 1.15.	Mathemat: $I_{\rm m} = -2$ 00	isches Sc	hiff 25 m
T = 0,0	80 m:	LI – 2,001	ш; D — О,	20 11
v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _B .10 ⁻⁶	° _{DC}	$\mathtt{e}_{\mathrm{MSL}}$
0,101	0,0130	0,01943	0,456	0,1176
0,148	0,0279	0,02846	0,503	0,0399
0,196	0,0489	0,0377	0,519	0,0136
0,244	0,0760	0,0469	0,548	-0,0151
0,288	0,1058	0,0554	0,546	-0,0650
0,345	0,1517	0,0663	0,551	-0,1116
0,384	0,1887	0,0738	0,513	-0,1397
0,439	0,2460	0,0845	0,543	-0,1452
0,500	0,3187	0,0962	0,544	-0,1556
0,548	0,3837	0,1054	0,582	-0,1206
0,608	0,4717	0,1170	0,622	-0,0413
0,682	0,5941	0,1311	0,657	-0,0369
0,790	0,7956	0,1519	0,754	0,0810
0,851	0,9243	0,1637	0,764	0,1069
$\underline{T} = 0, 1$	05 m:			
v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _B .10 ⁻⁶	° _{DC}	$\mathbf{c}_{\mathrm{MSL}}$
0,1136	0,01096	0,02186	0,608	0,0706
0 ,1 54	0,0 3 304	0,02961	0,602	0,0487
0,192	0,0358	0,03691	0,599	-0,00267
0,247	0,0592	0,0475	0,594	-0,0288
0,317	0,0976	0,0610	0,577	-0,0483
0,351	0,1195	0,0675	0,577	-0,0638
0,392	0,1495	0,0754	0,566	-0,0669
0,455	0,1975	0,0875	0,598	-0,0333
0,494	0,237	0,0950	0,601	-0,0344
0,582	0,329	0,1119	0,659	-0,0213
0,592	0,341	0,1139	0,671	-0,0246
0,727	0,513	0,1399	0,620	0

0,1491

0,1710

0,1900

0,638

0,626

0,659

0,0107

0,0277

0,0502

0,776

0,889

0,988

0,585

0,767

0,948

Tabelle 1 (Fortsetzung)

T = 0,130 m:

v m/s	$\mathrm{Fr_T}^2$	$\text{Re}_{B}.10^{-6}$	\mathbf{c}^{DC}	$\mathbf{e}_{\mathrm{MSL}}$
0,176	0,0243	0,0338	0,548	-0,02527
0,198	0,0306	0,0381	0,599	-0,02351
0,244	0,0468	0,0469	0,626	-0,02317
0,274	0,0589	0,0527	0,658	-0,02027
0,385	0,1162	0,0740	0,635	0,00196
0,485	0,1845	0,0932	0,644	0,03173
0,672	0,355	0,1291	0,669	0,06471
0,727	0,415	0,1397	0,653	0,07951
0,784	0,483	0,1507	0,670	0,09951
0,865	0,587	0,1662	0,675	0,11219
0,994	0,776	0,1910	0,707	0,13993

Querwi	iderstands- un	nd Rollmome	entenbeizal	nlen						
	(Aufgetragen	in Abb. 8	und 12)							
Modell	Nr. 1.23.	Mathemat	tisches Scl	niff						
		L = 2,49	98 m; B = (D,476 m						
T = 0	T = 0,125 m:									
v m/s	$\mathbb{F}r_{\mathbb{T}}^2$	Re _B .10 ⁻⁶	c_{DC}	$\mathbf{e}_{\mathrm{MSL}}$						
0,100	0,00815	0,0366	0,660	- 0,185						
0 ,1 56	0,0199	0,0571	0,593	-0,368						
0,216	0,0380	0,0791	0,514	-0,322						
0,263	0,0564	0,0963	0,542	-0,469						
0,305	0,0759	0,1117	0,541	- 0 , 484						
0,355	0,1029	0,1300	0,531	-0,470						
0,398	0,1291	0,1457	0,599	-0,510						
0,440	0,1579	0,1610	0,640	-0,491						
0,493	0,1984	0,1807	0,614	- 0 , 470						
0,540	0,2380	0,1976	0,619	-0,497						
0,550	0,2465	0,2014	0,601	-0,490						
$\underline{T} = 0$,150 m:									
v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _B .10 ⁻⁶	c ^{DC}	$\mathbf{c}_{\mathrm{MSL}}$						
0,099	0,00665	0,0362	0,643	-0,272						
0,154	0,01609	0,0564	0,620	-0,306						
0,215	0,03138	0,0788	0,551	-0,312						
0,262	0,0466	0,0960	0,569	-0,308						
0,303	0,0623	0,1110	0,558	-0,306						
0,355	0,0855	0,1300	0,577	-0,312						
0,400	0,1085	0,1464	0,610	-0,302						
0,442	0,1321	0,1618	0,571	- 0 , 345						
0,492	0,1640	0,1800	0,586	-0,322						
0,544	0,2005	0,1991	0,616	- 0,328						
0,604	0,2478	0,2212	0,698	-0,294						
0,614	0,2558	0,2248	0,692	-0,293						

Tabelle 2 (Fortsetzung)

T = 0,175 m:

the set the set of the	the second description of the second descrip			
v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _B .10 ⁻⁶	\mathbf{e}_{DC}	c_{MSL}
0,100	0,00582	0,0366	0,787	-0,253
0,157	0,0143	0,0575	0,530	- 0 , 239
0,216	0,0271	0,0791	0,613	-0,259
0,251	0,0367	0,0919	0,707	-0,281
0,305	0,0542	0,1117	0,647	-0,259
0,357	0,0743	0,1307	0,652	- 0 , 246
0,400	0,0931	0,1464	0,655	-0,233
0,443	0,1141	0,1623	0,671	-0,246
0,495	0,1428	0,1811	0,665	- 0 , 243
0,550	0,1762	0,2013	0,721	-0,225
0,582	0,1975	0,2127	0,765	-0,217
0,614	0,2195	0,2248	0,847	-0,191
0,658	0,2520	0,2410	1,107	-0,139

(Aufgetragen	in Abb. 9 und 13)	
ModeLL Nr. 1.17.	Tankschiff	
	L = 1,22 m; B = 0,17 m	

T = 0,052 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	$\operatorname{Re}_{\mathrm{B}}$.10 ⁻⁶	\mathbf{c}_{DC}	$\mathbf{e}_{\texttt{MSL}}$
0,202	0,0799	0,0264	0,4375	-0,0807
0,288	0,1627	0,0377	0,530	-0 ,1 849
0,371	0,2698	0,0485	0,643	-0,2482
0,485	0,4605	0,0635	0,711	-0,3505
0,576	0,651	0,0753	0,845	-0,2570
0,678	0,901	0,0887	1,135	0,2570
0,748	1,098	0,0978	1,247	0,4658
0,820	1,318	0,1072	1,402	0,6447

T = 0,062 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	$\text{Re}_{B}.10^{-6}$	$^{\rm c}{}_{ m DC}$	$\mathbf{c}_{ ext{MSL}}$
0,085	0,01189	0,0111	0,708	- 0 ,1 69
0,196	0,06335	0,0256	0,665	-0,208
0,294	0 ,1 423	0,0385	0,608	-0,230
0,367	0,222	0,0480	0,708	-0,256
0,482	0,382	0,0630	0,749	-0,0944
0,588	0,569	0,0769	1,005	0,143
0,662	0,720	0,0866	1,105	0,257
0,727	0,869	0,0951	1,257	0,515
0,792	1,032	0,1036	1,358	0,526

Tabelle 4

Querwiderstands- und Rollmomentenbeizahlen (Aufgetragen in Abb. 10 und 14) Frachtschiff Modell Nr. 1.10. L = 2,00 m; B = 0,32 mT = 0,164 m: $Re_{B}.10^{-6}$ $\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$ \mathbf{c}_{DC} $\mathbf{e}_{\mathrm{MSL}}$ V m/s 0,104 0,0256 0,00672 0,828 0,1550 0,01495 0,0382 0,771 0,1802 0,155 0,204 0,2860 0,02584 0,0502 0,830 0,244 0,0601 0,799 0,2025 0,03705 0,310 0,0598 0,0763 0,812 0,1885 0,348 0,0752 0,0857 0,758 0,1741 0,400 0,0995 0,0985 0,803 0,1492 0,443 0,1222 0,1091 0,797 0,1620 0,478 0,1422 0,1178 0,826 0,1796 0,1835 0,1730 0,543 0,1338 0,791

	(1	Aufgetrag	en in Abb	b. 15)		
ModeLL	Nr.	1.22.	Quader				
			L = 2, 0)O m;	В =	0,37	m

T = 0,108 m:

•

v m⁄s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _B .10 ⁻⁶	° _{DC}	° _{MSL}
0,100	0,00944	0,0285	0,911	-0,634
0,214	0,0432	0,0609	1,023	-0,547
0,262	0,0649	0,0746	1,108	-0,151
0,309	0,0902	0,0880	1,230	0,025
0,355	0,1190	0 ,1 010	1,302	0,107
0,400	0,1510	0,1139	1,369	0,216
0,443	0,1840	0,1262	1,371	0,254
0,492	0,2293	0,1400	1,335	0,258
0,548	0,2832	0,1560	1,381	0,301
0,609	0,3500	0 ,1 734	1,468	0,381

	(1	lufget	ragen :	in	Abb.	16))			
ModelL	Nr.	1.13.	Re	əcł	nteck	pLat	tte	9		
			\mathbf{L}	=	2,00	m;	В	=	0,02	m

<u>T = 0,21 m:</u>

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _T .10 ⁻⁶	° _{DC}	$c_{\rm MSL}$
0,098	0,00466	0,0317	1,235	-0,312
0,157	0,0119	0,0508	1,363	0
0,191	0,0177	0,0617	1,463	0,097
0,235	0,0268	0,0760	1,532	0,283
0,248	0,0300	0,0803	1 ,595	-

(Aufgetragen in Abb. 17 bis 20) Rechteckplatte L = 0,500 m; B = 0,005 m

T = 0,100 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _T .10 ⁻⁶	\mathbf{c}_{DC}	c _{MSL}
0,107	0,0117	0,01646	0,822	-0,034
0,200	0,0408	0,0308	0,980	0,0098
0,313	0,0999	0,0482	1,181	0,032
0,402	0 ,1 648	0,0618	1,210	0,019
0,490	0,245	0,0754	1,203	0,049
0,602	0,369	0,0926	1,219	0,081
0,715	0,522	0,1100	1,214	0,089
0,852	0,738	0,1310	1,245	0,092
0,910	0,844	0,1399	1,270	0,109

T = 0,200 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _T .10 ⁻⁶	e_{DC}	$\mathbf{e}_{ ext{MSI}}$
0,124	0,00784	0,0382	1,020	-0,344
0,215	0,0236	0,0662	1,140	-0,1692
0,316	0,0510	0,0973	1,099	-0,0933
0,415	0,0878	0,1277	1,159	-0,0248
0,500	0,127	0,1539	1,197	-0,0003
0,615	0,193	0,1892	1,230	0,0271
0,715	0,260	0,2200	1,210	0,0405
0,809	0,332	0,2490	1,222	0,0565
0,892	0,406	0,2746	1,216	0,0611
1,014	0,525	0,3122	1,250	0,0787
1,112	0,630	0,3421	1,260	0,0932

Tabelle 7 (Fortsetzung)

T =	0,	300	m:	

 $\text{Re}_{\text{T}}.10^{-6}$ $\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$ \mathbf{c}_{DC} $\mathbf{e}_{\texttt{MSL}}$ v m/s 1,071 0,113 0,00435 0,0522 -0,1714 0,0933 1,290 0,202 0,0139 -0,0303 0,328 0,0366 0,1513 1,220 -0,0203 0,403 0,0553 0,1860 1,201 -0,0114 0,504 0,0864 0,2325 1,235 -0,0017 0,603 0,1235 0,2784 1,240 0,0153 0,701 0,167 0,3240 1,253 0,0346 0,808 0,222 0,3730 1,292 0,0456 0,0558 0,902 0,276 0,4160 1,325 0,4550 1,298 0,987 0,331 0,0532

T = 0,400 m:

 $\text{Re}_{\text{T}}.10^{-6}$ $\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$ \mathbf{c}_{DC} \mathbf{e}_{MSL} *ττ* m/s 0,119 1,243 0,0345 0,00362 0,0732 0,0102 0,1230 0,200 1,231 0,0245 1,252 0,296 0,0224 0,1820 0,0260 1,234 0,404 0,0416 0,2486 0,0249 1,257 0,522 0,0696 0,3214 0,0292 0,616 0,0966 0,3790 1,282 0,0282 0,702 0,1259 0,4320 1,272 0,0324 0,809 0,1668 0,4975 1,285 0,0341 0,897 0,2049 0,5520 1,300 0,0450

(Aufgetragen in Abb. 21) RechteckpLatte

L = 0,200 m; B = 0,005 m

T = 0,100 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _T .10 ⁻⁶	CDC	c _{MSL}
0,191	0,0372	0,0294	1,093	-0,487
0,250	0,0637	0,0385	1,124	-0,404
0,297	0,0899	0,0457	1,123	-0,285
0,392	0,1567	0,0604	1,110	-0,098
0,486	0,241	0,0747	1,192	-0,036
0,531	0,287	0,0817	1,132	0,045
0,588	0,353	0,0905	1,217	0,089

(Aufgetragen in Abb. 22 bis 25)

Kreissche**i**be

Durchmesser 0,500 m; Stärke 0,005 m

T = 0,150 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	Re _T .10 ⁻⁶	cDC	$c_{\rm MSL}$
0,112	0,00847	0 ,0 2587	0,950	-0,179
0,202	0,0275	0,0466	0,998	-0,067
0,298	0,0604	0,0688	1,112	0,011
0,400	0,1088	0,0923	1 ,1 48	0,043
0,501	0,1703	0,1157	1,129	0,047
0,606	0,249	0,1400	1,169	0,045
0,709	0,342	0,1637	1,182	0,047
0,820	0,457	0,1892	1,229	0,059
0,899	0,550	0,2074	1,215	0,0716
0,993	0,670	0,2292	1,230	0,0815

T = 0,250 m:

v m/s	$\mathrm{Fr}_{\mathrm{T}}^{2}$	$\text{Re}_{\text{T}}.10^{-6}$	cDC	$\mathbf{c}_{ ext{MSL}}$
0,111	0,00505	0,0427	0,725	-0,2135
0,216	0,0189	0,0831	1,098	-0,0507
0,326	0,0434	0 ,1 254	1 ,1 63	0,0205
0,385	0,0605	0,1480	1,170	-0,0054
0,488	0,0969	0,1878	1,160	0,0044
0,609	0, 1 512	0,2340	1,200	0,0108
0,702	0,2018	0,2700	1,210	0,01615
0,817	0,272	0,3142	1,239	0,0200
0,885	0,320	0,3400	1,223	0,0316
0,975	0,388	0,3750	1,248	0,0412

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Τ	 0,	375	m:

v m/s	${\tt Fr}_{\rm T}^2$	Re _T .10 ⁻⁶	°DC	$\mathbf{c}_{\mathrm{MSL}}$
0,102	0,00282	0,0588	1,041	-0,0787
0,208	0,01177	0,1200	1,160	-0,01 095
0,308	0,02529	0,1777	1,247	0,00552
0,412	0,0462	0,2373	1,230	0,00761
0,540	0,0794	0,3116	1,223	0,01150
0,618	0,1038	0,3565	1,229	0,01609
0,710	0,1370	0,4094	1,230	0,0225
0,817	0,182	0,4710	1,250	0,0238
0,894	0,217	0,5160	1,232	0,0276
0,988	0,266	0,5700	1,250	0,0324

T = 0,500 m:

v m/s	Fr _T ^{2.}	Re _T .10 ⁻⁶	° _{DC}	$c_{\rm MSL}$
0,1117	0,00253	0,0858	1,287	0
0,211	0,00909	0,1619	1,321	0,00896
0,267	0,0145	0,2054	1,357	0,01319
0,309	0,0195	0,2377	1,360	0,0141
0,404	0,0332	0,3110	1,341	0,0171
0,537	0,0588	0,4130	1,371	0,0195
0,609	0,0755	0,4682	1,363	0,0246
0,697	0,099	0,5360	1,343	0,0273
0,808	0,133	0,6220	1,370	0,0371
0,897	0,164	0,6900	1,364	0,0376
0,983	0,197	0,7560	1,378	0,0409

Abb. 6

~

Beispiel eines Oszillogramms

Zusammenstellung der Modell

	the second s					
Nr. und Art des Modells	₩ m ³	L _{WL} m	B m	H m	T	h m
1.15 mathemat. Schiff	0,024 0,0315 0,039	2,00 2,00 2,00	0,25 0,25 0,25	0,25 0,25 0,25	0,08 0,105 0,13	0,04 0,053 0,065
1.23 mathemat. Schiff	0,0847 0,1016 0,1185	2,498 2,498 2,498	0,476 0,476 0,476	0,275 0,275 0,275	0,125 0,150 0,175	0,063 0,075 0,088
1.17 Tankschiff	0,00785 0,0096	1,19 1,22	0,17 0,17	0,124 0,124	0,052 0,062	0,0262 0,0312
1.10 Frachtschiff	0,0661	2,00	0,32	0,20	0,164	0,0832
1.22 Quader	0,08	2,00	0,37	0,32	0,108	0,054
Rechteckplatt	en	2,00 0,5 0,5 0,5 0,5 0,2	0,02 0,005 0,005 0,005 0,005 0,005	0,26 0,4 0,4 0,4 0,4 0,4	0,21 0,1 0,2 0,3 0,4 0,1	0,105 0,05 0,1 0,15 0,2 0,05
Kreisscheibe Durchmesser Stärke	0,5 m 0,005 m				0,15 0,25 0,375 0,5	0,089 0,144 0,207 0,25

ihrer Al	omessur	gen	und	MaBy	erhäl	Ltnis	sse

A _{WL} m ²	AL m ²	UL m	B T	AWL L	$V^{=\underline{\mathbb{V}}_{\overline{\mathbb{J}}_{\overline{\mathbb{J}}}}}$	$\Omega^{\frac{2U_L^2}{A_L}}$	Ergeb Tab.	nisse in Abb.
0,3333 0,3333 0,3333	0,16 0,21 0,26	2,16 2,21 2,26	3,125 2,38 1,92	2,08 1,586 1,28	0,08 0,105 0,13	58,3 46,5 39,3	1 1 1	7, 11 7, 11 7, 11
0,7145 0,7145 0,7145	0,312 0,375 0,437	2,748 2,798 2,848	3,81 3,17 2,72	2,29 1,905 1,635	0,10 0,12 0,14	48,5 41,7 37,2	2 2 2	8, 12 8, 12 8, 12
0,1643 0,1704	0,0604 0,0727	1,289 1,304	3,27 2,74	2,72 2,34	0,09 0,106	55 46,8	33	9, 13 9, 13
0,5238	0,3173	2,264	1,95	1,65	0,17	32,4	4	10, 14
0,74	0,216	2,216	3,42	3,42	0,108	45,5	5	15
	0,42 0,05 0,1 0,15 0,2 0,02	2,42 0,7 0,9 1,1 1,3 0,4			0,21 0,4 0,8 1,2 1,6 1	27,9 19,6 16,2 16,1 16,9 16	6 7 7 7 7 8	16 17 18 19 20 21
	0,0496 0,0982 0,1580 0,1965	0,578 0,785 1,046 1,57			0,91 1,27 1,78 2,54	13,47 12,56 13,83 25,10	9999	22 23 24 25

V

Definitionsskizzen

Rechteckplatte:









Beispiel eines Ogzillogramms

Sale wards



A 15 2 ... 1







































