

177 | September 1966

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dipl.-Ing. Alfred Kracht

Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Verringerung des Wellenwiderstandes gegebener Schiffsformen durch den Bugwulst

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

I.f.S. - Bericht Nr. ~~11736~~

Theoretische und experimentelle Untersuchungen über
die Verringerung des Wellenwiderstandes gegebener
Schiffsrümpfe durch den Bugwulst

(Abschlußbericht)

von

Dipl.-Ing. Alfred Kracht

Hamburg, September 1966

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Wahl des Doppelmodells
 - 2.1. Wahl der Schiff-Wulst-Kombinationen
3. Meßmethode
 - 3.1. Tiefschleppwaage
4. Experimente mit tiefgetauchten Doppelmodellen
 - 4.1. Auswertung der Meßergebnisse
 - 4.2. Diskussion der Resultate
5. Zusammenfassung
6. Literaturverzeichnis
7. Abbildungen
 - Abb. 1 Tiefschleppwaage, Biegestab und Vollbrückenschaltung der Dehnungsmeßstreifen
 - Abb. 2 Doppelmodell mit Wulstkörpern
8. Diagramme
 - Diagr. 1 Der Gesamtwiderstandsbeiwert C_v als Funktion der Reynoldsschen Zahl eines tiefgetauchten Doppelmodells ohne und mit Wulst in symmetrischer Anordnung
 - Diagr. 2 Der Gesamtwiderstandsbeiwert C_v als Funktion der Reynoldsschen Zahl eines tiefgetauchten Doppelmodells ohne und mit Wulst in asymmetrischer Anordnung
 - Diagr. 3 Vergleich der Gesamtwiderstandsbeiwerte mit und ohne Einfluß der freien Wasseroberfläche von Modellen ohne und mit Wulst in symmetrischer Anordnung
 - Diagr. 4 Vergleich der Gesamtwiderstandsbeiwerte mit und ohne Einfluß der freien Wasseroberfläche von Modellen ohne und mit Wulst in asymmetrischer Anordnung
 - Diagr. 5 Formfaktoren $n = (C_v - C_{F_0})/C_{F_0}$ als Funktion der Reynoldsschen Zahl für zwei Schiff-Wulst-Kombinationen
 - Diagr. 6 Vergleich der theoretischen und experimentellen Resultate
 - Diagr. 7 Vergleich der theoretischen und experimentellen Resultate

1. Einleitung

Mit dem vorliegenden Bericht findet ein Forschungsprogramm, das sich mit der Klärung des Problems der Verringerung des Wellenwiderstandes eines Schiffes durch einen additiven Bugwulst befaßt, einen vorläufigen Abschluß. Über die theoretische Seite dieses Problems und dessen Prüfung durch Experimente mit Modellen auf der freien Wasseroberfläche ist bereits in dem Bericht Nr. 166 des Institutes für Schiffbau, Hamburg, berichtet worden.

Aus dem Vergleich der lineartheoretischen und experimentellen Resultate und aufgrund der Tatsache, daß bei kleinen Geschwindigkeiten, bei denen der Wellenwiderstand schon vernachlässigbar klein ist, der Bugwulst auch noch den Widerstand verringert, ergab sich die Frage nach der Abhängigkeit des Zähigkeitsbedingten Widerstandsanteiles von der Größe und Lage des Wulstkörpers einer Schiff-Wulst-Kombination. (Hoerner (1)). Von der Beantwortung dieser Frage wird es nun auch abhängen, ob die experimentellen Resultate mit den lineartheoretischen in eine bessere Übereinstimmung gebracht werden können.

Die zur Zeit beste Methode, den Zähigkeitsbedingten Widerstand eines Schiffes zu messen, ist das Experiment mit einem tiefgetauchten Doppelmodell, nach einer Idee von Föttinger (2), nach der auch die Versuche zu diesem Bericht von der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, (VWS), durchgeführt worden sind.

2. Wahl des Doppelmodells

Korrekterweise müßte das Doppelmodell dem an der Schwimmwasserlinie gespiegelten Modell der Form

$$\langle 2, 4, 6, 0.72, 1.0 \rangle$$

entsprechen, mit dem auch die Versuche auf der freien Wasseroberfläche durchgeführt worden sind. Der mit diesem Doppelmodell gemessene gesamte Zähigkeitsbedingte Widerstand würde von dem Gesamtwiderstand des Oberflächenmodells abgezogen einen Restwiderstand ergeben, der mit dem lineartheoretisch berechneten Wellenwiderstand verglichen werden kann.

Um jedoch die Kosten für das Versuchsprogramm ein einen erträglichen Rahmen zu halten, ist ein anderes Doppelmodell ausgewählt worden, das aufgrund eines anderen Forschungsvorhabens schon in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau existierte. Dieses Modell hatte die folgenden Abmessungen

$$\begin{array}{ll} L = 5.0000 \text{ m} & \beta = 0.93 \\ B = 0.6250 \text{ m} & \varphi_v = 0.72 \\ T = 0.1875 \text{ m} & \varphi_h = 0.56 \\ S = 6.9300 \text{ m}^2 & \varphi_{\text{ges}} = 0.64 \\ \nabla = 0.6975 \text{ m}^3, & \end{array}$$

Es war zum Hauptspant unsymmetrisch und aus massivem Paraffin gefertigt.

2.1. Wahl der Schiff-Wulst-Kombinationen

Anhand der Vergleiche der lineartheoretischen und der experimentellen Resultate, die in den Diagrammen 14a bis 14e des IfS Berichtes Nr. 166 zusammengestellt worden sind, eignen sich die Fälle 1 und 3 für die Versuche mit den tiefgetauchten Doppelmodellen besonders gut. Die Diagramme dieser beiden Fälle werden der Deutlichkeit halber dem vorliegenden Bericht noch einmal hinzugefügt (Diagr. 6 und 7).

3. Meßmethode

Experimente mit tiefgetauchten Doppelmodellen bereiten besondere Schwierigkeiten, die sich aus der Notwendigkeit der Modellführung ergeben; denn einerseits muß das Modell auf einer vorgeschriebenen Bahn geführt werden können, andererseits darf die Haltevorrichtung selbst die hydrodynamischen Vorgänge am Modell nicht zu sehr stören.

In dem vorliegenden Fall wurde das Modell in der Mitte an einem Schwert befestigt, das mit dem Schleppwagen fest verbunden war. Außer der Funktion der Modellführung nahm das Schwert noch die elektrischen Leitungen zu den Meßelementen auf. Die eigentliche Widerstandswaage befand sich im Modellkörper (Abb.1).

3.1. Tiefschleppwaage

Die Abb.1 zeigt in skizzierter Form die in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau benutzte Tiefschleppwaage. Ihr Aufbau ähnelt einem Parallelogramm, dessen Seiten a und b wegen der weichen Blattfedern c und d gegeneinander unter Beibehalten der Parallelität verschieblich sind. Daneben erlauben diese Federn nur Bewegungen in einer Richtung. Auftretende Kräfte werden über gelenkig gelagerte Stäbe e und f auf das eigentliche Meßelement, den Biegestab g, übertragen.

Der Biegestab ist mit vier Dehnungsmeßstreifen in Vollbrückenschaltung beklebt. Die in Abb.1 gezeigte Anordnung der Streifen wurde gewählt, damit eine Verschiebung des Kraftangriffspunktes in Stabrichtung ohne Einfluß auf den Meßwert bleibt. Die Differenz der Dehnung ist dann bei konstantem Elastizitätsmodul E und Widerstandsmoment W, sowie auf beiden Seiten gleichem Streifenabstand proportional der angreifenden Kraft P.

4. Experimente mit den tiefgetauchten Doppelmodellen

Damit die Meßergebnisse nicht durch die Wellenbildung an der freien Wasseroberfläche verfälscht werden, darf das Modell die kritische Geschwindigkeit

$$v_{\text{krit}} = 0.7 \cdot \sqrt{g \cdot H}$$

nicht überschreiten (H ist dabei die Tauchtiefe des Modells, die von der ungestörten Wasseroberfläche bis zur Mitte des Modells zu messen ist). Mit einer Tauchtiefe von $H = 1.5875 \text{ m}$, die durch die Länge des Schwertes festgelegt ist, ergibt sich eine obere Grenzgeschwindigkeit von

$$v = 2.6 \text{ m/s} .$$

Alle fünf Versuchsreihen wurden daher in dem Geschwindigkeitsintervall

$$0.4 \leq v \leq 2.5 \text{ m/s}$$

mit $\Delta v = 0.1 \text{ m/s}$

untersucht.

Wegen der starren Verbindung des Modells mit dem Schleppwagen ist die Modellgeschwindigkeit gleich derjenigen des Wagens, die nach der üblichen Methode aus den Schre~~ib~~eben eines Zeit-Weg-Schreibers ermittelt wurde. Die Dehnungen des Biegestabes wurden von einem Philips-Kompensationsschreibers registriert und mit Hilfe der Eichkurve den entsprechenden Kräften zugeordnet.

Um auch bei den kleinen Geschwindigkeiten noch eine turbulente Grenzschicht zu erreichen, sind sowohl die vorderen Wulstkörper als auch das Modell mit einem Stolperdraht von 1 mm Durchmesser versehen worden.

Abb.2 vermittelt einen Eindruck von dem Doppelmodell mit den Wulstkörpern, die symmetrisch zum Hauptspant angeordnet sind und deren Zentren in den Loten liegen. Die gezeigte Schiff-Wulst-Kombination entspricht dem Fall 3.

4.1. Auswertung der Meßergebnisse

Alle Kräfte werden auf $\varrho/2 \cdot v^2 \cdot S$ bezogen, wobei S die gesamte benetzte Modelloberfläche ist.

Von dem Beiwert des gemessenen zähigkeitsbedingten Widerstandes des Doppelmodells

$$C_v = W_v / (\varrho/2 \cdot v^2 \cdot S)$$

ist der Beiwert des Reibungswiderstandes der äquivalenten ebenen Platte C_{F_0} , der nach Schoenherr berechnet worden ist, abgezogen worden. Der so erhaltene Restbeiwert

$$\Delta C_v = C_v - C_{F_0}$$

setzt sich nur aus den Anteilen des normal zur Modelloberfläche gerichteten zähigkeitsbedingten Druckwiderstandes und der Erhöhung des tangentialen Zähigkeitswiderstandes zusammen, der durch die Änderung des Druckgradienten über die Länge des Modells verursacht wird. Der in Wirklichkeit vorhandene Einfluß der freien Wasseroberfläche, der im Doppelmodellversuch nicht simuliert werden kann, muß unberücksichtigt bleiben.

In den Diagrammen 1 und 22 sind die Ergebnisse für die symmetri-

schen, resp. asymmetrischen Fälle als Funktionen der Reynoldsschen Zahl dargestellt worden. Zum Vergleich sind in die Diagramme 3 und 4 zusätzlich noch die Gesamtwiderstandsbeiwerte C_T der Schiff-Wulst-Kombinationen mit Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche eingetragen worden. Allerdings ist das Modell für diese Versuche mit

$$\varphi_v = \varphi_h = \varphi_{\text{ges}} = 0.72$$

völliger und symmetrisch zum Hauptspant gewesen.

Drückt man den formabhängigen Teil des gesamten zähigkeitsbedingten Widerstandes als Bruchteil des Reibungswiderstandes der äquivalenten ebenen Platte aus und benutzt die formale Schreibweise des Formfaktors, dann kann man für eine Schiff-Wulst-Kombination diesen Widerstandsbeiwert zu

$$C_v = (1 + n_o + n_I) \cdot C_{F_o}$$

angeben. In dieser Formel berücksichtigt n_o den Anteil des Schiffes ohne Wulst und n_I denjenigen, der durch den Wulst allein und dessen Interferenzeffekt mit dem Schiffskörper verursacht wird. Da der Reibungswiderstand durch das Anbringen eines zusätzlichen Wulstes infolge der Oberflächenvergrößerung nur anwachsen kann, muß bei konstantem n_o der Wert für n_I kleiner als Null angesetzt werden, wenn auch bei kleinen Geschwindigkeiten der Widerstand noch merklich verringert worden ist, ein experimentell vielfach bestätigtes Ergebnis (s. speziell Kinoshita und Sudo (3)). Selbstverständlich kann n_I auch größer als Null sein.

Im Diagramm 5 sind die Formfaktoren

$$n = n_o + n_I = (C_v - C_{F_o}) / C_{F_o} = \Delta C_v / C_{F_o}$$

des Doppelmodells ohne Wulst und aller Schiff-Wulst-Kombinationen als Funktionen der Reynoldsschen Zahl aufgetragen worden. Das Diagramm bestätigt die Auffassung, daß der Formfaktor nur unwesentlich von der Reynoldsschen Zahl abhängt.

Unter der Voraussetzung, daß ΔC_v sowohl von der Wellenbildung als auch von der Unsymmetrie des Doppelmodells nur wenig

beeinflusst wird, ist diese Differenz noch zusätzlich von dem entsprechenden Restwiderstandsbeiwert C_R des symmetrischen Modells mit $\varphi = 0.72$ abgezogen und in das Diagramm 6, resp. 7 eingezeichnet worden. Diese Funktion

$$C'_W = C_T - C_{F_0} - \Delta C_v = C_R - \Delta C_v = f_1(\text{Fr})$$

scheint besser zu einem Vergleich mit dem lineartheoretischen Wellenwiderstandsbeiwert

$$C_W = f_2(\text{Fr})$$

geeignet zu sein.

4.2. Diskussion der Resultate

Zunächst muß der Formfaktor n_0 des Modells ohne Wulst etwas näher betrachtet werden (Diagr. 5); denn das Doppelmodell unterscheidet sich erheblich von dem Oberflächenmodell mit $\varphi_{\text{ges}} = 0.72$. Da das Doppelmodell zum Hauptspant unsymmetrisch ist, ergeben sich je nach Fahrtrichtung zwei verschiedene Formfaktoren, die im Mittel

$$n_0 = 0.08 \quad (\varphi_v = 0.72, \varphi_h = 0.56, \varphi_{\text{ges}} = 0.64)$$

für die Hauptfahrtrichtung und

$$n_0 = 0.10 \quad (\varphi_v = 0.56, \varphi_h = 0.72, \varphi_{\text{ges}} = 0.64)$$

für die Rückwärtsfahrt betragen. Für das Modell ohne Wulst besagt dieses Ergebnis, daß die Form der Spantarealkurve besonders diejenige des Hinterschiffes eine große Rolle spielt. Dieses Resultat ist nicht überraschend, denn der Zähigkeitsbedingte Druckwiderstand, der aus der Verkümmerng des Druckanstieges im Hinterschiff in zäher Flüssigkeit resultiert, und der durch die Änderung des Druckgradienten entlang des Schiffes erhöhte tangentielle Zähigkeitswiderstand bilden die Hauptanteile der Differenz

$$\Delta C_v = C_v - C_{F_0}$$

Allerdings ist der für das Doppelmodell bestimmte Formfaktor n_0 wesentlich kleiner als in dem Bild 24 der Arbeit von Weinblum u.a.(4) für das symmetrische Modell mit $\varphi_{\text{ges}} = 0.64$ angegeben

worden ist. Auf diese Diskrepanz kann an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden, da dieses Problem Inhalt eines anderen Forschungsvorhabens ist, dessen Modellserie das benutzte Doppelmodell entnommen worden ist.

Aus dem gleichen Diagr. 5 folgt, daß der Formfaktor n für die Schiff-Wulst-Kombination nicht nur von der Anordnung, ob symmetrisch oder asymmetrisch zum Hauptspant, sondern auch von der Lage des Wulstzentrums zum Modell abhängt. Da die Ergebnisse der wenigen Rückwärtsfahrten mit den Kombinationen, die gefahren worden sind, keine nennenswerten Unterschiede zeigten, ist auf deren Auswertung ganz verzichtet worden. Für die weiteren Betrachtungen wird der Einfluß der Unsymmetrie des Modells auf den Formfaktor n der Schiff-Wulst-Kombination als gering angesehen.

Bei einer Froudeschen Zahl von 0.18, der Auslegungsgeschwindigkeit der Wulstkörper, ergeben sich die folgenden Formfaktoren:

a, symmetrische Anordnung

$n = 0.16$ (Fall 1, Wulstzentrum 5% L_{pp} vor dem vorderen, bzw.
hinter dem hinteren Lot),

$n = 0.14$ (Fall 3, Wulstzentrum in den Loten),

b, asymmetrische Anordnung

$n = 0.07$ (Fall 1, Wulstzentrum 5% L_{pp} vor dem vorderen Lot),

$n = 0.12$ (Fall 3, Wulstzentrum im vorderen Lot).

Soweit den wenigen Versuchsreihen vertraut werden kann, ist der Formfaktor n für den Fall der asymmetrischen Anordnung tatsächlich kleiner als n_0 , als der Formfaktor des Modells ohne Wulst. Wird n_0 als konstant vorausgesetzt, dann ist n_1 für diese Schiff-Wulst-Kombination kleiner als Null.

Da es aus physikalischen Gründen nicht einleuchtend ist, daß ein zusätzlicher Wulstkörper den zähigkeitsbedingten Widerstand verringert, läßt sich für das Gegenteil bis jetzt noch keine begründete Erklärung geben. Eine mögliche Deutung des Effektes liegt in der Veränderung der Zuströmverhältnisse des Modells durch den Wulstkörper, der vor allem die Umströmung der Kimm beeinflußt.

Damit in dem Diagr. 6, bzw. 7 die lineartheoretischen und experi-

mentellen Resultate nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ einigermäßen gut übereinstimmen, müßte der Formfaktor n_I das folgende Vorzeichen haben:

$$\begin{aligned} n_I < 0 & \quad \text{für den Fall 1} \\ n_I > 0 & \quad \text{für den Fall 3,} \end{aligned}$$

beide Fälle in symmetrischer und asymmetrischer Anordnung. Das erzielte Ergebnis ist allerdings wesentlich bescheidener ausgefallen als erhofft. Nur der Fall 3 der symmetrischen Anordnung zeigt das erwartete Resultat.

Da diese Versuchsreihe die erste mit tiefgetauchten Schiffwulst-Kombinationen gewesen ist, läßt sich ein endgültiges Urteil noch nicht aussprechen. Darüber hinaus spielt der Unterschied der beiden Modelle ebenfalls eine Rolle und es dürfte fraglich sein, ob sich die Kosteneinsparung durch die Verwendung eines vorhandenen Modells gelohnt hat. Endgültig wird auch dieses Problem nur durch eine Reihe systematischer Modellversuche zu klären sein, für die die vorliegende Serie erst den Anfang darstellt.

5. Zusammenfassung

Innerhalb der Beeinflussung des Widerstandes von Schiffen durch den Bugwulst, dessen Wirkung am prägnantesten in der Verringerung des Wellenwiderstandes zum Ausdruck kommt, spielt das Problem der Veränderung des Zähigkeitsbedingten Widerstandes besonders bei kleinen Froudeschen Zahlen eine bedeutende Rolle. Es ist versucht worden, durch fünf Versuchsreihen mit tiefgetauchten Doppelmodellen diese Frage zu klären.

Die Vermutungen, daß der zusätzliche Formfaktor n_I , der den Interferenzeffekt des Zähigkeitsbedingten Widerstandes von Schiffwulst-Kombinationen formal zum Ausdruck bringt, von der Größe und Lage des Wulstes zum Schiffskörper abhängt konnte durch die Experimente bestätigt werden.

Eine bessere quantitative Übereinstimmung der lineartheoretischen und experimentellen Resultate, wie sie die Diagramme 6 und 7

zeigen, konnte durch die Modellversuche nur in einem Fall erreicht werden, so daß von einer zufriedenstellenden Klärung des Problems nicht gesprochen werden kann.

Der Verfasser ist der Deutschen Forschungsgemeinschaft sehr zu Dank verpflichtet, die in großzügiger Weise die Mittel zur Durchführung der kostspieligen Experimente zur Verfügung gestellt hat. Weiterhin dankt der Verfasser Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. G. W e i n b l u m für das Interesse, das er dieser Arbeit entgegengebracht hat, und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, in der die schwierigen Experimente durchgeführt worden sind.

6. Literaturverzeichnis

- (1) Hoerner, S., F. 'Fluid, Dynamic, Drag (1965)'
- (2) Föttinger, H. 'Fortschritte der Strömungslehre im
Maschinenbau und Schiffbau'
STG Jahrbuch 1924 (p.295)
- (3) Kinoshita und Sudo, 11. International Towing Tank
Conference
- (4) Weinblum, G., Schuster, S., Boes, Chr., Bhattacharyya, R.,
'Untersuchungen über den Widerstand einer
systematisch entwickelten Modellfamilie'
STG Jahrbuch 1962 (p.206)

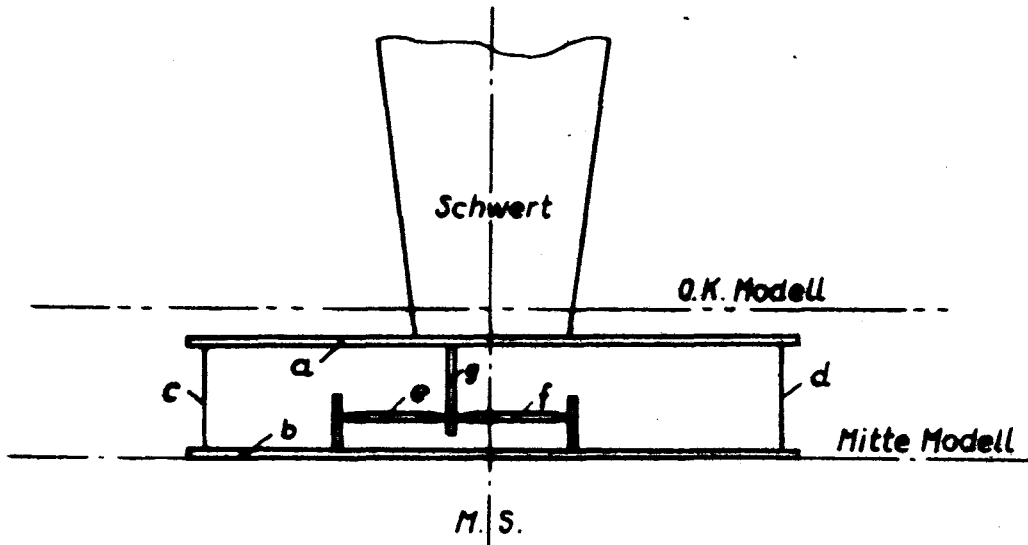
vordere Wulstkörper

hintere Wulstkörper

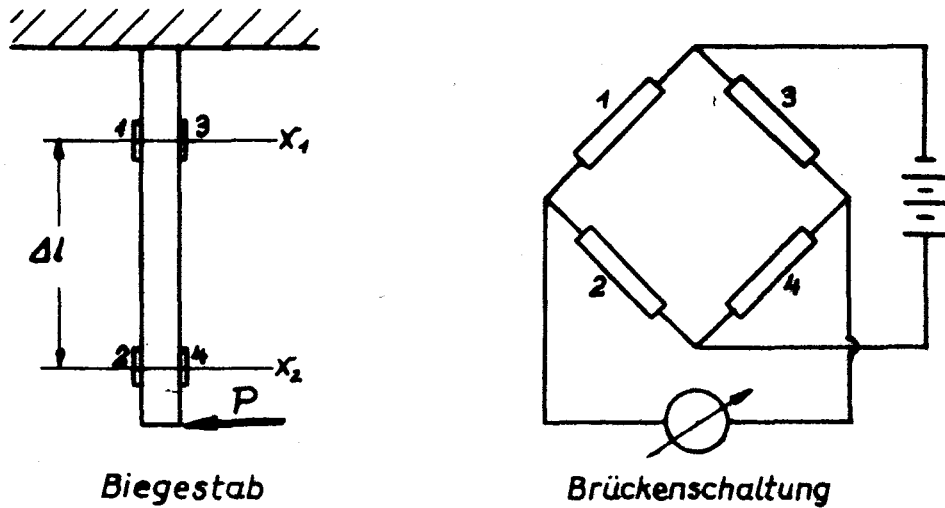
Doppelmodell am Schwert

vordere Wulstkörper

Abb. 2 Doppelmodell mit Wulstkörpern der Wulstform II
in der symmetrischen Anordnung ($d = 1.00$, $f = 1.00$)



Tiefschleppwaage



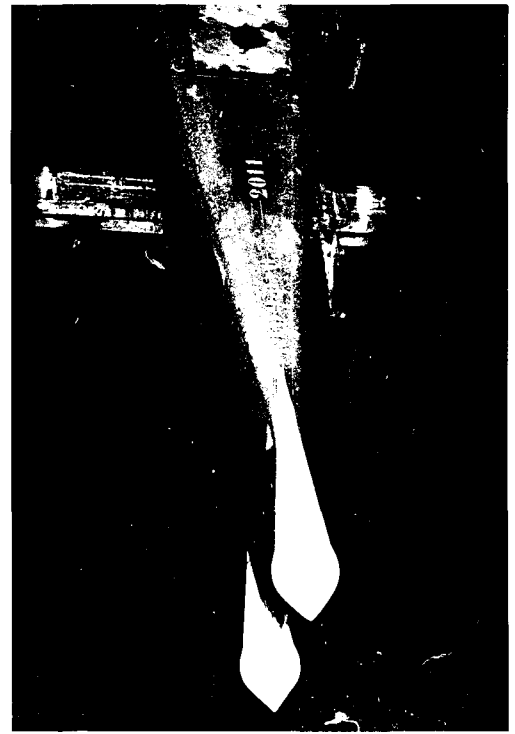
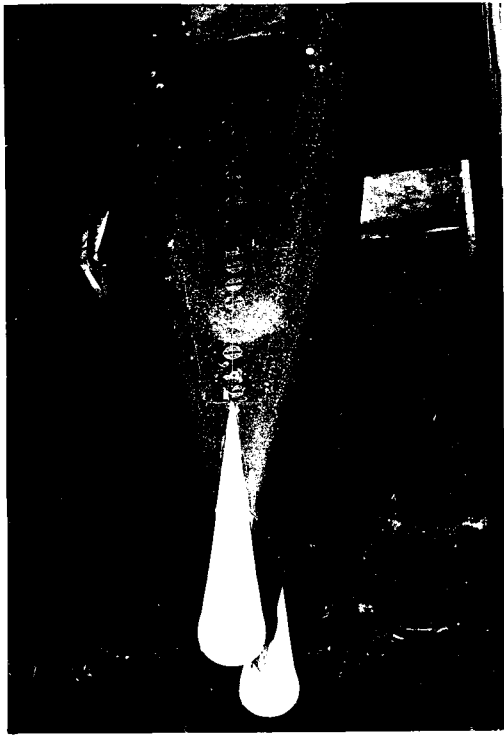
Biegestab

Brückenschaltung

$$\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{P}{E \cdot W} (x_2 - x_1)$$

- a obere Parallelogrammseite (wagenfest)
- b untere Parallelogrammseite (modellfest)
- c, d Blattfedern
- e, f Druckstäbe
- g Biegestab
- 1-4 Dehnungsmeßstreifen

Abb. 1 Tiefeschleppwaage, Biegestab und Vollbrückenschaltung der Dehnungsmeßstreifen.



Wulstform II

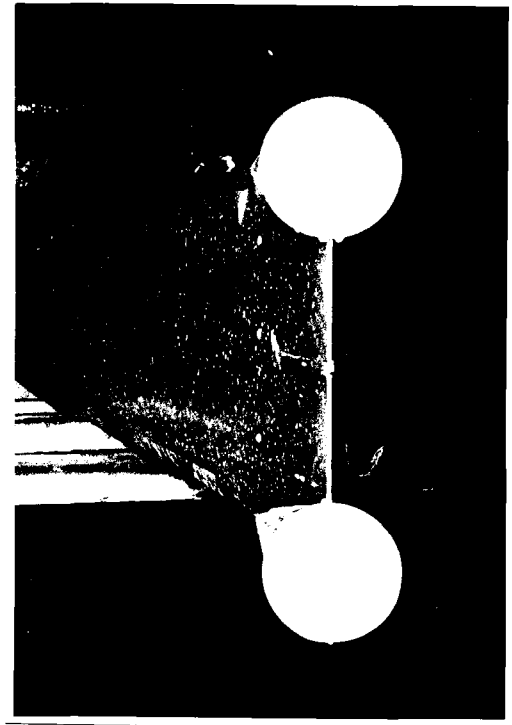
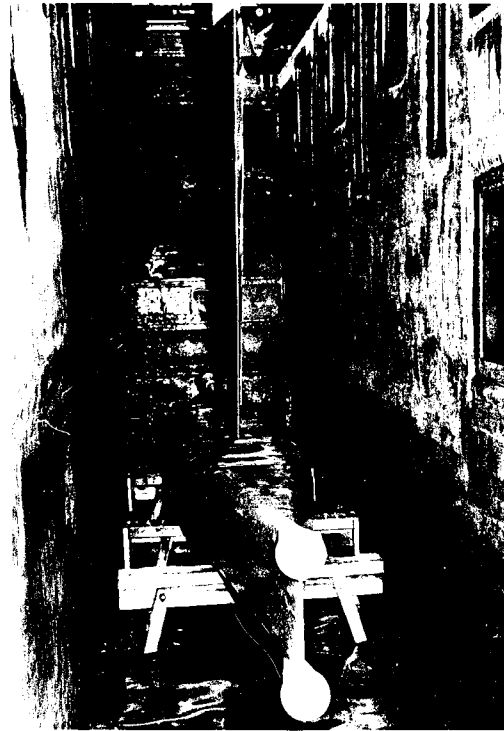
vordere Wulstkörper

hintere Wulstkörper

$$\varphi_v = 0.72$$

$$\varphi_{ges} = 0.64$$

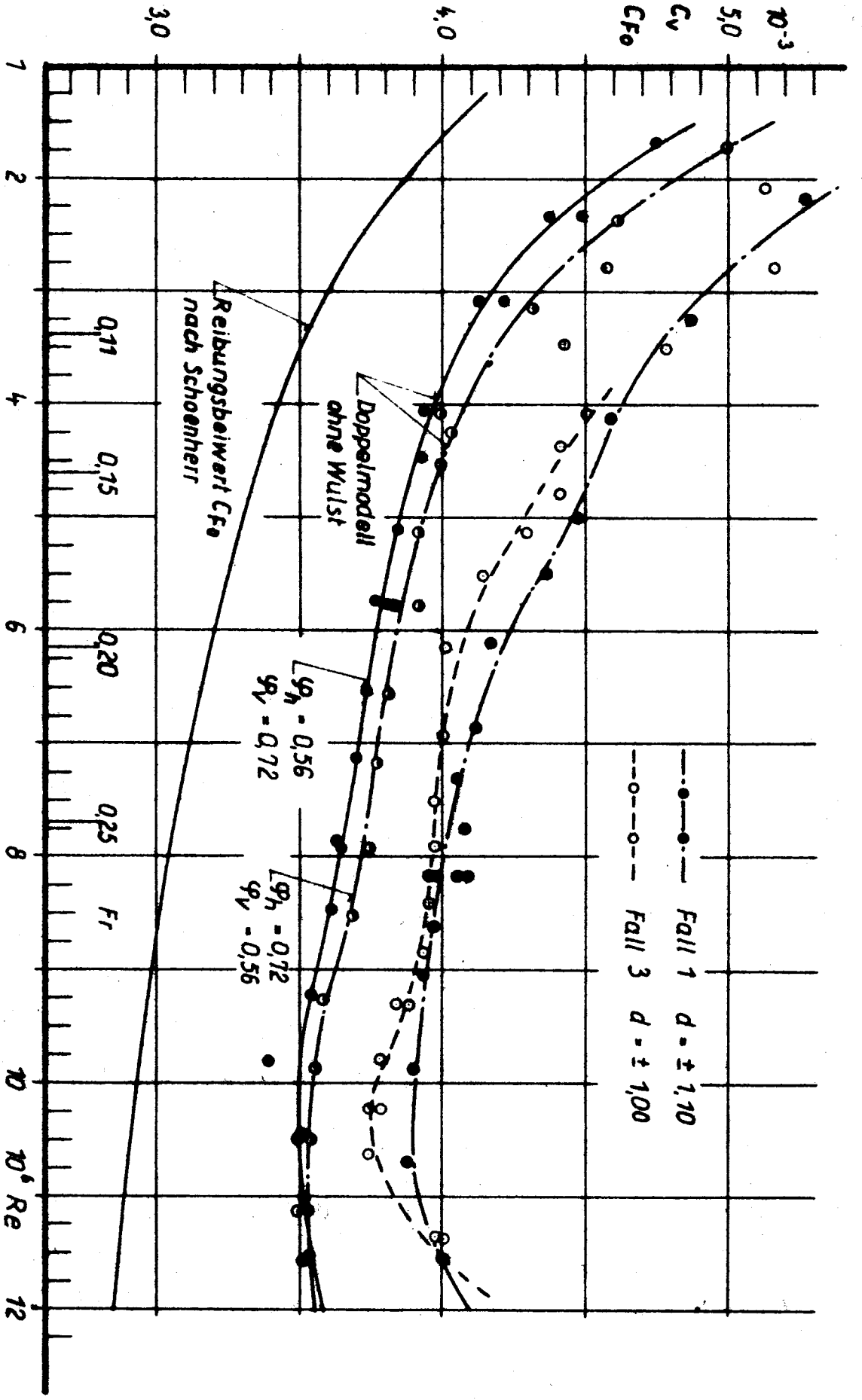
$$\varphi_h = 0.56$$



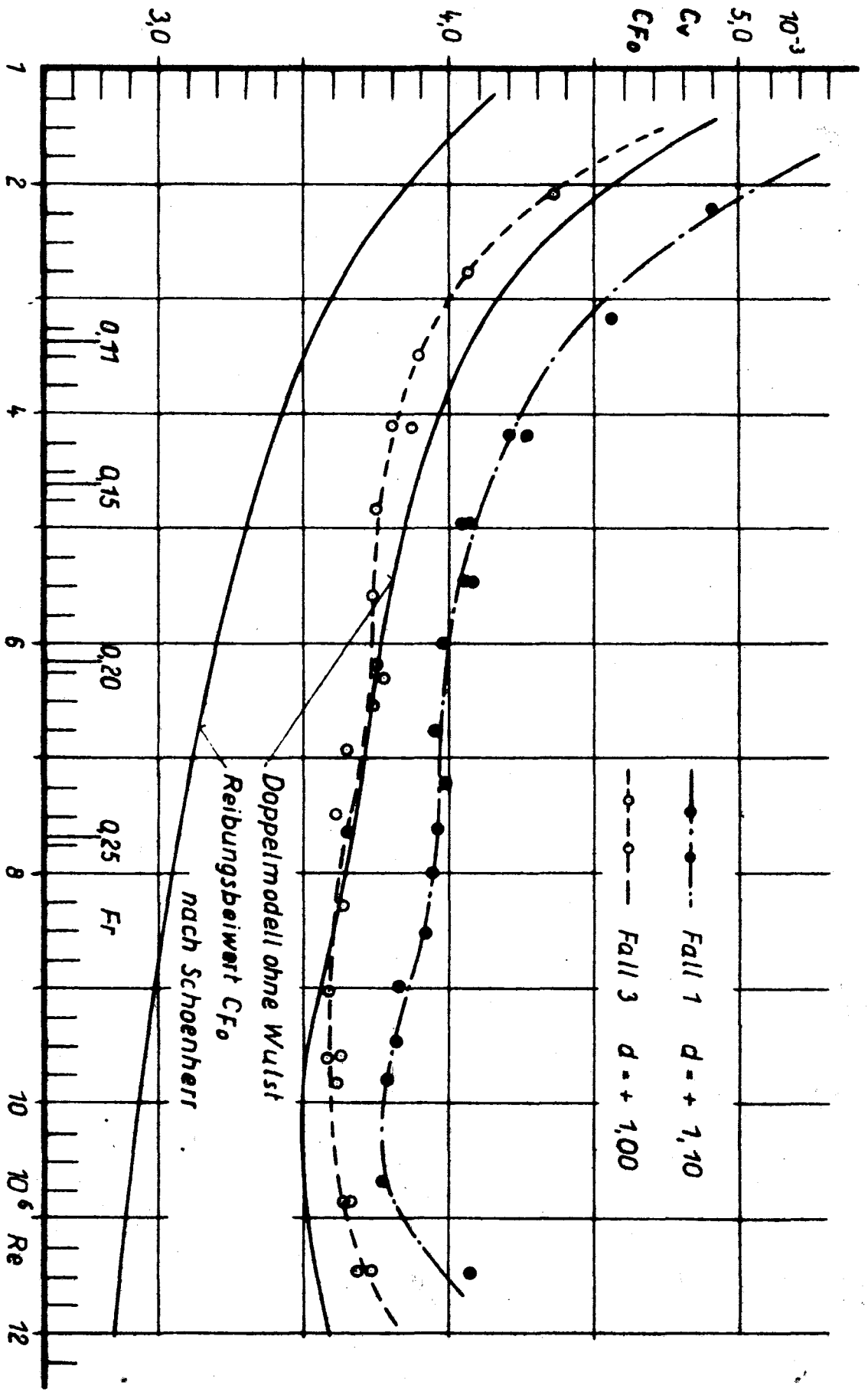
Doppelmodell am Schwert

vordere Wulstkörper

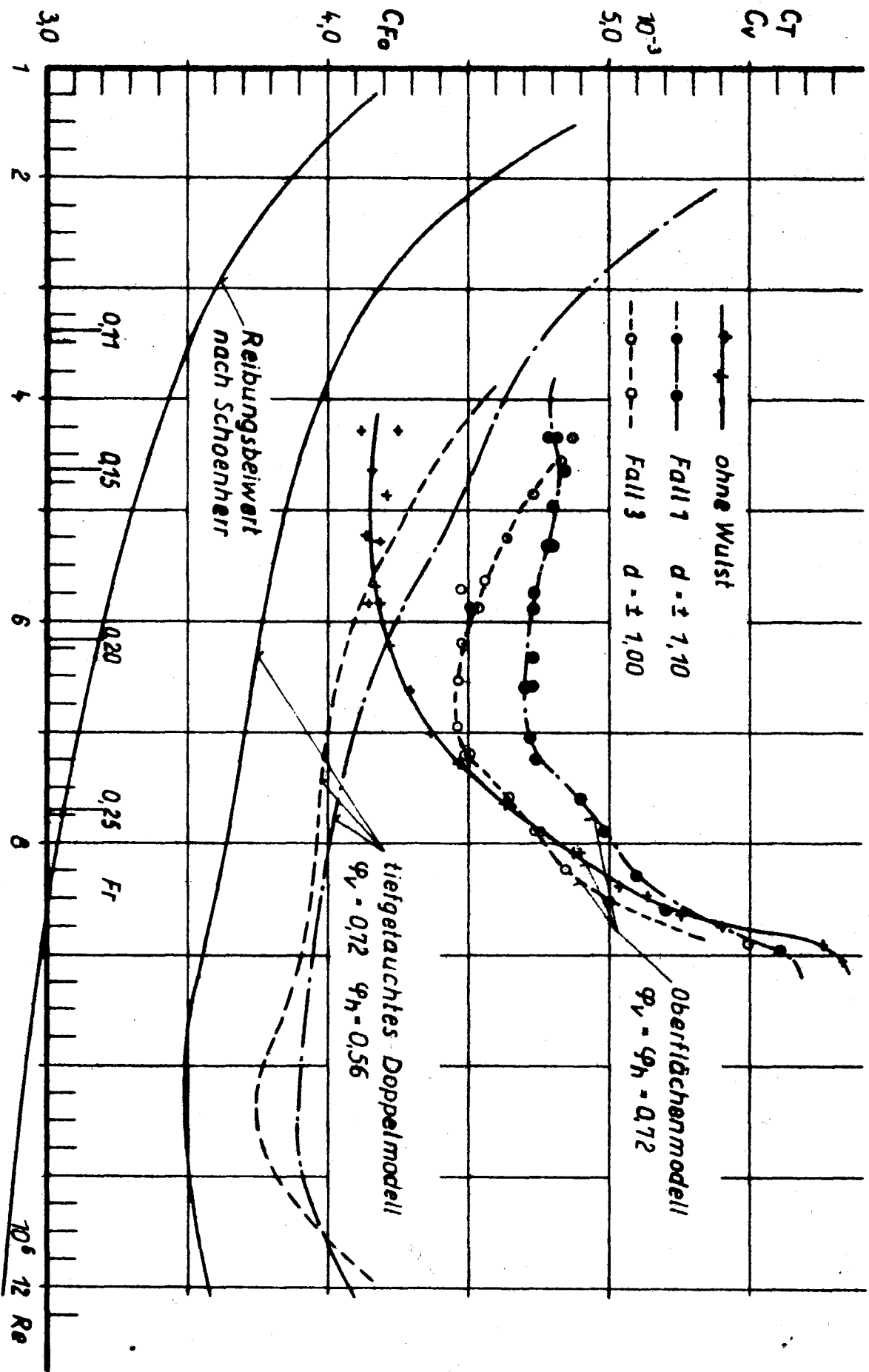
Abb. 2 Wulstform II: Doppelmodell mit Wulstkörpern in der symmetrischen Anordnung ($d = 1.00$, $f = 1.00$)



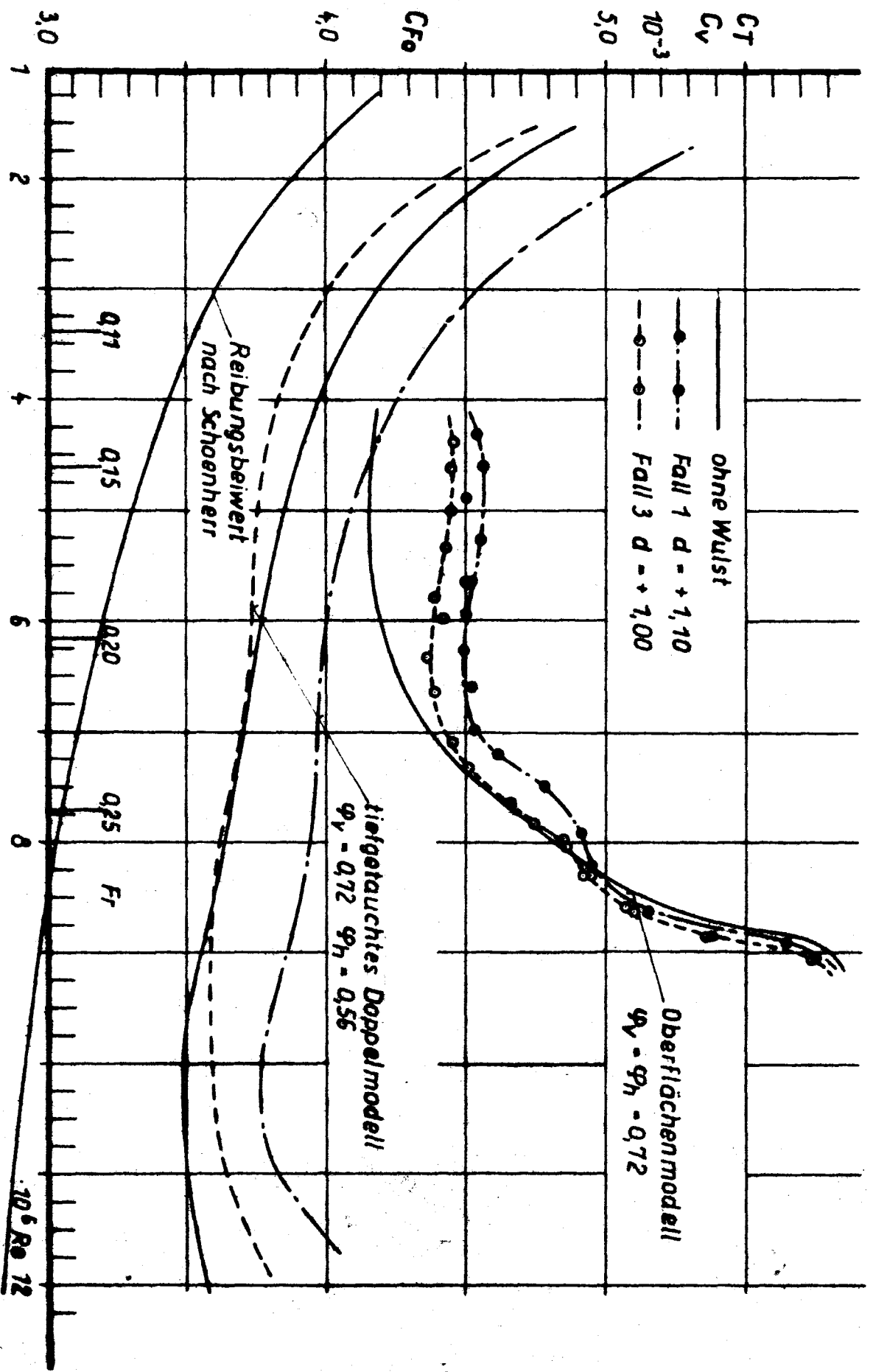
Diagr. 1 Der Gesamtwiderstandsbeiwert C_V als Funktion der Reynoldsschen Zahl eines tiefgetauchten Doppelmodells ohne und mit Wulst in symmetrischer Anordnung.



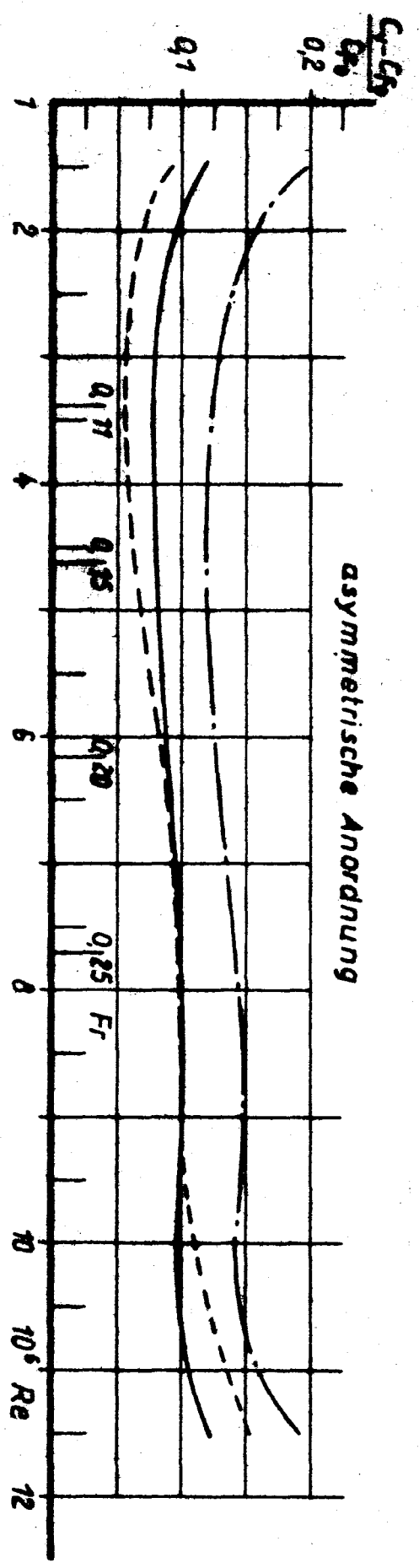
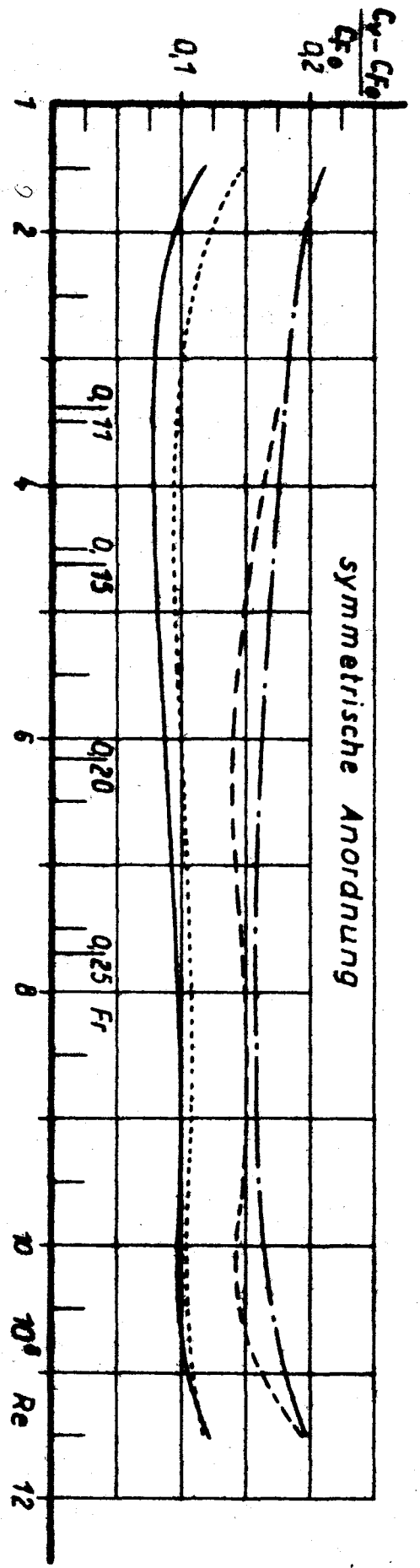
Diagr. 2 Der Gesamtwiderstandsbeiwert C_v als Funktion der Reynoldsschen Zahl eines tiefgetauchten Doppelmodells ohne und mit Wulst in asymmetrischer Anordnung.



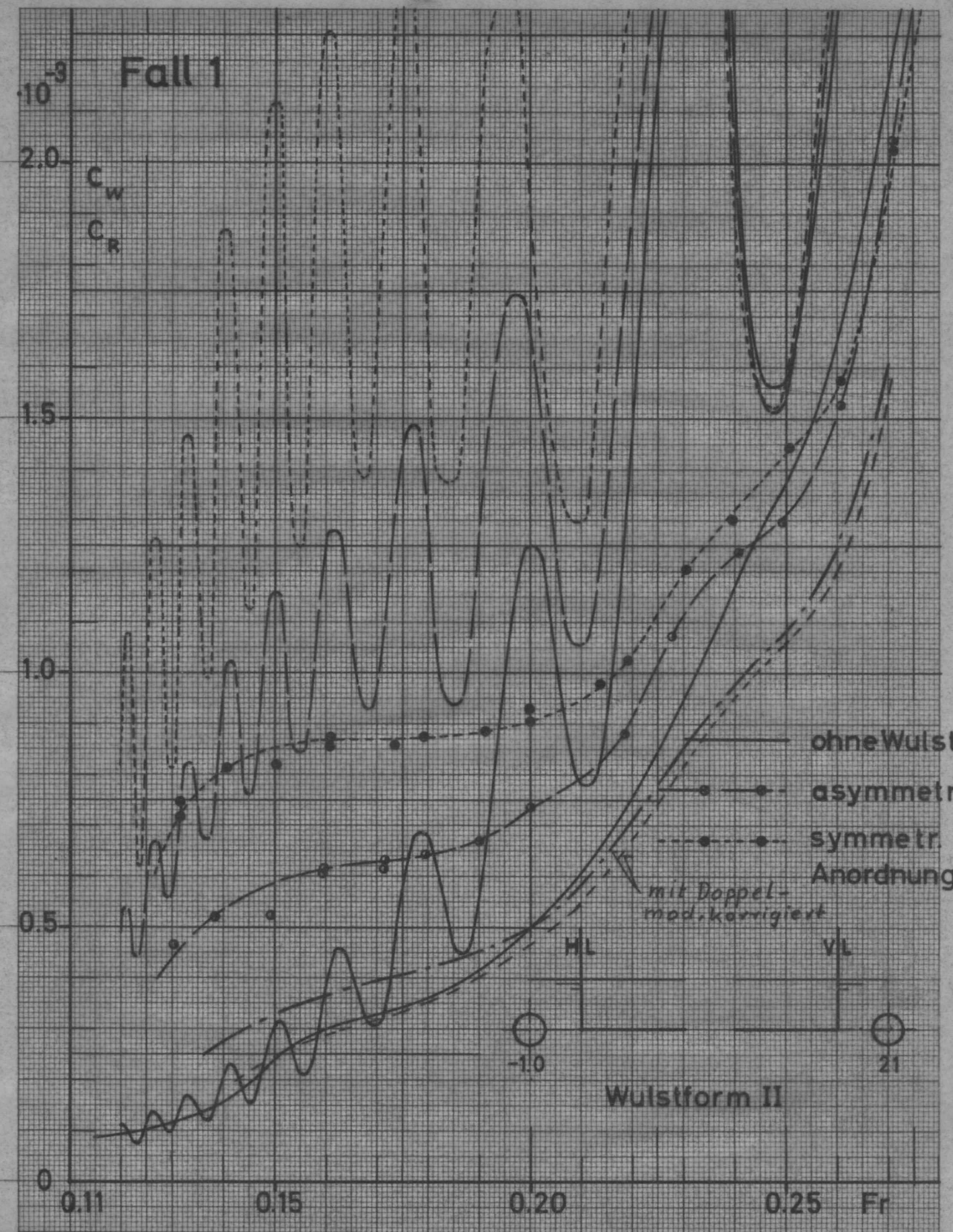
Diagr. 3 Vergleich der Gesamtwiderstandsbeiwerte mit und ohne Einfluß der freien Wasseroberfläche von Modellen ohne und mit Wulst in symmetrischer Anordnung.



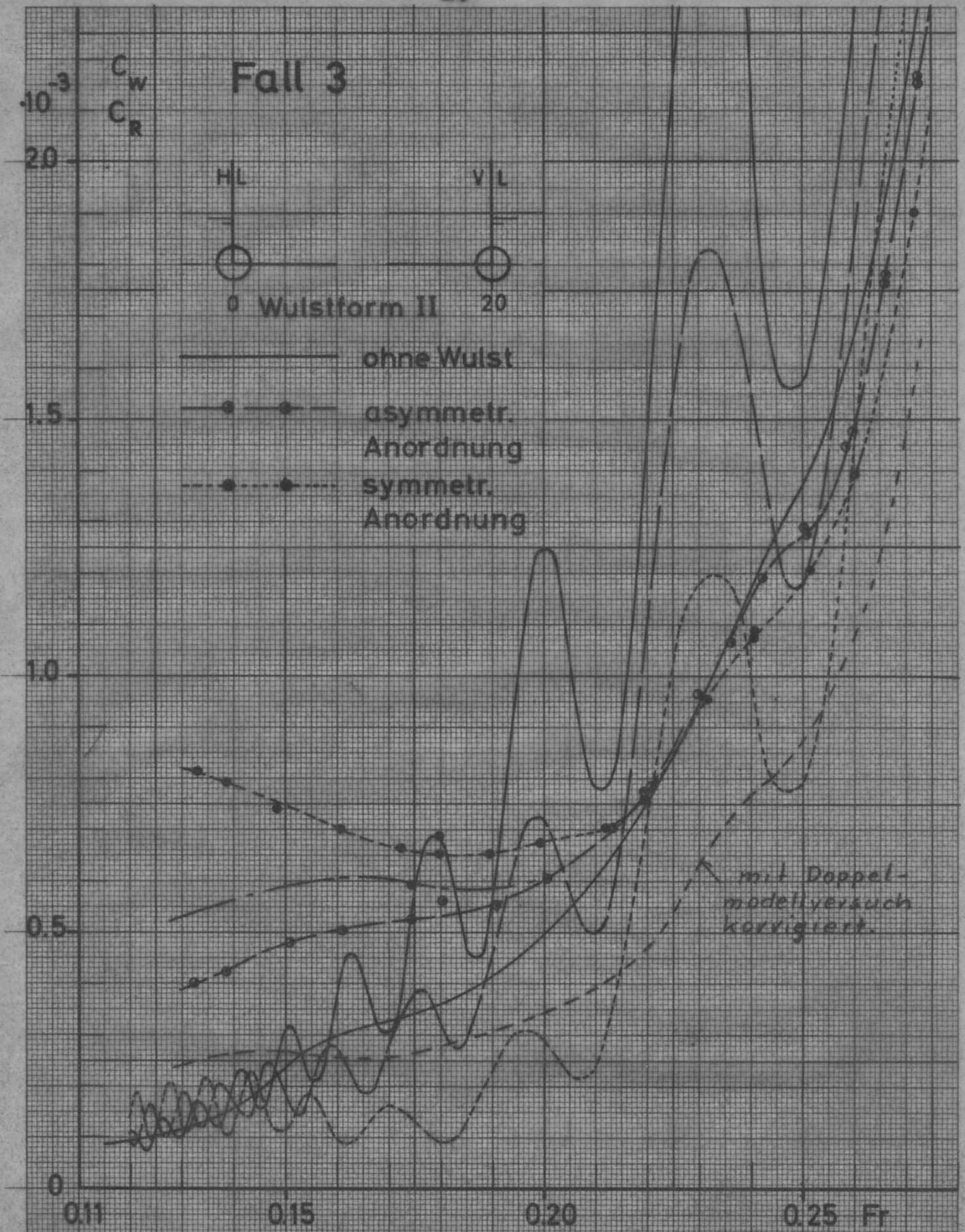
Diagr. 4 Vergleich der Gesamtwiderstandsbeiwerte mit und ohne Einfluß der freien Wasseroberfläche von Modellen ohne und mit Wulst in asymmetrischer Anordnung.



Diagr. 5 Formfaktoren $n = \frac{C_v - C_{Fs}}{C_{Fs}}$ als Funktion der Reynoldsschen Zahl für zwei Schiff-Wulst-Kombinationen.



Diagr. 14a Vergleich der theoretischen und experimentellen Resultate
 Diagr. 6



Diagr. 14c Vergleich der theoretischen und experimentellen Resultate
Diagr. 7