

285 | März 1972

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K.H. Kwik

Vergleichende Windkanalversuche mit
einem Leitkopfruder und einem
Balanceruder

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Vergleichende Windkanalversuche mit einem Leitkopfruder und einem Balanceruder

K.H. Kwik, 1. Auflage, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1972

© Technische Universität Hamburg-Harburg

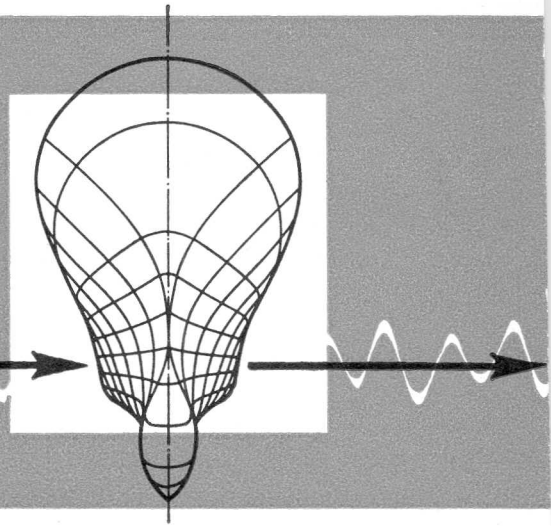
Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



Vergleichende Windkanalversuche
mit einem Leitkopfruder und
einem Balanceruder

K.H. Kwik

März 1972

Bericht Nr. 285

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 285

Prof. Dr.-Ing. habil. G. H. Kwik
Lehrstuhl für Schiffbau
Hamburg 54
1972

Vergleichende Windkanalversuche mit einem Leitkopfruder
und einem Balanceruder

K. H. Kwik

März 1972

Vergleichende Windkanalversuche mit einem Leitkopfruder und einem Balanceruder

Windkanalversuche zur Bestimmung der hydrodynamischen Charakteristiken eines Leitkopfruders und eines Balanceruders im Freistrahle sind durchgeführt worden. Es wurden Querkraft, Widerstand und Ruderschaftmoment bei verschiedenen Drift- und Ruderwinkeln sowohl bei Voraus- als auch bei Rückwärtsfahrt gemessen.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß beim Stützen mit dem Leitkopfruder ein längeres Anliegen der Strömung und damit eine größere maximale Seitenkraft erzielt werden kann als mit dem Balanceruder. Das Leitkopfruder liefert beim Stützen daher auch größere Seitenkräfte und kleinere Ruderschaftmomente als das Balanceruder in einem bestimmten Winkelbereich. In anderen Winkelbereichen zeigt das Balanceruder beim Stützen größere Seitenkräfte und kleinere Ruderschaftmomente. Beim Drehen und bei der Rückwärtsfahrt ist das Balanceruder dem Leitkopfruder hinsichtlich der Rudere Wirkung durchweg überlegen.

Comparative wind tunnel investigation on a rudder with fixed structure and an all-movable balance rudder

Wind tunnel tests estimating the free stream hydrodynamic characteristics of a rudder with fixed structure and of an all-movable balance rudder have been carried out. Cross-force, drag and rudder torque have been measured at several drift and rudder angles for both ahead and astern conditions.

The results indicate that in checking the rudder a prolonged maintenance of the unseparated flow and hence a higher maximum side force can be obtained with the flapped rudder than with the all-movable balance rudder. Therefore, in checking the flapped rudder produces larger side forces and less rudder torques than the balance rudder in a certain range of angle. In other ranges the all-movable balance rudder shows larger side forces and less rudder torques in checking. In turning and in the astern direction the balance rudder without exception is superior to the flapped rudder as regards the steering effectiveness.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Anlaß und Ziel der Arbeit	1
2. Angaben zum Rudermodell und zur Versuchseinrichtung	2
3. Durchführung der Versuche	5
4. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse	6
5. Diskussion der Ergebnisse	9
6. Zusammenfassung und Folgerungen	14
7. Schrifttum	18
8. Bezeichnungen	20

5 Tabellen

14 Bilder

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Aufmaße und Parameter des Profils IfS 64 LR 22
Tabelle 2	Kräfte und Momente für Leitkopfruder. $\Lambda_R=1; R_n=1,0 \cdot 10^6$
Tabelle 3	Kräfte und Momente für Balanceruder. $\Lambda_R=1; R_n=1,0 \cdot 10^6$
Tabelle 4	Kräfte und Momente für Leitkopfruder bei Rückwärtsfahrt. $\Lambda_R=1; R_n=0,56 \cdot 10^6$
Tabelle 5	Kräfte und Momente für Balanceruder bei Rückwärtsfahrt. $\Lambda_R=1; R_n=0,56 \cdot 10^6$

Bilderverzeichnis

Bild 1	Ruderprofil IfS 64 LR 22
Bild 2	Definitionsskizze für Kräfte und Winkel
Bild 3	Einfluß der Winkeländerungsrichtung auf die Seitenkräfte
Bild 4	Einfluß der Winkeländerungsrichtung auf die Längskräfte
Bild 5	Einfluß der Winkeländerungsrichtung auf die Rudermomente
Bild 6	Seitenkräfte für Leitkopfruder und Balanceruder
Bild 7	Längskräfte für Leitkopfruder und Balanceruder
Bild 8	Rudermomente am Leitkopfruder und Balanceruder
Bild 9	Verhältnis Querkraft zu Widerstand für Leitkopfruder und Balanceruder
Bild 10	Seitenkräfte für Leitkopfruder und Balanceruder bei Rückwärtsfahrt
Bild 11	Längskräfte für Leitkopfruder und Balanceruder bei Rückwärtsfahrt
Bild 12	Rudermomente am Leitkopfruder und Balanceruder bei Rückwärtsfahrt
Bild 13	Meßprogramm IfS 64 LR 22 Vorausfahrt
Bild 14	Meßprogramm IfS 64 LR 22 Rückwärtsfahrt

1. Anlaß und Ziel der Arbeit

Die bisher bekannten Veröffentlichungen über Leitkopfruder untersuchten das Ruder entweder nur für die Vorausfahrt oder aber nur für Fahrten ohne Drehung, d.h. für Driftwinkel Null. Es wurde daher im Rahmen der Ruderforschung am Institut für Schiffbau beschlossen, ein mit einem guten Profil versehenes Leitkopfruder für alle möglichen Fahrbedingungen zu untersuchen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse auch von Interesse, als sie in gewissem Umfang auch Auskunft über die hydrodynamischen Eigenschaften des Halbschweberuders, einer gegenwärtig oft verwendeten Ruderart, geben können.

Die vorliegenden Versuche wurden durchgeführt, um Vor- und Nachteile eines Ruders mit durchgehender fester Flosse vor dem eigentlichen Ruder gegenüber einem einteiligen Balance- ruder gleicher Fläche hinsichtlich der Ruderwirkung aufzuzeigen. Die Versuche fanden im Windkanal bei relativ hoher Reynoldszahl statt. Gemessen wurden Querkraft, Widerstand und Ruderschaftmoment der freistehenden Rudermodelle bei verschiedenen Ruder- und Driftwinkeln sowohl für die Voraus- als auch für die Rückwärtsfahrt. Die Modelle waren für beide Ruder von gleicher Form und Größe, ebenso war die Profilform gleich, so daß ein direkter Vergleich der Meß- ergebnisse möglich und auch zulässig ist. Die Ruder bekamen ein gutes IfS-Profil. Nebenbei ergab sich die Gelegenheit, die Unterschiede in der Größe der Kräfte und Momente zu zeigen, die sich, je nach dem, ob die Messungen bei steigendem oder bei abfallendem Anströmwinkel im laufenden Strahl durchgeführt werden, ergeben.

Die vorliegende Untersuchung wurde als Konsequenz des DFG- Forschungsvorhabens Th 28/18 geplant und von der DFG im Sonderforschungsbereich 98 gefördert. Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. H. Thieme für seine wertvollen Ratschläge.

2. Angaben zum Rudermodell und zur Versuchseinrichtung

Das untersuchte Leitkopfruder hatte ein IfS-Profil mit der Bezeichnung IfS 64 LR 22, das bereits in [3] beschrieben worden ist. Die Profilkontur ist durch folgende Gleichungen vollständig mathematisch definiert.

Leitkopf für $0 \leq \frac{x}{L} \leq 0,2$:

$$\begin{aligned} \pm \frac{y}{0,2L} &= \sqrt{2r_n/n} \left(\sqrt{\xi} - 4,375 \xi^2 + 5,25 \xi^3 - 1,875 \xi^4 \right) \\ &+ \left(\frac{dy}{dx} \right)_{r_n=x=0} \left(\xi - 3\xi^2 + 3\xi^3 - \xi^4 \right) \\ &+ \frac{B}{2n} \left(6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4 \right) - \frac{n}{r_B} \left(0,5\xi^2 - \xi^3 + 0,5\xi^4 \right) \end{aligned}$$

mit $\xi = \frac{x}{0,2L}$; $\sqrt{2r_n/n} = 1,13891$; $\left(\frac{dy}{dx} \right)_{r_n=x=0} = -0,61072$;
 $\frac{B}{2n} = 0,55$; $\frac{n}{r_B} = 0,24464$

Leitkopf für $0,2 \leq \frac{x}{L} < 0,4$:

$$\begin{aligned} \pm \frac{y}{0,7L} &= \left(\frac{B_S}{2S} \right)_{61TR22} \left(1 - 10\xi^3 + 15\xi^4 - 6\xi^5 \right) \\ &+ \left(\frac{B}{2S} \right)_{61TR22} \left(10\xi^3 - 15\xi^4 + 6\xi^5 \right) \\ &- \left(\frac{S}{r_B} \right)_{61TR22} \left(0,5\xi^3 - \xi^4 + 0,5\xi^5 \right) \end{aligned}$$

mit $\xi = (0,9 - \frac{x}{L}) / 0,7$; $\left(\frac{B_S}{2S} \right)_{61TR22} = 0,03143$;
 $\left(\frac{B}{2S} \right)_{61TR22} = 0,15714$; $\left(\frac{S}{r_B} \right)_{61TR22} = 0,85624$

Ruder für $0,3 \leq \frac{x}{L} \leq 0,4$:

$$\pm \frac{y}{0,1L} = \sqrt{1 - (1 - \xi)^2} \quad \text{mit} \quad \xi = 10 \frac{x}{L} - 3$$

Ruder für $0,4 \leq \frac{x}{L} \leq 1$:

$$\begin{aligned} \pm \frac{y}{0,6L} &= \frac{B_S}{2S_R} \left(1 - 10\xi^3 + 15\xi^4 - 6\xi^5 \right) \\ &+ \frac{B_R}{2S_R} \left(10\xi^3 - 15\xi^4 + 6\xi^5 \right) - \frac{S_R}{r_{BR}} \left(0,5\xi^3 - \xi^4 + 0,5\xi^5 \right) \\ &- 0,5 a_m (m-5)(m-4) \xi^3 + a_m (m-5)(m-3) \xi^4 - 0,5 a_m \\ &\cdot (m-4)(m-3) \xi^5 + a_m \xi^m \end{aligned}$$

mit $\xi = (1 - \frac{x}{L}) / 0,6$; $\frac{B_R}{2S_R} = 0,16667$; $\frac{S_R}{r_{BR}} = 6$; $\frac{B_S}{2S_R} = 0,025$;
 $m = 1000$; $a_m = -0,432 \cdot 10^{-5}$

Der Leitkopf war etwas dicker als das Ruder, das hohle Flanken hatte. Tabelle 1 gibt die Aufmaße und die wichtigsten Abmessungsverhältnisse für das Profil wieder. In Bild 1 ist das Ruderprofil maßstabsgerecht dargestellt.

Das Leitkopfrudermodell hatte einen quadratischen Gesamtumriß von 0,4 m x 0,4 m Größe; der feste Leitkopf und das bewegliche Ruder hatten je einen rechteckigen Umriß. Das Seitenverhältnis und das Trapezverhältnis betrug also jeweils eins, der Winkel zwischen der $\frac{L}{4}$ - Linie und der Ruderhochachse (sweepback-angle) null Grad. Das Verhältnis Ruderfläche (ab Drehachse) zu Gesamtruderfläche betrug 0,6; das Ruder hatte praktisch keine Balancierung. Der Spalt zwischen dem Leitkopf und dem Ruder betrug beim Modell 3 mm. Das Modell wurde aus Teakholz angefertigt; die Oberfläche war glatt lackiert. Die Ober- und Unterkante war ohne Abrundung stumpf abgeschnitten.

Als Modell für das Balanceruder diente das oben beschriebene Leitkopfruder nach Arretierung des Ruders in der Mittellage. Der Spalt wurde nicht zugeklebt. Eine frühere Untersuchung [3] hatte ergeben, daß ein Zukleben des Spaltes im vorliegenden Fall für die Vorfahrt kaum andere Werte, für die Rückwärtsfahrt ein größeres Maximum der Seitenkraft gebracht hätte.

Das hier benutzte Profil wurde anhand der Ergebnisse einer systematischen Entwicklung für Balanceruderprofile entworfen [4]. Obwohl auch eine frühere Messung bereits auf seine Überlegenheit gegenüber einem herkömmlichen Ruderprofil hindeutete, kann mit ihm noch nicht das Optimum erreicht sein: hierzu wären weitere systematische Untersuchungen an Leitkopfruderprofilen erforderlich. Für die vorliegende Untersuchung kann dies jedoch kaum als Mangel empfunden werden, da es uns hier in erster Linie darum geht, vergleichbare Ergebnisse für ein gutes zweiteiliges Ruder und ein Balanceruder gleicher Form und Größe zu erhalten.

Die Drehachse des beweglichen Teils des Leitkopfruders wurde auf 40 % der Gesamtruderlänge von vorn, d.h. an der Stelle der größten Dicke des beweglichen Ruders, festgelegt.

Die Messungen fanden im Frühsommer 1971 im Windkanal des Instituts für Schiffbau statt. Dieser turbulenzarme Kanal [5] besitzt eine feste, runde Düse von 2 m Durchmesser, an der weitere Düsen beliebiger Form wahlweise angebracht werden können, eine offene Meßstrecke von ca. 5,5 m Länge, und bei geschlossenen Außentoren eine nahezu vollständige Luft-rückführung. Für die vorliegenden Rudermessungen wurde eine runde Düse von 1,20 m Durchmesser benutzt. Das Versperrungsverhältnis bei quergestelltem Ruder betrug also 0,142. Als Waage wurde eine Vierkomponentenwaage verwendet, welche die Messung von (Gesamt-)Querkraft, (Gesamt-)Widerstand, (Gesamt-)Giermoment und Rudermoment ermöglichte. Die auf Dehnungsmeßstreifenbasis arbeitenden elektrischen Kraftmeßdosen wurden über einen Meßstellenumschalter durch einen Trägerfrequenz-Meßverstärker gespeist. Das Meßglied zur Messung des Rudermomentes war im Modell eingebaut. Die übrigen Meßglieder befanden sich außerhalb des Modells und Luftstrahls und maßen die Kräfte an der Modellhaltestange, die eine Ruderhochachse darstellte. Durch diese Stange wurden auch die Kabel für das im Modell befindliche Meßglied geführt. Die Haltestange wurde auf 20 % der Gesamtruderlänge von vorn angebracht.

3. Durchführung der Versuche

Das Modell wurde mit senkrechter Stellung der Ruderachse in Strahlmitte im Abstand von einem halben Düsendurchmesser hinter der Düsenhinterkante angeordnet. An diesem Ort war die Strömung ausgeglichen und der Staudruck bis auf Störungen unmittelbar am Strahlrand über dem Querschnitt konstant. Gemessen wurden Gesamtquerkraft C, Gesamtwiderstand D, Gesamt-Giermoment N (Moment an der Haltestange) und Rudermoment Q_R (effektives Moment an der Drehachse des eigentlichen Ruders beim Leitkopfruder) in dem Ruderwinkelbereich $-5^\circ \leq \delta_R \leq 45^\circ$ und den Driftwinkelbereichen $-50^\circ \leq \beta_R \leq 50^\circ$ (Vorausfahrt) und $-130^\circ \geq \beta_R \geq 130^\circ$ (Rückwärtsfahrt); die Intervalle waren dabei sowohl für den Ruderwinkel wie für den Driftwinkel 10° , in einigen Fällen 5° . Da Symmetrie vorausgesetzt wurde, erübrigte sich eine Messung im entsprechenden negativen Ruderwinkelbereich. Bild 2 möge zur Definition der Kräfte, Momente und Winkel dienen.

Die Versuche wurden in der Weise durchgeführt, daß bei jeweils konstanten Ruderwinkeln die Kräfte und Momente im ganzen Driftwinkelbereich durchgemessen wurden. Bei Kraftmessungen im Windkanal ist es zur Verkürzung der Meßzeit üblich, die Veränderung der Anstellwinkel im laufenden Strahl vorzunehmen. Auf diese Weise kann man aber im Bereich des kritischen Winkels, sofern das Meßobjekt einen solchen Winkel, bei dem die Strömung plötzlich abreißt, besitzt, verschiedene Werte für die Kräfte und Momente für denselben Winkel erhalten, je nachdem, ob man den Winkel von kleineren oder größeren Winkeln her einstellt. Da das Ruder in der Vorausfahrt einen ausgeprägten kritischen Winkel hat, erfolgten die Messungen hier zur Demonstrierung dieses Phänomens von kleineren auf größere Driftwinkel kommend, wie auch umgekehrt von größeren auf kleinere. Für die Rückwärtsfahrt erfolgten die Messungen nur bei Änderung des Winkels von größeren Werten auf kleinere.

In der "Voraus"-Stellung wurde das Modell bei zwei Geschwindigkeiten entsprechend den auf die Gesamtruderlänge bezogenen Reynoldszahlen von $0,8 \cdot 10^6$ und $1,0 \cdot 10^6$ angeblasen; in der Rückwärtsstellung betrug die Re-Zahl $0,56 \cdot 10^6$.

4. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

Um den Umfang dieses Berichtes in Grenzen zu halten, sind hier nicht alle Ergebnisse aufgenommen. So ist von den Meßreihen zu den beiden Reynoldszahlen in der Vorausfahrt hier nur die mit der größeren Reynoldszahl zur Auswertung und Darstellung gekommen. Auf eine Wiedergabe der mitgemessenen Gesamtgierrmomente am Leitkopfruder wurde auch verzichtet, da sie in der Praxis wenig Bedeutung haben. Ferner sind Ergebnisse einiger Meßreihen zu bestimmten Ruderwinkeln sowie bei einigen für ein Leitkopfruder weniger interessierenden Driftwinkeln fortgelassen. Die diesem Bericht beigelegten Tabellen enthalten für die Vorausfahrt außerdem nur die Ergebnisse der Messungen, bei denen der Driftwinkel von kleineren (absoluten) Werten auf größere im laufenden Strahl geändert wurde. Charakteristische Differenzen für die Kräfte und Momente bei Umkehrung der Winkeländerungsrichtung sind in den Diagrammen zu ersehen.

Für die Ruderwirkung bzw. das Steuermoment interessiert mehr die Seitenkraft Y als die Querkraft C , und für den "Zusatzwiderstand des Schiffes infolge Ruder" mehr die Längskraft X als der Widerstand D . Die Komponenten Y und X wurden aus den gemessenen Größen errechnet.

Es ist

$$Y = C \cos \beta_R + D \sin \beta_R$$

$$X = C \sin \beta_R - D \cos \beta_R$$

Umgekehrt kann man hieraus C und D erhalten:

$$C = Y \cos \beta_R + X \sin \beta_R$$

$$D = Y \sin \beta_R - X \cos \beta_R$$

In allen Fällen gilt

$$\beta_R = \varepsilon - \delta_R$$

mit

ε = Anströmwinkel des Ruders.

Für die Dimensionierung des Ruderschaftes und der Ruder-
maschine interessieren außerdem die Rudermomente Q_R beim
Leitkopfruder und N beim Balanceruder. Q_R ist auf die
Drehachse des beweglichen Teils des Leitkopfruders bezogen;
 N auf eine Achse mit 25 bzw. 30 % Rücklage von der Ruder-
vorderkante. Zur Umrechnung der Balancerudermomente dient
die Formel:

$$N_2 = N_1 - Y_R (a_1 - a_2)$$

mit $Y_R = Y \cos \delta_R - X \sin \delta_R$

$$N_1 = \text{Rudermoment um Achse 1}$$
$$N_2 = \text{Rudermoment um Achse 2}$$
$$a_1 = \text{Rücklage von Rudervorderkante für Achse 1}$$
$$a_2 = \text{Rücklage von Rudervorderkante für Achse 2}$$

Die Kräfte und Momente sind in diesem Bericht durch die
dimensionslosen Koeffizienten c_Y , c_X , c_{QR} , c_{N25} bzw. c_{N30}
angegeben. Diese Koeffizienten sind in üblicher Weise
definiert (siehe Bezeichnungen). Die Ergebnisse sind in
Tabellen- wie auch Kurvenform dargestellt.

Es wird betont, daß für das Leitkopf- und Balanceruder die
gleiche Bezugslänge und -fläche benutzt wurden, so daß
gleichen Kräften und Momenten auch gleiche Koeffizienten
entsprechen. Ferner wird noch einmal darauf hingewiesen, daß
 Y und X Kraftkomponenten normal und tangential zur Schiffs-
längsachse sind und nicht, wie in früheren Berichten, normal
und tangential zur Ruderlängsachse. Beim Leitkopfruder stel-
len Y und X die vom Leitkopf und Ruder gemeinsam hervor-
gerufenen Kräfte dar.

In den Tabellen 2 bis 5 sind die Kraft- und Momentenkoeffi-
zienten als Funktion vom Driftwinkel für $\delta_R = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ,$
 30° und 40° bei Voraus- und Rückwärtsfahrt angegeben. Der
Einfluß der Haltestange auf die Meßergebnisse wurde sorg-
fältig herausgeeicht. Eine Strahlkorrektur fand nicht statt,
da die bekannten Verfahren für die Anwendung auf kleinere
Seitenverhältnisse bei relativ großen Versperrungen noch

einer Überprüfung bedürfen. Aus diesem Grunde wurde in diesem Bericht auch davon Abstand genommen, die erhaltenen Ergebnisse mit der Theorie (für einen linearen Ansatz siehe z.B. [6]) zu vergleichen. Das Fehlen einer Strahlkorrektur dürfte jedoch den Vergleich nicht beeinträchtigen: hierfür reichen die unkorrigierten Ergebnisse völlig aus, sofern diese unter den gleichen Versuchsbedingungen (Versperrung, Windkanalturbulenz, Meßgenauigkeit usw.) gewonnen werden.

Um eine Übersicht darüber zu geben, wie sich die Winkeländerungsrichtung im Bereich des kritischen Winkels auf die Kräfte und Momente auswirkt, sind in den Bildern 3 bis 5 die Koeffizienten für beide Winkeländerungsrichtungen für das Leitkopfruder bei $\delta_R = 0^\circ, 20^\circ$ und 30° dargestellt. In den darauffolgenden Bildern werden die Charakteristiken des Leitkopfruders mit denen des Balanceruders verglichen. Es sind für die Vorfahrt die Ergebnisse dargestellt, die sich bei Änderung des Driftwinkels von kleineren absoluten Werten auf größere ergaben, und für die Rückwärtsfahrt die Ergebnisse, die bei Änderung des Winkels von größeren auf kleinere Werte erhalten wurden. In den Bildern 6 bis 8 sind für beide Ruder die Koeffizienten über dem Driftwinkel mit δ_R als Parameter aufgetragen; in den Bildern 10 bis 12 das gleiche für die Rückwärtsfahrt. In Bild 9 ist das Verhältnis Querkraft zu Widerstand, also das Reziproke der Gleitzahl, dargestellt.

5. Diskussion der Ergebnisse

In den Bildern 3, 4 und 5 ist der Einfluß der Winkeländerungsrichtung auf die Kräfte und Momente für das Leitkopfruder dargestellt. Wie aus den Bildern hervorgeht, kann dieser Einfluß beträchtlich sein. Zum Beispiel erstreckt sich die Hysterese für $\delta_R = 0^\circ$ im positiven wie auch im negativen Driftwinkelbereich von 15° bis 45° , wobei für den Seitenkraftkoeffizienten das Maximum bei Messung mit abnehmendem Winkel um ca. 37 % geringer ist als das Maximum bei Messung mit zunehmendem Winkel. In bestimmten Bereichen schließt die Hysterese auch einen Vorzeichenwechsel mit ein. Dies ist besonders bei der Ermittlung des Rudermomentendrehsinns zu beachten. Die Unterschiede der Kräfte und Momente sind darauf zurückzuführen, daß die Messung einmal mit anliegender Strömung und ein andermal bei nicht anliegender Strömung erfolgte. Mit zunehmendem Winkel wird bei anliegender Strömung das Abreißen und mit abnehmendem Winkel bei nicht anliegender Strömung das Anspringen derart hinausgezögert, daß Abreißwinkel und Anspringwinkel nicht zusammenfallen. Auf ähnliche Meßergebnisse an Tragflügeln größerer Streckung bei kleineren Reynoldszahlen [8] sei hingewiesen. Die Hysterese hat im Rudermanöver beim Stützen praktische Bedeutung, wenn das Gegenruder so schnell gelegt wird, daß die Strömung um das Ruder ablöst.

Es ist klar, daß man bei der Analyse solcher Versuchsergebnisse zu Trugschlüssen kommen kann, wenn man die Winkeländerungsrichtung nicht beachtet. Die meisten bekannten Windkanalergebnisse für Quertriebskörper beziehen sich, ohne daß es besonders erwähnt wird, auf Messungen, bei denen der Anstellwinkel von kleineren absoluten Werten auf größere geändert wurde.

In den Bildern 6, 7, 8 und 9 sind die aerodynamischen Eigenschaften des Leitkopfruders denen des Balanceruders gegenübergestellt. In diesen Bildern sind die Werte dargestellt, die sich aus den Messungen mit zunehmenden absoluten Beträgen des Driftwinkels ergaben.

Bild 6 zeigt, daß beim Drehen (Bewegungszustand, in dem Seitenkraft und Driftwinkel ungleiche Vorzeichen haben, also z.B. bei Seitenkraft nach Steuerbord und Anströmung des Schiffes von Steuerbord) das Balanceruder bei gleichen Drift- und Ruderwinkeln größere Seitenkräfte und damit auch ein höheres Steuermoment ergibt als das Leitkopfruder. Diese auch in der Praxis bekannte Tatsache findet ihre Erklärung darin, daß das eigentliche Ruder eines Leitkopfruders beim Drehen teilweise im Totwasser der festen Flosse arbeitet. Die Überlegenheit des Balanceruders gegenüber dem Leitkopfruder beim Drehen ist umso ausgeprägter, je größer der Ruderwinkel ist.

Beim Stützen (Bewegungszustand, in dem Seitenkraft und Driftwinkel gleiche Vorzeichen haben, also z.B. bei Seitenkraft nach Backbord und Anströmung des Schiffes von Steuerbord) sind zwei Fälle zu unterscheiden: Fall 1, bei dem Seitenkraft und Ruderwinkel ungleiche Vorzeichen haben (z.B. Seitenkraft nach B.B. bei B.B.-Ruder; dieser Fall tritt kurz nach dem Zurücknehmen des Ruders und fast ausschließlich bei kleineren Ruderwinkeln ein) und Fall 2, bei dem Seitenkraft und Ruderwinkel gleiche Vorzeichen haben (z.B. Seitenkraft nach B.B. bei St.B.-Ruder).

Im Fall 1 ergibt das Leitkopfruder im interessanten Driftwinkelbereich ($|\beta_R|$ etwa bis 30°) höhere Seitenkräfte als das Balanceruder. Im wichtigeren Fall 2 ist das Leitkopfruder hinsichtlich der Seitenkraft nur für $|\varepsilon| = |\beta_R + \delta_R| > 40^\circ$ dem Balanceruder überlegen. (Bei diesem Anströmwinkel beginnt hier für das Balanceruder die Strömung abzulösen; die Strömung am Leitkopfruder liegt über diesen Winkel hinaus noch an.) Im übrigen Bereich ist auch hier das Balanceruder besser als das Leitkopfruder: z.B. ergibt das Balanceruder bei $\beta_R = 0^\circ$ und $\delta_R \leq 40^\circ$, bei $\beta_R = 10^\circ$ und $\delta_R \leq 30^\circ$ und bei $\beta_R = 20^\circ$ und $\delta_R \leq 20^\circ$ höhere Seitenkräfte als das Leitkopfruder. In dem Fall, in dem Seitenkraft und Ruderwinkel das gleiche Vorzeichen haben, ist für das Leitkopfruder eine Seitenkraftzunahme mit zunehmendem Ruderwinkel (zunehmender "Wölbung")

bei konstantem Driftwinkel und anliegender Strömung nur bis $\delta_R = 30^\circ$ zu verzeichnen. Dieser Ruderwinkel stellt hier eine Grenze dar: wird er überschritten, so ist die Wölbung überzogen, wodurch die Strömung am Ruder abzulösen beginnt und die Seitenkraft rapid abnimmt. In diesem Gebiet wächst das Rudermoment nicht mehr so stark mit dem Ruderwinkel an, ja nimmt teilweise mit zunehmendem Ruderwinkel ab; vgl. Bild 8. Bei noch größeren Ruderwinkeln - wenn die Ablösung an der Saugseite des Ruders völlig ausgebildet ist, die Strömung am Leitkopf jedoch noch anliegt - ist in einem begrenzten Umfang ein weiteres Ansteigen der Seitenkraft mit dem Ruderwinkel denkbar. Der Höchstwert für den Seitenkraftkoeffizienten (er beträgt etwas über 2,0) wird - bei gesunder Strömung - bei $\delta_R \sim 15^\circ$ und $\beta_R \sim 40^\circ$ erreicht. Bild 6 läßt weiter erkennen, daß der Seitenkraftkoeffizient für das untersuchte Modell sich in keinem Bereich ohne grobe Fehler durch eine lineare Gleichung ausdrücken ließe.

Bild 7 zeigt, daß bei anliegender Strömung erst ab $\delta_R = 20^\circ$ das Balanceruder höhere Werte für die negative Längskraft ergibt als das Leitkopfruder. Bis zu diesem Ruderwinkel ist die Längskraft für beide Ruder praktisch gleich. Beim Drehen äußert sich die Längskraft als zusätzlicher Widerstand (Bereich negativen c_X), beim Stützen kann sie teilweise auch als zusätzlicher Schub wirken (Bereich positiven c_X). Das Abreißen der Strömung, das beim Balanceruder für gleiche Ruderwinkel bei kleineren Driftwinkeln stattfindet, bewirkt i.a. eine sprunghafte Vergrößerung des Widerstandes bzw. Verkleinerung des Schubes. Beim Balanceruder, von einem Ruderwinkel von ca. 25° an, bewirkt es dagegen eine sprunghafte Verminderung des Widerstandes. Von diesem Ruderwinkel an verschwindet beim Balanceruder auch das zweite Extrem, das bei kleineren Ruderwinkeln und beim Leitkopfruder im dargestellten Winkelbereich überall vorhanden ist. Es ist dies das Extrem, das bei anliegender Strömung die größte negative Längskraft anzeigt und bei positiven Ruderwinkeln auch nach positiven Driftwinkeln, d.h. in das Gebiet des Stützens, wandert.

Bild 8 deutet an, daß ein Vergleich des Rudermomentes des unbalancierten Leitkopfruders mit dem des Balanceruders mit 25 % Balancefläche vor allem beim Stützen sehr zuungunsten des letzteren ausfallen würde. Deshalb wird hier das Balanceruder mit 30 % Balancefläche für den Vergleich zugrunde gelegt. Beim Drehen ergibt so das Balanceruder bis $\delta_R = 30^\circ$ durchweg kleinere Rudermomente als das Leitkopfruder. Beim Stützen überschneiden sich die Kurven. Der Driftwinkel, von dem an das Balanceruder bei gleichem Ruderwinkel größere Rudermomente liefert, ist umso kleiner, je größer der Ruderwinkel. Er beträgt z.B. 17° bei $\delta_R = 0^\circ$, 11° bei $\delta_R = 10^\circ$ und 0° bei $\delta_R = 30^\circ$. Das Verhältnis Balancerudermoment zu Leitkopfrudermoment beträgt maximal 1,8 bei $\delta_R = 0^\circ$ (erreicht bei $\beta_R = 40^\circ$), 1,7 bei $\delta_R = 10^\circ$ (erreicht bei $\beta_R = 30^\circ$) und 1,4 bei $\delta_R = 30^\circ$ (erreicht bei $\beta_R = 10^\circ$). Wie aus dem Bild zu sehen, kann zwecks Verminderung der Rudermomente der Ruderschaft noch weiter nach hinten verlegt werden, ohne daß eine Überbalancierung befürchtet werden muß.

Aus Bild 9 geht hervor, daß das Verhältnis Querkraft zu Widerstand für das zweiteilige Ruder im allgemeinen niedriger ist als für das einteilige. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Ergebnis einer Untersuchung über Klappenruder [9]. Kleinere Werte liefert das Leitkopfruder vor allem beim Drehen. Beim Stützen sind die Werte des Leitkopfruders entweder auch kleiner oder höchstens gleich den des Balanceruders. Während der Höchstwert beim Balanceruder, der sich bei $|\epsilon| = 10^\circ$ einstellt, naturgemäß für alle Ruderwinkel konstant bleibt, nimmt er beim Leitkopfruder mit zunehmendem Ruderwinkel deutlich ab. Hätte man zwischen beiden Ruderausführungen zu wählen und würde dabei das Verhältnis Querkraft zu Widerstand als entscheidendes Kriterium herangezogen, wie es manchmal bei der Wahl von Profilen geschieht, so würde die Entscheidung leicht zuungunsten des Leitkopfruders fallen.

In den Bildern 10, 11 und 12 sind die Rückwärtseigenschaften des Leitkopfruders denen des Balanceruders gegenübergestellt.

Die Ergebnisse beziehen sich auf Messungen bei Anströmung von hinten mit abnehmendem Driftwinkel ($-130^\circ \rightarrow +180^\circ \rightarrow +130^\circ$). Kontrollmessungen bei umgekehrter Winkeländerungsrichtung hatten in diesem Fall nur unwesentliche Unterschiede ergeben.

Bild 10 zeigt, daß das Balanceruder bei Rückwärtsfahrt im interessanten Bereich für gleiche Winkel höhere Seitenkräfte ergibt als das Leitkopfruder. Dies gilt für $\beta_R = 180^\circ$ ebenso wie bei Schräganströmung für den Bereich, in dem ein Backbordruder eine nach Backbord gerichtete Seitenkraft (bzw. ein Steuerbordruder eine nach Steuerbord gerichtete Seitenkraft) hervorruft. Der Übergang zur abgerissenen Strömung erfolgt beim Leitkopfruder zwar weniger schroff, das Balanceruder behält aber auch bei abgelöster Strömung seine höheren Werte.

Bild 11 läßt erkennen, daß sich die Längskräfte für das Leitkopfruder und Balanceruder bei Rückwärtsfahrt ähnlich wie bei der Vorausfahrt in bestimmten Fällen, z.B. für $\beta_R = 180^\circ$ und $\delta_R \leq 20^\circ$, praktisch gleichen. Die Kraftspitzen und die Werte bei abgelöster Strömung liegen allerdings beim Balanceruder höher als beim Leitkopfruder. Die Längskräfte wirken bei Rückwärtsfahrt, bis auf einige seltenen Ausnahmen, als zusätzlicher Widerstand.

Bild 12 gibt Aufschluß über die Rudermomente bei Rückwärtsfahrt. Die erwartete Überbalance bei Rückwärtsfahrt bei beiden Rudern kommt durch den verhältnismäßig steilen Verlauf der Kurven für $\delta_R = 0^\circ$ bei $\beta_R = 0^\circ$ zum Ausdruck. Das Balanceruder ergibt bei mäßigen Ruderwinkeln nur wenig höhere Momente als das Leitkopfruder. Beide Ruder ergeben praktisch gleiche Maximalwerte. Interessant ist auch die Feststellung, daß die Höchstwerte bei Rückwärtsfahrt für das Balanceruder nicht größer, für das Leitkopfruder dagegen um knapp 30 % größer sind als die der Vorausfahrt.

6. Zusammenfassung und Folgerungen

Die Versuche haben folgendes ergeben:

- a. Je nachdem, ob man die Messungen bei anliegender Strömung mit zunehmendem Anstellwinkel oder bei abgerissener Strömung mit abnehmendem Anstellwinkel durchführt, kann man für denselben Anstellwinkel unterschiedliche Werte für die hydrodynamischen Kräfte und Momente am Ruder erhalten.
- b. Die für das Steuermoment maßgeblichen Seitenkräfte sind beim Drehen beim einteiligen Balanceruder durchweg größer als beim Leitkopfruder. Beim Stützen ergibt das Balanceruder ebenfalls größere Seitenkräfte, wenn Ruder- und Driftwinkel das gleiche Vorzeichen haben (also z.B. bei Backbordruder mit Anströmung des Schiffes von Backbord) und der Ruderanströmwinkel, bei welchem die Strömung um das Balanceruder abzulösen beginnt, nicht überschritten wird. Dieser Winkel beträgt beim hier untersuchten Balanceruder 40° .
- c. In allen anderen Fällen ergibt das Leitkopfruder beim Stützen größere Seitenkräfte. Mit dem Leitkopfruder wurde ein besseres Anliegen der Strömung und dadurch eine größere maximale Seitenkraft erzielt als mit dem einteiligen Balanceruder.
- d. Bei mäßigen Ruderwinkeln unterscheiden sich die Längskräfte für beide Ruder bis zur Ablösung kaum. Bei größeren Ruderwinkeln ergibt das Balanceruder größere Längskräfte als das Leitkopfruder.
- e. Das Verhältnis Querkraft zu Widerstand ist für das Leitkopfruder beim Drehen niedriger, beim Stützen höchstens genauso hoch wie für das einteilige Balanceruder. Der Höchstwert nimmt beim Leitkopfruder mit zunehmendem Ruderwinkel ab.

- f. Das Balanceruder mit 30 % Balancefläche ergibt beim Drehen fast durchweg kleinere Rudermomente als das Leitkopfruder. Beim Stützen können die Momente am Balanceruder größer sein als am Leitkopfruder.
- g. Bei Rückwärtsfahrt ergibt das Balanceruder für den interessanten Bereich, in dem ein Backbordruder eine nach Backbord gerichtete Seitenkraft bzw. ein Steuerbordruder eine nach Steuerbord gerichtete Seitenkraft erzeugt, größere Seitenkräfte als das Leitkopfruder.
- h. Für bestimmte Winkelbereiche unterscheiden sich die Längskräfte für das Leitkopf- und Balanceruder bei Rückwärtsfahrt kaum. Das Balanceruder weist höhere Maximalwerte auf.
- i. Das Rudermoment bei Rückwärtsfahrt ist für beide Ruder praktisch gleich groß.

Obwohl die hier mitgeteilten Ergebnisse sicher nicht mit allen Einzelheiten auf andere Ruder mit anderer Profilierung und Aufteilung übertragbar sind, zeigen sie doch einige wesentliche, allgemeingültige Unterschiede für die hydrodynamischen Eigenschaften eines Leitkopfruders und eines einteiligen Balanceruders auf. Als Argument für das Leitkopfruder als Steuerorgan wird oft vorgebracht, daß es mit einer kleineren bewegten Fläche gleiche oder gar größere Ruderwirkung erzielt als ein einteiliges Ruder. Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, daß das Leitkopfruder hinsichtlich der Ruderwirkung nur insofern dem einteiligen Balanceruder überlegen ist, als es beim Stützen teilweise größere Steuermomente und kleinere Ruderschaft-momente ergibt. Beim Drehen und auch zum Teil beim Stützen sowie bei Rückwärtsfahrt ist die Ruderwirkung des einteiligen Balanceruders größer als die des Leitkopfruders. Je nachdem, welchen dieser Eigenschaften in Verbindung mit sonstigen Gesichtspunkten nicht strömungstechnischer Art man größeres Gewicht beimißt, wird man sich für das eine oder das andere Ruder oder ein Zwischending entscheiden.

Die guten Eigenschaften des einteiligen Balanceruders kommen am besten beim Vollscheberuder zur Geltung. Eine Herabsetzung der Ruderschaft-momente kann, ohne eine Überbalancierung in Kauf zu nehmen, dadurch herbeigeführt werden, daß man den Ruderschaft so weit nach hinten legt, wie es die experimentell ermittelte Druckpunktslage für kleine Winkel angibt. Bei manchen guten Profilen kann damit erreicht werden, daß die maximalen Ruderschaft-momente bei Voraus- und Rückwärtsfahrt annähernd gleich groß sind. Um ähnlich große Seitenkräfte beim Stützen zu bekommen wie beim Leitkopfruder, muß (sofern eine Verbesserung der Profilierung nicht mehr möglich ist) die Ruderfläche entsprechend größer gewählt werden, was aber oft aus Platzgründen problematisch ist. Der Einwand, das Vollscheberuder bringe bei großen Dimensionen schier unauflösliche Fragen der Lagerung mit sich, sollte genauer geprüft werden. Einen oft praktizierten Kompromiß stellt das Halbscheberuder dar, bei dem die hydrodynamischen Vorteile des Vollscheberuders und die des Leitkopfruders jeweils, wenn überhaupt, nur gemildert in Erscheinung treten.

Die Ergebnisse gelten unmittelbar für die freistehenden Rudermodelle im unbegrenzten Medium. Zur Beurteilung des wirklichen Verhaltens der Ruder muß der Einfluß der Wasseroberfläche bzw. der Begrenzung durch das Schiff, des Zustroms und der Turbulenz berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Ablösungsstellen, die hier für die Ruder allein ermittelt worden sind, kann gesagt werden, daß sie sich durch das Zusammenwirken von Schiff + Ruder meistens im günstigen Sinn verschieben.

Die vorgelegten Ergebnisse zeigen die - zwar nicht ausnahmslosen - weit überwiegenden Vorzüge des einteiligen Balanceruders über das zweiteilige Ruder mit festem Leitkopf. Obwohl das zugrunde gelegte IfS-Profil in einer früheren Untersuchung [3] bereits seine Überlegenheit gegenüber einem NACA-Profil erwiesen hat, soll dennoch

eine gewisse Beeinflussung der hier vorgelegten Ergebnisse bei einer weiteren Ausfeilung der Profilform nicht ausgeschlossen werden. Aussichtsreicher für eine Leistungssteigerung erscheint aber eine Erweiterung und Ergänzung des Meßprogramms (Bild 13 und 14). Damit können die Grenzen der vorzugsweisen Anwendungsbereiche der beiden Rudertypen noch genauer beschrieben werden und andererseits wird die Anwendung der Meßergebnisse vom "Leitkopfruder" auf ein "Balanceruder mit Klappe" - voll bewegliches Klappenruder - ermöglicht. Zwar ist die grundsätzliche Überlegenheit einer solchen Ruderausführung von vornherein sicher, aber quantitative Angaben fehlen allgemein bei Rudern von qualifizierter Profilform. Die Arbeit an dieser ergänzenden Untersuchung [10] ist zur Zeit noch nicht abgeschlossen.

7. Schrifttum

- [1] Bowers, A.A.:
Wind Tunnel Investigation of the Characteristics of a Flapped Control Surface Mounted on a Simulated Submarine Hull
University of Maryland Report 259, June 1959
- [2] Flügel, G.:
Neue Ergebnisse der Ruderforschung
Hansa 1950, S. 1432 - 1440
- [3] Kwik, K.H.:
Systematische Windkanalversuche mit Schiffsrudern
Schiffstechnik 1971, S. 55 - 62
- [4] Thieme, H.:
Zur Formgebung von Schiffsrudern
Jahrbuch STG 1962, S. 381 - 422
- [5] Kux, J., Wieghardt, K.:
Der neue Windkanal des Instituts für Schiffbau
IfS-Bericht Nr. 169 (1966)
- [6] Göthert, R.:
Systematische Untersuchungen an Flügeln mit Klappen und Hilfsklappen
Jahrbuch 1940 der deutschen Luftfahrtforschung,
S. I 278 - I 307
- [7] Göthert, R., Scholkemeier:
Vierkomponentenmessungen an zwei Flügeln mit Klappen großer Tiefe
ZWB - Forschungsbericht Nr. 552/5 (1941)

- [8] Schmitz, F.W.:
Aerodynamik des Flugmodells - Tragflügel-
messungen I
Carl Lange Verlag, Duisburg, 1952
- [9] Olson, C.R.:
Effects of Various Linkage Ratios on the
Free-Stream Hydrodynamic Characteristics
of an All-Movable Flapped Rudder
DTMB-Report 991, Sept. 1955
- [10] Kwik, K.H., Thieme, H.:
Ergänzende Windkanalversuche mit dem Ruder
vom Profil IfS 64 LR 22 und Anwendung als
Leitkopfruder sowie als Balanceruder mit
und ohne Wölbungsklappe für Geradeausfahrt
und Drehung
IfS-Arbeitsunterlage A.163 (ab 1972)

8. Bezeichnungen

A_R	Gesamtruderfläche
B	maximale Profildicke bzw. maximale Dicke des Leitkopfes
B_R	maximale Dicke des beweglichen Ruders beim Leitkopfruder
B_s	Profilhinterkantendicke
C	Querkraft; positiv nach links, in Anströmrichtung gesehen
$c_C = \frac{C}{\rho/2 v^2 A_R}$	Querkraftkoeffizient
$c_D = \frac{D}{\rho/2 v^2 A_R}$	Widerstandskoeffizient
$c_{N..} = \frac{N..}{\rho/2 v^2 A_R L}$	Koeffizient für das Giermoment. Die zweistellige Zahl hinter dem N gibt die Rücklage der Momentenbezugsachse in % an
$c_{QR} = \frac{Q_R}{\rho/2 v^2 A_R L}$	Koeffizient für das Ruderschaftmoment
$c_X = \frac{X}{\rho/2 v^2 A_R}$	Längskraftkoeffizient
$c_Y = \frac{Y}{\rho/2 v^2 A_R}$	Seitenkraftkoeffizient
D	Widerstand; positiv in Anströmrichtung
d_o	Breite des Spaltes in der Mittellinie beim Leitkopfruderprofil

g_s	Länge des geraden Teils am Profilschwanz
L	Gesamtruderlänge
L_{FO}	Länge des Leitkopfes in der Mittellinie
L_R	Länge des beweglichen Ruders beim Leitkopfruder
N	Giermoment; positiv rechtsdrehend (von oben gesehen)
n	Länge des dickenveränderlichen Teils an der Profilnase bzw. an der Nase des Leitkopfes
n_R	Länge des dickenveränderlichen Teils an der Nase des beweglichen Ruders beim Leitkopfruder
Q_R	Ruderschaft-moment; positiv rechtsdrehend (von oben gesehen)
$R_n = \frac{vL}{\nu}$	Reynoldszahl
r_B	Krümmungsradius der Profilkontur an der maximalen Dicke bzw. an der maximalen Dicke des Leitkopfes
r_{BR}	Krümmungsradius der Profilkontur an der maximalen Dicke des beweglichen Ruders beim Leitkopfruder
r_n	Profil- bzw. Leitkopfnasenradius
r_{nR}	Nasenradius des beweglichen Ruders beim Leitkopfruder
s	Länge des dickenveränderlichen Teils am Profilschwanz
s_R	Länge des dickenveränderlichen Teils am Schwanz des beweglichen Ruders beim Leitkopfruder
v	Anströmgeschwindigkeit

X	Längskraft; positiv nach vorn
Y	Seitenkraft; positiv nach Steuerbord
x,y	rechtwinkliges Koordinatensystem zur Bestimmung der Profilkontur. Nullpunkt in der Profilnase. x in Profillängsrichtung, y quer dazu.
β_R	Driftwinkel am Ruder. Es ist der kleinere Winkel, den die Anströmungsgegenrichtung mit der Heck-Bug-Richtung des Schiffes einschließt. Positiv bei Backbordanströmung des Schiffes.
δ_R	Ruderwinkel; Backbordlage positiv
ε	Ruderanströmwinkel. Er ist der kleinere Winkel, den die Anströmungsgegenrichtung mit der Schwanz-Nase-Richtung des Ruders einschließt. Positiv bei Backbordanströmung des Ruders.
Λ_R	Seitenverhältnis für das Gesamtruder
ν	kinematische Zähigkeit des Strömungsmediums
ρ	Dichte des Strömungsmediums

Tabelle 1

Ruderprofil IfS 64 LR 22 - Profilaufmaße und Profilparameter

Profilaufmaße

Profilparameter

$\frac{x}{L}$	$\frac{y}{L}$
Leitkopf :	
0	0
0.005	0.0330
0.01	0.0448
0.02	0.0599
0.04	0.0776
0.06	0.0886
0.08	0.0960
0.12	0.1048
0.16	0.1089
0.20	0.1100
0.25	0.1085
0.30	0.1041
0.35	0.0972
Ruder :	
0.30	0
0.31	0.0436
0.32	0.0600
0.34	0.0800
0.36	0.0917
0.38	0.0980
0.40	0.1000
0.43	0.0987
0.46	0.0953
0.52	0.0843
0.58	0.0700
0.64	0.0551
0.70	0.0413
0.76	0.0301
0.82	0.0220
0.88	0.0173
0.94	0.0153
1.00	0.0150

B/L	0.22
B_R/L	0.20
B_s/L	0.03
B_s/B	0.13636
n/L	0.2
n_R/L	0.1
s_R/L	0.6
g_s/L	0
L_{FO}/L	0.2925
d_0/L	0.0075
L_R/L	0.7
r_n/L	$268(B/L)^2 = 0.1297$
r_{nR}/L	$2.0694(B/L)^2 = 0.1$
L/r_B	$5.56 B/L = 1.2232$
L/r_{BR}	$45.45 B/L = 10$
$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{r_n=x=0}$	$-2.776 B/L = -0.6107$
$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=L}$	0
$\left(\frac{d^2y}{dx^2} L\right)_{r_n=x=0}$	$1.183 B/L = 0.260$
$\left(\frac{d^2y}{dx^2} L\right)_{x=L}$	0
$\int_0^1 (y/L) d(x/L)$	$\approx 0.309 B/L = 0.068$

Tabelle 2

Kräfte und Momente am Leitkopfruder IfS 64 LR 22

$$\Lambda_R = 1 ; \quad R_n = 1,0 \cdot 10^6$$

$\delta_R = 0^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-40	.375	-1.549	.152
-35	.287	-1.360	.129
-30	.211	-1.144	.103
-25	.144	-.917	.077
-20	.084	-.717	.055
-15	.033	-.505	.033
-10	-.002	-.324	.017
-5	-.024	-.148	.006
0	-.034	.000	.000
5	-.032	.156	-.012
10	-.023	.340	-.024
15	.003	.531	-.040
20	.038	.746	-.060
25	.083	.966	-.083
30	.141	1.196	-.106
35	.209	1.422	-.133
40	.286	1.614	-.149
45	-.006	1.001	-.131

$\delta_R = 10^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-40	.034	-.759	.101
-30	.197	-.718	.045
-20	.058	-.343	.003
-10	-.034	-.015	-.020
0	-.086	.303	-.043
10	-.096	.687	-.078
20	-.064	1.132	-.119
30	.027	1.591	-.160
40	.181	1.920	-.183
45	.281	2.061	-.199

$\delta_R = 20^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-40	-.006	-.494	.073
-30	.117	-.378	-.003
-20	—	—	-.040
-10	-.136	.219	-.066
0	-.211	.546	-.108
10	-.257	1.020	-.144
20	-.247	1.484	-.176
30	-.137	1.855	-.195
40	.018	2.081	-.214
45	-.192	1.060	-.155

$\delta_R = 30^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-40	-.070	-.240	.058
-30	-.013	-.110	-.044
-20	-.149	.080	-.092
-10	-.261	.371	-.109
0	-.380	.771	-.160
10	-.477	1.291	-.191
20	-.461	1.736	-.207
30	-.180	1.595	-.199
40	-.293	1.000	-.160

$\delta_R = 40^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-40	-.131	-.131	.045
-30	-.181	-.063	-.021
-20	-.247	.126	-.105
-10	-.389	.457	-.137
0	-.517	.817	-.176
10	-.494	1.120	-.187
20	-.371	1.335	—
30	-.244	1.422	-.183
40	-.369	.929	-.160

Tabelle 3

Kräfte und Momente am Balanceruder IfS 64 LR 22

$$\Lambda_R = 1 ; \quad R_n = 1,0 \cdot 10^6$$

$\delta_R = 0^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-40	.375	-1.549	.197
-35	.287	-1.360	.164
-30	.211	-1.144	.121
-25	.144	-.917	.082
-20	.084	-.717	.053
-15	.033	-.505	.021
-10	-.002	-.324	.012
-5	-.024	-.148	.005
0	-.034	.000	.000
5	-.032	.156	-.010
10	-.023	.340	-.017
15	.003	.531	-.050
20	.038	.746	-.072
25	.083	.966	-.121
30	.141	1.196	-.166
35	.209	1.422	-.221
40	.286	1.614	-.268
45	-.006	1.001	-.227

$\delta_R = 10^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-50	.638	-1.460	.197
-45	.519	-1.289	.164
-40	.406	-1.090	.121
-35	.301	-.878	.082
-30	.207	-.691	.053
-25	.121	-.492	.021
-20	.054	-.319	.012
-15	.003	-.150	.005
-10	-.034	-.006	.000
-5	-.058	.148	-.010
0	-.082	.331	-.017
5	-.090	.524	-.050
10	-.092	.741	-.072
15	-.086	.966	-.121
20	-.068	1.202	-.166
25	-.041	1.436	-.221
30	.001	1.639	-.268
35	-.179	.984	-.227

$\delta_R = 20^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-60	.882	-1.327	.197
-55	.735	-1.180	.164
-50	.589	-1.003	.121
-45	.449	-.813	.082
-40	.324	-.645	.053
-35	.204	-.463	.021
-30	.108	-.305	.012
-25	.029	-.147	.005
-20	-.032	-.012	.000
-15	-.083	.136	-.010
-10	-.138	.312	-.017
-5	-.179	.500	-.050
0	-.219	.714	-.072
5	-.253	.936	-.121
10	-.276	1.172	-.166
15	-.290	1.408	-.221
20	-.283	1.614	-.268
25	-.347	.938	-.227

$\delta_R = 30^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-70	1.099	-1.154	.197
-65	.929	-1.034	.164
-60	.754	-.885	.121
-55	.583	-.723	.082
-50	.431	-.579	.053
-45	.282	-.421	.021
-40	.160	-.281	.012
-35	.054	-.140	.005
-30	-.030	-.017	.000
-25	-.105	.119	-.010
-20	-.190	.283	-.017
-15	-.263	.461	-.050
-10	-.340	.665	-.072
-5	-.411	.878	-.121
0	-.475	1.106	-.166
5	-.530	1.336	-.221
10	-.559	1.541	-.268
15	-.505	.864	-.227

(Fortsetzung nächste Seite)

Fortsetzung Tabelle 3

$\delta_R = 40^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-80	1.282	-.946	.197
-75	1.094	-.857	.164
-70	.897	-.741	.121
-65	.700	-.610	.082
-60	.525	-.495	.053
-55	.350	-.366	.021
-50	.206	-.249	.012
-45	.077	-.129	.005
-40	-.026	-.022	.000
-35	-.124	.099	-.010
-30	-.237	.246	-.017
-25	-.339	.409	-.050
-20	-.450	.596	-.072
-15	-.558	.793	-.121
-10	-.660	1.007	-.166
-5	-.754	1.223	-.221
0	-.819	1.420	-.268
5	-.647	.763	-.227

Tabelle 4

Kräfte und Momente an Leitkopfruder IfS 64 LR 22
 bei Rückwärtsfahrt

$$\Lambda_R = 1 ; \quad R_n = 0,56 \cdot 10^6$$

$\delta_R = 0^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-140	.111	-.856	.206
-150	.073	-1.019	.269
-160	.082	-.701	.216
-170	.066	-.275	.116
180	.058	-.000	.000
170	.056	.257	-.126
160	.039	.591	-.217
150	.059	.968	-.264
140	.098	.821	-.212

$\delta_R = 10^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-140	.226	-.832	.210
-150	.200	-.770	.200
-160	.217	-.803	.231
-170	.149	-.501	.200
180	.107	-.161	.109
170	.060	.105	-.008
160	.034	.452	-.139
150	-.045	.799	-.233
140	-.103	1.069	-.291

$\delta_R = 20^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-140	.331	-.753	.207
-150	.326	-.710	.215
-160	.295	-.611	.193
-170	.261	-.616	.217
180	.303	-.513	.206
170	.172	-.118	.099
160	.086	.171	-.010
150	-.022	.522	-.139
140	-.182	.944	-.258

$\delta_R = 30^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-140	.443	-.640	.196
-150	.433	-.591	.201
-160	.369	-.400	.191
-170	.344	-.376	.187
180	.371	-.483	.228
170	.385	-.378	.191
160	.198	.001	.087
150	.067	.252	-.027
140	-.143	.605	-.146

$\delta_R = 40^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{QR}
-140	.536	-.529	.186
-150	.514	-.470	.196
-160	.473	-.284	.193
-170	.464	-.386	.198
180	.486	-.472	.208
170	.527	-.493	.231
160	.442	-.318	.185
150	.202	.050	.076
140	.019	.329	-.041

Tabelle 5

Kräfte und Momente am Balanceruder IfS 64 LR 22
bei Rückwärtsfahrt

$$\Lambda_R = 1 ; \quad R_n = 0,56 \cdot 10^6$$

$\delta_R = 0^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-140	.111	-.856	.196
-150	.073	-1.019	.228
-160	.082	-.701	.195
-170	.066	-.275	.136
180	.058	-.000	.000
170	.056	.257	-.136
160	.039	.591	-.240
150	.059	.968	-.268
140	.098	.821	-.226

$\delta_R = 10^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-150	.258	-.824	.196
-160	.249	-.991	.228
-170	.203	-.676	.195
180	.113	-.259	.136
170	.057	.010	.000
160	.011	.263	-.136
150	-.065	.589	-.240
140	-.110	.963	-.268
130	-.046	.825	-.226

$\delta_R = 20^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-160	.397	-.766	.196
-170	.417	-.932	.228
180	.317	-.631	.195
170	.156	-.236	.136
160	.055	.020	.000
150	-.035	.260	-.136
140	-.166	.569	-.240
130	-.275	.930	-.268
120	-.188	.805	-.226

$\delta_R = 30^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
-170	.525	-.686	.196
180	.573	-.846	.228
170	.422	-.566	.195
160	.195	-.205	.136
150	.050	.029	.000
140	-.080	.250	-.136
130	-.262	.531	-.240
120	-.433	.868	-.268
110	-.325	.760	-.226

$\delta_R = 40^\circ$			
$\beta_R [^\circ]$	c_X	c_Y	c_{N30}
180	.636	-.584	.196
170	.711	-.734	.228
160	.514	-.484	.195
150	.228	-.168	.136
140	.044	.037	.000
130	-.122	.233	-.136
120	-.350	.478	-.240
110	-.577	.779	-.268
100	-.452	.692	-.226

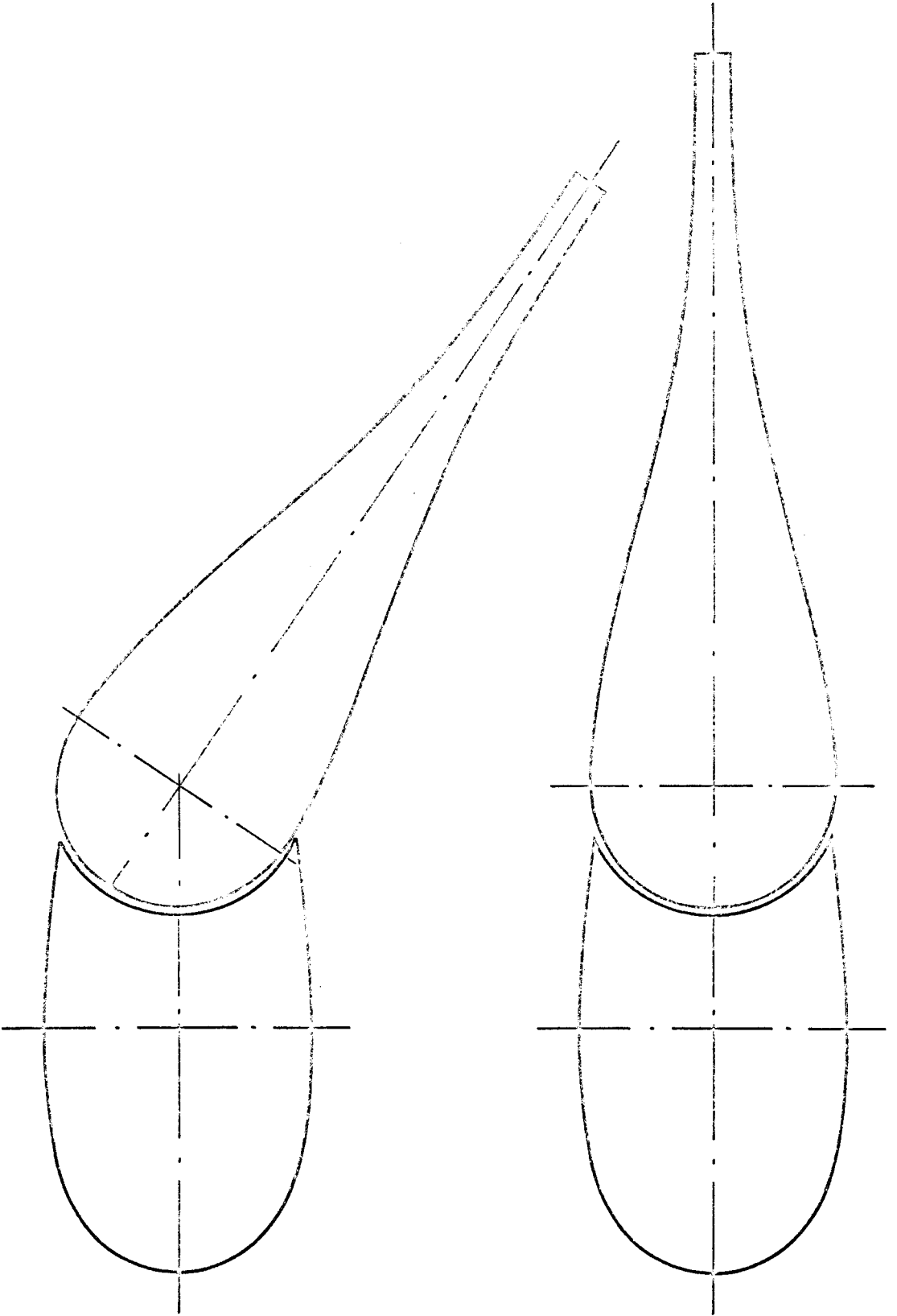


Bild 1 :

Ruderprofil JFS 64LR 22

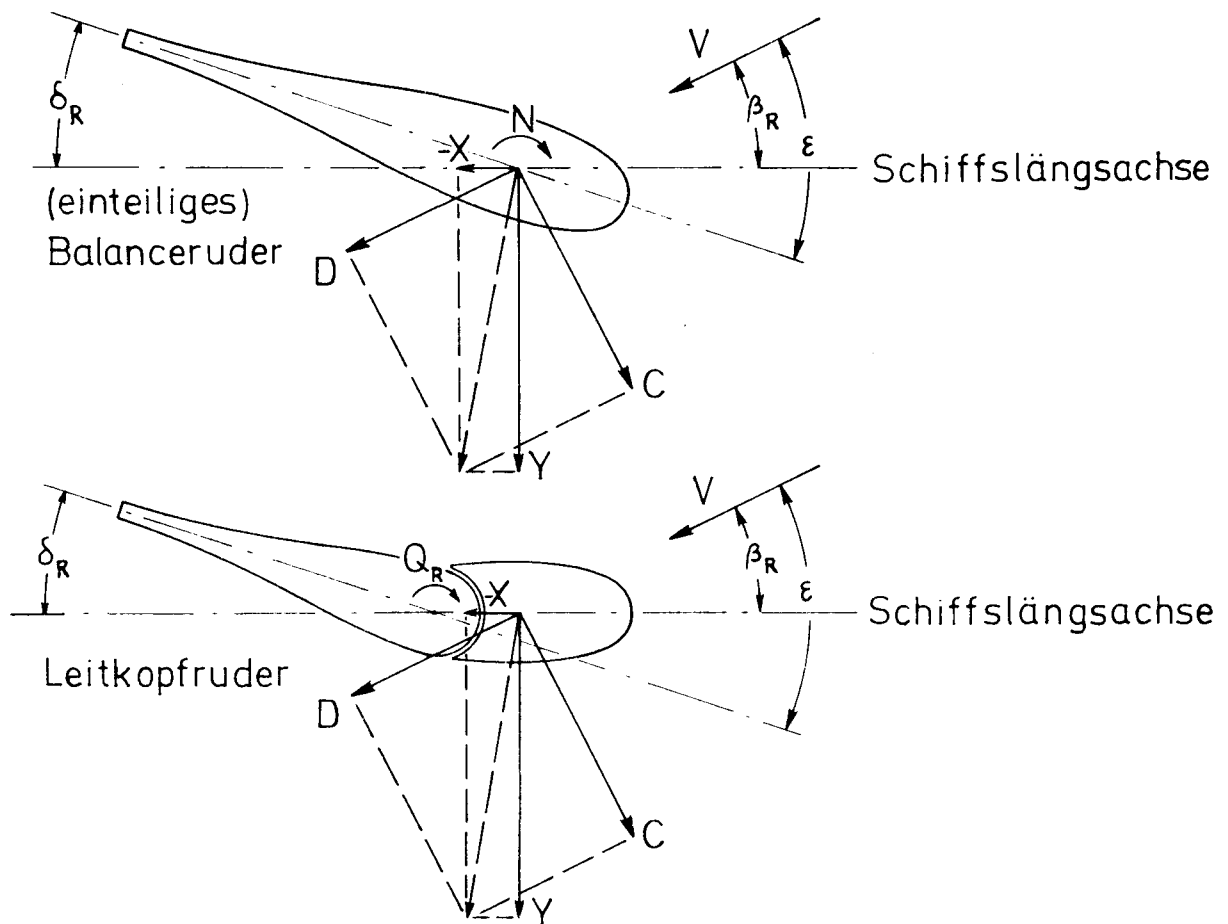


Bild 2:

Definitionsskizze für Kräfte, Momente und Winkel

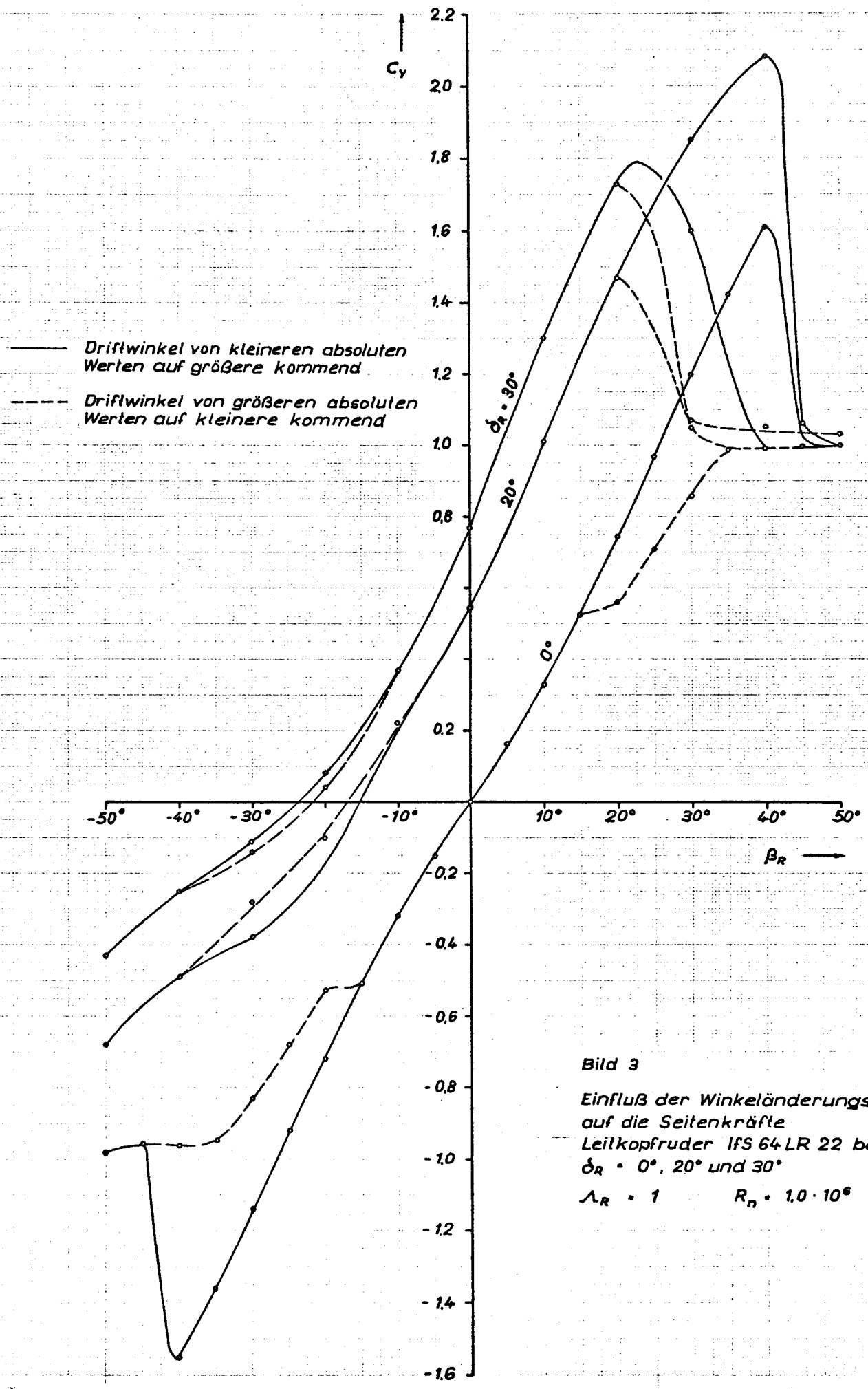


Bild 3
 Einfluß der Winkeländerungsrichtung
 auf die Seitenkräfte
 Leitkopfruder IFS 64LR 22 bei
 $\delta_R = 0^\circ, 20^\circ$ und 30°
 $\Lambda_R = 1$ $R_n = 1,0 \cdot 10^6$

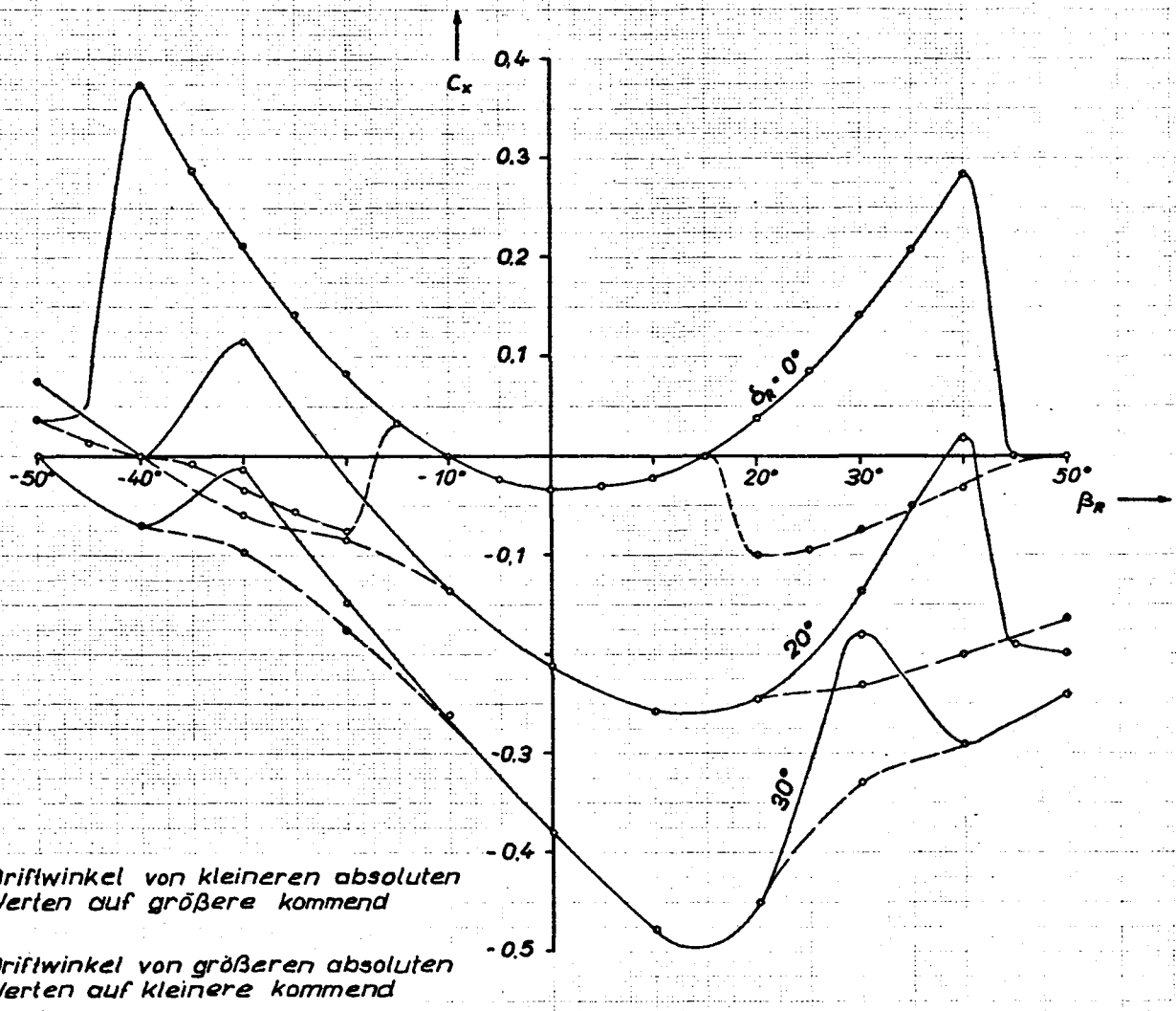
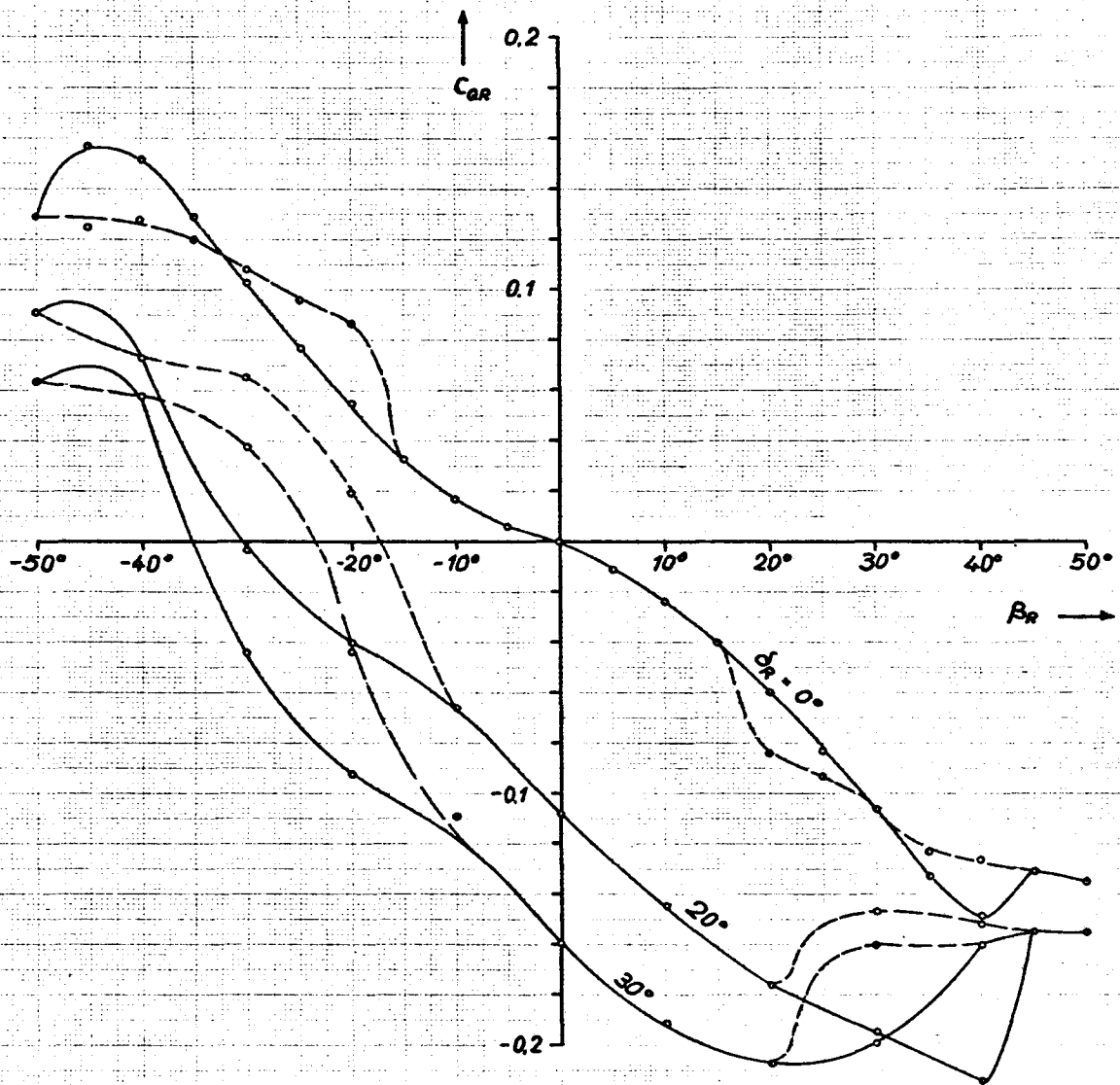


Bild 4
 Einfluß der Winkeländerungsrichtung
 auf die Längskräfte
 Leitkopfruder IFS 64 LR 22 bei
 $\delta_R = 0^\circ, 20^\circ$ und 30°
 $\Lambda_R = 1$ $R_n = 1.0 \cdot 10^6$



— Driftwinkel von kleineren absoluten Werten auf größere kommend
 - - - Driftwinkel von größeren absoluten Werten auf kleinere kommend

Bild 5

Einfluß der Winkeländerungsrichtung auf die Rudermomente.

Leitkopfruder IFS 64 LR 22 bei $\delta_R = 0^\circ, 20^\circ$ und 30°

$\Lambda_R = 1$

$R_n = 1.0 \cdot 10^6$

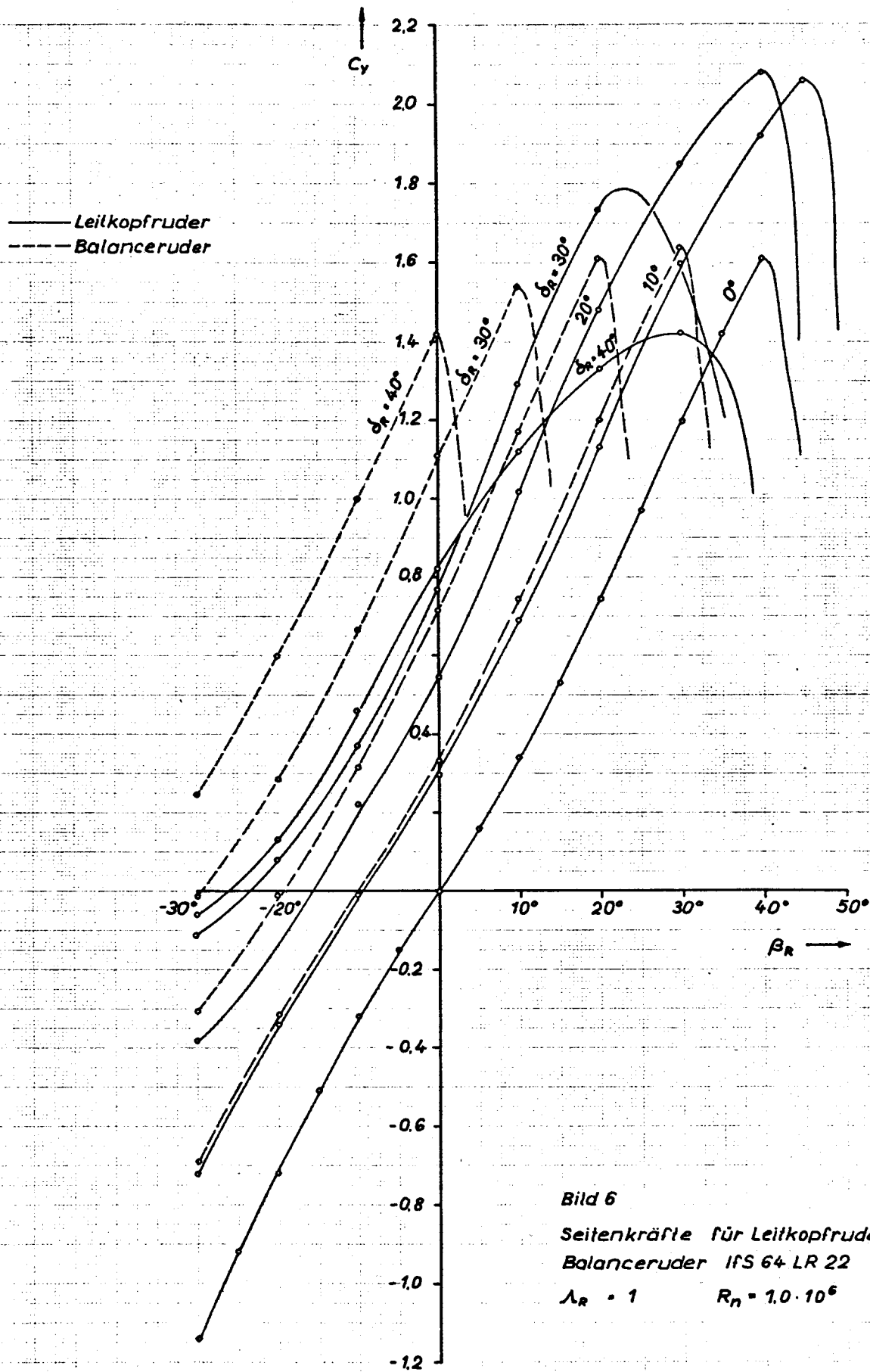


Bild 6

Seitenkräfte für Leitkopfruder und Balanceruder IFS 64 LR 22

$\Lambda_R = 1$ $R_H = 1.0 \cdot 10^6$

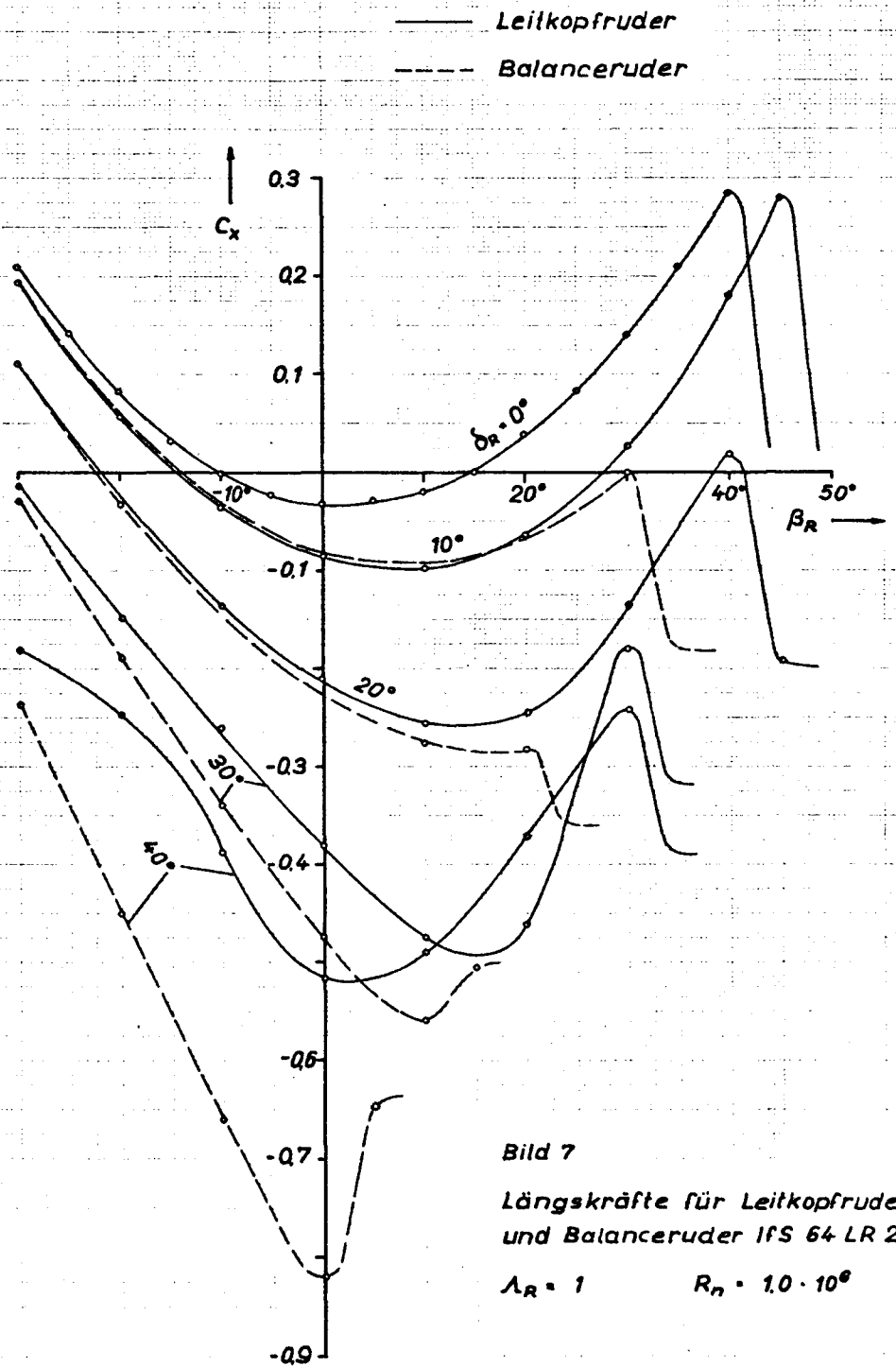


Bild 7

Längskräfte für Leitkopfruder
und Balanceruder IfS 64 LR 22

$\lambda_R = 1$ $R_n = 1.0 \cdot 10^6$

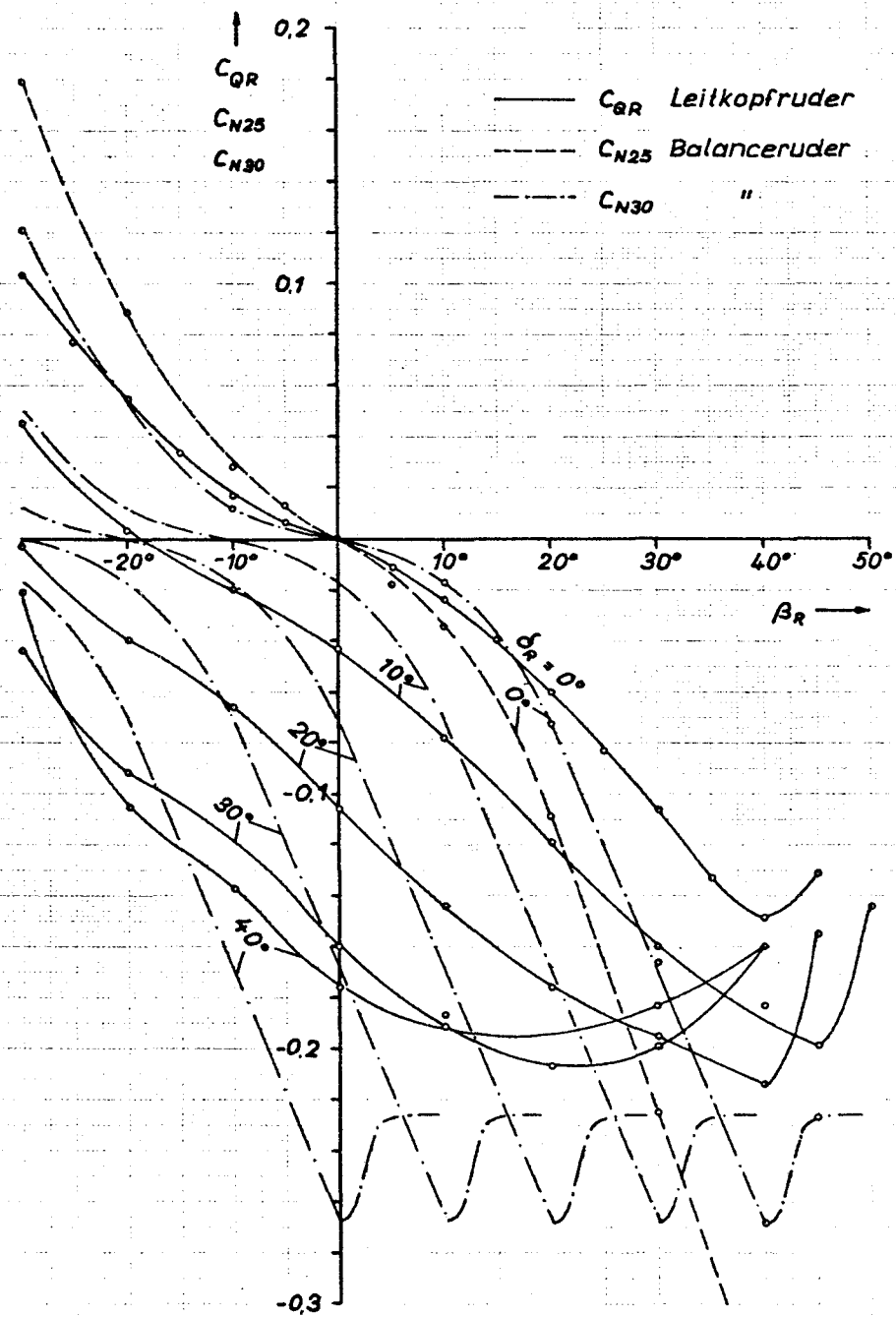
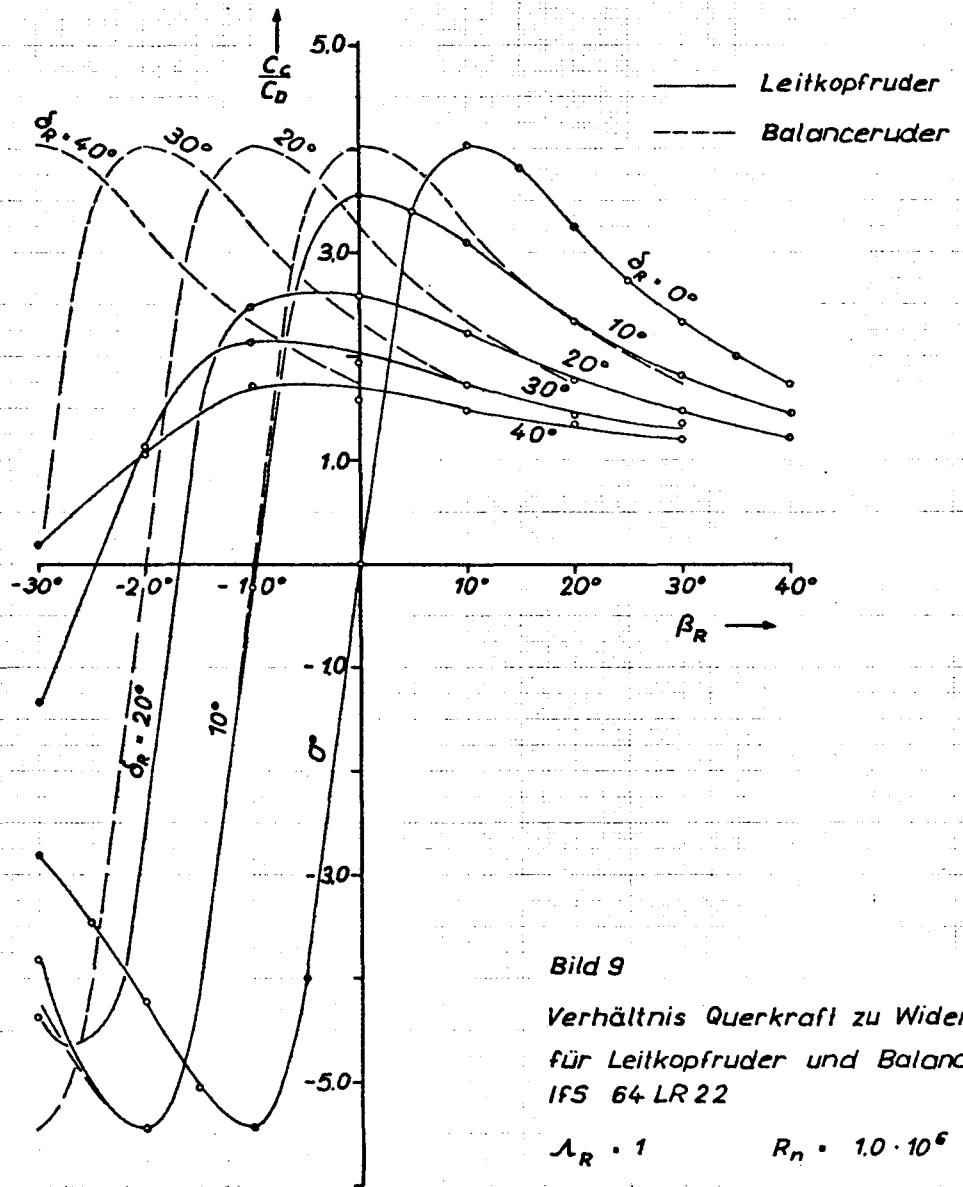


Bild 8
 Rudermomente am Leitkopfruder und
 Balanceruder IFS 64 LR 22

$\Lambda_R = 1$ $R_n = 1.0 \cdot 10^6$



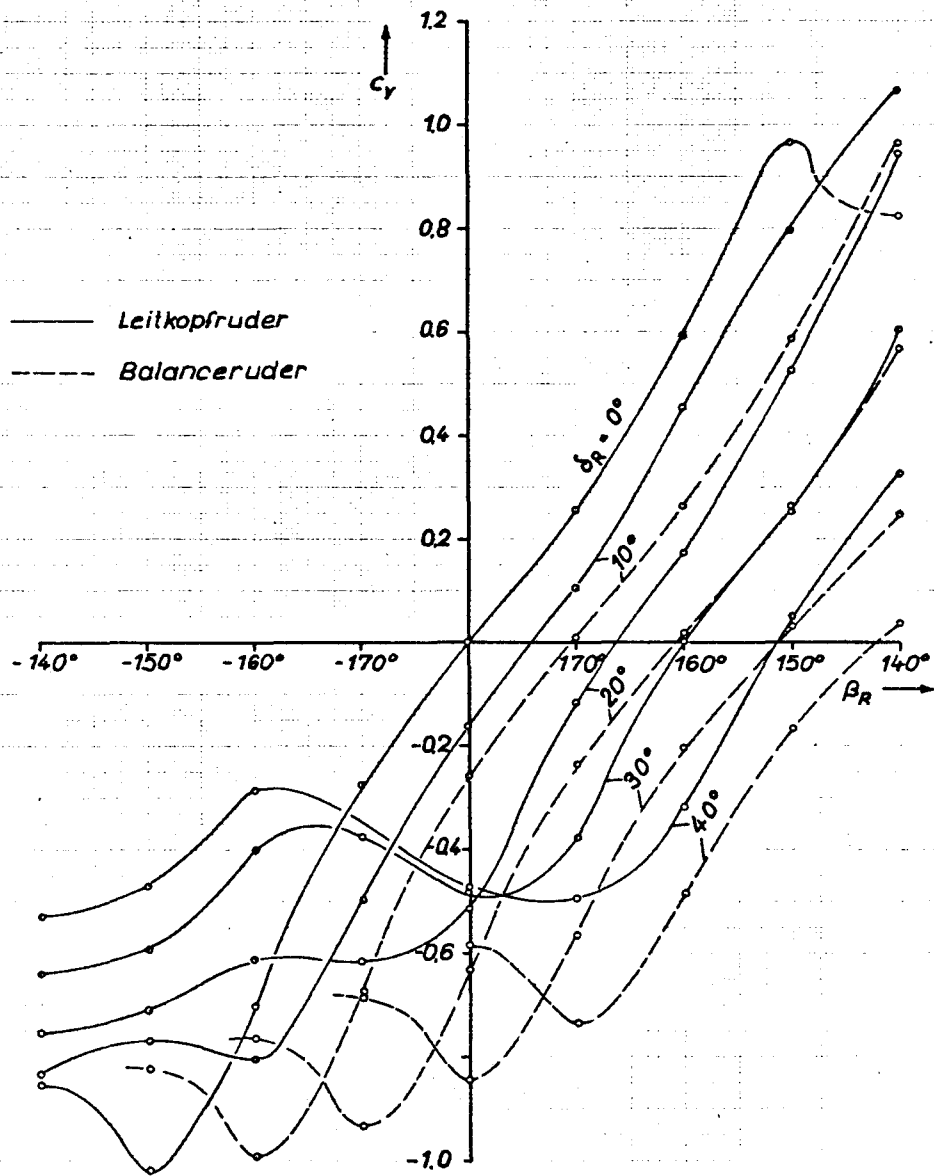


Bild 10

Seitenkräfte für Leitkopfruder und
Balanceruder IFS 64 LR 22 bei
Rückwärtsfahrt

$$\lambda_R = 1$$

$$R_n = 0.56 \cdot 10^6$$

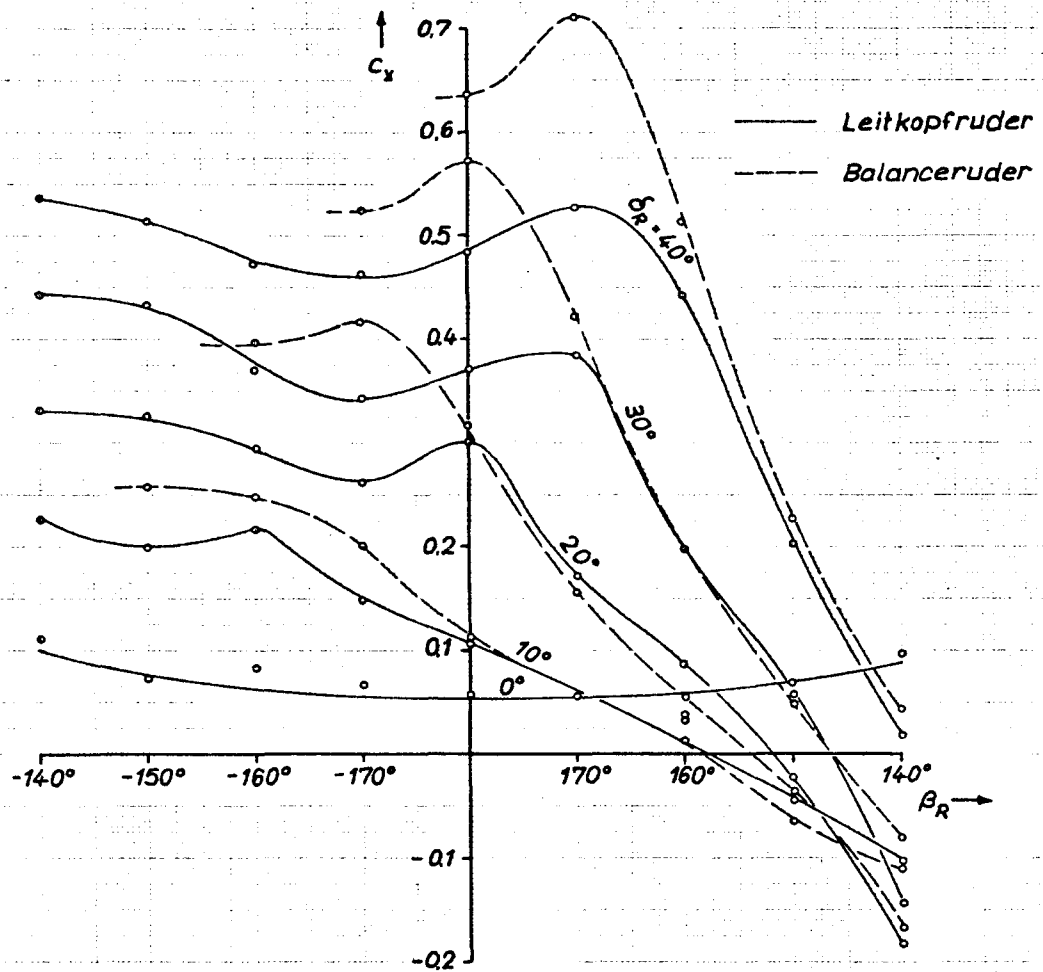


Bild 11

Längskräfte für Leitkopfruder und
Balanceruder IFS 64 LR 22 bei
Rückwärtsfahrt

$$\Lambda_R = 1$$

$$R_n = 0,56 \cdot 10^6$$

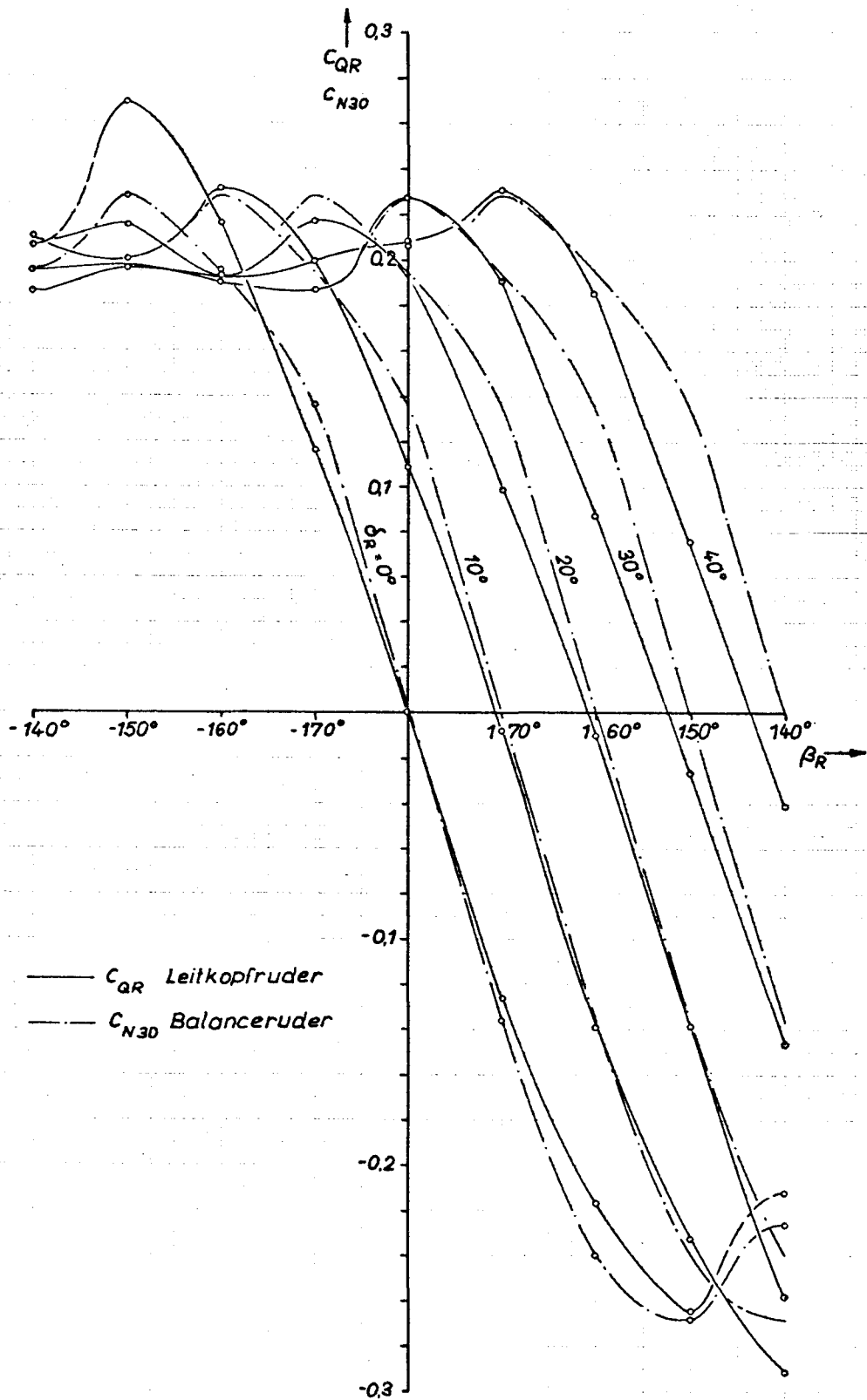


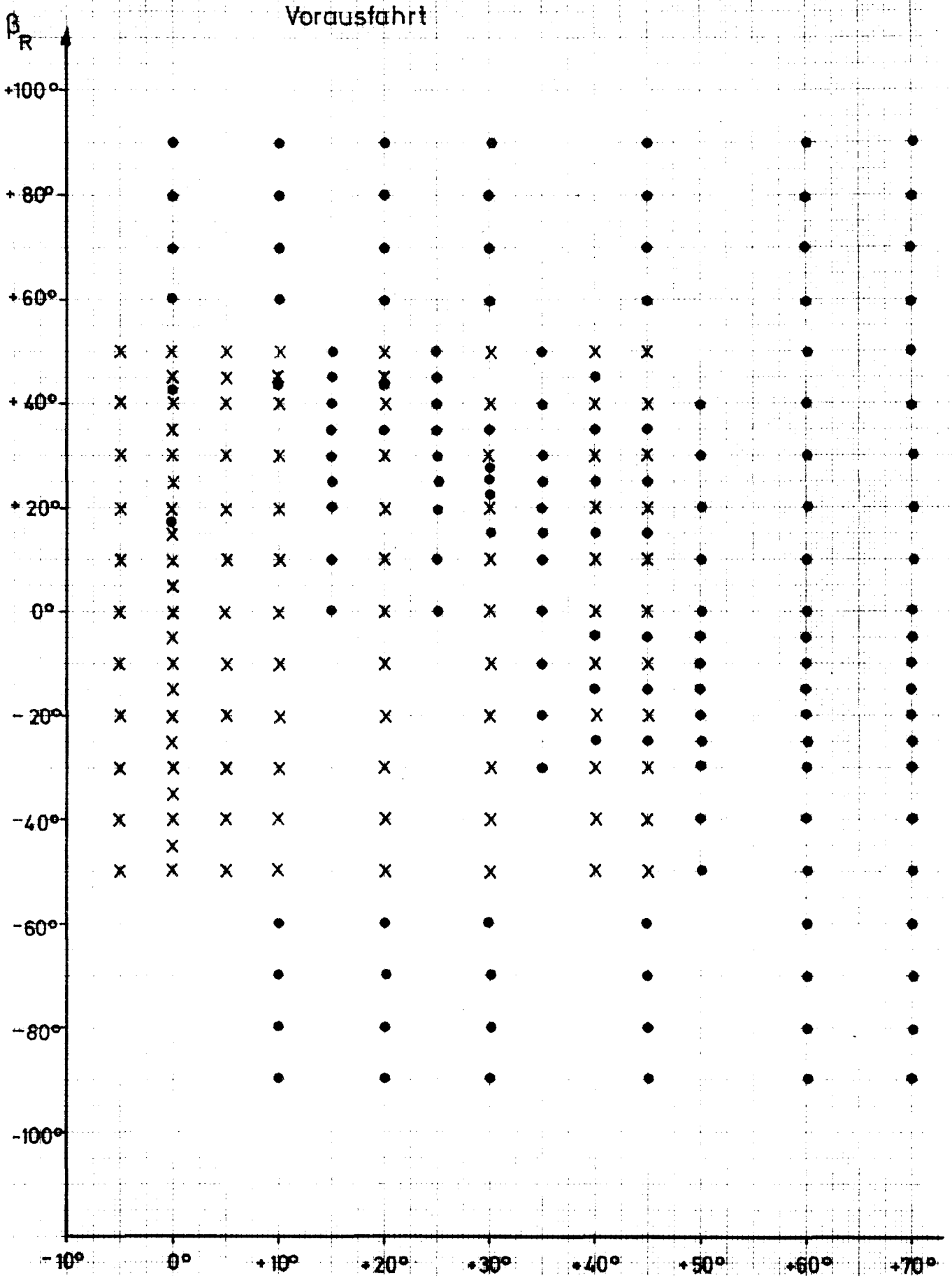
Bild 12

Rudermomente am Leitkopfruder und Balanceruder IFS 64LR 22 bei Rückwärtsfahrt

$\Lambda_R = 1$

$R_n = 0,56 \cdot 10^6$

- x Messung 1971
- Ergänzungs-Messung 1972



Meßprogramm IfS 64 LR 22

- x Messung 1971
- Ergänzungs - Messung 1972

Rückwärtsfahrt

