

40 | 1957

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K. Romahn und H. Thieme

### Zur Wahl der Balancefläche von Rudern im Propellerstrahl

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

# Zur Wahl der Balancefläche von Rudern im Propellerstrahl

K. Romahn und H. Thieme

Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Die Darstellung der Strömungsverhältnisse an einem Ruder im drallbehafteten Abstrom des Propellers wird in geeigneter Weise so weit vereinfacht, daß eine einfache Berechnung der Strömungskräfte nach dem für frei fahrende Ruder brauchbaren Verfahren möglich wird. Das Zusammenwirken von Drall und nicht linearem Anteil von Ruderkraft und Rudermoment macht gegenüber dem Freifahrtzustand des Ruders eine größere Rücklage der Ruderdrehachse erforderlich, wenn volle Balancierung des Ruders erzielt werden soll. Für den Fall symmetrischer Anordnungen und Zuströmungen werden explizite Beziehungen für diese Drehachsverschiebung angegeben. Der etwas umständlichere Weg im allgemeinen unsymmetrischen Fall wird aufgezeigt und durch Beispiele erläutert. Die Ergebnisse entsprechen den Borderfahrungen; ergänzende experimentelle Untersuchungen werden vorbereitet.

- A. Einführung
- B. Geschwindigkeit im Schraubenstrahl
- C. Einfluß der Strahldrehung
- E. Folgerungen
- D. Einfluß der Ungleichförmigkeit des Nachstroms
- F. Schrifttum
- G. Symbole

## A. Einführung

Über den Einfluß des Propellerstrahles auf die Steuerungseigenschaften eines Schiffes ist — wie in [12] erwähnt — bisher sehr wenig veröffentlicht worden. Hinweise über den Einfluß der Strahldrehung auf die Ruderkräfte beschränken sich auf qualitative Aussagen. Die unsymmetrischen Drehtendenzen von Einschraubenschiffen sind im Prinzip auf den Effekt der Strahldrehung im ungleichförmigen Nachstrom zurückgeführt worden. Für die Praxis besonders wichtig ist die Untersuchung der für volle Balancierung erforderlichen Drehachs-rücklage. Sie muß bei Strahldrehung wesentlich größer sein, als bei drallfreier Anströmung.

Der Strahl mit Drall oberhalb und unterhalb der Propellerachse hat entgegengesetzt gerichtete Umfangsgeschwindigkeiten, die eine unterschiedliche Anströmung des Ruders oben und unten bewirken. Bei rechtsdrehendem Propeller wird das Ruder in seiner Null-Lage oberhalb der Propellerachse von Backbord, unterhalb der Propellerachse von Steuerbord schräg angeströmt. Durch den ungleichförmigen Nachstrom sind die Anströmgeschwindigkeiten in Größe und Richtung (Vorzeichen und absolute Größe des Winkels) verschieden. Es ist deshalb naheliegend, den in [12] gemachten Vorschlag aufzunehmen und zur Bestimmung der Ruderkräfte geeignete Mittelbildungen für Ober- und Unterteil des Ruders zu finden, d. h. ober- und unterhalb der Propellerachse getrennte Ansätze zu machen und die Werte in Abhängigkeit voneinander zu bringen. Dabei soll nur der Teil des Ruders betrachtet werden, der sich unmittelbar im Propellerstrahl befindet. Im allgemeinen trifft das für den größten Teil der Ruderfläche zu.

Wie oben bereits erwähnt, sind weder theoretische noch experimentelle Ergebnisse von Untersuchungen ähnlicher Zielsetzung bisher bekannt geworden. Es wurde daher diese Problemstellung in ein langfristiges Forschungsprogramm zum Thema Ruder mit aufgenommen, das dank der Unterstützung und Förderung der Deutschen Forschungsgemein-

schaft durchgeführt werden kann. Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf eine theoretische Behandlung der Aufgabe, um mit dem so auch quantitativ gewonnenen Einblick die Durchführung des Versuchsprogrammes zielsicherer ansetzen zu können. Unabhängig von den Modellversuchen können jedoch gewisse Schlüsse über die Treffsicherheit der Rechnung aus dem vorliegenden statistischen Material über die Drehachslage ausgeführter Schiffsruder gezogen werden. Es ist selbstverständlich, daß eine ‚gebaute‘ Drehachslage der Praxis nicht unbedingt eine ‚richtige‘ Drehachslage zu sein braucht. Bei der Bewertung der statistischen Angaben muß also die für die Ruderanlage vorliegende Betriebserfahrung mit herangezogen werden.

## B. Geschwindigkeiten im Schraubenstrahl

Zur genauen Berechnung der Geschwindigkeiten im Schraubenstrahl ist die Kenntnis des Nachstromfeldes erforderlich. Leider existiert über Nachstromverteilungen nur sehr wenig und leider auch nur spezielles Material. In mehreren Quellen [3] [5] [7] [9] [13] [14] [15] findet man oberhalb

der Propellerachse Werte  $\frac{\Delta v}{v}$  von etwa 0,30 bis 0,50 und

unterhalb  $\frac{\Delta v}{v}$  von 0,17 bis 0,35. Also sind je nach Schiffstyp

Eintrittsgeschwindigkeiten in die Propellerebene oberhalb  $v_{eo}$  von  $0,55 \cdot v$  bis  $0,70 \cdot v$ , unterhalb  $v_{eu}$  von  $0,65 \cdot v$  bis  $0,83 \cdot v$  zu erwarten. Damit wird das Verhältnis des Fortschrittsgrades oberhalb zum Fortschrittsgrad unterhalb der Propellerachse

$$\frac{\Lambda_{Po}}{\Lambda_{Pu}} = \frac{\frac{v_{eo}}{n \cdot D_P}}{\frac{v_{eu}}{n \cdot D_P}} = \frac{v_{eo}}{v_{eu}} = 0,60 \text{ bis } 1,08$$

Selbstverständlich braucht man nicht zu erwarten, daß der größte Wert von  $v_{eo}/v$  mit dem kleinsten Wert von  $v_{eu}/v$  zusammen auftritt. Dennoch gibt eine derartige „kreuzweise“ Zusammenfassung der Werte eine anschauliche Vorstellung über die rechnerisch extremen Grenzen. Da ein Wert  $v_{eo}/v_{eu} > 1$  für normale Schiffsförmungen sinnlos ist, genügt es also, den Bereich  $v_{eo}/v_{eu} = 0,6$  bis  $1,0$  für diese Untersuchung in Betracht zu ziehen. Das Verhältnis  $\Lambda_{Po}/\Lambda_{Pu}$  ist entscheidend für die Bestimmung der je für Ober- und Unterteil des Ruders gemittelten Anströmrichtungen  $\Delta\alpha$ . Größe und Richtung der Geschwindigkeit im Propellerstrahl hängt außer von der Eintrittsgeschwindigkeit dann noch von den Kennzahlen des Propellers und vom Abstand von der Propellerebene ab.

## BA. Geschwindigkeit in Axialrichtung

In [2] berechnet Gutsche nach Biot-Savart die zusätzliche Axialgeschwindigkeit in einem Punkt eines Strahlquerschnitts im Abstände  $x$  von der Propellerebene zu

$$\Delta v_{sr} = \frac{\Gamma_P}{4\pi R_P} \int_0^{2\pi} \int_{x/R_P}^{+\infty} \frac{1 - r/R_P \cdot \cos \vartheta}{\left[ \left( \frac{x}{R_P} \right)^2 + 1 + \left( \frac{r}{R_P} \right)^2 - 2 \left( \frac{r}{R_P} \right) \cos \vartheta \right]^{3/2}} d\vartheta d\left( \frac{x}{R_P} \right)$$

Dieses Doppelintegral löst er für mehrere  $r/R_P$ , bildet aus den gewonnenen Werten das Verhältnis  $k_r = \frac{\Delta v_{Sr}}{\Delta v_{S\infty}}$  und trägt

es über  $x/R_P$  auf.  $\Delta v_{S\infty}$  ist die Zusatzgeschwindigkeit unendlich weit hinter der Propellerebene. Sie ist doppelt so groß wie die Zusatzgeschwindigkeit am Ort des Propellers (Prandtl:  $\Delta v_{S\infty} = 2\Delta v_P$ ). Hier interessiert vor allem der Mittelwert über die Querschnittsebene

$$\Delta v_S = \frac{2 \int \Delta v_{Sr} \cdot r \cdot dr}{r^2}$$

und das daraus resultierende Verhältnis  $k_m = \frac{\Delta v_S}{\Delta v_{S\infty}}$ , das

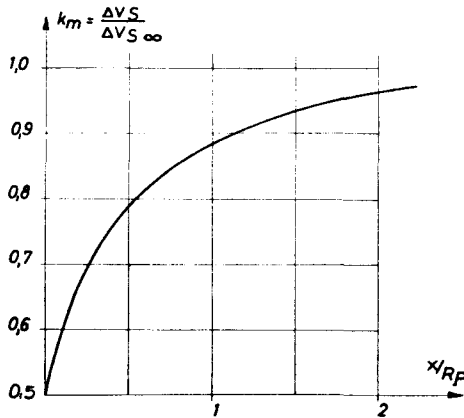


Bild 1 Einfluß des Propellerabstandes auf die Geschwindigkeit am Ruder. Mittelwert nach Gutsche [2]

ebenfalls im Diagramm eingetragen ist und etwa  $r/R_P = 0,75$  entspricht.  $k_m$  ist als Funktion von  $x/R_P$  nach [2] in Bild 1 für den im Rahmen dieser Untersuchung interessierenden Bereich wiedergegeben. Die mittlere zusätzliche Axialgeschwindigkeit kann danach ausgedrückt werden

$$\begin{aligned} \Delta v_S &= k_m \cdot \Delta v_{S\infty} \\ &= k_m \cdot v_e (-1 + \sqrt{1 + C_S}) \end{aligned} \quad (1)$$

mit  $C_S = \frac{S}{\rho/2 v_e^2 \pi D_P^2/4}$  bzw.  $C_S = \frac{8K_T}{\pi \cdot \Lambda_P^2}$  mit  $K_T = \frac{S}{\rho n^2 D_P^4}$

und die Axialgeschwindigkeit

$$\begin{aligned} v_S &= v_e + \Delta v_S \\ &= v_e [1 + k_m (-1 + \sqrt{1 + C_S})]. \end{aligned} \quad (2)$$

Am Ort des Propellers ist  $k_m = 0,5$  und die Geschwindigkeit

$$v_{SP} = v_e (0,5 + 0,5 \sqrt{1 + C_S}) \quad (3)$$

Vor dem Propeller ist  $0 < k_m < 0,5$ , hinter dem Propeller  $0,5 < k_m < 1,0$ . Die Werte nach (2) liegen nur wenige Prozent höher als nach der Formel von Smelt-Davies [8], die in [10] verwendet ist.

### BB. Geschwindigkeit in Umfangsrichtung

Die Tangentialgeschwindigkeit in der Propellerebene läßt sich mit Hilfe des Eulerschen Momentensatzes in folgender Form ausdrücken:

$$u_{SP} = (v_{SP} - v_e) \cdot \frac{2 K_Q}{\frac{r}{R_P} \cdot K_T} \quad \text{mit } K_Q = \frac{M_d}{\rho n^2 D_P^5} \quad (4)$$

Um eine mittlere Tangentialgeschwindigkeit zu erhalten, wird das 0,75 R-Theorem angewendet, d. h.  $u_{Sm} = u_{S0,75}$ .

Man erhält also

$$u_{SPm} = (v_{SP} - v_e) \frac{2K_Q}{0,75 \cdot K_T} \approx u_{Sm} \quad (5)$$

Die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit durch die Strahl-

kontraktion ist für die hier in Betracht kommenden Abstände vom Propeller so gering, daß sie nicht berücksichtigt zu werden braucht.

### BC. Größe und Richtung der Relativanströmung des Ruders

Die mittlere Umfangs- und Axialgeschwindigkeit kann in jedem Abstand von der Propellerebene für die obere und untere Hälfte des Strahles — unter Beachtung der entsprechenden Propellerkennzahlen — bestimmt werden. Die wahre Anströmgeschwindigkeit  $v_R$  setzt sich geometrisch nach Bild 2 aus den beiden Komponenten  $v_S$  und  $u_S$  zusammen.  $\Delta\alpha$  ist die Änderung der Anströmrichtung infolge der Strahldrehung.

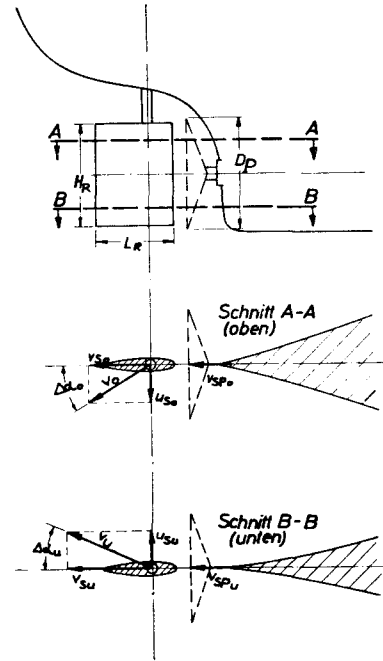


Bild 2 Geschwindigkeitskomponenten am Ruder bei rechtsdrehendem Propeller

Es ergibt sich folgende Beziehung:

$$\frac{v_R}{v_S} = \sqrt{1 + \frac{u_S^2}{v_S^2}} = \frac{1}{\cos \Delta\alpha} \quad (6)$$

mit

$$\frac{u_S}{v_S} = \text{tg } \Delta\alpha = \frac{1,3 K_Q/K_T}{k_m + \frac{1}{\sqrt{1 + C_S} - 1}} = \frac{0,212 \cdot \Lambda_P/\eta_P}{k_m + \frac{1}{\sqrt{1 + C_S} - 1}} \quad (7)$$

(siehe Darstellung in Bild 3).

Damit ist die Anströmrichtung und das Verhältnis der wahren Anströmgeschwindigkeit des Ruders zur Axialgeschwindigkeit nur von den Propellerkennzahlen und dem Abstand von der Propellerebene abhängig ausgedrückt. Bei Kenntnis der Propellerkennwerte ist also die Berechnung der Anströmung am Ruder möglich. Das Ergebnis solcher Rechnungen ist in Bild 3 für die Wageninger Serien B. 3. 35 und B. 3. 50 dargestellt; sie entsprechen den Propellern des Versuchsprogrammes, das diese Arbeit ergänzt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, daß die Änderung der Anströmrichtung mit dem Abstand von der Propellerebene nur bei höherer Propellerbelastung wesentlich ist.

### C. Einfluß der Strahldrehung auf die Ruderkräfte

Die Voraussetzung zur Untersuchung des Dralleinflusses auf die Ruderkräfte wurde im Abschnitt B behandelt. Anströmgeschwindigkeit und -richtung können für jeden Abstand vom Propeller als Mittelwert je für die obere und untere

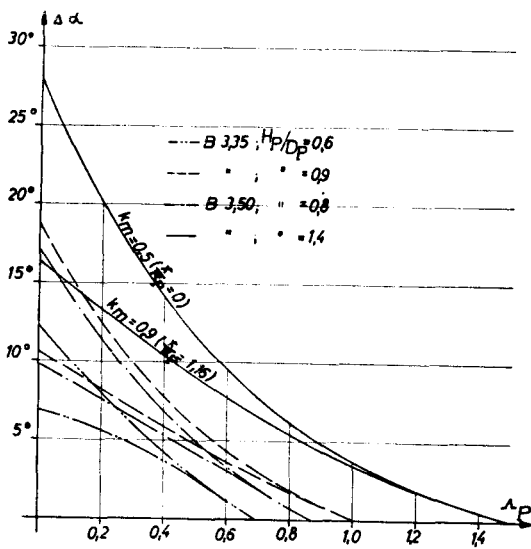


Bild 3 Drallwinkel am Ruder  $\Delta\alpha$  in Abhängigkeit vom Propellerfortschrittsgrad  $\Delta p$

Hälfte des Ruders ermittelt werden. Der Einfluß der Strahldrehung auf die Kräfte des Ruders läßt sich durch Mittelbildungen für Ober- und Unterteil annähern mit Hilfe der Theorie der Quertriebskörper von kleinem Seitenverhältnis, auf deren Anwendung bei Betrachtung von Steuereigenschaften und Rudern in [11] [12] ausführlich eingegangen worden ist. Das Verhältnis von Moment zu Querkraft würde dabei erhalten bleiben, wenn nur eine lineare Abhängigkeit des Momentes und auch der Querkraft vom effektiven Anströmwinkel bestehen würde. Es würde dann auch die für volle Ausbalancierung (Ruderachse im „Druckpunkt“) des Ruders ohne Propellerstrahl richtige Drehachslage durch den Strahleinfluß nicht verändert werden können. Wie in [11] gezeigt, gelten diese einfachen linearen Zusammenhänge zwischen Querkraft und Moment mit dem Winkel auch näherungsweise nur für

Seitenverhältnisse  $\Lambda_R = \frac{H_R^2}{F_R}$  (vgl. Bild 2), die größer als 3

sind. Selten erreichen Schiffsruder diesen Wert. Im allgemeinen sind sie wesentlich kleiner. Bei Küstenschiffen liegen sie oft nur wenig zwischen 1 und 1,5. Es muß also für allgemeine Betrachtungen immer mit einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Kraft und Moment mit dem Winkel gerechnet werden. Zur vollen Ausbalancierung des Ruders im Propellerstrahl wird also eine andere Drehachslage erforderlich sein als bei drallfreier Anströmung. Bereits qualitative Untersuchungen [10] zeigen, daß durch den Strahleinfluß eine Vergrößerung des Abstandes der Ruderachse von der Ruder Vorderkante notwendig wird. Dies gilt auch unabhängig vom Nachstrom und seiner Ungleichmäßigkeit. Es mag interessant sein zu erwähnen, daß die genannten Untersuchungen durch praktische Beobachtungen ausgelöst worden waren. Es hatte sich wiederholt gezeigt, daß Ruder von Einschraubern mit gutem Erfolg eine größere Balancefläche erhalten hatten, als nach einfachen Rechnungen ohne Berücksichtigung des Strahldalles richtig gewesen wäre.

Es soll nun zunächst die Drehachslage bei Strahldrehung ohne Nachstromberücksichtigung ermittelt werden. Der Nachstromeinfluß wird danach durch Mittelbildungen für die obere und untere Hälfte des Ruders behandelt. Für die Ausbalancierung des Ruders genügt es zwar nicht, nur die Verhältnisse bei Ruderlage Null zu untersuchen, man kann sich jedoch auf solche endlichen Ruderlagen beschränken, bei denen keine Ablösungseinflüsse spürbar werden.

Da diese Arbeit speziell der Frage der Balancefläche von Rudern gewidmet ist, interessiert hier vornehmlich das auf die Drehachse des Ruders bezogene Rudermoment (vgl. Bild 4):

$$M_a = c_{Ma} \cdot \rho/2 \cdot v_R^2 \cdot F_R \cdot L_R$$

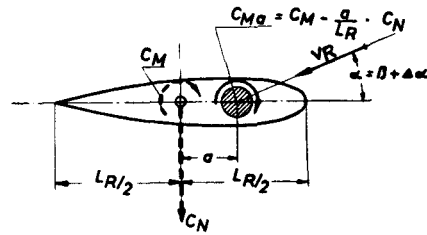


Bild 4 Zur Formulierung der Momentenbeizahl  $c_{Ma}$  bei Geradeausfahrt

Bei vom Rechteck abweichendem allgemeinen Ruderumriß ist zu beachten, daß die Drehachslage  $a$  als Abstand der Ruderachse von der zu ihr Parallelen durch den Flächenschwerpunkt zu nehmen ist, und daß die mittlere Länge

$$L_R = \frac{1}{F_R} \int_0^{H_R} L_z^2 dz$$

(Momentenlänge (vgl. [11])) an Stelle der Kantenlänge genommen werden muß.

Die Formulierung des Momentenbeiwertes lautet allgemein:

$$c_{Ma} = m_{wa} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha - a/L_R \cdot a_{wa} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + m_{sa} \cdot \sin^2 \alpha - a/L_R \cdot a_{sa} \cdot \sin^2 \alpha \quad (8)$$

(vgl. [12] u. Bild 4)

Mit  $\alpha$  ist die Anströmrichtung des Ruders gekennzeichnet, die sich aus dem Ruderwinkel  $\beta$  und der durch die Umfangsgeschwindigkeiten im Propellerstrahl erzeugten Änderung der Anströmrichtung  $\Delta\alpha$  zusammen setzt ( $\alpha = \beta + \Delta\alpha$ ).

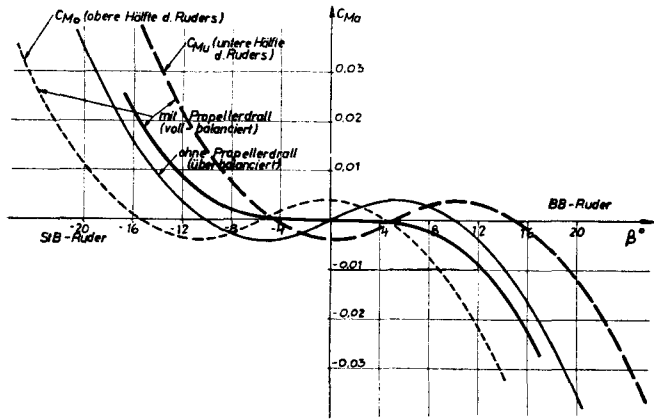
Nun ist die Bedingung für vollen Ausgleich des Rudermomentes, daß dieses auf die Drehachse bezogene Moment bzw. seine Beizahl zu Null wird. Mit  $c_{Ma} = 0$  erhält man aus (8) die hierzu bei einem bestimmten Winkel  $\alpha = \beta + \Delta\alpha$  erforderliche Drehachslage.

$$\frac{a}{L_R} = \frac{m_{wa} \left( \frac{m_{sa}}{m_{wa}} \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1 \right)}{a_{wa} \left( \frac{a_{sa}}{a_{wa}} \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1 \right)} \quad (9)$$

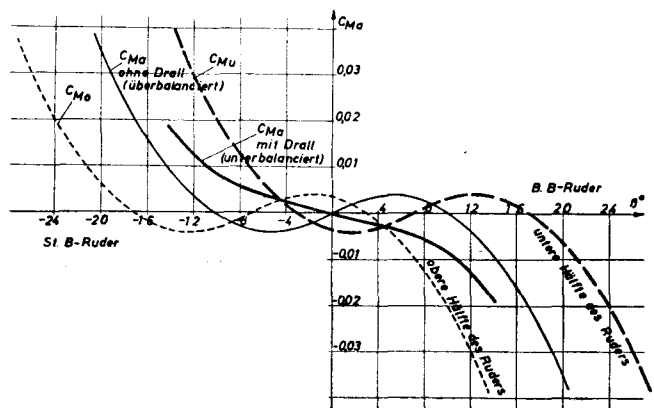
Die starke Abhängigkeit dieser zum Ausgleich erforderlichen Drehachslage vom Anströmwinkel  $\alpha$  zeigt sofort, daß es — bei den praktisch in Frage kommenden Ruderausführungen — nicht möglich sein kann, einen einzigen „Druckpunkt“ für ein Ruder anzugeben und damit etwa auch noch die Vorstellung zu verbinden, daß dieser der für den gesamten Wirkungsbereich richtige Ort der Drehachse ist. Man kann also nur für einen Anströmwinkel  $\alpha$  das Ruder wirklich voll ausgleichen. Prinzipiell kann man als Winkel des Ausgleichs  $\beta_a$  jeden Winkel  $\beta$  nehmen. Voller Ausgleich des Rudermomentes bei großen Winkeln bedeutet aber bei kleinen Winkeln immer eine Überbalance, vor deren ungünstiger Auswirkung (Unverträglichkeit bei Handsteuerung, verstärkte Abnutzung bei mechanischem Ruderantrieb, Begünstigung des „Klapperns“) schon in [10] gewarnt worden ist.

Beschränkt man sich auf symmetrisch gebaute und zur Propellerachse symmetrisch angeordnete Ruder und außerdem

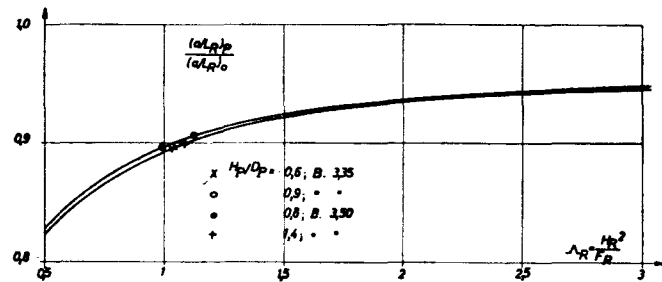




**Bild 7** Beispiel für den Verlauf von Rudermomenten über dem Ruderwinkel bei symmetrischem Nachstrom und symmetrischer Anordnung des Ruders. Rechtsdrehender Propeller;  $\Delta p = 0,53$ ;  $H/D = 0,9$  (B 3,35);  $\eta_p = 0,548$ ;  $\Delta \alpha_o = -\Delta \alpha_u = 5,3^\circ$ . Ruderseitenverhältnis  $\Lambda_R = 1,44$ ;  $a/L_R = 0,298$



**Bild 8** Beispiel für den Verlauf von Rudermomenten bei geändertem Beispiel Bild 7 geänderten Propellerbedingungen  $\Delta \alpha_o = -\Delta \alpha_u = 7^\circ$ ;  $a/L_R = 0,298$



**Bild 9** Drehachslage für volle Balancierung bei symmetrischer Anordnung des Ruders und symmetrischem Nachstrom in Abhängigkeit vom Ruderseitenverhältnis für verschiedene Propeller. Propellerkennwerte bei  $\eta_p = 0,8 \cdot \eta_{pmax}$

#### D. Einfluß der Ungleichförmigkeit des Nachstroms

Normalerweise ist die in Abschnitt C gemachte Voraussetzung der Gleichförmigkeit des Nachstroms nicht erfüllt, wenn das Ruder an einem Schiff eingebaut ist. Die axiale Zuströmung oben ist von der im unteren Teil des Ruders verschieden ( $v_o/v_u \neq 1$ ). Damit ist aber auch  $\Delta \alpha_o/\Delta \alpha_u \neq 1$ . Weiterhin ist dann das zwischen oberem und unterem Teil des Ruders zu mittelnde Rudermoment bei Ruderlage Null etwas von Null verschieden. Besitzt das Ruder außerdem noch eine auch geometrisch unsymmetrische Anordnung zur Propellerachse, z. B. bei Trapezruder oder Ruder, das nach oben sehr weit und nach unten kaum über den Propellerstrahl hinausragt (Bild 10), so fallen auch die Punkte „Moment gleich Null“ und „Querkraft gleich Null“ nicht unbedingt zusammen. Die

**Bild 10** Beispiel für ein unsymmetrisch zum Propeller angeordnetes Trapezruder.  $a_o \neq a_u$ ;  $L_o \neq L_u$ ;  $H_o \neq H_u$ ;  $F_o \neq F_u$ ;  $\frac{a_o}{L_o} \neq \frac{a_u}{L_u}$

$$\text{Trapez: } F_o = \frac{L_{ok} + L_{mP}}{2} \cdot H_o; \quad F_u = \frac{L_{mP} + L_{uk}}{2} \cdot H_u$$

$$\frac{L_o}{L_{ok}} = \frac{1}{3} \left( 4 \frac{F_o}{H_o \cdot L_{ok}} + \frac{H_o \cdot L_{ok}}{F_o} - 2 \right)$$

$$\frac{L_u}{L_{uk}} = \frac{1}{3} \left( 4 \frac{F_u}{H_u \cdot L_{mP}} + \frac{H_u \cdot L_{mP}}{F_u} - 2 \right)$$

$$\frac{L_R}{L_{ok}} = \frac{1}{3} \left( 4 \frac{F_R}{H_R \cdot L_{ok}} + \frac{H_R \cdot L_{ok}}{F_R} - 2 \right)$$

in Abschnitt C gegebene Definition für den Begriff der vollen Balancierung eines Ruders ist dann nicht mehr allgemein genug, da ja bei  $\beta = 0$  sowohl das Moment wie auch die Querkraft verschieden von Null sein können. Dennoch gelten auch hierfür die gleichen physikalischen Vorstellungen, die man mit dem Begriff der vollen Balancierung zu verbinden hat und die auch dem praktischen Gebrauch des Schiffbauers und des Nautikers entsprechen. Folgende allgemeine Bedingungen muß man für die Rudermaschine an ein nicht überbalanciertes Ruder stellen.

Im Bereich gesunder Strömung darf die Änderung des Rudermomentes mit dem Ruderwinkel niemals zu Rudermomenten im Sinne der Winkeländerung führen; eine Winkeländerung darf also keine Momentenänderung im Sinne dieser Winkeländerung zur Folge haben. So lautet die Bedingung für die volle Balancierung eines beliebig unsymmetrisch eingebauten Ruders (vgl. Bild 13b u. 13g):

$$\left( \frac{\partial c_{Ma}}{\partial \beta} \right)_{c_{Ma}=0} = 0 \quad (17)$$

(17) muß und kann nur an einem Punkt der Rudermomentenkurve erfüllt werden. Mit (18) wird nun das gesamte Rudermoment als Summe der Anteile oben und unten ausgedrückt, wobei „volle Unsymmetrie“ (Bild 10) berücksichtigt ist.

$$M_a = \left[ c_{Ma0} \left( \frac{v_o}{v_R} \right)^2 \cdot \frac{F_o}{F_R} \cdot \frac{L_o}{L_R} + c_{Ma0} \left( \frac{v_u}{v_R} \right)^2 \cdot \frac{F_u}{F_R} \cdot \frac{L_u}{L_R} \right] \varrho/2 \cdot v_R^2 \cdot F_R \cdot L_R \quad (18)$$

$$M_a = c_{Ma} \cdot \varrho/2 \cdot v_R^2 \cdot F_R \cdot L_R$$

In diesem Ausdruck bezeichnen die Indizes „o“ und „u“ die Anteile des oberen bzw. unteren Teiles des Ruders.  $v_R$  ist die für das gesamte Ruder gemittelte Anströmgeschwindigkeit. Die Momentenbeizahl für ein in Anordnung und An-

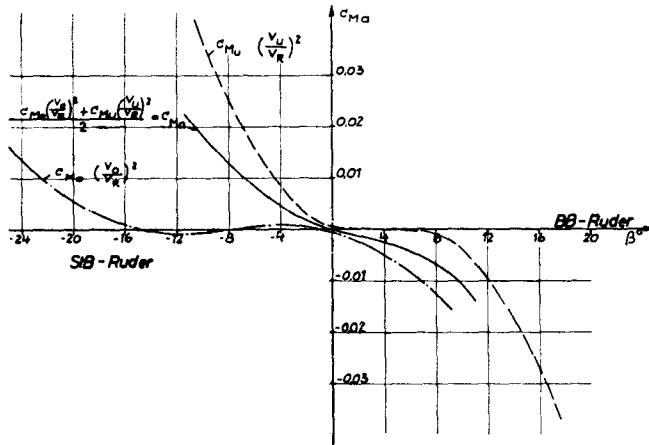
strömung beliebig unsymmetrisches Ruder wird also aus den jeweiligen Anteilen des oberen und unteren Teiles zusammengesetzt und kann entsprechend (8) nach (18) formuliert werden:

$$\begin{aligned}
 c_{Ma} = & \left( \frac{v_o}{v_R} \right)^2 \cdot \frac{F_o}{F_R} \cdot \frac{L_o}{L_R} \cdot \left[ m_{wa} \sin \alpha_o \cdot \cos \alpha_o \right. \\
 & - a_{wa} \cdot \frac{a_o}{L_o} \cdot \sin \alpha_o \cos \alpha_o + m_{sa} \cdot \frac{\alpha_o}{|\alpha_o|} \cdot \sin^2 \alpha_o \\
 & \left. - a_{sa} \frac{a_o}{L_o} \cdot \frac{\alpha_o}{|\alpha_o|} \cdot \sin^2 \alpha_o \right] \\
 & + \left( \frac{v_u}{v_R} \right)^2 \cdot \frac{F_u}{F_R} \cdot \frac{L_u}{L_R} \cdot \left[ m_{wa} \cdot \sin \alpha_u \cdot \cos \alpha_u \right. \\
 & - a_{wa} \cdot \frac{a_u}{L_u} \cdot \sin \alpha_u \cdot \cos \alpha_u + m_{sa} \cdot \frac{\alpha_u}{|\alpha_u|} \sin^2 \alpha_u \\
 & \left. - a_{sa} \frac{a_u}{L_u} \cdot \frac{\alpha_u}{|\alpha_u|} \sin^2 \alpha_u \right]. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Bei unsymmetrischem Nachstrom, aber symmetrischer Anordnung des Ruders vereinfacht sich (19) bzw. (18) zu (20):

$$c_{Ma} = \frac{1}{2} \left[ c_{Ma0} \left( \frac{v_o}{v_R} \right)^2 + c_{MaU} \left( \frac{v_u}{v_R} \right)^2 \right] \quad (20)$$

Hierfür gibt Bild 11 ein gerechnetes Beispiel. Bei gleicher Drehachslage und bei gleichem mittlerem Fortschrittsgrad des Propellers wie beim Beispiel in Bild 7 ergibt sich nun durch die Unsymmetrie des Nachstroms ( $\Delta_{P_o}/\Delta_{P_u} = 0,6$ ) keine volle Balancierung des Ruders mehr.



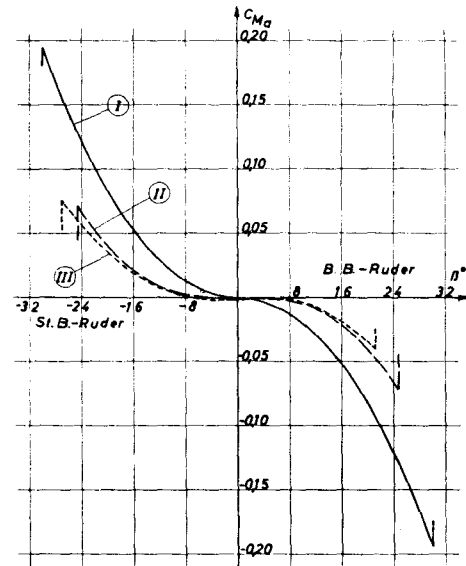
**Bild 11** Beispiel für den Einfluß unsymmetrischen Nachstroms auf den Verlauf des Rudermomentes bei symmetrischer Ruderanordnung.

nach Bild 7:  $a/L_R = 0,298$ ;  $\Delta_{P_m} = 0,53$ ,  
aber:  $\Delta_{P_o}/\Delta_{P_u} = 0,6$

$$\frac{v_o}{v_R} = 0,7; \Delta_{P_o} = 0,398; \Delta\alpha_o = 7,3^\circ$$

$$\frac{v_u}{v_R} = 1,22; \Delta_{P_u} = 0,662; \Delta\alpha_u = -3,6^\circ$$

Auf die explizite Darstellung erforderlicher Drehachslagen bei allgemeiner Unsymmetrie, wie sie aus (19) mit der Bedingung (17) zu gewinnen wäre, soll im Rahmen dieser Arbeit noch nicht weiter eingegangen werden, da die Berechnung natürlich wesentlich umständlicher wird und die, wie gezeigt, recht einfache Behandlung des symmetrischen Falles bereits einen guten Anhalt für den meist leicht unsymmetrischen Normalfall verspricht. So wurde mit den Daten des Beispiels in Bild 7 auch ein unsymmetrischer Fall nach (19) gerechnet; dabei ist die Drehachslage für volle Balancierung im symmetrischen Fall mit Drall gewählt ( $\Delta\alpha_o = \Delta\alpha_u$ ). Das Ergebnis ist



**Bild 12** Beispiele für Rudermomentenverläufe

- (I) bei symmetrischer Anströmung:  $\Delta\alpha = 0$ ;  $a/L_R = 0,324$   
 (II) bei symmetrischem Nachstrom mit Drall:  $\Delta\alpha_o = -\Delta\alpha_u = 5,3^\circ$ ;  
 $a/L_R = 0,278$   
 (III) bei unsymmetrischem Nachstrom mit Drall:  $\Delta\alpha_o = 8,8^\circ$ ;

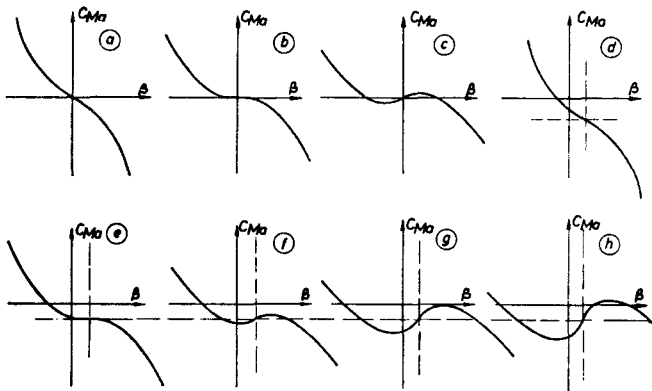
$$\Delta\alpha_u = -3^\circ; \frac{v_o}{v_R} = 0,7; \frac{v_u}{v_R} = 1,2; a/L_R = 0,278$$

mit symmetrischer Ruderanordnung und Ruderseitenverhältnis  $\Delta_R = 1,44$

in Bild 12 (Kurve III) dargestellt. Der Verlauf des Rudermomentes hat einen instabilen Bereich, doch in diesem Bereich ist ein zwar kleines, aber eindeutiges Moment vorhanden, so daß die in [10] zitierten Nachteile für die Rudermaschine noch nicht auftreten können. Sie würden sich erst auswirken, wenn das Moment im instabilen Sinne seine Richtung wechselt. Außer der Betrachtung des Momentencharakters bei kleinen Winkeln ist auch ein Vergleich der Maximalmomente nützlich. Das Maximalmoment liegt dort, wo starke Ablösung der Strömung beginnt. Bild 12 zeigt den Verlauf des Rudermomentes für das Beispiel des Bildes 7 unter Annahme der jeweiligen Maximalmomente bei  $\beta = 30^\circ$ , sowohl bei drallfreier Anströmung ( $\Delta\alpha = 0$ ) als auch bei Anströmung im Strahl mit symmetrischem ( $|\Delta\alpha_o| = |\Delta\alpha_u|$ ) und unsymmetrischem ( $|\Delta\alpha_o| \neq |\Delta\alpha_u|$ ) Drall. Für alle drei Fälle ist das Ruder voll ausbalanciert nach der Bedingung (17), wobei die entsprechenden Drehachslagen nach (10) und (11) berechnet wurden. Eine Ausnahme macht dabei das Moment III, da es auf die Drehachslage des Momentes II bezogen wurde, um die Abweichung durch die unsymmetrische Anströmung herauszustellen. Diese Abweichung ist, wie Bild 12 zeigt, sehr gering. Die auftretenden maximalen Momente bei II und III sind nahezu gleich, obwohl die Unsymmetrie der Anströmung eine Unsymmetrie der Maximalmomente zur Folge hat. Die für das Beispiel III angenommenen Verhältnisse der Geschwindigkeiten oben und unten  $v_o/v_R = 0,7$  und  $v_u/v_R = 1,2$  werden in der Praxis selten auftreten, so daß sich der Verlauf des Momentes bei Änderung dieser Verhältnisse unter Konstanthaltung der Drehachslage immer mehr dem Verlauf für  $v_o/v_u = 1$  (Moment II) annähern wird. Es ist zu erwarten, daß der spezielle Fall des Bildes 12 auch auf andere, allgemeine Fälle übertragen werden kann, ohne daß sich die mit Überbalance verbundenen Nachteile auswirken, d. h. daß man unter Annahme symmetrischer Anströmung recht gute Ergebnisse erhält, ohne befürchten zu müssen, daß durch die Unsymmetrie des Propellerstrahles ein größeres Maximalmoment oder eine Überbalance des Ruders auftritt, solange die Anordnung des Ruders symmetrisch bzw. die Abweichung von

der Symmetrie sehr klein ist. Bei unsymmetrischer Anordnung muß noch eine dahingehende Kontrolle durchgeführt werden.

Bild 13 skizziert Beispiele für den möglichen Verlauf von Rudermomenten in möglichen Fällen symmetrischer und unsymmetrischer Zuströmung und Anordnung. Das Beispiel g)



**Bild 13 Schematische Beispiele für die Definition der „vollen Balancierung“ von Rudern nach dem Charakter der Rudermomentenkurve.** — a) „unterbalanciertes“ Ruder, symmetrischer Nachstrom, stabiler Momentenverlauf — b) „voll balanciertes“ Ruder, symmetrischer Nachstrom, labiler Momentenverlauf — c) „überbalanciertes“ Ruder, symmetrischer Nachstrom, instabiler Momentenverlauf — d) unterbalanciert, unsymmetrischer Nachstrom, stabiler Verlauf — e) unterbalanciert, unsymmetrischer Nachstrom, labiler Verlauf — f) unterbalanciert, unsymmetrischer Nachstrom, instabiler Verlauf — g) voll balanciert, unsymmetrischer Nachstrom, stabiler Verlauf — h) überbalanciert, unsymmetrischer Nachstrom, instabiler Verlauf

hat zwar einen instabilen Bereich, doch das Ruder ist nach (17) noch nicht überbalanciert, d. h. das Moment wechselt nicht sein Vorzeichen. Die günstigste Drehachslage für den unsymmetrischen Fall ist also entsprechend Bild 13, g) dort zu finden, wo die  $c_{MR}$ -Kurve zwei Nullstellen hat, da in diesem Falle die Momente in ihrem Verlauf so klein wie möglich bleiben und andererseits die in [10] zitierten Nachteile noch nicht auftreten. Dagegen sind die Beispiele c) und h) in Bild 13 für die praktische Anwendung nicht geeignet wegen angesprochener Überbalance.

### E. Folgerungen

Für den Fall symmetrischer Anordnung und Zuströmung können einfache Beziehungen angegeben werden, die die Berechnung der zur vollen Balancierung des Ruders erforderlichen Drehachslage ermöglichen. Weiterhin ist zu erwarten, daß die im Propellerstrahl durch den ungleichförmigen Nachstrom auftretende Unsymmetrie keine wesentliche Änderung des Ergebnisses aus der symmetrischen Betrachtung zur Folge haben wird, solange die Anordnung symmetrisch ist. Die auftretende leichte Unstabilität des Rudermomentes führt nicht wie im symmetrischen Fall zu einer Überbalance des Ruders, die sich nachteilig auf das mechanische Verhalten der Rudermaschine auswirkt. Das maximale Rudermoment ist im symmetrischen und unsymmetrischen Fall nahezu gleich groß. Für Ruder, die nicht sehr stark vom Rechteckumriß abweichen, und deren Ober- und Unterkante nicht wesentlich über den Propellerstrahl hinausragt, kann zur Berechnung der erforderlichen Drehachslage bei Vollbalancierung des Ruders eine symmetrische Zuströmung im Propellerstrahl als gute Näherung angesetzt werden. Bei unsymmetrischen Ruderanordnungen ist die Bestimmung der günstigsten Drehachslage etwas umständlicher. Die angegebenen Beziehungen sind für diesen Zweck noch nicht explizit durchgeführt, sie sollen aber weiter behandelt werden.

Die quantitativen Ergebnisse dieser Arbeit entsprechen den Erfahrungen der Praxis. Trotzdem sind damit die im Rahmen

eines Forschungsprogrammes zum Thema Ruder vorgesehenen ergänzenden experimentellen Untersuchungen dadurch nicht gegenstandslos, da ein numerisch befriedigender Vergleich zwischen Theorie und Experiment ohne Modellversuche kaum verwirklicht werden kann. Darüber hinaus bleiben anschließend noch andere Fragen, wie z. B. der Einfluß des Verhältnisses von Ruderhöhe zu Propellerdurchmesser oder unterschiedliche Flächenverteilung oben und unten, vorwiegend für die experimentellen Untersuchungen. Ebenso ist eine Behandlung des Ruders am drehenden Schiff notwendig.

### F. Schrifttum

- [1] Dickmann, H. E.: Wechselwirkung zwischen Propeller und Schiff unter besonderer Berücksichtigung des Welleneinflusses. Jb. S.T.G. 1939, S. 234/282.
- [2] Gutsche, F.: Die Induktion der axialen Strahlzusatzgeschwindigkeit in der Umgebung der Schraubenebene. Schiffstechnik 1955, Heft 12/13, S. 31/33.
- [3] Horn, F.: Ungleichförmigkeitseinflüsse bei Schiffsschrauben. Hydromechanische Probleme des Schiffsantriebes. 1932, S. 343/379.
- [4] Horn, F.: Über die Wirkung von Flossen hinter dem Schraubenpropeller. Schiffbau 1928, S. 538/543.
- [5] Kempf, G.: Mitstrom und Mitstromschrauben. Jb. S.T.G. 1931, S. 134/152.
- [6] Kucharski, W.: Neuere Gesichtspunkte für den Entwurf von Schiffsrudern. Jb. S.T.G. 1931, S. 206/253.
- [7] Lewis, F. M. + Tachmindji, A. J.: Propeller forces exciting hull vibrations. S.N.A.M.E. 1954, S. 397/425.
- [8] Smelt-Davies: Estimation of increase in Lift due to slipstream. ARC RM 1788.
- [9] Schuster, S.: Über die hydrodynamisch bedingten Schub- und Drehmoment-Schwankungen in Schiffsantriebsanlagen. VDI-Zeitschrift, 1956, S. 1789/1794.
- [10] Thieme, H.: Ruder. Handbuch der Werften 1952, S. 89/94.
- [11] Thieme, H.: Über strömungstechnische Grundlagen zur Bestimmung von Steuereigenschaften. Schiff und Hafen 1954, S. 510/518.
- [12] Thieme, H.: Zur Behandlung von Ruderproblemen. Schiff und Hafen 1955, S. 605/618.
- [13] Voigt, H.: Systematische Schraubenuntersuchungen am Schiffsmodell. Schiffbau 1934, S. 38/41, 53/57, 87/93, 103/107.
- [14] Weingart, W.: Nachstrom und Sogziffern für Schiffe mittlerer Geschwindigkeit. Schiffbau 1934, S. 237/242.
- [15] Weitbrecht, H.: Über Mitstrom und Mitstromschrauben. Jb. S.T.G. 1931, S. 117/133.

### G. Symbole

$C_S$	=	$\frac{S}{\frac{\rho}{2} \cdot v_e^2 \cdot \pi \cdot D_p^2/4}$	Schubbelastungsgrad des Propellers
$D_p$			Propellerdurchmesser
$F_o$			Oberer Teil der Ruderfläche
$F_u$			Unterer Teil der Ruderfläche
$F_R$			Ruderfläche
$H_p$			Propellersteigung
$H_R$	=	$H_o + H_u$	Ruderhöhe
$H_o$			Höhe des oberen Teiles des Ruders, über der Prop.-Achse
$H_u$			Höhe des unteren Teiles des Ruders, unter der Prop.-Achse
$K_Q$	=	$\frac{M_d}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^5}$	Drehmomentenbeiwert des Propellers
$K_T$	=	$\frac{S}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4}$	Schubbeiwert des Propellers
$L_{R_1}$	=	$\frac{1}{F_R} \int_0^{H_R} L_z^2 dz$	Momentenbezugslänge des Ruders, bei Rechteckruder gleich der Ruderlänge
$L_{mP}$			Länge des Ruders in Höhe der Propellerachse
$L_o$	=	$\frac{1}{F_o} \int_0^{H_R} L_z^2 dz$	Momentenbezugslänge des oberen Ruderteiles

$L_{ok}$	Länge der Ruderoberkante	$\Delta v_S = v_S - v_e$	Achbiale Zusatzgeschwindigkeit im Propellerstrahl
$L_u = \frac{1}{F_u} \int_0^{H_u} L_z^2 dz$	Momentenbezugslänge des unteren Ruderteiles	$v_{SP}$	Achbiale Geschwindigkeit im Propellerstrahl am Ort des Propellers
$L_{uk}$	Länge der Ruderunterkante	$v_{SPo}$	Achbiale Geschwindigkeit im oberen Teil des Propellerstrahles am Ort des Propellers
$L_z$	Länge eines beliebigen Wasserlinienprofils des Ruders	$v_{SPu}$	Achbiale Geschwindigkeit im unteren Teil des Propellerstrahles am Ort des Propellers
$M_d$	Rudermoment bezogen auf die Drehachse	$v_{So}$	Wirksame Achbiale Geschwindigkeit am oberen Teil Ruders
$M_d$	Propellerdrehmoment	$\Delta v_{Sr}$	Achbiale Zusatzgeschwindigkeit im Propellerstrahl im Abstand $r$ von der Propellerachse
$R_p$	Propellerhalbmesser	$v_{Su}$	Wirksame Achbiale Geschwindigkeit am unteren Teil des Ruders
$S$	Propellerschub	$\Delta v_{S\infty}$	Achbiale Zusatzgeschwindigkeit im Propellerstrahl unendlich weit hinter dem Propeller
$a$	Drehachslage, Abstand des Ruderflächenschwerpunktes von der Drehachse	$v_e = v - \Delta v$	Geschwindigkeit am Ort und bei Abwesenheit des Propellers
$a_0$	Erforderliche Drehachslage, um bei Ruderlage Null und drallfreier Zuströmung volle Balancierung des Ruders zu erhalten	$v_{e0} = v - \Delta v_0$	Geschwindigkeit am Ort und bei Abwesenheit des Propellers, für oberen Teil gemittelt
$a_p$	Erforderliche Drehachslage, um bei Ruderlage Null im Propellerstrahl mit Drall volle Balancierung des Ruders zu erhalten	$v_{eu} = v - \Delta v_u$	Geschwindigkeit am Ort und bei Abwesenheit des Propellers, für unteren Teil gemittelt
$a_o$	Abstand des Flächenschwerpunktes des oberen Ruderteiles von der Drehachse	$v_o$	Wirksame resultierende Geschwindigkeit am oberen Teil des Ruders
$a_u$	Abstand des Flächenschwerpunktes des unteren Ruderteiles von der Ruderachse	$\Delta v_o = v - v_{e0}$	Mittlerer Nachstrom für den oberen Teil des Propellers
$a_{s\alpha}$	Koeffizient des Querkraft-Spantanteiles infolge Anstellwinkel, nichtlinearer Anteil	$v_u$	Wirksame resultierende Geschwindigkeit am unteren Teil des Ruders
$a_{w\alpha}$	Koeffizient des Querkraft-Wasserlinienanteiles infolge Anstellwinkel, linearer Anteil	$\Delta v_u = v - v_{eu}$	Mittlerer Nachstrom für den unteren Teil des Propellers
$c_{Ma} = \frac{M_a}{\frac{\rho}{2} \cdot v_R^2 \cdot F_R \cdot L_R}$	Rudermomentenbeizahl	$x$	Abstand eines Strahlquerschnittes von der Propellerachse, positiv nach hinten
$c_{Ma0} = \frac{M_{a0}}{\frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot F_0 \cdot L_0}$	Rudermomentenbeizahl des oberen Ruderteiles	$z$	Abstand eines beliebigen Wasserlinienprofils des Ruders von der Ruderunterkante
$c_{Ma_u} = \frac{M_{a_u}}{\frac{\rho}{2} \cdot v_u^2 \cdot F_u \cdot L_u}$	Rudermomentenbeizahl des unteren Ruderteiles	$\Gamma_p$	Zirkulation des Propellers
$c_N$	Beizahl der Normalkraft	$\Delta p_o = \frac{v_{e0}}{n \cdot D_p}$	Fortschrittsgrad gemittelt für den oberen Teil des Propellers
$k_m = \frac{\Delta v_S}{\Delta v_{S\infty}}$	Verhältniszahl nach Gutsche	$\Delta p_u = \frac{v_{eu}}{n \cdot D_p}$	Fortschrittsgrad gemittelt für den unteren Teil des Propellers
$k_r = \frac{\Delta v_{Sr}}{\Delta v_{S\infty}}$	Verhältniszahl nach Gutsche	$\Delta R = H_R^2 / F_R$	Seitenverhältnis des Ruders
$m_{s\alpha}$	Koeffizient des Momenten-Spantanteiles infolge Anstellwinkel, nichtlinearer Anteil	$\alpha$	Anströmwinkel des Ruders
$m_{w\alpha}$	Koeffizient des Momenten-Wasserlinienanteiles infolge Anstellwinkel, linearer Anteil	$\Delta \alpha$	Mittlerer Drallwinkel des Propellerstrahls am Ruder
$n$	Propellerdrehzahl (Umdr./s)	$\alpha_o$	Anströmwinkel des oberen Ruderteiles
$r$	Abstand von der Propellerachse	$\Delta \alpha_o$	Für den oberen Teil des Ruders wirksamer Drallwinkel des Propellerstrahls
$u_S$	Tangentialgeschwindigkeit im Propellerstrahl	$\alpha_u$	Anströmwinkel des unteren Ruderteiles
$u_{SP}$	Tangentialgeschwindigkeit im Propellerstrahl am Ort des Propellers	$\Delta \alpha_u$	Für den unteren Teil des Ruders wirksamer Drallwinkel des Propellerstrahls
$u_{SPm}$	Mittlere Tangentialgeschwindigkeit im Propellerstrahl am Ort des Propellers	$\beta$	Ruderlagewinkel
$u_{Sm}$	Mittlere Tangentialgeschwindigkeit im Propellerstrahl	$\beta_a$	Ruderlagewinkel, bei dem das Rudermoment voll ausgeglichen ist
$u_{So}$	Wirksame Tangentialgeschwindigkeit am oberen Teil des Ruders	$\eta_p$	Propellerwirkungsgrad
$u_{Su}$	Wirksame Tangentialgeschwindigkeit am unteren Teil des Ruders	$\eta_a = \left(\frac{a_{w\alpha}}{2\pi}\right) \Delta R = \infty$	Wirkungsfaktor des Querkraft-Wasserlinienanteiles infolge Anstellwinkel $\alpha$
$u_{S0,75}$	Tangentialgeschwindigkeit im Propellerstrahl bei $0,75 \cdot R_p$	$\eta_{\kappa} = \left(\frac{a_{w\kappa}}{\pi/2}\right) \Delta R = \infty$	Wirkungsfaktor des Querkraft-Wasserlinienanteiles infolge Krümmung $\kappa$
$v$	Schiffsgeschwindigkeit (m/s)	$\mu = \left(\frac{m_{w\alpha}}{\pi/2}\right) \Delta R = \infty$	Wirkungsfaktor des Momenten-Wasserlinienanteiles infolge Anstellwinkel $\alpha$
$\Delta v = v - v_e$	Nachstrom am Ort des Propellers	$\rho$	Dichte des Wassers
$\Delta v_p$	Achbiale Zusatzgeschwindigkeit im Propellerstrahl am Ort des Propellers	$\theta$	Polarwinkel im Propellerstrahl-Querschnitt nach Gutsche
$v_R$	Resultierende Anströmgeschwindigkeit am Ruder		
$v_S = v_e + \Delta v_S$	Achbiale Geschwindigkeit im Propellerstrahl		