

36 | 1957

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

H. Thieme

# Kennzahlen von Steuereigenschaften

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

# Kennzahlen von Steuereigenschaften

von H. Th i e m e,

Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Zur Beschreibung der Steuereigenschaften eines Schiffes werden entsprechend den theoretischen Grundlagen und dem nautischen Begriffsinhalt bekannte und ergänzende Kennzahlen definiert. Für die wichtigsten Eigenschaften werden Beispiele und theoretische Anhaltspunkte gegeben. Methoden zur experimentellen Bestimmung der Kennzahlen werden mit einer Übersicht über ihre Beziehungen untereinander verbunden. Eine Intensivierung der Untersuchung von Steuereigenschaften bietet sich damit in einfacher Weise ebenso an wie eine quantitative Auswertung bisher vorwiegend qualitativ beurteilter Versuche. Dies kann in gleicher Weise der systematischen Ordnung experimenteller Ergebnisse wie der Güte der rechnerischen Erfassung von Steuereigenschaften dienlich sein.

- A. Einführung.
- B. Einfache Kennzahlen aus den Grundlagen stationärer Bewegungen.
- C. Kennzahlen aus dem Ablauf instationärer Bewegungen.
- D. Experimentelle Methoden und formale Zusammenhänge zwischen den Kennzahlen.
- E. Folgerungen.
- F. Schrifttum.

## A. Einführung

Die Behandlung von Steuereigenschaften im Rahmen der Schiffstheorie und des Versuchswesens hat nur eine relativ kurze Entwicklungsgeschichte hinter sich und hat normalerweise auch nicht die Bedeutung, die anderen Gebieten, wie z. B. Widerstand und Antrieb, zukommt. Dennoch kommen immer wieder Fälle vor, bei denen die Steuereigenschaften des Schiffes den Vorrang vor seinen anderen Eigenschaften und auch seinen Leistungen haben. Bei Sonderfahrzeugen gilt dies oft schon für das Entwurfsstadium. Bei normalen Typen tritt dies gelegentlich bei ungünstigen Auslegungen — besonders auch bei Umbauten — auf. Diese Anlässe sind zahlreich genug gewesen, um das Bemühen nach erweiterten Ergebnissen auf dem Gebiete der Steuereigenschaften zu verstärken. Das Schrifttum (hier Abschnitt F.) ist besonders in letzter Zeit stark angewachsen. Von öffentlicher Seite ist auch in Deutschland Interesse und Förderung lebendig geworden. Insbesondere die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat bereits in der Vergangenheit helfend eingegriffen und auch für die Zukunft ihre Hilfe gern zugesagt. Dank dieser Unterstützung konnte auch die hier vorliegende Arbeit durchgeführt werden. Sie steht im Rahmen umfangreicherer Untersuchungen theoretischer und experimenteller Art und soll diese beiden Methoden der Untersuchung möglichst eng miteinander zu verbinden gestatten und dabei zugleich das gesamte Gebiet mit seinen vielfältigen Spezialitäten auch programmäßig beschreiben.

Besonders auch zu diesem Zweck muß der Begriff Steuereigenschaften durch eine Aufgliederung noch etwas näher beschrieben werden. Auch ist der genannte Begriff aus dem Wort heraus leider nicht so begriffsklar, wie etwa die Begriffe Widerstand und Antrieb es sind. So findet man das Gebiet häufig auch mit Manövriereigenschaften bezeichnet. Vielfach heißt es auch Steuer- und Manövriereigenschaften. Andererseits werden zum Teil aber auch die Manövriereigenschaften als ein Teilgebiet der Steuereigenschaften angesehen. Das andere Teilgebiet der Steuereigenschaften ist dann das Steuern (auch Kurseigenschaften oder Kurshalten) genannt. Hier soll also das ganze durch die folgenden Gliederungsgesichtspunkte umrissene Gebiet als „Steuereigenschaften“ bezeichnet sein.

- a) Freifahrt voraus
- b) Freifahrt zurück
- c) Geschleppt
- d) Schleppend
- e) Aus dem Stand auf Voraus
- f) Aus dem Stand auf Zurück
- g) Am Stand
- h) Traversieren (einschl. Quertreiben und Querverholen)
- i) Kurshalten
- j) Drehen
- k) Stützen
- l) Unbegrenztes Fahrwasser bei ruhigem Wetter
- m) Begrenztes Fahrwasser
- n) Wind und Strom
- o) Seegang
- p) Normalantrieb (Längsschub)
- q) Ohne Antriebsanlage
- r) Mit schwenkbarem Schub
- s) Mit Aktivrudder (Schubrudder)
- t) Mit Querschub
- u) Mit gestoppter Antriebsanlage
- v) Unter Segel

Die Gesichtspunkte können wie vorstehend zusammengestellt in die Gruppen „Fahrzustand“, „Eigenschaft“, „Ortsbedingung“ und „Antriebszustand“ eingeordnet werden. Die Reihenfolge ist sowohl bei den Gruppen wie auch innerhalb der Gruppen etwa nach der Häufigkeit des Interesses gewählt. Sie entspricht auch der Behandlung in dieser Arbeit, so daß mit der Nennung dieser Gesichtspunkte, die am Anfang dieser Arbeit gegebene grobe Gliederung ergänzt wird.

Damit erscheint der Begriff, der hier Steuereigenschaften genannt wird, im unmittelbaren Sinne bereits ausreichend beschrieben. Es sind also im wesentlichen die Eigenschaften der Bewegungen des Schiffes, die mit einer Drehung um seine Vertikalachse und einer Bewegung in Richtung seiner Querachse verbunden sind. Es sind also immer die Eigenschaften des ganzen Schiffes. Diese Eigenschaften sind natürlich die Folge der hydrodynamischen Reaktionen seiner einzelnen Bauteile auf diese Bewegungen. Trotz der zwischen diesen Bauteilen — z. B. Ruder und Propeller — bestehenden Interferenzen mit ihren oft recht unübersichtlich erscheinenden Konsequenzen für die Gesamtkräfte kann man aber auf eine solche Aufgliederung der Gesamtkräfte nicht verzichten, wenn die Eigenschaften des gesamten Schiffes nicht nur erkannt, sondern durch Ordnung und Aufgliederung der Bedingungen auch in ihren Ursachen erklärt werden sollen.

Nach dem heutigen Stand kann man wohl mit der Berücksichtigung der nachstehend genannten Bauteile eines Schiffes bei der Behandlung von Steuereigenschaften auskommen.

- Unterwasserschiff (einschl. Kiel und Schlingerkeile)
- Ruder
- Flossen (einschl. Schlingerflossen)
- Normalpropeller (für Längsschub)
- Schaufelräder
- Kortdüsen
- Voith-Schneider-Propeller
- Aktivrudder (Schubrudder)
- Schwenkdüsen (Düsenräder, Ringrudder am Propeller)
- Schwenkpropeller
- Querpropeller (Querkanal)
- Überwasserschiff
- Takelage

Als Kennzahlen sollen nun experimentell oder theoretisch ermittelte, ausgezeichnete Werte bezeichnet werden, die mit ihrer Größe relativ zu den Schiffs- oder Ortsbedingungen eine oder mehrere Eigenschaften des gesamten Schiffes zu bewerten gestatten.

## B. Einfache Kennzahlen aus den Grundlagen stationärer Bewegungen

Die zu betrachtenden Bewegungszustände eines Schiffes können zeitlich veränderlich und auch unveränderlich sein. Bei der Durchführung eines Manövers wechseln meist stationäre Bewegungszustände mit instationären Bewegungszuständen ab. So z. B. Geradeausfahrt, Andrehen, Drehkreis, Herauskommen und wieder Geradeausfahrt. Oft fällt auch der zwischen zwei instationären Zuständen liegende stationäre Zustand aus, wenn z. B. die Zeit zwischen Ruderlegen und Stützen relativ kurz ist. Aus beiden Zuständen nun können aufschlußreiche Kennzahlen gewonnen werden. Die voraussetzungslose Behandlung instationärer Zustände liefert auf theoretischem Wege — ganz abgesehen von dem erheblichen Aufwand, um zu Zahlenergebnissen zu gelangen — keine für die Bildung von Kennzahlen genügend einfachen Zusammenhänge zwischen Form und Eigenschaft. Aus der Betrachtung stationärer Bewegungszustände des Schiffes kann eine große Zahl von Eigenschaftskennzahlen abgeleitet werden. Aber auch ein wesentlicher Teil der instationären Eigenschaften läßt sich leicht und durchsichtig dadurch erfassen, daß man die instationäre Bewegung als die Aneinanderreihung verschiedener stationärer Zustände annähert, also quasistationär behandelt. Auf hiermit erzielte Ergebnisse ist schon in [14] näher eingegangen worden. Dies Verfahren steht auch im Vordergrund der Betrachtungen dieser Arbeit. Der Vergleich mit instationären Methoden wie mit Erfahrung und Experiment rechtfertigt diese Vereinfachung.

### BA. Freifahrt

Dieser wichtigste Teil der Steuereigenschaften ergibt naturgemäß auch die größte Zahl von Kennzahlen. Üblicherweise denkt man meist überhaupt nur an den Zustand des voraus oder rückwärts mit eigener Kraft oder im Auslauf fahrenden Schiffes normaler Bauart und normaler Bedingungen wenn das Wort Steuereigenschaften oder Manöviereigenschaften gebraucht wird. Gerade in diesem Zustand ist es aber weniger das eigentliche „Manövrieren“ — d. h. ändern eines Bewegungszustandes —, das zu Beanstandungen Anlaß gibt, als vielmehr das Einhalten eines Bewegungszustandes also das „Steuern“ oder Kurshalten.

### BAA. Vorausfahrt

Die Vorausfahrt — im Gegensatz zur Rückwärtsfahrt etwa — birgt zwar meist nicht so viele Probleme, ist aber wegen der ungleich größeren Häufigkeit dieses Fahrtzustandes von so hervorragender Bedeutung, daß man anderer Fahrtzustände meist erst dann gedenkt, wenn deren Eigenschaften bei einem Schiff einmal so schlecht ausgefallen sind, daß dessen Verwendung in unökonomischer Weise eingeschränkt erscheint. Sowohl die nur rein schematischen wie auch die theoretischen Behandlungsmethoden gehen von diesem Zustand aus. So benutzt man den für nicht zu große relative Geschwindigkeiten hierfür gut ausreichenden etwa quadratischen Zusammenhang von Kräften und Geschwindigkeit sowie von Kräften und Lateralfläche, um die Behandlung in üblicher Weise dimensionslos durchzuführen. In [14] ist die Zweckmäßigkeit der Wahl der Bezugsgrößen eingehend diskutiert worden. Es werden danach der Staudruck  $v^2 \cdot \rho/2$ , die Lateralfläche  $F_L$  und für das hier besonders interessierende Giermoment um die Vertikalachse des Schiffes die Momentenbezugsgröße  $L_L$  verwendet. Dabei ist diese Momentenbezugsgröße im allgemeinen nur wenig von der Länge zwischen den Loten verschieden und definiert durch

$$L_L = \frac{1}{F_L} \cdot \int_0^T L_z^2 \cdot dz.$$

Nach [14] genügt für eine gute Annäherung dieses Wertes — genau bei trapezförmigem Lateralplan — mit  $\tau$  als Völligkeit der Lateralfläche  $\tau = F_L/(L \cdot T)$  die Beziehung

$$L_L = \frac{L}{3} \left( 4 \cdot \tau + \frac{1}{\tau} - 2 \right).$$

Die hydrodynamisch ausgezeichnete Bezugsachse für das Giermoment des Unterwasserschiffes ist die Vertikalachse durch

den Flächenschwerpunkt des Lateralplanes. Die Beizahl  $c_M$  des hierauf bezogenen Giermomentes ist

$$c_M = \frac{M}{\rho/2 \cdot v^2 \cdot F_L \cdot L_L}$$

und die Beizahl der zugehörigen Querkraft  $c_Q$  ist

$$c_Q = \frac{Q}{\rho/2 \cdot v^2 \cdot F_L}$$

In Abb 1 sind die Kräfte bereits als Beizahlen eingezeichnet. Dort ist ein Schiff in einem allgemeinen Bewegungszustand durch den Radius der Drehung  $R$  und seinen Gierwinkel  $\alpha$  gekennzeichnet. Als Drehung schlechthin wird der dimensionslose Wert  $\kappa = L_L/R$  bezeichnet. Für Betrachtungen über die Eigenschaften interessiert das Giermoment des gesamten Schiffes, bezogen auf den Schwerpunkt der Verdrängung, der im Abstand  $s$  vom Lateralschwerpunkt liegend eingetragen ist. Dieses Giermoment wird mit  $M$ , und seine Beizahl mit  $c_M$  bezeichnet. Ausgehend von diesem Moment ist bereits in [14] dargelegt worden, daß die infolge eines bestimmten Giermomentes am Schiff auftretenden Wirkungen für das nautische Gefühl durch die etwa auf der Back auftretenden Beschleunigungen beschrieben werden können.

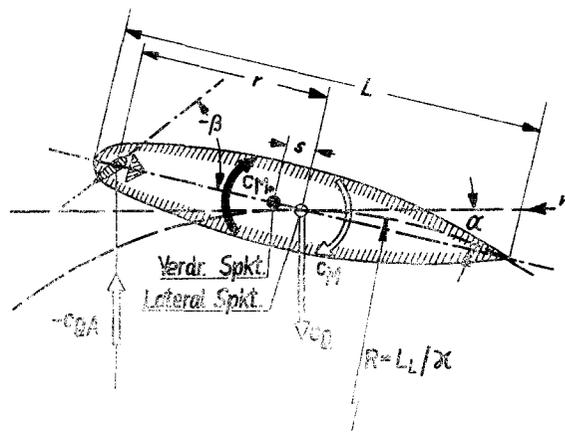


Abb. 1: Schiff bei Freifahrt voraus

Diese Beschleunigung ist:

$$b = c_M \cdot \frac{F_L \cdot L_L \cdot g}{\forall \cdot 4} \cdot \left( \frac{Fr}{i_z / L_L} \right)^2 \quad (1)$$

Dabei ist mit  $\forall$  die Verdrängung, mit  $g$  die Erdbeschleunigung, mit  $Fr$  die Froudesche Zahl und mit  $i_z$  der Trägheitsradius um die Vertikalachse bezeichnet. Im Normalfall wird man beim Vergleich der Steuereigenschaften verschiedener Schiffe — diesem Zwecke sollen ja die „Kennzahlen“ dienen — den beschleunigungsvermehrenden Einfluß eines höheren Froudeschen Zahl und den gegenteiligen Einfluß eines größeren Trägheitsradius ausschalten wollen, da beide Einflüsse so gut wie unveränderlich durch die Zweckbestimmung des Schiffes vorgegeben sind. Unter dieser Normaleinschränkung verbleibt also als dimensionsloses Vergleichsmaß für das Giermoment der Ausdruck:

$$c_M \cdot \frac{F_L \cdot L_L}{\forall} = \frac{M}{\rho/2 \cdot v^2 \cdot \forall} = \frac{M}{q \cdot \forall} \quad (2)$$

Zur Bildung der Kennzahlen für nautische Zwecke wird man auf diese Darstellung zurückgreifen, während für theoretische und hinsichtlich der Entstehung der Kräfte systematische Überlegungen die vorerwähnte einfache Beizahl  $c_M$  geeigneter ist.

Um einfache Aussagen über die Fähigkeit eines Schiffes, einen geraden Kurs zu halten (Kurstetigkeit), oder allgemein einen beliebig kreisförmigen Weg einzuhalten (Bahntetigkeit), oder vom geraden Kurs auf Kreisbahn überzugehen (Drehen), oder schließlich von der Kreisbahn wieder auf geraden Kurs überzugehen (Stützen), machen zu können, ist das sogenannte Giermomentendiagramm entwickelt wor-

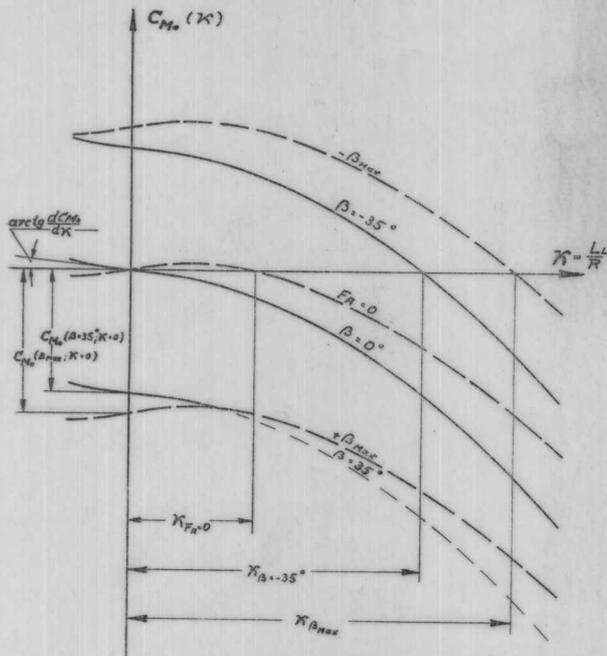


Abb. 2: Schema für das Giermomentendiagramm eines Schiffes von mäßiger Kursstetigkeit

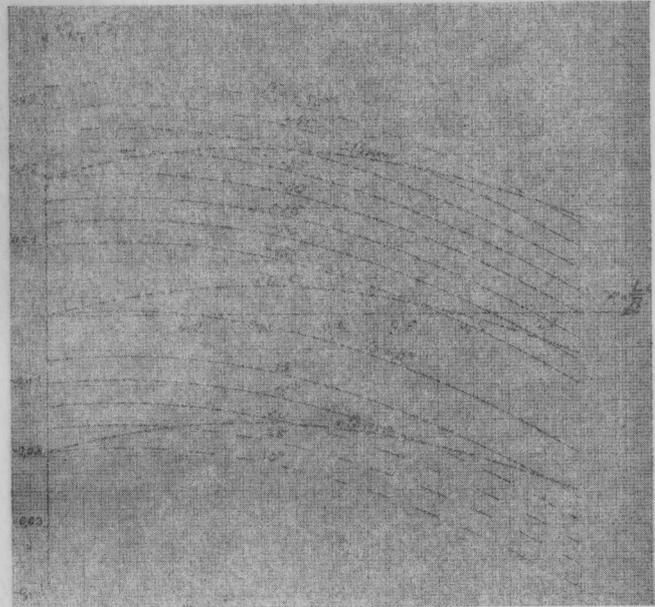


Abb. 4: Beispiel für das Giermomentendiagramm eines nicht kursstetigen Schiffes. (Nach Näherungsrechnung für einen Minenräumer)

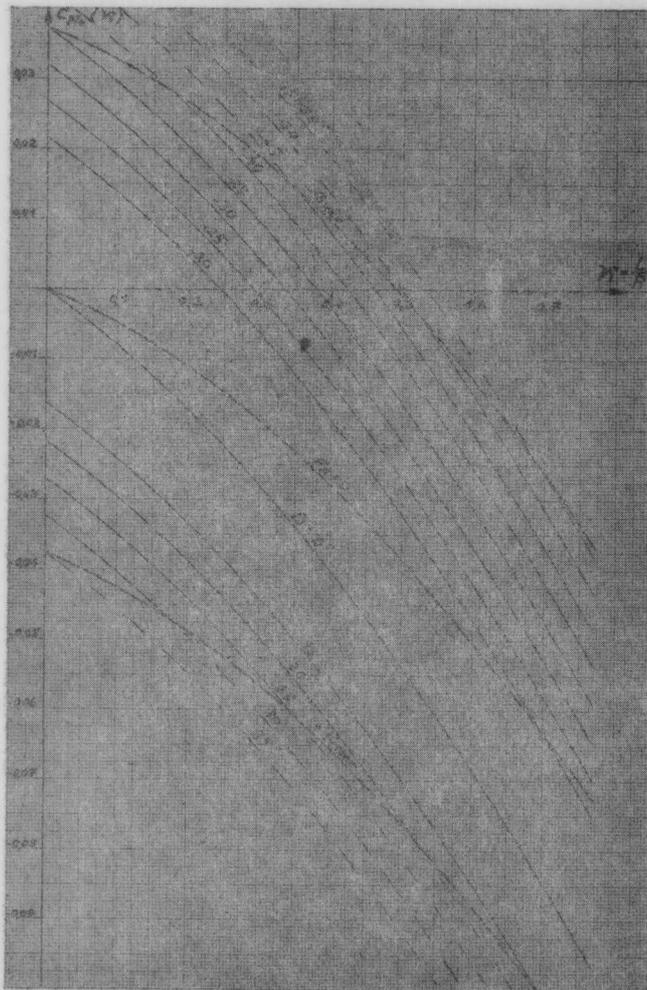


Abb. 3: Beispiel für das Giermomentendiagramm eines Schiffes von sehr hoher Kursstetigkeit. (Nach Näherungsrechnung für eine Barkasse)

den. (Abb. 2 bis 4.) Ihm liegt eine stationäre Betrachtung zugrunde, die den in Abb. 1 skizzierten Drehzuständen des Schiffes von der Geradeausfahrt bis zum engsten Drehkreis schrittweise folgt, mit der Bedingung, daß in jedem Augenblick der Bewegung die Summe aller Querkräfte verschwindet. Die Zentrifugalkraft muß also mit dem hydrodynamischen Querkräften des Schiffsrumpfes ( $c_Q$ ) und aller Anhänge ( $c_{QA}$ ) im Gleichgewicht sein:

$$c_Q + c_{QA} - 2 \cdot \frac{v}{F_L \cdot L_L} \cdot \kappa = 0 \quad (3)$$

(In (3) ist abweichend von früherer Darstellung die Berücksichtigung der „mitbeschleunigten“ Wassermasse in den auf der Drehung  $\kappa$  beruhenden Anteilen der Kräfte enthalten.)

Ebenfalls im Gleichgewicht müssen natürlich Widerstand und Antriebskraft sein, was in Abb. 1 nicht besonders mehr ausgedrückt ist. Es verbleibt dann zur Darstellung das Giermoment  $c_M$  in Abhängigkeit von der Drehung  $\kappa = L_L/R$  und dem Ruderwinkel  $\beta$  als Parameter, wie es schematisch in Abb. 2 gezeigt ist. Die Momentenkurve für Schiff und Ruder ( $F_A = 0$ ) stellt die einfachste Form des Giermomentendiagrammes dar, wie es zuerst von Davidson (14. Zitat in [14]) angegeben worden sein dürfte. Die dort veröffentlichten Meßergebnisse enthalten aber auch bereits die bei verschiedenen Ruderwinkeln erzielten Drehungen mit Momentenausgleich  $c_M = 0$ . Die Beispiele in Abb. 3 und 4 sind Inter- und Extrapolationen aus den Versuchsergebnissen aus [11] bzw. von Davidson entnommen, die auf Grund der in [14] gezeigten Möglichkeiten der Rechnung bzw. einer vereinfachten Abwandlung vertretbar erscheinen. Besonders angenehm ist, daß das Giermomentendiagramm — auch in der in Abb. 3 und 4 gezeigten vollständigen Form — sowohl durch Rundlaufversuche relativ rasch ausgemessen werden kann [11] als auch aus den Strömungskräften an Rumpf und Anhängen berechnet werden kann [14]. Eine solche Rechnung führt unter bestmöglicher Berücksichtigung aller Einflüsse auch bei starken Drehungen (engen Drehkreisen) zu einer quantitativ durchaus zu bewältigenden Formulierung, wie die in [14] gerechneten Beispiele zeigen, die qualitative Übersicht, die im Hinblick auf die Gewinnung von Kennzahlen so nützlich sein könnte, geht dabei aber doch etwas verloren. Insbesondere ergibt sich auch  $c_M$  nicht mehr als leicht differenzierbares und integrierbares Polynom in der Darstellung des Giermomentendiagramms. Dieserhält man vielmehr erst, wenn man in die Endformeln von [14] eine ganze Reihe von Näherungen einführt. Es liegt daher nahe, solche

Näherungen von vornherein zur Aufstellung der Beziehungen von Giermoment und Querkraft mit Gierwinkel  $\alpha$  und Drehung  $\kappa$  und den wichtigsten Baugrößen des Schiffes und der Anhänge zu verwenden. Unter Vernachlässigung kleinerer Komponenten der Ruderkraft und insbesondere der nicht linearen Anteile von Ruderquerkraft und von Rumpfquerkraft und Moment infolge Schräganströmung, kann man schließlich den formalen Aufwand auf die Beziehungen (4) und (5) beschränken.

$$c_{M.} = m_{sz} \cdot \kappa^2 + m_{wa} \cdot \alpha + \frac{s}{L_L} (a_{wa} \cdot \alpha + a_{wz} \cdot \kappa) - \frac{F_A}{F_L} \cdot \frac{r}{L_L} + (\beta + \frac{r}{L_L} \cdot \kappa) \cdot a_{waR} \quad (4)$$

$$\tilde{a}_{wa} \cdot \alpha + a_{wz} \cdot \kappa + \frac{F_A}{F_L} \cdot (\beta + \frac{r}{L_L} \cdot \kappa) \cdot \tilde{a}_{waR} - \frac{2\forall}{F_L \cdot L_L} \cdot \kappa = 0 \quad (5)$$

Dabei ist nach [14]:

- $m_{sz}$  der Koeffizient für das nicht lineare Moment der Spantumströmung infolge Drehung,
- $a_{wz}$  der Koeffizient für die Querkraft der Wasserlinienumströmung infolge Drehung,
- $\tilde{m}_{wa}$  der Koeffizient für näherungsweise linearisiertes Moment infolge Schräganströmung,
- $\tilde{a}_{wa}$  der Koeffizient für näherungsweise linearisierte Querkraft infolge Schräganströmung,
- $\tilde{a}_{waR}$  der Koeffizient für den näherungsweise linearisierten Beitrag des Ruders zur Querkraft des Schiffes infolge Schräganströmung des Ruders und
- $F_A/F_L$  die gewissermaßen relative Größe der effektiven Anhängflächen. Dabei ist der Einfluß von Nachstrom des Schiffes, Propeller und anderer Anhänge eingeschlossen, so daß man  $F_A$  als eine Art reduzierte Ruderfläche ansehen könnte.

Damit besteht also ein — für Übersichtszwecke ausreichend genäherter — linearer Zusammenhang zwischen der Drehung  $\kappa$  und dem Gierwinkel  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{1}{\tilde{a}_{wa}} \left[ \kappa \left( \frac{2\forall}{F_L \cdot L_L} - a_{wz} - \frac{r}{L_L} \cdot \tilde{a}_{waR} \cdot \frac{F_A}{F_L} \right) - \beta \cdot \tilde{a}_{waR} \cdot \frac{F_A}{F_L} \right] \quad (5a)$$

(5a) mit (4) kombiniert, liefert dann den gesuchten, einfachen Zusammenhang von Giermomentenbeizahl  $c_{M.}$  und Drehung  $\kappa$ , der der Übersicht halber mit den Definitionen (7) bis (9) in (6) schematisch angedrückt ist.

$$c_{M.} = c_{M.0} + \left( \frac{dc_{M.}}{d\kappa} \right)_0 \cdot \kappa + \frac{1}{2} \left( \frac{d^2 c_{M.}}{d\kappa^2} \right) \cdot \kappa^2 \quad (6)$$

$$c_{M.0} = -\beta \cdot \tilde{a}_{waR} \cdot \frac{F_A}{F_L} \left( \frac{r}{L_L} + \frac{s}{L_L} + \frac{m_{wa}}{\tilde{a}_{wa}} \right) \quad (7)$$

$$\left( \frac{dc_{M.}}{d\kappa} \right)_0 = \left( \frac{s}{L_L} + \frac{m_{wa}}{\tilde{a}_{wa}} \right) \left( \frac{2\forall}{F_L \cdot L_L} - a_{wz} - \frac{F_A}{F_L} \cdot \frac{r}{L_L} \cdot \tilde{a}_{waR} \right) + \frac{s}{L_L} \cdot a_{wz} - \left( \frac{r}{L_L} \right)^2 \frac{F_A}{F_L} \cdot \tilde{a}_{waR} \quad (8)$$

$$\left( \frac{d^2 c_{M.}}{d\kappa^2} \right) = 2 \cdot m_{sz} \quad (9)$$

In Abb. 3 ist nun ein Giermomentendiagramm gezeichnet, das unter Verwendung einiger experimentell ermittelter Punkte [11] mit Benutzung von (6) und (7) als Interpolationsformeln gewonnen worden ist. Es entspricht so etwa den Verhältnissen einer Hafenbarkasse von hoher Kursstetigkeit. Ähnlich ist für ein nicht kursstetiges Schiff die Abb. 4 in Anlehnung an Versuchsergebnisse von Davidson (Nr. 14 in [14]) gerechnet worden. In beiden Diagrammen ist durch die Kurven  $-\beta_{max}$  und  $+\beta_{max}$  mit einer gewissen quantitativen Willkür — die hydrodynamische Begrenzung der Ruderwirksamkeit eingetragen. Dabei ist in einfachster

Weise angenommen, daß bei Überschreiten eines bestimmten örtlichen Anströmwinkels am Ruder die Wirksamkeit abrupt so stark abfällt, daß  $\beta_{max}$  die praktische Grenze der Ruderwirkung darstellt. In (10) ist ein für Abschätzungen brauchbarer Anhaltswert für die Größe von  $\beta_{max}$  abhängig von der Drehung  $\kappa$  angegeben.

$$\beta_{max, \kappa}^0 \approx \beta_{max, \kappa=0}^0 - 28,65 \cdot \kappa \quad (10)$$

Da — vgl. Abb. 1 — bei Voraussahrt ein Winkel  $-\beta$  zum Drehen und ein Winkel  $+\beta$  zum Stützen gehört, drückt sich in (10) die nautische Erfahrung aus, daß beim Drehen das Maximum an Wirkung erst bei höheren Ruderwinkeln als bei der Geradeausfahrt erreicht wird, während es beim Stützen bereits bei kleinerem Winkel auftritt. Der im Sinne der Drehung wirksame „hydrodynamische“ Anströmwinkel des Ruders  $\alpha_R$  wird also mit stärker werdender Drehung  $\kappa$  immer kleiner. Bei einer bestimmten Drehung ist er dann überhaupt zu Null geworden, und die Verhältnisse sind etwa die gleichen wie beim Zustand Schiff ohne Ruder, der in den Abb. 3 und 4 auch mit dargestellt ist. Bei diesem Zustand ist dann auch die Größe der Ruderfläche unerheblich für die Drehfähigkeit des Schiffes. Man kann auch sagen, daß bei unendlich großer Ruderfläche ein Maximum an Drehung gegeben ist, das allein vom Ruderwinkel abhängig ist, wie es (11) als eine Näherung angibt, die ebenso wie (10) auf der künstlichen Linearisierung der Ruderwirkung beruht.

$$\kappa_{max} \approx -\beta^0 / 28,65^\circ \quad (11)$$

Diese in (11) ausgedrückte interessante Konsequenz aus dem Giermomentendiagramm entspricht praktischen Erfahrungen von Möckel und Stemmer (Zitat Nr. 4 in [15]) bei Untersuchungen mit Variation der Rudergröße.

Dieser kurze Überblick über die Möglichkeiten, mit gewissen Rechenansätzen eine übersichtliche Beziehung zum Giermomentendiagramm herzustellen, geschieht ja, um eine genügend einfache, aber auch theoretisch vertretbare Grundlage

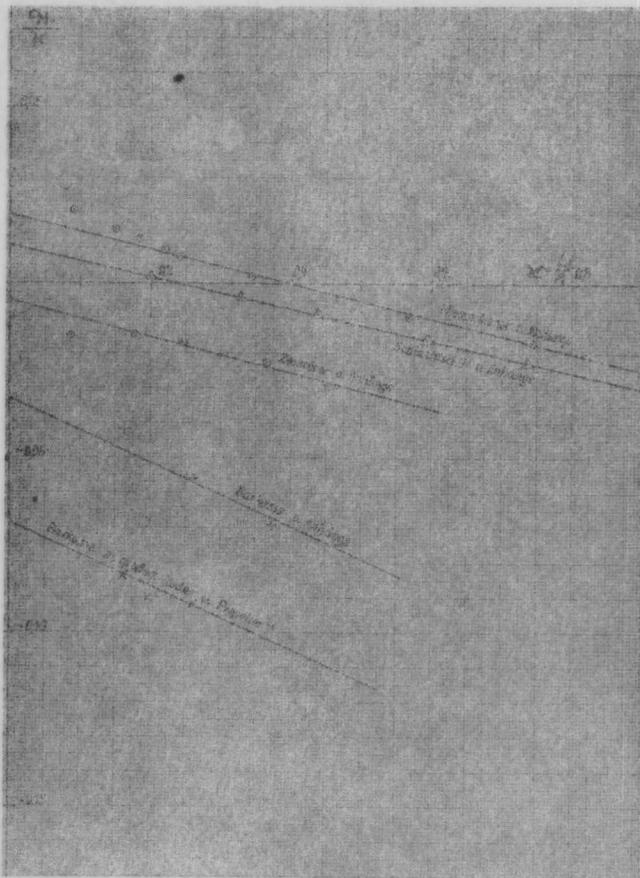


Abb. 5: Angenähert lineare Darstellung des auf die Drehung bezogenen Giermomentes. Barkasse nach [15], übrige nach Davidson (14. Zit. in [14])

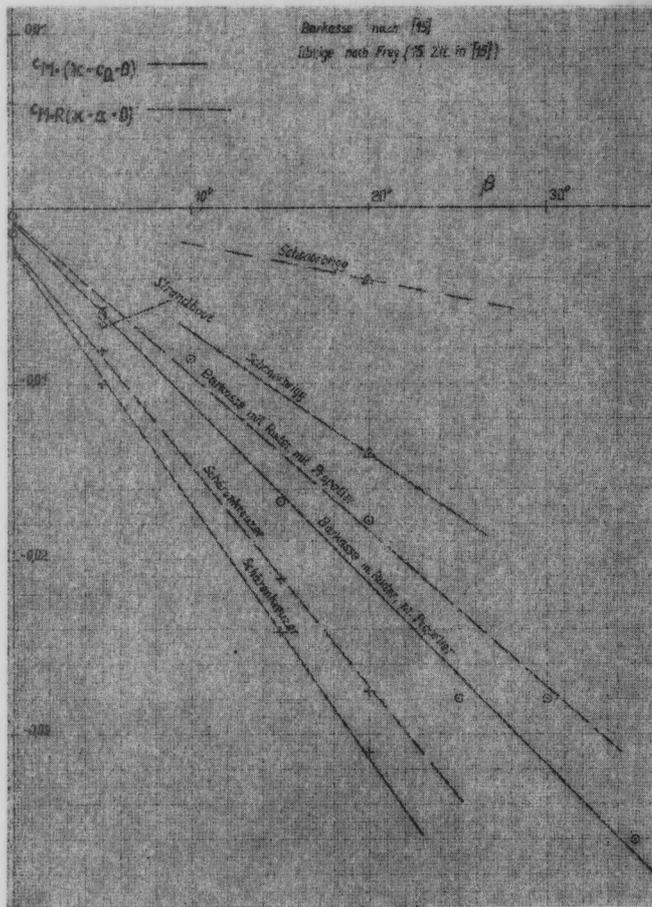


Abb. 6: Steuermoment und Ruderausschlag

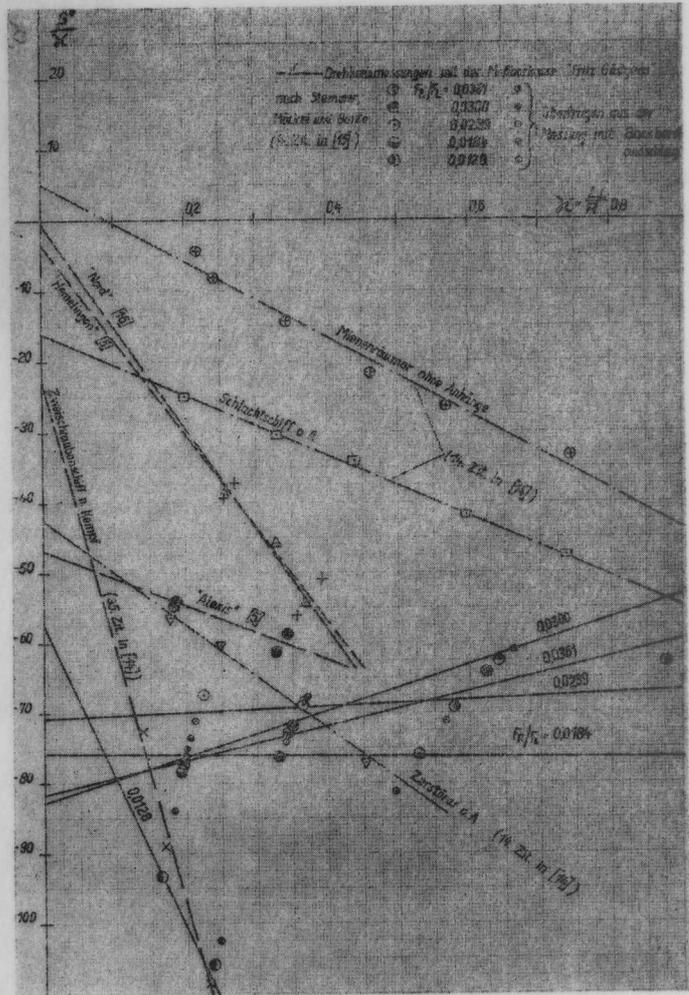


Abb. 7: Ruderausschlag und Drehung

zur Bildung von Kennzahlen der verschiedenen Eigenschaften zu gewinnen. Da leider heute noch kein ausreichend umfangreiches experimentelles Material zur allgemeinen Nachprüfung zur Verfügung steht, sollen noch mit vorhandenen Versuchsergebnissen wenigstens einige Stichproben zur Erhärtung durchgeführt werden. In der Abb. 5 ist das für den Zusammenhang von Momentenbeizahl und Drehung, in Abb. 6 für Steuermoment und Ruderwinkel und in Abb. 7 für Ruderwinkel und Drehung geschehen. Die eingetragenen Meßpunkte sind dabei bewußt nur durch Gerade gemittelt worden, wie es den Ansätzen (6) und (9) entsprechen müßte.

Für die Geraden in Abb. 5 gilt ja nach (6) ohne Anhänge bzw. ohne Ruderausschlag:

$$\frac{c_{M.}}{z} = \left( \frac{dc_{M.}}{dz} \right)_0 + \frac{1}{2} \left( \frac{d^2c_{M.}}{dz^2} \right) \cdot z \quad (12)$$

In Abb. 6 ist sowohl das Giermoment infolge Ruderausschlag bei Drehung  $z = 0$  und Querkraft  $c_Q = 0$  entsprechend (7) wie auch das Giermoment infolge Ruderausschlag bei Drehung und Gierwinkel Null entsprechend (13) dargestellt. Im letzteren Falle, der dem klassischen „Initial Turning Moment“ entspricht, ist die Querkraft natürlich verschieden von Null.

$$c_{M.} (z = \alpha = 0) = -\beta \cdot a_{waR} \frac{F_A}{F_L} \left( \frac{r}{L_L} + \frac{s}{L_L} \right) \quad (13)$$

Schließlich ist noch eine weitere Kontrolle der theoretischen Ansätze durch experimentelle Punkte in Abb. 7 durchgeführt. Dort sind sowohl aus Manövrierversuchen wie auch aus Rundlaufversuchen die bei einer bestimmten Drehung  $z$  zum Ausgleich von Querkraft und Giermoment nötigen Ruderwinkel  $\beta$  angegeben. Sie müßten also der mit  $c_{M.} = 0$  aus (6) und (7) gewonnenen Beziehung (14) entsprechen:

$$\text{mit } dc_{M.}/dz = -a_{waR} \frac{F_A}{F_L} \left( \frac{r}{L_L} + \frac{s}{L_L} + \frac{m_{wa}}{a_{wa}} \right)$$

$$0 = \frac{dc_{M.}}{d\beta} \cdot \beta + \left( \frac{dc_{M.}}{dz} \right)_0 \cdot z + \frac{1}{2} \left( \frac{d^2c_{M.}}{dz^2} \right) \cdot z^2$$

und daraus

$$\frac{\beta}{z} = \frac{(dc_{M.}/dz)_0}{-dc_{M.}/d\beta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(d^2c_{M.}/dz^2)}{-dc_{M.}/d\beta} \cdot z \quad (14)$$

Auch diese Kontrolle in Abb. 7 erscheint so befriedigend, daß in (14) wie in (13) und (12) brauchbare Interpolationsformeln und damit in (6) und (7) nicht nur genügend handliche, sondern auch quantitativ verwendbare Näherungen gesehen werden können. Die Ableitung der Kennzahlen in einzelnen kann nun hierauf aufgebaut werden.

**BAAA. Kurshalten**

Dieser Begriff wird auch mit Kurstätigkeit, Kursstabilität oder Steuern schlechthin bezeichnet. Trotz so unterschiedlicher Bezeichnungen, die sämtlich sehr weit verbreitet sind, besteht zum Glück kein Unterschied in den Auffassungen über den Begriffsinhalt. Man versteht allgemein darunter die Fähigkeit eines Schiffes, mit hydrodynamisch auf Null liegendem Ruder, nach beliebiger Störung unter ungestörten Bedingungen wieder auf einen geraden Kurs zu kommen. Praktisch ist ein solches Schiff mit geringen Ruderausschlägen und auch ohne hohe Ansprüche an das Vorahnen des Rudergängers für das „Kommen“ des Schiffes auf Kurs zu halten, d. h., es ist leicht zu steuern. Umgekehrt setzt das nicht kursstetige Schiff sehr viel mehr Gefühl beim Rudergänger voraus und „versteuert“ bei gleichqualifizierter Bedienung bedeutend mehr. Bei sehr starker Kursunstetigkeit wird dann die Kursfahrt immer mehr zur „Schlängelfahrt“. Als Kriterium der Kursstetigkeit ist über-

einstimmend sowohl aus instationärer Betrachtung (Weinblum, Davidson und Schiff, Horn) wie auch aus den hier wieder verwendeten einfachen stationären Betrachtungen die Änderung des Giermomentes mit der Drehung gefunden worden. Verläuft diese Änderung im Sinne der Drehung, ist das Verhalten unstabil, das Schiff also unstetig; umgekehrt mit Momentenänderung entgegen der Drehung erhält man ein kursstetiges Schiff. Im Unterschied zur instationären Betrachtungsweise ist aus der stationären, der das Giermomentendiagramm zugrunde liegt, sehr leicht die Größe dieser Momentenänderung anzugeben. Man kann sie jedem Giermomentendiagramm als Tangente an die Momentenkurve bei  $\alpha = 0$  entnehmen. Es ist daher zugleich mit der Anwendung der stationären Betrachtungsweise und der Einführung des vollständigen Giermomentendiagrammes nach Abb. 2 bis 4 diese Momentenänderung als Maß der Kursstetigkeit vorgeschlagen worden, (15.)

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \left( \frac{dc_M}{d\alpha} \right)_0 = \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \left[ \frac{\partial c_M}{\partial \alpha} + \frac{\partial c_M}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial c_0}{\partial \alpha} \right]_{\alpha = \beta = 0} \quad (15)$$

In (15) ist dabei die aus rein hydrodynamischen Zweckmäßigkeitsgründen definierte Beizahl  $c_M$  mit dem — früher schon einmal als „mittleres“  $L/B$  bezeichneten — Verhältnis  $F_L \cdot L_L / \sqrt{V}$  multipliziert worden, um den in (2) hergeleiteten nautischen Bedingungen an solche Kennzahlen zu genügen.

Abgesehen also von diesem Faktor, ist die Kursstetigkeit die Konstante des zweiten Gliedes der Giermomentengleichung (6). Aus Abb. 5 kann man auch Zahlenwerte hierfür gewinnen. Sie sind natürlich quantitativ noch völlig unzureichend, um etwa Sollwerte angeben zu können. Aus den Ergebnissen für den Minenräumer und für die Barkasse kann man gewisse Größenordnungen abschätzen. Man hat mit

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \left( \frac{dc_M}{d\alpha} \right)_0 = -0,4 \text{ sicher eine sehr gute}$$

und mit

$$0,1 \text{ eine unangenehm schlechte}$$

Kursstetigkeit zu erwarten.

Überträgt man das für den geraden Kurs Ausgeführte sinngemäß auf die Stetigkeit bei der Kreisfahrt, so kommt man zum analogen Begriff der Bahnstetigkeit, der dann also die Kursstetigkeit und die Drehstetigkeit zusammenfassen würde. Für die von der Drehung  $\alpha$  abhängige Bahnstetigkeit kann man aus (6) die allgemeine Beziehung (16) angeben.

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \frac{dc_M}{d\alpha} = \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \left( \frac{dc_M}{d\alpha} \right)_0 + \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \left( \frac{d^2 c_M}{d\alpha^2} \right) \cdot \alpha \quad (16)$$

Die Bahnstetigkeit (16) läßt sich also als die Summe aus Kursstetigkeit und dem Produkt von Stetigkeitszuwachs und Drehung interpretieren. Dabei ist also der

$$\text{Stetigkeitszuwachs} \equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \frac{d^2 c_M}{d\alpha^2} \quad (17)$$

(17) stellt eine weitere ergänzende Kennzahl für die Beurteilung des Kurshalten eines Schiffes dar. Z. B. wird ein an sich nach (15) nicht kursstetiges Schiff dennoch um so leichter zu steuern sein, je größer der Stetigkeitszuwachs ist. Diese Kennzahl ist also einmal wichtig für die Beurteilung der nautischen Auswirkungen von Kurs-Unstetigkeit eines Schiffes und zum andern führt es auch zur Beurteilung des Kurshalten im Seegang eines an sich kursstetigen Fahrzeuges. Mit Hilfe von (9) und der in [14] unter (17) für den Koeffizienten  $m_{s\alpha}$  gemachten Angaben kann man in (18) den sehr einfachen Zusammenhang dieser Kennzahl mit den Bau-Größen des Schiffes zeigen. Dabei ist  $q = v^2 \cdot g/2$  der der Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes entsprechende Staudruck und  $W_{Q\infty}$  bzw.  $c_{WQ\infty}$  der Querwiderstand bzw. die Querwiderstandsbeizahl des mit  $\alpha = 90$  Grad angeströmten Schiffskörpers in zweidimensionaler Strömung

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \frac{d^2 c_M}{d\alpha^2} = - \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \frac{c_{WQ\infty}}{16} = - \frac{1}{16} \cdot \frac{W_{Q\infty} \cdot L_L}{q \cdot \sqrt{V}} \quad (18)$$

Die Beizahl  $c_{WQ\infty}$  aber ist außer durch Schlingerkeile oder Kiele innerhalb eines Schiffstyps praktisch nicht zu beeinflussen — das zeigt sich praktisch z. B. darin, daß in Abb. 5 die Geraden fast alle parallel verlaufen. Ein steilerer Verlauf würde leichteres Kurshalten bedeuten und wäre also nach (18) durch ausgeprägte Kiele zu erzielen, was vollauf im Einklang mit der praktischen Erfahrung steht. In diesem Falle ergibt sich ein besonders einfacher und übersichtlicher Zusammenhang zwischen Kennzahl, Theorie und praktischer Nutzenanwendung, so daß diese Zusammenhänge hier kurz aufgezeigt werden sollten. Es muß aber darauf verzichtet werden, auch bei den anderen Kennzahlen die Betrachtung so weit zu treiben. Dies würde wegen der meist nicht so einfachen Zusammenhänge den Rahmen dieser Untersuchung so weit überschreiten, daß darunter die auf die Kennzahlen selbst ausgerichtete Übersicht leiden würde.

Ein weiteres Kennzeichen für die Eigenschaft des Kurshalten läßt sich bei kursunstetigen Schiffen angeben durch die Größe der Drehung, die das Schiff mit in Mittellage festgehaltenem Ruder bahnstetig aufnehmen wird. Im Beispiel, Abb. 4, wäre das ein  $\alpha$  von etwa 0,2. Mit der Näherung (6) für das Giermomentendiagramm folgt für diese kleinste stabile Drehung bei Ruder mittschiffs.

$$\alpha_{\text{stab.}} (\beta = 0) = -2 (dc_M / d\alpha)_0 / (d^2 c_M / d\alpha^2) \quad (19)$$

Ebenfalls aus (6) folgt leicht, daß die kleinste stabile Drehung mit Ruderlage als weitere Kennzahl (20) in halber Größe von (19) angegeben werden kann.

$$\alpha_{L,\text{lab.}} = - (dc_M / d\alpha)_0 / (d^2 c_M / d\alpha^2) \quad (20)$$

Schließlich kann man auch noch das bei dieser Drehung auftretende Maximum der Giermomentenkurve selbst als Charakteristikum für die Größe der Kurs-Unstetigkeit ansprechen (21).

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} c_{M,\text{Max}} (\beta = 0) = - (dc_M / d\alpha)_0^2 / (d^2 c_M / d\alpha^2) \cdot \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \quad (21)$$

Die Ruderlage der kleinsten labilen Drehung

$$\beta_{\alpha,\text{Lab.}} = \frac{(dc_M / d\alpha)_0}{(dc_M / d\beta) \cdot (d^2 c_M / d\alpha^2)} \quad (22)$$

gehört zu den Kennzahlen (20) und (21) und ist bei „normal“ kursstetigen Schiffen aber immer nur sehr klein, so daß die experimentelle Ermittlung dieser Kennzahl wohl meist sehr ungenau sein wird.

Diese bisher für ein vollständiges Schiff gegebenen Kennzahlen für das Kurshalten können noch ergänzt werden durch ganz entsprechende Kennzahlen für das Schiff ohne Ruder. Die praktische Bedeutung dieser Kennzahlen ist natürlich auf Modellsystematik beschränkt, sie bieten aber gerade dabei gute Kennwerte zur Unterscheidung von Einfluß des Schiffes und des Ruders. Eine physikalisch vernünftige Bedeutung hat hierfür zwar nur eine Formulierung analog (19), dennoch können aber auch Kennzahlen entsprechend (20) und (21) dazu dienen, das Kursverhalten des Schiffes ohne Ruder zu charakterisieren. Ein Analogon zu (22) besteht natürlich nicht, da ja kein Ruder vorhanden ist.

Drehung ohne Ruder (vgl. Abb. 2):

$$\alpha_{FA=0} = -2 [(dc_M / d\alpha)_0 / (d^2 c_M / d\alpha^2)]_{FA=0} \quad (23)$$

Drehung für maximales Giermoment ohne Ruder:

$$\alpha_{L,\text{lab.}, FA=0} = - [(dc_M / d\alpha)_0 / (d^2 c_M / d\alpha^2)]_{FA=0} \quad (24)$$

Maximales Giermoment ohne Ruder:

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} c_{M,\text{Max}} (FA=0) = - [(dc_M / d\alpha)_0^2 / (d^2 c_M / d\alpha^2)]_{FA=0} \cdot \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \quad (25)$$

### BAAB. Drehen.

Eine scharfe Trennung zwischen den Begriffen Kurshalten und Drehen erscheint schwer. Im vorgehenden Abschnitt ist bereits beim Kurshalten der Begriff der Drehstetigkeit eingeführt worden: er verbindet in doch wohl nur natürlicher Weise diese beiden Abschnitte. Dabei ist hier das Drehen mit sehr kleiner Drehung mit zum Kurshalten gezählt

worden. Der Kurs eines schlecht steuernden Schiffes kann ja durchaus auch als Aneinanderfügung von Kreisbögen mit wechselndem Vorzeichen betrachtet werden.

Den Eigenschaftskomplex „Drehen“ kann man auch mit Drehfähigkeit bezeichnen. Die auch sehr oft gebrauchten Begriffe Manövrieren, Manövrierfähigkeit und Steuerbarkeit enthalten, streng genommen, aber auch Gesichtspunkte mit, die erst im anschließenden Komplex „Stützen“ behandelt werden. Unter Drehen oder Drehvermögen soll hier also nur verstanden werden die Eigenschaft des Schiffes, durch Ruderlegen aus dem geraden Kurs in eine Drehung im Sinne der Ruderlage überzugehen und diese beizubehalten. Die in der Bemerkung „im Sinne der Ruderlage“ liegende Einschränkung liefert die Begründung dafür, daß im vorhergehenden Abschnitt die mit sehr kleinen — gegensinnigen — Ruderlagen ausgeführten labilen Drehungen kursunstetiger Schiffe mit bei der Kursstetigkeit behandelt werden.

Die Drehfähigkeit eines Schiffes ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Ruderwirksamkeit und Drehwilligkeit des Schiffes. Streng genommen bei beiden Anteilen sind sowohl Eigenschaften des Schiffsrumpfes wie seiner Anhänge besonders des Ruders beteiligt. Fast alle möglichen baulichen Maßnahmen beeinflussen daher beide Anteile. Eine Ausnahme — aber auch die nur näherungsweise — macht dabei eine zum Lateralschwerpunkt symmetrische Veränderung des Kieles oder der Schlingerkiele; mit verstärkter Wirkung der Kiele nimmt die Drehwilligkeit des Schiffes ab, und die Ruderwirksamkeit wird in erster Näherung nicht berührt. Dies folgt aus der Betrachtung von (8) bis (9); es ist in Praxis beim Vergleich von alten Küstenseglern mit hohem Balkenkiel und modernen Kümos besonders auffällig geworden.

Die Ruderwirksamkeit wird an sich durch den Verlauf des Giermomentes  $c_{M,0}$  mit dem Ruderwinkel  $\beta$  dargestellt, vereinfacht in (7), in Wirklichkeit ist der Verlauf mehr oder weniger stark nicht linear. Als Kennzahlen aber bieten sich an die

stationäre Steuermomentenzunahme

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \left( \frac{dc_M}{d\beta} \right)_{\alpha = \beta = c_Q = 0} \quad (26)$$

die für Überschlagszwecke von (7) genommen werden kann, das stationäre Steuermoment bei 35 Grad Ruderlage

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot c_M (\alpha = c_Q = 0; \beta = \mp 35^\circ) \quad (27)$$

und das hydrodynamisch maximale stationäre Steuermoment

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot c_M (\alpha = c_Q = 0; \mp \beta_{Max}) \quad (28)$$

Diese stationären Steuermomente entsprechen den Werten in den Giermomentendiagrammen, Abb. 2 bis 4. Sie enthalten außer der eigentlichen Ruderwirksamkeit auch noch einen Beitrag an Rumpfwirksamkeit, wie es in (29) und (30), vgl. auch (7), angeschrieben werden kann.

$$\left( \frac{dc_M}{d\beta} \right)_{\alpha = \beta = c_Q = 0} = \frac{\partial c_M}{\partial \beta} + \frac{\partial c_M}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial c_Q} \cdot \frac{\partial c_Q}{\partial \beta} \quad (29)$$

$$\left( \frac{dc_M}{d\beta} \right)_{\alpha = \beta = c_Q = 0} = -a_{waR} \cdot \frac{F_A}{F_L} \left( \frac{r}{L_L} + \frac{s}{L_L} + \frac{m_{wa}}{a_{wa}} \right) \quad (30)$$

Die stets kleinere instationäre Steuermomentenzunahme

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot \left( \frac{\partial c_M}{\partial \beta} \right)_{\alpha = \beta = \alpha = 0} \quad (31)$$

$$\left( \frac{\partial c_M}{\partial \beta} \right)_{\alpha = \beta = \alpha = 0} = -a_{waR} \cdot \frac{F_A}{F_L} \left( \frac{r}{L_L} + \frac{s}{L_L} \right) \quad (32)$$

enthält dagegen nur die Wirksamkeit des Ruders allein. Dieses Moment ist besonders durch die umfangreichen Untersuchungen von Bottomley (Zit. 17 bis 21 in [51]) als in i-

tial Turning Moment ein Begriff geworden. Es ist unmittelbar kennzeichnend für die Rudereigenschaften, für die Steuereigenschaften im engeren Sinne nur mittelbar. Um auch hier die Wirkung bei großen bzw. bei maximalen Ruderwinkeln zu kennzeichnen, können analog zu (27) und (28) das instationäre Steuermoment bei 35 Grad Ruderlage

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot c_{M,0} (\alpha = 0; \beta = \mp 35^\circ) \quad (33)$$

und das hydrodynamisch maximale instationäre Steuermoment

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{V}} \cdot c_{M,0} (\alpha = 0; \mp \beta_{Max}) \quad (34)$$

als Kennzahlen angegeben werden.

Abb. 7 gibt einige Beispiele, wie bei verschiedenen Ruderwirksamkeiten bzw. Steuermomenten (vgl. hierzu Abb. 6), je nach der Drehwilligkeit des Schiffes bestimmte Drehungen  $\alpha$  mit kleineren oder größeren Ruderwinkeln  $\beta$  zu erreichen sind. Es zeigt sich dort ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen der Drehung  $\alpha$  und dem — man darf vielleicht sagen — spezifischen Ruderwinkel  $\beta/\alpha$ , wie er nach (14) wenigstens näherungsweise auch zu erwarten ist. Zweckmäßig paßt man also die für die Drehfähigkeit zu verwendenden Kennzahlen auch dieser „Natur der Dinge“ an. Nennt man ganz allgemein  $\beta/\alpha$  den Ruderwinkelbedarf, so erhält man in Fortsetzung der Kennwertbildung bei den verschiedenen Steuermomenten den Anfangsruderbedarf

$$\left( \frac{d\beta}{d\alpha} \right)_{\beta = \alpha = 0} = \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)_{\beta = \alpha = 0} = (dc_M / d\alpha)_0 / -(dc_M / d\beta) \quad (35)$$

die Zunahme des Ruderbedarfs

$$\frac{d(\beta/\alpha)}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(d^2 c_M / d\alpha^2)}{-(dc_M / d\beta)} \quad (36)$$

die 35-Grad-Drehung  $\equiv \alpha [\beta = \mp 35^\circ]$  (37)

den Ruderbedarf der 35-Grad-Drehung  $\equiv (\beta/\alpha)_{\beta = \mp 35^\circ}$  (38)

die stärkste Drehung  $\equiv \alpha \mp \beta_{Max}$  (39)

die Ruderlage der stärksten Drehung  $\equiv \mp \beta_{Max}$  (40)

aus anschaulichen Gründen und aus Tradition, und wegen der unmittelbaren Einfügung in ein Diagramm nach Art der Abb. 7 auch

den Ruderbedarf der stärksten Drehung  $\equiv \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)_{\mp \beta_{Max}}$  (41)

(37) bis (41) können natürlich auch mit den Ansätzen (6) bis (9) abhängig von den Baugrößen und den hydrodynamischen Koeffizienten explizit ausgedrückt werden. Die Genauigkeit ist bei dieser etwas extremen Anwendung der Näherungsformeln natürlich nicht mehr sehr gut. Die Beziehung (42) für die Kennzahl (37) soll mehr als Anhalt für den qualitativen Zusammenhang verwendet werden. Es ist dabei vorausgesetzt, daß mit der Ruderlage von 35 Grad das hydrodynamische Maximum nicht überschritten ist, was fast durchweg auch der Fall sein dürfte bei Ruderlage im Sinne der Drehung.

$$\alpha (\beta = \mp 35^\circ) = \frac{\left( \frac{dc_M}{d\alpha} \right)_0}{\pm \left( \frac{d^2 c_M}{d\alpha^2} \right)_0} \left[ \sqrt{1 - 2 c_{M,0} (\beta = \mp 35^\circ) \frac{\pm \frac{d^2 c_M}{d\alpha^2}}{\left( \frac{dc_M}{d\alpha} \right)_0^2}} - 1 \right] \quad (42)$$

Das gleiche gilt für die Beziehung (43), die die Kennzahl (39) noch formal erläutern soll. Man geht dabei von einer Giermomentengleichung aus, die ähnlich wie (6) jedoch mit den Faktoren für Schiff ohne Anhänge gebildet ist.

$$\alpha_{\beta \text{ Max}} = \frac{\left(\frac{dc_M}{d\alpha}\right)_{FA=0}}{\pm \left(\frac{d^2 c_M}{d\alpha^2}\right)_{FA=0}} \cdot \left[ \sqrt{1 - 2 c_{M,0}(\beta \text{ Max}) \pm \left(\frac{d^2 c_M}{d\alpha^2}\right)_{FA=0}} - \frac{\left(\frac{dc_M}{d\alpha}\right)_{FA=0}}{\left(\frac{d^2 c_M}{d\alpha^2}\right)_{FA=0}} \right] \quad (43)$$

Mit den bisher für das Drehen gegebenen Kennzahlen (26) bis (41) ist jedoch nur Aufwand und Endzustand beim Drehen erfaßt. Der Verlauf des Drehens vom Beginn des Ruderlegens bis zum Erreichen eines stationären Drehzustandes  $\alpha = L_L/R$  kann ebenso wie etwa die dafür nötige Zeit nicht aus einer rein stationären Betrachtung zu gewinnen sein. Hierauf wird im Abschnitt C. noch eingegangen werden. Dennoch bietet aber das „stationäre“ Giermomentendiagramm die Möglichkeit anschauliche und leicht bestimmbare Kennzahlen anzugeben, die wenigstens qualitativ zeigen, wie rasch bei gegebener Ruderwirksamkeit und Drehwilligkeit des Schiffes mit Ruder ein bestimmter Endzustand der Drehung erreicht werden kann. Bei diesen Kennzahlen handelt es sich also um charakteristische Drehbeschleunigungen, die ja jeden Punkt des Giermomentendiagrammes mit  $c_M = 0$  zugeordnet sind. Führt man den Trägheitsradius des Schiffes, bezogen auf seine Vertikalachse, durch den Verdrängungsschwerpunkt mit  $i_z$  und mit  $\zeta$  eine mit der sogenannten „Schiffslängen-Fahrzeit“ dimensionslos gemachte Zeit für das fahrende Schiff ein so ist:

$$\frac{M}{F_L \cdot L_L \cdot v^2 \cdot \gamma / 2\alpha} = \frac{i_z^2}{L_L^2} \cdot \frac{\alpha}{F_L \cdot L_L} \cdot 2 \frac{d\alpha}{d(t \cdot v/L_L)} = \frac{i_z^2}{L_L^2} \cdot 2 \cdot \frac{d\alpha}{d\zeta} = \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha} \cdot c_M \quad (44)$$

Die als Kennzahlen bereits eingeführten Steuermomente (26) bis (34) sind bereits solche charakteristischen „Drehbeschleunigungen“ für den Anfang der Drehung. Den gesamten Verlauf erfaßt man natürlich besser durch eine einfache Flächenmittelung in allgemeiner Form

$$\text{als mittlere Dreh-Beschleunigung } \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha} \int_0^{\alpha_1} \frac{c_{M,\beta}}{\alpha_1} \cdot d\alpha \quad (45)$$

oder auch als

$$\text{spezifische mittlere Dreh-Beschleunigung } \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha} \int_0^{\alpha_1} \frac{c_{M,\beta}}{\alpha_1^2} \cdot d\alpha \quad (46)$$

Unter Verwendung von (6) erhält man den formalen Zusammenhang mit den schon behandelten Kennzahlen der Giermomentengleichung,

$$\int_0^{\alpha_1} \frac{c_{M,\beta}}{\alpha_1} d\alpha = c_{M0,\beta} + \frac{1}{2} \left(\frac{dc_M}{d\alpha}\right)_0 \cdot \alpha_1 + \frac{1}{6} \left(\frac{d^2 c_M}{d\alpha^2}\right) \alpha_1^2 \quad (47)$$

$$\int_0^{\alpha_1} \frac{c_{M,\beta}}{\alpha_1^2} d\alpha = \frac{c_{M0,\beta}}{\alpha_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{dc_M}{d\alpha}\right)_0 + \frac{1}{6} \left(\frac{d^2 c_M}{d\alpha^2}\right) \cdot \alpha_1 \quad (48)$$

Eine systematische Verwendung solcher Kennzahlen könnte auf die Drehungen mit 35 Grad Ruderlage und mit maximaler Ruderlage beschränkt bleiben (49) bis (52):

$$\text{Mittlere Drehbeschleunigung der 35-Grad-Drehung} \equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha_{\beta=-35^\circ}} \int_0^{\alpha_{\beta=-35^\circ}} c_M \cdot d\alpha \quad (49)$$

$$\text{Spezifische mittlere Drehbeschleunigung der 35-Grad-Drehung} \equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha_{\beta=-35^\circ}} \int_0^{\alpha_{\beta=-35^\circ}} c_M \cdot d\alpha \quad (50)$$

$$\text{Mittlere Drehbeschleunigung der stärksten Drehung} \equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha_{-\beta \text{ max}}} \int_0^{\alpha_{-\beta \text{ max}}} c_M \cdot d\alpha \quad (51)$$

Spezifische mittlere Drehbeschleunigung der stärksten Drehung

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\alpha_{-\beta \text{ max}}} \int_0^{\alpha_{-\beta \text{ max}}} c_M \cdot d\alpha \quad (52)$$

Der bereits bei (44) eingeführte Begriff der dimensionslosen Zeit  $\zeta = t \cdot v/L_L$  wird zweckmäßig auch bei Kennzahlen über die Drehzeiten der stationären Drehungen verwendet. Man erhält als

Zeitzahl der 35-Grad-Drehung:

$$\frac{v_0 \cdot t_{z,35^\circ}}{L_L} = \zeta_{z,35^\circ} = \frac{2\pi}{\alpha_{35^\circ} \cdot (v/v_0)_{35^\circ}} \quad (53)$$

Dabei ist  $v_0$  die Geschwindigkeit der Geradeausfahrt und  $(v/v_0)$  der Faktor für den Fahrtverlust im Drehkreis. Entsprechendes gilt für die Zeitzahl der stärksten Drehung:

$$\frac{v_0 \cdot t_{z,\text{max}}}{L_L} = \zeta_{z,\text{Max}} = \frac{2\pi}{\alpha_{\text{Max}} \cdot (v/v_0)_{\text{Max}}} \quad (54)$$

Die stärkste Drehung muß nicht notwendigerweise auch immer die schnellste Drehung sein.

$$\alpha_{(t,\text{Min})} \quad (55)$$

Für diese gibt es dann auch eine

Zeitzahl der schnellsten Drehung:

$$\frac{v_0 \cdot t_{z(t,\text{Min})}}{L_L} = \zeta_{z(t,\text{Min})} = \frac{2\pi}{\alpha_{(t,\text{Min})} \cdot (v/v_0)_{\beta(t,\text{Min})}} \quad (56)$$

Auch diese Kennzahlen sind im Prinzip durch Rechenansätze zugänglich, die in Art der Beziehungen (6) bis (9) die Änderung des Widerstandes beim Drehen angeben. Die Rechnung wird besonders dadurch etwas weniger einfach, daß man in diesem Falle auf keinen Fall mehr die sogenannten „Spantumströmungsurteile“ (vgl. hierzu [14]) vernachlässigen darf. Tut man dies nämlich, so erhält man stets das Ergebnis, daß die Drehzeit mit stärker werdender Drehung abnimmt. Erst bei der Berücksichtigung dieser Spantanteile der Kräfte ergibt sich ein Optimum für die Drehzeit, wie es den Kennzahlen (55) und (56) entspricht.

Drehzeiten wird man im allgemeinen mehr dem Experiment entnehmen. Für Modellversuche ist die Messung am Rundlaufgerät vorteilhaft, da man hierbei auch den Reibungsabzug berücksichtigen kann, was beim frei fahrenden Modell natürlich nicht so leicht möglich ist.

### BAAC. Stützen.

Für die Manövierversicherheit eines Schiffes ist sein Stützvermögen (Stützfähigkeit oder kurz Stützen) eine wesentliche Voraussetzung. Mit diesen Begriffen bezeichnet man die Fähigkeit des Schiffes, aus einer mit der Ruderlage  $-\beta$  stationär gefahrenen Drehung  $\alpha = L_L/R$  wieder einen stetigen geraden Kurs zu erreichen. Es ist dabei im Prinzip unerheblich, ob dabei zunächst „Gegenruder“  $+\beta$  gegeben wird oder ob man das Ruder nur auf die Neutrallage  $\beta \approx 0$  legt. Wie aus den Beispielen für Giermomentendiagramme, Abb. 2 bis 4, zu ersehen ist, ist nur bei den Schiffen diese Möglichkeit gegeben, die bei  $\alpha = 0$  eine negative Tangente der Giermomentenkurve besitzen. Nur diese Schiffe sind auch kursstetig. Stützfähigkeit und Kursstetigkeit sind also nahe verwandt. Der Begriff des Stützens enthält aber auch noch die Charakterisierung der Schnelligkeit, mit der der Stützvorgang von der Drehung bis zum geraden Kurs vor sich geht. In der Weise ist also wiederum das Stützen das Gegenstück zum Drehen. Die Erfahrungen der Nautiker mit dem Steuern, Drehen und

Stützen eines Schiffes sprechen stets von sehr engen Beziehungen zwischen diesen drei charakteristischen Eigenschaften der Freifahrt eines Schiffes. Sie werden manchmal in nicht ganz treffender Weise ausgesprochen. Allgemein gültig kann man diese Erfahrungen aber so formulieren:

Eine Verbesserung der Ruderwirksamkeit verbessert das Steuern sowohl wie das Drehen und auch das Stützen. Eine Änderung am Rumpf des Schiffes oder den anderen Anhängen außer dem Ruder, die die Kursstetigkeit verbessert, verbessert auch zugleich die Stützfähigkeit und verschlechtert das Drehen. Die umgekehrten Folgen treten ein bei einer die Kursstetigkeit vermindernenden Baumaßnahme.

Bevor Kennzahlen für das Stützvermögen genannt werden können, muß noch einmal auf die schon erwähnte Stützbedingung hingewiesen werden, daß das Maximum der Giermomentenkurve für maximale Stützwirkung, also  $+ \beta_{\text{Max}}$  (vgl. Abb. 4 und 10), noch einen negativen (also stützenden) Wert haben muß. Andernfalls kommt das Schiff niemals aus der Fahrt auf geraden Kurs zurück. Fehlende Stützfähigkeit ist bei Vorausfahrt eigentlich eine Ausnahme, bei Rückwärtsfahrt (siehe Abschnitt BAB) heute noch leider die Regel. Man verwendet diese Bedingung zugleich zur Bildung einer ersten Kennzahl für das Stützen. Dabei ist natürlich eine „gute“ Kennzahl dann gegeben, wenn die Annäherung der Giermomentenkurve für Stützruder an den Wert Null möglichst gering und erst bei möglichst kleinen Drehungen erfolgt. Diese Forderung erfüllt in recht einfacher Weise die

$$\text{Stützbedingung } \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\kappa}} \left( \frac{c_{M, (+\beta_{\text{Max}})}}{\kappa} \right)_{\text{Max}} < 0 \quad (57)$$

Als Kennzahlen wesentlich handlicher sind analog den behandelten Drehbeschleunigungen zu bildende Stützbeschleunigungen. Der Aufbau dieser Kennzahlen und ihrer numerischen Ermittlung nach den hier gebrauchten Näherungsbeziehungen ist formal völlig der gleiche wie bei den Drehbeschleunigungen, so daß hier nur noch die Kennzahlen angeschrieben werden sollen.

Mittlere Drehbeschleunigung bei 35-Grad-Stützen

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\kappa}} \int_{\kappa_{\beta = -35^\circ}}^0 c_{M, (\beta = +35^\circ)} d\kappa \quad (58)$$

Spezifische mittlere Drehbeschleunigung bei 35-Grad-Stützen

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{(\sqrt{\kappa_{\beta = -35^\circ}})^2} \int_{\kappa_{\beta = -35^\circ}}^0 c_{M, (\beta = +35^\circ)} d\kappa \quad (59)$$

Mittlere Drehbeschleunigung bei maximalem Stützen

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\kappa - \beta_{\text{max}}}} \int_{\kappa - \beta_{\text{max}}}^0 c_{M, (+\beta_{\text{max}})} d\kappa \quad (60)$$

Spezifische mittlere Drehbeschleunigung bei maximalem Stützen

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L / \sqrt{\kappa - \beta_{\text{max}}}}{(\sqrt{\kappa - \beta_{\text{max}}})^2} \int_{\kappa - \beta_{\text{max}}}^0 c_{M, (+\beta_{\text{max}})} d\kappa \quad (61)$$

Ein zwar nur sehr grobes, aber dafür recht anschauliches Kriterium für gutes Stützen ist ganz einfach das Verhältnis des bei Beginn des Stützens zur Verfügung stehenden Stützmomentes zur Drehung  $\kappa = L_L/R$ , in der sich das Schiff zu der Zeit gerade befindet. Man kann wieder Kennzahlen für die spezifischen Anfangsstützmomente bei 35 Grad und bei maximaler Ruderlage — und natürlich auch für jede beliebige andere Ruderlage — angeben.

Spezifisches Anfangsstützmoment bei 35-Grad-Stützen

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\kappa}} \cdot \frac{c_{M, (\beta = +35^\circ; \kappa_{\beta = -35^\circ})}}{\kappa_{\beta = -35^\circ}} \quad (62)$$

Spezifisches Anfangsstützmoment bei maximalem Stützen

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\kappa}} \cdot \frac{c_{M, (+\beta_{\text{Max}}; \kappa_{-\beta_{\text{Max}}})}}{\kappa_{-\beta_{\text{Max}}}} \quad (63)$$

Dabei ist als Näherung nach den Ansätzen (6) bis (9)

$$c_{M, (\beta = +35^\circ; \kappa_{\beta = -35^\circ})} = -2 \cdot c_{M, 0 (\beta = -35^\circ)} \quad (64)$$

$$c_{M, (+\beta_{\text{Max}}; \kappa_{-\beta_{\text{Max}}})} = -2 \cdot c_{M, 0 (-\beta_{\text{Max}})} \quad (65)$$

Aus (64) und (65) ergibt sich dann auch, daß diese spezifischen Anfangsstützmomente gerade doppelt so groß etwa sind wie spezifische Anfangsdrehmomente, die man analog zu (62) und (63) als Kennzahlen für das Drehen bilden könnte. Sie würden sich also nur durch das Vorzeichen und einen Faktor von etwa 2 unterscheiden und erscheinen darum entbehrlich. In den Kennzahlen (62) und (63) ist implizit ausgedrückt, daß das Stützvermögen um so besser ist je mehr Ruderwirksamkeit zur Erzielung einer bestimmten Drehung erforderlich ist, d. h. also je geringer die Drehwilligkeit des Schiffsrumpfes allein ist. Eine hohe Drehwilligkeit des Schiffsrumpfes ist also ein „schlechtes“ Kennzeichen für den Beitrag des Rumpfes zur Stützfähigkeit. Um daraus eine „gute“ Kennzahl für das Stützen zu bilden, kann man eine Art

Mittlere Drehverzögerung des Schiffsrumpfes ohne Ruder

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L / \sqrt{\kappa}}{\kappa} \int_0^{\kappa} c_{M, F_A = 0} d\kappa \quad (66)$$

bilden, die dann für gutes Stützen einen möglichst großen negativen Wert haben sollte. Die Kennzahl (66) hat natürlich verschiedene Werte, wenn man sie für die 35-Grad-Drehung oder für die maximale Drehung oder für die mit einem beliebigen Ruderwinkel erzielbare Drehung anwendet. Eine weitere ähnlich aufgebaute Kennzahl ergibt sich aus Betrachtung des Betrages, den das Ruder selbst jedoch ohne Ruderausschlag zur Drehverzögerung liefert. Hierzu die

Mittlere Drehverzögerung ohne Ruderausschlag

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L / \sqrt{\kappa}}{\kappa} \int_0^{\kappa} c_{M, \beta = 0} d\kappa \quad (67)$$

Auch hier kann man wieder „spezifische“ Kennzahlen bilden:

Spezifische mittlere Drehverzögerung des Schiffsrumpfes ohne Ruder

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L / \sqrt{\kappa}}{\kappa^2} \int_0^{\kappa} c_{M, F_A = 0} d\kappa \quad (68)$$

Spezifische mittlere Drehverzögerung ohne Ruderausschlag

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L / \sqrt{\kappa}}{\kappa^2} \int_0^{\kappa} c_{M, \beta = 0} d\kappa \quad (69)$$

Auf die damit recht einfach gegebenen Zusammenhänge zwischen den Kennzahlen für die Steuermomente, die mittleren Drehbeschleunigungen und die mittleren Drehverzögerungen sei hier nur hingewiesen. In Abschnitt D. sind diese formalen Zusammenhänge übersichtlicher zusammengestellt. Abschließend hierzu seien nur noch einige aufschlußreiche Verhältniswerte genannt, die sich auch leicht aus den angedeuteten Zusammenhängen aufbauen lassen und die zum Teil bereits in [14] genannt sind.

Diese „Stütz-Dreh“-Verhältnisse geben also ein Maß dafür, wie stark die stützenden Momente relativ zu den drehenden Momenten sind. Wenn die Momente nicht von der Drehung abhängig wären, wäre dies auch ein unmittelbares Maß für das Verhältnis der Stütz- und Drehzeiten. Da diese Voraussetzung aber nicht gegeben ist, ist dies nur ein Anhalt dafür, der die Ermittlung der in Abschnitt C. zu be-

handelnden Zeiten selbst nicht erübrigen kann. Die Kennzahlen (70) und (71) stellen eigentlich keine reinen Stütz-Kennzahlen dar, sondern verbinden das Stützen mit dem Drehen.

Stütz-Dreh-Verhältnis der mittleren Beschleunigungen bei 35-Grad-Ruderlage

$$\equiv \frac{\int_0^{\alpha} c_{M. (\beta = +35^\circ)} \cdot d\alpha}{\int_0^{\alpha} c_{M. (\beta = -35^\circ)} \cdot d\alpha} \quad (70)$$

Stütz-Dreh-Verhältnis der mittleren Beschleunigungen bei maximaler Ruderlage

$$\equiv \frac{\int_{\alpha - \beta_{Max}}^{\alpha} c_{M. (+\beta_{Max})} \cdot d\alpha}{\int_{\alpha - \beta_{Max}}^{\alpha} c_{M. (-\beta_{Max})} \cdot d\alpha} \quad (71)$$

Entsprechende Verhältnisse sind dann gegebenenfalls auch für andere Ruderlagen zu bilden.

**BAB. Rückwärtsfahrt.**

Der prinzipielle Unterschied zwischen der Behandlung der Steuereigenschaften bei Rückwärtsfahrt und der bei Vorausfahrt besteht lediglich in einigen Vorzeichenänderungen, die nicht zu umgehen sind, wenn man Richtungen und Dreh-sinne absolut — d. h. hier unabhängig davon, ob das Schiff Fahrt voraus, Fahrt zurück oder überhaupt keine Fahrt macht — festlegen will. Abb. 9 zeigt dies im Vergleich zu Abb. 1. Auch hier kann wieder das Giermomentendiagramm zur Grundlage stationärer Betrachtungen gemacht werden. Dabei (Abb. 10) ergibt sich als einziger prinzipieller Unterschied zur Vorausfahrt (z. B. Abb. 4), daß jetzt positive Ruderwinkel zum Drehen und negative zum Stützen gehören, also gerade umgekehrt wie bei der Vorausfahrt. Dennoch sind die quantitativen Unterschiede zwischen Vorausfahrt und Rückwärtsfahrt sehr augenfällig. Abb. 10 ist auf Grund gewisser Anhaltspunkte aus Schräg-schleppversuchen [15] und aus Fahrerfahrungen mit einer Hafenbarkasse „konstruiert“ worden. Es ist darum auch quantitativ etwa zu vergleichen mit Abb. 3. Die Unterschiede ergeben sich, da die Drehwilligkeit auf Rückwärtsfahrt größer ist als auf Vorausfahrt und daß dazu die Ruderwirksamkeit auf Rückwärtsfahrt ganz erheblich vermindert ist. Beides wirkt im Sinne schlechteren Steuern und Stützen. Das Ergebnis ist, daß die Bedingung der Kennzahl (57) nicht mehr erfüllt ist. Hat das Fahrzeug erst einmal eine Drehung von etwa 0,15 erreicht, so ist es auch mit  $\beta = -30$  Grad Gegenrudder nicht mehr auf geraden Kurs zurückzuholen. Ein derartiges Verhalten bei Rückwärtsfahrt ist typisch für ein normales Schiff, das zur Erzielung von Steuerwirkungen allein auf sein Ruder angewiesen ist. Leider ist dabei auch oft nicht mehr von den Rückwärtseigenschaften eines Schiffes bekannt, als daß sie eben sehr schlecht sind. Eine eingehende Untersuchung dieser Eigenschaften ist bisher weitgehend unterblieben, da die meist gebräuchlichen Methoden, wie z. B. Manövrierversuch, wegen der Unstabilität der interessanten Zustände gar nicht auszuführen sind bei normalen Ruderanordnungen. Über die prinzipiellen Ursachen der schlechten Eigenschaften besteht qualitativ Klarheit [51] und 166. Zit. in [51]; auch die Grundsätze für Verbesserungsmöglichkeiten sind bekannt. Eine theoretische Untersuchung, die von entsprechenden Ansätzen wie (4) und (5) ausgehen kann, wird ebenso wie systematische experimentelle Untersuchungen auch quantitative Ergebnisse liefern. Solche Versuche lassen sich besonders gut am Rundlaufgerät durchführen, da man dabei mit ungestörten Bedingungen auch die unstabilen Zustände ausmessen kann. Das Giermomentendiagramm kann mit reproduzierbaren Zahlenwerten das darstellen, was sonst nur aus gefühlsbedingt qualitativen Erfahrungen vom unsystematischen Rückwärtssteuern einiger Schiffe bekannt ist.

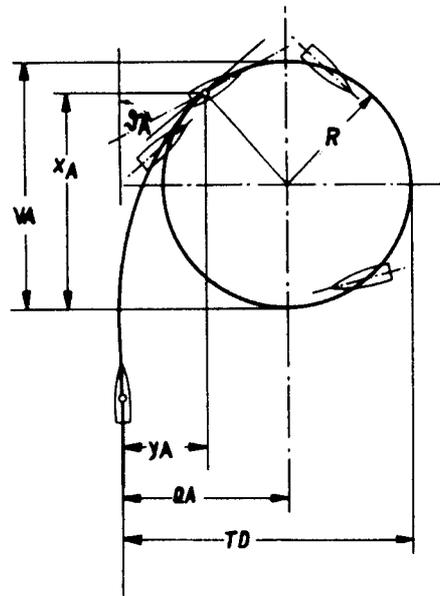


Abb. 8: Wendedurchmesser

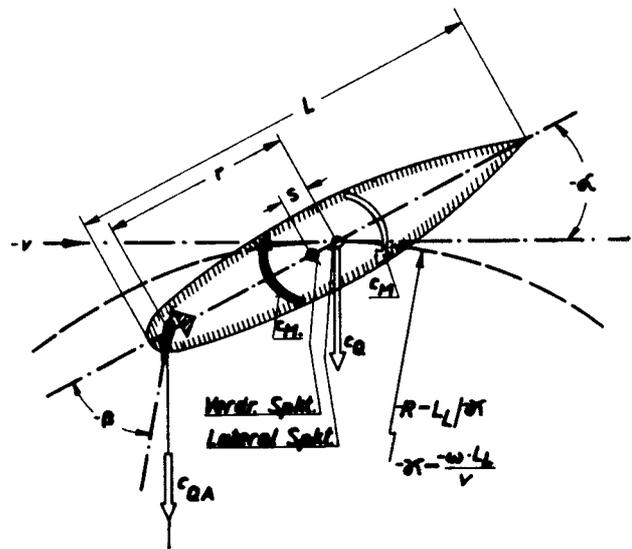


Abb. 9: Schiff bei Freifahrt zurück

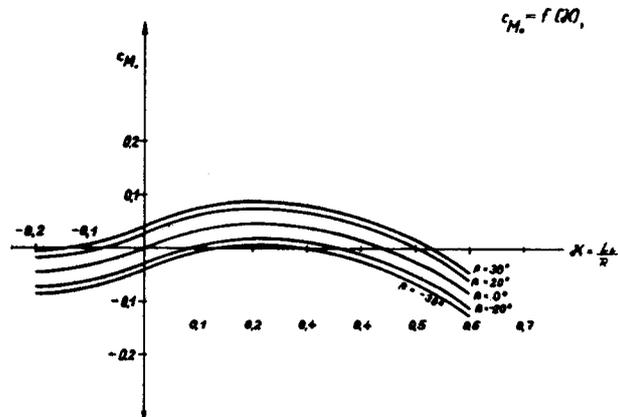


Abb. 10: Giermoment bei Rückwärtsfahrt

Da sich — in Kennzahlen ausgedrückt — die Steuereigenschaften der Rückwärtsfahrt von denen der Vorausfahrt also nur quantitativ unterscheiden werden, im übrigen aber die qualitativ gleichen Erscheinungen zu beschreiben haben, können sämtliche innerhalb der Formeln (15) bis (71) hergestellten Kennzahlen für die Vorausfahrt völlig analog — lediglich unter Beachtung der kleinen Vorzeichenunterschiede — auch für die Rückwärtsfahrt angeschrieben werden. Diese sollen dann bei späteren Zitaten als (15r) bis (71r) bezeichnet werden.

Das Maß der Kursstetigkeit bei Rückwärtsfahrt

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\quad}} \cdot \left( \frac{dc_M}{d\alpha} \right)_0 \quad (15r)$$

ist also als Beispiel so angeschrieben; der Wert ist praktisch immer positiv, also unstetig.

Ein weiteres sehr wichtiges Beispiel ist die kleinste labile Drehung mit Ruderlage bei Rückwärtsfahrt

$$\equiv \alpha_{Lab} = \frac{-(dc_M / d\alpha)_0}{(d^2 c_M / d\alpha^2)} \quad (20r)$$

die — im Gegensatz zur Vorausfahrt — praktisch immer anzugeben ist. Das bei dieser Drehung auftretende Maximum der Giermomentenkurve bei Rückwärtsfahrt

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\quad}} c_{M, \text{Max}} (\beta = 0) = \frac{-(dc_M / d\alpha)_0^2 \cdot \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\quad}}}{(d^2 c_M / d\alpha^2)} \quad (21r)$$

ist das entscheidende Kennzeichen, ob man das Schiff bei Rückwärtsfahrt noch in der Hand hat. Dies ist nur dann der Fall, wenn das

hydrodynamisch maximale stationäre Steuermoment bei Rückwärtsfahrt

$$\equiv \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{\quad}} \cdot c_M (\alpha = \alpha_0 = 0; + \beta_{\text{Max}}) \quad (28r)$$

größer ist, (28r) > (21r). Auf die Wiederholung der anderen Kennzeichen für die Rückwärtsfahrt kann in diesem Rahmen verzichtet werden.

### BB. Schlepffahrt.

Die Eigenschaften der Schlepffahrt sind ganz besonders in neuerer Zeit durch experimentelle und theoretische Untersuchungen [18] bis [38] erhellt worden. Auch aus stationären Betrachtungen können ähnlich wie bei der Freifahrt gewisse Kennzahlen abgeleitet werden. Die Verwendung von Momenten und ihren Ableitungen zur Bildung dieser Kennzahlen ist aber einerseits sehr viel weniger einfach als beim frei fahrenden Schiff — dieses stellt vom geschleppten Schiff her gesehen ja nur einen Spezialfall dar — andererseits wären diese Kennzahlen nur theoretisch zu ermitteln und praktisch nicht experimentell kontrollierbar. Einfacher und anschaulicher ist es daher, sich auf gewisse Verhältnisse zu beschränken, die für ein geschlepptes Schiff charakteristisch sind.

Abb. 11 zeigt ein mit Seil von der Länge  $a$  geschlepptes Schiff. Der Angriffspunkt des Seiles liegt um die Strecke  $b$  vor dem Lateralschwerpunkt, der wiederum um die Strecke  $s$  vor dem Verdrängungsschwerpunkt liegt. Ein weiterer Parameter ist der Ausschermwinkel  $\gamma$ . Für das stationäre Schleppen interessieren natürlich nur Schleppbedingungen, die frei von Pendelbewegungen des Anhangs hinter dem Schlepper sind. Wenn auch in sehr vielen Fällen ein solcher Zustand aus praktischen Gründen gar nicht erreicht werden kann, so ist auch für diese Fahrzeuge die Angabe der Verhältniswerte von Seillänge zu Schiffslänge  $a/L_L$  und Beleglänge zu Schiffslänge  $b/L_L$  von Interesse, für die ein stationäres Schleppen möglich ist. Ein solches Schleppen ist dabei teilweise bei  $\gamma = 0$  und teilweise bei endlichen und manchmal sogar sehr großen Ausschermwinkeln erst möglich. Im Bereich großer relativer Beleglängen  $b/L_L$  besteht eine starke Ab-

hängigkeit dieser von der Seillänge, wenn stationäres Schleppen mit möglichst großer Seillänge gefordert ist. Da dabei immer für die erwünschte große Seillänge eine möglichst große Beleglänge nötig ist, diese aber praktisch nicht über den Vorsteven hinausgeführt werden kann, kann der Wert

$$b/L_L = 0,5 \text{ für die}$$

$$\text{Größt-Seillänge} \equiv (a/L_L)_{\text{Max}}, b/L_L = 0,5 \quad (72)$$

zugrunde gelegt werden. In Sonderfällen ist dabei der Ausschermwinkel  $\gamma$  von Null verschieden. Für diese Fälle ergibt sich dann die dazu gehörige weitere Kennzahl

Stabiler Ausschermwinkel bei Seilangriff am Bug

$$\equiv \gamma_{st} (b/L_L = 0,5) \quad (73)$$

Wenn dieser Winkel von Null verschieden ist, ist zu erwarten, daß die Kennzahl (72) keine Bedeutung mehr hat und die Größtseillänge beliebig sein kann. Im allgemeinen aber ist (73) Null und dann ist ein weiteres Charakteristikum diejenige Beleglänge, bei der sich nun ein von Null verschiedener Ausschermwinkel einstellt, wobei die Seillänge keinen Einfluß mehr auf das Verhalten hat.

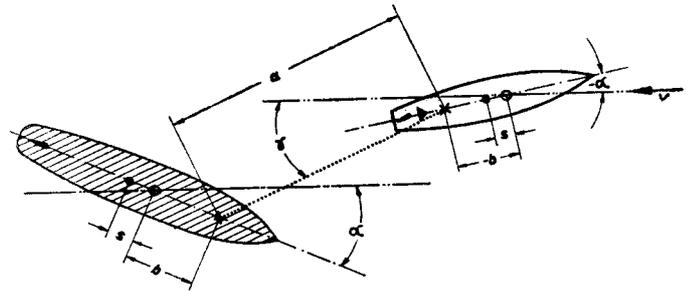


Abb. 11: Stationäres Schleppen

Größt-Beleglänge für beliebiges Seil

$$\equiv (b/L_L)_{\text{Max}} (a/L_L \div \infty) \quad (74)$$

Stabiler Ausschermwinkel bei Größt-Beleglänge für beliebiges Seil

$$\equiv \gamma_{st} (b/L_L)_{\text{M}} \quad (75)$$

Vorstehende Kennzahlen sollte man festhalten für geschlepptes Schiff mit und ohne Ruder; Ruderlage dabei mittschiffs. Da aus Gründen der Passagiersicherheit und auch des Schlepprawiderstandes ein Interesse daran besteht, den Ausschermwinkel möglichst klein zu halten — falls mit der möglichen Schleppanordnung überhaupt ein stabiles Schleppen möglich ist —, kann weiter der Einfluß einer Ruderlage auf den Ausschermwinkel untersucht werden. Das Ergebnis führt zu einer Kennzahl, die für (73) und (75) etwas verschieden sein wird.

Rudereinfluß auf den Ausschermwinkel

$$\equiv d\gamma_{st} / d\beta \quad (76)$$

Für das schlepptende Schiff sind, abgesehen von den Kennzahlen für die Freifahrt, die beiden Grenzlagen für den Haken (Abb. 11)

Hakengrenzlage vorn

$$\equiv (-b/L_L)_{\text{Min}} \quad (77)$$

Hakengrenzlage hinten

$$\equiv (-b/L_L)_{\text{Max}} \quad (78)$$

von Interesse für die Kintersicherheit bzw. die Manövrierfähigkeit des Schleppers. Es ist nicht möglich, im Rahmen dieser Arbeit hierzu weitere Angaben zu machen. Eine rechnerische Untersuchung muß neben den Steuereigenschaften des Schleppers auf jeden Fall auch seine Stabilitätseigenschaften mit berücksichtigen. Wegen der Problematik der bei Kursänderungen in Betracht zu ziehenden instationären Schleppseilkräfte scheint der Weg über Versuche mit massenähnlichen Schlepptzügen naheliegend.

### BC. Manövrieren im und aus dem Stand.

Nur in Ausnahmefällen haben die Eigenschaften des Querschleppens oder Quertreibens, des Traversieren, des Drehen am Stand und des Drehen zum An- und Ablegen eine entscheidende Bedeutung, so daß nur selten solche Art Versuche oder Rechnungen durchgeführt werden. Zweifellos sind es aber echte „Steuereigenschaften“. Die hierfür anzugebenden Kennzahlen sind an sich naheliegend. Lediglich die Wahl der Bezugsgrößen kann mitunter zweifelhaft sein, da es sich zum Teil um reine Translationen wie beim Querschleppen oder Quertreiben und beim Traversieren handelt. Zum Teil ist es eine reine Drehung am Stand und andererseits ist es beim An- und Ablegen eigentlich eine Drehung und Translation. (Abb. 12.)

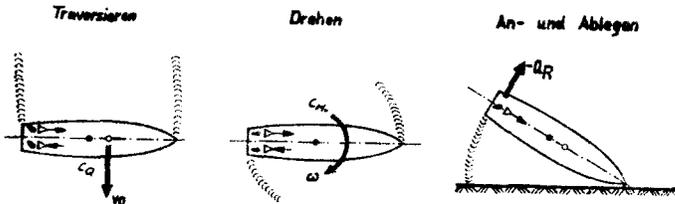


Abb. 12: Schiff beim Manöver aus dem Stand

Für Querschleppen, Quertreiben oder Querverholen gibt die Kennzahl das Verhältnis des Querschubes oder Querschubwiderstandes  $W_Q$  zur Lateralfäche  $F_L$  und zum Staudruck der Quergeschwindigkeit  $v_Q$  an.

Die Querwiderstandsbeizahl

$$\frac{F_L}{\sqrt{v_Q^3}} c_{WQ} = \frac{W_a}{v_Q^2 \cdot \rho / 2 \cdot \sqrt{v_Q^3}} \quad (79)$$

spielt darüber hinaus aber auch noch eine große Rolle bei den Strömungskräften am Schiffskörper in Fahrt ([14] und dort 62. Zit.). Bei der Angabe von (79) nach Modellversuchen — das wird praktisch allein nur in Frage kommen — ist zur Kennzeichnung der Übertragbarkeit auf die Großausführung immer die Froudesche Zahl bezogen auf den Tiefgang und die Reynoldszahl bezogen auf die Breite anzugeben.

$$Fr_T = \frac{v_Q}{\sqrt{g \cdot T}}; Re_B = \frac{v_Q \cdot B}{\nu}$$

Für die Querbewegung mit Eigenantrieb (Traversieren) kann (79) nur dann angegeben werden, wenn der Querschub gleichzeitig gemessen werden kann. Dies wird selten einwandfrei möglich sein, so daß man eine andere aus (79) gebildete Kennzahl angeben wird.

Froudesche Zahl des Traversierens

$$\frac{v_Q}{\sqrt{g \cdot L_L}} = \sqrt{\frac{Q}{\Delta \cdot F_L \cdot L_L} \cdot \frac{2}{c_{WQ}}} \quad (80)$$

Auch hierfür ist beim Modellversuch die Angabe der Reynoldszahl notwendig.

Beim An- und Ablegen ist die Drehbewegung entscheidend. Sie wird daher zur Kennzahlbildung zu benutzen sein. Wird beim Versuch das zum Ablegen erforderliche Moment und die sich ergebende Drehgeschwindigkeit — zweckmäßig auf die Vertikalachse durch den Lateralschwerpunkt bezogen — gemessen, so kann die dadurch gewonnene Beizahl als Kennzahl eingeführt werden.

Drehmomentenbeizahl für An- und Ablegen

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{M}} c_{\omega MA} = \frac{M}{\rho (\omega \cdot L_L)^2 / 2 \cdot \sqrt{M}} \quad (81)$$

Wegen der Kennwertempfindlichkeit dieser Beizahl sollte auch hier wieder die entsprechende Froudesche Zahl  $\omega \sqrt{L_L / g}$  und die Reynoldszahl  $\frac{\omega \cdot L_L \cdot B}{\nu}$  angegeben werden.

Beim Ablegen mit Eigenantrieb steht praktisch wieder nur die erzielte Drehgeschwindigkeit zur Kennzahlbildung zur Verfügung. Man kann analog (80) angeben eine

Relative Drehgeschwindigkeit beim An- und Ablegen

$$\left( \omega \sqrt{\frac{L_L}{g}} \right)_A = \sqrt{\frac{M}{\Delta \cdot L_L} \cdot \frac{\sqrt{M}}{F_L \cdot L_L} \cdot \frac{2}{c_{\omega MA}}} \quad (82)$$

Für das Drehen am Stand ist je nach der Art des Versuches bzw. der Erprobung eine Kennzahl analog (81) oder (82) anzugeben. Die Beizahl  $c_{\omega M}$  für die freie Drehung unterscheidet sich natürlich von der für die „abgestützte“ Drehung beim An- und Ablegen  $c_{\omega MA}$ . Bei dieser geht der relative Abstand vom festen Drehpunkt zum Bezugsdrehpunkt (also etwa  $L_L/2$ ) noch mit ein.

Momentenbeizahl für Drehen am Stand

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{M}} c_{\omega M} = \frac{M}{\rho \cdot (\omega \cdot L_L)^2 / 2 \cdot \sqrt{M}} \quad (83)$$

Relative Drehgeschwindigkeit am Stand

$$\left( \omega \sqrt{\frac{L_L}{g}} \right) = \sqrt{\frac{M}{\Delta \cdot L_L} \cdot \frac{\sqrt{M}}{F_L \cdot L_L} \cdot \frac{2}{c_{\omega M}}} \quad (84)$$

Für das Manövrieren aus dem Stand können aus stationärer Betrachtung natürlich nur die Anfangsdrehmomente angegeben werden, die aber bereits schon aufschlußreich genug sind. Bei Mehrschraubern sind diese Drehmomente durch den Abstand der Propellerachsen vom Schwerpunkt und durch Interferenzen der Propellerstrahlen mit dem Schiffsrumpf bestimmt. Die Wirkung des Ruders tritt demgegenüber meist stark zurück. Durch Veränderung des Propellerschubes hat man das Andrehen des Schiffes weitgehend in der Hand. Das stärkste Drehmoment tritt natürlich am Stand auf und ist durch Kennzahl (83) bereits erfaßt. Hier interessiert nun aber das Drehmoment für den aus dem Stand heraus mit voller Leistung beginnenden Dreh- und Fahrtzustand, bei dem Drehung und Fahrt noch etwa Null sind. Hier sind die Momente des Zweischraubers z. B. sehr gering, da sie allein vom Ruder her kommen. Sie können im allgemeinen jedoch eben durch Ruderlage immer auf Null gehalten werden. Beim Einschrauber dagegen erzeugt die Unsymmetrie des Schraubendralls bereits bei Rudernull-Lage eine derartige Ruderkraft und damit ein Drehmoment des Schiffes, daß es meist durch stärkstes Gegenruder nicht aufgehoben werden kann. Bei Rückwärtsmanöver entsteht diese entsprechende Kraft am Totholz des Schiffes selbst und ist durch das dann fast wirkungslose Ruder überhaupt nicht mehr zu korrigieren. Da in beiden Fällen wegen der Unterschiede in der Ruder- und Totholzausbildung diese Momente durchaus etwas zu beeinflussen — manchmal sogar zu korrigieren — sind, können entsprechende Kennzahlen einen gewissen Nutzen haben. Es ist nach dem Ausgeführten sinnvoll, ein Maximum und ein Minimum des Momentes anzugeben. Von einer Steuerbarkeit kann dann nur gesprochen werden, wenn diese Momente wenigstens verschiedene Vorzeichen haben, d. h. einmal Bug nach St. B. und einmal nach B. B. drehen. Je nach vorwiegend nautischem oder hydrodynamischem Gesichtspunkt bei der Beurteilung der Kennzahlen sind sie auf das Schiffsgewicht  $\Delta$  oder den Propellerschub  $S$  zu beziehen. Diese Kennzahlen (85) bis (88) können entsprechend auch wieder als (85r) bis (88r) für das Rückwärtsmanöver angegeben werden.

Maximales (Stb) Schubbezogenes Standardmoment auf voll Voraus

$$\equiv \left( \frac{M}{S \cdot L_L} \right)_{\text{Max}} \quad (85)$$

Minimales (Bb) Schubbezogenes Standardmoment auf voll Voraus

$$\equiv \left( \frac{M}{S \cdot L_L} \right)_{\text{Min}} \quad (86)$$

Minimales Gewichtsbezogenes Standdrehmoment auf voll Voraus

$$\equiv \left( \frac{M}{\Delta \cdot L_L} \right)_{\text{Max}} \quad (87)$$

Maximales Gewichtsbezogenes Standdrehmoment auf voll Voraus

$$\equiv \left( \frac{M}{\Delta \cdot L_L} \right)_{\text{Min}} \quad (88)$$

**BD. Verhalten bei Fahrwasserbegrenzung.**

Fahrwasserbegrenzungen können gegeben sein durch Flachwasser, durch Querschnittsbeschränkung im Kanal durch kontinuierliche und diskontinuierliche Ufernähe sowie durch Begegnen und Überholen. Abb. 13 soll diese Möglichkeiten andeuten. Bei Flachwasser und engem Kanal, der normalerweise symmetrisch durchfahren wird, verändern sich die besprochenen Kennzahlen für unbeschränktes Wasser. Bei Angabe der entsprechenden Kennzahlen für die verschiedenen Stauereigenschaften ist also unbedingt die Angabe für die Tiefenbeschränkung  $T/H_W$  und für die Breitenbeschränkung  $B/B_W$  hinzuzufügen. Bei kontinuierlicher Ufernähe kommt hierzu der Uferabstand  $a/B$ , der nicht nur die normalen Eigenschaften verändert, sondern zusätzlich eine Querkraft und ein Moment am Schiff erzeugt. Als Kennzahlen hierfür können wieder die üblichen Beizahlen verwendet werden, die mit der Fahrtgeschwindigkeit gebildet sind. Es besteht außer der ausgeprägten Abhängigkeit dieser Beizahl vom Uferabstand  $a/B$  auch eine solche von der Froudeschen Zahl. Die Kennzahlen (89) und (90) sind also durch entsprechende Angaben hierzu zu erläutern.

Querkraftbeizahl bei kontinuierlicher Ufernähe

$$\equiv \left( \frac{F_L}{\sqrt{v}} \cdot c_Q \right)_{aU} \quad (89)$$

Momentenbeizahl bei kontinuierlicher Ufernähe

$$\equiv \left( \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{v}} \cdot c_M \right)_{aU} \quad (90)$$

Um Querkraft und Moment zu kompensieren, muß das Schiff mit Ruderausschlag und Gierwinkel fahren. Diese bieten sich daher — besonders für Freifahrtversuche — als Kennzahlen an:

Gierwinkel bei kontinuierlicher Ufernähe  $\alpha_{aU} \quad (91)$

Ruderwinkel bei kontinuierlicher Ufernähe  $\beta_{aU} \quad (92)$

Ist die Ufernähe diskontinuierlich, wie extrem in Abb. 13c dargestellt, dann ergeben sich Extremwerte für die Kennzahlen (89) und (90) und entsprechend auch für (91) und (92), die jedoch aus stationärer Messung nicht zu gewinnen sind. Zusammen mit den Kennzahlen für Begegnen und Überholen werden sie unter Abschnitt C. aufgeführt.

**BE. Einfluß von Strom, Wind und Seegang.**

Hier handelt es sich um die Darstellung des Einflusses dieser Wettergrößen auf die Fähigkeit des Schiffes, eine bestimmte Position bzw. einen Kurs zu halten. Darüber hinaus haben Seegang und Wind — auch bereits der reine Fahrtwind — Einfluß auf die resultierenden Strömungskräfte infolge Schräganströmung und Drehung, so daß sich die Koeffizienten der Gleichungen (6) bis (9) ändern und damit alle davon abzuleitenden Größen. Diese Änderungen werden erheblich in jedem Falle bei stärkerem Seegang und kommen bei großen Windflächen und starkem Wind auch zu einer gewissen Wirkung. Im Extremfalle des Segelschiffes sind diese Kräfte dann überhaupt ausschlaggebend; die Kursstetigkeit und Wendigkeit eines Segelschiffes liegt in seiner Takelage. Rein statistisch zeigt sich dies bereits in den relativ sehr kleinen Ruderflächen von großen Seglern.

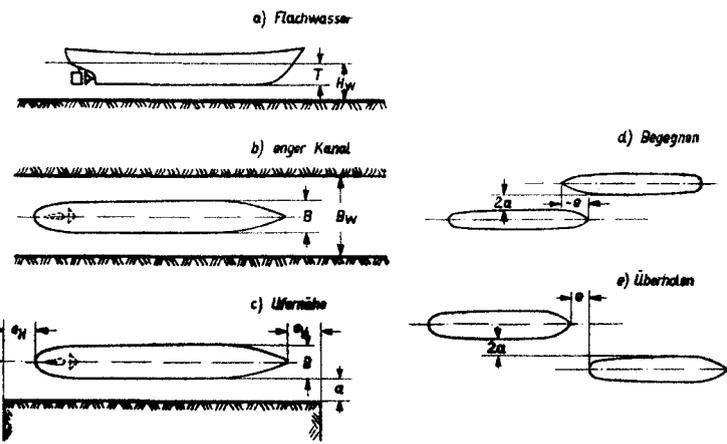


Abb. 13: Schiff in begrenztem Fahrwasser

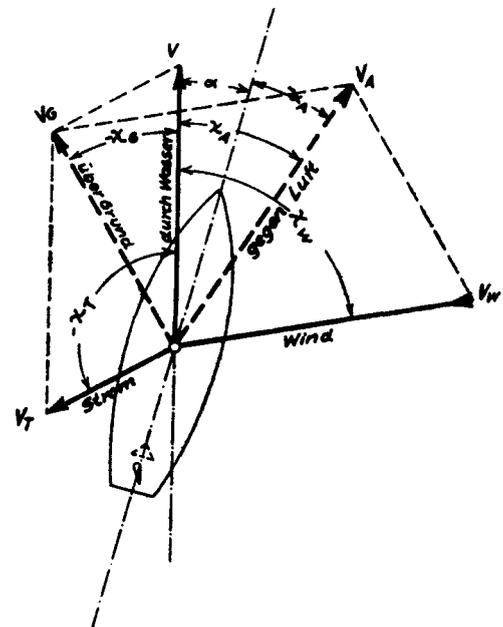


Abb. 14: Schiff mit Wind und Strom

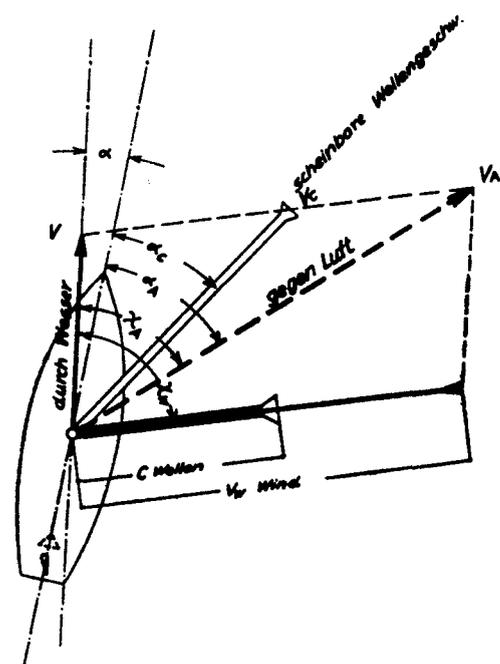


Abb. 15: Schiff mit Wind und See

Die Erfassung dieser Einflüsse kann wohl nur in der Weise erfolgen, daß die wichtigsten Kennzahlen außer für Glattwasserverhältnisse auch für einige Wind- und Seegangsverhältnisse unter Nennung und Kennzeichnung dieser Zustände ermittelt werden.

Außer einer Spezifizierung des Seegangs nach Steilheit und Charakter („Spektrum“) sind dazu die in Abb. 15 eingezeichneten Winkel und Geschwindigkeiten  $\chi_W$ ,  $c$ ,  $v_W$ ,  $v$  notwendig. Aus einer einfachen stationären bzw. hinsichtlich des Seegangseinflusses quasi-stationären Betrachtung des Kräfte- und Momentengleichgewichtes des auf geradem Kurs laufenden Schiffes ergeben sich dann auch für verschiedene Richtungswinkel  $\chi_W$  des Windes und der Windsee die zum Kurshalten maximal noch verträglichen Wellen- und Windgeschwindigkeiten  $c$  und  $v_W$ , wenn das Schiff seine Dienstgeschwindigkeit  $v$  beibehalten will. Wegen der Vielzahl der Möglichkeiten läßt sich auch hierfür keine Kennzahl formulieren, falls man nicht einen Normseegang und eine Normwindstärke vereinbaren kann. In diesem Falle kann man den unverträglichen Bereich der Richtungswinkel durch Kennzahlen etwa

$$\text{Maximaler Winkel gegen an} \quad \equiv \chi_{W, \text{Max}, \text{See}} \quad (93)$$

bis

$$\text{Mindestwinkel bei gedreht} \quad \equiv \chi_{W, \text{Min}, \text{See}} \quad (94)$$

eingrenzen.

Bei Wind mit Strom allein ohne wesentlichen Seegang spielt die Veränderung der gesamten Steuereigenschaften nicht diese Rolle. Dafür werden aber hier gelegentlich Eigenschaften verlangt, die darauf hinauslaufen, daß ein Schiff trotz Strom und oft auch Wind seine Position nach Lage und Richtung des Schiffes genau einhalten soll. Dies ist natürlich nur mit Mehrschraubern oder Sonderantrieben möglich. Bei  $v = 0$  wird nach Abb. 14 der Winkel zwischen Stromrichtung und Schiff zu  $\alpha$  und der zwischen Windrichtung und Schiff zu  $\alpha_A$ . Das Entscheidende ist der Strom. Der Wind tritt demgegenüber meist an Bedeutung zurück. Die Untersuchung theoretischer oder experimenteller Art erstreckt sich dann auch wieder auf die eventuelle Feststellung eines unverträglichen Bereiches von  $\alpha$ .

$$\text{Maximaler Winkel zum Strom} \quad \equiv \alpha_{\text{Max}, \text{Strom}} \quad (95)$$

und

$$\text{Mindestwinkel zum Strom} \quad \equiv \alpha_{\text{Min}, \text{Strom}} \quad (96)$$

grenzen diesen Bereich dann wiederum ein.

#### BF. Einflüsse besonderer Antriebsanordnungen und Schiffstypen.

Die genannten Kennzahlen können im Prinzip bei jedem Schiffstyp und jeder Antriebsart verwendet werden. Es verschiebt sich nur die Bedeutung der einzelnen Kennzahlen, wenn man vom Normaltyp zu Sonderformen übergeht. Dies gilt für alle im Abschnitt A bereits genannten besonderen Antriebsformen und auch für besondere Typen wie Schiffe mit flachem Heck oder mit Bugruder, für besonders schnelle Schiffe oder auch Gleit- und Tragflügelboote. Selbstverständlich gelten bei den Letztgenannten die Beziehungen (4) und (5) nicht mehr in der gleichen Form. Ganz ungewöhnliche Wasserfahrzeuge können hier außer Betrachtung bleiben. Jedoch selbst Schubschiffe mit fest gekoppelten Kähnen können — als ein Fahrzeug betrachtet — bei dieser Betrachtung mit eingeschlossen sein.

#### C. Kennzahlen aus dem Ablauf instationärer Bewegungen.

Kriterien für die Beurteilung instationärer Bewegungen sind meist wenig anschaulich, wenn sie aus theoretischen Untersuchungen kommen, und meist weniger genau bestimmbar, wenn sie entsprechenden Versuchen zu entnehmen sind. Der Zusammenhang mit den einfachen Kräften an

einem sich bewegenden Schiffskörper ist nur mittelbar. Andererseits entsprechen solche Ergebnisse in Gestalt von Zeit und Winkeländerung manchmal mehr der Gewohnheit des Nautikers. Entscheidend für die Bedeutung der Kennzahlen aus instationärer Bewegung ist aber wohl der Umstand, daß entsprechende Versuche weitgehend am naturgroßen Schiff gemacht werden können.

#### CA. Freifahrt.

Alle Kennzahlen werden für Voraufahrt angeschrieben. Sie können sinngemäß unter Beachtung der Vorzeichenänderungen (Abb. 9) auch auf die Rückwärtsfahrt angewendet werden. Zur systematischen Unterscheidung kann den entsprechenden Formelnnummern wieder ein „r“ angefügt werden.

Für die Kursstetigkeit folgt aus der Stabilitätsuntersuchung der Bewegungsgleichungen des frei manövrierenden Schiffes das gleiche Stetigkeitskriterium, wie es durch die Kennzahl (15) bereits ausgedrückt ist. Kennzahlen zur Beurteilung der Kursstetigkeit wird man aus der Beobachtung eines auf Kurs gesteuerten Schiffes erwarten. Es ist dabei im Prinzip gleichgültig, ob von Hand mehr oder weniger gut gesteuert wird oder ob ein Selbststeuerer eingesetzt ist. Von Möckel (28. Zit. in [14]) ist hierfür der Begriff der Gierzahl eingeführt worden. Registriert man über Zeit und Weg des Schiffes bzw. Modelles die seitlichen Wegabweichungen  $y$ , die Kursabweichungen  $\vartheta$  und die zum Kurssteuern gegebenen Ruderwinkel  $\beta$ , so kann man folgende Kennzahlen bilden:

Gierzahl der Wegabweichung

$$d = \frac{|y_{Bb}| + |y_{Stb}|}{\Delta x} \quad (97)$$

Gierzahl der Kursabweichung

$$\equiv \frac{|\vartheta_{Bb}| + |\vartheta_{Stb}|}{\Delta \zeta} \quad (98)$$

Mittlere Wegabweichung

$$\equiv \int_1^2 \frac{|y| dx}{x_2 - x_1} \quad (99)$$

Mittlere Kursabweichung

$$\equiv \int_1^2 \frac{|\vartheta| d\zeta}{\zeta_2 - \zeta_1} \quad (100)$$

Mittlerer Ruderbedarf zum Kurshalten

$$\equiv \int_1^2 \frac{|\beta_h| d\zeta}{\zeta_2 - \zeta_1} \quad (101)$$

Dabei ist  $x$  der Weg des Schiffes in Richtung des Sollkurses,  $\zeta = t \cdot v / L_L$  die dimensionslose Zeit und  $\beta_h$  ein wirksamer Ruderwinkel nach (102)

$$\beta_h = \beta - \int_1^2 \frac{\beta d\zeta}{\zeta_2 - \zeta_1} \quad (102)$$

Die Gierzahlen (97) und (98) sind jeweils aus einer charakteristischen Weg- bzw. Kursschwingung zu bilden, während die Mittelwerte (99) bis (101) über einen längeren Zeitraum zu mitteln sind. Alle Kennzahlen sollen möglichst klein sein für ein gut steuerndes und gut gesteuertes Schiff.

Für das Abdrehen in eine stationäre Drehung (Abb. 8) können zahlreiche Kennzahlen aus den dabei auftretenden charakteristischen Wegen, Winkeln und Zeiten gebildet werden. Der Radius des stationären Endzustandes ist in der Form  $L_L/R$  schon in den Kennzahlen (37) (39) erfaßt. Die Zuordnung zu bestimmten Ruderlagen, etwa 35 Grad, maximaler Ruderwinkel oder bestimmter anderer Ruderwinkel, kann durch entsprechende Indizes geschehen. Hier soll nur die allgemeine Form dieser Kennzahlen angegeben werden.

$$\text{Andrehweg} \quad \equiv x_A / L_L \quad (103)$$

$$\text{Andreh-Versetzung} \quad \equiv y_A / L_L \quad (104)$$

- Andreh-Kursabweichung  $\equiv \vartheta_A$  (105)  
 Vorausweg  $\equiv VA/L_L$  (106)  
 Taktischer Durchmesser  $\equiv TD/L_L$  (107)  
 Querweg  $\equiv QA/L_L$  (108)  
 Andrehzeit (Vom Beginn des Manövers bis zum Erreichen der stationären Drehung.)  $\equiv \zeta_A$  (109)  
 Wendezeit (Vom Beginn bis zur 180 Grad Schwenkung der Schiffsbahn)  $\equiv \zeta_{TD}$  (110)

Für das Stützen des Schiffes können nun ganz analog aufgebaute Kennzahlen aus dem Bewegungsablauf des Auslaufens aus der stationären Drehung gebildet werden. Abb. 8 kann dann im umgekehrten Sinne als Schema dienen. Vom Punkt A an beginnt das Auslaufen aus der Drehung durch Rücknahme des Ruders auf Null-Lage. Es wird also nicht etwa Gegenruder gelegt wie beim weiter zu besprechenden Z-Manöver, da dann ja kein einwandfreies Auslaufen auf geraden Kurs erfolgen würde. Die Kennzahlen für das Auslaufen werden gegenüber den entsprechenden Kennzahlen des Andrehens oder Abdrehens durch einen zusätzlichen Index „0“ gekennzeichnet. Wegen der völligen Analogie zu (103) bis (110) soll hier darauf verzichtet werden, sie anzuschreiben. Dagegen sollen die Kennzahlen des Auslaufens zu denen des Andrehens durch weitere Kennzahlen ins Verhältnis gesetzt werden, da diese Verhältnisse recht anschaulich einen Begriff vom Stützen im Verhältnis zum Drehen geben. Diese Verhältnisse liegen immer über 1, da die Vorgänge beim Auslaufen weniger rasch vor sich gehen als beim Andrehen. Sie würden natürlich unter 1 liegen, wenn das Auslaufen mit Stützruder gefahren würde.

- Auslauf-Andreh-Wegverhältnis  $x_{A0}/x_A$  (111)  
 Auslauf-Andreh-Versetzungsverhältnis  $y_{A0}/y_A$  (112)  
 Auslauf-Andreh-Kursabweichungsverhältnis  $\vartheta_{A0}/\vartheta_A$  (113)  
 Auslauf-Andreh-Vorauswegverhältnis  $VA_0/VA$  (114)  
 Auslauf-Andreh-TD-Verhältnis  $TD_0/TD$  (115)  
 Auslauf-Andreh-Querwegverhältnis  $QA_0/QA$  (116)  
 Auslauf-Andreh-Zeitverhältnis  $\zeta_{A0}/\zeta_A$  (117)  
 Auslauf-Andreh-Wendezeitverhältnis  $\zeta_{TD0}/\zeta_{TD}$  (118)

Der Bewegungsvorgang, der sich ergibt, wenn die Drehung mit gleich großem Gegenruder beendet und dann in eine gegensinnige Drehung eingelaufen wird, entspricht dem Prinzip des Standard-Manövierversuches, auch Schlängelversuch oder international Z-Manöver genannt. Der Wert dieses Versuches, der von Kraemer (39. Zit. in [14] eingeführt und von Kempf, Hebecker und Möckel zum „Standard“-Versuch entwickelt worden ist, liegt darin, daß er relativ leicht mit Schiff und Modell durchgeführt werden kann. Ein Vorteil und Nachteil zugleich ist, daß praktisch alle Steuerungseigenschaften der Freifahrt in ihm implizit enthalten sind bzw. enthalten sein können, wenn der Versuch (vgl. Abb. 16) auch bei großem Ruderwinkel gefahren wird. Die Bildung von Kennzahlen für einen derartigen Bewegungsablauf ist besonders wichtig für die systematische Verwertung des durch solche Versuche relativ häufig anfallenden Erfahrungsmaterials. Dem Zusammenhang dieser Kennzahlen mit den Kennzahlen, die die einzelnen Eigenschaften explizit beschreiben, kommt so eine besondere Bedeutung zu. Abb. 16 zeigt oben den Verlauf des Schiffskurses  $\vartheta$  und des Ruderwinkels  $\beta$  für das erste Ausschwenken aus der Geradeaus-

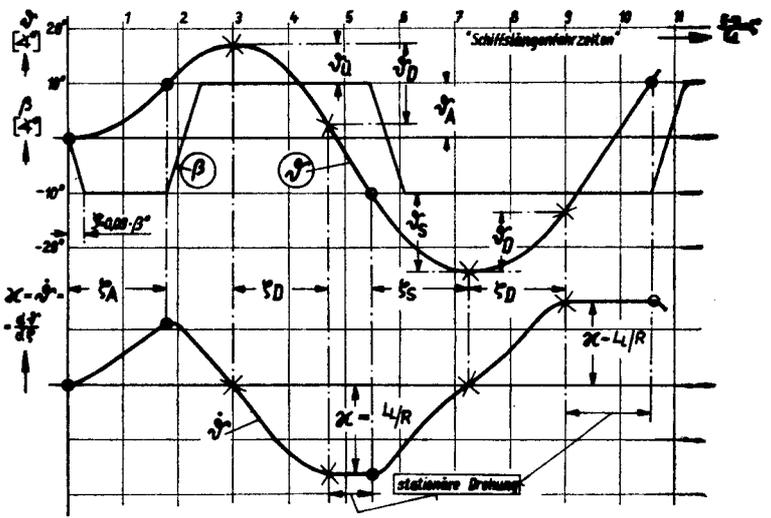


Abb. 16: Schema für den Standard-Manövierversuch (Z-Manöver)

fahrt. Noch ehe die zu diesem Ruderwinkel gehörende stationäre Drehung sich hat einstellen können, wird dann bei z. B. 10 Grad Kursabweichung Gegenruder gelegt. Die erste Drehung hört dann auf, um in die Gegendrehung überzugehen. Von diesem Punkt bis zum Erreichen einer stationären Gegendrehung wird die Drehzeit gerechnet. Meist verbleibt dann noch eine kurze Zeit für diese stationäre Drehung, bis dann bei 10 Grad Gegenkurs im Beispiel wieder Gegenruder kommt. Von da ab bis zum Aufhören der Drehung rechnet dann wieder die Stützzeit, an die dann unmittelbar wieder eine neue Drehzeit anschließt. Der Einfluß der endlichen Ruderlegezeit kann im allgemeinen schon nicht mehr vernachlässigt werden, wie Abb. 16 anschaulich zeigt. Darum ist die relative Ruderlegezeit  $\zeta/\beta$  ein notwendiger Parameter zur Kennzeichnung der Bedingungen des Manövierversuches. Man kann mit

$$\frac{t \cdot v}{L_L \cdot \beta^0} = \zeta / \beta^0 = 0,03 \quad (119)$$

hierfür eine gewisse Norm vorschlagen. Eine Verwendung der bekannten 30 Sekunden von Hart zu Hart als Ruderlegezeit ist nicht nur für die Modellverhältnisse völlig unsinnig, es entspricht auch nicht den Bedürfnissen der verschiedenen Schiffstypen. Im unteren Teil von Abb. 16 ist noch zusätzlich die Differentialkurve der Kurskurve gezeigt, um die einzelnen Phasen des Vorgangs deutlicher abgrenzen zu können. Die Darstellung ist der Deutlichkeit halber etwas schematisiert auf Grund der in [5] mitgeteilten Ergebnisse. Aus einem Manövierversuch mit vorgegebenem Ruderwinkel  $\beta$ , relativer Ruderlegezeit  $\zeta/\beta$  und vorgegebener „Schalt-Kursabweichung“  $\vartheta_A$  ergeben sich die Anschwenkzeit  $\zeta_A$ , eine oder mehrere Drehzeiten  $\zeta_D$ , eine oder mehrere Stützzeiten  $\zeta_S$ , eine oder mehrere Drehungen  $\kappa$ , ein Überschwingwinkel  $\vartheta_A$ , ein oder mehrere Drehwinkel  $\vartheta_D$  und ein oder mehrere Stützwinkel  $\vartheta_S$ . Diese Werte jeder für sich besagen wenig, sie werden erst beim statistischen Vergleich interessant. Als Kennzahlen wird man daher gewisse physikalisch sinnvolle Verhältnisse dieser Werte verwenden.

Außer dem Ruderbedarf  $\beta/\kappa$ , der schon in den Kennzahlen (38) und (41) genannt ist, kommen in Betracht:

- Relativer Drehwinkel  $\equiv \vartheta_D/\kappa^2$  (120)  
 Relativer Stützwinkel  $\equiv \vartheta_S/\kappa^2$  (121)  
 Stütz-Drehwinkel-Verhältnis  $\equiv \vartheta_S/\vartheta_D$  (122)  
 Relative Drehzeit  $\equiv \zeta_D/\kappa$  (123)  
 Relative Stützzeit  $\equiv \zeta_S/\kappa$  (124)  
 Stütz-Drehzeit-Verhältnis  $\equiv \zeta_S/\zeta_D$  (125)  
 Relativer Überschwingwinkel  $\equiv \vartheta_{\text{Ü}}/\vartheta_A$  (126)

Schließlich kann auch die Zeitzahl für eine volle Kurschwenkung, die „Schlängelzeit“  $\zeta_Z$ , bezogen auf die dabei auftretende stationäre Drehung als

Relative Schlängelzeit  $\equiv \zeta_Z/\kappa$  (127) angegeben werden.

Der Schlängelversuch setzt sich überwiegend aus instationären Bewegungszuständen zusammen, die lediglich durch kurze stationäre Intervalle unterbrochen sind. Trotz der prinzipiell gegebenen Grundlagen ist daher bisher noch keine instationäre Nachrechnung bekannt geworden, da der Aufwand zu mühselig erscheint. Man kann jedoch auch hierfür eine quasi-stationäre Annäherung machen, die dabei die Ansätze (5) bis (9) benutzt. Man erhält dann für einen Zeitabschnitt des Schlängelversuches, der zwischen zwei Drehungen bzw. zwischen der Drehung Null und einer Drehung liegt, die Näherung (128). Es ist dabei  $\kappa = L_L/R$  der stationäre Wert der Drehung.

$$\zeta_{01} = 2 L \int_0^{\kappa} \frac{d\kappa}{c_M} + d\alpha/d\kappa \quad (128)$$

Dieses Integral kann, falls die Koeffizienten für die Gleichungen (5a) und (6) hierzu gegeben sind, sofort gelöst werden. Liegt das Giermomentendiagramm als experimentelles Ergebnis vor, so kann es durch Auswertung nach Art von Abb. 5 auf seine Parameter hin analysiert werden, die dann über (6) in (128) eingeführt die numerische Lösung

für die Drehzeit ergeben. Man kann aber auch unmittelbar durch graphische Integration nach dem Schema von Abb. 17 die Drehzeit bzw. Stützzeit bestimmen. Das Korrekturglied  $d\alpha/d\kappa$  ist dann aus der gemessenen Abhängigkeit  $\alpha(\kappa)$  leicht zu entnehmen. Die gleiche Methode ist z. B. bei der Bestimmung der Startzeit von Flugzeugen nach graphisch gegebenen Grundlagen im Gebrauch gewesen.

Will man umgekehrt aus dem Schlängelversuch auf die in Abschnitt B. gegebenen Kennzahlen schließen, so bedarf es mehrfacher Differentiationen der „Schlängelkurve“  $\vartheta(\zeta)$ . Sofern die Schlängelkurve mit der hierzu nötigen Genauigkeit aufgenommen werden kann — hierzu ist natürlich eine häufigere Zeitnahme als nur alle 10 Grad Kursänderung notwendig —, können aus der ersten Ableitung  $d\vartheta/d\zeta$  im Bereich stationärer Drehung und aus den höheren Ableitungen bei  $d\vartheta/d\zeta = 0$  (vgl. Abb. 16) folgende Kennzahlen gewonnen werden:

$$\text{Mit } \zeta = t \cdot v / L_L \text{ und } d\vartheta/d\zeta = \dot{\vartheta} \text{ und } \iota = \frac{i_z^2}{L_L^2} \cdot \frac{\forall}{F_L \cdot L_L}$$

$$d^2\vartheta/d\zeta^2 = \ddot{\vartheta}$$

usw.

$$\text{Ruderbedarf, Kennzahl (38)} \quad \frac{\beta}{\kappa} = \frac{\vartheta}{\dot{\vartheta}} \quad (\ddot{\vartheta} = 0) \quad (129)$$

$$\text{Steuermomentenzunahme, Kennzahl (26)}$$

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\forall} \cdot \frac{dc_M}{d\beta} = 2 \iota \frac{F_L \cdot L_L}{\forall} \cdot \ddot{\vartheta} \quad (\dot{\vartheta} = 0) \quad (130)$$

$$\text{Kurstetigkeit, Kennzahl (15)}$$

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\forall} \left( \frac{dc_M}{d\kappa} \right)_0 = 2 \iota \frac{F_L \cdot L_L}{\forall} \cdot \left( \frac{\ddot{\vartheta}}{\dot{\vartheta}} \right) \quad (\dot{\vartheta} = 0) \quad (131)$$

$$\text{Stetigkeitszunahme, Kennzahl (17)}$$

$$\frac{F_L \cdot L_L}{\forall} \cdot \frac{d^2 c_M}{d\kappa^2} = 2 \iota \frac{F_L \cdot L_L}{\forall} \left( \frac{\ddot{\vartheta} - \dot{\vartheta}^2/\vartheta}{\dot{\vartheta}} \right) \quad (132)$$

(129) ergibt sich aus der Neigung der Kurskurve (Abb. 16) in ihrem linearen Teil. Die höheren Ableitungen für (130) bis (132) sind immer nur an der Stelle  $\dot{\vartheta} = 0$  erforderlich; sie können also aus mehrfacher Auftragung der Differenzenquotienten und Extrapolieren auf den Wert bei den Maxima bzw. Minima der Kurskurve erhalten werden. Streuungen der Meßkurve gleichen sich dabei aus, und es bedarf keiner instrumentellen Hilfsmittel oder besonderer Peinlichkeit bei der Ausführung der graphischen Differentiation.

Zwischen (130) bis (132) und (129) besteht näherungsweise der Zusammenhang (14), der dann zur Kontrolle der aus dem Schlängelversuch ausgewerteten Ergebnisse dienen kann. Hierdurch ist also ein Weg gegeben, um aus dem Schlängelversuch ein Giermomentendiagramm zu konstruieren. Selbstverständlich ist der direkte Weg der Messung am Rundlaufgerät einfacher, schneller und genauer, wenn man ein solches gesamtes Diagramm erhalten muß. Zur Kontrolle einzelner Kriterien oder Kennzahlen kann aber so der Schlängelversuch weit mehr als bisher üblich noch ausgewertet werden.

### CB. Schlepffahrt.

Die Verfolgung des Bewegungsvorganges am geschleppten Schiff liefert gegenüber den unter BB. angegebenen Werten noch die Amplituden und die Frequenz der Pendelbewegungen des „Anhangs“. Es bestehen aber keine praktischen Gesichtspunkte, um hieraus weitere Kennzahlen zur Beschreibung der Eigenschaften geschleppter Fahrzeuge aufzustellen, so daß hinsichtlich der Kennzahlen auf (72) bis (78) verwiesen werden kann.

### CC. Manövrieren in und aus dem Stand.

Eine instationäre Ergänzung der bereits mit (79) bis (88) hierfür gegebenen Kennzahlen stellen die Drehzeiten aus der Ruhe heraus dar. Für das An- und Ablegen wird man eine 90-Grad-Drehung und für das Drehen „auf dem Teller“ im freien Wasser eine 180-Grad-Drehung zugrunde legen.

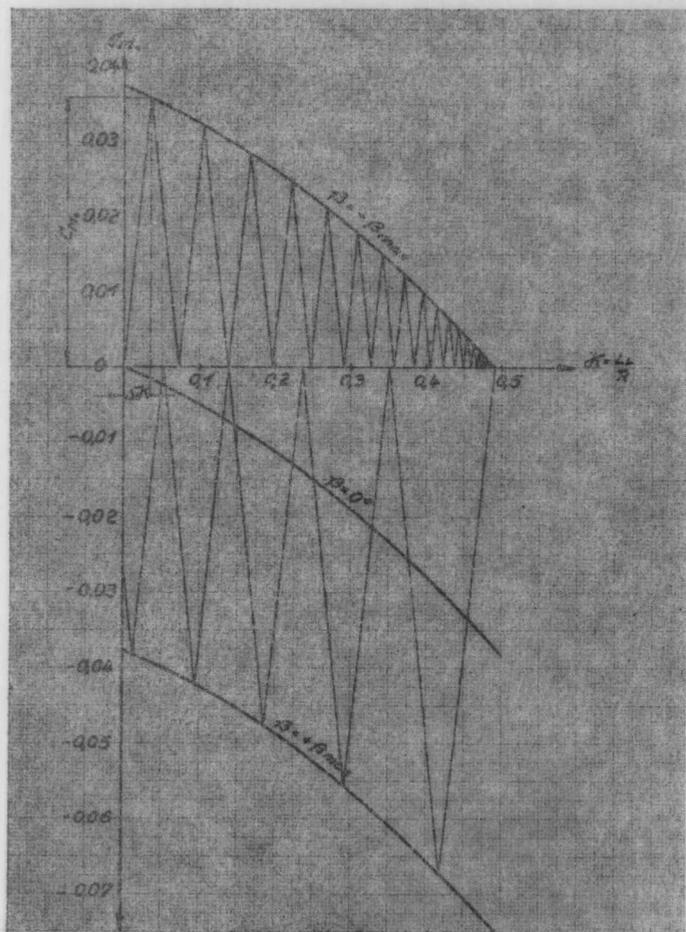


Abb. 17: Beispiel für die graphische Bestimmung von Dreh- und Stützzeiten aus dem Giermomentendiagramm

(nach Abb. 3 mit  $\beta = \mp \beta_{Max}$ )

$$\text{Mit } \frac{t \cdot v}{L_L} = \zeta = 2 \iota \cdot n + d\alpha/d\kappa$$

$n \equiv$  Anzahl der  $\Delta\kappa$ -Schritte von  $\kappa = 0$

bis  $\kappa = \kappa_{Max}$  bei  $\frac{\Delta\kappa}{c_M} = 1$ .

$$\iota = \frac{1}{F_L \cdot L_L} \cdot \frac{i_z^2}{L_L^2}; \quad d\alpha/d\kappa \text{ nach Versuch oder (5a)}$$

Das eingezeichnete Beispiel ergibt für

$$\text{Drehen: } \zeta_D = 37 + d\alpha/d\kappa$$

$$\text{Stützen: } \zeta_S = 9,3 + d\alpha/d\kappa$$

nach [11]:  $d\alpha/d\kappa \approx 0,2$

Man erhält dann noch die beiden Kennzahlen (133) und (134):  
Relative Zeit für An- oder Ablegen  
auf 90 Grad aus der Ruhe

$$\equiv \left( t \sqrt{\frac{g}{L_L}} \right)_{A, 90^\circ} \quad (133)$$

Relative Zeit für Wenden  
auf 180 Grad aus der Ruhe

$$\equiv \left( t \sqrt{\frac{g}{L_L}} \right)_{180^\circ} \quad (134)$$

#### CD. Verhalten bei Fahrwasserbegrenzung.

Die Fahrwasserbegrenzung ist häufig wie beim Passieren anderer Schiffe, besonderer Strombauten oder ganz allgemein diskontinuierlicher Uferkontur zeitlich veränderlich. Als Kennzahlen zur Kennzeichnung solcher instationärer Bewegungsabläufe werden zweckmäßig die Extremwerte der beim Passieren dieser Stellen auftretenden Querkräfte und Giermomente einerseits bzw. der zum Kompensieren notwendigen Gierwinkel und Ruderwinkel andererseits festgehalten.

Die geometrischen Verhältnisse der Fahrwasserbegrenzung bzw. die Geschwindigkeitsverhältnisse sind dabei anzugeben (Abb. 13). Für den Passierabstand spricht der Wert a/B. Außer dem Geschwindigkeitsverhältnis  $v_1/v_2$ , das positiv beim Überholen und negativ beim Begegnen ist, soll noch die Froudesche Zahl der Relativgeschwindigkeit beider Fahrzeuge angegeben werden  $(v_1 + v_2) / \sqrt{g \cdot L_{L,1}}$ . Beim Überholen wäre die Differenz der Geschwindigkeiten zu setzen. Die Länge ist die Länge des Schiffes, für das die Untersuchung durchgeführt wird und für das die Kennzahlen gegeben werden.

Maximale Querkraftbeizahl  
beim Passieren

$$\equiv \left( \frac{F_L}{\sqrt{v^3}} \cdot c_Q \right)_{P, \text{Max}} \quad (135)$$

Maximale Momentenbeizahl  
beim Passieren

$$\equiv \left( \frac{F_L \cdot L_L}{\sqrt{v}} \cdot c_M \right)_{P, \text{Max}} \quad (136)$$

Maximaler Gierwinkel beim Passieren

$$\equiv \alpha_{P, \text{Max}} \quad (137)$$

Maximaler Ruderwinkel beim Passieren

$$\equiv \beta_{P, \text{Max}} \quad (138)$$

Dabei sind auch von Interesse die kritischen „Eindringtiefen“ beim Passieren von anderen Schiffen oder Diskontinuitäten des Ufers oder am Ufer.

$$(e_v / L_L)_{\text{Krit.}} ; (e_H / L_L)_{\text{Krit.}}$$

#### D. Experimentelle Methoden und formale Zusammenhänge zwischen den Kennzahlen.

Die experimentelle Bestimmung der in den Abschnitten B. und C. zusammengestellten Kennzahlen der Steuereigenschaften wird immer im Vordergrund des praktischen Interesses stehen. Die theoretischen Methoden geben Kontrollen, Ergänzungen und vor allem den inneren Zusammenhang des gesamten Komplexes. Bereits durch qualitative theoretische Überlegungen können formale Zusammenhänge zwischen verschiedenen Kennzahlen, die bei verschiedenen Versuchsausführungen gewonnen werden können, hergestellt werden. Manche Kennzahlen, deren unmittelbare experimentelle Bestimmung vielleicht schwierig oder an bestimmte instrumentelle Voraussetzung gebunden ist, können damit aus den Ergebnissen mehrerer anderer Versuchsarten unmittelbar gewonnen werden. Es ginge zu weit, diese Möglichkeiten in jedem Falle entsprechend zu verfolgen. Durch eine Liste der Versuchsarten und eine anschließende Liste der Kenn-

zahlen soll aber die wechselseitige Zuordnung etwas übersichtlicher gemacht werden. Die Liste der Versuchsarten erstrebt im Rahmen dieser Arbeit eine Vollständigkeit an. Dennoch kann hierfür keine Gewähr gegeben werden. Die Liste der Kennzahlen enthält alle bereits in der Arbeit aufgeführten Kennzahlen.

#### Versuchsarten.

Neben einer Kennzeichnung durch Buchstaben sind kurze Stichworte zur Benennung und Erläuterung der Versuchsarten und daran anschließend die Nummern der aus diesen Versuchen direkt zu gewinnenden Kennzahlen gegeben. „Direkt“ heißt hier „ohne Gebrauch theoretischer oder zusätzlicher experimenteller Ergebnisse“.

- a) Drehkreismessung am frei fahrenden Schiffsmodell mit Eigenantrieb.  
Kennzahlen: 35 bis 41, 53 bis 56, auch rückwärts.
- b) wie a) am Schiff.
- c) Drehkreismessung am frei fahrenden Modell mit Eigenantrieb und Vorgabe eines Giermomentes. Damit Drehkreise auch ohne Ruderlage.  
Kennzahlen: 15, 17, 19, 23, 26, 27, 28, 35, 36, 57, 66 bis 69, auch rückwärts.
- d) Traversiersversuch in Freifahrt.  
Kennzahlen: 80.
- e) An- und Ablegeversuch in Freifahrt.  
Kennzahlen: 82, 133.
- f) Freifahrt-Drehversuch am Stand.  
Kennzahlen: 84, 134.
- g) Querschleppversuch.  
Kennzahlen: 79, 80.
- h) Dreikomponentenmessung am Stand.  
Kennzahlen: 81 bis 88.
- i) Einfacher Schleppversuch mit Giermomentenmessung ohne Gierwinkel.  
Kennzahlen: 31 bis 34, auch r.
- j) Einfacher Schrägschleppversuch mit Drei-Komponenten-Messung.  
Kennzahlen: 26, 27, 28, 31 bis 34, 79 bis 88, auch r.
- k) Schrägschleppversuch mit gekrümmten Modellen.  
Kennzahlen: 15, 17, 19 bis 28, 31 bis 36, 57, 66 bis 69, auch r.
- l) Ruderlagenbestimmung für verschwindendes Giermoment und Fliehkraftausgleich der Querkraft, am Rundlaufgerät.  
Kennzahlen: 35 bis 41, auch r.
- m) Giermomentenmessung für Fliehkraftausgleich der Querkraft, am Rundlaufgerät.  
Kennzahlen: 15, 17, 19 bis 25, 35 bis 41, 57, auch r.
- n) Drei-Komponenten-Messung am Rundlaufgerät.  
Kennzahlen: 15, 17, 19 bis 25, 35 bis 41, 53 bis 57, auch r.
- o) Giermomentenmessung mit am Stand drehendem Modell, an der Drehvorrichtung.  
Kennzahl: 81 bis 84, 133, 134.
- p) Ruderlagenbestimmung für verschwindendes Giermoment und Fliehkraftausgleich der Querkraft, am Schleppwagen mit Querlauf- und Dreheinrichtung (X-Y-Wagen).  
Kennzahlen: wie bei l).
- q) Giermomentenmessung für Fliehkraftausgleich durch Querkraft, am Schleppwagen mit Querlauf- und Dreheinrichtung.  
Kennzahlen: 15, 17, 19 bis 28, 31 bis 41, 57, auch r.
- r) Drei-Komponenten-Messung am Schleppwagen mit Querlauf- und Dreheinrichtung.  
Kennzahlen: 15, 17, 19 bis 28, 31 bis 41, 49 bis 63, 66 bis 71, auch r, 79 bis 88.
- s) Auslaufversuche mit verschiedenen Ruderlagen am Modell.  
Kennzahlen: 19, 35 bis 41, auch r.
- t) wie s) am Schiff.
- u) Standard-Manövrierversuch (Z-Manöver) am Modell.  
Kennzahlen: 35, 36, 37, 38, 120 bis 127, u. U. auch r.

- v) wie u) am Schiff.  
w) Kurssteuer-Versuch mit Handsteuerung am Modell.  
Kennzahlen: 97 bis 101, auch r.  
x) wie w) am Schiff.  
Kennzahlen: 98, 100, 101, auch r.  
y) Kurssteuer-Versuch mit Selbststeuerer am Modell.  
Kennzahlen: wie w).  
z) Kurssteuer-Versuch mit Selbststeuerer am Schiff.  
Kennzahlen: wie x).
- aa) Freifahrt-Drehkreis- und Wendeversuch am Modell.  
Kennzahlen: 19, 35 bis 41, 53, 55, 56, 57, 103 bis 118,  
auch r.  
ab) wie aa) am Schiff.  
Kennzahlen: 19, 35 bis 41, 53, 55, 56, 57, 105, 107,  
113, 117, 118, auch r.  
ac) Drehen aus dem Stand am Modell, in „Freifahrt“.  
Kennzahlen: 82, 84, 133, 134.  
ad) wie ac) am Schiff.  
ae) Passivversuch in Freifahrt.  
Kennzahlen: 137, 138.  
af) Ufer- und Anlaufversuch in Freifahrt.  
Kennzahlen: 91, 92, 137, 138, auch r.  
ag) Kursversuch mit geschlepptem Modell.  
Kennzahlen: 72 bis 76, auch r.  
ah) wie ag) am Schiff.  
ai) Kursversuche mit schleppendem Modell.  
Kennzahlen: 77, 78.  
aj) wie ai) am Schiff.  
ak) Dreihkreisversuche mit Schleppzug bei Freifahrt im  
Modell.  
Kennzahlen: 35 bis 41, 53, 55, 56, 72 bis 78, 82, 84,  
133, 134.  
al) Drei-Komponenten-Messung beim Passieren.  
Kennzahlen: 135 bis 138.  
am) Drei-Komponenten-Messung beim Ufer-An- und -Ab-  
lauf.  
Kennzahlen: 89 bis 92, 135 bis 138, auch r.  
an) Drei-Komponenten-Messung mit in Fahrt drehendem  
Modell, an der Drehvorrichtung am Schleppwagen.  
Kennzahlen: wie j).  
ao) Drei-Komponenten-Messung mit auf Kreisbahn ge-  
führtem, um sich drehendem Modell, an der Drehvor-  
richtung am Rundlaufgerät.  
ap) Drehversuch mit schleppendem Modell am Rundlauf-  
gerät.  
Kennzahlen: wie bei n) und 72 bis 78.  
aq) Bahnschwingungsversuch mit Weg- und Winkel-  
geführten Modell.  
ar) Überwasserschiff-Schrägschleppversuch mit Drei-  
Komponenten-Messung.  
as) Überwasserschiff-Drei-Komponenten-Messung  
am Rundlaufgerät.  
at) Drei-Komponenten-Windkanal-Messung am Überwasser-  
schiffs-Modell.  
au) Drei-Komponenten-Messung am drehenden Über-  
wasserschiffs-Modell im Windkanal.  
av) Drei-Komponenten-Messung am schwingenden Über-  
wasserschiffs-Modell im Windkanal.

Die Versuche an) bis aq) sind hier mit aufgeführt, obwohl sie unmittelbar keine Kennzahlen liefern. Sie tragen aber durch Ermittlung verschiedener Strömungskräfte in Ergänzung anderer Versuche bzw. für rechnerische Untersuchungen zur mittelbaren Bestimmung von Kennzahlen für Steuereigenschaften bei.

#### Kennzahlen.

Die nachfolgende Liste dient der Koordinierung der Kennzahlen und der Versuche von den Kennzahlen her. Nur die Nummern der Kennzahlen und dahinter die Buchstaben der zur Gewinnung dieser Kennzahlen geeigneten Versuche werden angegeben. Die Ordnung erfolgt nach Eigenschaftskomplexen und innerhalb dieser nach den Formelnummern der Kennzahlen. Ein Teil der Kennzahlen ist nicht unabhängig, sondern steht mit anderen Kennzahlen in einem

formalen Zusammenhang. Einige der besonders einfachen Beziehungen werden in Form von Symbolgleichungen angegeben. Die Sachbedeutung der Kennzahl-Nummern ist dem fortlaufenden Text der Abschnitte B. und C. zu entnehmen; eine kurze Stichwörtererläuterung für die Kennbuchstaben der Versuchsarten bringt die hier voraufgehende Liste der Versuchsarten.

#### Kurshalten

- (15) aus: c, k, m, n, q, r.  
 $(15) = -0,5 \cdot (19) \cdot (17) = - (20) \cdot (17) = \sqrt{-(21) \cdot (17)}$   
 $= \sqrt{(17) \cdot (22) \cdot (26)} = - (35) \cdot (26)$
- (17) aus: c, k, m, n, q, r.  
 $(17) = -0,5 \cdot (15)/(19) = -(15)/(20) = -(15)^2/(21)$   
 $= (15)^2/[(22) \cdot (26)] = -2 \cdot (26) \cdot (36)$
- (19) aus: c, k, m, n, q, r, s, t, aa, ab.  
 $(19) = -2 \cdot (15)/(17) = 2 \cdot (20) = 2 \cdot (21)/(15)$
- (20) aus: k, m, n, q, r, ap.  
 $(20) = -(15)/(17) = 0,5 \cdot (19) = (21)/(15)$
- (21) aus: k, m, n, q, r, ap.  
 $(21) = -(15)^2/(17) = (15) \cdot (20) = 0,5 \cdot (15) \cdot (19)$
- (22) aus: k, m, n, q, r, ap.  
 $(22) = (15)^2/[(17) \cdot (26)] = (21)^2 \cdot (17)/(26)$
- (23) aus: c, k, m, n, q, r, ap.  
(24) und (25) aus: k, m, n, q, r, ap.  
(97) aus: w, y.  
(98) aus: w, x, y, z.  
(99) aus: w, y.  
(100) aus: w, x, y, z.  
(101) aus: w, x, y, z.

#### Drehen

- (26) aus: c, j, k, q, r, an.  
 $(26) = -(15)/(35) = (15)^2/[(17) \cdot (22)]$
- (27) und (28) aus: c, j, k, q, r, an.  
(31) bis (34) aus: j, k, q, r, an.  
(35) aus: a, c, k bis n, p bis u, aa, ab, ak, ap.  
 $(35) = -(15)/(26)$
- (36) aus: wie (35).  
 $(36) = -0,5 \cdot (17)/(26)$
- (37) und (38) aus: a, l, m, n, p bis u, aa, ab, ak, ap.  
(39) bis (41) aus: a, l, m, n, p bis t, aa, ab, ak, ap.  
(49) bis (52) aus: r und auch aus i + m, j + n.  
 $(49) = (27) + (67)$   
 $(50) = (49)/(37)$   
 $(51) = (28) + (66)$   
 $(52) = (51)/(39)$
- (53) aus: a, b, n, r, aa, ab, ak, ap.  
(54) aus: a, b, n, r, ap.  
(55) und (56) aus: wie (53).  
(103) und (104) aus: aa.  
(105) aus: aa, ab.  
(106) aus: aa.  
(107) aus: aa, ab.  
(108) bis (110) aus: aa.  
(120) aus: u, v.  
(123) aus: u, v.  
(127) aus: u, v.

#### Stützen

- (57) aus: c, k, m, n, q, r, aa, ab, ap.  
(58) bis (63) aus: r und auch aus i + m, j + n.  
 $(58) = -(27) + (67) = (49) - 2 \cdot (27)$   
 $(59) = (58)/(37)$   
 $(60) = -(28) + (66) = (51) - 2 \cdot (28)$   
 $(61) = (60)/(39)$   
 $(62) = -2 \cdot (27)/(37)$   
 $(63) + -2 \cdot (28)/(39)$   
(66) bis (69) aus: c, k, r und auch aus i + m, j + n.  
 $(66) = (15)_{FA=0} \cdot (39)^2/2 + (17)_{FA=9} \cdot (39)^3/6$   
 $(67) (15) \cdot (37)^2/2 + (17) \cdot (37)^3/6$   
 $(68) = (66)/(39)$

- (69) = (67)/(37).  
 (70) und (71) aus: r und auch aus i + m, j + n.  
 (70) [—(27 + (67))/(49) = (58)/(49).  
 (71) = [—(28) + (66)]/(51) = (60)/(51).  
 (111) und (112) aus: aa.  
 (113) aus: aa, ab.  
 (114) bis (116) aus: aa.  
 (117) und (118) aus: aa, ab.  
 (121) und (122) aus: u, v.  
 (122) = (121)/(120).  
 (124) bis (126) aus: u, v.  
 (125) = (124)/(123).

#### Schleppfahrt

- (72) bis (76) aus: ag, ah, ak, ap.  
 (77) und (78) aus: ai, aj, ak, ap.

#### Manövrieren im und aus dem Stand

- (79) aus: g, j, r, an.  
 (80) aus: d, g, j, r, an.  
 (81) aus: h, j, o, r, an.  
 (82) aus: e, h, j, o, r, ac, ak, an.  
 (83) aus: wie (81).  
 (84) aus: f, h, j, o, r, ac, ak, an.  
 (85) bis (88) aus: h, j, r, an.  
 (133) aus: e, o, ac, ad, ak.  
 (134) aus: f, o, ac, ad, ak.

#### Verhalten bei Fahrwasserbegrenzung

- (89) und (90) aus: am.  
 (91) und (92) aus: af, am.  
 (135) und (136) aus: al, am.  
 (137) und (138) aus: ae, af, al, am.

#### Einfluß von Strom, Wind und Seegang

- (93) bis (96) aus: den Ergebnissen der Versuche j bzw. n bzw. r mit und ohne Seegang durch Überlagerung mit den Ergebnissen der Versuche ar bzw. as bzw. at.

#### E. Folgerungen.

Eine Durchsicht des vorgelegten Verzeichnisses von Kennzahlen für Steuereigenschaften der Schiffe zeigt, daß die Sammlung sowohl qualitativ noch zu verfeinern ist als auch quantitativ noch Ergänzungswünsche offen läßt. Im Verlauf weiterer Arbeit an den Problemen der Steuereigenschaften werden sich hierzu noch sicher manche Gesichtspunkte ergeben, die hier vorgelegten Kennzahlen, die nicht etwa als eine Norm, sondern als Vorschlag für eine Begriffsabstimmung aufgefaßt werden möchten, zu überprüfen und anzupassen. Die große Zahl von über 100 Kennzahlen mag etwas erschrecken. Sie verteilt sich aber über sehr unterschiedliche Gebiete einerseits, und zum anderen sind viele Eigenschaften durch eine größere Zahl von Kennzahlen ausgedrückt worden, um den Bedürfnissen spezieller Versuchsbedingungen möglichst weit entgegen zu kommen. Viele dieser Kennzahlen können durch einfache Umrechnung aus anderen Kennzahlen gewonnen werden, so daß natürlich die Zahl der unabhängigen Kennzahlen bei vielen Eigenschaften bedeutend geringer ist. Es erscheint also im Augenblick noch offen, ob durch weitere Arbeit an dem Thema die Zahl der Kennzahlen sich vermehren wird oder ob sie sich vielleicht doch etwas einschränken läßt.

Als Folge der Analysierung der Versuchsergebnisse durch Kennzahlen hat sich — besonders im Falle des Standard-Manövierversuches — ein Weg gezeigt, Versuchsergebnisse einer Versuchsart mit denen einer anderen und mit theoretischen Ergebnissen auch quantitativ vergleichen zu können. Die in dieser Richtung hier vorgeschlagenen Anfänge erscheinen lohnend für weitere Untersuchung an Einzelproblemen der Steuereigenschaften.

#### F. Schrifttum.

Die folgenden Schrifttumsangaben gehen über das unmittelbare Bedürfnis dieser Arbeit weit hinaus; die überwiegende Zahl der Literaturstellen wird angegeben, um in Ergänzung der Zusammenstellungen in früheren Arbeiten [14] und [15] eine möglichst umfassende Literaturübersicht zu erhalten.

Das gesamte Gebiet der Steuereigenschaften, das ja die Manövriereigenschaften der Schiffe mit einschließt, hat in seinem vollen sachlichen Begriffsinhalt einen recht erheblichen „literarischen“ Umfang angenommen. Eine gewisse, fachliche Aufgliederung mag so dem Überblick förderlich sein. Es gehören ja zum Thema nicht nur die Steuereigenschaften des frei fahrenden Schiffes, an die man als „Normalfall“ zunächst immer denken wird. (Hierzu [1] bis [17].) Auch die Behandlung der Probleme des schleppenden bzw. des geschleppten Schiffes ([18] bis [38]) hat an Bedeutung in sicher ähnlichem Maße zugenommen. Schließlich sind ja die Steuereigenschaften des gesamten Schiffes das Ergebnis von Art und Größe der hydrodynamischen Wirkungen, die bei der Bewegung an seinen einzelnen Bauteilen entstehen. Die Kenntnis dieser Kräfte ist unumgänglich, um zu effektiven Aussagen über die Steuereigenschaften insgesamt kommen zu können. Mit [39] bis [47] werden die in [15] gegebenen Quellen zur Behandlung des Schiffsrumpfes, als wichtigstem Bauteil des Schiffes, ergänzt.

Die Eigenschaften der Vortriebsorgane sowie der Ruder und Flossen bei Schräganströmung werden meist gesondert behandelt. Es darf daher der Hinweis auf [48] bis [52] und die weiteren Literaturhinweise in diesen Arbeiten hier genügen.

- [1] Dussardier, P.: Tendances des navires à centrer en giration sous l'influence des hélices. — A.T.M.A. 1953, S. 685/692.
- [2] Eichler, C.: Steuerfähigkeit, Kursbeständigkeit, Luvgerichtigkeit. — „Hansa“, 1949, S. 1214/1216.
- [3] Gusew, A.: Der Einfluß des Windes auf Kurs und Steuerbarkeit des Schiffes. — Verlag Morskoi Transport, Moskau, 1954. Ref.: „Schiffbautechnik“ 1956, Sonderheft, S. 17.
- [4] Hansa: Vom „Beigedrehtliegen“ auf freier See. — „Hansa“ 1954, Nr. 26, S. 1170.
- [5] Horn, F.: Ausbildung und Erprobung der Ruderdüse von MS „Hemeligen“. — „Schiff und Hafen“ 1956, S. 899/908.
- [6] Jones, R.: The Application of the results of experiments on model airships to full-scale turning. — A.R.C. R.M. No. 716.
- [7] Jones, R.: The equilibrium of airships in curvilinear flight. — A.R.C. R.M. No. 749 (1921).
- [8] Kempf, G.: Über Steuerwirkungen bei Schiffen. — „Schiffbau“ 1923/1924, Nr. 1.
- [9] Kempf, G.: Kentergefahr für flachbordige Fahrzeuge bei Querbewegung. — „Hansa“ 1948, Nr. 26, S. 11.
- [10] Kucharski, W.: Zur Theorie des Steuervorganges bei Schiffen. — „Werft - Reederei - Hafen“ 32, S. 35.
- [11] Möckel, W., und Thiem, H.: Rundlaufversuche mit einem geraden und einem gekrümmten Barkassenmodell. — „Hansa“ 1957, S. 377/381.
- [12] Remmers, K.: Meßtechnik für Ruderversuche und für die Erprobung der Drehfähigkeit und Kursstabilität von Schiffen. — HJV-Bericht, September 1950.
- [13] Ship's Bulletin Turning circles. — Ship's Bulletin 1956, No. 3, p. 2. Ref.: BSRA-Journal 1956, May, p. 297.
- [14] Thiem, H.: Über Strömungstechnische Grundlagen zur Bestimmung von Steuereigenschaften. — „Schiff und Hafen“ 1954, S. 510/518.

- [15] Thieme, H.: Schrägschleppversuche mit einem geraden und einem gekrümmten Barkassenmodell. — „Schiff und Hafen“ 1956, S. 274/291.
- [16] Waas, H., und Walter, H.: Technische Neuerungen auf dem Vermessungsschiff „Nord“ der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. — „Schiffstechnik“ 1955, November, S. 61/71.
- [17] Wynne-Edwards, C. J.: Handling ships in narrow waters. — „The Journal of the Institute of Navigation“, April 1956, p. 198/220.
- [18] Anderson, G.: Steel barge construction for west coast operations. — Int. Shipb. Progress, Bd. 2 (1955), S. 167/178.
- [19] Baer, W.: Treckermanöver. — Forschungshefte für Schiffstechnik 1954, November, S. 79.
- [20] Benford, H.: The control of yaw in towed barges. — Int. Shipb. Progress. Vol. 2 (1955), No. 11, S. 296/318.
- [21] Bogdanow, B.: Über das Gieren und die Steuerfähigkeit von Seeschleppkähnen. — Morskoi-Flot, Moskau, 1951, H. 2, S. 15. (Karteibesprechung: Schiffbautechnik 1952, H. 1.)
- [22] Bogdanow, B.: Erfahrungen bei Verwendung von Stabilisatoren bei Leichtern von 1000 t Tragfähigkeit. — Morskoi-Flot 16 (1956), Nr. 1, S. 26/27.
- [23] Dawson, A. J.: The design of inland waterways barges. — S.N.A.M.E. 1950, S. 6.
- [24] Eggers, K.: Zum Aufsatz „Beitrag zur Theorie des Schleppens“. „Schiffstechnik“ 1954, S. 212.
- [25] Eichler, C.: Die Steuerfähigkeit geschleppter Schuten. — „Hansa“ 1950, S. 221/223.
- [26] Eichler, C.: Die Form von Bagger- und Hafenschulen. — „Hansa“ 1951, S. 371/372.
- [27] German, J., und McPherson, R.: Bridle effect on the way of towed barges. — University of Michigan, Thesis 1947.
- [28] Horn, F., und Reckling, K.: Beitrag zur Theorie des Schleppens. — „Schiffstechnik“ 1953, S. 128/133.
- [29] Krohn, J.: Vorversuche zur Stabilität von frei geschleppten Modellen. — Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Februar 1953.
- [30] Maasch, O.: Neuartige Baggerschuten im Hamburger Hafen. — „Schiff und Hafen“ 1955, S. 562/567.
- [31] Peters, B. H.: Discussion to „Dynamic stability on course of towed ships“. — S.N.A.M.E. 1950, p. 46/52.
- [32] Stemmer, H.: Kursstabilitätsversuche mit dem Modell einer Schute. — HSVA-Bericht Nr. 968, Mai 1951.
- [33] Surie, J. J.: Slepende motorvrachtschepen op de Rijn. — Schip en Werf 1952, S. 73 und 90.
- [34] Strandhagen, A., und Schoenherr, K., und Kobayashi, F.: The dynamic stability on course of towed ships. — S.N.A.M.E. 1950, S. 32/66.
- [35] Taggart, R.: A study of barge hull forms. — Journ. Am. Soc. Nav. Eng. 1956, p. 781/800.
- [36] Todd, F. H.: Some model experiments carried out in connection with the Mulberry Harbour. — T.I.N.A. 1946, p. 196/212.
- [37] User, T.: An investigation of yaw problem in barge. — University of Michigan, Thesis 1954.
- [38] Wolowenko, K.: Das Steuern und die Bestimmung der Steuerbarkeit von Lastzügen mit Stoßantrieb. — Binnenschifffahrt (Moskau) 1952, S. 5, Nr. 5. Referat in: „Schiffbautechnik“ 1953, Nr. 3.
- [39] Weinblum, G.: Theoretische Untersuchungen der Strömungsbeeinflussung zweier Schiffe aufeinander beim gegenseitigen Begegnen auf tiefem und beschränktem Wasser. — „Schiffbau“ 1933, S. 113/117.
- [40] Foster, D. J., und Haynes, G. W.: Rotary stability derivatives from distorted models. — Journ. Roy. Aer. Soc. 1956, p. 623.
- [41] Frazer, R., und Bateman, H.: Measurements of normal force and pitching moment on rigid airship R. 33. — A.R.C R. a. M. No. 815.
- [42] Schirmer, M.: Aerodynamische Modellversuche an deutschen und ausländischen Luftschiff-Baumustern im Windkanal des Luftschiffbau Zeppelin in Friedrichshafen. — Z.W.B. F.B. 1647 (1942).
- [43] Schmitz, G.: Kräfte und Momente infolge der Bewegung eines Schiffes auf gerader und gekrümmter Bahn. — „Schiffbautechnik“ 1956, Sonderheft S. 10/18.
- [44] Thieme, H., und Jöns, K.: Untersuchung des Schleppmodells Modell 100. — Blohm & Voß, Fo. 247 (1941).
- [45] Thieme, H., und Jöns, K.: Untersuchung eines Schleppmodells Modell 70r-BV 222 B. — Blohm & Voss, Fo. 248 (1941).
- [46] Thieme, H., und Jöns, K.: Untersuchung von Schleppmodellen BV 238 - Modell 111. — Blohm & Voss, S. 101 (1942).
- [47] Wysocki: Sechs-Komponenten-Messungen an Sperrballonen. — Z.W.B. F.B. 1414 (1941).
- [48] Horn, F.: Querkräfte am Propeller bei Schräganströmung, speziell bei Manöviervorgängen. — Schiffstechnik-Forschungshefte, Februar 1957.
- [49] Multhopp, H.: Einige einfache Beziehungen für die schräg angeblasene Luftschraube. — „Albert Betz zum 60. Geburtstag“. Göttingen 1945, S. 117/127.
- [50] Romahn, K., und Thieme, H.: Zur Wahl der Balancefläche von Rudern im Propellerstrahl. — „Schiffstechnik-Forschungshefte“ 1957.
- [51] Thieme, H.: Zur Behandlung von Ruderproblemen. — „Schiff und Hafen“ 1955, S. 605/618.
- [52] Thieme, H.: Balanceruder mit und ohne Vorflügel. - Modellversuche am Rudermeßgerät. — „Schiff und Hafen“ 1956, S. 158/165.