

# 5. Manövrierversuche mit naturgroßen Schiffen

Die Manövriertfähigkeit von Schiffen ist hauptsächlich durch das Anschwenkvermögen, die Drehfähigkeit, die Stützfähigkeit, das Stoppvermögen und die Gierstabilität (wie schon auf Seite 3 erläutert) gekennzeichnet.

Die Drehfähigkeit scheint am wenigsten wichtig, weil sie das Verhalten des Schiffes erst lange Zeit nach dem Manöverbeginn angibt. Das Stoppvermögen interessiert fast nur bei geringen Geschwindigkeiten, denn bei höherer Geschwindigkeit erfordern Kursänderungen viel weniger Raum als Stoppmanöver. Diese Eigenschaften sollen durch Manövrierversuche quantifiziert werden, die bei Probefahrten und z.T. auch später durchgeführt werden. Als Geschwindigkeit vor Versuchsbeginn wird meist die Entwurfsgeschwindigkeit gewählt. Große Wassertiefe ( $> 2.5$  mal Schiffstieftang) und wenig Wind (bis Bf. 4) werden angestrebt, um vergleichbare Ergebnisse zu anderen Schiffen zu erhalten. Man sollte beachten, dass der Trimm die Drehfähigkeit und die Gierstabilität entscheidend beeinflusst (mehr als der Tiefgang). Zum Vergleich mit anderen Schiffen werden die Ergebnisse mit der Schiffslänge und der Schiffslängenfahrzeit dimensionslos gemacht.

## 5.1. Drehkreisversuch

Drehkreisversuche dienen der Bestimmung der Zeiten und des Platzbedarfs für plötzliche Kursänderungen aus der Geradeausfahrt heraus. Nach Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit wird das Ruder so schnell wie möglich auf einen Winkel  $\delta$  (meist Maximalausschlag nach Backbord oder nach Steuerbord) gelegt und dort gelassen, bis sich eine konstante Drehgeschwindigkeit eingestellt hat, was in der Regel etwa nach  $1,5$  bis  $2 \times 360^\circ$  der Fall ist. Gemessen werden, möglichst mit Differential GPS (Global Positioning System), Position und Geschwindigkeit. Weiterhin werden Propellerdrehzahl, Ruderwinkel, Drehmoment am Ruderschaft und der Krängungswinkel während des Versuches gemessen. Aus den Daten können die folgenden Werte ermittelt werden, siehe auch [Abbildung 5.1](#):

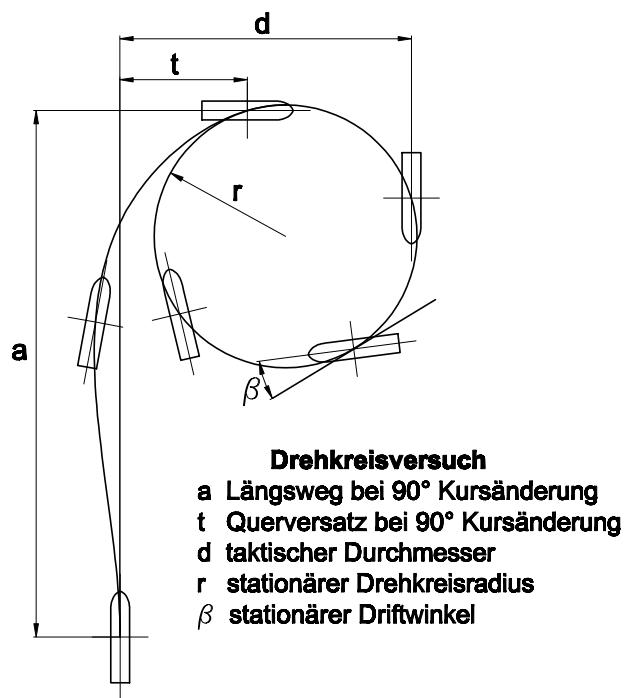


Bild 5.1.: Drehkreisversuch

- der taktische Durchmesser (Querversatz bei 180° Kursänderung) ( $d$ )
- Zeit, Längsweg ( $a$ ) und Querversatz ( $t$ ) bei 90° Kursänderung
- der stationäre Drehkreisdurchmesser ( $2r$ )
- der stationärer Driftwinkel ( $β$ )
- Geschwindigkeitsverlust
- der sich einstellende Krängungswinkel

Da die laufende Bahnvermessung früher nicht möglich war, konzentriert man sich bis heute nicht auf den vordersten und seitlichsten Bahnpunkt, sondern statt dessen auf die Bahnpunkte bei 90° und 180° Kursänderung.

Bei der Betrachtung des Schiffes im Drehkreisversuch stellt man fest, dass es sich um einen Punkt dreht, der kurz hinter dem Bug liegt. Dieser Punkt als Drehpunkt wird „Pivot point“ genannt.

Die Lage dieses Punktes wird durch die Lage des Angriffspunktes der hydrodynamischen Kräfte und der Zentrifugalkraft am Schiff bestimmt. Er liegt normalerweise bis zu 20% hinter dem Bug, von dort aus gesehen.

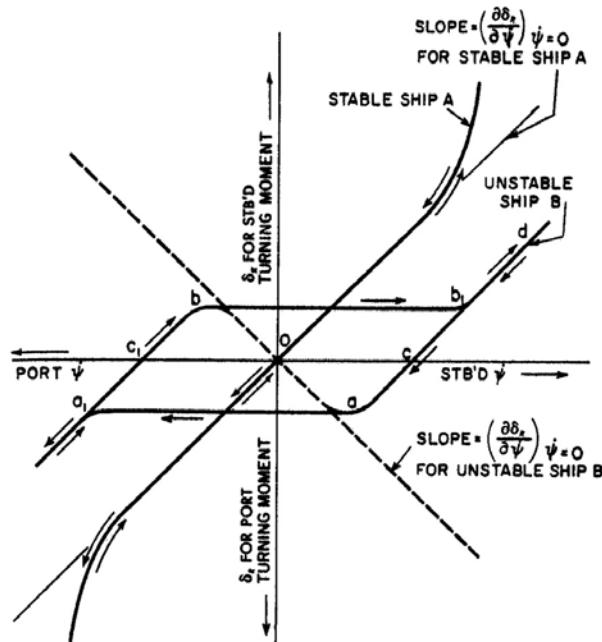


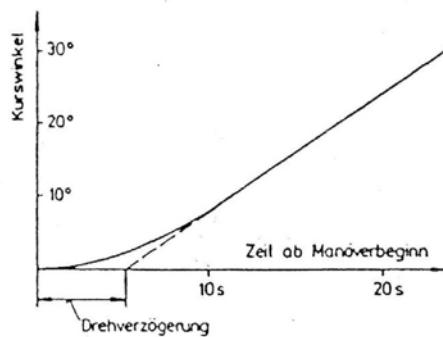
Bild 5.2.: Drehgeschwindigkeit zu Ruderwinkel für ein gierstabiles und ein gierinstabiles Schiff<sup>1</sup>

## 5.2. Spiralversuch

Spiralmanöver nach der Methode von Dieudonné dienen der Beurteilung der Kursstabilität eines Schiffes und der Bestimmung der stationären Drehgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ruderwinkel. Hierzu wird die Drehgeschwindigkeit über dem zugehörigen Ruderwinkel gemessen. Es wird in mehreren Schritten vorgegangen, wobei von Geradeausfahrt mit konstanter Maschinenleistung ausgegangen wird.

Bei der 'direkten Methode' (nach Dieudonné) wird das Ruder z.B. hart BB gelegt, bis das Schiff eine konstante Drehgeschwindigkeit erreicht; diese wird registriert. Der Ruderwinkel wird dann in Stufen (von z.B. 5°, nahe 0 besser in kleineren Stufen) verringert bis zur entgegengesetzten Hartruderlage. Das Schiff fährt dabei eine spiralförmige Bahn. Auf jeder Stufe wird die stationäre Drehgeschwindigkeit abgewartet und gemessen. Zumindest bei möglicherweise gierinstabilen Schiffen sollte die stufenweise Veränderung des Ruderwinkels auch in umgekehrter Richtung wiederholt werden.

Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf der Drehgeschwindigkeit über dem Ruderwinkel für ein gierstabiles (A) und ein gierinstabiles (B) Schiff. Bei dem stabilen Schiff A wird die Beziehung zwischen  $\psi$  und  $\delta_R$  durch eine einzige Linie beschrieben. Das Schiff B hingegen hat eine Drehgeschwindigkeit bei  $\delta_R = 0$ . In einem Ruderwinkelbereich existieren für jeden Ruderwinkel zwei Drehgeschwindigkeiten und es gibt somit keine eindeutige Zuordnung des Ruderwinkels zur Drehgeschwindigkeit.



Bei der indirekten Methode (nach Bech) wird statt dessen die Drehgeschwindigkeit vorgegeben und mit einem Wendezieger (Messgerät für Drehgeschwindigkeit) kontrolliert; der Ruderwinkel wird so (z.B.: von Hand) geregelt, dass die gewünschte Drehgeschwindigkeit erreicht wird. Der so nach längerer Zeit erhaltene zeitliche Mittelwert des Ruderwinkels wird bestimmt. So werden verschiedene BB- und StB-Drehgeschwindigkeiten bis zur Hartruderlage untersucht. Hier ist die Reihenfolge, in der verschiedene Drehgeschwindigkeiten und -richtungen gefahren werden, gleichgültig.

Ergebnis ist in beiden Fällen eine Kurve Drehgeschwindigkeit  $r$  über dem Ruderwinkel  $\delta$  (Abbildung 5.3), aus der auf die Drehfähigkeit und die Gierstabilität geschlossen werden kann: Bei gierinstabilen Schiffen gibt es in einem Bereich von Ruderwinkeln drei stationär mögliche Drehgeschwindigkeiten. Die mittlere, von dem rückwärts geneigten Kurvenast dargestellte Drehgeschwindigkeit stellt bei konstantem Ruderwinkel einen labilen Gleichgewichts-Zustand dar. Dieser Hysteresebereich kann nur mit der indirekten Methode gefunden werden. Bei der direkten Methode 'springt' die Drehgeschwindigkeit bei Veränderung des Ruderwinkels an den senkrechten Stellen der Kurven von einem Kurvenast auf den anderen.

Die Eigenschaft eines Schiffes, kursstabil bzw. kursinstabil zu sein, gilt als nicht geschwindigkeitsabhängig.

Der Spiralversuch ist - vor allem nach der direkten Methode - zeitaufwendig und bedarf sehr ruhigen Wetters. Seine Ergebnisse (Abbildung 5.3) demonstrieren, dass eine Linearisierung der Steuergleichungen bei gierinstabilen Schiffen zwar für kleine  $|r|$  zulässig ist, dass es aber keinen Bereich von  $|\delta|$  gibt, in dem entsprechend kleine  $|r|$  nicht überschritten werden. Bei gierstabilen Schiffen ist die Linearisierung nur in einem sehr kleinen Bereich von Ruderwinkeln (z.B.:  $\pm 5^\circ$ ) ausreichend genau.

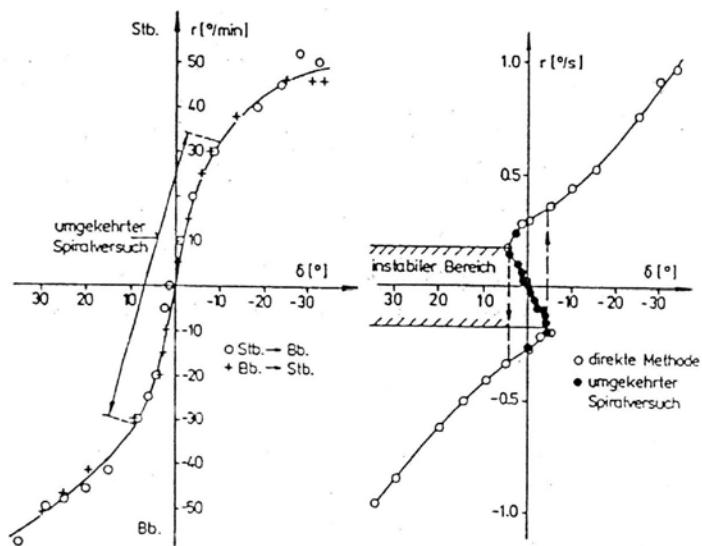


Bild 5.3.: Ergebnisse des Spiralversuchs für ein gierstabiles (links) und ein gierinstabiles (rechts) Schiff

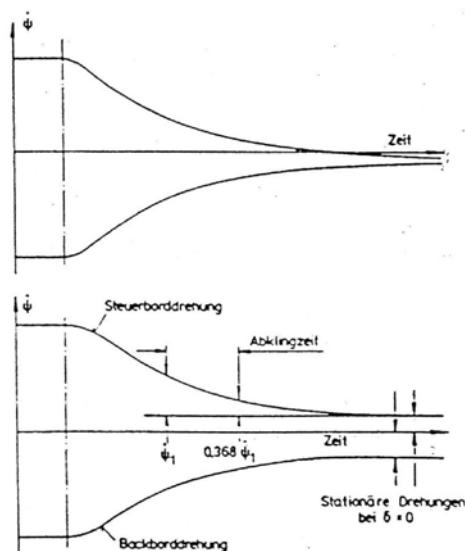


Bild 5.4.: Ausschwingversuch für ein gierstabiles (oben) und ein gierinstabiles (unten) Schiff

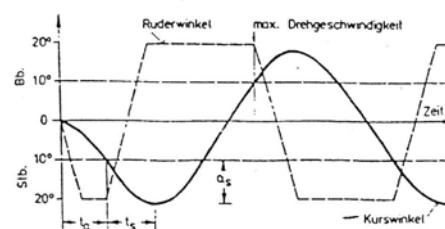


Bild 5.5.:  $20^\circ/10^\circ$ -Z-Manöver: Anschwenkzeit  $t_a$ , Stützzeit  $t_s$ , Überschwingwinkel  $\alpha_s$ . Man beachte, dass Stb.-Kurswinkel und Bb.-Kurswinkel positiv sind.

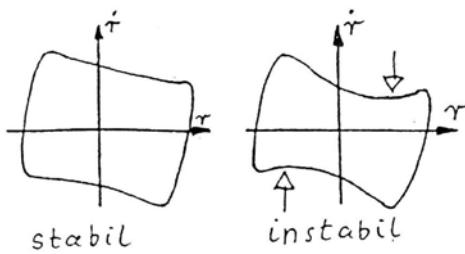


Bild 5.6.

### 5.3. Ausschwingversuch

Nach einer Drehkreisfahrt wird das Ruder mittschiffs gelegt und so gehalten, bis die Drehgeschwindigkeit des Schiffes konstant geworden ist. Der zeitliche Verlauf wird (möglichst mit einem Wendezieger, notfalls durch Differenzieren der Kompass-Anzeige nach der Zeit) registriert. Bei einem gierinstabilen Schiff stimmen die asymptotisch nach einem StB- und einem BB-Drehkreis erreichten Drehgeschwindigkeiten bei Mittschiffsruder nicht miteinander überein. Aus den Versuchsergebnissen wird die Abklingzeit bestimmt; dies ist die Zeit, während der sich die Differenz zwischen der jeweiligen Drehgeschwindigkeit und dem Grenzwert lange nach Manöverbeginn auf  $1/e = 0.368$  vermindert (Abbildung 5.4). Typisch sind Abklingzeiten von 1 bis 4 Schiffslängen-Fahrzeiten; im Zahlenbeispiel des Abschnitt 4.1 ergab sich die Abklingzeit allerdings zu 32.6 L/U.

### 5.4. Z-Manöver

Nach Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit wird das Ruder auf den Winkel  $-\delta_e$  gelegt und dort gehalten, bis der Kurzwinkel  $+\psi_e$  beträgt. Dann wird das Ruder auf  $+\delta_e$  gelegt und gehalten, bis der Kurzwinkel  $-\psi_e$  beträgt. Meist wird dieser Ablauf noch einige Male wiederholt, weil z.B. durch allmähliche Verringerung der Fahrgeschwindigkeit andere Ergebnisse erzielt werden. Gemessen werden der Zeitverlauf des Ruder- und des Kurzwinkels (Abbildung 5.5) und - falls möglich - die Bahn des Schiffes. Wichtige Zahlenergebnisse sind die Anschwenkzeit, die Stützzeit und der Überschwingwinkel.

Dieser Versuch wird auch Standard-Manövrierversuch genannt. Er wurde von Kempf für Modelle eingeführt und lässt sich im Gegensatz zu den vorher genannten Versuchen in einem Schlepptank durchführen; er ist aber auch für naturgroße Schiffe üblich, weil er besser als die vorher genannten Versuche die Anschwenk- und Stützfähigkeit kennzeichnet. Er eignet sich bei genauer Bahnmessung auch zur Bestimmung der in Tabelle A.2 angegebenen Manövrierkraft-Koeffizienten. Für Modelle sind vor allem die Kombinationen

$(\delta_e, \psi_e) = (10^\circ, 10^\circ), (20^\circ, 20^\circ)$  und  $(20^\circ, 10^\circ)$  üblich. (Größere Kurswinkel  $\psi_e$  lassen das Modell u.U. an der Tankwand anstoßen.) Zur Koeffizienten-Bestimmung ist eine Abwandlung des Z-Manövers besser: der Stufenversuch. Dabei werden nach jeder Periode andere Winkel  $(\delta_e, \psi_e)$  gewählt, um den gesamten Ruderwinkelbereich gut abzudecken. Bei genauerer Bahnvermessung könnte der Stufenversuch den Drehkreis-, Ausschwing-, Spiral- und den üblichen Z-Versuch ersetzen, da man durch Koeffizientenbestimmung aus dem Stufenversuch die Ergebnisse der anderen Versuche durch Computer-Simulation recht genau ermitteln kann.

Zur Abschätzung der Gierstabilität werden Z-Manöver mit kleinen Ruder- und Kurswinkel (z.B.:  $5^\circ, 5^\circ$ ) und eine Auftragung wie in [Abbildung 5.6](#) empfohlen. Eine Zunahme der Gierbeschleunigung (und damit des Giermomentes) mit zunehmendem  $r$  bei festem Ruderwinkel zeigt negative Gier-Dämpfungsmomente und damit Gier-Instabilität an. Die eher vertikalen Kurvenäste entstehen während des Ruderlegens. Wenn der mehrdeutige Bereich der 'Spiralkurve'  $r(\delta)$  einen Winkelbereich  $\pm\delta_m$  überdeckt, so lässt sich das Z-Manöver nur mit Ruderwinkeln  $> \delta_m$  durchführen.

[Abbildung 5.9](#) zeigt in vielen Modellversuchen gefundene Werte für die dimensionslose Anschwenk- und Stützzeit und für den Überschwingwinkel. Danach ergeben sich beim  $(20^\circ, 10^\circ)$ -Versuch meist folgende Werte:

- Anschwenkzeit 1 bis 1.5 Schiffslängenfahrzeiten
- Stützzeit 0.5 bis 2 Schiffslängenfahrzeiten (mehr bei schnelleren Schiffen)
- Überschwingwinkel 5 bis  $15^\circ$

## 5.5. Stoppversuch

Bei Schiffen mit Festpropeller wird in Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit zunächst die Maschine gestoppt und dann so bald wie möglich umgesteuert. Bei Schiffen mit Verstellpropeller wird statt dessen die Propellersteigung negativ eingestellt. Das Ruder wird teils mittschiffs gelassen; teils wird versucht, das Schiff mit dem Ruder auf geradem Kurs zu halten. Das Manöver endet, wenn  $u = 0$  ist. Wird dieses Manöver bei voller Vorausgeschwindigkeit und unter Einsatz der hierbei höchstzulässigen Maschinenleistung gefahren, so spricht man von einem Crash-Stop-Manöver.

Ergebnisse des Stoppversuchs sind (siehe [Abbildung 5.10a](#)) der maximale Längsweg, der Querversatz (sehr abhängig vom Wind, u.U. auch von kleinen Kursschwankungen bei Beginn des Manövers), die Stoppzeit sowie die Zeiten bis Maschinenstillstand und bis Rückwärtslauf der Maschine. Nautisch sinnvoll sind Stoppmanöver aus geringer Geschwin-

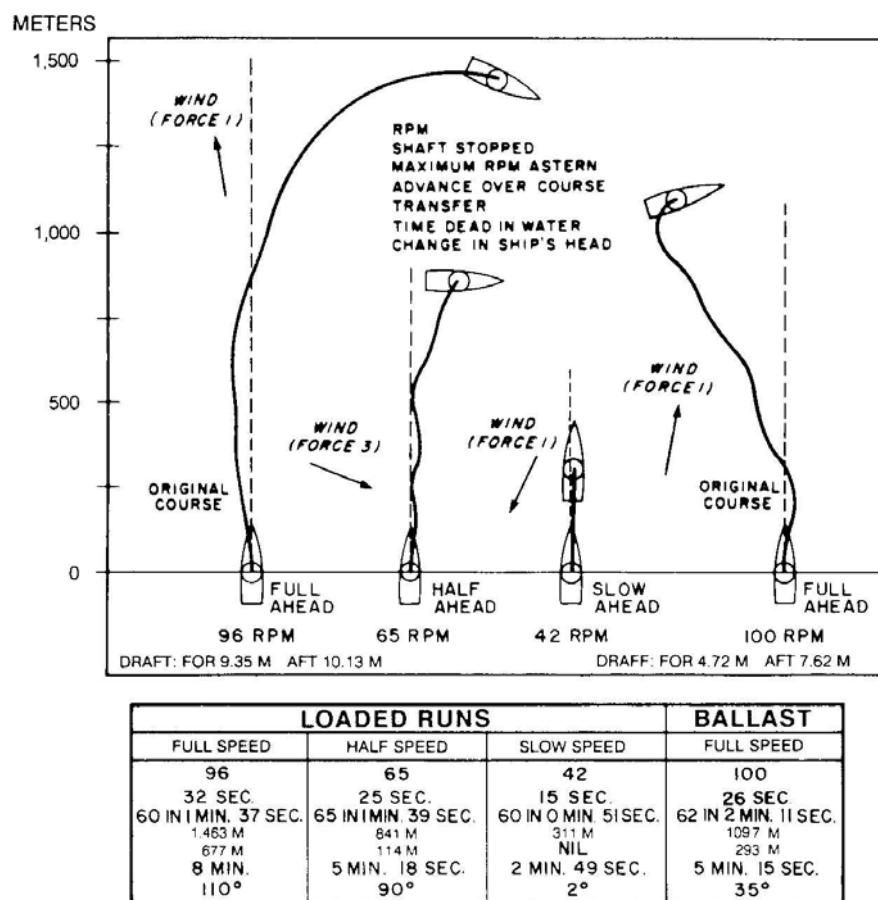


Fig. 65 Emergency stopping trials Esso Lima (26,700 dwt) (Crane, 1973)

Bild 5.7.: Bahn eines Schiffes beim Stoppmanöver

digkeit.

Im Allgemeinen ist Stoppen wichtig, um in engen Fahrrinnen eine Kollision zu verhindern bzw. um zu vermeiden, dass das Schiff auf Grund läuft. Während im höheren Geschwindigkeitsbereich der Schiffswiderstand die Hauptrolle bei der Verkürzung des Stoppweges spielt, leistet der rückwärts gerichtete Propellerschub den Hauptbeitrag im niedrigen Geschwindigkeitsbereich.

Beim Stoppmanöver eines Einschraubers ist das Schiff ohne Querstrahlruder nicht in der Lage, den Kurs zu halten. Der Bahnverlauf wird von vielen Randbedingungen beeinflusst, siehe auch Abbildung 5.7.

Durch Stoppen in Kombination mit Rudereinsatz bleibt das Schiff steuerbar. Hierbei wird das Ruder abwechselnd nach steuerbord und nach backbord umgelegt. Dabei reduziert sich die kinetische Energie des Schiffes durch die Drehbewegung. Gleichzeitig wird stufenweise von Vorwärtsschub auf Rückwärtsschub heruntergeschaltet. Der Nachteil ist jedoch, dass

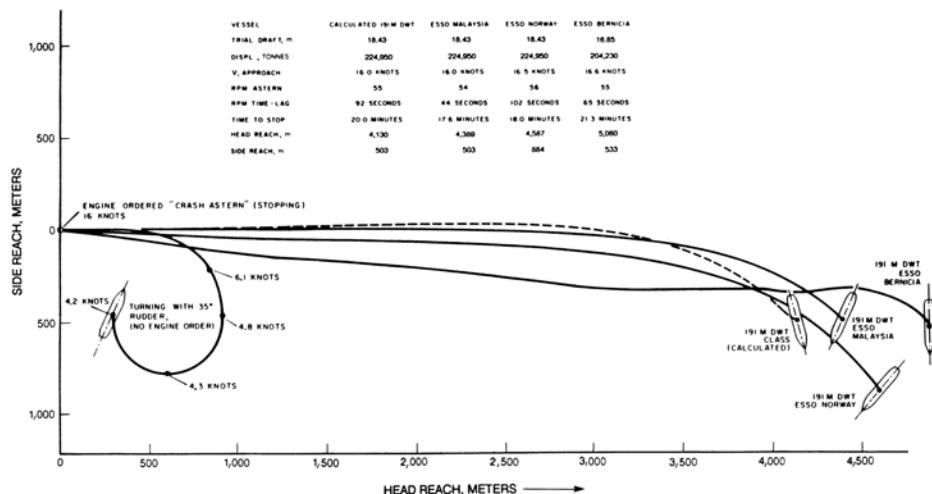


Fig. 66 Comparison of calculated "crash astern" maneuvers with full-scale trial results (Exxon 191,000-dwt tankers, load condition) (Crane, 1973)

Bild 5.8.: Stoppmanöver in Kombination mit Drehkreismanöver

der Stoppweg länger wird.

Die Kombination von Stopp- und Drehkreismanöver verkürzt den Stoppweg erheblich. Durch das Drehkreismanöver wird die kinetische Energie des Schiffes reduziert. Vgl. hierzu Abbildung 5.8

Bremsklappen sind nur bei hohen Geschwindigkeiten wirksam.

Hauptantrieb, Getriebe, Propeller und Propellerwelle haben einen großen Einfluss auf die Steuerbarkeit des Schiffes. Bei leichten Schiffen mit hoher Leistung hängt der Stoppweg davon ab, wie schnell die Drehzahl des Propellers umgesteuert werden kann. Bei Schiffen mit niedriger Leistung ist dies nicht der Fall.

Im flachen Wasser muss die Maschine oft umgesteuert werden, was zu kritischen Situationen führen kann, wenn der Umsteuerungsvorgang viel Zeit in Anspruch nimmt.

## 5.6. Ruderlegeversuch

Nach Geradeausfahrt mit Maximalgeschwindigkeit wird das Ruder auf  $35^\circ$  Backbord gelegt; sobald dieser Ruderwinkel erreicht ist (d.h. ohne die weitere Geschwindigkeitsminderung abzuwarten), wird das Ruder auf hart Steuerbord gelegt. Der Zeitbedarf zwischen  $35^\circ$  BB und  $30^\circ$  StB darf nach einer IMO-Vorschrift 28s nicht übersteigen. Dasselbe muss auch für Ruderlegen von StB nach BB nachgewiesen werden. Es wird mit einem Recht Kritik daran geübt, dass diese Zeit für große und kleine Schiffe gleich ist. Die Vorschrift soll eine zu schwache Auslegung der Rudermaschine vermeiden.

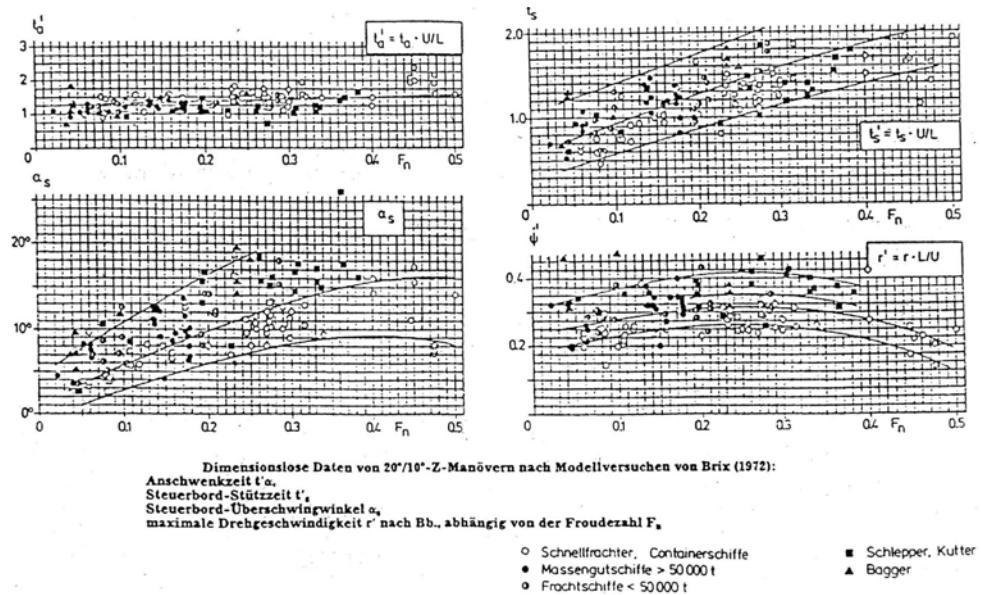
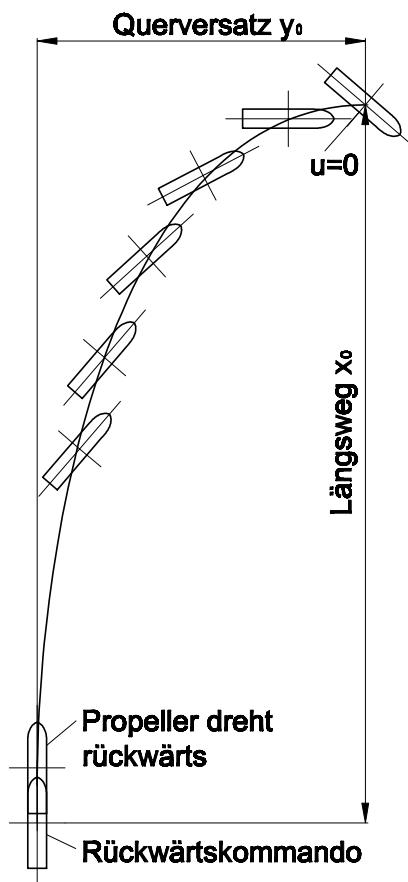


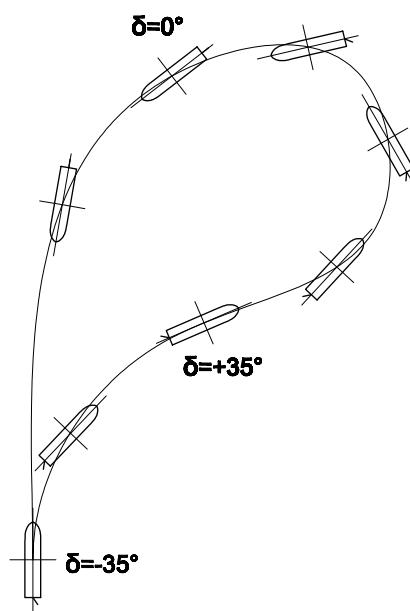
Bild 5.9.: Anschwenkzeit, Stützzeit, Überschwingwinkel und maximale Drehgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Froudezahl

## 5.7. Mann-über-Bord-Manöver

Das Manöver (auch Williamson-Turn genannt; Abbildung 5.10b) soll das Schiff in möglichst kurzer Zeit auf den antiparallelen Kurs und dieselbe Spur wie vor Beginn des Manövers bringen, z.B.: um einen über Bord gefallenen Menschen zu suchen. Dazu wird bei Manöverbeginn das Ruder hart steuerbord, bei einer Kursabweichung von z.B.:  $60^\circ$  hart backbord und bei z.B.:  $-130^\circ$  (bezogen auf den ursprünglichen Kurs) mittschiffs gelegt. Die jeweiligen Winkel ( $60^\circ, -130^\circ$ ) müssen für jedes Schiff, eigentlich auch für jede Schwimmlage, so bestimmt werden, dass bei Manöverende die Bahnabweichung etwa 0 und die Kursabweichung etwa  $180^\circ$  ist. Dazu dienen Versuche z.B. während der Probefahrt.



(a) Stoppversuch



(b) Mann-über-Bord-Manöver