

479 | März 1987

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Bernd Hampel

**Bestimmung und Beurteilung der  
Manövrierfähigkeit von Schiffen unter  
dem Aspekt der Kollisionsvermeidung**

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

## **Bestimmung und Beurteilung der Manövrierfähigkeit von Schiffen unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung**

Bernd Hampel, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1987

© Technische Universität Hamburg-Harburg  
Schriftenreihe Schiffbau  
Schwarzenbergstraße 95c  
D-21073 Hamburg

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

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 479

Bestimmung und Beurteilung der Manövrierfähigkeit von Schiffen  
unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung

von

Bernd Hampel

März 1987

ISBN 3 - 89220 - 479 - 9

Copyright      Institut für Schiffbau  
                  Universität Hamburg  
                  Lämmersieth 90  
                  D-2000 Hamburg 60

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln  
des Bundesministers für Forschung und Technologie gefördert.  
(Förderungskennzeichen des FE-Vorhabens: MTK 0321)

## Zusammenfassung

-----

Die Beurteilung der Manövrierfähigkeit eines Schiffes unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung ist für alle Beteiligten wie z.B. Schiffsführung, Reeder, Kollision haben die Manövriereigenschaften eines Schiffes und die Art und Weise der Nutzung seines Manövriervermögens entscheidenden Anteil an dem Erfolg des erforderlichen Ausweichmanövers.

Gemessen werden kann die Manövrierfähigkeit mit einer nautischen Kenngrösse: erforderlicher Manöverabstand bzw. erforderliche Manöverzeit. Als Beurteilungsmass der Manövrierfähigkeit dient dann die Anzahl der Kollisionen pro Zeiteinheit, die das betrachtete Schiff in einem bestimmten Modellverkehr erfährt. Zur Simulation der Ausweichbewegungen der Schiffe wurden zwei verschiedene Manövermodelle zusammengestellt. Die Berechnungsverfahren dazu und die Methode zur Abschätzung der Kollisionsrate werden beschrieben. Für ein Beispiel wurden die Berechnungen durchgeführt, um die nautischen Kenngrössen zu bestimmen und den Erfolg des gewählten Ausweichmanövers abzuschätzen. Ferner wird eine mögliche Verwendung der Ergebnisse demonstriert.

## Summary

-----

The assessment of the maneuvering capability of a ship with regard to collision avoidance is of importance to all concerned, e.g. ship masters, ship owners, shipbuilders and vessel traffic designers. For in case of an impending collision, the physical maneuverability of the ship as well as the kind and manner of its utilization by the navigator-in-charge will have a decisive share in the success of the necessary evasive maneuver. The maneuvering capability can be assessed by means of a nautical measure: the required maneuvering range ( or the required maneuvering time) to avoid a collision. The maneuvering capability can then be quantified in terms of the mean collision rate, i.e. the average number of collisions expected for the given ship per unit time in a given model traffic.

Two different maneuvering models have been set up to simulate the evasive motions of ships. The simulation algorithms and the method for estimating the collision rate are described. Sample calculations have been performed and the nautical measures determined for one case, in order to estimate the success of the chosen evasive maneuver. Moreover, a possible practical application of the results is demonstrated.

Gliederung		Seite
1.	Einleitung	6
1.1.	Thematik	6
1.2.	Abriss der Problemlösung	7
2.	Beschreibung und Darstellung von Begriffen und Elementen	8
2.1.	Betrachtetes Beispielschiff	8
2.2.	Begriffe und Definitionen	8
2.2.1.	Begegnung	8
2.2.2.	Passierabstand - Kollisionsgefahr	9
2.2.3.	Kollision - erforderlicher Passierabstand	9
2.2.4.	Manöverabstand - Manöverzeit - nautische Kenngrösse	10
2.3.	Ausweichmanöver und Manöverkonzeptionen	12
2.3.1.	Ausweichmanöver	12
2.3.2.	Manöverkonzeptionen	12
2.4.	Manövrierfähigkeit - Ausweichfähigkeit	14
2.4.1.	Einfluss der Schiffsführung auf die Ausweichfähigkeit	15
2.4.1.1.	Manöverbereitschaft	15
2.4.1.2.	Manöverqualität	16
2.4.1.2.1.	Charakterisierung der Manöverqualität	16
2.4.1.2.2.	Ursachen für optimale, neutrale oder pessimale Ausweichmanöver	17
2.4.1.2.3.	Häufigkeiten, mit denen optimale, neutrale und pessimale Ausweichmanöver zu erwarten sind	17
2.4.1.3.	Manöverwirksamkeit	18
2.4.1.3.1	Verteilungsfunktion für die verfügbare Manöverzeit	19
2.4.1.3.2	Verteilungsfunktion für den verfügbaren Manöverabstand	20
2.4.2.	Manövrierbarkeit - Einfluss des Schiffes auf die Ausweich- fähigkeit	20
2.4.2.1.	Beschreibung der Bewegungsmodelle	20
2.4.2.1.1.	Bewegungsmodell von Söding	21
2.4.2.1.2.	Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma	22
2.4.2.1.3.	Schiffsbewegungen im Differentialspielmodell	23
2.4.2.2.	Gegenüberstellung der Manöverwege für ausgewählte Beispiel- manöver	24

	Seite	
2.4.2.3.	Darstellung der Schiffskonturen	24
2.4.3.	Berücksichtigung der Struktur des begegnenden Verkehrs	25
2.4.3.1.	Grösse und Manövriereigenschaften der Schiffe des begegnenden Verkehrs	25
2.4.3.2.	Kurswinkelverteilung der begegnenden Schiffe	25
2.4.3.3.	Geschwindigkeitsverteilung der begegnenden Schiffe	26
3.	Manövermodelle und Modell zur Beurteilung der Manövrierfähigkeit hinsichtlich der Kollisionsvermeidung	27
3.1.	Manövermodelle	27
3.1.1.	Iterativmodell	27
3.1.2.	Differentialspielmodell	28
3.1.3.	Entwicklungsstand und Anwendungsbereich der Manövermodelle	34
3.2.	Modell zur Beurteilung der Manövrierfähigkeit hinsichtlich der Kollisionsvermeidung	35
3.2.1.	Berechnung der Kollisionsrate	35
3.2.2.	Kollisionsrate - Charakterisierung der Manövrierfähigkeit	38
4.	Nautische Kenngrössen zur Beschreibung der Ausweichfähigkeit	40
4.1.	Beschreibung und Darstellung des Manöverraumes	40
4.1.1.	Projektionen des Manöverraumes	40
4.1.1.1.	Räumliche Darstellung des Manöverraumes	40
4.1.1.2.	Manöverabstandskurven - Schnitte durch den Manöverraum	42
4.1.2.	Denkbare Projektionen der Manöverpfade für die Manöverentscheidungsfindung im Bordbetrieb	43
4.1.2.1.	Projektion der Manöverpfade in die $r, \theta$ -Ebene	44
4.1.2.2.	Projektion der Manöverpfade und der Manöverabstandskurven in die $x, y$ -Ebene	46
4.2.	Gegenüberstellung von Ergebnissen und Berechnungsweisen der beiden Manövermodelle zur Bestimmung der Manöverabstände	46
4.2.1.	Anmerkungen bezüglich unterschiedlicher Berechnungsverfahren	46
4.2.2.	Gegenüberstellung der Manöverabstände für die günstigsten Ausweichmanöver	47

	Seite	
4.3.	Manöverabstandsbilder	48
4.3.1.	Erläuterung der Manöverabstandskurven	48
4.3.2.	Beschreibung der Manövrierfähigkeit durch den erforderlichen Manöverabstand	50
4.3.2.1.	Darstellung des Geschwindigkeitseinflusses bei der Begegnung von Schwesterschiffen	50
4.3.2.1.1.	Manöverabstände für die Geschwindigkeitsrelation $V_A/V_O = 1$ und beliebigen Kombinationen von Hart-Ruder-Drehkreismanövern von Schiff 0	50
4.3.2.1.2.	Manöverabstände für Begegnungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsrelationen zu Manöverbeginn, wenn Schiff A neutral bleibt	51
4.3.2.2.	Manöverabstände bei den betrachteten Geschwindigkeiten und Manöverkombinationen, wenn beide Schiffe manövrieren	52
4.3.2.2.1.	Beide Schiffe fahren Stb-Drehkreise	52
4.3.2.2.2.	Beide Schiffe fahren Bb-Drehkreise	52
4.3.2.2.3.	Schiff A fährt Stb-Drehkreis und Schiff 0 Bb-Drehkreis	53
4.3.2.2.4.	Schiff 0 fährt Stb-Drehkreis und Schiff A Bb-Drehkreis	53
4.3.2.2.5.	Manöverabstände bei optimalem, neutralem und pessimalem Manöververhalten von Schiff A	53
4.3.3.	Manöverabstände für Crash-Stop-Manöver	54
4.3.3.1	Schiff A behält Kurs und Geschwindigkeit bei, Schiff 0 fährt Crash-Stop-Manöver mit und ohne Ruderunterstützung	54
4.3.3.2	Schiff A und Schiff 0 führen Crash-Stop-Manöver aus	55
4.3.3.3.	Crash-Stop-Manöverabstände bei optimalem, neutralem und pessimalem Verhalten von Schiff A	56
4.3.3.4.	Gegenüberstellung ausgewählter Manöverkombinationen	56
4.3.4.	Der Manöverabstand bei veränderter Manövrierbarkeit	57
5.	Kollisionsrate - Kenngrösse der Ausweichfähigkeit zur Beurteilung der Manövrierfähigkeit	59
5.1.	Gegenüberstellung der Kollisionsrisiken für verschiedene Geschwindigkeiten und Rudermanöverkombinationen	59
5.2.	Das Kollisionsrisiko bei veränderter Manövrierbarkeit	61

	Seite	
5.2.1.	Abschätzung des Einflusses veränderter Manövrierbarkeit für verschiedene Geschwindigkeiten und Manöverstrategien des begegnenden Schwesterschiffes	61
5.2.2.	Abschätzung des Einflusses veränderter Manövrierbarkeit auf die Kollisionsrate im Modellverkehr	61
5.3.	Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Geschwindigkeiten für Schiff 0 bei Manöverbeginn	62
5.4.	Kollisionsrate/Verkehrsdichte für verschiedene Manöverkombinationen und Geschwindigkeiten	63
6.	Schlussfolgerungen - Erkenntnisse - Entwicklungsmöglichkeiten	64
6.1.	Schlussfolgerungen	64
6.2.	Vermindert eine verbesserte Manövrierbarkeit die Kollisionsgefahr eines Schiffes ?	64
6.3.	"Sichere Geschwindigkeit" - Kenngrösse der Manövrierfähigkeit	67
7.	Literaturhinweise	69
8.	Abkürzungen, Symbole und Sonderzeichen	71
8.1.	Abkürzungen	71
8.2.	Symbole	72
8.3.	Sonderzeichen	74
9.	Anhang	75
9.1	Eingabedaten für das Bewegungsmodell von Söding	75
9.2	Eingabedaten für das Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma	78
10.	Bilder (0 bis 75)	80

## 1. Einleitung

Im vorliegenden Bericht werden die Berechnungsverfahren und die wesentlichen Ergebnisse des Einzelvorhabens 5a "Bestimmung und Beurteilung der Manövrierfähigkeit von Schiffen" vom Teilprojekt 5 "Manövriersicherheit" innerhalb des vom BMFT dankenswerterweise geförderten FE-Vorhabens MTK 0321 "Schiffshydrodynamik" für ein Beispielschiff vorgestellt und erläutert.

### 1.1. Thematik

Eine der ureigensten Forderungen an die Manöviereigenschaften eines Schiffes ist die Fähigkeit, eine Kollision mit einem anderen Schiff vermeiden zu können. Um dieser Forderung zu genügen, muss das Schiff bestimmte Manöviereigenschaften besitzen. Ob in einer bestimmten Begegnung zwischen zwei Schiffen die drohende Kollision vermeidbar ist, ist jedoch nicht nur von der Manövrierbarkeit des Schiffes abhängig, sondern auch von der Art und Weise, wie diese Manövrierbarkeit hinsichtlich des Manöverzieles - Vermeidung der Kollision - von den beteiligten Schiffsführungen genutzt wird.

Um die Manövrierfähigkeit des Schiffes unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung - der Ausweichfähigkeit - bestimmen und beurteilen zu können, muss folglich neben der Manövrierbarkeit das Verhalten der Schiffsführungen berücksichtigt werden.

In der Praxis wurden die Manöviereigenschaften bisher, wenn überhaupt, immer nur mittelbar auch unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung betrachtet. Ausweichmanöver wurden vornehmlich dem nautischen Problemkreis zugeordnet. Dies ist im überwiegenden Teil der Manöver auch zutreffend und gilt immer bei Ausweichbewegungen in grossen Distanzen. In diesen Fällen sind die Manöviereigenschaften eines Schiffes weitgehend ohne Bedeutung. Ist die Entfernung der Schiffe bei Manöverbeginn jedoch klein, so ist die Berücksichtigung des Manöververhaltens in der speziellen Begegnungssituation unerlässlich. Hier kann dann von dem mehr technischen Problem des "Aneinander Vorbeiführens" gesprochen werden. Werden in solchen Situationen die Manöverentscheidungen

einzig auf Grund rechtlicher Überlegungen und/oder unvollständiger Kenntnis der Manövereigenschaften getroffen, so kann durch ein derartiges Manöver die Kollisionsgefahr verschärft werden. Die Betrachtung der Manövrierfähigkeit unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung hat somit einen doppelten Sinn. Sie ermöglicht einmal, den Einfluss des Manöververhaltens auf die Ausweichfähigkeit abzuschätzen, und zum anderen, eine Bemessungsgrösse für die Manövrierfähigkeit vorzugeben. Die Verbindung zwischen der nautischen "Qualität" der Schiffsführung und den manövertchnischen Eigenschaften des Schiffes wird damit ebenfalls quantifizierbar.

## 1.2. Abriss der Problemlösung

Zur Abschätzung der Ausweichfähigkeit war es eingangs erforderlich, Manövermodelle zu erstellen bzw. Rechenprogramme dafür zu erzeugen. Die beiden verwendeten Manövermodelle werden mit "Differentialspielmodell" und "Iterativmodell" bezeichnet. Die Berechnungen mit diesen Manövermodellen liefern sogenannte "Nautische Kenngrössen" - den Manöverabstand bzw. die Manöverzeit (Siehe auch Abschnitt 3.2. "Modell zur Beurteilung der Ausweichfähigkeit"). Im folgenden und abschliessenden Berechnungsteil erfolgt dann mittels einer Bewertung der nautischen Kenngrössen die eigentliche Abschätzung der Ausweichfähigkeit. Als Mass dient dazu die Anzahl der Kollisionen pro Zeiteinheit, die das untersuchte Schiff erleidet, wenn es sich in einem Modellverkehr bewegt. Diese Kollisionsrate wird nach dem sogenannten Interferenzmodell der Zuverlässigkeitsrechnung bestimmt, indem die situationsabhängige vorhandene Ausweichfähigkeit einer stochastisch verteilten Anforderung an dieselbe gegenübergestellt wird (vergl. Krappinger und Sharma /1/ und Sharma /2/). Überschreitet dabei die geforderte Ausweichfähigkeit die vorhandene, so kommt es zur Kollision. Die Anforderung an die Ausweichfähigkeit wird durch eine rein stochastisch verteilte, verfügbare Manöverzeit bzw. einen verfügbaren Manöverabstand gemessen. Die vorhandene Ausweichfähigkeit wird dagegen im wesentlichen deterministisch aus den Manöverdaten der Schiffe nach dem Differentialspielmodell oder dem Iterativmodell berechnet.

Die nautischen Kenngrößen selbst ermöglichen Aussagen dahingehend, welches Manöver zu welcher Zeit in welchem Abstand Kollision in einer konkreten Begegnung noch zu vermeiden. Sie quantifizieren die Manövereigenschaften des Schiffes in einer betrachteten Begegnungssituation für ein bestimmtes der Schiffsführung unterstelltes Manöververhalten. Für die Schiffsführung können damit sinnvolle und effektive Handlungsanweisungen zur Kollisionsverhütung entwickelt werden.

## 2. Beschreibung und Darstellung von Begriffen und Elementen

### 2.1. Betrachtetes Beispielschiff

Das hier untersuchte Beispielschiff ist die "Tokyo Maru" (Tanker:  $L = 300$  m; Displacement = 180 000 t). Ihre Daten sind in Anlage 1 explizit abgedruckt. Bild 1 zeigt einen Spantenriss und die Vor- und Achterstevenform mit der Ruderkonfiguration. Aus Modellversuchen in der Hamburgischen Schiffsbauversuchsanstalt und durch Messungen an der Grossausführung sind ihre Manövriereigenschaften schon auf vielfältige Art und Weise untersucht worden. Bezüglich einer Bewertung dieser Manövriereigenschaften unter dem Gesichtspunkt der Kollisionsvermeidung ist bisher nichts bekannt.

### 2.2. Begriffe und Definitionen

#### 2.2.1. Begegnung

Unter einer Begegnung wird ganz allgemein der Bewegungsverlauf zwischen zwei sich mit fortschreitender Zeit annähernden Schiffen verstanden.

Ein solcher Verlauf ist beispielhaft in Bild 2 skizziert worden. Zu irgendeiner Zeit MP befindet sich ein Schiff A bezüglich Schiff O in einem Abstand MR. Mit der Zeit vermindert sich

dieser Abstand. Im Zeitpunkt NCPA erfolgt die Passage in der Entfernung NPR. Danach entfernen sich die Schiffe wieder voneinander. Jede kontaktfreie Passage, ob mit oder ohne Ausweichmanöver hat qualitativ diesen Verlauf.

Der hier verwendete Begriff Begegnung umschreibt unterschiedslos jede Annäherung auf einem beliebigen Kurs. Dies steht im Gegensatz zur nautischen Terminologie. Dort bezeichnet Begegnung eine Annäherung von Schiffen auf weitestgehend entgegengesetzt gerichteten Kursen ( Überholen - Kurse gleichgerichtet; Kreuzen - querlaufende Kurse ).

#### 2.2.2. Passierabstand - Kollisionsgefahr

Gemäss Seestrassenordnung /3/ (SSO) ist die Gefahr eines Zusammenstosses dann als gegeben anzusehen, wenn sich die Peilung zwischen zwei sich annähernden Schiffen nicht oder nicht merklich ändert. Diese rein kinematische Betrachtung in der anfänglichen Begegnungsphase beschreibt auch die übliche nautische Massnahme, mittels fortlaufender Peilung die Kollisionsgefahr zwischen zwei Schiffen abzuschätzen. Wird neben der Peilung auch die Entfernung der Schiffe bestimmt, so kann unter der Annahme, dass Kurse und Geschwindigkeiten der sich begegnenden Schiffe konstant bleiben, der Begegnungsverlauf und damit der Zeitpunkt NCPA und der Abstand NPR prognostiziert werden (Bild 3). Unterschreitet dieser prognostizierte NPR einen bestimmten von der Schiffsführung als erforderlich angesehenen Abstand EPR so wird Kollisionsgefahr vermutet. In diesem Fall wird sich die Schiffsführung veranlasst sehen, Manöver dergestalt vorzunehmen, dass dieser EPR nicht unterschritten wird.

#### 2.2.3. Kollision - erforderlicher Passierabstand EPR

Eine Kollision zwischen zwei Schiffen im üblichen Sinne bedeutet, dass eine physische Berührung der Schiffe erfolgt. In den i.f. gemachten Berechnungen wird jedoch unter Kollision verstanden, dass ein bestimmter als erforderlich angesehener Pas-

sierabstand EPR unterschritten wird. Dieser EPR wurde auf Grund der i.w. vorgestellten Überlegungen auf eine Kabellänge (185.2 m) festgesetzt. Es ist der lichte Abstand zwischen den Deckskonturen der Schiffe, der mindestens eingehalten werden muss.

Die Festlegung und Einhaltung eines EPR entspricht einer üblichen nautischen Massnahme und hat im wesentlichen das Ziel, eine kollisionsfreie Passage wahrscheinlicher zu machen, denn infolge Ungenauigkeiten in der Bestimmung von Peilung und Abstand ( z.B. mittels Radar) werden die prognostizierten Werte NPR und NCPA unsicher sein. Nach rechtlichen (SSO) oder nautischen Aspekten, wie z.B. im Handbuch für die Schiffsführung /4 / erläutert, wird ein solcher EPR von jeder Schiffsführung individuell festgelegt. Seine Grösse kennzeichnet vereinfacht den Grad der erlebten Gefährdung.

Für die gemachten Berechnungen wurde der EPR nach den folgenden Kriterien gewählt: Manövrieren zwei Schiffe in geringem Abstand voneinander, so können gegenseitige hydrodynamische Interaktionen eine Änderung der geplanten Fahrtverläufe eines oder beider Schiffe verursachen. Da der Verlauf und die Grösse dieser Änderung meist nicht absehbar und für die Beteiligten auch nicht konkret vorhersehbar sind, erhalten Manöver in diesem Bereich hinsichtlich ihrer Wirkung eine gewisse Zufälligkeit. Aus nautischer Sicht umschliesst diese Grenze, an der die physikalische wechselseitige Einflussnahme der Schiffe beginnt, eine "Zone", in der vorgesehene Manöver nicht mehr ihre beabsichtigte Wirkung zeigen und die somit zu meiden ist. Berücksichtigt werden diese Nahfeldeffekte in keinem der Manövermodelle. Aus Erfahrungen kann die Grösse der Zone mit 0.5 bis 1 Schiffslänge angegeben werden.

#### 2.2.4. Manöverabstand - Manöverzeit - nautische Kenngrösse

In Bild 4 sind typische Abstand-Zeit-Verläufe einer Begegnung zwischen zwei Schiffen dargestellt. Kurve 1 gilt dabei für eine Begegnung, in der kein Ausweichmanöver erfolgt. Der Verlauf der Kurve ist, wie vorne ausgeführt, prognostizierbar. Ist die

prognostizierte Passage in der Entfernung NPR im Zeitpunkt NCPA einer oder beiden Schiffsführungen zu klein, d. h. unterschreitet NPR einen von der Schiffsführung als erforderlich angesehenen Passierabstand EPR, so werden Ausweichmanöver erfolgen.

Wird in einem Abstand MR bzw. an einem Zeitpunkt MP von einer oder beiden Schiffsführungen erkannt, dass die Gefahr einer Kollision besteht, so wird als verfügbare Manöverzeit die Zeitspanne vom Erkennen der Gefahr bis zur prognostizierten Passage in NCPA bzw., falls das folgende Ereignis zeitlich vor der Passage liegt, bis zum Unterschreiten des erforderlichen Passierabstandes bezeichnet. Der verfügbare Manöverabstand ist der Abstand der Schiffe im Zeitpunkt MP.

Manövriert eins oder beide Schiffe, so ist der Abstands-Zeit-Verlauf entsprechend den Kurven 2a, 2b, oder 3 darstellbar. Bei den Berechnungen dieser Kurven wurde unterstellt, dass die Schiffe zwar immer die gleichen Manöver ausführen, aber diese Manöver in unterschiedlichen Abständen bzw. zu verschiedenen Zeitpunkten einleiten. Wird im Zeitpunkt MP Ruder gelegt, so zeigt Kurve 2a den Abstands-Zeit-Verlauf. Hier erfolgt die Passage in einem grösseren Abstand als EPR. Ein Manöver zu einem späteren Zeitpunkt - Kurve 2b - ist dagegen nicht mehr geeignet, die Kollision zu vermeiden. Wird entsprechend Kurve 3 gehandelt, so erfolgt die Passage genau im Abstand EPR. Der Zeitpunkt bzw. der Abstand, in dem genau dieses Manöver eingeleitet werden muss, wird als der erforderliche Manöverabstand EMR bzw. die erforderliche Manöverzeit EMT bezeichnet und mit den Manövermodellen berechnet.

Die beiden Grössen - erforderliche Manöverzeit bzw. erforderlicher Manöverabstand - kennzeichnen die Ausweichfähigkeit des Schiffes immer genau dann, wenn die zugehörigen Manöver an der Grenze der Manövrierbarkeit des Schiffes erfolgen. Für den Nautiker scheint der erforderliche Manöverabstand die anschaulichere Grösse zu sein, da sie z.B. unmittelbar auf dem Radar darstellbar ist. Aber auch die erforderliche Manöverzeit besitzt als Kenngrösse gewisse Vorzüge, so ist sie z.B. weitgehend invariant gegen die Geschwindigkeit und Peilung des nicht manövrierenden Schiffes, vgl. Sharma /2/.

## 2.3. Ausweichmanöver und Manöverkonzeptionen

### 2.3.1. Ausweichmanöver

Ein Ausweichmanöver wird hier als eine gewollte Änderung des Kurses und/oder der Geschwindigkeit verstanden, die mit dem Ziel durchgeführt wird, die drohende Kollision mit dem begegnenden Schiff zu vermeiden. Zur Bestimmung der Manöverwege werden diese Manöver in den Bewegungsmodellen mittels Anstellung des Ruders und/oder Änderung der Schubrichtung des Propellers simuliert.

Ein Ausweichmanöver lässt sich im praktischen Sinne in eine Einleitungs- und eine Durchführungsphase gliedern. Unter Einleitungsphase wird i. f. die Zeitspanne vom Geben des Ruder- oder Maschinenbefehls bis zum Erreichen einer deutlich wahrnehmbaren Änderung des Kurses, der Abweichung vom Geradeausweg oder der Fahrtgeschwindigkeit verstanden. Ein Beispiel dafür ist in Bild 14, der Gegenüberstellung der Manöverwege, wie sie in den Manövermodellen verwendet werden, gegeben. Die Grösse dieser Zeitspanne ist einmal von der Stellzeit des betreffenden Manöverorgans und zum anderen von den hydrodynamischen Eigenschaften des Systems Schiff-Manöverorgan abhängig. Hohe Stellgeschwindigkeiten und grosse Kraftwirkungen des Manöverorgans werden immer relativ kurze Einleitungsphasen bewirken. Dies ist auch erstrebenswert, da mit der Senkung der Stellzeiten die Ausweichfähigkeit erhöht werden kann.

An die Einleitungsphase schliesst sich unmittelbar die Durchführungsphase an. Sie endet in den gemachten Berechnungen immer dann, wenn die Passage erfolgt und die Schiffe sich wieder voneinander entfernen. Nach dieser Entfernungsphase ist zwar eine zukünftige Kollision zwischen den Schiffe nicht auszuschliessen, sie müssen sich dazu jedoch erstmal wieder in eine Begegnungsphase begeben. Die Dauer der Durchführungsphase ist von den verschiedensten Parametern wie Kurse, Geschwindigkeiten, Manöver und Manövrierbarkeit beider Schiffe in dem gerade befahrenen Seegebiet (Wassertiefe und Wettereffekte) abhängig. Diese letzt-

genannten Umwelteinflüsse haben selbstverständlich auch Auswirkung auf die Einleitungsphase. Durch sie kann die Ausweichfähigkeit sowohl verbessert als auch verschlechtert werden.

### 2.3.2. Manöverkonzeptionen

Aus dem möglichen Spektrum aller durchführbaren Manöver und Manöverkombinationen konnten aus Zeitgründen nur einige wenige ausgewählt und eingehender untersucht werden, um das Verhalten des Schiffes und seine Ausweichfähigkeit zu charakterisieren und zu beurteilen.

Rudermanöver wurden mit Hartruderlage ausgeführt. Die Ruderlegegeschwindigkeit wurde dabei so gross wie möglich gewählt. Bei reinen Rudermanövern wurde die Propellerdrehzahl des Schiffes konstant gehalten, d.h. der Propeller drehte während des gesamten Ausweichvorganges mit der Drehrate weiter, die das Schiff vor Einleitung des Manövers auf Marschfahrt hatte. Als Maschinenmanöver wurde eine mit "Crash-Stop" bezeichnete Umsteuerung der Maschine vorgenommen. Dies bedeutet ein Aufstoppen des Schiffes mit rückwärtsdrehendem Propeller ohne Rücksicht auf eventuelle thermische oder mechanische Überlastungen der Antriebsanlage. Der Crash-Stop hat das Ziel, die Fahrt eines Schiffes möglichst drastisch auf Null zu reduzieren. Solcherart der Manöver bezeichnen im nautischen Sinne die technische "Grenze der Manövrierbarkeit" des Schiffes. Im Bedarfsfall soll der Nautiker diese Manöver durchführen können. Sie kennzeichnen damit für ihn die Leistungsfähigkeit des fahrenden Schiffes, auf Ruder oder Maschine zu reagieren. Ob diese Manöver in den verschiedenen untersuchten Begegnungen aus nautischen Überlegungen sinnvoll oder aus rechtlichen Gründen überhaupt zulässig sind, wird hier nicht weiter beachtet. Als entscheidend wurde bei der Ausführung immer angesehen, ob das Ziel - Vermeidung der Kollision - erreicht wurde.

Die folgende Übersicht zeigt den Umfang der simulierten Manöver und Manöverkombinationen für die beiden Modelle:

Ausweichmanöver mit	DG-Modell	IT-Modell
Ruder	ja	ja
Maschine	nein	ja
Ruder und Maschine	nein	ja

Weichen beide Schiffe aus, so werden ihre Manöver immer im gleichen Augenblick eingeleitet. Dies ist aus nautischen Gesichtspunkten ein besonders ungünstiger Augenblick, wenn wie üblich nicht bekannt ist, ob, wann und wenn ja, wie das begegnende Schiff reagieren wird, da es offensichtlich bisher nichts unternimmt. Weicht dann ein Schiff aus, wozu es eventuell verpflichtet ist oder was ihm unter gewissen Bedingungen zumindest gestattet ist, so kann die Wirkung des eigenen Manövers durch ein zeitgleiches Manöver des anderen derart verändert werden, dass es gerade infolge dieses Manövers zur Kollision kommt. Erfolgen die Manöver zu verschiedenen Zeiten, so kann das später manövrierende Schiff immer angemessen reagieren, unterstellt, das Manöver des Gegenübers wird erkannt und richtig verstanden.

#### 2.4. Manövrierfähigkeit - Ausweichfähigkeit

Der Begriff Manövrierfähigkeit als Systemeigenschaft beinhaltet hier sowohl die Manövrierbarkeit als auch die der Schiffsführung unterstellte Manöverstrategie. Während unter Manövrierbarkeit die Reaktion des Schiffes auf einen bestimmten Befehl der Schiffsführung verstanden wird, charakterisiert die Manöverstrategie, wie die Manövrierbarkeit genutzt wird. Mit Ausweichfähigkeit wird in diesem Zusammenhang vereinfacht immer die "Manövrierfähigkeit unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung" verstanden.

#### 2.4.1. Einfluss der Schiffsführung auf die Ausweichfähigkeit

Der Einfluss der Schiffsführung auf die Ausweichfähigkeit wird in dem hier verwendeten Beurteilungsmodell durch die drei folgenden Faktoren berücksichtigt:

1. Die Manöverbereitschaft, d.i. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass in der betrachteten Begegnung überhaupt manövriert wird.
2. Die Manöverqualität, d.s. die unterstellten relativen Häufigkeiten, mit denen innerhalb der jeweils angenommenen zulässigen Manövermenge optimale, neutrale und pessimale Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung angewendet werden.
3. Die Manöverwirksamkeit, d.i. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die stochastisch verteilt angenommene verfügbare Manöverzeit VMT (bzw. Abstand VMR) die jeweils zur Kollisionsvermeidung erforderliche Manöverzeit EMT (bzw. Abstand EMR) nicht unterschreitet.

##### 2.4.1.1. Manöverbereitschaft

Die Manöverbereitschaft kennzeichnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit in der momentanen Begegnung überhaupt ein Ausweichmanöver zu erwarten ist. Dies kann über den vermutlichen Passierabstand NPR relativ einfach abgeschätzt werden (Bild 5). Ist NPR kleiner als EPR, so ist mit Sicherheit ein Manöver zu erwarten. Damit ergibt sich für den Passierabstandsbereich zwischen  $EPR_u$  und  $EPR_o$  - dem Kollisionsband - die Wahrscheinlichkeit für ein Ausweichmanöver zu 1. Liegt NPR zwischen  $EPR_o + 4 \cdot EPR$  oder  $EPR_u - 4 \cdot EPR$  wird ein linearer Verlauf der Manöverbereitschaft vermutet. Befindet sich A innerhalb des Kollisionsbandes, so ist die Kollision unvermeidlich wenn keins der beiden Schiffe entsprechend manövriert. Befindet sich A ausserhalb des Kollisionsbandes, so muss zumindest eins der Schiffe erst ein entsprechendes Manöver durchführen, damit sich die Kollision überhaupt ereignen kann.

Dies gilt gleichermassen für beide Manövermodelle. In Bild 5

ist nur der Wahrscheinlichkeitsverlauf für das Iterativmodell dargestellt. Infolge der Berücksichtigung der aktuellen Schiffsförm und der Lage des Messpunktes (Position der Radarantenne) ist  $EPR_o$  und  $EPR_u$  von der Annäherungsrichtung der Schiffe abhängig. Wird wie beim Differentialspielmodell die Deckskontur durch Kreise schematisiert und der Messpunkt in Mitte-Schiff positioniert, so ist  $EPR_o = - EPR_u$  und d.h., die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Manöver erwartet werden kann, ist symmetrisch um diesen Messpunkt verteilt.

#### 2.4.1.2. Manöverqualität

Die der Schiffsführung unterstellte Manöverstrategie beschreibt das Verhalten der Schiffsführung bei einer drohenden Kollision. Dazu wird das mögliche Verhaltensspektrum vereinfacht rasterartig in optimal, neutral und pessimal unterteilt.

##### 2.4.1.2.1. Charakterisierung der Manöverqualität

Optimales Verhalten hinsichtlich der Kollisionsvermeidung bedeutet, dass man bestrebt ist, den Abstand  $MPR$  zu maximieren. Neutral verhält sich eine Schiffsführung, die keinerlei Massnahmen bezüglich des prognostizierten Passierabstandes ergreift. Pessimal wird agiert, wenn der Passierabstand minimiert werden soll. Ein optimales/neutrales/pessimales Verhalten stellt in dem verwendeten Sinne keine rechtliche oder moralische Bewertung des Ausweichmanövers dar, sondern dient nur der Diskretisierung des an sich kontinuierlichen Spektrums der möglichen Manöverstrategien. So führt im praktischen Sinn optimales Verhalten zu der absolut kleinsten Entfernung der beiden Schiffe, in der ein erfolgreiches Ausweichmanöver eingeleitet werden muss, um eine sichere Passage im Abstand  $EPR$  zu erreichen. Verhalten sich beide oder eins der Schiffe neutral oder gar pessimal, so vergrößert sich der erforderliche Manöverabstand  $EMR$  im Extremfall bis ins Unendliche.

Von entscheidender Bedeutung für die Kollisionsvermeidung sind die Manöverabsichten der Beteiligten bei Manövern nahe der Nahbereichsgrenze. Dies gilt besonders dann, wenn das pessimal handelnde Schiff schneller ist und ein kritisches Mass an Drehfähigkeit (abhängig vom Geschwindigkeitverhältnis beider Schiffe und EPR) besitzt. Auch wenn sich bei einer solchen Begegnung die eigene Schiffsführung optimal verhält, kann sie die drohende Kollision mittels Ausweichmanöver allein nicht verhindern.

#### 2.4.1.2.2. Ursachen für optimale, neutrale oder pessimale Ausweichmanöver

Grundsätzlich kann wohl unterstellt werden, dass Kollisionen nicht vorsätzlich herbeigeführt werden. Die mögliche Kette der Handlungen und Unterlassungen, die dann trotz sorgfältiger und gewissenhafter Überprüfung zu einer Kollision führen, kann mit

- dem in der Regel zwischen den Schiffsführungen bestehenden Informationsdefizit bezüglich der Einschätzung der Kollisionsgefahr,
- der unvollständigen Kenntnis betreffs der Manövrierbarkeit des eigenen und des begegnenden Schiffes,
- der rechtlichen Verteilung von Ausweichpflicht und Manöverwahl zwischen den Schiffen und
- der Bedrohung, die infolge der Anwesenheit des anderen Schiffes empfunden wird,

begründet werden. Diese Problempunkte beeinflussen und verstärken sich wechselseitig. Im Vorgriff auf spätere Ergebnisse sei hier nur auf die Vergrößerung der Kollisionswahrscheinlichkeit hingewiesen, die durch die Vorschrift der SSO, in bestimmten Situationen nur bestimmte Manöver zuzulassen, entsteht, und in Bild 74 abgelesen werden kann.

#### 2.4.1.2.3. Häufigkeiten, mit denen optimale, neutrale und pessimale Ausweichmanöver zu erwarten sind

In den vorgelegten Rechnungen wurde einfach unterstellt, dass das eigene Schiff stets optimal manövriert, da seine Ausweichfähigkeit betrachtet werden soll.

Das begegnende Schiff dagegen manövriert nach einem willkürlichen, aber als plausibel angenommenen Schlüssel, da zur Abschätzung dieser Häufigkeiten keine objektiven Daten verfügbar waren. Die i. f. gemachte Erläuterung der verschiedenen Häufigkeitsanteile ist in Bild 6 schematisch dargestellt. Diese Daten beruhen auf eigener Erfahrung und auf Eindrücken des Verfassers aus Gesprächen mit Nautiker-Kollegen. Für rund 5% aller Begegnungen kann angenommen werden, dass sie verspätet oder überhaupt nicht wahrgenommen werden. Unter verspätet wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass die Kollisionsgefahr erst zu einem Zeitpunkt erkannt wird, in dem zur Einschätzung der Situation und Abschätzung der erforderlichen Ausweichmanöver nicht mehr die nötige Zeit zur Verfügung steht oder die Grösse der erlebten Bedrohung die unmittelbare Einleitung des Manövers erzwingt. Werden in diesem fortgeschrittenen Zustand Manöver ausgeführt, so haben sie eine gewisse Zufälligkeit hinsichtlich ihrer beabsichtigten Wirkung - Vermeidung der Kollision. Erwartet werden kann folglich, dass die in dieser Lage ausgeführten Manöver zu je gleichen Anteilen optimal, neutral oder pessimal sein werden. Schwieriger ist es abzuschätzen, wie das Verhältnis von den verspätet zu den "nicht wahrgenommen" Begegnungen ist. Hier wurde für die Berechnungen angenommen, dass beide Situationen gleichhäufig eintreten. Damit ergibt sich die folgende Verteilung für das Manöververhalten des begegnenden Schiffes.

optimal	neutral	pessimal
95 5/6 %	3 1/3 %	5/6 %

#### 2.4.1.3. Manöverwirksamkeit

Die Manöverwirksamkeit wird z.B. durch die Wahrscheinlichkeit erfasst, mit der die stochastisch verteilte verfügbare Manöverzeit VMT eine eventuell zur Kollisionsvermeidung erforderliche Zeitspanne EMT nicht unterschreitet. Analog kann

die Manöverwirksamkeit mittels dem erforderlichen Manöverabstand EMR berechnet werden. Infolge mangelnder weitergehender statistischer Daten wurde für die Zufallsvariablen VMT bzw. VMR eine empirische, universelle Verteilungsfunktion angesetzt. Die erforderlichen Manöverabstände EMR bzw. Manöverzeiten EMT wurden für jede der betrachteten Begegnungen in Abhängigkeit von allen Parametern des gewählten Manövermodells determiniert.

#### 2.4.1.3.1. Verteilungsfunktion für die verfügbare Manöverzeit

Aus den von Hara /5/ beschriebenen Beobachtungen des Schiffsverkehrs in Port of Kobe und in der Bisan Seto Passage wurde eine allgemeine Häufigkeitsverteilung der verfügbaren Manöverzeit ermittelt. Diese empirische Häufigkeitsverteilung kann durch eine Gaußsche Normalverteilung mit dem Mittelwert  $\tau_m = 204$  s und der Standardabweichung  $\tau_s = 72$  s angenähert werden.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der in einer beliebigen Begegnungssituation die verfügbare Manöverzeit eine eventuell zur Kollisionsvermeidung erforderliche Zeit  $\tau$  unterschreitet, ist dann

$$\langle F1 \rangle \quad \Phi(\tau) = \frac{1}{\tau_s \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tau} e^{-(x-\tau_m)^2/2\tau_s^2} dx$$

Um die Kollisionswahrscheinlichkeit bei  $\tau = 0$  - zum Ausweichen ist kein Manöver mehr erforderlich, da Schiff A gerade sicher in CPA passiert - zu null werden zu lassen, wird eine folgendermassen renormierte Verteilungsfunktion eingeführt.

$$\langle F2 \rangle \quad F(\tau) = \frac{\Phi(\tau) - \Phi(0)}{1 - \Phi(0)} \quad \tau \geq 0.$$

Der Funktionsverlauf dieser Verteilungsfunktion ist in Bild 8 wiedergegeben.

#### 2.4.1.3.2. Verteilungsfunktion für den verfügbaren Manöverabstand

Von Kwik /6/ wurde für den verfügbaren Manöverabstand VMR aus Beobachtungen der Manöverabstände für ein Tankschiff im Rahmen der Arbeiten des SFB 98 eine empirische Verteilungsfunktion ermittelt.

$$\langle F3 \rangle \quad F(r) = (7812.5r^2 + 4882.8125r^3 - 991.821289r^4 + 72.479248r^5 - 2.3841858r^6 + 0.0298023r^7)10^{-6}$$

$0 \leq r \leq 16$                       ( Abstand in Seemeilen)

Der Funktionsverlauf dieser Verteilungsfunktion ist in Bild 9 wiedergegeben.

#### 2.4.2. Manövrierbarkeit - Einfluss des Schiffes auf die Ausweichfähigkeit

Die Manövrierbarkeit des Schiffes ist durch Form und Grösse des Unterwasserschiffes, Anzahl und Grösse der Steuer- und Antriebsorgane, den Wechselwirkungen mit seiner Umwelt wie Wind und Seegang und eventuell besonderer Einflüsse wie z.B. Flachwasser- und Kanaleffekte vorgegeben. Sie kann im Rahmen der Genauigkeit der Berechnungsverfahren bestimmt und vorhergesagt werden.

##### 2.4.2.1. Beschreibung der Bewegungsmodelle

Die Bewegungen eines manövrierenden Schiffes werden mit den Bewegungsmodellen bestimmt. Für die beiden Manövermodelle wurden unterschiedliche Bewegungsmodelle verwendet bzw. getestet, die in den folgenden Unterabschnitten kurz erläutert werden. Für ein Hart-Stb.-Rudermanöver sind die mit den verschiedenen Bewegungsmodelle berechneten Manöverwege für die Geschwindigkeit von 15 sm/h bei Manöverbeginn in den Bildern 10 bis 16 abgebildet worden.

Auswirkungen der Umwelt, wie z.B. in Bild 16 infolge Wind, auf das Schiff in der konkreten Manöversituation wurden bei der Beurteilung der Manövrierfähigkeit in den Berechnungen für das Beispielschiff nicht berücksichtigt.

#### 2.4.2.1.1. Bewegungsmodell von Söding

In /7/ wurde von Söding ein Modell zur Vorhersage von Schiffsbewegungen vorgestellt. Aus den Entwurfsdaten eines Schiffes wie Spantflächen, Spantbreiten, Ruder- und Propellerdimensionen etc. (siehe Anhang 1.1.: Beschreibung des betrachteten Schiffes) können damit Kräfte und Geschwindigkeiten an einem manövrierenden Schiff berechnet werden.

Die Bewegungsgleichungen zur Beschreibung der Kräfte in x und y Richtung und des Momentes um die Hochachse z (Koordinatensystem - Bild 0) lauten:

- Kraft in x-Richtung

$$\langle F4 \rangle \quad X = m(\dot{u} - v\dot{\psi} - x_G\dot{\psi}^2) = X_H + X_P + X_R + X_S$$

- Kraft in y-Richtung

$$\langle F5 \rangle \quad Y = m(\dot{v} + u\dot{\psi} + x_G\dot{\psi}^2) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_S$$

- Moment um Hochachse (Index z)

$$\langle F6 \rangle \quad N = I_z\ddot{\psi} + mx_G(\dot{v} + u\dot{\psi}) = N_H + N_P + N_R + N_S$$

Beginnend mit Geradeausfahrt bzw. einem Punkt der Fahrkurve, in dem die Geschwindigkeiten bekannt sind, können diese Werte für beliebige Zeiten bei laufend bekannten Krafteinwirkungen bestimmt werden. Die Integration der Geschwindigkeiten über die einzelnen Zeitschritte ergibt den Fahrtweg des Schiffes. Das umgebende Wasser wird dabei als ungestört, homogen und isotrop

angenommen. Es ist seitlich und in der Tiefe unbeschränkt. Für die explizite und umfassende Darstellung der Berechnungsverfahren von Rumpf-, Ruder- und Propellerkräften ( Index H,R,P) sei auf die Literatur verwiesen. Die mit S (Seaway) indizierten Kräfte beschreiben den Einfluss der Umwelt auf das Schiff wie z.B. Wind, Seegang, Flachwasser etc.. Wird angenommen, dass die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Termen vernachlässigbar sind, so können sie durch Superposition zusammengefasst werden.

Da für die Berechnung der Manöverwege mit diesem Modell nur Parameter zur Beschreibung der Schiffsform benutzt werden, die im Entwurfszustand des Schiffes schon bekannt sind, ist es geeignet, relativ problemlos qualitative Aussagen über den Einfluss einzelner oder mehrerer Änderungen der Schiffsform, der Ruderkonzeption und des Antriebes zu erhalten. Bild 10 zeigt unter anderem die Fahrkurve des Tankers nach diesem Modell.

Dieses Modell wurde bei der Ermittlung der nautischen Kenngrößen bzw. der Abschätzung der Ausweichfähigkeit in den später vorgestellten Ergebnissen nicht verwendet.

#### 2.4.2.1.2. Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma

Das von Oltmann und Sharma entwickelte Verfahren zur Simulation von Ruder- und Maschinenmanövern wird z.B. in /8/ beschrieben. Die zur Berechnung der Kräfte an Rumpf und Ruder erforderlichen Parameter werden aus CPMC-Versuchen ( Computerized Planar Motion Carriage) des Schiffsmodelles gewonnen. Sie sind in Anhang 1.2 komplett angegeben. (Anm.: Die dort verwendeten Abkürzungen und Symbole sind in /8/ erläutert und nicht in der beigefügten Symbolliste aufgeführt.)

Die Bewegungen des Schiffes lassen sich für die Grossausführung, wie vergleichende Rechnungen /8/ zeigen, mit zufriedenstellender Genauigkeit vorhersagen. Das Schiff bewegt sich in ungestörtem, homogenen, isotropen und horizontal unbegrenztem Wasser mit bestimmter konstanter ( auch Flachwasser) Tiefe. Die Bewegungsgleichungen haben die gleiche Form wie in Abschnitt 2.4.1.1.1.

Der mögliche Manöverbereich überdeckt alle vier Quadranten. Die Änderung der Manövereigenschaften z.B. infolge einer Änderung der Schiffsform ist nur nach der Durchführung und Auswertung der zugehörigen Modellversuche erfassbar. In Anlage 1.2. sind die wesentlichen Eingabedaten zur Beschreibung des Schiffes für dieses Berechnungsverfahren aufgelistet. Bild 11 zeigt die Fahrkurve des Schiffes nach diesem Modell bei Drehkreisfahrt.

Für die Berechnungen der nautischen Kenngrößen mit dem Iterativmodell wurde dieses Verfahren benutzt.

#### 2.4.2.1.3. Schiffsbewegungen im Differentialspielmodell

In diesem Modell wird das Ausweichmanöver in Einleitungsphase und Durchführungsphase unterteilt. In der Einleitungsphase bewegt sich das Schiff geradeaus weiter. In dieser Zeitspanne fällt die Geschwindigkeit linear von Marschfahrt auf die konstante Geschwindigkeit im Drehkreis - der Manövergeschwindigkeit - ab. In der Durchführungsphase bewegt sich dann das Schiff auf einer Drehkreisbahn mit einem idealisierten Drehkreisradius mit konstanter Manövergeschwindigkeit, wenn Ruder gelegt ist. Bei Mittschiffsruder fährt das Schiff geradeaus.

Die Manövergeschwindigkeit, die Dauer der Einleitungsphase und die Grösse des Drehkreisradius muss aus Messungen an der Grossausführung oder aus Simulationen abgeschätzt werden. Bild 12 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit des Schiffsschwerpunktes für den Tanker während einer simulierten Drehkreisfahrt mit der Geschwindigkeit von 15 sm/h bei Manöverbeginn in den ersten 300 s nach dem Modell von Oltmann und Sharma. Sie variiert erheblich mit der Dauer des Manövers. Für das Differentialspielmodell ist ihr Verlauf, wie er zur Berechnung der nautischen Kenngrößen relevant ist und verwendet wurde, ebenfalls eingetragen. Die Fahrkurve bei Drehkreisfahrt des Tankers für die Verwendung im Differentialspielmodell ist beispielhaft in Bild 13 geplottet worden.

#### 2.4.2.2. Gegenüberstellung der Manöverwege für ausgewählte Beispielmanöver

In den folgenden Abbildungen wurden immer die ersten 900 s nach Manövereinleitung wiedergegeben. Gleichen Nummern entlang der Fahrkurve entsprechen gleiche Zeiten.

1. Bild 14: Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes, für die Berechnungsverfahren nach 2.4.2.1.
2. Bild 15: Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes, wenn die Ruderlegegeschwindigkeit halbiert wird ( berechnet mit dem Modell von Söding). Diese Massnahme entspricht etwa einer Verlängerung der Manöverreaktionszeit von 50 s auf 60 s.
3. Bild 16: Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes, wenn Wind mit 20 m/s ( etwa Bft. 8 ) herrscht ( berechnet mit dem Modell von Söding). Der Einfluss des Windes ist für das betrachtete Schiff klein infolge des, bezogen auf das Unterwasserschiff, kleinen Überwasserschiffes.
4. Bild 17: Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes bei Variation der Ruderfläche ( berechnet mit dem Modell von Oltmann).
5. Bild 18: Manöverweg des Tankers für Crash-Stop-Manöver ohne Ruderunterstützung
6. Bild 19: Geschwindigkeit und Drehzahl im Crash-Stop ( Ergänzung zu Bild 18)

#### 2.4.2.3. Darstellung der Schiffskonturen

In den Bildern 10, 11 und 13 sind die Deckskonturen des Tankers idealisiert für die verschiedenen Berechnungsmodelle geplottet worden. Wird der ERP wie im vorliegenden Fall mit einer Kabellänge angenommen, so sollte die Schiffskontur mit ihren unterschiedlichen Proportionen von Länge und Breite zur Verbesserung

der Genauigkeit der Ergebnisse berücksichtigt werden. Für das Differentialspielmodell wird die Schiffskontur immer als Kreisscheibe mit dem Durchmesser der Schiffslänge angenommen. Im Iterativmodell wird wie in Bild 20 die Schiffskontur entlang der Schiffslängsachse durch 7 Kreise abgebildet. Der Abstand der Kreismittelpunkte bestimmt sich nach der Formel:

$$\langle F7 \rangle \quad l = \frac{6L}{35} - \sqrt{\left(\frac{6L}{35}\right)^2 - \frac{L^2 - B^2}{35}}$$

und der Durchmesser der Kreise ist dann

$$\langle F8 \rangle \quad c = L - 6l$$

Die Schiffslängsrichtung wird dabei exakt erfasst, die Breite jedoch überzeichnet.

#### 2.4.3. Berücksichtigung der Struktur des begegnenden Verkehrs

##### 2.4.3.1. Grösse und Manövriereigenschaften der Schiffe des begegnenden Verkehrs

Die Verteilung der Grösse und der Manövriereigenschaften eines Schiffes des begegnenden Verkehrs ist grundsätzlich weitestgehend unbekannt und aus dem Radarbild nicht bestimmbar. Sind die Schiffe optisch in Sicht, so können die Dimensionen grob abgeschätzt werden. Die Manövrierbarkeit des anderen Schiffes in der momentanen Begegnung kann nur dann abgeschätzt werden, wenn sie aus irgendwelchen Gründen dem Nautiker auf dem Schiff 0 bekannt ist. Dies ist praktisch niemals der Fall.

Bei den gemachten Berechnung wurde der Verkehr durch ein Schwesterschiff der "Tokyo Maru" mit gleichen Abmessungen und gleichen Manövriereigenschaften repräsentiert.

##### 2.4.3.2 Kurswinkelverteilung der begegnenden Schiffe

Der Kurswinkel, unter dem zwei Schiffe einander begegnen ist

weitestgehend vom befahrenen Seegebiet abhängig. In der Nähe der Küste und in Verkehrstrennungsgebieten verlaufen die Kurse vornehmlich in ganz bestimmte Richtungen, denen die Schiffe mit einer gewissen Schwankungsbreite folgen werden. Kreuzungen von Verkehrsströmen werden sicherlich auch unter dem Gesichtspunkt günstiger nautischer Verkehrsführung geplant werden, ihre Richtungen folgen aber immer annähernd dem Küstenprofil, und es werden nicht bestimmte, als besonders sicher anzusehende Begegnungswinkel der Verkehrsströme per Verordnung erzwungen. Auf Hoher See können für den Kurswinkel zweier sich begegnender Schiffe wohl kaum bestimmte Richtungen als besonders häufig angegeben werden.

Diese Gedanken legen den Schluss nahe, dass zur Beurteilung der Ausweichfähigkeit alle möglichen Kurswinkel mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erwartet werden können. Dies gilt zumindest immer dann, wenn ein Schiff nicht ständig die gleiche Route ( wie z.B. Fährschiffe) befährt. I.f. wird der Einfachheit halber eine Gleichverteilung aller möglichen Kurswinkel angenommen.

#### 2.4.3.3 Geschwindigkeitsverteilung der begegnenden Schiffe

Nimmt man an, dass ein Schiff jedem anderen existierenden Schiff begegnen kann und ihm ausweichen will oder muss, so sind realistische Grenzwerte des möglichen Geschwindigkeitsspektrums für das begegnende Schiff etwa mit 0 und 40 sm/h anzugeben. Auf Revierfahrt ist oft die Obergrenze eingeschränkt. Ihre Häufigkeitsverteilung kann für ein bestimmtes Seegebiet aus Messungen des Schiffsverkehrs abgeschätzt werden, wie z.B. in /18/.

Um die Berechnungen in annehmbarem Rahmen zu halten und doch einen repräsentativen Geschwindigkeitsbereich zu erfassen wurden für die durchgeführten Beispielrechnungen 13 Kn, 15 Kn und 17 Kn als die Geschwindigkeiten angesehen, mit denen der Tanker fahren kann, bzw. die das den begegnenden Verkehrsstrom repräsentierende Schwesterschiff fährt.

### 3. Manövermodelle und Modell zur Beurteilung der Manövrierfähigkeit hinsichtlich der Kollisionsvermeidung

#### 3.1. Manövermodelle

Zur Bestimmung der nautischen Kenngrößen - erforderlicher Manöverabstand bzw. erforderliche Manöverzeit - wurden die eingangs schon erwähnten unterschiedlichen Berechnungsmodelle erstellt. Sie werden mit Differentialspielmodell (DG-Modell) und Iterativmodell (IT-Modell) bezeichnet.

Beide Modelle unterscheiden sich in wesentlichen Aspekten wie

- dem Bewegungsverhalten der Schiffe beim Ausweichen,
- der Bestimmung und Wahl des erfolgreichen Ausweichmanövers,
- der Berücksichtigung der Schiffsform und der Position,

zwischen dem die erforderlichen Abstände gemessen werden.

Jedes Manövermodell beinhaltet zwangsläufig vereinfachte Quantifizierungen der Begriffe: Kollision, Manövrierbarkeit (d.i. die Antwort des Schiffes auf beliebige Steuerbefehle) und Manöverstrategie (d.i. die Antwort der Schiffsführung auf beliebige Begegnungssituationen). Das DG-Modell und das IT-Modell unterscheiden sich in allen drei Punkten. Diese Unterschiede werden in der Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen an einem Beispiel (Abschnitt 4.2.) noch verdeutlicht.

##### 3.1.1. Iterativmodell

Sind die Manöverwege der beiden sich begegnenden Schiffe für ein bestimmtes Manöver oder eine Manöverfolge bekannt, so kann der Abstand bestimmt werden, der benötigt wird, beide Schiffe im erforderlichen Passierabstand  $EPR$  (Bild 4) passieren zu lassen. Das Iterativmodell wurde zuerst von Kenan /10/ eingeführt und von Webster /11/ weiter erprobt. Für die hier durchgeführten Rechnungen wurde das von Hampel /12/ erstellte Simulationssystem in Verbindung mit dem Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma /8/ verwendet. Das Simulationssystem kann aber auch unmittelbar mit dem Bewegungsmodell von Söding benutzt werden.

Die Bestimmung der erforderlichen Passierabstände geschieht schematisch folgendermassen :

Der Anfang der Manöverwege beider Schiffe wird derart gegeneinander positioniert, dass die Schiffe mit Sicherheit kollidieren werden, wenn sie ihre Manöver ausführen ( Bild 21). Durch iterative Verschiebung des Manöverweges von Schiff A in Annäherungsrichtung kann die Entfernung bzw. Position  $x, y$  bestimmt werden, in der sich die beiden Schiffe befinden müssen um - unterstellt sie manövrieren wie bei der Berechnung der Manöverwege angenommen - in EPR passieren zu können. Die so gewonnene Position  $x, y$  repräsentiert dann einen Punkt der Manöverabstandskurve für Begegnungen der beiden Schiffe mit dem betrachteten Kurswinkel, den betrachteten Geschwindigkeiten bei Manöverbeginn und dem unterstellten Manöver bzw. der unterstellten Manöverkombinationen. Systematische Variation der Anfangsposition der Schiffe ergibt die gesamte Manöverabstandskurve für diesen Kurswinkel innerhalb des Kollisionsbandes. Jede Position auf dieser Manöverabstandskurve entspricht genau der Entfernung, die benötigt wird, wenn mit den Manövern, die der Bestimmung der Fahrkurve für jedes der beiden Schiffe zugrunde gelegt wurden, ausgewichen wird. Eine Veränderung der Zeiten, an denen z.B. das Ruder eines der Schiffe von Bb. nach Stb. gelegt wird, führt zur Veränderung der betreffenden Fahrkurve und damit auch der Manöverabstände.

Der nach nautischem Verständnis kennzeichnende Abstand kann dann nach verschiedenen Kriterien - wie z.B. in der Erläuterung zu den Manöverabstandsbildern bzw. in der Gegenüberstellung der Manöverabstände dargestellt - gewählt werden.

### 3.1.2. Differentialspielmodell

Die Grundlagen, die Theorie der Differentialspiele auf das Bewegungsverhalten von Fahrzeugen anzuwenden, wurden von Isaacs /13/ erarbeitet. Erweitert auf maritime Anwendung wurden sie von

Merz, Kenan, Miloh und Sharma, u.a./ 14,15,16,17,18/. für die explizite Darstellung des mathematischen Hintergrundes sei auf die Literaturquellen verwiesen. Hier sind nur übersichtartig die für das Verständnis der Manövermodelle wesentlichen Aspekte aufgeführt.

Das dynamische Verhalten der beiden manövrierenden Schiffe A und O wird in dem DG-Modell mittels der folgenden kinematischen Gleichungen beschrieben:

$$\begin{aligned}\langle F9 \rangle \quad \dot{x} &= V_A \cos \theta + y \phi_O V_O / R_O - V_O \\ \dot{y} &= V_A \sin \theta - x \phi_O V_O / R_O \\ \dot{\theta} &= -\phi_O V_O / R_O + \phi_A V_A / R_A\end{aligned}$$

$\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  ist die relative Geschwindigkeit mit der sich die Position von Schiff A bezogen auf Schiff O ändert.  $\dot{\theta}$  ist die Änderung des relativen Kurswinkels, unter dem sich die Geschwindigkeitsvektoren der beiden Schiffe - auch als Kurswinkeldifferenz bezeichnet, schneiden. Berechnet werden die Grössen  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{\theta}$  aus den absoluten Geschwindigkeiten  $V_A$  bzw.  $V_O$  von Schiff O bzw. Schiff A, der Kurswinkeldifferenz  $\theta$  und Termen, die, vereinfacht gesprochen und wie i.f. näher erläutert, den von den Schiffsführungen ausgeübten Einfluss ( hier nur Kursänderungen) auf den Begegnungsverlauf darstellen.

So dreht z.B. Schiff O mit der maximal technisch möglichen Geschwindigkeit, wenn es, wie in diesem Modell angenommen, mit der Voraugeschwindigkeit  $V_O$  idealisiert auf einer Hart-Ruder-Drehkreisbahn, die einen Radius  $R_O$  hat, fährt.

$$\langle F10 \rangle \quad \hat{\psi}_O = \frac{V_O}{R_O} \quad \hat{\psi}_A = \frac{V_A}{R_A}$$

Analog gilt dies auch für Schiff A.

Die Kontrollvariable  $\phi_0$  bzw.  $\phi_A$  in <F9> beschreibt den Willen der Schiffsführung, mit welcher Drehgeschwindigkeit - innerhalb der möglichen maximalen Werte - die Kursänderung vorgenommen werden soll. So bedeutet z.B.  $\phi_0 = -1$ , dass die Schiffsführung von Schiff 0 mit Hart-Bb.-Ruder, also auf der engsten Bb.-Drehkreisbahn, ausweichen will. Die Kursänderungsgeschwindigkeit von 0 ist in diesem Fall:

$$\langle F11 \rangle \quad \dot{\psi}_0 = -\dot{\hat{\psi}}_0 = -\frac{V_0}{R_0}$$

Welcher Wert für die Kontrollvariable  $\phi_A$  bzw.  $\phi_0$  - zwischen den möglichen Extremen (+1, -1) - in einer bestimmten Begegnungssituation von der jeweiligen Schiffsführung gewählt wird, ist von der Manöverstrategie (siehe auch 2.4.1.2) abhängig. Im vorliegenden Manövermodell sind diese Werte Lösungen des Differentialgleichungssystem.

Das im Sinne der Theorie der Differentialspiele "optimale" - besser entsprechend der Manöverabsicht günstigste Spiel - nach Isaacs (/13/ Seite 67) wird durch die folgende partielle Differentialgleichung vom Hamilton-Jacobi-Typ beschrieben:

$$\langle F12 \rangle \quad M \sum (W_x \dot{x} + W_y \dot{y} + W_\theta \dot{\theta}) = 0.$$

Der Operator  $M$  repräsentiert dabei die Manöverabsichten der Schiffsführungen. So hat für den Fall, dass beide Schiffe hinsichtlich der Kollisionsvermeidung zusammenarbeiten wollen - sich optimal verhalten - der Operator die Form:

$$\langle F13 \rangle \quad M = \max_{\phi_0} \max_{\phi_A}$$

Verhält sich A pessimal, so wird

$$\langle F14 \rangle \quad M = \max_{\phi_0} \min_{\phi_A}$$

$W_x, W_y, W_\theta$  sind die partiellen Ableitungen der unbekanntes Wertfunktion  $W(x, y, \theta)$  des Spieles. Diese beschreibt - vereinfacht - den erzielbaren Passierabstand.

Gleichung <F12> kann durch Integration ihrer charakteristischen Gleichungen gelöst werden, wobei die Integration ausgehend von den sogenannten Terminalbedingungen durchgeführt wird. Diese Terminalbedingungen definieren den Bewegungszustand der Schiffe im Augenblick der engsten Annäherung.

$$\langle F15 \rangle \quad r = r_{EP} \quad \dot{r} = 0. \quad \ddot{r} \leq 0.$$

Sie besagen vereinfacht, dass sich die Schiffe nach engster Annäherung  $r_{EP}$  wieder voneinander entfernen müssen. Für diesen Augenblick der Ausweichbewegung zwischen den Schiffen sind die möglichen Positionen  $x, y$  und die zugehörigen Werte für  $W_x, W_y, W_\theta$  bestimmbar, wenn die Kurswinkeldifferenz  $\theta = \theta_f$  als bekannt angenommen wird.

$$\langle F16 \rangle \quad x = r_f \cos \alpha_f$$

$$y = r_f \sin \alpha_f$$

$$r_f = r_{EP}$$

$$W_x = \cos \alpha_f$$

$$W_y = \sin \alpha_f$$

$$W_\theta = 0.$$

$\alpha_f$  ist der Winkel zwischen der Vorausrichtung des Schiffes 0 und dem Schwerpunkt von Schiff A im Passierabstand  $r_f = r_{EP}$ . Die Kurswinkeldifferenz hat dabei den Wert  $\theta_f$ .

$\alpha_f$  ist für jeden Kurswinkel  $\theta_f$  bestimmbar, wenn die Geschwindigkeiten  $V_{Af}$  und  $V_{Of}$  der Schiffe im Augenblick der Passage bekannt sind (im vorliegenden Modell ist  $V_{Af} = V_A = \text{constant}$  bzw.  $V_{Of} = V_O = \text{constant}$  für den Kursänderungszeitraum). Mit  $V_R$  als

Relativgeschwindigkeit gilt

$$\begin{aligned} \langle F17 \rangle \quad \sin \alpha_f &= \pm (V_{Of} - V_{Af} \cos \theta_f) / V_{Rf} \\ \cos \alpha_f &= \pm (V_{Af} \sin \theta_f) / V_{Rf} \end{aligned}$$

Dabei existieren für jeden Kurswinkel  $\theta_f$  zwei Positionen von A, in der die Terminalbedingungen erfüllt sind.

Für beliebige Zeiten  $T$ , die vor der Passage liegen, können die relativen Positionen und Kurswinkeldifferenzen berechnet werden, wenn die Werte für die Kontrollvariablen  $\phi_O, \phi_A$ , beginnend vom Zeitpunkt der Passage ( $T = 0$ ) an bis zur Zeit  $T$ , lückenlos bekannt sind.

$$\begin{aligned} \langle F18 \rangle \quad \theta &= \theta_f + (\phi_O V_O / R_O - \phi_A V_A / R_A) T \\ x &= r_f \cos(\alpha_f + T \phi_O V_O / R_O) + R_O \sin(T \phi_O V_O / R_O) / \phi_O \\ &\quad + R_A (\sin \theta - \sin(\theta_f + T \phi_O V_O / R_O)) / \phi_A \\ y &= r_f \sin(\alpha_f + T \phi_O V_O / R_O) + R_O (1 - \cos(T \phi_O V_O / R_O)) / \phi_O \\ &\quad - R_A (\cos \theta - \cos(\theta_f + T \phi_O V_O / R_O)) / \phi_A \end{aligned}$$

Die im Sinne der Theorie der Differentialspiele günstigsten Werte für die Kontrollvariablen  $\phi_O, \phi_A$  können mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\langle F19 \rangle \quad \phi_O = \gamma_O \operatorname{sgn}(W_z y - W_y x - W_\theta) V_O / R_O$$

$$\langle F20 \rangle \quad \phi_A = \gamma_A \operatorname{sgn} W_\theta V_A / R_A$$

$W_z, W_y, W_\theta$  sind wieder die Ableitungen der Wertfunktion  $W$  und  $x, y, \theta$  die relativen Koordinaten der Schiffe zur Zeit  $T$ . Die Parameter  $\gamma_A$  und  $\gamma_O$  stehen dabei für die den Schiffsführungen unterstellten Manöverstrategien. Sie haben in diesem Modell die folgenden Werte:

- optimal : 1
- neutral : 0
- pessimal : -1 . (Siehe auch 2.4.1.2.)

Werden die möglichen Kurswinkel an der Terminalen systematisch variiert und die zugehörigen Manöverpfade retrogressiv berechnet, so bilden die Pfade in ihrer Gesamtheit die Oberfläche des "Manöverraums". Ein Beispiel ist in Bild 22 gegeben. Dort sind zwei ineinander gestülpte Flächensysteme erkennbar. Der parallel zur  $\theta$  - Achse und zentral zum Ursprung angeordnete Zylinder hat den Radius der zulässigen Mindestentfernung  $r_f = r_{EP}$  der Schwerpunkte beider Schiffe. Im Ursprung des Koordinatensystems muss sich der Beobachter ferner den Schwerpunkt von Schiff 0 positioniert denken. Befindet sich A mit seinem Schwerpunkt innerhalb des Zylindermantels, so ist die Kollision per Definition schon erfolgt. Die um den Zylinder schraubenartig gewölbte Fläche wird von den Manöverpfaden und den zugehörigen (zwecks plastischerer Darstellung) retrogressiven Manöverzeit-Parameterlinien gebildet. Erfolgreiche Ausweichmanöver sind in dem betrachteten Beispiel genau immer dann noch möglich, wenn sich Schiff A gerade auf einem Punkt dieser Oberfläche befindet. Wird das Ausweichmanöver dann derart durchgeführt, wie bei der Berechnung des zugehörigen Manöverpfades angenommen, so wird sich A entlang des Manöverpfades bewegen und im Fusspunkt des Pfades - dort wo der Pfad die Zylinderfläche berührt und die Terminalbedingungen erfüllt sind - seine engste Annäherung an 0 erfahren. Hat A diese Manöverpfadfläche schon durchdrungen, d.h. befindet er sich im Raum zwischen Zylinder und Manöverpfadfläche, so ist die Kollision zwar noch nicht erfolgt, jedoch auch nicht mehr vermeidbar.

Folgendes sei hier nur angemerkt: diese komplexe Darstellung des Manöverraumes enthält alle Informationen wie erforderliche Ausweichmanöver, Manöverabstände etc. für die betrachtete Spielkombination. In dieser Form der Darstellung sind diese Größen jedoch nicht mit genügender Deutlichkeit erkennbar. Deshalb wird später immer eine vereinfachte zweidimensionale Darstellung benutzt (siehe auch 4.1.1. "Projektionen des Manöverraumes"). Wird z.B. der Manöverraum auf einer  $\theta$  - Ebene geschnitten, so erhält man die Manöverabstandskurve für diese Kurswinkeldifferenz (siehe dazu auch die Bilder 23, 25, 26, 27, 29, 31).

### 3.1.3. Entwicklungsstand und Anwendungsbereich der Manövermodelle

Beim bisherigen Stand der Entwicklung können beide Manövermodelle für beliebige Manöverkombinationen, Schiffe und Begegnungssituationen, in denen mit Rudermanövern ausgewichen wird, zur Bestimmung der nautischen Kenngrößen benutzt werden. Sollen auch Maschinenmanöver simuliert werden, so ist dies bisher nur mit dem Iterativmodell möglich.

Für bestimmte Spielkombinationen sind die Manöverabstände nicht derart bestimmbar, wie es für nautische Zwecke sinnvoll wäre. Dies ist immer dann der Fall, wenn der erforderliche Manöverabstand unendlich gross wird. Als Erklärung sei dafür das folgende Beispiel gegeben. In Bild 7 sind für eine Begegnung die Abstand-Zeit-Verläufe abhängig von dem Manöververhalten von A skizziert worden. Schiff 0 manövriert in dieser Begegnung immer optimal. Schiff A ist jedoch schneller als 0 und seine Drehfähigkeit überschreitet das schon in 2.4.1.2.1 erwähnte kritische Mass. Reagiert A optimal (Kurve 1) oder bleibt zumindest neutral (Kurve 2), so ist der erforderliche Passierabstand für 0 immer einhaltbar. Jedoch muss 0 zu verschiedenen Zeiten  $EMPo$  bzw.  $EMPn$  mit dem Manöver beginnen. Für den Fall, dass A pessimal handelt, steht Kurve 3. Beginnt z.B. 0 zur Zeit  $MPP$  mit seinem optimalen Manöver, so gelingt es ihm zwar die Annäherungsgeschwindigkeit zu vermindern, es kann aber nicht verhindern, dass A den als erforderlich erachteten Passierabstand unterschreitet. Im praktischen Sinne beschreibt dieser Abstand-Zeit-Verlauf das folgende Verhalten der Schiffe: Durch eine Kursänderung versucht 0 dem A auszuweichen. Eine gleichzeitige Kursänderung des A bewirkt, dass 0 zur Entschärfung der Situation solange weiterdreht, bis er in den Kurs des Schiffes A einläuft. Schiff A stoppt ebenfalls in dieser Position seine Drehung. Da A schneller und wendiger ist, wird er jeden Ausbruchversuch des 0 verhindern können. Das günstigste Manöver nach der Theorie der Differentialspiele für 0 ist nun

zu versuchen, die Kollision mit A zu einem möglichst späten Zeitpunkt erfolgen zu lassen - also ihm nach Möglichkeit davonzulaufen, was O jedoch nicht gelingen wird. Im gegenwärtigen Stand der Entwicklung der Manövermodelle ist für diese Art von Begegnungssituationen noch keine befriedigende Lösung gefunden worden, mit der das tatsächliche nautische Verhalten realistisch nachgebildet werden kann, denn unzweifelhaft ereignen sich derartige Situationen im Seeverkehr laufend, ohne dass es unbedingt zur Kollision kommt.

In solchen Begegnungssituationen, in denen sich A beliebig oft pessimal verhält, kann O aus keinem noch so grossen Manöverabstand heraus die Passage in EPR erzwingen. Hier reichen seine Manövereigenschaften zur Kollisionsverhütung nicht aus. Damit wird die Bestimmung der Manöverabstände in diesen Situationen trivial - sie sind unendlich. Eine nautische Kenngrösse mit unendlichem Wert und damit unbestimmter Grösse hat für die praktische navigatorische Entscheidungsfindung keine weitere Aussagekraft und folglich werden Begegnungssituationen dieser Art nicht weiter betrachtet. Bei der Beurteilung der Manövrierfähigkeit haben sie allerdings wieder Bedeutung - ist z.B. die erforderliche Manöverzeit unendlich, so wird die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die verfügbare Manöverzeit die erforderliche Manöverzeit überschreitet, zu eins, d.h., Kollision ist zu erwarten.

### 3.2. Modell zur Beurteilung der Manövrierfähigkeit hinsichtlich der Kollisionsvermeidung

#### 3.2.1. Berechnung der Kollisionsrate

Hinsichtlich der Grundlagen zur Berechnung der Kollisionsrate sei auch auf die Literatur /1,2/ verwiesen. In /17/ ist das Berechnungsverfahren an einem ähnlichen Beispiel - Abschätzung der Kollisionsrate eines in die Jade einlaufenden Tankers - angewandt worden.

Begegnen sich zwei Schiffe, so kann mit den Manövermodellen der erforderliche Manöverabstand bzw. die erforderliche Manöverzeit bestimmt werden. Abhängig von den Manövereigenschaften, dem Kurswinkel und den von den Schiffsführungen verfolgten Manöverstrategien lassen sich dann für eine beliebige Begegnung theoretisch zuordnen:

- eine Manöverzeit  $\tau_c$ , die mindestens erforderlich ist, eine drohende Kollision noch zu vermeiden, wenn Schiff A optimal oder neutral manövriert und
- eventuell noch eine Manöverzeit  $\tau_d$  - kleiner als die mindestens erforderliche  $\tau_c$  - die mindestens benötigt wird, eine eigentlich nicht drohende Kollision noch herbeizuführen, wenn Schiff A pessimal manövriert.

Dieser zweite Punkt sei stichwortartig an Hand von Bild 23 erklärt. In diesem Bild ist die Manöverabstandskurve für den Kurswinkel von 165 Grad zwischen den begegnenden Schiffen abgebildet worden. Schiff O agiert optimal und A pessimal. Der Kollisionskreis um den Ursprung des Koordinatensystems, in dem O positioniert ist, stellt die "Körperkontur" - den Abstand, den die Schwerpunkte der Schiffe (hier im DG-Modell) bei der Passage im erforderlichen Passierabstand EPR zumindest haben müssen, um keine Kollision zu erleiden, - dar. Befindet sich A mit seinem Schwerpunkt schon in dem Gebiet innerhalb der Manöverabstandskurve, so ist die Kollision bei dem der Schiffsführung unterstellten Verhalten nicht mehr zu vermeiden. Die erforderlichen Manöverzeiten ( analog die Manöverabstände) lassen sich aus dem Abstand der Manöverabstandskurve von dem Kollisionskreis bzw. in den Fällen, in denen der Kollisionskreis nicht berührt wird, bis zur Position bei engster Annäherung NPR und der Annäherungsgeschwindigkeit  $V_R$  bestimmen. Für den Fall, das Schiff A aus einer Position mit dem "Ausweichmanöver" beginnt, aus der heraus eigentlich kein Ausweichen notwendig wäre, ergeben sich die besagten Zeiten  $\tau_c$  und  $\tau_d$ .

Der Manöverabstand und die Manöverzeit sind, wie schon vorne geschildert, von der Manövrierbarkeit der Schiffe, der den

Schiffsführungen unterstellten Manöverstrategie und den Parametern der Begegnungssituation wie Kurswinkel, Geschwindigkeit, erforderlicher Passierabstand etc. abhängig. Wenn nun erwartet wird, dass beide Schiffe gleichzeitig ihre jeweiligen Manöver nach einer der beiden in Abschnitt 2.4.1.3. vorgestellten allgemeinen Verteilungsfunktionen stochastisch einleiten, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine beliebige Begegnung ( d.h. bestimmter Kurswinkel, bestimmtes Manöververhalten, bestimmte Geschwindigkeit des begegnenden Schiffes ) trotz bzw. wegen solcher Manöver zu einer Kollision führt, genau

$$\langle F21 \rangle \quad P_{BKM} = \frac{F(\tau_c)}{F(\tau_c) - F(\tau_d)} \quad \text{bzw. gegebenenfalls}$$

Berücksichtigt man jedoch die im Abschnitt 2.4.1.1. begründete Abnahme der Manöverbereitschaft  $P_M$  mit zunehmendem voraussichtlichem Passierabstand  $EPR$ , so ist die tatsächliche Wahrscheinlichkeit, dass aus einer Begegnung eine Kollision wird, nur noch

$$\langle F22 \rangle \quad P_{BK} = P_{BKM} P_M$$

Für die gemachten Berechnungen wurde die Verkehrsdichte des Modellverkehrs pauschal mit  $\rho = 1/\text{sm}^2$  angenommen. Mit dieser Annahme wird die elementare Begegnungsrate des untersuchten Schiffes  $O$  mit den stochastisch in dem  $O$  umgebenden Seegebiet verteilten begegnenden Schiffen  $A$  (konstanter Kurs und konstante Geschwindigkeit) in den Passierabständen zwischen

$$\tau_{NP} \quad \text{und} \quad \tau_{NP} + d\tau_{NP}$$

$$\langle F23 \rangle \quad d\lambda = \rho V_R d\tau_{NP}$$

Die Summation dieser Wahrscheinlichkeiten über alle möglichen Begegnungen für einen bestimmten Kurswinkel liefert dann die

mittlere Kollisionsrate  $\lambda_{C_{ijk}}$  für die Geschwindigkeit  $V_{A_k}$  von Schiff A.

$$\langle F24 \rangle \quad \lambda_{C_{ijk}} = V_R(\theta_i, V_{A_k}) \int_{r_{NP_u}}^{r_{NP_o}} P_{BK}(\theta_i, j, V_{A_k}, r_{NP}) dr_{NP}$$

Wird diese Kollisionsrate für jede Geschwindigkeitskombination  $k$  berechnet und mit ihren relativen Anteilen  $p_{V_{ik}}$  im Verkehr gewichtet, so erhält man eine gewichtete Kollisionsrate

$$\langle F25 \rangle \quad \lambda_{C_{ij}} = \sum_k \lambda_{C_{ijk}} p_{V_{ik}}$$

Liegt dieses Ergebnis für jede Strategiekombination  $j$  vor, so kann unter Berücksichtigung der zugeordneten Wahrscheinlichkeiten eine neue gewichtete Kollisionsrate bestimmt werden

$$\langle F26 \rangle \quad \lambda_{C_i} = \sum_j \lambda_{C_{ij}} p_{S_{ij}}$$

Für die möglichen Kurswinkel kann dieser Wert dann zusammengefasst werden, wenn die relativen Häufigkeiten  $p_{\theta_i}$  bekannt sind, mit der die verschiedenen Kurswinkel vorkommen.

$$\langle F27 \rangle \quad \lambda_C = \sum_i \lambda_{C_i} p_{\theta_i}$$

Dieses Ergebnis beschreibt die mittlere Kollisionsrate für Begegnungen des untersuchten Tankers mit dem Schwesterschiff. Hierbei wurde unterstellt, dass der Modellverkehr so gestaltet ist bzw. die Begegnungen derart verlaufen, dass keine nicht-linearen Staueffekte ( Mehrschiffsbegegnungen ) eintreten.

### 3.2.2. Kollisionsrate - Charakterisierung der Manövrierfähigkeit

Die gemäss der Beschreibung im vorangehenden Abschnitt berechnete Kollisionsrate ist darüber hinaus unmittelbar auch ein Mass für die Manövrierfähigkeit des betrachteten Beispielschiffes.

Sie gibt Auskunft, in welchem Umfang die den Berechnungen zugrunde gelegte Manövrierbarkeit den Anforderungen genügt, mit dem Modellverkehr keine Kollision zu erfahren - d.h., einem begegnenden Schwesterschiff ausweichen zu können.

Als absolute Grösse hat eine so interpretierte Kollisionsrate allerdings nur geringe Aussagekraft. Erkennbar wird die Qualität der betrachteten Manövereigenschaften erst, wenn sie z.B. den berechneten Kollisionsraten von Schiffen mit anderen Manövereigenschaften gegenübergestellt wird. Ebenso ist es möglich, die Qualität der Manövereigenschaften für die Anwendung verschiedener alternativer Manöverkombinationen bzw. Ausweichstrategien einander gegenüber zu stellen. Eine solche Betrachtung ermöglicht direkt eine objektive Bewertung des möglichen Ausweichverhalten, hinsichtlich der Kollisionsvermeidung.

#### 4. Nautische Kenngrößen zur Beschreibung der Ausweichfähigkeit

##### 4.1. Beschreibung und Darstellung des Manörraumes

In den folgenden Abschnitten wird an einem mit dem Differentialspielmodell berechneten Beispiel der Manörraum beschrieben und vorgestellt. Ferner werden an denkbaren Formen der Darstellung des Manörraumes seine Verwendungsmöglichkeiten im Bordbetrieb zur Unterstützung der Entscheidungsfindung demonstriert. Die Manöverpfade in diesem Beispiel wurden für die Bewegung der Schiffsschwerpunkte berechnet und geplottet. Es wurden nur die Bewegungen in der Durchführungsphase (konstante Manövergeschwindigkeit) betrachtet.

Die Spielparameter sind im einzelnen:

Manöverstrategie von Schiff 0 : optimal

Manöverstrategie von Schiff A : neutral

Geschwindigkeit von Schiff A = 15.0 sm/h

Geschwindigkeit von Schiff 0 = 13.0 sm/h vor Manöverbeginn

Drehkreisradius von Schiff A = 550 m

Drehkreisradius von Schiff 0 = 500 m

erforderlicher Passierabstand der Deckkonturen = 185.2 m

Eine Manövergeschwindigkeit von 9.7 sm/h entspricht etwa einer Marschfahrt des betrachteten Schiffes von 13 sm/h.

##### 4.1.1. Projektionen des Manörraumes

###### 4.1.1.1. Räumliche Darstellung des Manörraumes

In Bild 22 sind für das vorne angegebene Beispiel die Manöverpfade in perspektivischer Darstellung geplottet worden.

Die Koordinaten des Manörraumes sind  $x, y, \theta$  (entspricht  $x, y, \theta$  im Abschnitt 3.1.2. "Differentialspielmodell").  $x, y$  ist die relative Position der Schiffe auf der Wasseroberfläche.  $\theta$  ist der Winkel

unter dem sich die Geschwindigkeitsvektoren der beiden Schiffe schneiden. In der Mitte des Kreiszyinders befindet sich Schiff 0. Der Zylinder symbolisiert die Fläche im Manöverraum, die von Schiff A nicht durchdrungen werden darf. Durchdringung dieser Zylinderfläche bedeutet per Definition Kollision. Der Zylinder hat den Radius, der gleich dem Abstand ist, den die Schwerpunkte der beiden Schiffe bei engster Annäherung gerade noch haben dürfen. Von der Zylinderfläche gehen retrogressiv die Manöverpfade, beginnend mit den Bedingungen (Terminalbedingungen) im Augenblick der Passage aus. Die von einer Seite des Zylinders ausgehenden nachbarlichen Pfade bilden in ihrer Gesamtheit eine "Manöverpfadfläche". Befindet sich A innerhalb des von den Manöverpfadflächen umschlossenen Raumes, so hat sich eine Kollision zwar noch nicht ereignet, sie ist für Schiff 0 aber nicht mehr vermeidbar. Erreicht A eine mit den Raumkoordinaten definierte Position auf dieser Fläche, so kann 0 das Schiff A gerade noch im Abstand  $EPR$  passieren lassen. Die Position des A im Verlauf des Manövers kann dann entlang des betreffenden Manöverpfades verfolgt werden.

Form und Grösse des von den Manöverpfadflächen umschlossenen Raumgebietes ist von den Spielparametern abhängig. Ist der Raum abgeschlossen, so ist für Schiff 0 die Kollision vermeidbar. Ist der Raum jedoch offen, so wird die Kollision für Schiff 0 unvermeidbar, wenn A beliebig oft pessimal agieren darf (siehe auch 3.2.1. "Anwendungsbereiche der Manövermodelle")

Die Trennlinien auf dieser Fläche heissen "Universallinie" und "Dispersallinie". (siehe Bild 24 - Projektion einer Hälfte der Manöverpfadfläche in die  $x, \theta$  Ebene) Die Universallinie ist diejenige Linie, von der aus retrogressiv (Rückwärtszeit  $T$ ; Zeitverlauf entgegen der physikalische Zeit) neue Pfade entstehen. An der Dispersallinie enden die Pfade der benachbarten Regionen. Sie ist die Schnittlinie dieser beiden Regionen. Befinden sich Schiff A in relativer Darstellung auf einer Position der Universallinie, so muss 0 mit Mittschiffs-Ruder ausweichen, also geradeaus weiterfahren. An der Dispersallinie hat 0 die Wahl zwischen einem Bb.- oder Stb.-Rudermanöver. Hinsichtlich der Kollisionsvermeidung sind

beide Manöver gleichwertig, unterschiedlich ist jedoch die Grösse der erforderlichen Kursänderung.

Jede Region der Manöverfläche symbolisiert einen Abschnitt, in dem unterschiedliche Manöver erforderlich sind, um die Kollision zu vermeiden.

#### 4.1.1.2. Manöverabstandskurven - Schnitte durch den Manöverraum

Wird der in Bild 22 wiedergegebene Manöverraum in verschiedenen Kurswinkelebenen geschnitten, so bilden die Schnittlinien der Manöverpfadflächen die Manöverabstandskurven (Bild 25). Der Kreis um den Ursprung des Koordinatensystems repräsentiert den erforderlichen Schwerpunktabstand der beiden Schiffe im Augenblick der Passage. Infolge der Symmetrie der Manöverabstandskurven in den Kurswinkelbereichen von 0 bis 180 bzw. 180 bis 360 wird in weiteren Bildern nur immer eine Hälfte dargestellt.

Jede dieser Manöverabstandskurven steht für einen bestimmten Kurswinkel der begegnenden Schiffe. Nähern sich die Schiffe auf nahezu entgegengesetzten oder kreuzenden Kurven, so sind die erforderlichen Manöverabstände, wie es zu erwarten war, am grössten.

Wie sich eine solche Begegnungssituation konkret darstellt, sei an dem folgenden Beispiel demonstriert. In Bild 26 ist beispielhaft die Manöverabstandskurve für mögliche Begegnungen der Schiffe für die Kurswinkeldifferenz von genau 60 Grad dargestellt worden. Die unterstellte Manöverstrategie ist für 0 optimal und für A neutral. Im Ursprung des Koordinatensystems ist Schiff 0 positioniert. Die Deckskonturen der Schiffe sind durch Kreise idealisiert. Der Kreis mit dem Radius EPRS beschreibt den minimal zulässigen Abstand der beiden Schiffsmittelpunkte. Haben die Mittelpunkte der Schiffe gerade diesen Abstand, so ist die Entfernung zwischen den Deckskonturen genau 185.2 m - der als erforderlich angesehene Passierabstand EPR. Befindet sich Schiff A auf der eingezeichneten Relativbahn 1, so entspricht der für diese Bahn erforderliche Manöverabstand der Mittelpunkte der dargestellten Grösse EMRS. Die zugehörige Manöverzeit kann an der mit Annäherungsrichtung be-

zeichneten Zeit-Achse abgelesen werden. Diese Achse liegt parallel zum Vektor der relativen Geschwindigkeit  $V_R$ . Die Menge aller möglichen Begegnungsbahnen liefert die dick eingezeichnete Abgrenzung des Gebietes, in das Schiff A nicht eindringen darf. Geschieht dies doch, so wird für 0 die Kollision unvermeidlich. In Position 2 von Schiff A ist der Abstand EMR für diesen Kurswinkel - oder analog dazu für diese Annäherungsrichtung - der Schiffe eingetragen worden. Dieser Abstand beschreibt den für diesen Kurswinkel maximal erforderlichen Manöverabstand zwischen dem Mittelpunkt von Schiff 0 und der 0 zugewandten Seite der Deckskontur von Schiff A. EMR ist die Entfernung zwischen den beiden Schiffen, wie sie z.B. mit dem Radar gemessen werden kann.

In den späteren Bildern wird immer dieser Abstand EMR als Manöverabstand bezeichnet. Im IT-Modell ist er jedoch nicht wie beim DG-Modell auf den Mittelpunkt von Schiff 0, sondern auf die Position der Radarantenne (Schiffslänge/6 von achtern aus) bezogen worden.

Diese Manöverabstandskurven bezeichnen die x,y - Position der Schiffe gegeneinander, an der 0 mit der Durchführungsphase des Ausweichmanövers beginnen muss, wenn die Kollision vermieden werden soll. Dies ist im DG-Modell der Augenblick am Ende der Einleitungsphase, in dieser Position beginnt die eigentliche Kursänderung. Im Verlauf des Manövers bis zu diesem Moment verminderte sich die Geschwindigkeit von 0 von Marschfahrt auf Manövergeschwindigkeit. Während dieser Zeit fährt das Schiff geradeaus. Der Einfluss dieser Geschwindigkeitsänderung auf konstantem Kurs wird im Bild 27 verdeutlicht. Durch die Berücksichtigung der Einleitungsphase verändert sich die Form der von der Manöverabstandskurve umschlossenen Fläche. Ebenso werden die maximalen Manöverabstände grösser.

#### 4.1.2. Denkbare Projektionen der Manöverpfade für die Manöverentscheidungsfindung im Bordbetrieb

Wird im Bordbetrieb in kritischen Situationen Antwort auf das nautische Problem gesucht, welches Manöver in der momentanen

Begegnung wann erforderlich ist, um die drohende Kollision zu vermeiden, so kann mit den beiden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellten Projektionen der Manöverpfade der Zeitpunkt, die Ruderlage bei Beginn der Durchführungsphase des Ausweichmanövers und der Verlauf der Ausweichbewegung des Schiffes A in relativer Darstellung bestimmt werden. Mit diesen Bildern ist es folglich nicht nur möglich zu entscheiden, wann etwas wie zu tun ist, sondern auch den Erfolg der eingeleiteten Massnahme, wie es z.B. in der SSO gefordert wird, zu überwachen. Das bedeutet in einer konkreten Ausweichsituation, dass die zu erwartende Manöverbewegung des anderen Schiffes berechnet wird - z.B. in Form eines Manöverpfadbildes wie Bild 28 oder 29. Der tatsächliche Bewegungsverlauf wird beim laufenden Ausweichmanöver z.B. mit Radar gemessen. Stimmen dieser gemessene und der berechnete Bewegungsverlauf (Peilungen und Abstände) nicht überein, so verhält sich Schiff A nicht wie erwartet (z.B. infolge einer anderen Manöverstrategie) und es können frühestmöglich entsprechende Gegenmassnahmen eingeleitet werden. Eine Verarbeitung der erforderlichen Daten für diese Zwecke ist jedoch nur mit Hilfe von Rechnerunterstützung möglich.

#### 4.1.2.1. Projektion der Manöverpfade in die $r, \theta$ -Ebene

Bild 28 ist ein Beispiel für die Darstellung der erforderlichen Mittelpunktabstände der Schiffe für beliebige Kurswinkel beim Beginn und während des Manövers. Aus Symmetriegründen wurde nur die eine Hälfte der möglichen Begegnungssituationen und der Manöver dargestellt. Die fehlende Hälfte erhält man durch Spiegelung des Bildes am Punkt: Kursdifferenz=180 Grad, Abstand=0. Bb.- und Stb.-Manöver sind dann ebenfalls gegeneinander zu vertauschen. Die vertikale Achse des Plots bezeichnet die Kursdifferenz der begegnenden Schiffe. Die horizontale Achse gibt die Entfernung der Mittelpunkte an. Geschwindigkeiten, Drehkreisradien und Manöverstrategie der Schiffe sind, wie auf dem Bild angegeben, angenommen. Der erforderliche Passierabstand der Mittelpunkte beider Schiffe ist 485.2 m und wird durch die Linie EPRS symbolisiert. Die Kurvenschar mit der grösseren Strichstärke repräsentiert den Abstandsverlauf der Schiffsmittelpunkte EMRS. Die andere Schar bezeichnet die zugehörige Peilung des Mittelpunktes von Schiff A bezüglich

Schiff O. Diese Kurvenschar ist zudem durch die Winkelangabe indiziert. Der von den beiden Kurvenscharen überdeckte Kurswinkel- und Abstandsbereich bezeichnet das Gebiet, in dem ein Ausweichen erfolgen muss. Dieses "Manövergebiet" ist unterteilt in Teilflächen. Jede dieser Teilflächen beschreibt eine Zone gleicher Ausweichrichtung. Die Grenzlinien dieser Zonen sind die Dispersallinie und die Universallinie. Die Universallinie ist die Linie, auf der das Ausweichmanöver von O die Geradeausfahrt ist. Drehte O vorher z.B. nach Steuerbord, so muss O nach Erreichen der Universallinie geradeaus weiterfahren. Anders ist es, wenn sich A an der Dispersallinie befindet. Hier kann sich O entscheiden, ob mit Stb.- oder Bb.-Ruderlage ausgewichen werden soll.

Befindet sich A ausserhalb der durch die Abstands- und Peilungschar beschriebenen Fläche, so ist kein optimales Manöver von O zur Kollisionsvermeidung erforderlich. Hat A jedoch einen durch Kurswinkel, Abstand und Peilung definierbaren Punkt der Fläche erreicht, so kann O nur noch mit dem optimalen Manöver verhindern, dass A den EPR unterschreitet. Das zugehörige Ausweichmanöver muss in einer ganz bestimmten Richtung erfolgen und gegebenenfalls geändert werden, wenn bestimmte Positionen der Schiffe erreicht worden sind. Nähert sich A aus einem Abstandsbereich ausserhalb des dargestellten Gebietes und erreicht A keinen durch Abstand, Peilung und Kurswinkel definierten Punkt des Manövergebietes, so ist kein Ausweichmanöver erforderlich.

Zur Erklärung ein Beispiel (siehe auch Bild 26): Begegnen sich O und A mit einem Kurswinkel von 60 Grad, so ist der Abstand EMRS in der eingezeichneten Position 2 von A in Bild 26 etwa 1170 m, und die Peilung der Mittelpunkte ist etwa 258 Grad. O muss mit Hart-Stb. das Ausweichmanöver einleiten. Im Laufe des Ausweichmanövers bewegt sich A auf der parallel zum Manöverpfad eingezeichneten Linie. Dabei ändern sich die Peilung und der Abstand der Schiffe. Erreicht A die Universallinie, so muss O sein Ruder auf mittschiffs legen. Zwar wird sich A entlang der Universallinie noch weiter nähern, aber nicht den Abstand EPR unterschreiten.

#### 4.1.2.2. Projektion der Manöverpfade und der Manöverabstandskurven in die x,y -Ebene

In dem Plot (Bild 29) wird wieder das schon vorne vorgestellte Beispiel abgebildet. Dabei sind die Manöverpfade in die x,y - Ebenen projiziert worden. Die Ausweichbewegungen finden für jede beliebige Begegnung, wie auch in der Realität richtig, auf der Wasseroberfläche statt. Dies entspricht einer vorausstabilisierten relativen Darstellung auf dem Radar.

Der erforderliche Passierabstand wird durch den Kreis - EPRS - um den Ursprung symbolisiert. Die mit den Kurswinkeln indizierten Kurven sind die schon in Bild 25 gezeigten Manöverabstandskurven. Mit den kleinen Dreiecksymbolen sind die Manöverpfade für ein Bb.- Ruder Ausweichmanöver gekennzeichnet. Manöverpfade mit Stb.- Ruder sind mit Quadraten versehen.

Zur weiteren Verdeutlichung dieses Bildes diene wiederum das schon im vorangehenden Abschnitt benutzte Beispiel in Verbindung mit Bild 26. Ist die Kurswinkeldifferenz zwischen A und O 60 Grad und erreicht A die eingezeichnete Position (Position 2 in Bild 26), so muss O manövrieren, und zwar mit einem Stb.- Manöver. Die Relativbewegung des Schwerpunktes von A erfolgt dann wie eingezeichnet.

#### 4.2. Gegenüberstellung von Ergebnissen und Berechnungsweisen der beiden Manövermodelle zur Bestimmung der Manöverabstände

##### 4.2.1. Anmerkungen bezüglich unterschiedlicher Berechnungsverfahren

Mit einem - wie in 4.1. vorgestellten - Satz von Spielparametern werden mit dem Differentialspielmodell für eine Begegnungssituation immer unmittelbar der erforderliche Manöverabstand und die zugehörigen Ausweichmanöver bestimmt. Die dem Differentialspielmodell innewohnende Eigenschaft, aus verschiedenen möglichen Manöver-

massnahmen die zur Kollisionsvermeidung günstigste zu wählen, ist ein wesentlicher Vorzug bei der Anwendung dieses Verfahrens. Das Iterativmodell enthält diese geschlossene Lösungsmöglichkeit nicht. Hier muss für eine bestimmte Begegnungssituation ein bestimmtes Ausweichmanöver (z.B. Rudermanöver) gefahren werden. Durch Vergleich der für verschiedene Rudermanöver erzielbaren Manöverabstände lässt sich dann bestimmen, welches Manöver das für diese Begegnung optimale (das den kleinsten erforderlichen Manöverabstand bedingt) oder z.B. pessimale ( das den grössten erforderlichen Manöverabstand bedingt) ist. Dieses Vorgehen ist recht aufwendig. Jedoch erhält man infolge der guten Berücksichtigung der wirklichen Manövrierbarkeit des Schiffes und der Schiffskontur relativ genaue Ergebnisse. Die Idealisierung der Fahrkurve und der Schiffskontur im Differentialspielmodell ermöglicht dagegen diese hohe Genauigkeit nicht - jedoch lässt sich für die optimalen Manöver auch der Zeitverlauf bestimmen.

#### 4.2.2. Gegenüberstellung der Manöverabstände für die günstigsten Ausweichmanöver

In den Bildern 30 und 31 sind die Manöverabstandskurven für das IT-Modell und das DG-Modell geplottet worden. Die Spielparameter wurden wie unter 4.1. angegeben gewählt, d.h., die Bedingungen bei Einleitung des Ausweichmanövers waren für beide Modelle identisch. Die Zahl an der Manöverabstandskurven bezeichnet den dieser Kurve zugehörigen Kurswinkel.

Wie zu erwarten, unterscheiden sich Grösse und Verlauf der Manöverabstandskurven für identische Kurswinkel nach Grösse und Form. Vergleichbar sind z.B. in etwa die Kurven mit dem Kurswinkel von 180, 100, 60 und 0 Grad. Infolge der gestreckten Schiffsform im IT- Modell und der damit verbundenen Unstetigkeiten ist es ferner nicht möglich, Manöverabstände nahe der erforderlichen Passierabstandsgrenze zu ermitteln. Gültig sind diese Manöverabstandskurven im strengen Sinne nur innerhalb des dem Kurswinkel zugehörigen Kollisionsbandes (siehe auch 2.4.1.1.). Dies hat zur Folge, dass in dem Kurswinkelbereich zwischen etwa 25 Grad und 100 Grad die "Einhüllende" in Bild 30 nicht die abgebildeten maximalen Werte

der Manöverabstandskurven berührt, sondern durch das Kollisionsband schon auf kleinere Werte abgeschnitten wird.

Werden die maximalen Manöverabstände eines Kollisionsbandes - diese maximalen Werte werden z.B. durch die "Einhüllende" für alle Manöverabstände in Bild 30 dargestellt - beider Manövermodelle zu Vergleichszwecken wie in Bild 32 geschehen, in gleichem Massstab und bezüglich der Annäherungsrichtung aufgetragen, so lassen sich die Unterschiede (für diese maximalen Manöverabstände) leichter erkennen. Die Ursachen für diese Abweichungen sind:

- Idealisierung der Fahrkurve und der Körperkontur für das Differentialspielmodell
- Selektion der optimalen Manöverabstände aus einer betrachteten beschränkten Rudermanövermenge, einem Drehkreismanöver
- unterschiedliche Messpunktpositionen (Radarantenne) .

#### 4.3. Manöverabstandsbilder

##### 4.3.1. Erläuterung der Manöverabstandskurven

Um die in den folgenden Abschnitten berechneten und vorgestellten Manöverabstandsbilder qualitativ richtig zu interpretieren, muss auf die folgenden erklärenden Hinweise bezüglich notwendiger Vereinfachungen und Vereinheitlichungen aufmerksam gemacht werden.

Die Ordinate in den Bildern bezeichnet den Manöverabstand. Die Abszisse stellt die Richtung der Annäherung in der Kollisions-situation dar. Diese nautische Annäherungsrichtung wird von Voraus ( Richtung des Buges des Schiffes 0) rechtsdrehend gezählt. Das Symbol im Ursprung des Koordinatensystems beschreibt das Gebiet um Schiff 0 ( Schiffskontur von 0 plus erforderlicher Passier-abstand ), in das Schiff A gerade nicht eindringen darf.

Um den Umfang der Berechnungen in einen übersichtlichen Rahmen zu halten, wurden für die Darstellungen einige Vereinfachungen gemacht. So werden im folgenden nur Ergebnisse nach dem IT-Modell abgebildet. Ferner wurde eine Selektion der erforderlichen Manöverabstände nicht für optimale Ausweichmanöver durch den Vergleich der Manöver-

abstandskurven, wie er z.B. in Bild 32 dargestellt wurde, vorgenommen, sondern nur die maximalen Werte der mit der untersuchten Manöverkombination erzielten Manöverabstände für eine Annäherungsrichtung miteinander verglichen. Dieser Vergleich ermöglicht dann den Schluss, ob eine optimale, neutrale oder pessimales Manöverstrategie von den Schiffsführungen verfolgt wurde. Da immer unterstellt wurde, dass das Schiff 0 optimal reagiert, ergeben sich die Manöverabstände für optimales Verhalten von Schiff A:

$$\langle F 28 \rangle \quad R_M \left| \begin{array}{l} A_{optimal} \\ O_{optimal} \end{array} \right| = \min \left( R_M \left| \begin{array}{l} A : Stb. - Drehkreis; Geradeausfahrt; Bb. - Drehkreis \\ O : Stb. - Drehkreis; Bb. - Drehkreis \end{array} \right| \right)$$

Bleibt A neutral, dann ist der zugehörige erforderliche Manöverabstand:

$$\langle F 29 \rangle \quad R_M \left| \begin{array}{l} A_{neutral} \\ O_{optimal} \end{array} \right| = \min \left( R_M \left| \begin{array}{l} A : Geradeausfahrt \\ O : Stb. - Drehkreis; Bb. - Drehkreis \end{array} \right| \right)$$

In dem Fall, dass A pessimal reagiert, ist der erforderliche Abstand:

$$\langle F 30 \rangle \quad R_M \left| \begin{array}{l} A_{pessimal} \\ O_{optimal} \end{array} \right| = \max \left( \begin{array}{l} \min \left( R_M \left| \begin{array}{l} A : Stb. - Drehkreis \\ O : Stb. - Drehkreis; Bb. - Drehkreis \end{array} \right| \right) \\ \min \left( R_M \left| \begin{array}{l} A : Geradeausfahrt \\ O : Stb. - Drehkreis; Bb. - Drehkreis \end{array} \right| \right) \\ \min \left( R_M \left| \begin{array}{l} A : Bb. - Drehkreis \\ O : Stb. - Drehkreis; Bb. - Drehkreis \end{array} \right| \right) \end{array} \right)$$

Diese Vereinfachung ermöglicht es, die so bestimmten Manöverabstände als diejenigen zu verstehen, die für eine bestimmte Annäherungsrichtung mindestens erforderlich sind, mit der unterstellten Manöververhaltenskombination dem anderen Schiff auszuweichen. Unter Annäherungsrichtung (Richtung des Vektors der Relativgeschwindigkeit beider Schiffe) kann dann mehr die nautische Interpretation verstanden werden. Das ist die Richtung, unter der sich Schiff A an Schiff 0 bei Kollisionsgefahr - stehender oder nahezu stehender Peilung - annähert. Im praktischen Sinne bedeutet das für eine Annäherungsrichtung, dass nicht mehr der unmittelbare Verlauf der Manöverabstandskurve, wie er z.B. in Bild 30 dargestellt wurde, erfasst wird,

sondern nur der kleinste der mit Bb.- und Stb.-Manövern von Schiff 0 erforderlichen Maximalabstände (A verhält sich neutral) innerhalb des Kollisionsbandes. In Bild 33 sind diese Manöverabstände für das vorangehende Beispiel über der Annäherungsrichtung aufgetragen und dem optimalen Manöverabstand von Bild 32 gegenübergestellt worden.

Infolge der nahezu symmetrischen Manövereigenschaften für Bb.- und Stb.- Rudermanöver wurden ferner immer nur Annäherungen von Bb.-Seite an Schiff 0 in den Bildern dargestellt. Die Manöverabstände für Begegnungen von Steuerbord können durch Spiegelung an der Vorausrichtung erzeugt werden. Dabei muss dann auch die Richtung der Ruderlage vertauscht werden.

- 4.3.2. Beschreibung der Manövrierfähigkeit durch den erforderlichen Manöverabstand
- 4.3.2.1. Darstellung des Geschwindigkeitseinflusses bei der Begegnung von Schwesterschiffen
- 4.3.2.1.1. Manöverabstände für die Geschwindigkeitsrelation  $V_A/V_O = 1$  und beliebigen Kombinationen von Hart-Ruder Drehkreismanövern von Schiff 0

Die Bilder 34 bis 36 zeigen die erforderlichen Manöverabstände (MR) für Begegnungen des Tankers mit einem gleich schnellen Schwesterschiff. In Bild 34 ist die Geschwindigkeit beider Schiffe 13 Kn, in Bild 35 15 Kn und Bild 36 17 Kn bei Einleitung des Manövers. Schiff 0 weicht mit einem Steuerborddrehkreismanöver aus. Schiff A behält Kurs und Geschwindigkeit bei oder führt zeitgleich mit 0 ein Bb- oder Stb- Drehkreismanöver aus.

Die unmittelbare Zusammenfassung der drei Bilder in Bild 37 zeigt, dass die absolute Geschwindigkeit nahezu ohne Einfluss auf den Manöverabstand ist. Der Manöverabstand ist nahe der Vorausrichtung für die Kollisionssituationen am grössten, in denen Schiff A nicht manövriert. Die Erklärung hierfür ist in dem Umstand zu suchen, dass die Geschwindigkeitsrelation sich während des Ausweichmanövers

zu Ungunsten von Schiff 0 verschiebt -  $V_A/V_O$  wird grösser als 1 - wenn Schiff 0 allein manövriert. Manövrieren beide Schiffe, so ist das günstigste Manöver - also dasjenige, welches die kleinsten Manöverabstände erfordert - abhängig von dem Kurswinkel bzw. der Annäherungsrichtung der Schiffe.

Bild 38 ist die Zusammenfassung der möglichen Manöverkombinationen für den Fall, dass das Schiff 0 einem von Backbord sich nähernden Schiff A mit Bb-Drehkreis ausweichen will. Die grössten MR sind erforderlich, wenn gegenläufige Drehkreise gefahren werden.

Nahe der Vorausrichtung bedingen Begegnungen, in denen A Kurs und Geschwindigkeit beibehält, wiederum die grössten MR, grössere noch als für gegenläufige Manöver.

#### 4.3.2.1.2. Manöverabstände für Begegnungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsrelationen zu Manöverbeginn, wenn Schiff A neutral bleibt

In den Bildern 39 bis 41 sind die Manöverabstände für unterschiedliche Geschwindigkeitskombinationen geplottet worden. In diesen Begegnungen weicht Schiff 0 dem Schiff A mit Stb-Drehkreis aus. Schiff A hält Kurs und Geschwindigkeit bei.

Solange Schiff 0 schneller ist als Schiff A, liegen die möglichen Annäherungsrichtungen bei Begegnungen von Backbord immer im vierten Quadranten. Dies gilt für alle möglichen Kurse von A. Ist A schneller als 0, kann eine Annäherung von A an 0 auch von achteraus erfolgen (Annäherungsrichtung kleiner als 270 Grad). Im Grenzfall der gleichen Geschwindigkeit ist die Annäherung gerade von querab (paralleler Kurs) nicht mehr möglich.

Generell wird mit abnehmendem Verhältnis von  $V_A/V_O$  auch der Manöverabstand geringer. Dies wird besonders deutlich in Bild 42, in dem die MR aller Geschwindigkeitskombinationen einander gegenübergestellt wurden. Wie schon im vorangehenden Abschnitt wird wiederum deutlich, dass für den MR die absolute Geschwindigkeit der Schiffe von geringer Bedeutung ist. So sind für die Geschwindigkeitskombination  $V_A = 15 \text{ Kn}$  und  $V_O = 13 \text{ Kn}$  beispielsweise die MR

nahezu gleich wie bei Begegnungen mit  $V_A = 17$  Kn und  $V_O = 15$  Kn. Für den Fall, dass  $V_O$  grösser als  $V_A$  ist, gilt dies auch.

Bild 43 zeigt die Manöverabstände für die gleichen Geschwindigkeitsrelationen wie Bild 42, nur fährt hier Schiff O einen Bb-Drehkreis. A führt wiederum keinerlei Manöver aus. Wie zu erwarten, stellt sich der Einfluss der Geschwindigkeitsrelationen entsprechend denen von Steuerbordmanövern des Bildes 44 dar. Jedoch haben die Abstandskurven einen anderen Verlauf. So entfallen die übergrossen Abstände nahe der Vorausrichtung. Dafür entstehen grosse MR für Begegnungen, in denen Schiff A von achtern aufläuft.

#### 4.3.2.2. Manöverabstände bei den betrachteten Geschwindigkeiten und Manöverkombinationen, wenn beide Schiffe manövrieren

##### 4.3.2.2.1. Beide Schiffe fahren Stb-Drehkreise

In Bild 44 (sowie in den Bildern 45, 46, 47) wurden die berechneten Manöverabstandskurven für alle Geschwindigkeitskombinationen zusammengefasst. Die Stufung der Manöverabstände bleibt hinsichtlich der unterschiedlichen Geschwindigkeitsrelationen grundsätzlich erhalten. Sie ist bei Begegnungen mit Kurswinkeldifferenzen, die kleiner als 90 Grad sind, deutlicher als in den Bereichen mit nahezu entgegengesetzten Kursen.

Bei Begegnungen mit grossen Geschwindigkeitsrelationen und grossen Kurswinkeln (nahe 180 Grad) ist die Differenzierung zwischen den einzelnen Manöverabstandskurven kaum möglich. Die Ursache dafür ist:

- der Einfluss der Schiffskörperkontur auf den Manöverabstand
- die etwa proportionale Geschwindigkeitsreduktion bei der Einleitung des zeitgleichen Hartrudermanövers.

##### 4.3.2.2.2. Beide Schiffe fahren Bb-Drehkreise

In Bild 45 verlaufen die Abstandskurven ähnlich wie in Bild 44. Die Differenzen der Manöverabstände in Bereichen, in denen die Schiffe in gleiche Halbkreise (Kurswinkeldifferenz < 90 Grad)

fahren, sind ausgeprägter als im vorangehenden Bild. Für das Zusammenfallen der MR auf nahezu einen Wert bei Begegnungen nahe der Vorausrichtung gelten die gleichen Gründe wie im vorangehenden Bild. Die im allgemeinen grösseren Abstände haben ihre Ursache in der Unsymmetrie der Manöverwege bei Steuerbord- und Backbordmanöver und in dem Umstand, dass bezüglich der Messpunktanordnung auf Schiff 0 der Radarabstand grösser werden muss, da bei der vorliegenden Konfiguration 0 mit dem Vorsteven am Heck des A vorbeidreht. In Bild 46 dreht dagegen der Vorsteven von A am Heck des 0 vorbei.

#### 4.3.2.2.3. Schiff A fährt Stb-Drehkreis und Schiff 0 Bb-Drehkreis (Bild 46)

Bei Annäherung des Schiffes A von Bb-Seite an 0 führt diese Manöverkombination zu den grössten MR. Die gegenläufigen Manöver erzwingen diese grossen Abstände immer dann, wenn die Begegnung auf kreuzenden Kursen erfolgt, also bei Annäherungen von querab. Zeigen die Kurse in den gleichen Halbkreis, so wird hier auch wieder der Geschwindigkeitseinfluss erkennbar. Bei entgegengesetzten Kursen führen grosse  $V_A/V_0$  zu kleineren Abständen als kleine  $V_A/V_0$  wie bei den anderen bisher betrachteten Begegnungen.

#### 4.3.2.2.4. Schiff 0 fährt Stb-Drehkreis und Schiff A Bb-Drehkreis (Bild 47)

Bei dieser Manöverkombination sind die Manöverabstandskurven durch die unterschiedlichen Geschwindigkeitsverhältnisse wieder deutlicher gegliedert. Die Differenzierung ist jedoch bei weitem nicht so ausgeprägt wie in den Fällen, in denen A Kurs und Geschwindigkeit beibehält. Bei nahezu entgegengesetzten Kursen verschwinden diese Unterschiede wiederum weitestgehend.

#### 4.3.2.2.5. Manöverabstände bei optimalem, neutralem und pessimalen Verhalten von Schiff A

Hier sei zuerst eindringlich vor dem Gedanken gewarnt, dass infolge der scheinbaren Vereinheitlichung der MR's für die verschiedenen

betrachteten Geschwindigkeiten auf einen "universellen" Manöverabstand bei beliebigen Geschwindigkeiten geschlossen werden kann, der immer eine sichere Passage ermöglicht. Auf keinen Fall darf vergessen werden, dass die Manöver alle gleichzeitig eingeleitet werden und mit Hartruder solange gefahren werden, bis die Passage erfolgt. Im praktischen Seebetrieb sind diese Bedingungen nahezu nie gegeben und in manchen Situationen wie z.B. auf Revierfahrt gar nicht erfüllbar und auch nicht unbedingt sinnvoll. Führt A sein Manöver später aus und gegebenenfalls auch nicht mit Hartruder, so wird sich der Manöverabstand den entsprechenden Werten in den Bildern 41 bis 45 annähern (Begegnungen, in denen A nicht manövriert). Wenn A mehrstufig manövriert, z.B. anfänglich nach Stb. und dann nach Bb. dreht, dann werden sich in bestimmten Situationen die Abstände noch weiter vergrössern.

Schiff O manövrierte bei der Berechnung der in den Bildern 48 bis 50 geplotteten Manöverabständen immer optimal. In Bild 48 handelt A ebenfalls optimal - erwartungsgemäss sind die Manöverabstände geringer als in Bild 49, wo A neutral bleibt oder bei pessimalem Manöver von Schiff A in Bild 50. In Bild 50 sind nur die Geschwindigkeitskombinationen dargestellt, in denen O theoretisch die Chance hat, ein Ausweichmanöver erfolgreich durchzuführen. Der Umstand, dass A während seines eigenen Manövers ebenfalls eine ungewollte Geschwindigkeitsverminderung erfährt, bewirkt, dass die erforderlichen Manöverabstände nicht wesentlich über denen von Bild 49 liegen.

#### 4.3.3. Manöverabstände für Crash-Stop-Manöver

##### 4.3.3.1 Schiff A behält Kurs und Geschwindigkeit bei, Schiff O führt Crash-Stop-Manöver mit und ohne Ruderunterstützung

Wird von Schiff O ein Crash-Stop-Manöver gefahren, um in einer Kollisionssituation dem gleich schnellen Schwesterschiff auszuweichen-

en, so geben die Bilder 51, 52, 53 Aufschluss über die erforderlichen Abstände, bei denen die Umsteuerung der Maschine eingeleitet werden muss. In Bild 51 behält A Kurs und Geschwindigkeit bei. Hier sind die absolut grössten Manöverabstände (Kurve 1) erforderlich, die für Begegnungen der beiden Schiffe berechnet wurden in dem Fall, in dem Schiff 0 lediglich seine Maschine von Voll Voraus auf Voll Zurück umsteuert. Wenn 0 gleichzeitig sein Ruder auf Hart-Steuerbord legt, reduzieren sich die Abstände etwas (Kurve 2, Bild 51). Mit Hart-Bb.-Ruder ergeben sich nahe der Vorausrichtung und bei Annäherung von querab die grössten MR. Bei der Berechnung der MR von Bild 52 weicht Schiff A Schiff 0 mit einem Backbord-Drehkreismanöver aus. Diese Massnahme von A reduziert MR offensichtlich beträchtlich im Vergleich mit Bild 51. Ähnliche Wirkung zeigt das Steuerbord-Drehkreismanöver für Schiff A in Bild 53.

Bemerkenswert ist noch, dass für Schiff 0 bei den simulierten Annäherungen des Schiffes A von Bb. die Hart-Stb.-Ruderlage nahezu für alle Begegnungen die deutlich günstigste Massnahme ist. Für Bild 50 (A behält Kurs und Geschwindigkeit bei) gilt das jedoch nur bedingt.

#### 4.3.3.2 Schiff A und Schiff 0 führen Crash-Stop-Manöver aus

Die Bilder 54, 55, 56 geben Aufschluss, wie gross die Manöverabstände in den Fällen sein müssen, in denen beide Schiffe Voll Zurück geben und mit oder ohne Unterstützung des Ruders arbeiten. Auch in diesen Situationen bewirkt in der Regel ein gleichzeitiges Wegdrehen der Schiffe voneinander den kleinsten MR. Erkennbar bleibt jedoch, dass bis auf Annäherungsrichtungen von Querab (nahezu gleiche Kurse von A und 0) die Manöverabstände grösser sind als in den Fällen, in denen A nicht zeitgleich mit 0 ein Stop-Manöver fährt. Hier nutzt A quasi seinen Geschwindigkeitsvorteil, um von Schiff 0 freizukommen.

#### 4.3.3.3. Crash-Stop-Manöverabstände bei optimalem, neutralem und pessimalem Verhalten von Schiff A

Operieren beide Schiff mit einem optimalen Rudermanöver, und wollen sie ihre Ausweichbewegung durch einen Crash-Stop unterstützen, so zeigt Bild 57 die erforderlichen Manöverabstände für den Fall, dass nur Schiff 0 die Fahrt stoppt, und Bild 58 für Situationen, in denen auch A stoppt. Stoppen beide Schiffe, so vermindert Schiff A ebenfalls seine Ausweichfähigkeit, und die erforderlichen Abstände wachsen.

Verhält sich A neutral und stoppt nicht auf, so sind in der Regel für 0 vielfach grössere MR's erforderlich (Bild 59) als für Fälle, in denen A ebenfalls stoppt (Bild 60).

Stoppt A seine Fahrt auf und reagiert mit dem Ruder pessimale, so ergeben sich die in Bild 61 geplotteten MR-Werte.

Für die Spielkombination A pessimal und Voll Voraus liegt der erforderliche Manöverabstand für 0 im Unendlichen. Denn liegt 0 irgendwo aufgestoppt, so kann jedes noch so langsam fahrenden Schiff eine Kollision herbeiführen. 0 hat sich durch sein Stoppen quasi der Ausweichfähigkeit beraubt.

Stoppt nur Schiff 0 mit mittschiffs liegendem Ruder und A fährt mit konstantem Kurs und gleicher Geschwindigkeit weiter, so muss 0 in den in Bild 62 abgebildeten MR's seine Maschine umsteuern, wenn er die Kollision vermeiden will. Stoppt auch Schiff A (Ruder mittschiffs) so vermindern sich die Abstände drastisch. Sie sind aber immer noch erheblich grösser als solche mit Ruderunterstützung (Bild 63)

#### 4.3.3.4. Gegenüberstellung ausgewählter Manöverkombinationen

Bild 64 ist ein Plot der EMR-Kurven für verschiedene Ruder- und Maschinenmanöverkombinationen der ausweichenden Schiffe. Schiff 0 wählt immer das optimale Rudermanöver und Schiff A lässt sein

Ruder mittschiffs. Die Geschwindigkeit von Schiff 0 ist 15 Kn, Schiff A fährt mit 13, 15 oder 17 Kn. In den Kurven 1,2,3 behalten beide Schiffe die Schubrichtung des Propellers mit konstanter Drehzahl bei. Die MR-Kurven 4,5,6 wurden unter der Voraussetzung berechnet, dass Schiff 0 einen Crash-Stop mit optimaler Ruderlage durchführt. Schiff A behält auch hier Kurs und Geschwindigkeit bei. Die Kurven 7,8,9 sind die Manöverabstände für den Fall, dass neben 0 auch A einen Crash-Stop ausführt, jedoch lässt A sein Ruder mittschiffs. Auch aus dieser Darstellung wird deutlich, dass EMR vom Verhältnis  $V_A/V_0$  abhängig ist. Wesentlicher ist jedoch die Wahl der das Rudermanöver begleitenden Maschinenmanöver. Besonders ungünstig ist in diesen Fällen, wenn A allein versucht, durch Aufstoppen der Fahrt die drohende Kollision zu vermeiden.

Operiert auch Schiff A mit dem Ruder und zwar optimal, so wird dieser Umstand in Bild 65 noch deutlicher. Die erforderlichen EMR erscheinen für Begegnungen, in denen die Schiffe sich auf kreuzenden oder entgegengesetzten Kursen befinden, nur wenig von dem Verhältnis  $V_A/V_0$  abhängig zu sein. Zudem werden bei kleinen  $V_A/V_0$  grössere Abstände benötigt als bei grossen  $V_A/V_0$ . Ferner werden für Manöverkombinationen mit Crash-Stop für beide Schiffe die grössten EMR benötigt.

#### 4.3.4. Der Manöverabstand bei veränderter Manövrierbarkeit ( Rudergrösse variiert)

Bei gleichen Ruderlagen bewirkt eine Veränderung der Rudergrösse unterschiedliche Manövriereigenschaften. In Bild 17 sind die Manöverwege des Tankers für verschiedene Ruderflächen bei sonst gleichen Bedingungen einander gegenübergestellt worden. Wird die Ruderfläche um etwa 20 m<sup>2</sup> verringert, so vergrössert sich der Vorausweg um etwa 100 m gegenüber dem gebauten Ruder. Bei einer Vergrösserung der Ruderfläche um rund 36 m<sup>2</sup> wird der Vorausweg im Drehkreis um etwa 100 m verkürzt.

Die Auswirkung dieser Änderung der Manövrierbarkeit auf den

Manöverabstand wird in Bild 66 für Begegnungen gezeigt, in denen Schiff A nicht manövriert. So vermindert sich der MR etwa um 100 m für den Fall, dass die Ruderfläche vergrössert wurde. Umgekehrt vergrösserte sich der MR ebenfalls um etwa 100 m bei kleinerer Ruderfläche. Dies gilt in weitem Umfang für alle die Begegnungen, in denen die Kurswinkel der Schiffe grösser als 90 Grad sind.

Manövrieren beide Schiffe und handeln beide Schiffsführungen hinsichtlich der Kollisionsvermeidung optimal (Bild 67), so bewirkt die Verbesserung der Manövrierfähigkeit des Schiffes O allein ebenfalls eine Reduzierung der MR. Sie ist jedoch geringer als die Verkürzung des Vorausweges. Bei Verminderung der Ruderfläche wird wie zu erwarten der Manöverabstand vergrössert.

In dem Fall, in dem A neutral bleibt, verdoppeln sich die durch die Vergrösserung bzw. Verkleinerung erzielbaren Effekte (Bild 68). Die Effekte werden für das gezeigte Beispiel nicht wesentlich grösser wenn A pessimal handelt (Bild 69). Es sei nur angemerkt, bei grösseren Geschwindigkeitsverhältnissen können sich die Effekte gegenüber dem neutralen Fall durchaus vervielfachen.

5. Kollisionsrate - Kenngrösse der Ausweichfähigkeit zur Beurteilung der Manövrierfähigkeit

Die für das betrachtete Schiff im angenommenen Einheitsverkehr berechneten Kollisionswahrscheinlichkeiten werden nachfolgend durch das Verhältnis Kollisionsrate zur Verkehrsdichte ausgedrückt und erörtert. Dadurch wird die hier nicht interessierende lineare Abhängigkeit der Kollisionsrate von der Verkehrsdichte ausgeklammert.

Wie unter 2.4.1.3. "Manöverwirksamkeit" beschrieben, kann die Bewertung der Manövereigenschaften über den erforderlichen Manöverabstand oder über die manöverfreie Annäherungszeit erfolgen. Für beide Methoden werden hier Anwendungsbeispiele vorgestellt.

Je nachdem, ob die Kollisionsrate über den erforderlichen Manöverabstand nach <F3> oder über die manöverfreie Annäherungszeit <F2> abgeschätzt wird, ergeben sich unterschiedliche Werte. Diese Unterschiede beruhen im wesentlichen darauf, dass die Konstanten  $T_m, T_s$  der Verteilungsfunktion für die verfügbare Manöverzeit auf Beobachtungen beruhen, die in küstennahen und dichtbefahrenen Gewässern durchgeführt wurden. Die konstanten Faktoren der Verteilungsfunktion nach <F3> dagegen wurden aus Ausweichmanövern auf "hoher See" ermittelt. Für die Gegenüberstellung der betrachteten Modellfälle bedeutet das: Die Kollisionshäufigkeit wächst beim Übergang von "hoher See" auf ein küstennahes Seegebiet infolge des veränderten Manöververhaltens der Schiffsführungen um etwa den Faktor 6 bei gleicher Verkehrsdichte (vergleiche z.B. Ergebnisse in den Bildern 70, 71, 72, 73 und Tabellen in Abschnitt 5.2.2. und 5.3.).

5.1. Gegenüberstellung der Kollisionsrisiken für verschiedene Geschwindigkeiten und Rudermanöverkombinationen

In den Bildern 70 und 71 sind die Kollisionsraten des untersuchten Tankers bei Fahrt im Modellverkehr für verschiedene Kombinationen von Geschwindigkeit und Rudermanöver aufgetragen worden. Die zugehörigen Manöverabstände wurden mit dem Iterativmodell berechnet.

Hier wurden explizit die Raten für die Geschwindigkeiten 13 sm/h, 15 sm/h und 17 sm/h bestimmt. Die Gerade in den Plots, die diese Punkte miteinander verbindet, dient nur der eindeutigen Zuordnung der Punkte zu den entsprechenden Manöverkombinationen. Sie soll keine Anhaltswerte für den Risikoverlauf zwischen den Berechnungspunkten liefern. Wahrscheinlich würden diese jedoch nicht wesentlich vom dargestellten Trend abweichen.

Ahnlich wie bei den Manöverabständen wird auch hier erkennbar, dass für Schiff 0, wenn es mit einer bestimmten Geschwindigkeit fährt, das Kollisionsrisiko mit

- der Geschwindigkeit von Schiff A
- und dem Manöververhalten von A wächst.

Dies gilt sowohl für Kollisionsraten, die über die Bewertung der Manöverzeit als auch für solche, die über den Manöverabstand ermittelt wurden. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit von 0 bewirkt eine Verminderung der Kollisionsgefahr, die je nach Manöverkombination mehr oder weniger stark ausgeprägt ist. Besonders deutlich ist dieser Effekt, wenn Schiff A Kurs und Geschwindigkeit beibehält. Hier macht sich wieder der unfreiwillige - für dieses untersuchte Schiff erhebliche - Fahrtverlust beim Manövrieren bemerkbar. Wenn beide Schiffe ein Drehkreismanöver fahren, erleiden beide diesen Nachteil, und somit ist die Kollisionsgefahr in diesen Begegnungen gegenüber Situationen in denen Schiff A neutral bleibt, erheblich vermindert.

Dreht A infolge seines Manövers mehr oder weniger auf 0 zu - bei Annäherungen von A an 0 von Backbord mit einem Steuerbord-drehkreis - so wird gegenüber dem wegdrehenden Manöver das Risiko bei der Bewertung mittels der Manöverzeit etwa verdoppelt. Erfolgt die Bewertung über den Manöverabstand, so wird dieser Effekt zwar auch angedeutet, aber er erscheint nicht so ausgeprägt wie bei der Zeit. Bei der Zeitbetrachtung wirkt sich der Umstand aus, dass in Begegnungssituationen, in denen A dem 0 mit etwa gleichgerichteten Kursen aufläuft, 0 infolge des

kleinen relativen Geschwindigkeitsüberschusses von A relativ lange braucht, um sich frei zu manövrieren. Eine grosse erforderliche Manöverzeit erhöht auch zwangsläufig die Wahrscheinlichkeit, dass die verfügbare Manöverzeit schon überschritten ist, wenn die Kollisionssituation wahrgenommen wird (siehe dazu auch z.B. Bilder 34 bis 50)

## 5.2. Die Kollisionrate bei veränderter Manövrierbarkeit

### 5.2.1. Abschätzung des Einflusses veränderter Manövrierbarkeit für verschiedene Geschwindigkeiten und Manöverstrategien des begegnenden Schwesterschiffes

Hat Schiff 0 die bei den Berechnungen der Bilder 66 bis 69 zugrunde gelegten Manöviereigenschaften und begegnet 0 einem Schwesterschiff mit unveränderten Manövereigenschaften (Drehkreisradius rund 550 m) aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten, so zeigen die Bilder 72 bzw. 73 die zugehörigen Kollisionsraten einmal für optimales Manöververhalten beider Schiffe und zum anderen für die Kombination 0 optimal und A neutral bei den verschiedenen betrachteten Geschwindigkeiten von Schiff A. Die Verminderung der Kollisionsrate durch die Reduzierung des erforderlichen Manöverabstandes infolge einer Vergrösserung der Ruderfläche ist deutlich effektiver für den Fall, dass A Kurs und Geschwindigkeit beibehält. Bei grösseren Geschwindigkeiten des begegnenden Verkehrs scheint dieser Verminderungseffekt noch zuzunehmen.

### 5.2.2. Abschätzung des Einflusses veränderter Manövrierbarkeit auf die Kollisionsrate im Modellverkehr

Wie aus den Bildern 72 und 73 erkennbar, bedingen veränderte Manövereigenschaften - wie z.B. der hier betrachtete Drehkreisradius - eine Veränderung der Fähigkeit, bei drohender Kollision den Zusammenstoss doch noch zu vermeiden.

Fährt der untersuchte Tanker mit diesen veränderten Manövereigenschaften im Modellverkehr, so lassen sich die folgenden

Kollisionraten bestimmen:

$R_0$ (m)	:	500	550	600
über Manöverzeit	:	0.135	0.15	0.1644
über Manöverabstand:		0.0255	0.027	0.02845

Eine Veränderung der Ruderfläche, die den Drehkreisradius des betrachteten Tankschiffes um etwa 10% reduziert oder vergrößert, würde somit die Kollisionsrate bei der Begegnung mit einem Schwesterschiff um ebenfalls etwa 10% vermindern bzw. erhöhen. Diese Zahl stellt gleichzeitig eine Quantifizierung der den Berechnung zugrunde gelegten Manövereigenschaften des Schiffes hinsichtlich der Kollisionvermeidung dar.

Veränderte Stellzeiten des Steuerorgans oder veränderte hydrodynamische Eigenschaften des Schiffsrumpfes, die gleiche Wirkungen auf den Manöverweg des Schiffes haben, werden auch gleichen Einfluss auf die Kollisionsgefahr haben. Der Einfluss von Wettereffekten kann dagegen nicht so einfach abgeschätzt werden, da er abhängig von der Angriffsrichtung unterschiedliche Wirkung zeigt.

5.3. Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Geschwindigkeiten für Schiff 0 bei Manöverbeginn

für die unterschiedlichen betrachteten Geschwindigkeiten von 13 sm/h, 15 sm/h und 17 sm/h der Schiffe bei Manöverbeginn lassen sich die folgenden Kollisionsraten von Schiff 0 bei Begegnungen mit dem Modellverkehr ermitteln:

$V_0$ (sm/h)	:	13	15	17
über Manöverzeit	:	0.1999	0.15	0.108
über Manöverabstand:		0.0351	0.027	0.01755

Reduziert folglich Schiff 0 die Geschwindigkeit um 2 sm/h, so steigt hiernach das Kollisionsrisiko um etwa 30% bis 40%, je nachdem, ob die Kollisionsrate über die Zeit oder den Abstand bestimmt wurde. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit um 2 sm/h würde dagegen eine Reduzierung des Risikos von etwa der gleichen Grössenordnung bewirken.

#### 5.4. Kollisionsrate/Verkehrsdichte für verschiedene Manöverkombinationen und Geschwindigkeiten

In Bild 74 ist das Verhältnis Kollisionsrate/Verkehrsdichte für eine Reihe von Manöverstrategiepaaren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit vom Schiff 0 dargestellt. In den 6 Kurven sind 6 verschiedene Ausweichmanöverkombinationen untersucht worden.

Kurve 1 stellt Kollisionsraten für die theoretische Begegnungssituation dar, dass beide Schiffe mit kontantem Kurs und kontanter Geschwindigkeit weiterfahren. Für die Kollisionsrate beschreiben sie folglich eine Obergrenze der möglichen Kollisionen im Modellverkehr.

Maschinenmanöver führen gegenüber der neutralen Strategie in Kurve 1 nur dann zu einer merklichen Reduzierung der Kollisionsrate, wenn beide Schiffe ihre Maschinen umsteuern. Rudermanöver mit vorausdrehendem Propeller (Kurve 4) sind jedoch immer die beste Lösung beim Ausweichen. Eine gleichzeitige "Unterstützung" des Rudermanövers durch ein Umsteuern der Maschine führt immer zu einer grösseren Anzahl der zu erwartenden Kollisionen. Dabei ist es kritischer, wenn beide Schiffe die Schubrichtung des Propellers ändern. In dieser Situation berauben sich beide Schiffe quasi ihrer Ausweichfähigkeit. Stoppt nur Schiff 0 (Kurve 5), so ist zu erwarten, dass das Schiff A den Grossteil der Ausweichlast übernimmt. Ursächlich für die Verminderung der Kollisionsgefahr mit zunehmender Geschwindigkeit in den meisten Manöverkombinationen ist die Abweichung des Schiffes von seiner Geradeausbahn während des Manövers. Bleibt die Geschwindigkeit hoch, wie z.B. beim reinen Rudermanöver, ist dieser Effekt gross. Er macht sich aber auch schon durch die Steuerwirkung des Propellers beim reinen Rückwärtsmanöver bemerkbar.

## 6. Schlussfolgerungen - Erkenntnisse - Entwicklungsmöglichkeiten

### 6.1. Schlussfolgerungen

Zur Berechnung der erforderlichen Manöverabstände sind beide verwendeten Modelle ( DG-Modell, IT-Modell) geeignet.

Wird eine mehr nautische Problemlösung gefordert, wie z.B. Wahl des Ausweichmanövers oder Prognose des Abstandsverlaufs während des Manövers, so ist das Differentialspielmodell von Vorteil, da zur Simulation nur relativ wenige Spielparameter erforderlich sind und der Rechenaufwand bedeutend geringer ist. Die Erfassung spezieller Manövereigenschaften mit der nötigen Genauigkeit ist vorerst jedoch nur mit dem Iterativmodell möglich, da bisher nur mit diesem Modell die realen Bedingungen im notwendigen Umfang berücksichtigt werden können.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass mit der Kenngrösse Manöverabstand eine qualifizierende Darstellung der Gefahr einer Kollision gegeben werden kann. Mit der Kollisionsrate als Sicherheitstheoretisches Mass wird es möglich, den Beitrag der Manöverkonzepte und der Manövrierbarkeit zur Ausweichfähigkeit quantitativ zu erfassen und dem betrachteten Schiff individuell zuzuordnen. Es wird deutlich, dass die Wahl des Manöverkonzeptes einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Kollisionsgefahr hat als die untersuchte und vorgestellte Drehkreisänderung infolge Ruderflächenänderung.

### 6.2. Vermindert eine verbesserte Manövrierbarkeit die Kollisionsgefahr eines Schiffes ?

In Diskussionen zu dem Thema, ob eine verbesserte Manövrierfähigkeit auch zu einer Verminderung des Kollisionsrisikos führt, wird gelegentlich folgendes Argument vorgebracht: Eine allgemeine Verbesserung der Manövrierbarkeit aller Schiffe vermindert nicht die Kollisionsgefahr, da eine bessere Manövrierbarkeit nicht nur das Ausweichvermögen steigert, sondern auch die Fähigkeit eine

Kollision herbeizuführen. Folglich ist eine Verbesserung der Manövrierbarkeit für die Kollisionshäufigkeit ohne Bedeutung.

Diese Antwort auf die oben gestellte Frage ist jedoch unvollständig, da sie nur den rein technischen Vorgang betrachtet. Der beteiligte und letztlich handelnde Nautiker wird dabei nicht berücksichtigt.

An drei Stellen des vorliegenden Modells zur Abschätzung der Kollisionsrate für ein Schiff mit bestimmten Manövereigenschaften werden im vorliegenden Modell die Handlungen des Navigators gewichtet:

1. Manöverbereitschaft
2. Manöverstrategie
3. Manöverwirksamkeit

Punkt 1 wird beeinflusst von der Fähigkeit des Nautikers, die vorliegende nautische Plotaufgabe zur Bestimmung des manöverfreien Passierabstandes möglichst exakt zu lösen. Punkt 2 ist abhängig vom Grad der Aufmerksamkeit, die der Nautiker dem umgebenden Verkehr zuwendet. So wird ein geübter Beobachter eher eine Kollisionsgefahr erkennen und mögliche pessimale Manöver des anderen Schiffes abschätzen können und mit grösserer Sicherheit die optimale Manöverstrategie wählen. Dies steht in enger Wechselwirkung mit Punkt 3, der im wesentlichen von der Geschicklichkeit des Nautikers abhängig ist, die Manövereigenschaften seines Schiffes in der momentanen Situation auszunutzen. Eine Verbesserung der Manövrierbarkeit bedeutet auch eine Erweiterung der Möglichkeiten, auf Gefahren angemessen reagieren zu können, und befähigt somit zu präzisen Manövern.

Eine Veränderung der Manövrierbarkeit wird unzweifelhaft auch Auswirkungen auf das Verhalten der Nautiker haben. Das bedeutet, dass die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten eine andere Gewichtung erhalten werden. Unter vereinfachten Annahmen lassen sich diese Verteilungsänderungen abschätzen. Hinsichtlich der Manöverbereitschaft sind wohl kaum Auswirkungen zu erwarten, denn ob jemand einen prognostizierten Passierabstand für ertragbar hält, ist im Wesentlichen von der Genauigkeit des Prognose-Verfahrens und seiner Anwendung abhängig. Bezüglich der Manöverstrategie sind jedoch Auswirkungen zu erwarten. Zwar wird die Aufmerksamkeit vom Grad der Arbeitsbe-

lastung und/oder der psychischen Eigenarten des Navigators beeinflusst, jedoch wird sich der Anteil der Begegnungssituationen vermindern, in denen die Kollisionsgefahr vor der Passage nicht rechtzeitig erkannt wurde. Dies gilt einfach aus dem Umstand heraus, dass bei erweiterter Manövrierbarkeit geringere Abstände genügen, um eine sichere Passage zu erreichen. Daraus folgt, dass der Anteil der "Panikmanöver" vermindert wird. Falls jedoch die Verbesserung der Manövrierbarkeit den Nautiker zu erhöhter Risikobereitschaft und entsprechend weniger Aufmerksamkeit bei der Beobachtung des Verkehrs verführt, gilt diese Betrachtung selbstverständlich nicht mehr, da sich gleichzeitig die Verteilungswahrscheinlichkeit des Manöververhaltens wieder ändern würde. Eine konservative Abschätzung der Änderung wäre folglich: alles bleibt so wie es ist.

Ändern wird sich ferner die Manöverwirksamkeit. Der erforderliche Manöverabstand bzw. die manöverfreie Annäherungszeit würde von den Schiffsführungen bezüglich der Kollisionsvermeidung anders genutzt werden. Denn unzweifelhaft würde eine Verbesserung der Manövereigenschaften eines Schiffe auch von den Nautikern bei der Manöverplanung berücksichtigt werden. Das bedeutet eine Verminderung des Mittelwertes der durch die Gauss'sche Normalverteilung empirisch angenäherten Verteilungsfunktion, z.B. für die verfügbare Manöverzeit. In welcher Richtung sich die Standardabweichung ändert, ist dagegen schwieriger abzuschätzen.

Wird durch konstruktive Massnahmen am Ruder z.B. der Drehkreisdurchmesser reduziert, so ist die damit erzielte Verminderung der Kollisionsrate bzw. Erhöhung der Manövrierfähigkeit durch eine Änderung des Mittelwertes und/oder Änderung der Standardabweichung wieder ausgleichbar. Reduziert sich die Standardabweichung und/oder der Mittelwert, so gibt Bild 75 Aufschluss über den Risikobereich, in dem sich Schiff 0 mit den vorgegebenen Manövereigenschaften bewegt. Erkennbar ist, dass bei gleicher Standardabweichung  $\tau_s$  der Mittelwert  $\tau_m$  etwa um 3% sinken darf um gleiche Raten für die verschiedenen Manövrierbarkeiten zu erhalten. Sinkt mit  $\tau_m$  auch  $\tau_s$ ,

so wird die Kollisionsratenminderung vermutlich erhalten bleiben. Bezogen auf das Verhalten des Nautikers an Bord bedeutet dieser Umstand: Das Manöver erfolgt im allgemeinen später (Mittelwert sinkt), wird aber mit grösserer Pünktlichkeit ausgeführt werden (Standardabweichung sinkt).

### 6.3. "Sichere Geschwindigkeit" - Kenngrösse der Manövrierfähigkeit

Wie im Abschnitt 5 dargelegt, kann Schiff 0 seine Kollisionsraten senken, indem es die Geschwindigkeit vor Beginn des Manövers erhöht. Im praktischen Sinne bedeutet dieses Ergebniss für den Nautiker: fahre immer mit grösstmöglicher Geschwindigkeit - so bleibt die Kollisionsgefahr klein. In besonderen Verkehrssituationen, wie z.B. bei verminderter Sicht, ist in Regel 6 der SSO eine "sichere Geschwindigkeit" vorgeschrieben. Diese "sichere Geschwindigkeit" stellt sinngemäss nach SSO den Versuch des Gesetzgebers dar, die Schiffsführungen zu einem Verhalten anzuregen, das die Manövriermöglichkeiten erweitert, um mit angemessenen Massnahmen auf die potentiellen Gefahren für Fahrten bei z.B. verminderter Sicht reagieren zu können. Die Fahrt in Gebieten mit verminderter Sicht bedeutet für die Schiffsführung gegenüber der Fahrt bei guter Sicht ein Informationsdefizit hinsichtlich der umgebenden Verkehrssituation. Es besteht im Wesentlichen auf Grund

- unzureichender oder verzögerter Kenntnis über das Verhalten der anderen Schiffe,
- und mangelnder Kenntnis vom Vorhandensein anderer Schiffe.

Nun ist es vorstellbar, dass Art und Weise eines unbekanntes oder zumindest unerwartet eintretenden Ereignisses eine Situation bedingt, in der es einmal günstiger ist, nur mit dem Ruder zu manövrieren, ein andermal die einzige Möglichkeit darin besteht, mit einer Fahrtreduzierung bzw. einem Crash-Stop der Gefahr zu begegnen.

Wie vorne gezeigt wurde, bedingt eine hohe Geschwindigkeit zwar

eine relativ geringe Kollisionsrate für Rudermanöver. Sind bei hohen Geschwindigkeiten jedoch Stoppmanöver erforderlich, so vervielfacht sich die Kollisionsgefahr. Ein denkbarer Break-even-point, ist dann durch die Geschwindigkeit vorgegeben, die gleiche Kollisionsraten bedingt:

$$\langle F31 \rangle \quad \lambda_{CR}(V_O) = \lambda_{CC}(V_O)$$

Fährt ein Schiff mit dieser Geschwindigkeit  $V_O$ , so ist der angestrebte Erfolg beim Ausweichen für ein reines Rudermanöver gleichwahrscheinlich mit dem für ein Stoppmanöver (mit Ruderunterstützung).

Ist darüberhinaus die Wahrscheinlichkeit  $P_{MC}$  bekannt, mit der z.B. in Nebelsituationen Crash-Stop-Manöver erwartet werden können, und wird vereinfachend angenommen, dass in allen anderen Situationen nur mittels Rudermanöver ausgewichen wird, so ist es auch denkbar, dass die Geschwindigkeit  $V_O$  gewählt wird, die unter diesem Aspekt der Manöverrierhäufigkeit gleiche Kollisionsraten ergibt:

$$\langle F32 \rangle \quad \lambda_{CR}(V_O)(1 - P_{MC}) = \lambda_{CC}(V_O)P_{MC}$$

Diese Geschwindigkeit kann dann im Sinne der SSO als "Sichere Geschwindigkeit" bezeichnet werden. Weitergehend böte sich eine dermassen definierte Geschwindigkeit auch als Bezugsgrösse an, eine einheitliche Manövrierfähigkeit festzulegen. Ferner erhielten die Schiffsführungen an Bord mit der Quantifizierung des Begriffes "sichere Geschwindigkeit" einen Richtwert für das Verhalten bei Nebelfahrt, was sicherlich auch der Rechtssicherheit förderlich wäre.

7. Literaturhinweise

- /1/ KRAPPINGER, O.; SHARMA, S.D.: Sicherheit in der Schiffstechnik. Jahrbuch der STG 68, 1974, S. 329 - 355.
- /2/ SHARMA; S.D.: On Manövrability and Collision Avoidance. Proc. Second WEMT Conference, London, May 1977, pp. 189-200.
- /3/ Seestrassenordnung von 1972
- /4/ MÜLLER/KRAUS: Handbuch fuer die Schiffsführung. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1976.
- /5/ HARA, K.: Probability of Collision in a Model Collision Avoidance System. Journal of Navigation 27, 1974, pp. 496-509.
- /6/ KWIK, K.H.: Berechnung der Kollisionsrate - ein numerisches Beispiel. Schiff und Hafen/Kommando-Brücke 30, 1978, S. 870-873.
- /7/ SÖDING, H.: Prediction of Ship Maneuvering Capabilities. Schiffstechnik 29, 1982.
- /8/ OLTMANN, P.; SHARMA, S.D.: Simulation of Combined Engine and Rudder Maneuvers Using an Improved Model of Hull-Propeller-Rudder Interactions. Fifteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg, 1984, pp. 83-108.
- /9/ ABKOWITZ, M.A.: Lectures on Ship Hydrodynamics - Steering and Maneuverability. Hydro- and Aerodynamics Laboratory, Lyngby/ Denmark, Report Hy-5.
- /10/ KENAN, G.: Collision Avoidance between Surface Ships at Short Range. SNAME, Northern California Section Paper, Los Angeles, USA, 1972.
- /11/ WEBSTER, W.C.: When is Collision Unavoidable?. Tenth Naval Hydrodynamics Symposium, Boston, Mass., 1974, pp. 277-293.
- /12/ HAMPEL, B.: Bestimmung des Manöverabstandes für den Kurs-haltepflichtigen zur Vermeidung von Nahbereichssituationen. Institut für Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 434, 1983.
- /13/ ISAACS, R.: Differential Games. John Wiley and Sons, New York, 1965.

- /14/ MERZ, A.W.: Optimal Evasive Maneuvers in Maritime Collision Avoidance. Navigation 20, 1973, pp. 144-152.
- /15/ MILOH, T.: Determination of Critical Maneuvers for Collision Avoidance Using the Theory of Differential Games. Institut für Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 319, 1974.
- /16/ MILOH, T.; SHARMA, S.D.: Maritime Collision Avoidance as a Differential Game. Fourth Ship Control Systems Symposium, The Hague, 1975, Vol. 2, pp. 109-128.
- /17/ SHARMA, S.D.; HAMPEL, B.: Abschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit eines in die Jade einlaufenden Tankers. Zwischenbericht zum FE-Vorhaben MTK 210 des Germanischen Lloyd, Hamburg, 1985.
- /18/ KWIK, K.H.: Untersuchung über den Schiffsverkehr in der inneren deutschen Bucht im Bereich der Wegführungsenden. Institut für Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 411, 1981.

## 8. Abkürzungen, Symbole und Sonderzeichen

### 8.1. Abkürzungen

A	Schiff A; anderes Schiff
Bb.	Backbord
CPA	Zeitpunkt engster Annäherung (Closest point of Approach)
EMR	Erforderlicher MR, um die Kollision zu vermeiden
EMRS	Erforderlicher MR, um die Kollision zu vermeiden, bezogen auf die Schiffsschwerpunkte im Differentialspielmodell
EMT	Erforderliche MT, um die Kollision zu vermeiden
EPR	Erforderlicher PR, um die Kollision zu vermeiden
EPRS	Erforderlicher PRS, um die Kollision zu vermeiden
EPRo	Zur Kollisionsvermeidung erforderlicher Passierabstand an Stb.-Seite von Schiff 0
EPRu	Zur Kollisionsvermeidung erforderlicher Passierabstand an Bb.-Seite von Schiff 0
MCPA	CPA, wenn manövriert wird
MP	Zeitpunkt, in dem das Manöver eingeleitet wird
MPR	PR, wenn manövriert wird
MR	Abstand, in dem das Manöver eingeleitet wird
MT	Manöverzeit, Zeitspanne von MP bis NCPA
NCPA	CPA, wenn nicht manövriert wird
NPR	PR, wenn nicht manövriert wird
O	Schiff 0; eigenes Schiff
PR	Passierabstand zwischen den Deckskonturen beider Schiffe
PRS	PR zwischen den Mittelpunkten beider Schiffe
R	Abstand, Entfernung (Range)
SSO	Seestrassenordnung
Stb.	Steuerbord
VMR	Verfügbarer MR, um die Kollision zu vermeiden
VMT	Verfügbare MT, um die Kollision zu vermeiden
x,y	Koordinaten im schiffsfesten System (entspricht sinngemäss $x,y$ in den Bildern und $\bar{x},\bar{y}$ im Abschnitt 3.1.1. "Differentialspielmodell")

## 8.2. Symbole

<b><i>B</i></b>	Schiffsbreite
<b><i>c</i></b>	Durchmesser zur Beschreibung der Schiffskontur
<b><i>d</i></b>	Differential
<b><i>F</i></b>	Verteilungsfunktionswert für die Zeit $\tau$ oder den Abstand $r$
<b><i>H</i></b>	Hull - Schiffskörper
<b><i>I<sub>z</sub></i></b>	Trägheitsmoment bezüglich z-Achse
<b><i>i</i></b>	Zählindex für die betrachteten Kurswinkeldifferenzen
<b><i>j</i></b>	Zählindex für die betrachteten Strategiekombinationen
<b><i>k</i></b>	Zählindex für die betrachteten Geschwindigkeiten
<b><i>L</i></b>	Schiffslänge
<b><i>l</i></b>	Abstand der die Schiffskontur beschreibenden Kreismittelpunkte
<b><i>M</i></b>	Operator
<b><i>m</i></b>	Schiffsmasse
<b><i>N</i></b>	Moment um z-Achse
<b><i>P</i></b>	Propeller (als Index)
<b><i>P<sub>BKM</sub></i></b>	Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Begegnung zur Kollision führt
<b><i>P<sub>BK</sub></i></b>	Wahrscheinlichkeit dafür, trotz bzw. wegen des Manövers eine Kollision erfolgt
<b><i>P<sub>M</sub></i></b>	Wahrscheinlichkeit dafür, dass infolge des prognostizierten NCPA ein Manöver ausgeführt wird
<b><i>P<sub>M<sub>c</sub></sub></i></b>	Wahrscheinlichkeit, dass bei verminderter Sicht ein Crash-Stop-Manöver gefahren wird
<b><i>P<sub>S</sub></i></b>	Manöverstrategiewahrscheinlichkeit
<b><i>P<sub>v,i</sub></i></b>	relative Häufigkeit mit der auf dem Kurs <i>i</i> die Geschwindigkeit <i>k</i> zu erwarten ist
<b><i>R</i></b>	Ruder (als Index)
<b><i>R<sub>M</sub></i></b>	Maximalwert der Manöverabstandskurve für eine Kurswinkeldifferenz
<b><i>R<sub>A</sub>, R<sub>O</sub></i></b>	Drehkreisradius für Schiff A, 0
<b><i>r</i></b>	Abstand zwischen den Schiffen
<b><i>r<sub>f</sub></i></b>	Abstand im Augenblick der Passage
<b><i>r<sub>BP</sub></i></b>	Erforderlicher Passierabstand ( bei engster Annäherung)

$S$	Seaway (als Index)
$T$	Retrogressive Manöverfahrzeit
$u$	Geschwindigkeit des Schiffes in Längsrichtung
$v$	Geschwindigkeit des Schiffes in Querrichtung
$V_0, V_A$	Geschwindigkeit von Schiff 0, A
$V_R$	Relativgeschwindigkeit der Schiffe: <F33> $V_R = \sqrt{V_A^2 + V_0^2 - 2V_A V_0 \cos\theta}$
$V_{Rf}$	Relativgeschwindigkeit der Schiffe im Augenblick der Passage: <F34> $V_{Rf} = \sqrt{V_{Af}^2 + V_{0f}^2 - 2V_{Af} V_{0f} \cos\theta_f}$
$W_x$	partielle Ableitung der Wertfunktion zur Beschreibung des erreichbaren Passierabstandes nach x
$X$	Kraft in x-Richtung
$x, y$	Koordinaten im schiffsfesten System (entspricht sinngemäss $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ in den Bildern und $x, y$ im Text)
$x_0, y_0$	Koordinaten im erdfesten System
$x_G$	Lage des Gewichtsschwerpunkts des Schiffes
$\underline{x}$	Vektor der relativen Koordinaten für DG-Modell
$Y$	Kraft in y-Richtung
$\alpha_f$	Peilung von 0 an A im Augenblick der Passage
$\gamma_A, \gamma_0$	Strategieparameter für A, 0
$\theta$	Kurs von A relativ zum Kurs von 0
$\theta_f$	Relativer Kurswinkel der Schiffe im Augenblick der Passage
$\lambda_C$	Kollisionsrate
$\lambda_{C_c}$	Kollisionsrate, wenn mit Crash-Stop-Manöver ausgewichen wird
$\lambda_{C_i}$	Kollisionsrate für die Kurswinkeldifferenz i
$\lambda_{C_{i,j}}$	Kollisionsrate für die Kurswinkeldifferenz i und der Manöverstrategiekombination j
$\lambda_{C_{i,k}}$	Kollisionsrate für Begegnungen des Schiffes 0 mit dem Schiff A für eine bestimmte Geschwindigkeitskombination k, der Manöverstrategiekombination j und der Kurswinkeldifferenz i
$\rho$	Verkehrsdichte
$\phi_A, \phi_0$	Kontrollparameter für Schiff A, 0

$\psi_A, \psi_O$	Kurswinkel von Schiff A, 0 in erdfesten Koordinaten
$\dot{\psi}_A, \dot{\psi}_O$	Kursänderungsgeschwindigkeit in erdfesten Koordinaten für Schiff A, 0
$\tau_c$	Zur Kollisionvermeidung durch optimales Manöver erforderliche Mindestzeit; sie wird von MR bis zur voraussichtlichen Passage in NPR bzw. des zugewandten Körperkonturpunktes gemessen
$\tau_d$	Erforderliche Manöverzeit, um durch ein pessimales Manöver die Kollision noch erzwingen zu können; sie wird vom Austritt aus dem von der Manöverabstandskurve umschlossenen Gebiet bis zur NPR gezählt.
$\tau_m$	Mittelwert der normalverteilten, verfügbaren Manöverzeit
$\tau_s$	Standardabweichung der normalverteilten, verfügbaren
$\tau$	Manöverzeit
$\Phi$	Normalverteilung

### 8.3. Sonderzeichen

- Ableitung der mit Punkten überschriebenen Grössen nach der Zeit
- / / Literaturstellenhinweis
- < > Formelnumerierung

9. Anhang : Beschreibung des untersuchten Tankers  
( Spantenriss und Stevenkontur siehe Bild 2 )

Die in diesem Anhang verwendeten Symbole und Abkürzungen sind nicht im Abschnitt 8 - Abkürzungen, Symbole und Sonderzeichen aufgeführt. Hinsichtlich ihrer Beschreibung wird auf die entsprechenden Literaturquellen verwiesen.

Anhang 9.1. : Eingabedaten für das Bewegungsmodell von Söding

\*\*\* SCHIFFSDATEN \*\*\*

MASSSTABFAKTOR	[1]:	1.000
WASSERDICHT	[T/M3]:	1.025
SCHIFFSLAENGE	[M]:	296.446
SCHIFFSBREITE	[M]:	47.500
SCHIFFSTIEFGANG	[M]:	16.080
HAUPTSPANTVOELLIGKEIT	[1]:	0.995
VERDRAENGUNG	[M3]:	178300.000
VERDRAENGUNGSSCHWERPKT. VOR L/2	[M]:	7.243
LAENGENTRAEGHEITSMOMENT	[M4]:	785200000.0
X-KOORDINATE DER ABREISSKANTE	[M]:	-140.000
TIEFGANG AN ABREISSKANTE	[M]:	16.400
SCHIFFSWIDERSTANDSFAKTOR	[1]:	0.965

DATEN DES SCHIFFSRUMPFES

X-KOORDINATE	TIEFGANG	WL-BREITE	SPANTFLAECHE	BEIWERT	CO
ACHTERSTER INTEGRATIONSPUNKT BEI [M]:					-140.000
-140.000	16.400	12.000	63.000	0.900	
-127.500	16.350	23.800	184.000	0.910	
-116.000	16.180	31.200	322.000	0.920	
-101.500	16.160	44.350	487.000	0.930	
-87.000	16.150	47.000	610.000	0.940	
-72.500	16.140	47.000	700.000	0.950	
-58.000	16.130	47.000	742.000	0.970	
-43.500	16.090	47.000	760.000	0.990	
-14.500	16.080	47.000	760.000	0.980	
14.500	16.070	47.000	760.000	1.010	
43.500	16.050	47.000	760.000	1.040	
72.500	16.020	47.000	760.000	1.050	
87.000	16.010	47.000	745.000	1.060	
101.500	16.000	45.900	693.000	1.070	
116.000	15.990	37.200	555.000	1.080	
130.500	15.970	21.800	322.000	1.090	
145.000	15.960	2.500	60.000	1.100	

ERMITTELTE PARAMETER

RM = 182757.5  
RMX = 18090.1  
RIZ = 785200000.0  
RMUEH = 433.1  
RMY = 158732.1  
XY = 10.0  
RJZ = 937640576.0

PROPELLER- UND RUDERDATEN

MITTLERE PROBEFAHRTSGESCHW. [M/S]:	7.717
SOGZIFFER [1]:	0.191
NACHSTROMZIFFER [1]:	0.370
X-KOORDINATE DES PROPELLERS [M]:	-140.400
PROPELLERWELLE UNTER KOKER [M]:	7.000
PROPELLERDURCHMESSER [M]:	7.910
PROPELLERSTEIGUNG [M]:	5.893
PROPELLERDREHZAHL [1/S]:	1.450
PROPELLERFLAECHEVERHAELTNIS [1]:	0.600
PROPELLERFLUEGELZAHL [1]:	5.000
SCHRAUBENBRUNNENLAENGE [M]:	5.000
X-KOORDINATE DES RUDERDRUCKPKT. [M]:	-146.200
CQ-WERT DES RUDERS [M]:	1.500
RUDERFLAECHE [M2]:	73.500
ABSTAND OK.-RUDER - RUMPF [M]:	1.000
ABSTAND UK.-RUDER - RUMPF [M]:	12.200
RUDERWINKELFAKTOR [1]:	1.250
GRENZANSTELLWINKEL [GRAD]:	35.000
NACHSTROMNEIGUNG [RAD]:	0.000
NACHSTROMVERTEILUNG VERTIKAL [1]:	0.000
NENNDREHZAHL AM PROPELLER [1/S]:	2.000
DREHZAHL BEI MANOEVERBEGINN [1/S]:	1.450
MAX. MASCHINENMOMENT AM PROP. [KNM]:	6000.000
MOEGLICHE DREHZAHLAENDERUNG [1/S2]:	0.02500

WIND UND WINDBEIWERTE

LATERALPLANFLAECHE	[M2]:	4800.000
LUFTHAUPSPANTFLAECHE	[M2]:	1200.000
LUFTDICHTHE	[T/M3]:	0.00130
LATERALSCHWERPKT BEI 90 GRAD	[M]:	-70.000
LATERALSCHWERPKT BEI 5 GRAD	[M]:	-110.000
STUETZSTELLENANZAHL AUF HALBKREIS [1]:		13
ABSOLUTE WINDRICHTUNG	[GRAD]:	180.000
WINDGESCHWINDIGKEIT	[M/S]:	20.000

STUETZSTELLEN UND KRAFTKOMPONENTEN FUER DEN WINDEINFLUSS

BEGEGNUNGS- WINKEL [GRAD]	X- KOMPONENTE [KNM2/S2]	Y- KOMPONENTE [KNM2/S2]
0.000	1.030	0.000
15.000	0.845	0.582
30.000	0.854	1.142
45.000	0.750	1.765
60.000	0.428	2.239
75.000	0.162	2.412
90.000	0.062	2.402
105.000	-0.071	2.436
120.000	-0.317	2.483
135.000	-0.640	2.096
150.000	-0.725	1.427
165.000	-0.840	0.483
180.000	-0.842	0.000

Anhang 9.2. : Eingabedaten für das Bewegungsmodell von  
Oltmann und Sharma

SCHIFFSHAUPTABMESSUNGEN:

LAENGE ZWISCHEN DEN LOTEN	LPP =	290.000 M
LAENGE IN DER WASSERLINIE	LWL =	296.446 M
BREITE AUF SPANTEN	B =	47.500 M
TIEFGANG, VORN	TF =	16.196 M
TIEFGANG, HINTEN	TA =	15.964 M
VERDRAENGUNG	DISV =	178309. M3
BLOCKKOEFFIZIENT	CB =	0.805
LAGE DES GEWICHTSSCHWERPUNKTES	XG =	7.243 M
TRAEGHEITSRADIUS	RDGZ =	66.360 M

PROPELLERABMESSUNGEN:

ANZAHL DER PROPELLER	=	1.
DURCHMESSER	DP =	7.910 M
STEIGUNGSVERHAELTNIS	PP/DP =	0.745
FLAECHEVERHAELTNIS	AE/AO =	0.600
FLUEGELZAHL	NPB =	5.

MASCHINENANLAGE (AUTOMATIK, N= KONSTANT):

NENNLEISTUNG	PDN =	20608. KW
NENNDREHZAHL	REVN =	95.0 1/MIN
TRAEGHEITSMOMENT	TETAM =	766. T*M2
ZEITVERZOEGERUNG MASCHINENANLAGE	=	0.00 S

RUDERANLAGE:

ANZAHL DER RUDER	NRUD =	1.
RUDERFLAECHE	AR =	73.50 M2
MITTL. RUDERLAENGE	C =	7.15 M
SEITENVERHAELTNIS	=	1.44
RUDERLEGE GESCHWINDIGKEIT	=	2.32 DEG/S
ZEITVERZOEGERUNG RUDERSYSTEM	=	0.00 S

AUSGANGSGESCHWINDIGKEIT	VO =	15.00 KN
AUSGANGSDREHZAHL	REVO =	85.70 1/MIN
BEZOGENE DAMPFMENGE BZW. FUELLUNG	=	1.000

ZEITINTERVALL	DT =	0.2 S
---------------	------	-------

Hydrodynamic Characteristics

Ideal Fluid Effects:

$$\begin{aligned} X_{\dot{u}}'' &= -0.0737 & X_{v_r}'' &= 0.6482 \\ X_{r_r}'' &= 0.0423 & X_{v_v}'' &= -0.0261 \\ Y_{\dot{v}}'' &= -0.7810 & Y_{\dot{r}}'' &= -0.0488 \\ N_{\dot{r}}'' &= -0.0394 & N_{\dot{v}}'' &= -0.0357 \end{aligned}$$

Hull Cross-Flow Effects:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.207 & a_7 &= 5.310 \\ a_8 &= 3.218 & a_9 &= -6.732 \end{aligned}$$

Hull Resistance:

	(Model)	(Ship)
$R_{Tu}''$	= 0.00162	0.00109
$R_{Tu u}''$	= 0.04034	0.02364
$R_{Tuuu}''$	= 0.07659	0.03594

Hull Lifting Effects:

$$\begin{aligned} c &= 0.240 & c' &= 0.500 \\ d &= 1.000 & d' &= 1.000 \\ e &= 0.064 & e' &= 0.100 \\ k &= 0.400 \end{aligned}$$

Interaction Factors:

$$\begin{aligned} w &= 0.530 \text{ (Model)} \\ w &= 0.370 \text{ (Ship)} \\ t &= 0.191 \\ Y_{PT+}'' &= -0.030 & N_{PT+}'' &= 0.015 \\ Y_{PT-}'' &= 0.410 & N_{PT-}'' &= -0.105 \\ k_{HR} &= 1.000 & k_{PR} &= 0.870 \end{aligned}$$

Propeller Coefficients:

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \epsilon \leq 21^\circ: & \quad C_T^* = -0.833 + 1.020 \cos \epsilon - 0.332 \sin \epsilon \\ & \quad 10C_Q^* = -1.171 + 1.378 \cos \epsilon - 0.235 \sin \epsilon \\ 21^\circ \leq \epsilon \leq 180^\circ: & \quad C_T^* = 0.099 \cos \epsilon |\cos \epsilon| - 0.671 \sin \epsilon |\sin \epsilon| \\ & \quad 10C_Q^* = 0.158 \cos \epsilon |\cos \epsilon| - 0.824 \sin \epsilon |\sin \epsilon| \end{aligned}$$

Rudder Coefficients:

$\delta_e = 0 \text{ deg}$	$C_{LR}^0 = 0.0000$	$C_{DR}^0 = 0.0000$	$k_{LR} = 5.30$ $k_{DR} = 2.50$ $k_{NR} = 0.12$ $x_R'' = -0.50$
$= 15 \text{ deg}$	$= 0.2401$	$= 0.0428$	
$= 30 \text{ deg}$	$= 0.4539$	$= 0.1875$	
$= 45 \text{ deg}$	$= 0.5789$	$= 0.4250$	
$= 50 \text{ deg}$	$= 0.2960$	$= 0.3057$	
$= 90 \text{ deg}$	$= 0.0329$	$= 0.5096$	

Machinery Characteristics

Steering Gear:

$$\begin{aligned} |\delta| &\leq 35.0 \text{ deg} & \tau_L &= 0.00 \text{ s} \\ |\dot{\delta}| &\leq 2.32 \text{ deg/s} \end{aligned}$$

Turbine Torque:

$$\begin{aligned} a &= 0.075 & A_f &= 2.500 & A_b &= 1.000 \\ b &= 0.250 & B_f &= 1.000 & B_b &= 0.600 \end{aligned}$$

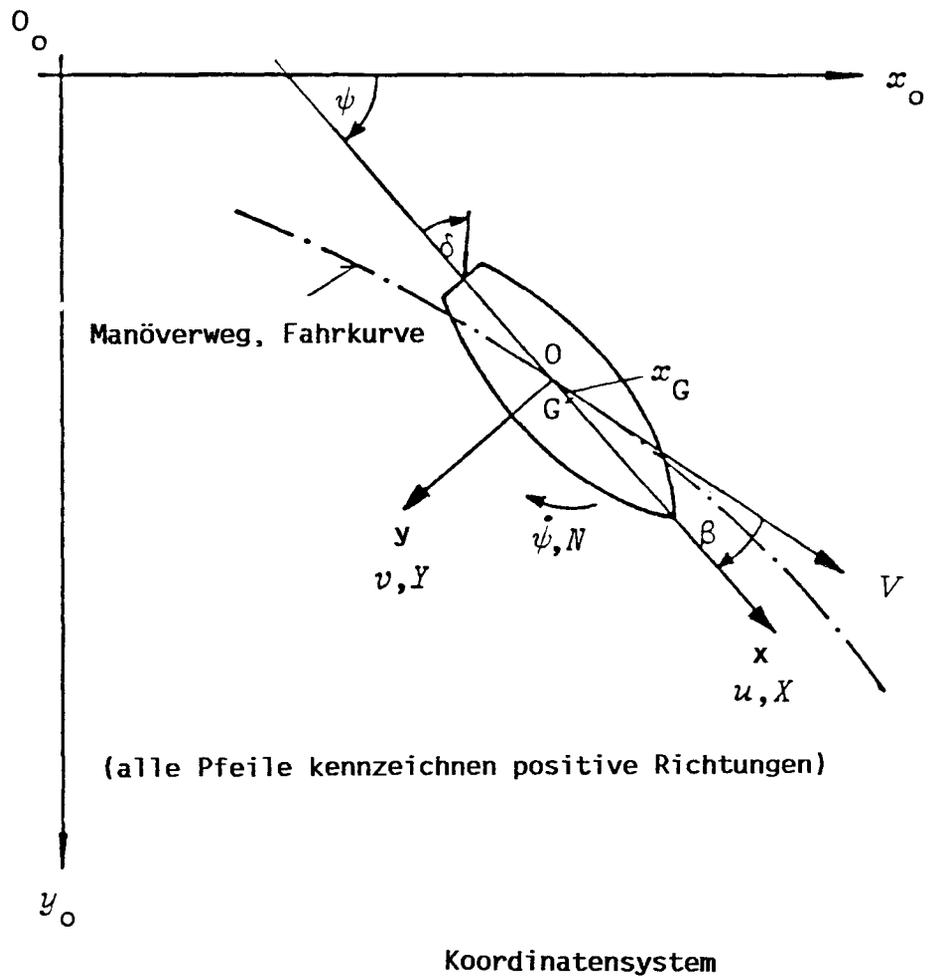
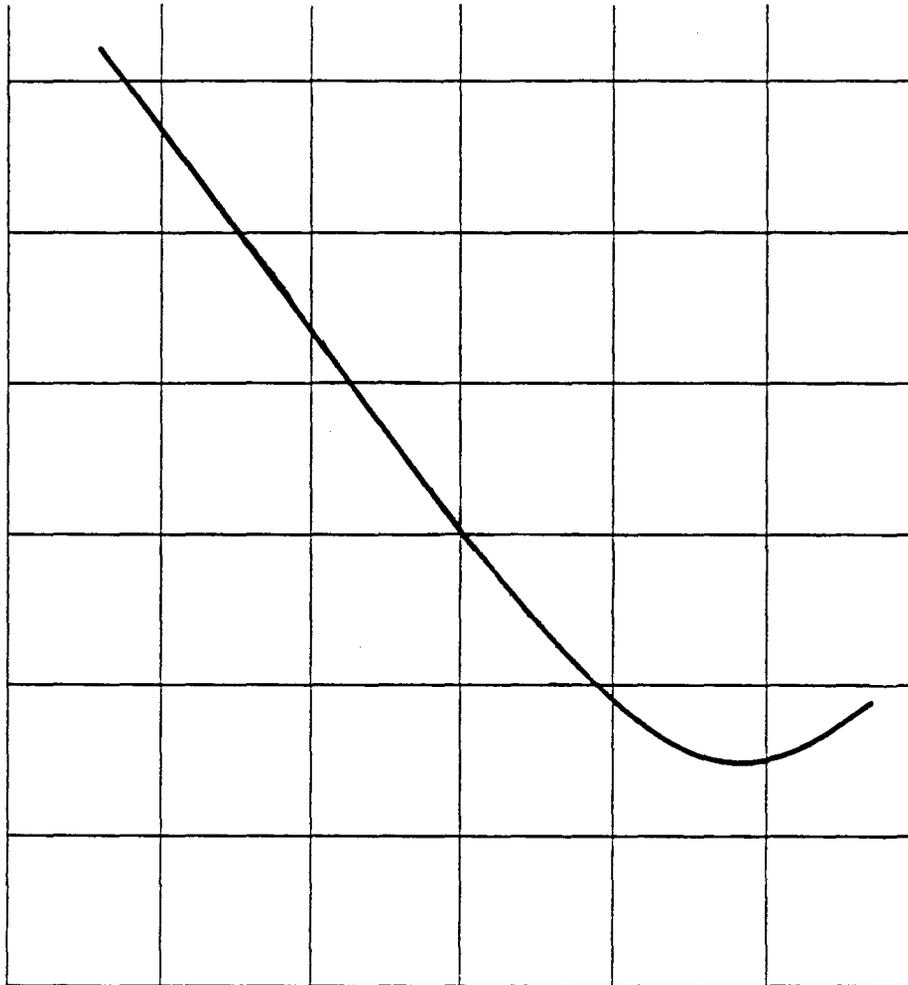


Bild 0



Abstand



Zeit

Abstand - Zeit - Verlauf während einer Begegnung

Bild 2

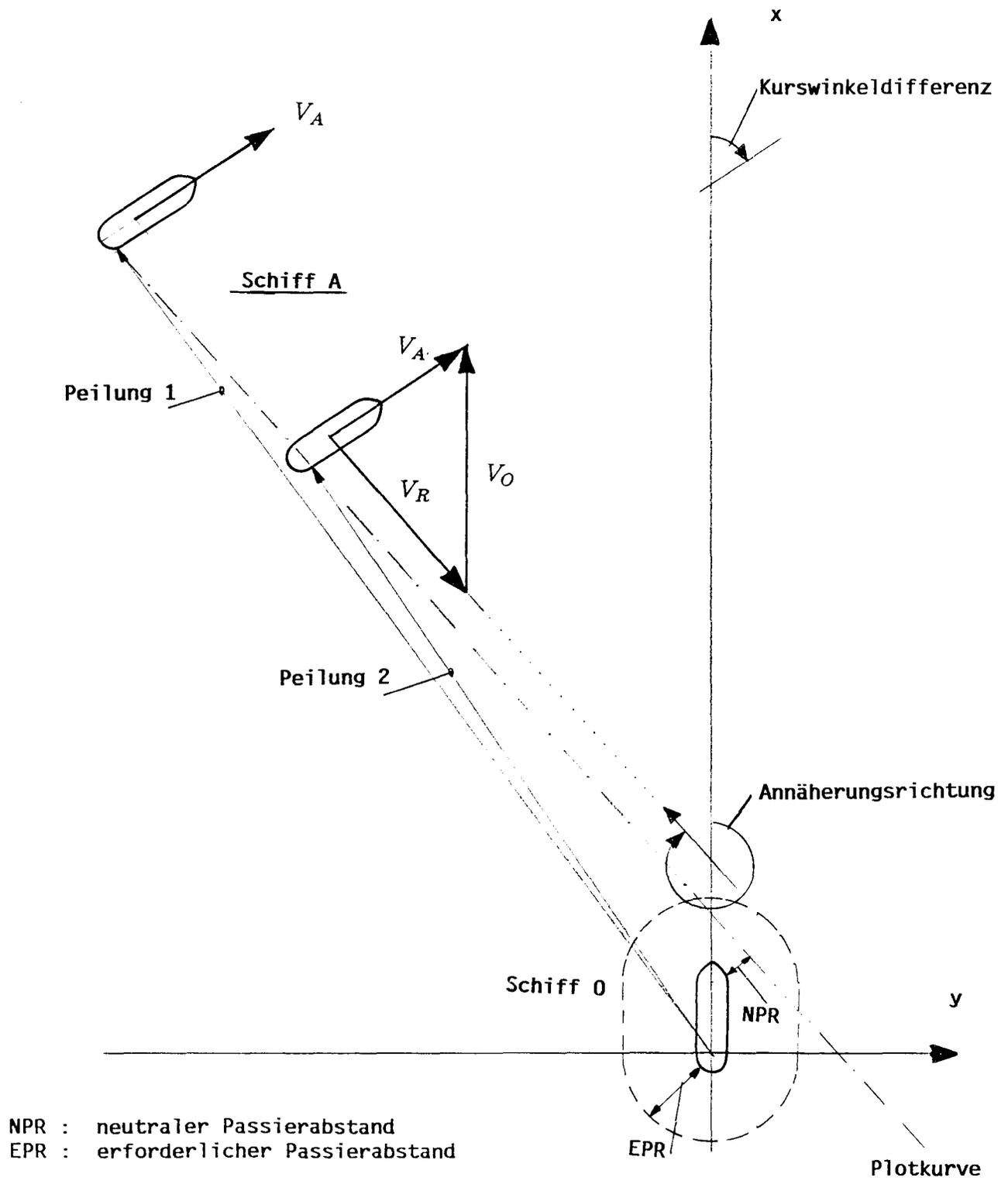
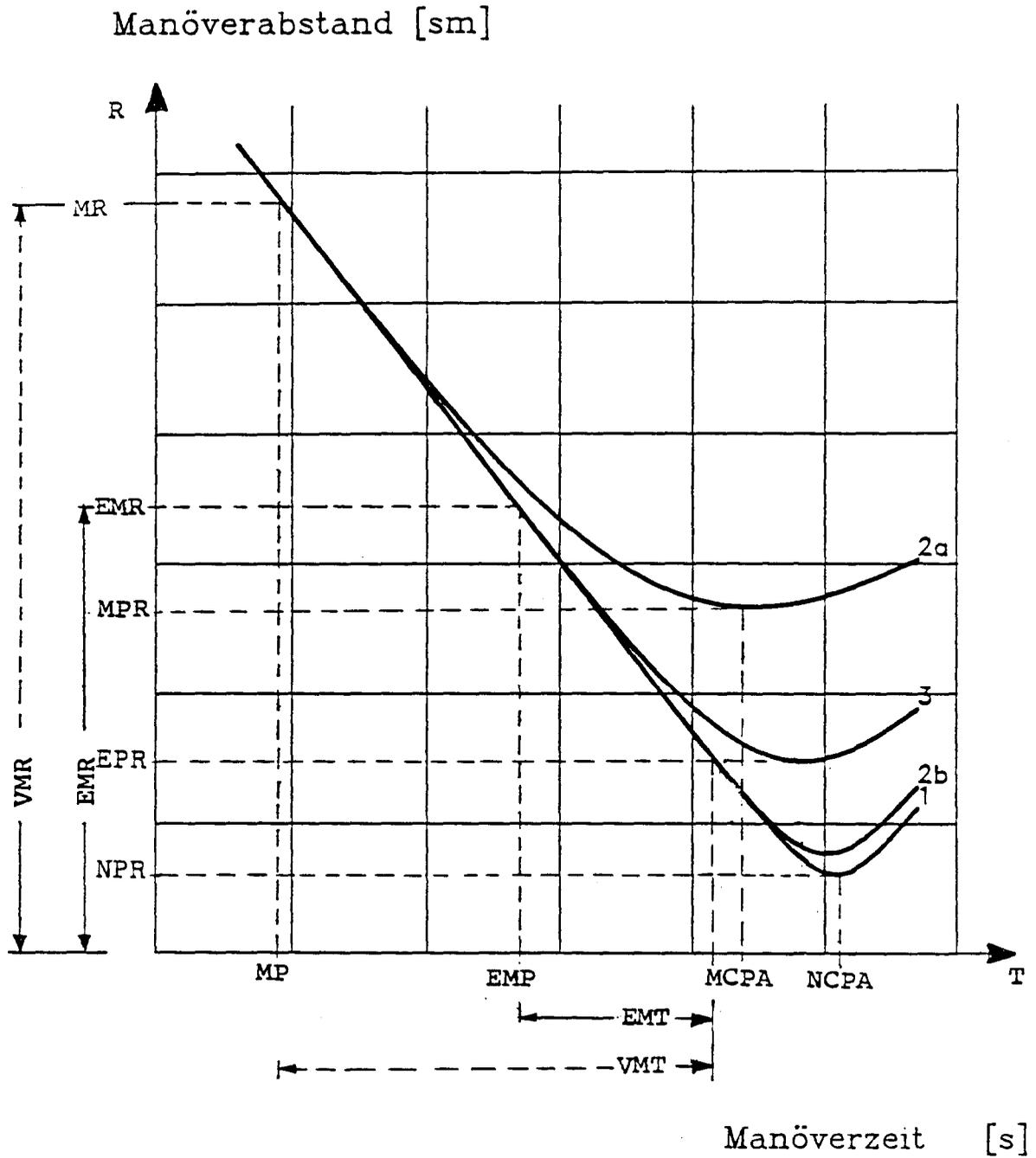


Bild 3

Prognose des neutralen Passierabstandes NPR aus zwei Peilungen



ohne Ausweichmanöver : Kurve 1  
mit Ausweichmanöver : Kurve 2a, 2b, 3

Entfernungsverlauf  
während einer Begegnung

Bild 4

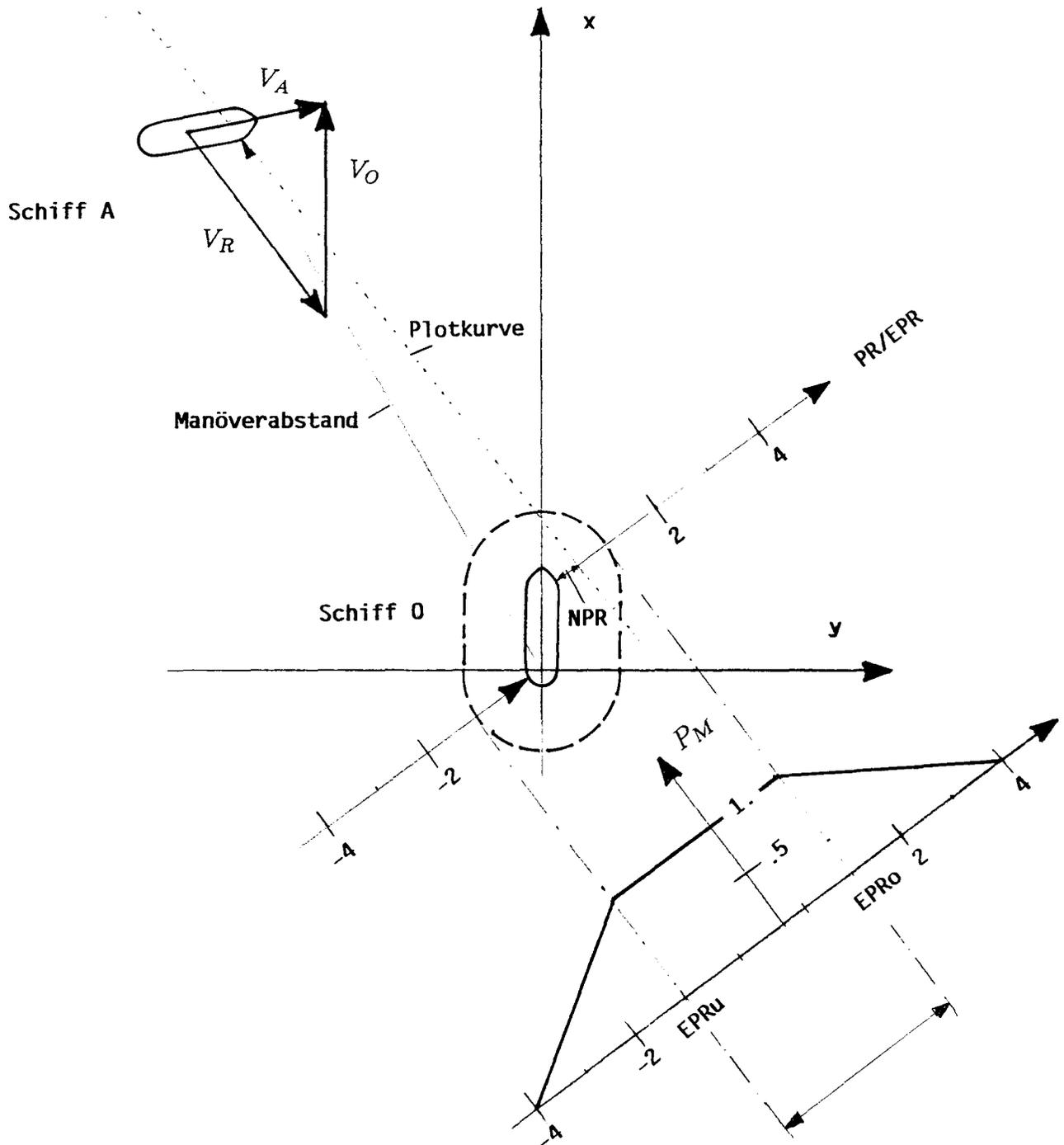


Bild 5

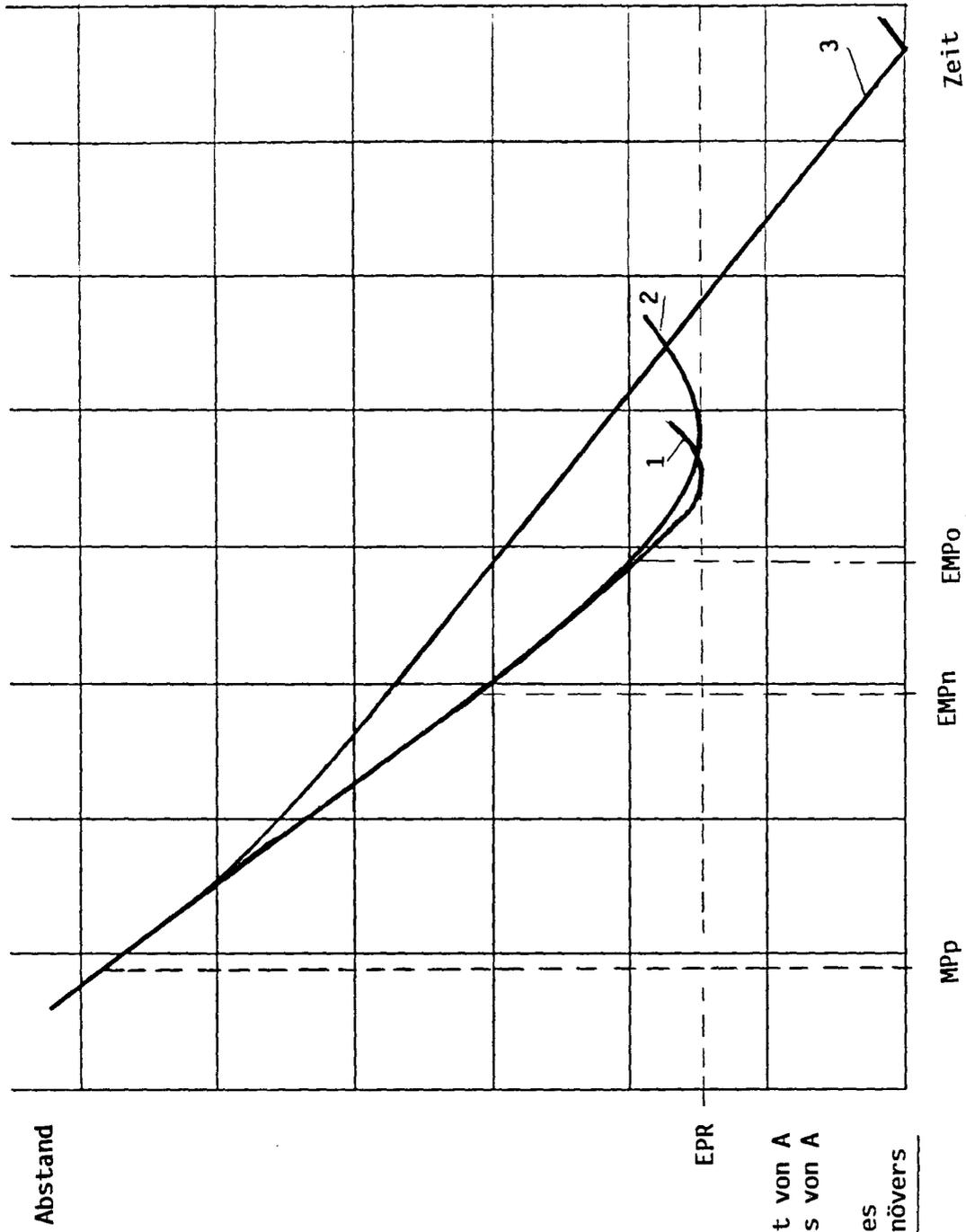
Abhängigkeit der Manöverbereitschaft vom prognostizierten Passierabstand

Abschätzung der Häufigkeit mit der optimale, neutrale und pessimale Manöver zu erwarten sind

Erkennen der Kollisionsgefahr	rechtzeitig	nicht rechtzeitig	
		Vor Passage	nach erfolgter Passage
Anteil an allen Passagen	95 %	2.5 %	2.5 %
vermutliche Manöverstrategie bei einem Ausweichmanöver	optimal	optimal : 2.5/3 % neutral : 2.5/3 % pessimial : 2.5/3 %	neutral

Häufigkeiten : optimal : 95 5/6 %  
neutral : 3 1/3 %  
pessimial : 5/6 %

Bild 6

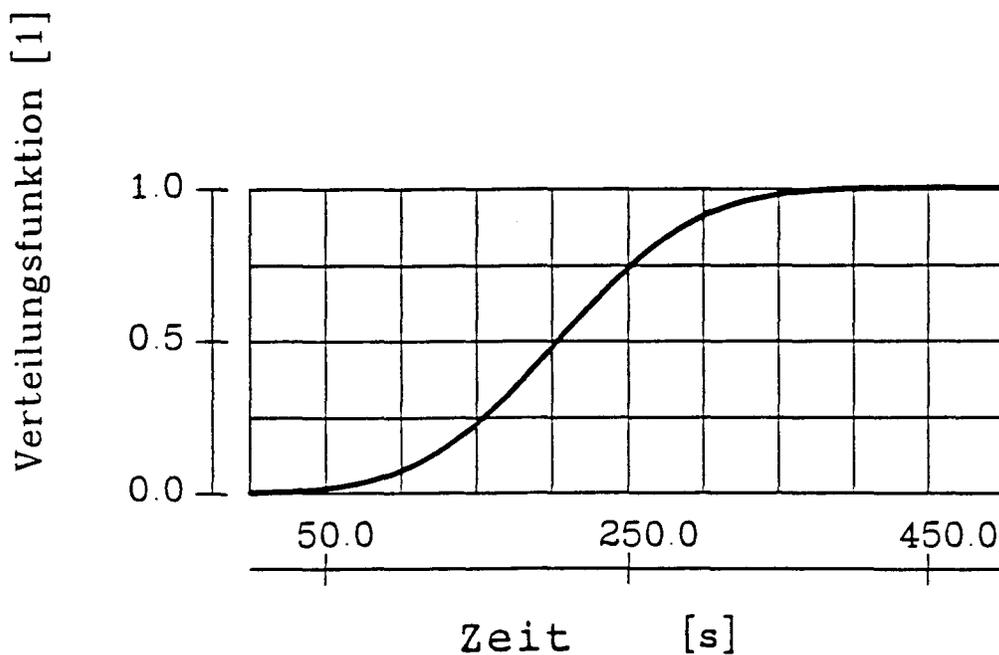


Geschwindigkeit von 0 < Geschwindigkeit von A  
 Drehkreisradius von 0 > Drehkreisradius von A

Kurve	Manöverstrategie		Beginn des Ausweichmanövers
	0	A	
1	optimal	optimal	EMPo
2	optimal	neutral	EMPn
3	optimal	pessimial	MPP

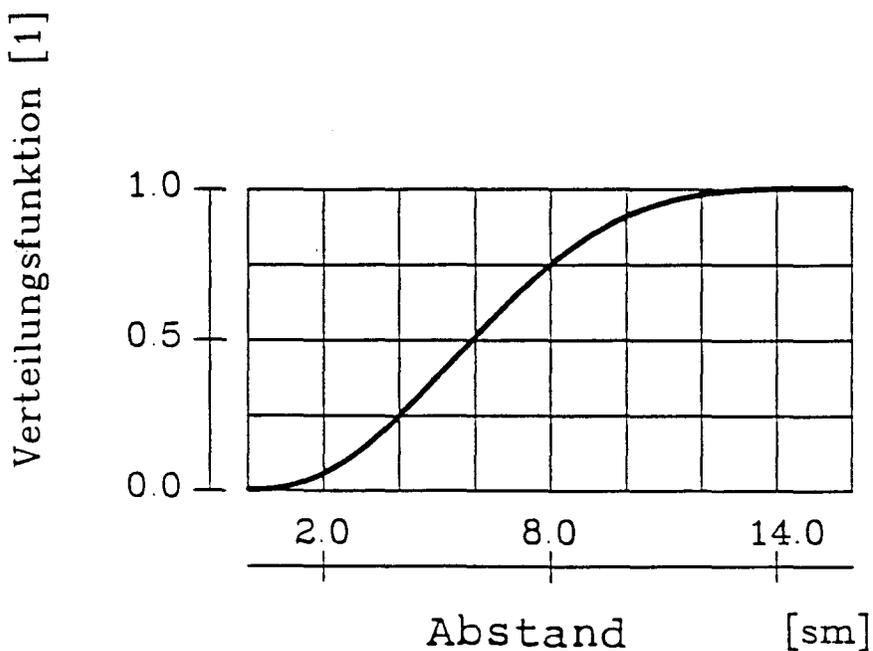
Abstand - Zeit - Verlauf während einer Begegnung

Bild 7



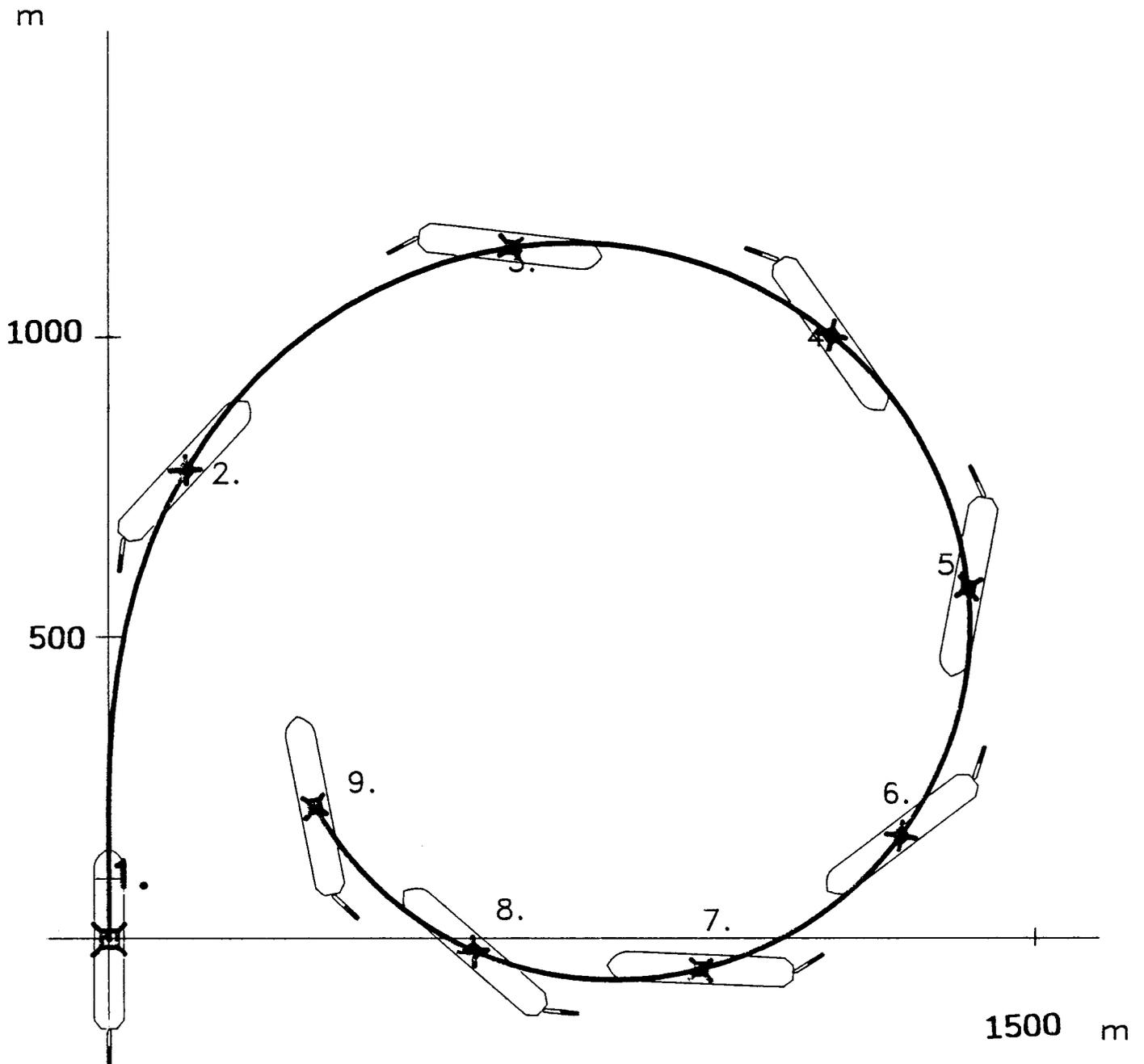
Verteilungsfunktion  
für die  
verfügbare Manöverzeit

Bild 8



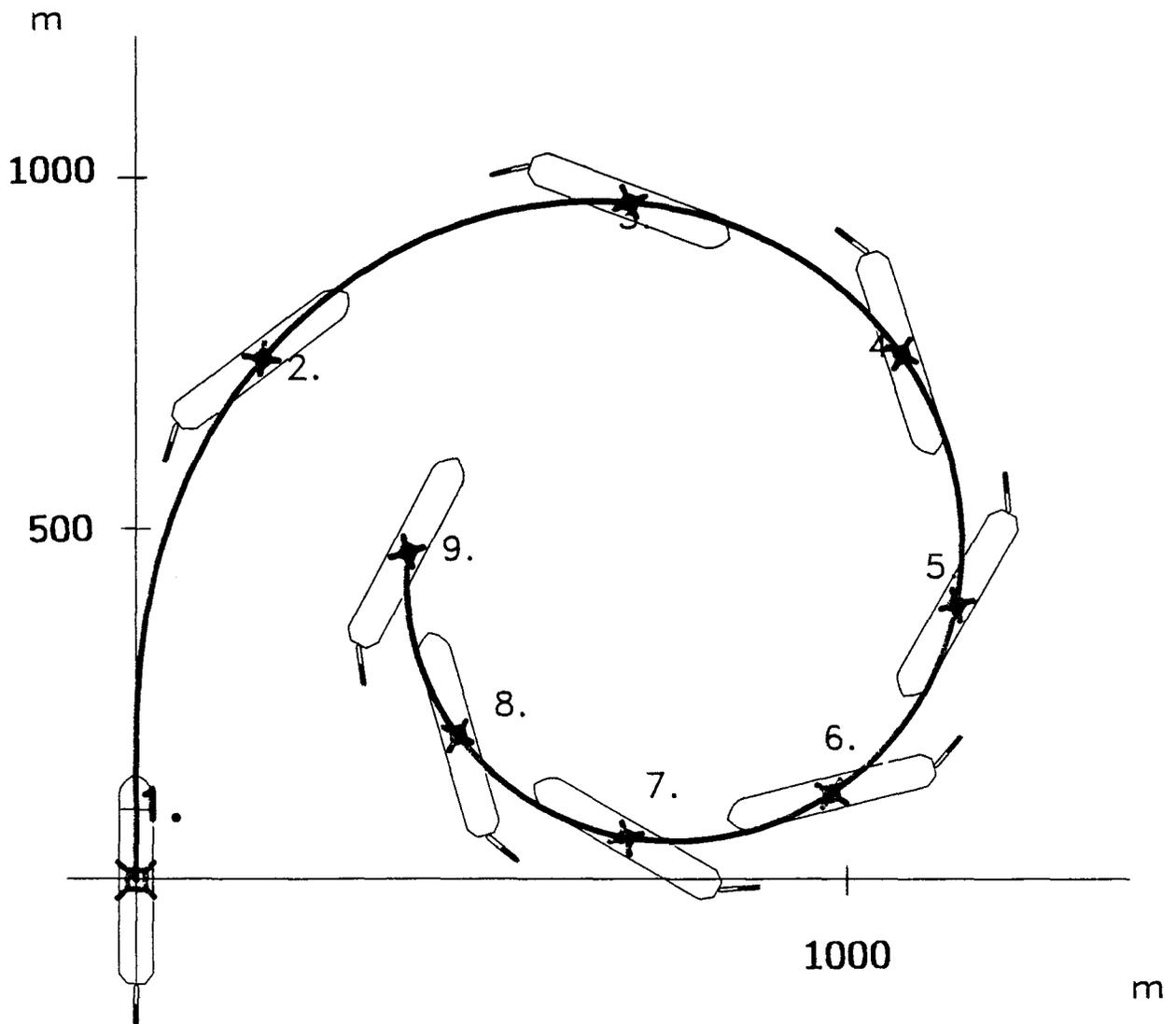
Verteilungsfunktion  
für den  
verfügbaren Manöverabstand

Bild 9



Schiffsbewegung nach dem Bewegungsmodell von Söding  
bei Drehkreisfahrt

Bild 10



Schiffsbewegung nach dem Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma  
bei Drehkreisfahrt

Bild 11

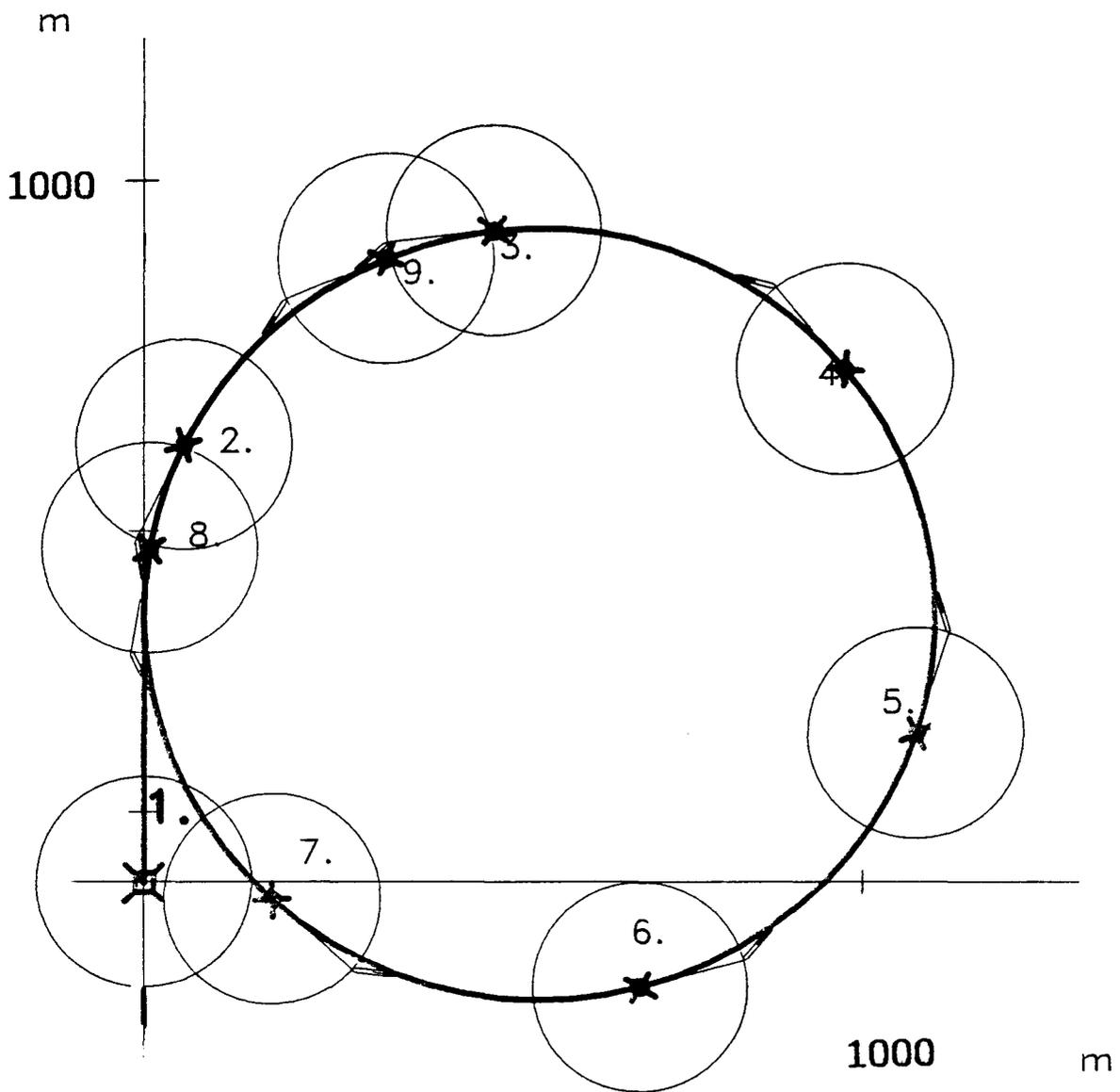
### Geschwindigkeitsverlauf beim Drehkreismanöver

Kurve 1: Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma

Kurve 2: Differentialspielmodell

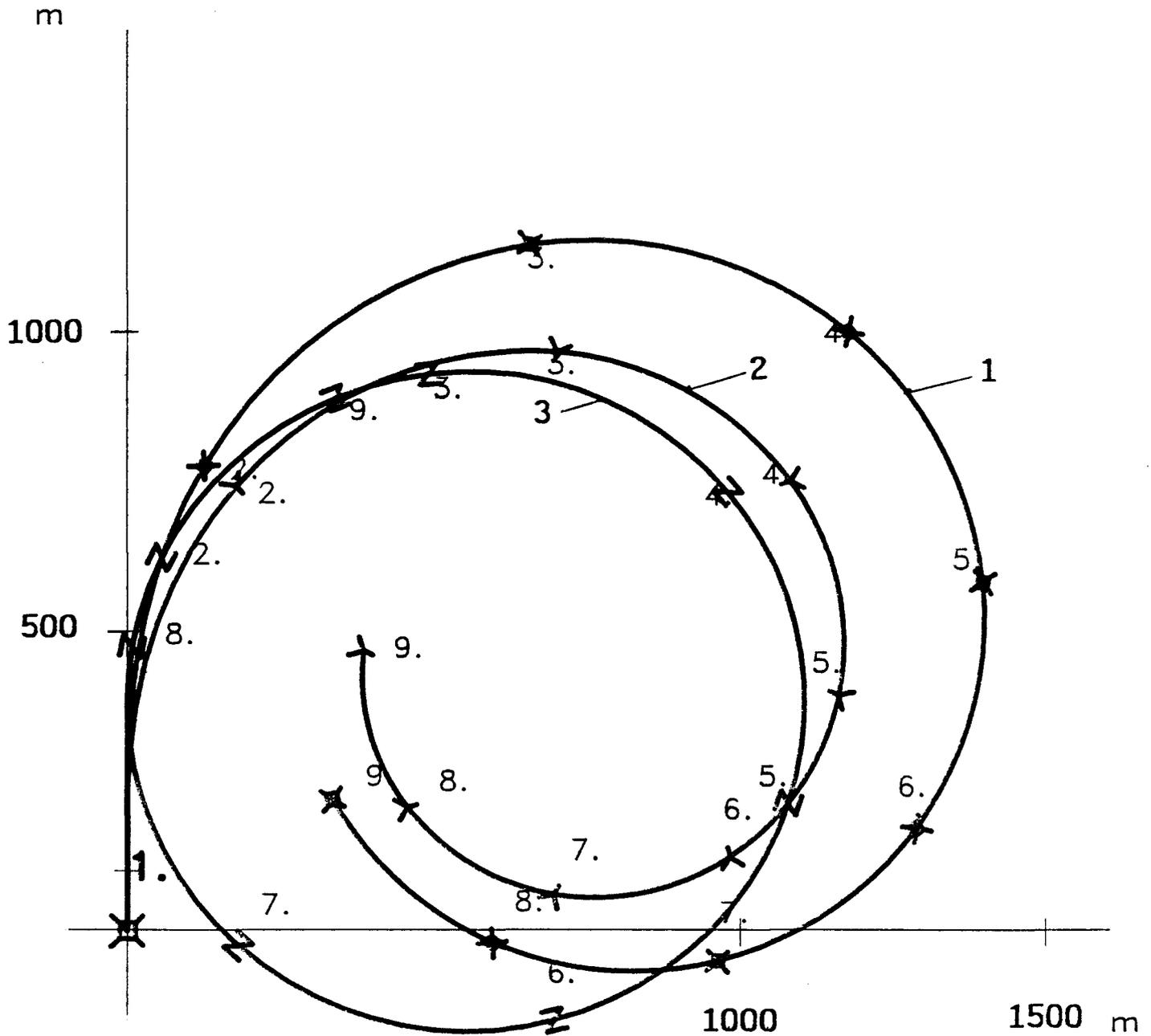


Bild 12



Schiffsbewegung und Deckskontur für das Differentialspielmodell  
bei Drehkreisfahrt

Bild 13



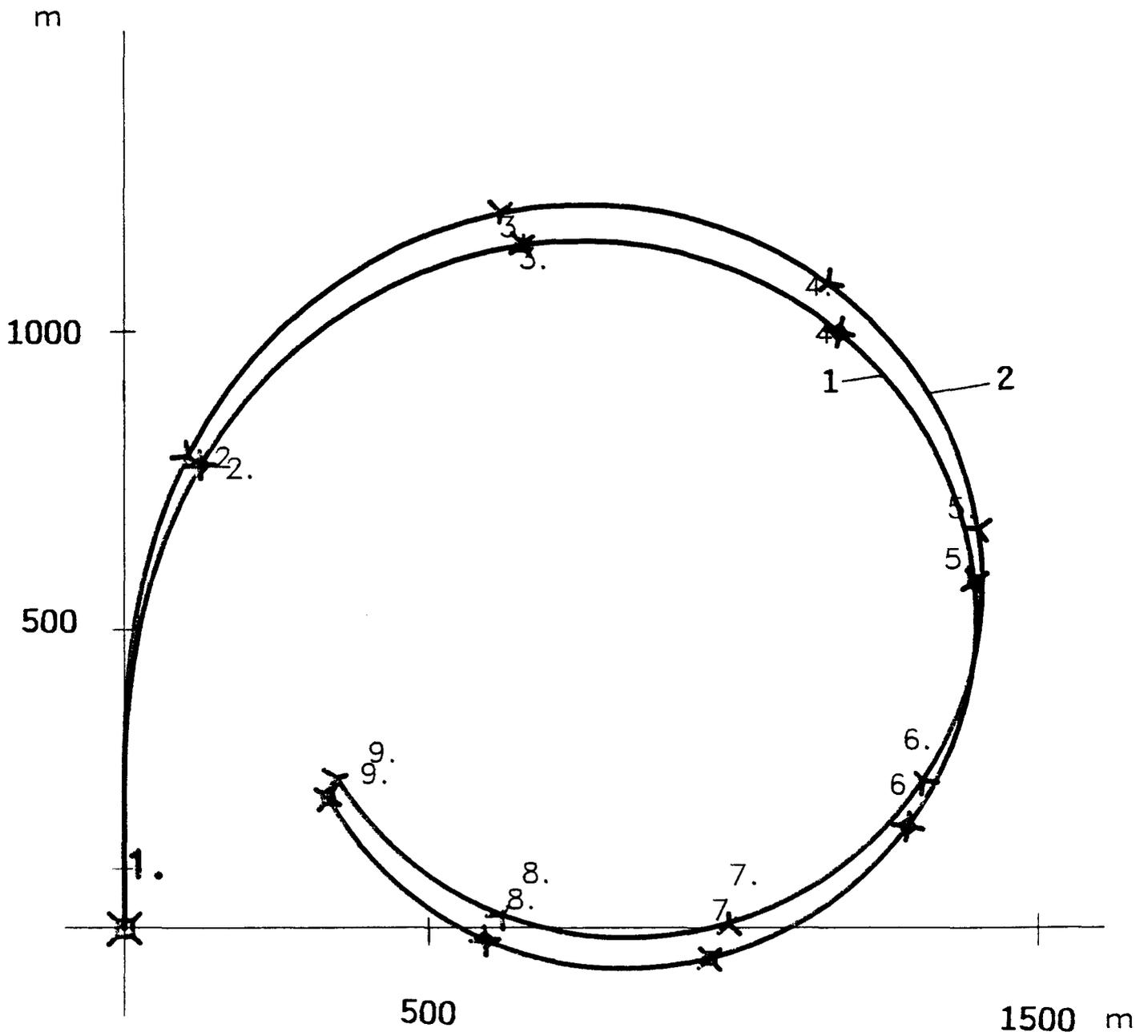
Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes für die verschiedenen Berechnungsverfahren

Kurve 1: Bewegungsmodell von Söding

Kurve 2: Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma

Kurve 3: Manöverweg im Differentialspielmodell

Bild 14

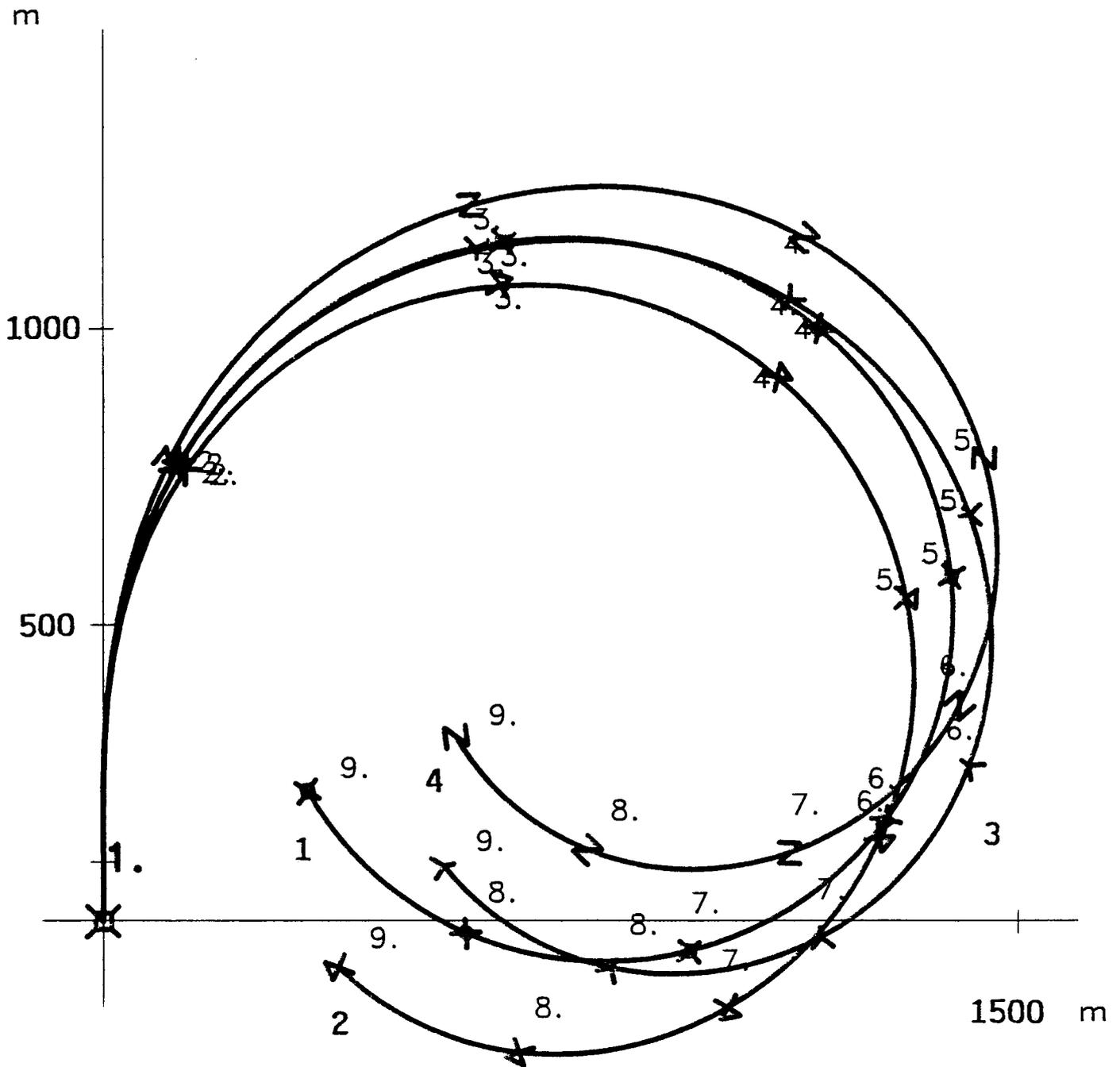


Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes bei verschiedenen Ruderlegegeschwindigkeit

Kurve 1: Ruderlegegeschwindigkeit 2.32 Grad/s

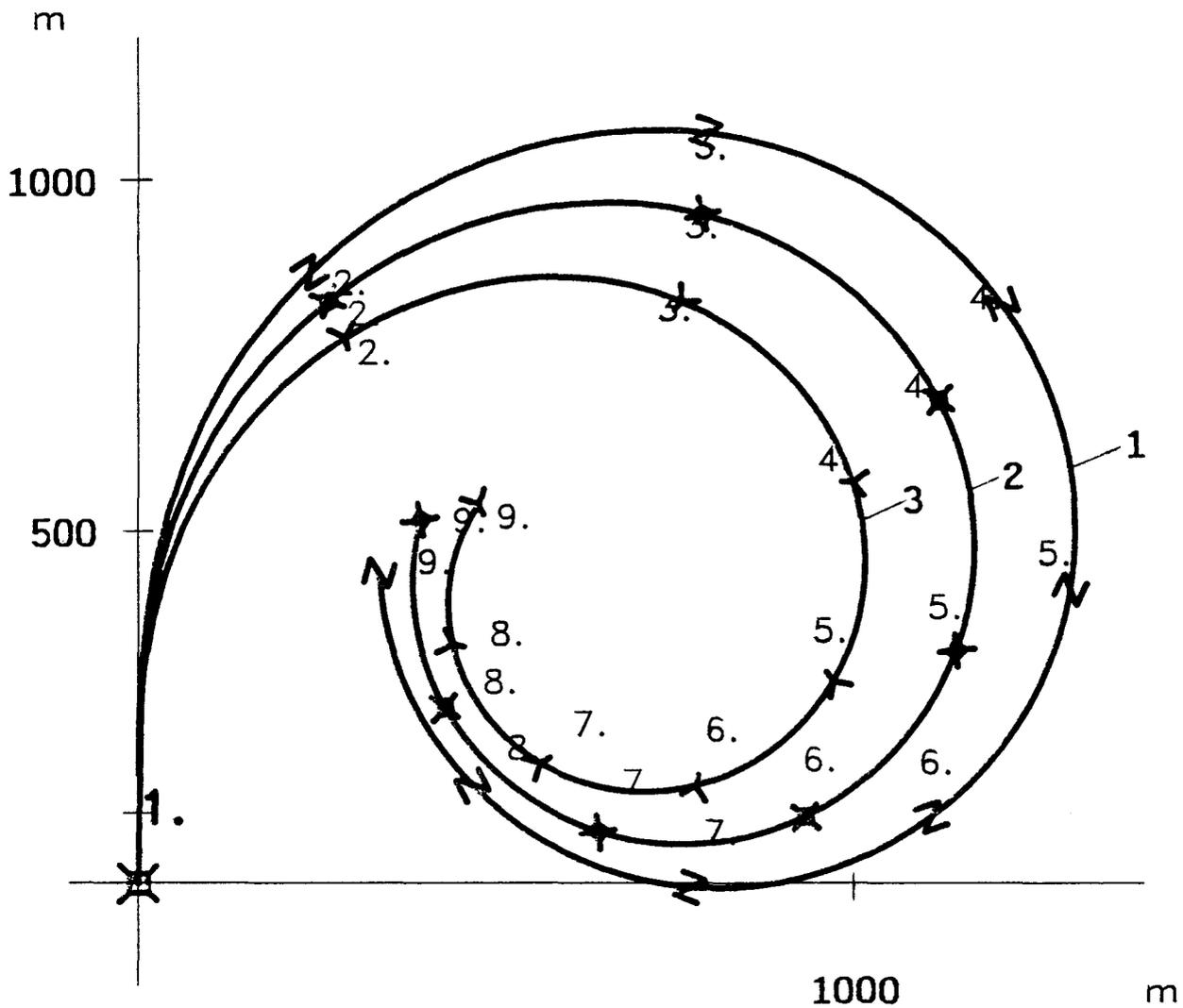
Kurve 2: Ruderlegegeschwindigkeit 1.16 Grad/s

Bild 15



Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes bei Wind

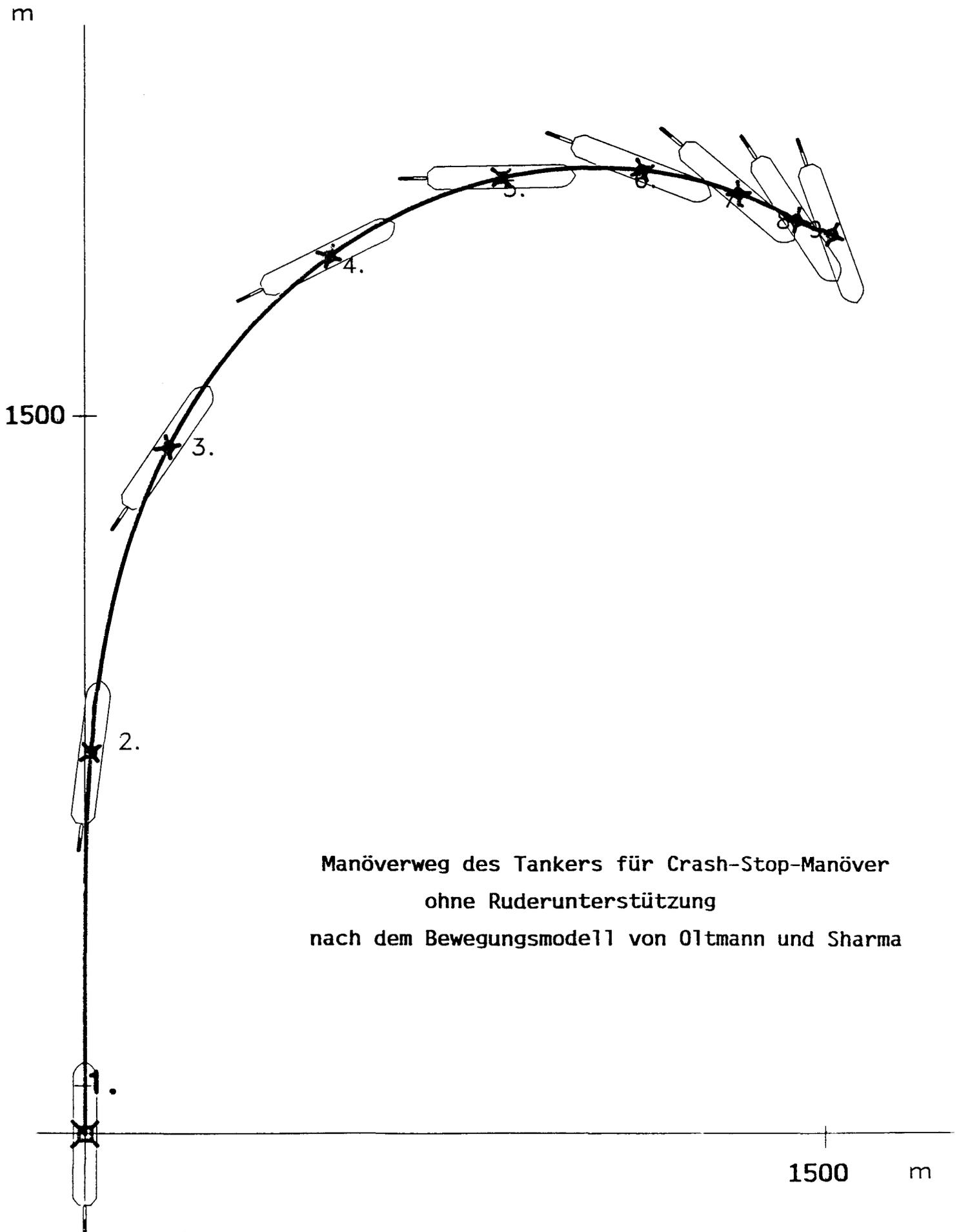
Kurve	Windstärke (Beaufort)	Windrichtung bei Manöverbeginn (Grad - Seitenpeilung)
1	0	0
2	8	60
3	8	180
4	8	300



Gegenüberstellung der Manöverwege des Schiffsschwerpunktes  
bei Variation der Ruderfläche nach dem Bewegungsmodell  
von Oltmann und Sharma

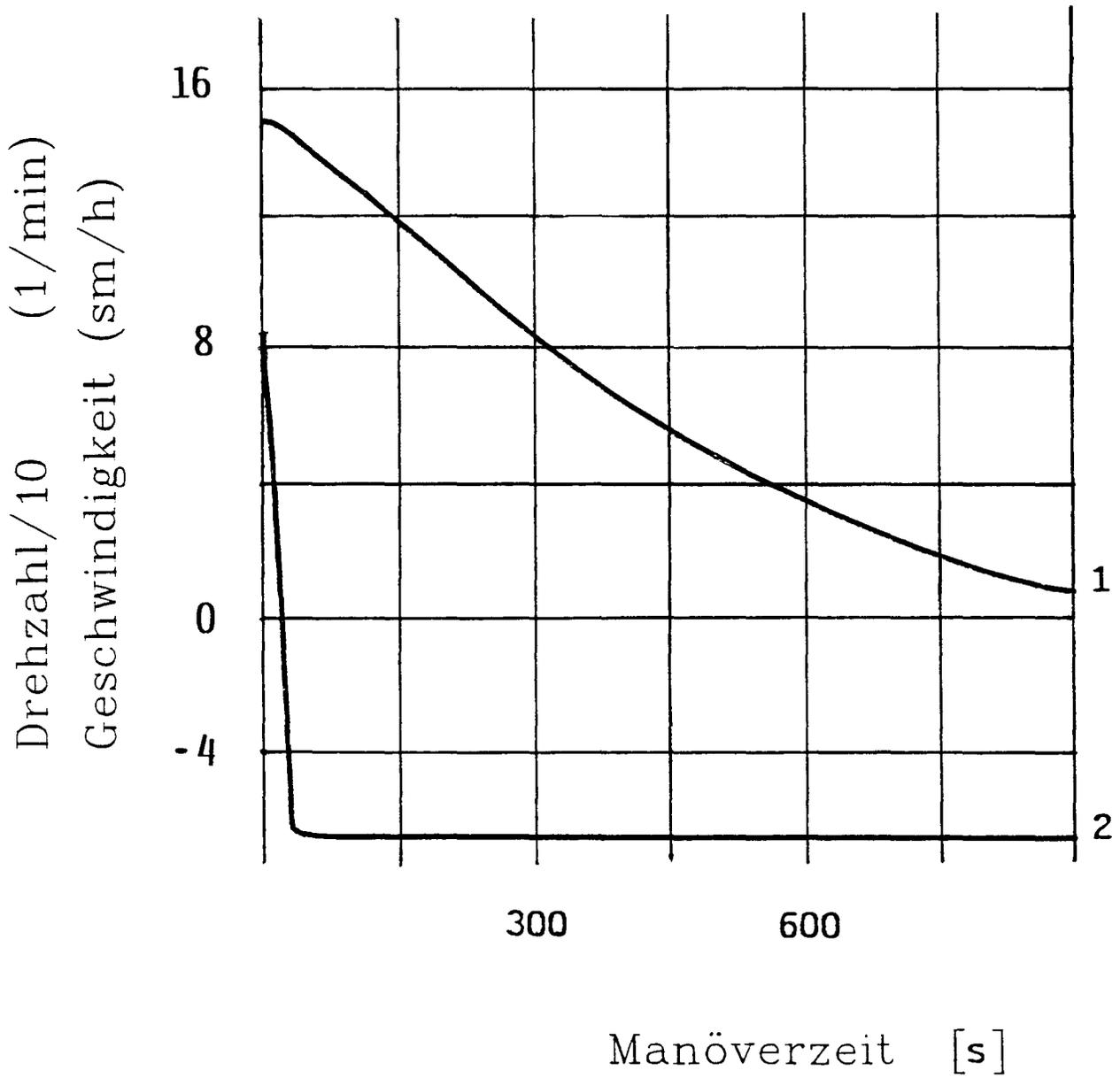
- Kurve 1: Ruderfläche 54.0 m
- Kurve 2: Ruderfläche 73.5 m
- Kurve 3: Ruderfläche 110.0 m

Bild 17



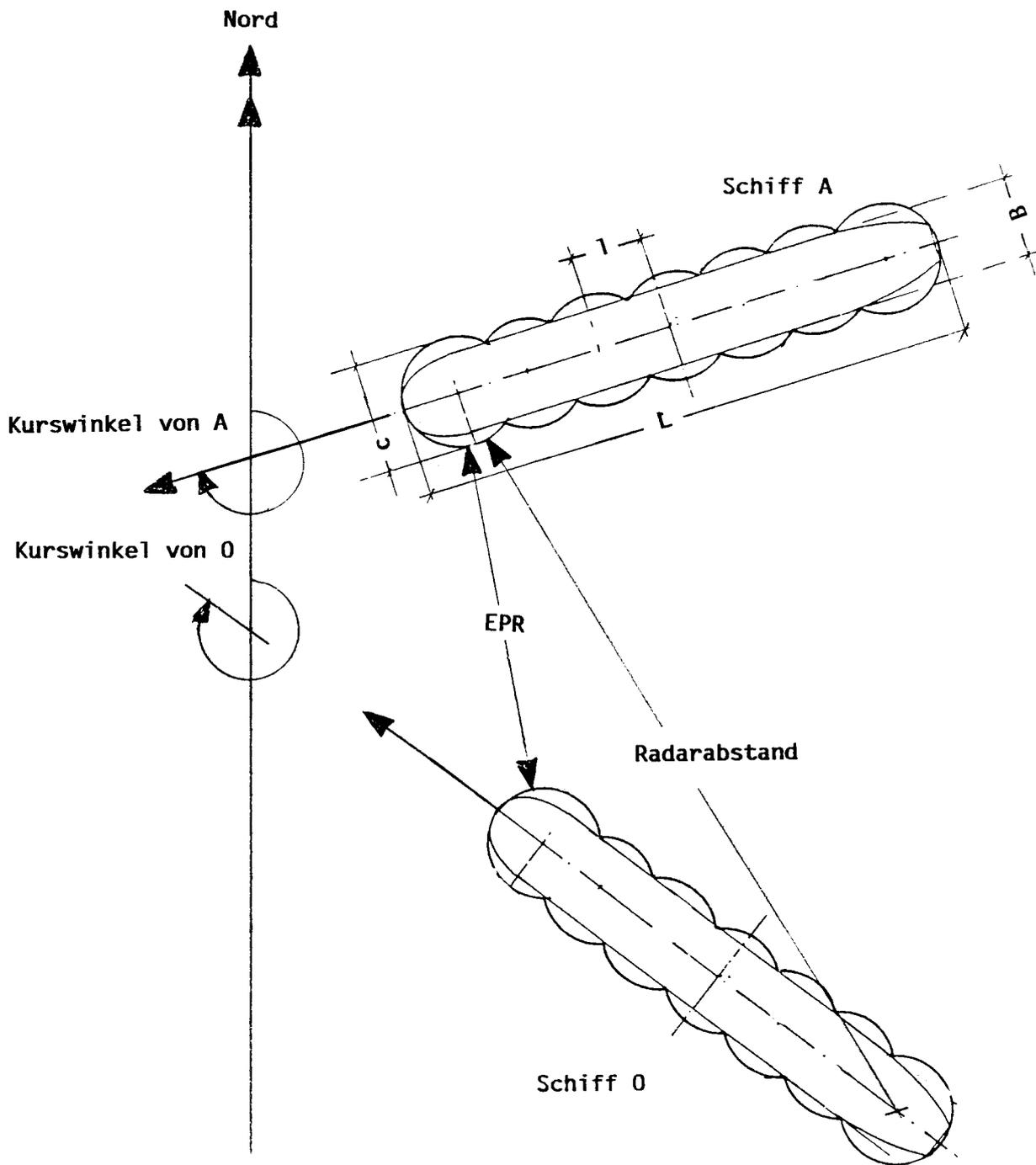
Manöverweg des Tankers für Crash-Stop-Manöver  
ohne Ruderunterstützung  
nach dem Bewegungsmodell von Oltmann und Sharma

Bild 18



Geschwindigkeit und Drehzahl beim Crash-Stop

Bild 19



Darstellung der Deckskontur und Beschreibung der Abstände  
im Augenblick der engsten zulässigen Annäherung  
im Iterativmodell

Bild 20

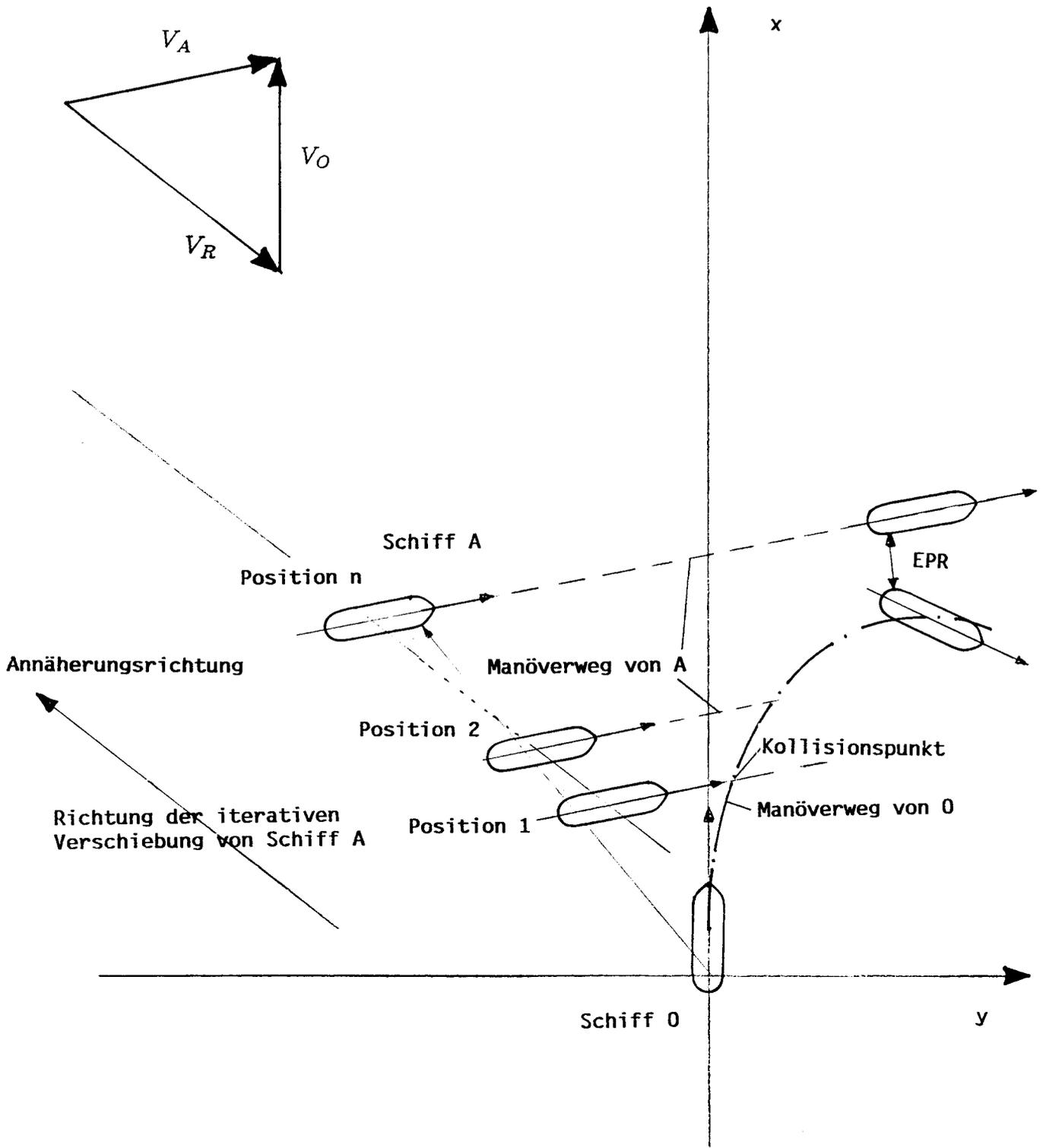


Bild 21

Schematische Darstellung der iterativen Bestimmung des erforderlichen Manöverabstandes

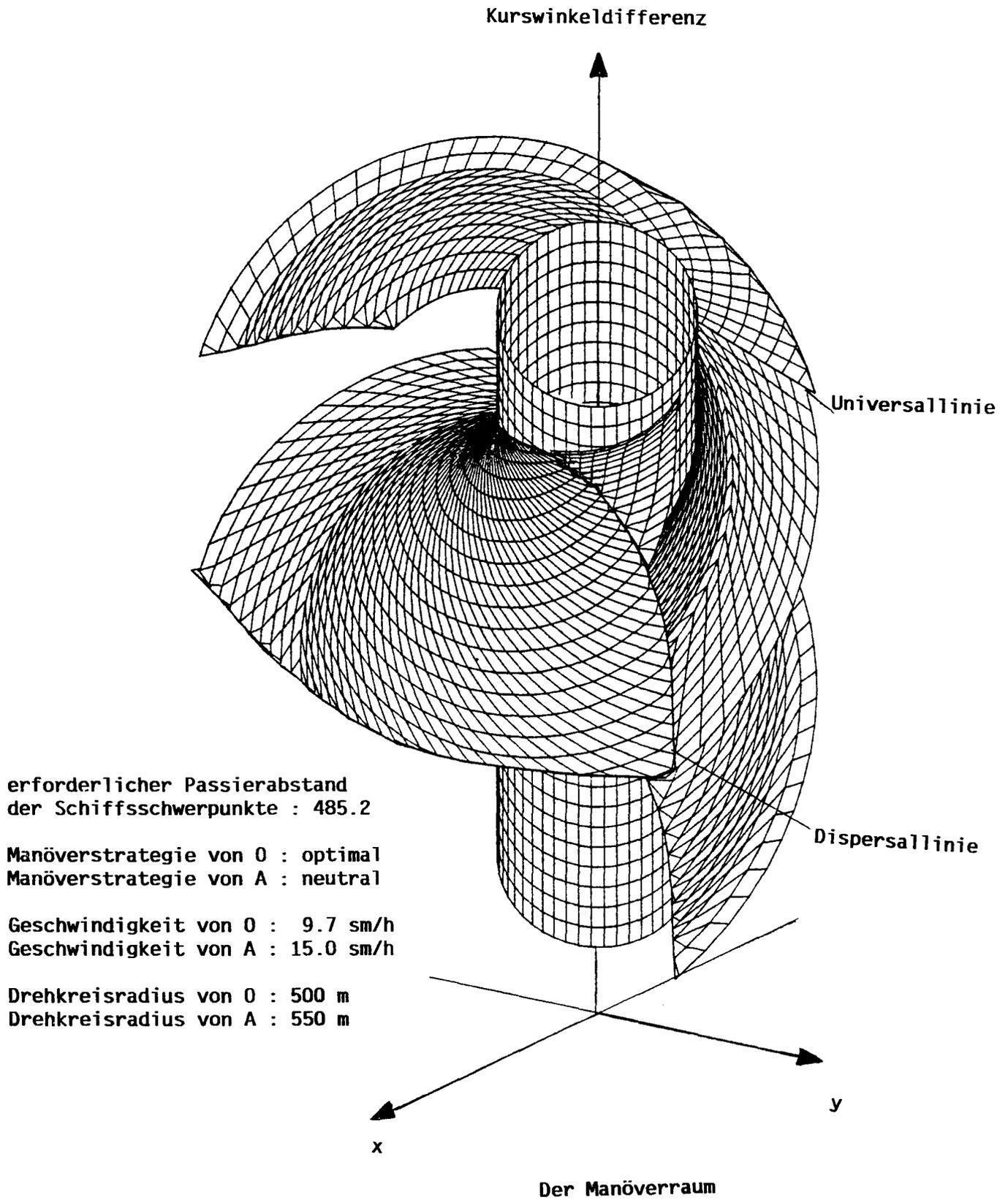
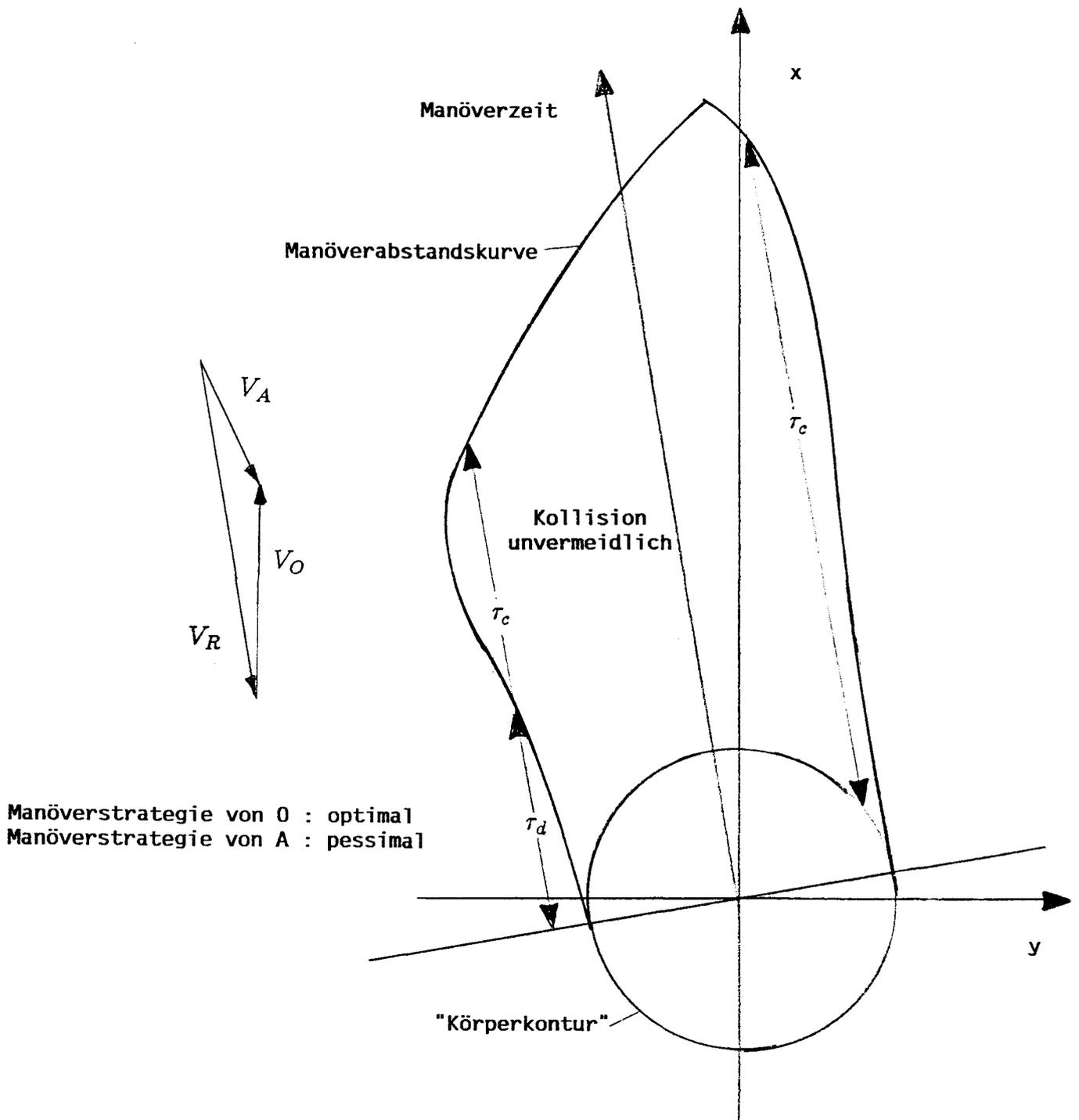
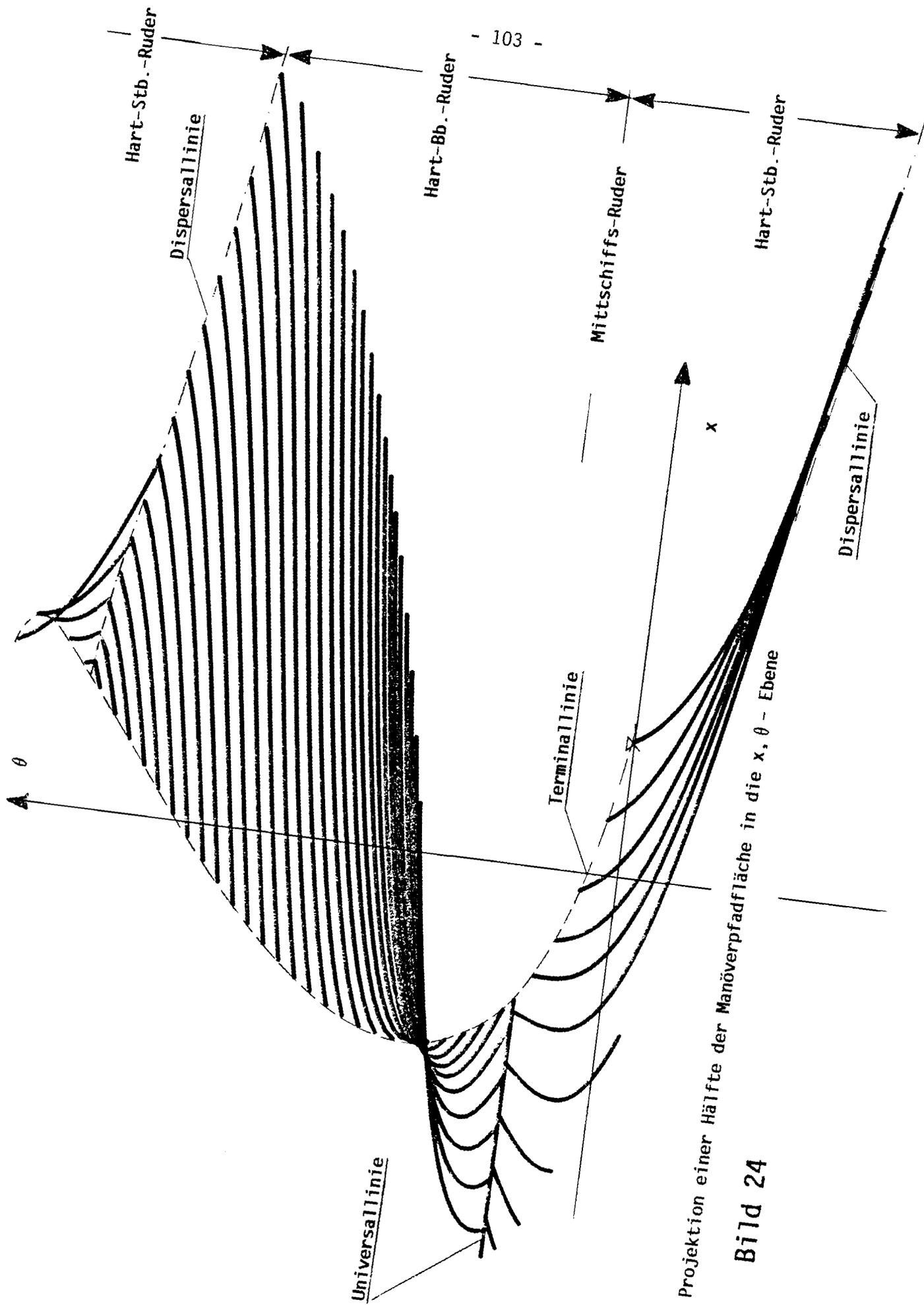


Bild 22



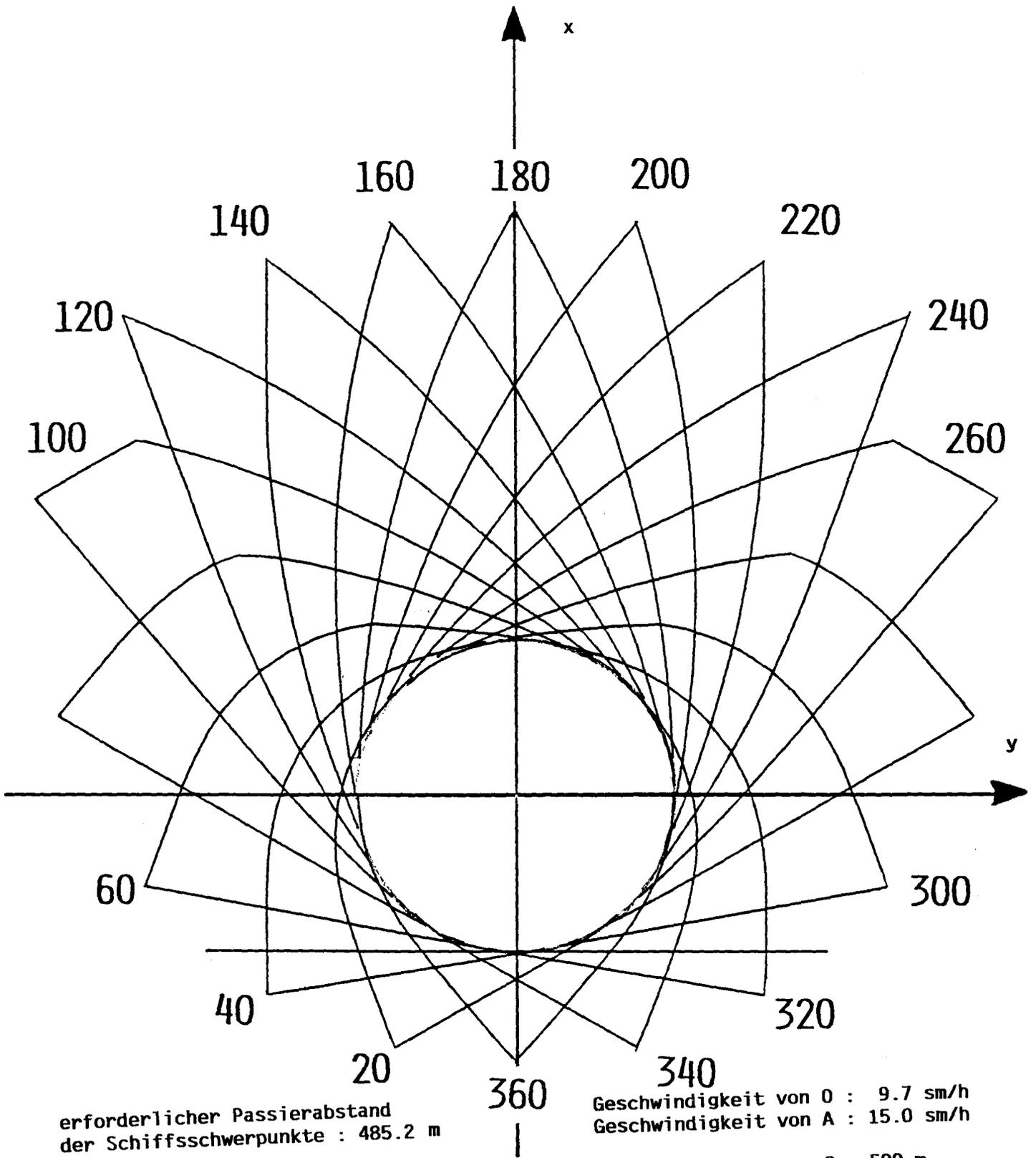
Schematische Darstellung der verschiedenen erforderlichen Manöverzeiten

Bild 23



Projektion einer Hälfte der Manöverpfadfläche in die  $x, \theta$  - Ebene

**Bild 24**



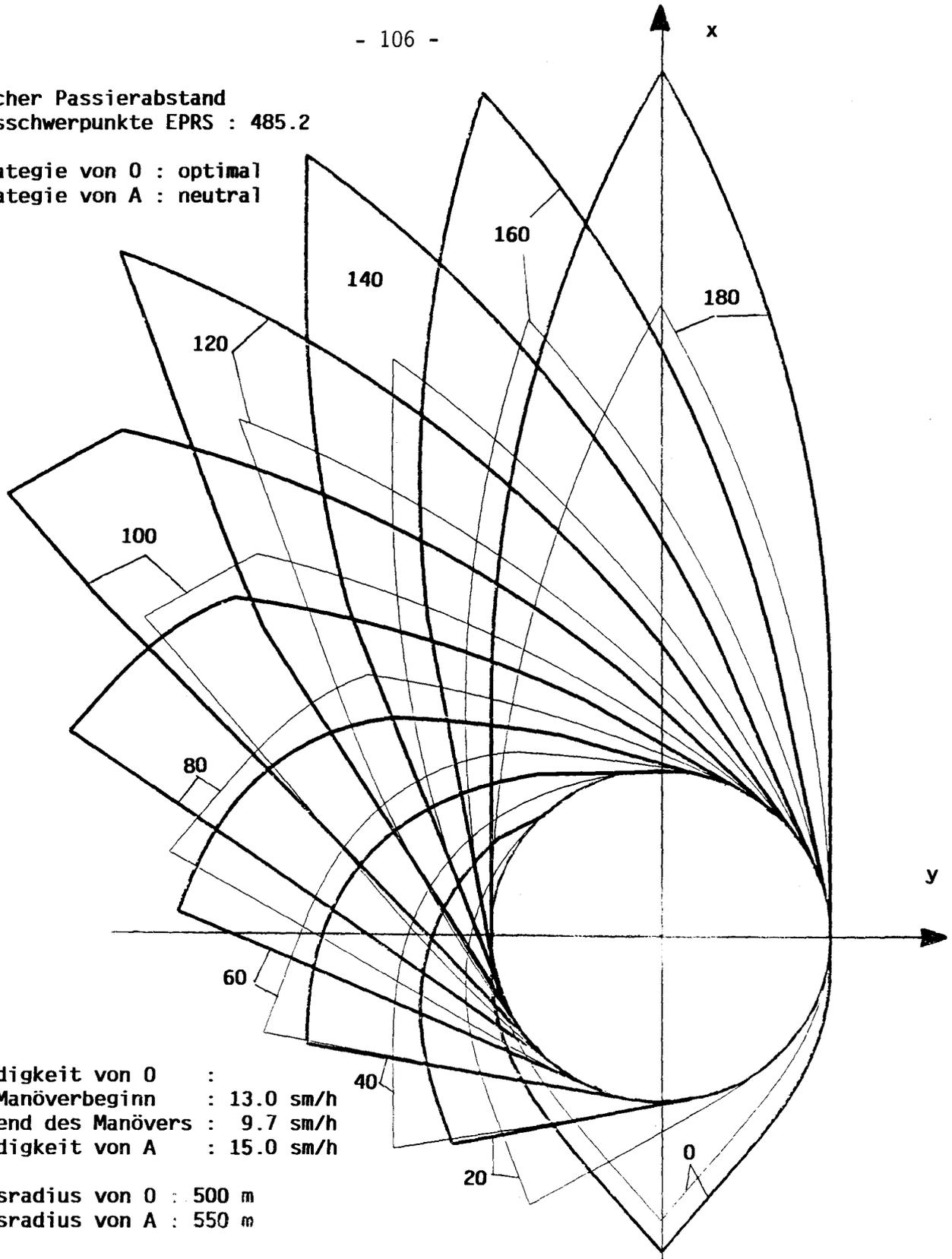
Manöverabstandskurven - Schnittlinien durch den Manöverraum  
Kurvennumerierung : Kurswinkeldifferenz bei Manöverbeginn

Bild 25



erforderlicher Passierabstand  
der Schiffsschwerpunkte EPRS : 485.2

Manöverstrategie von 0 : optimal  
Manöverstrategie von A : neutral



Geschwindigkeit von 0 :  
bei Manöverbeginn : 13.0 sm/h  
während des Manövers : 9.7 sm/h  
Geschwindigkeit von A : 15.0 sm/h

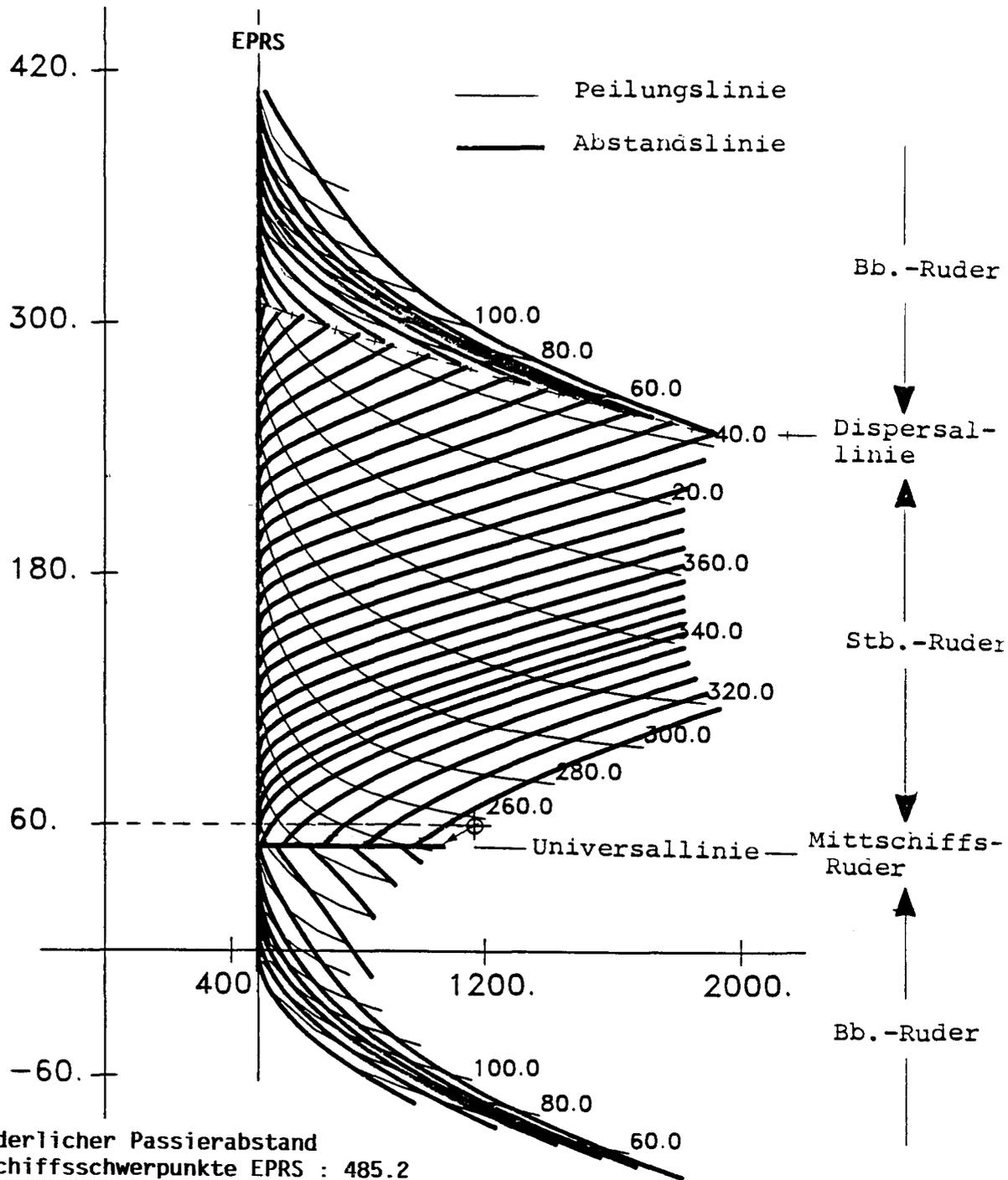
Drehkreisradius von 0 : 500 m  
Drehkreisradius von A : 550 m

Kurvennumerierung : Kurswinkeldifferenz bei Manöverbeginn  
— Manöverabstandskurve ohne Berücksichtigung der Einleitungsphase  
— Manöverabstandskurve mit Berücksichtigung der Einleitungsphase

Manöverabstandskurven unter Berücksichtigung der Einleitungsphase

Bild 27

# Kursdifferenz (Grad)



Manöverstrategie von 0 : optimal  
Manöverstrategie von A : neutral

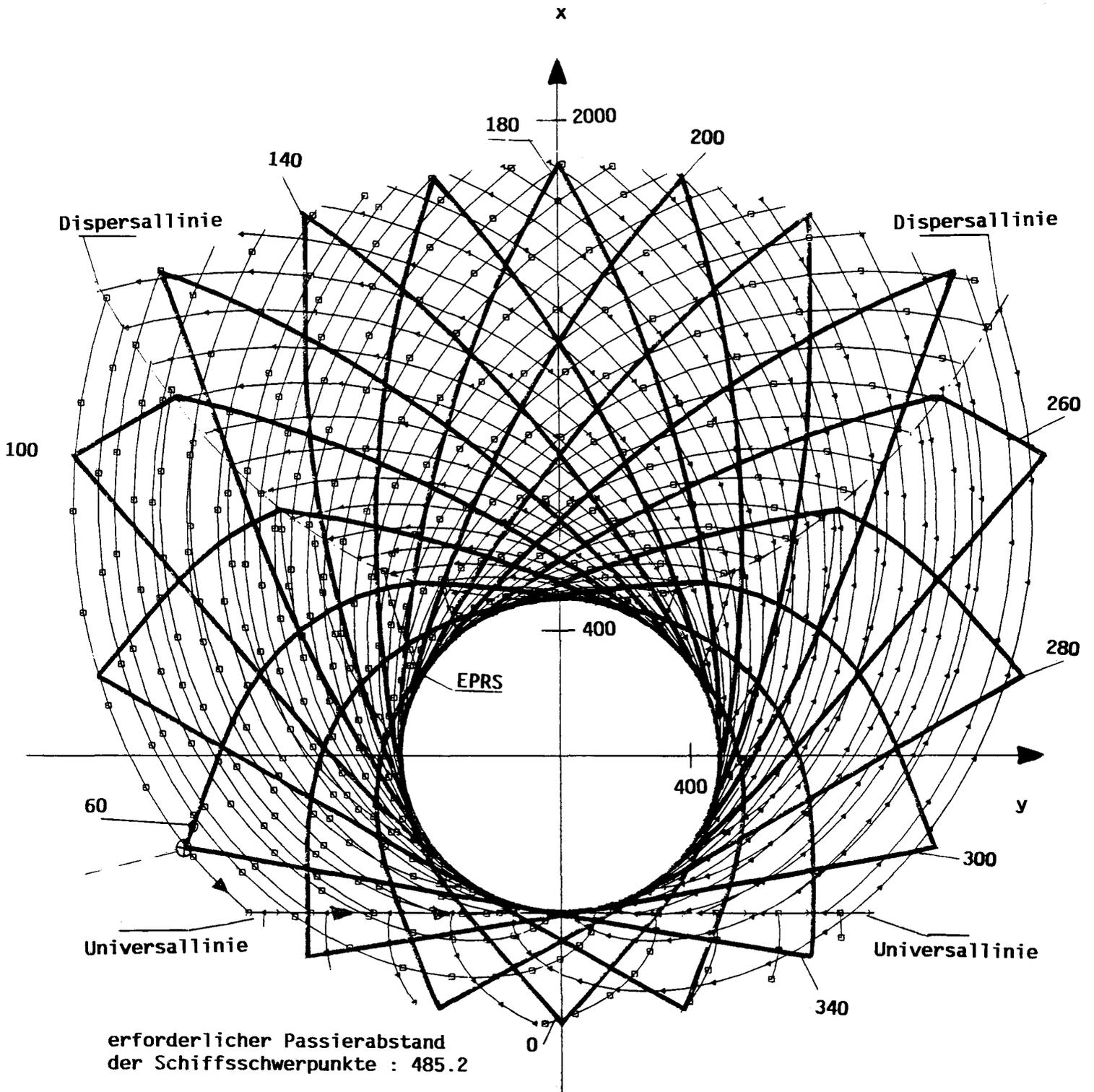
Geschwindigkeit von 0 : 9.7 sm/h  
Geschwindigkeit von A : 15.0 sm/h

Drehkreisradius von 0 : 500 m  
Drehkreisradius von A : 550 m

Abstand (m)

Bild 28

Manöverpfade projiziert in die  $r, \theta$  - Ebene



erforderlicher Passierabstand  
der Schiffsschwerpunkte : 485.2

Manöverstrategie von 0 : optimal  
Manöverstrategie von A : neutral

Geschwindigkeit von 0 : 9.7 sm/h  
Geschwindigkeit von A : 15.0 sm/h

Drehkreisradius von 0 : 500 m  
Drehkreisradius von A : 550 m

Kennzeichnung der Manöverpfade:  
□ Hart-Stb.-Ruder  
▲ Hart-Bb.-Ruder  
> Mittschiffs-Ruder

Bild 29

Manöverpfade projiziert in die x,y - Ebene

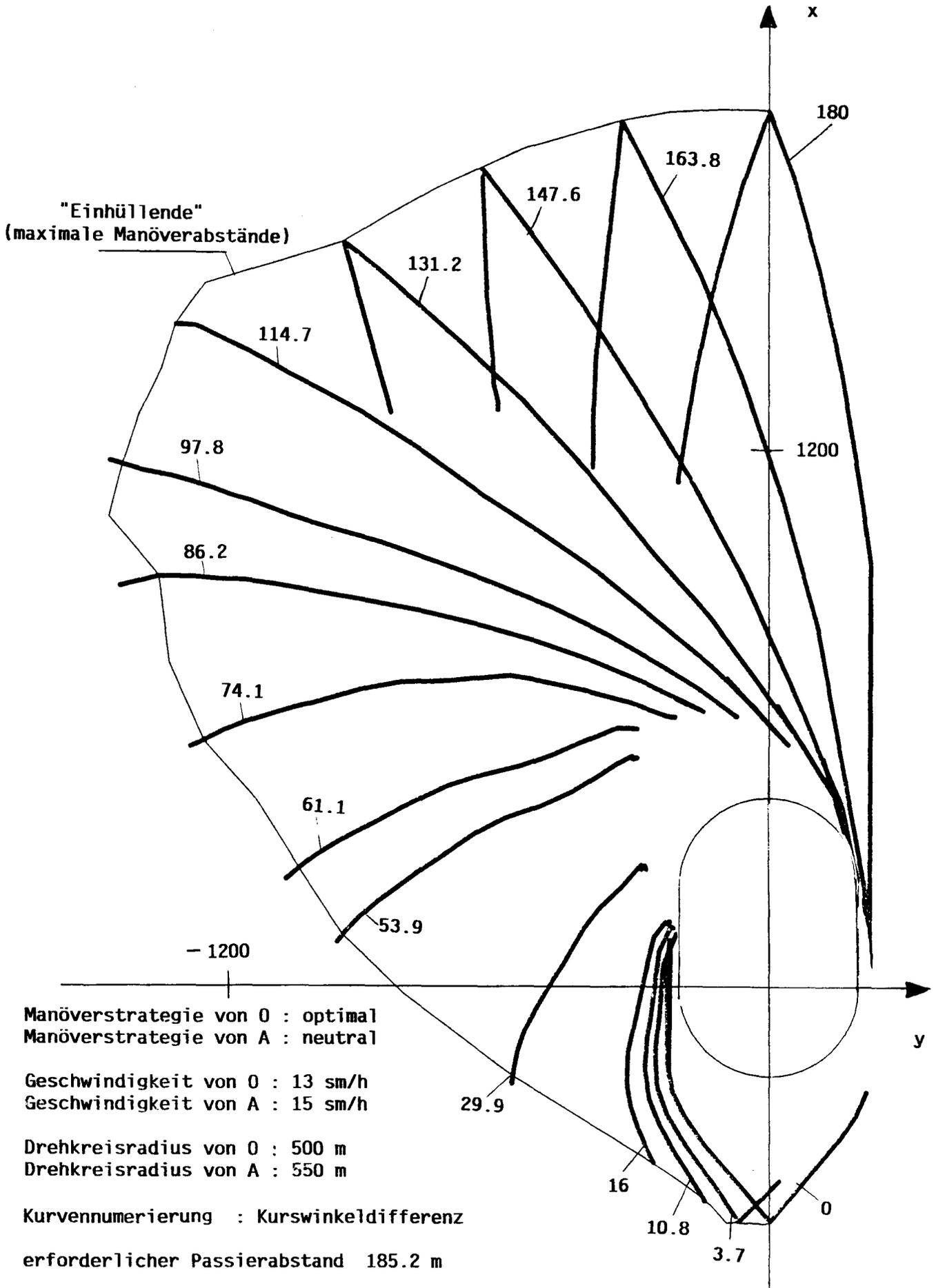
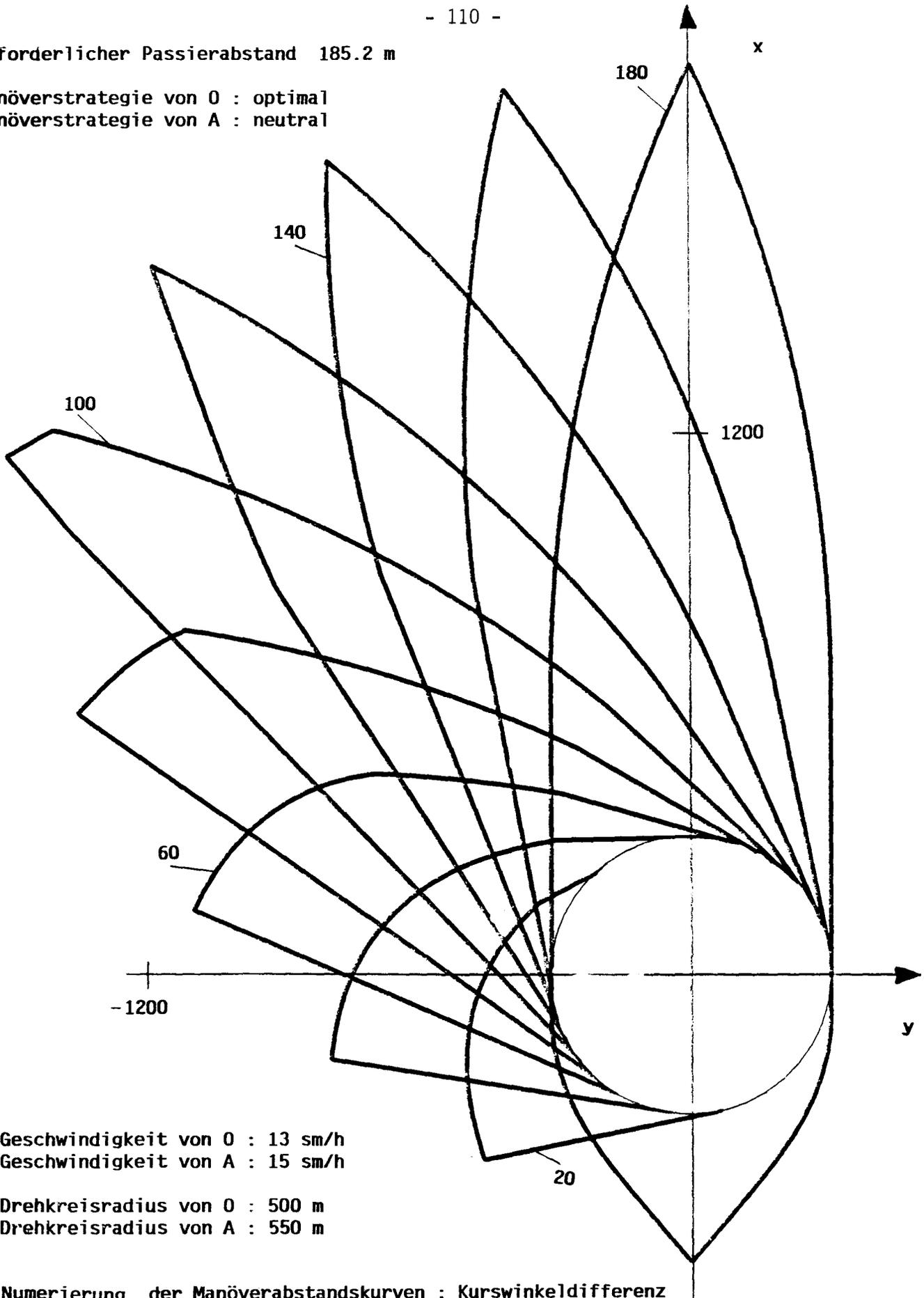


Bild 30

Manöverabstandskurven für das Iterativmodell

erforderlicher Passierabstand 185.2 m

Manöverstrategie von 0 : optimal  
Manöverstrategie von A : neutral



Geschwindigkeit von 0 : 13 sm/h  
Geschwindigkeit von A : 15 sm/h

Drehkreisradius von 0 : 500 m  
Drehkreisradius von A : 550 m

Numerierung der Manöverabstandskurven : Kurswinkeldifferenz

Bild 31

Manöverabstandskurven für das Differentialspielmodell, wenn die Manöverabstände gegen die Schiff 0 zugewandte Seite von Schiff A gemessen werden

# Manöverabstand

(sm)

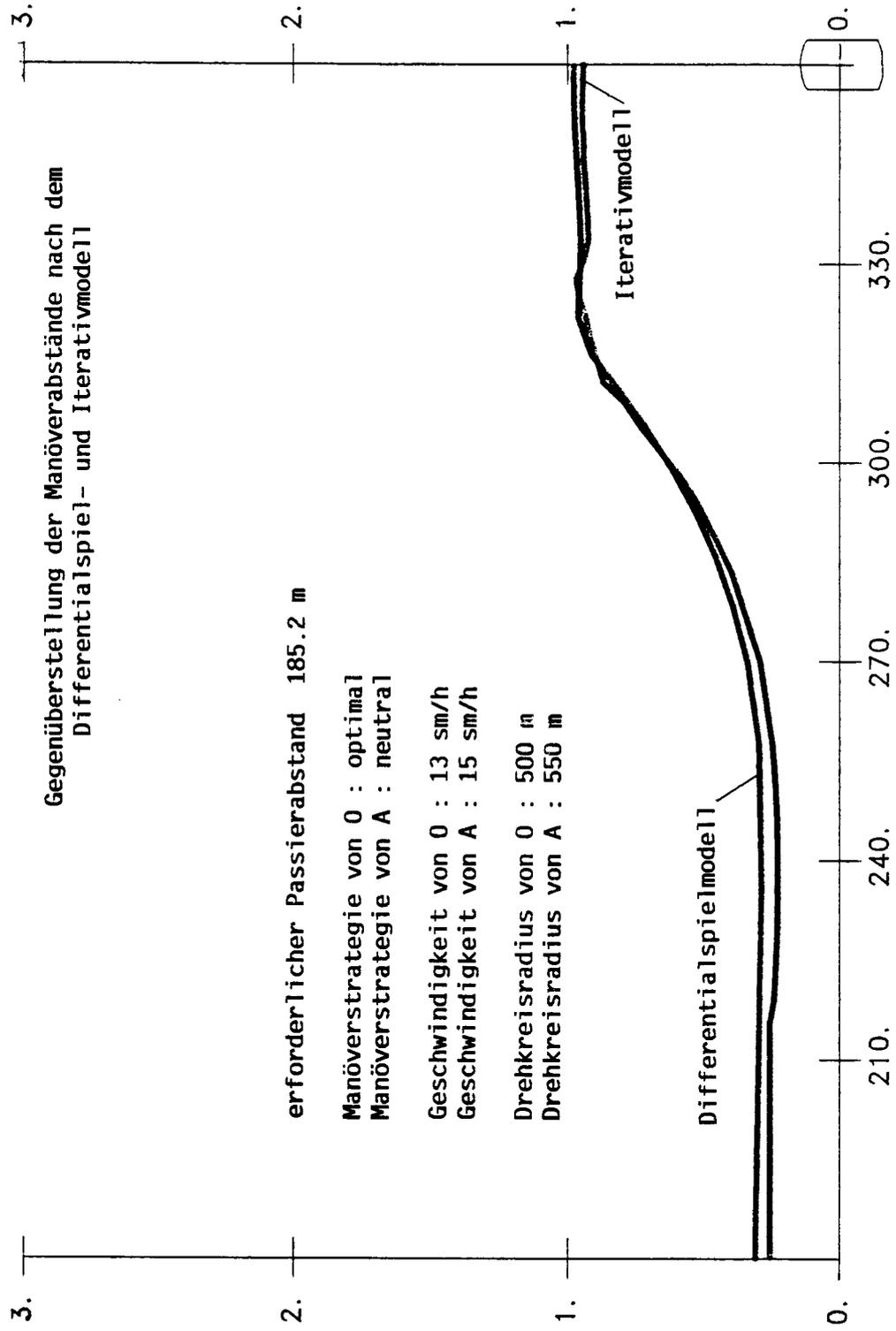
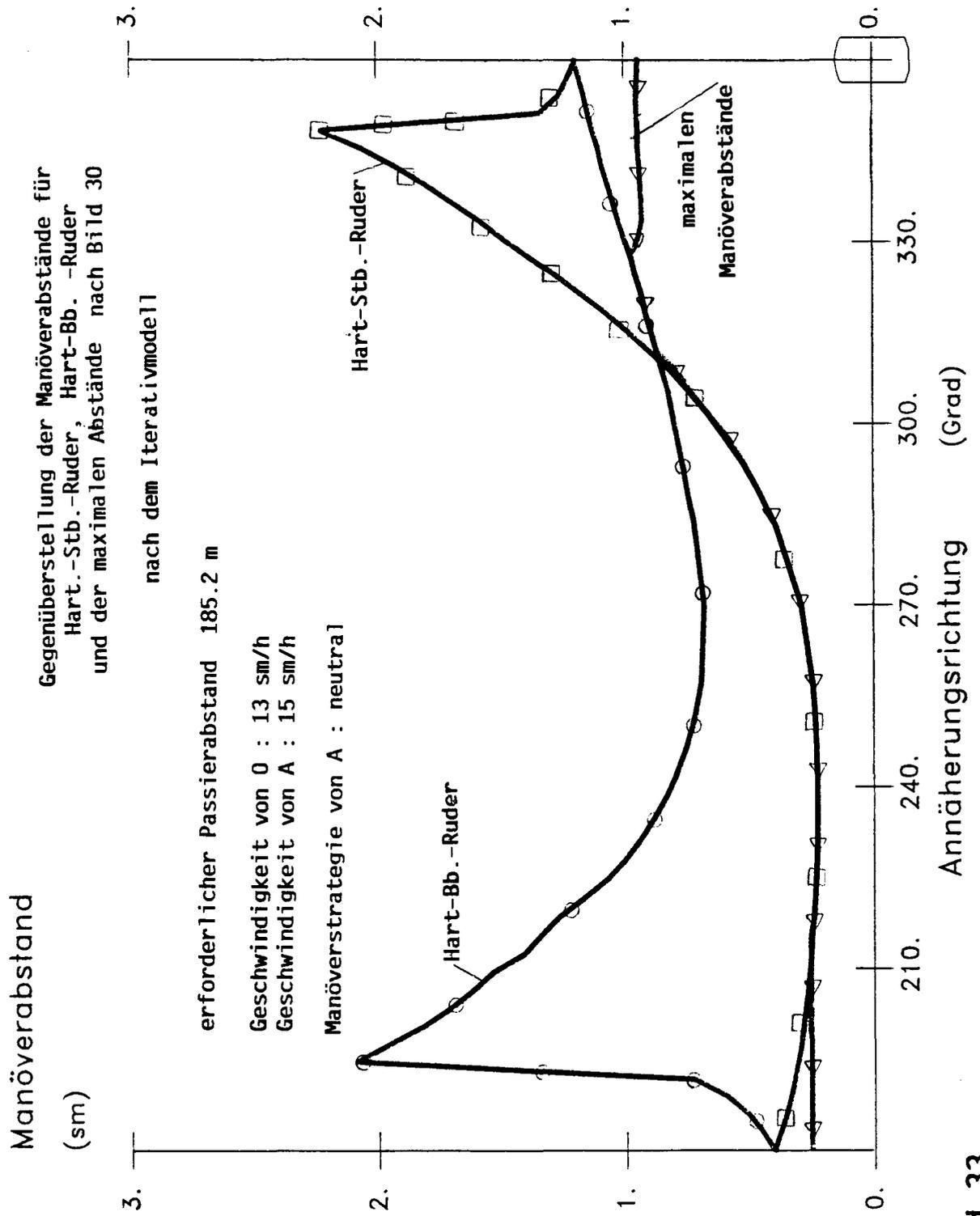


Bild 32



**Bild 33**

$V_O = 13 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 13 \text{ sm/h}$

Manöverabstand (sm)

Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Kurve	Rudermanöver von A
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

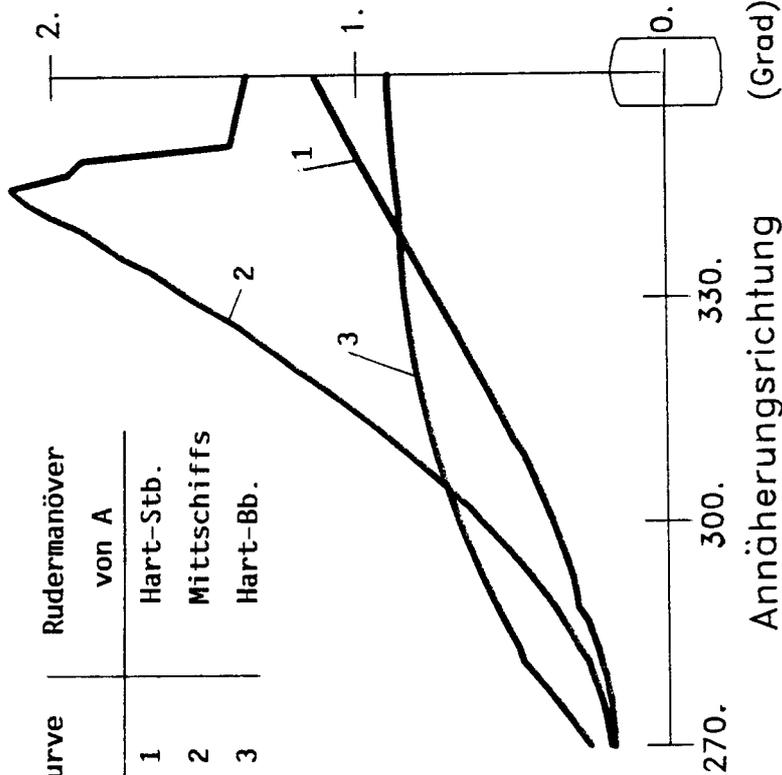


Bild 34

$V_O = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 15 \text{ sm/h}$

Manöverabstand (sm)

Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Kurve	Rudermanöver von A
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

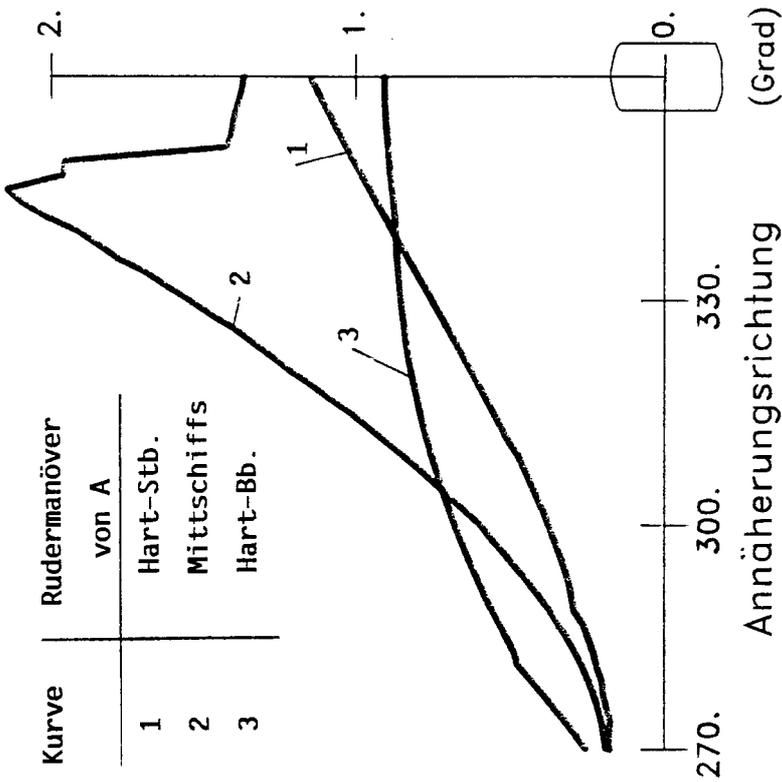


Bild 35

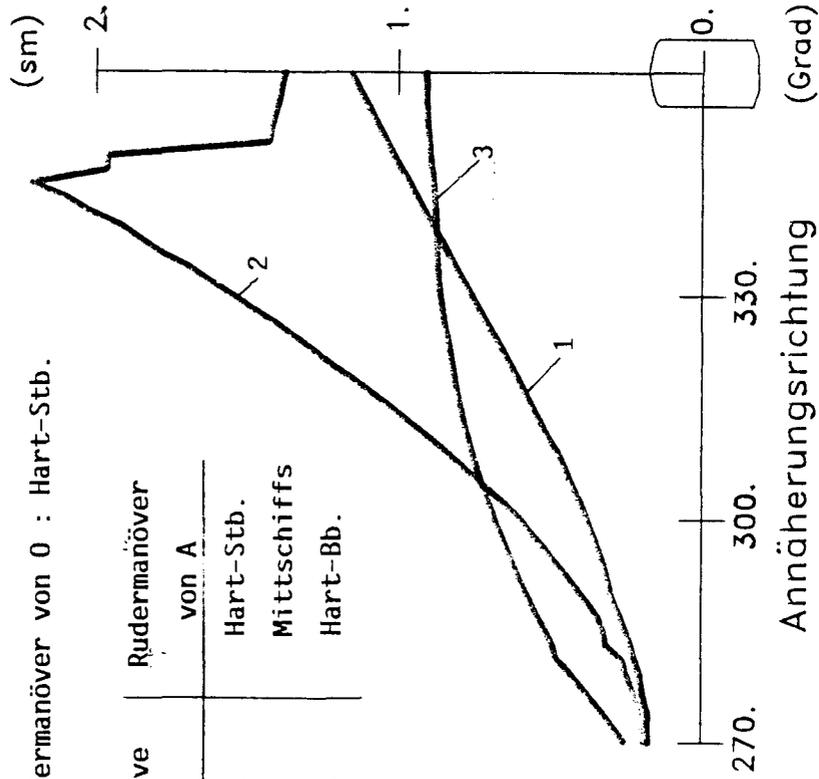
Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Kurve	Rudermanöver	Geschwindigkeit (sm/h)	
	von A	A	0
1	Hart-Stb.	13	13
2	Hart-Stb.	15	15
3	Hart-Stb.	17	17
4	Mittschiffs	13	13
5	Mittschiffs	15	15
6	Mittschiffs	17	17
7	Hart-Bb.	13	13
8	Hart-Bb.	15	15
9	Hart-Bb.	17	17

$V_0 = 17 \text{ sm/h}$

$V_A = 17 \text{ sm/h}$

Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.



Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Kurve	Rudermanöver
	von A
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

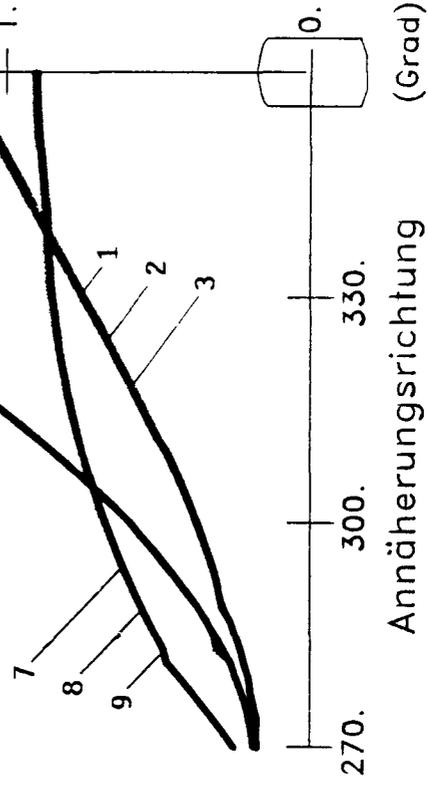


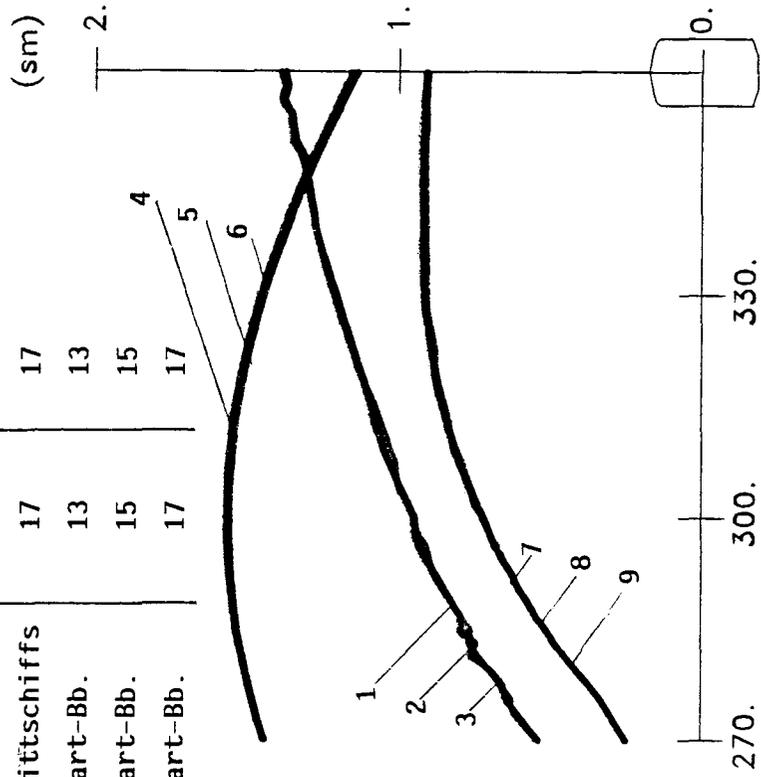
Bild 36

Bild 37

Rudermanöver von 0 : Hart-Bb.

Kurve	Rudermanöver von A	Geschwindigkeit (sm/h)
	A	0
1	Hart-Stb.	13
2	Hart-Stb.	15
3	Hart-Stb.	17
4	Mittschiffs	13
5	Mittschiffs	15
6	Mittschiffs	17
7	Hart-Bb.	13
8	Hart-Bb.	15
9	Hart-Bb.	17

Manöverabstand (sm)



An näherungsrichtung (Grad)

Bild 38

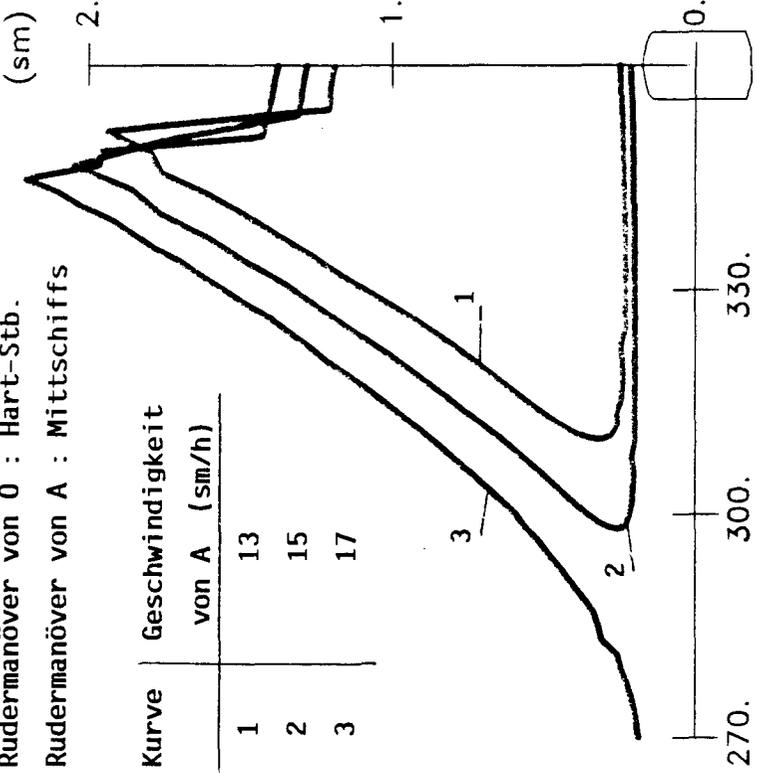
$V_0 = 17 \text{ sm/h}$

Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Rudermanöver von A : Mittschiffs

Kurve	Geschwindigkeit von A (sm/h)
1	13
2	15
3	17

Manöverabstand (sm)



An näherungsrichtung (Grad)

Bild 39

Manöverabstand

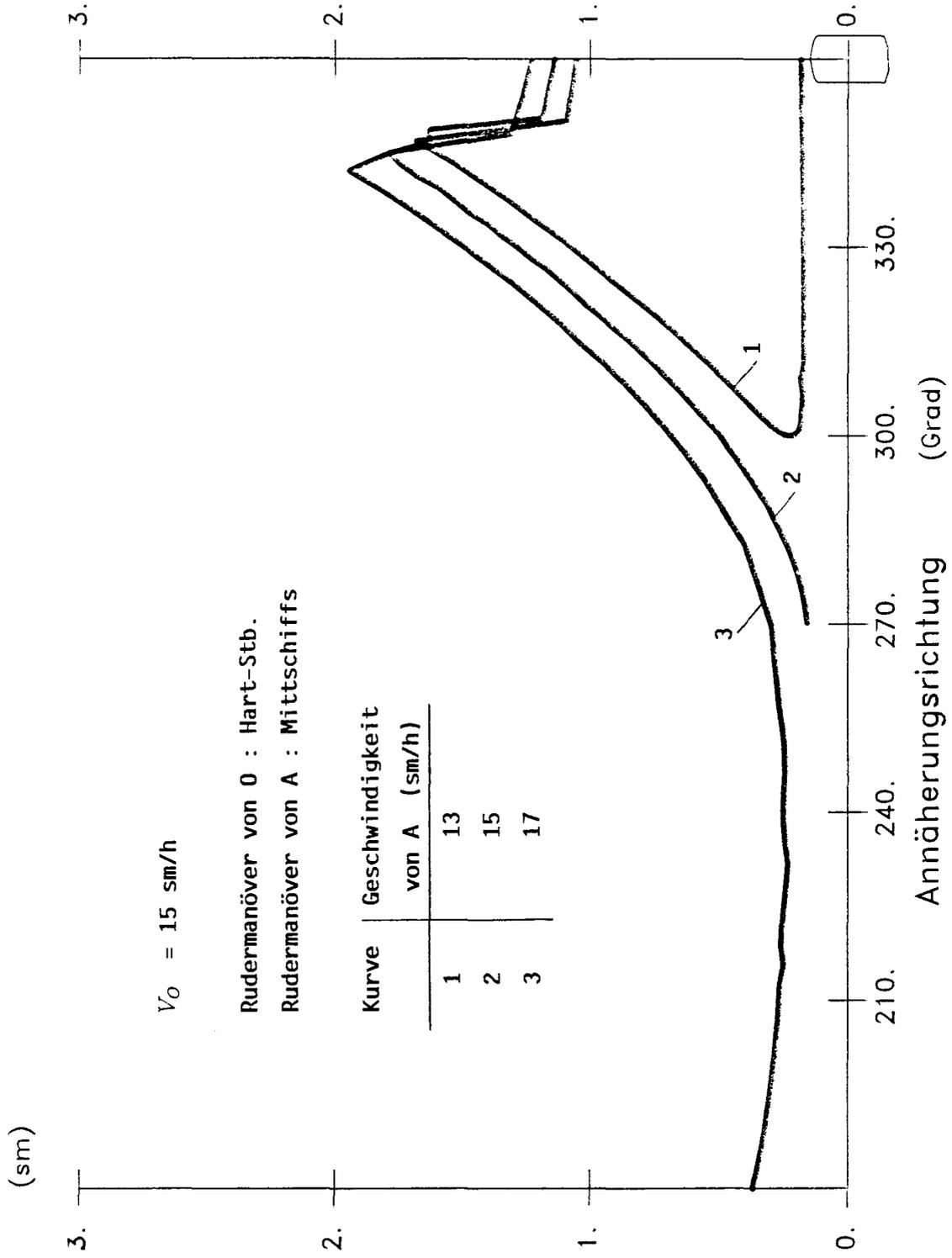


Bild 40

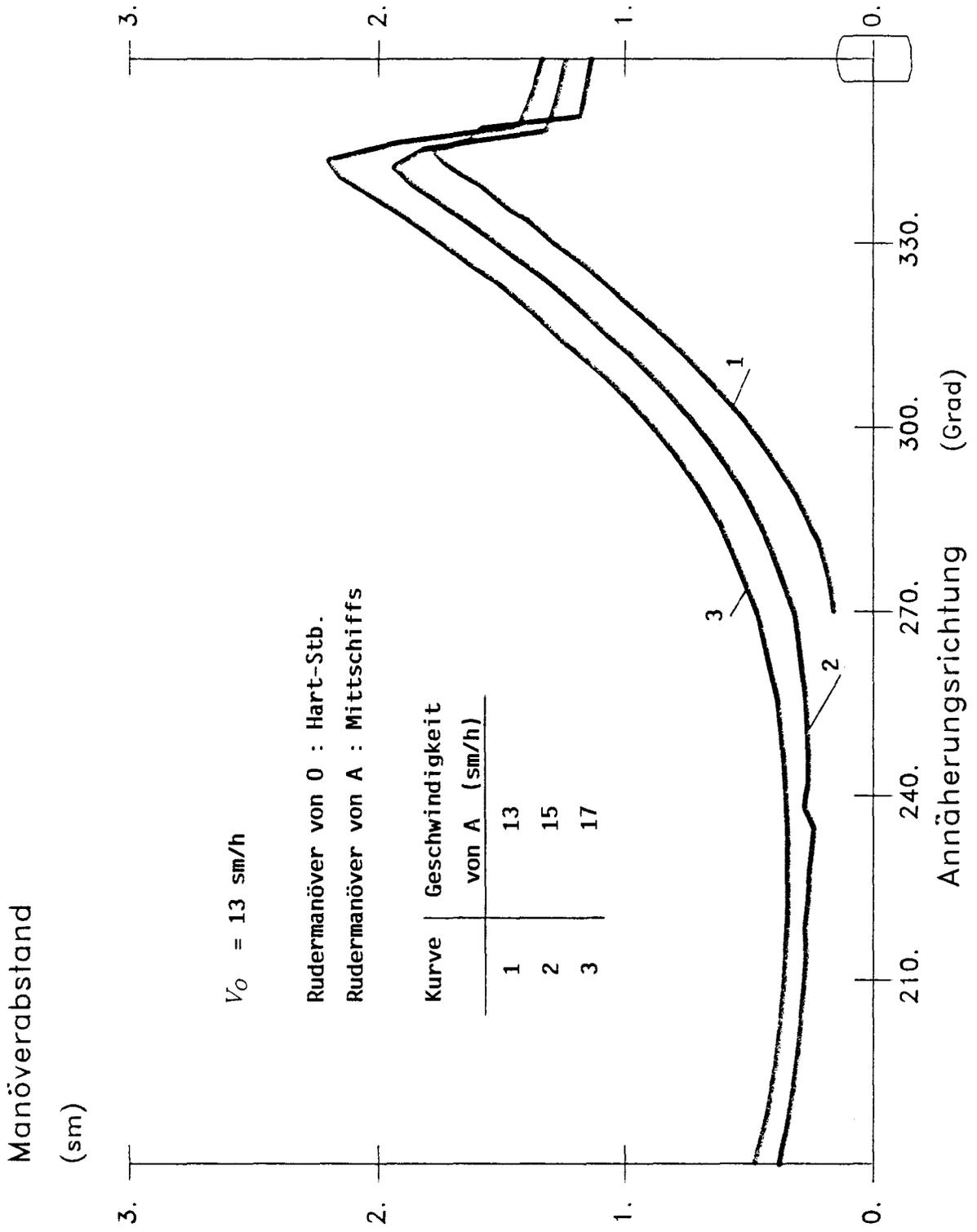
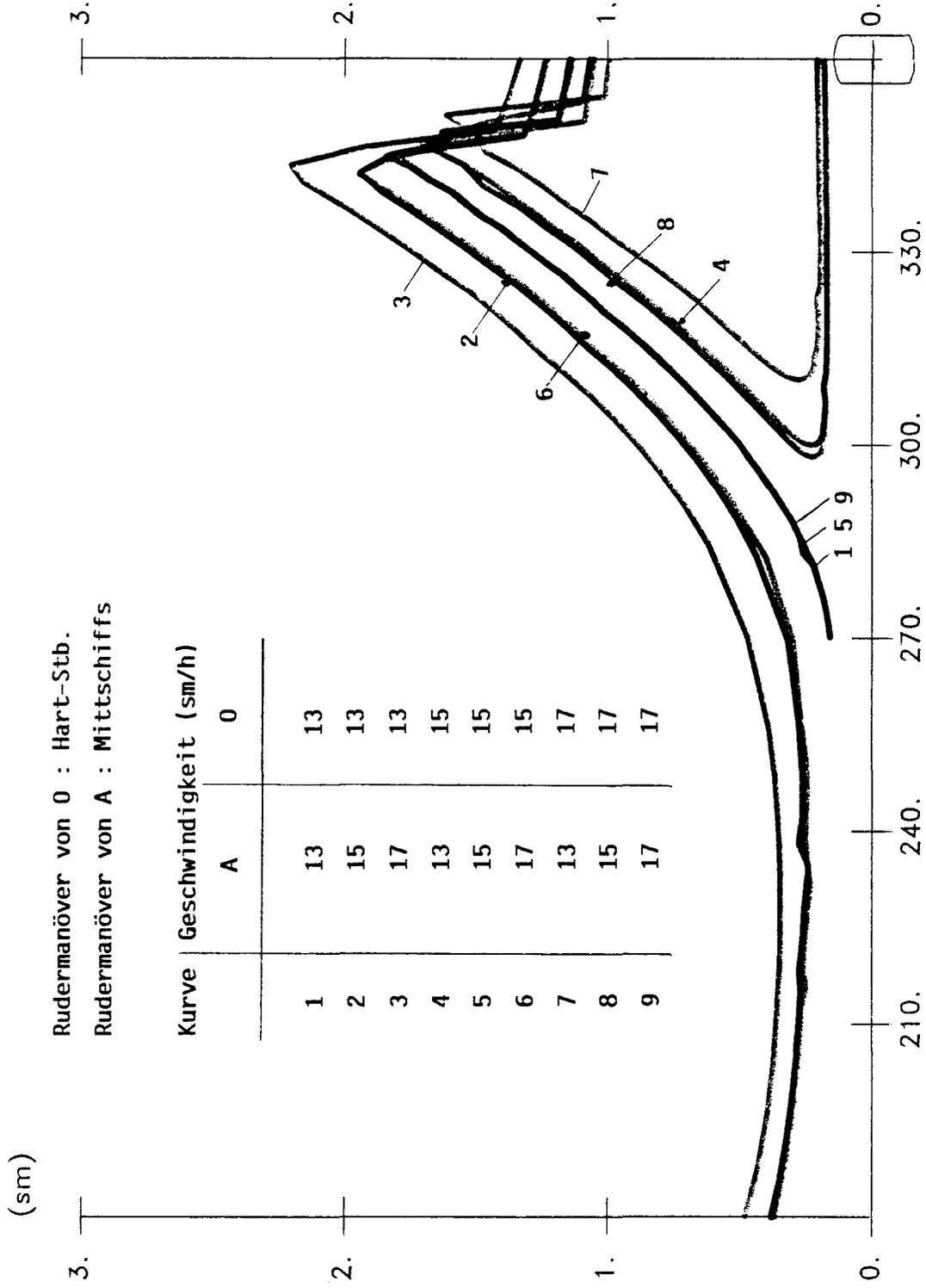


Bild 41

# Manöverabstand



Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.  
 Rudermanöver von A : Mittschiffs

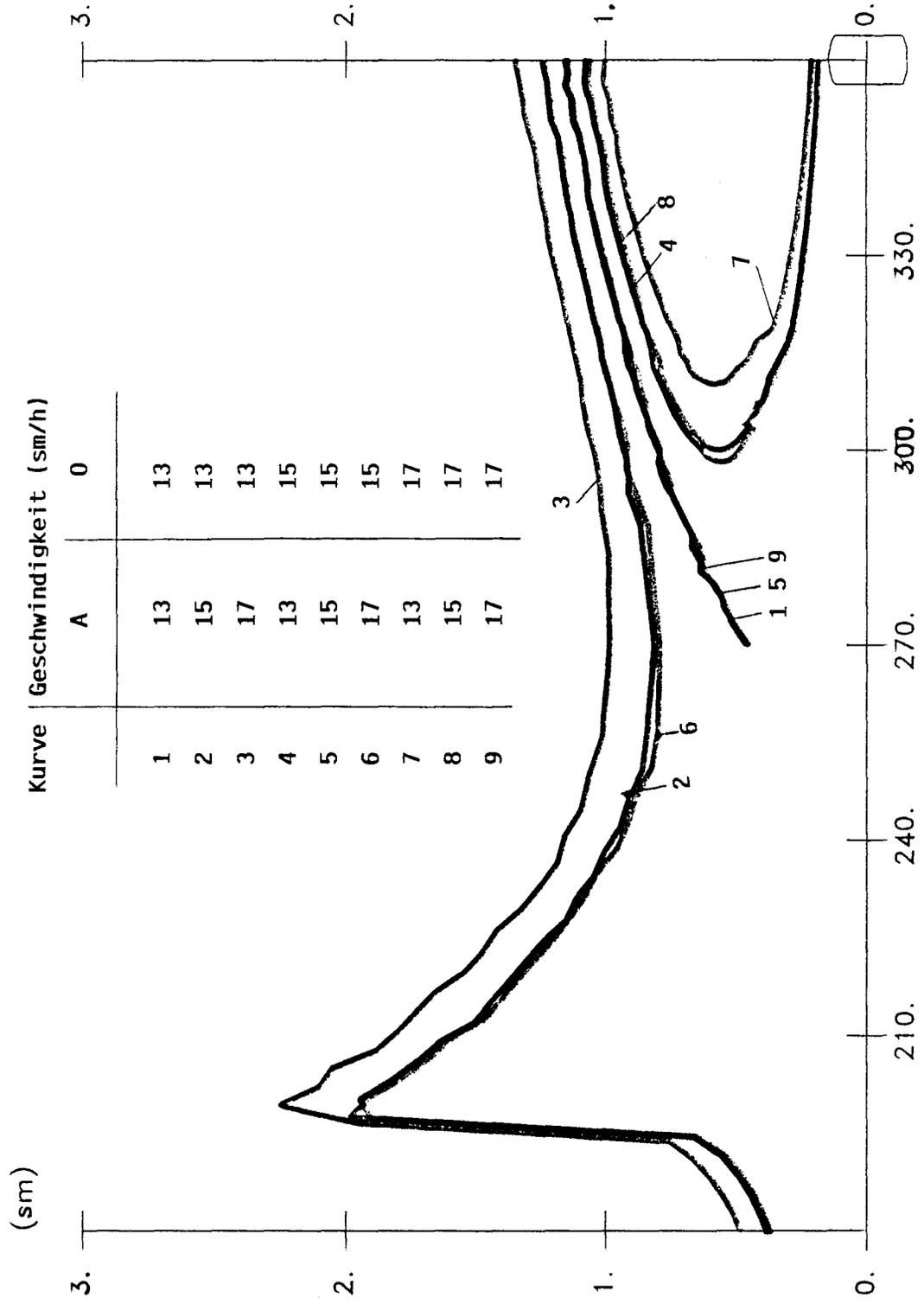
Kurve	Geschwindigkeit (sm/h)	
	A	0
1	13	13
2	15	13
3	17	13
4	13	15
5	15	15
6	17	15
7	13	17
8	15	17
9	17	17

Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 42

Rudermanöver von 0 : Hart-Bb.  
 Rudermanöver von A : Mittschiffs

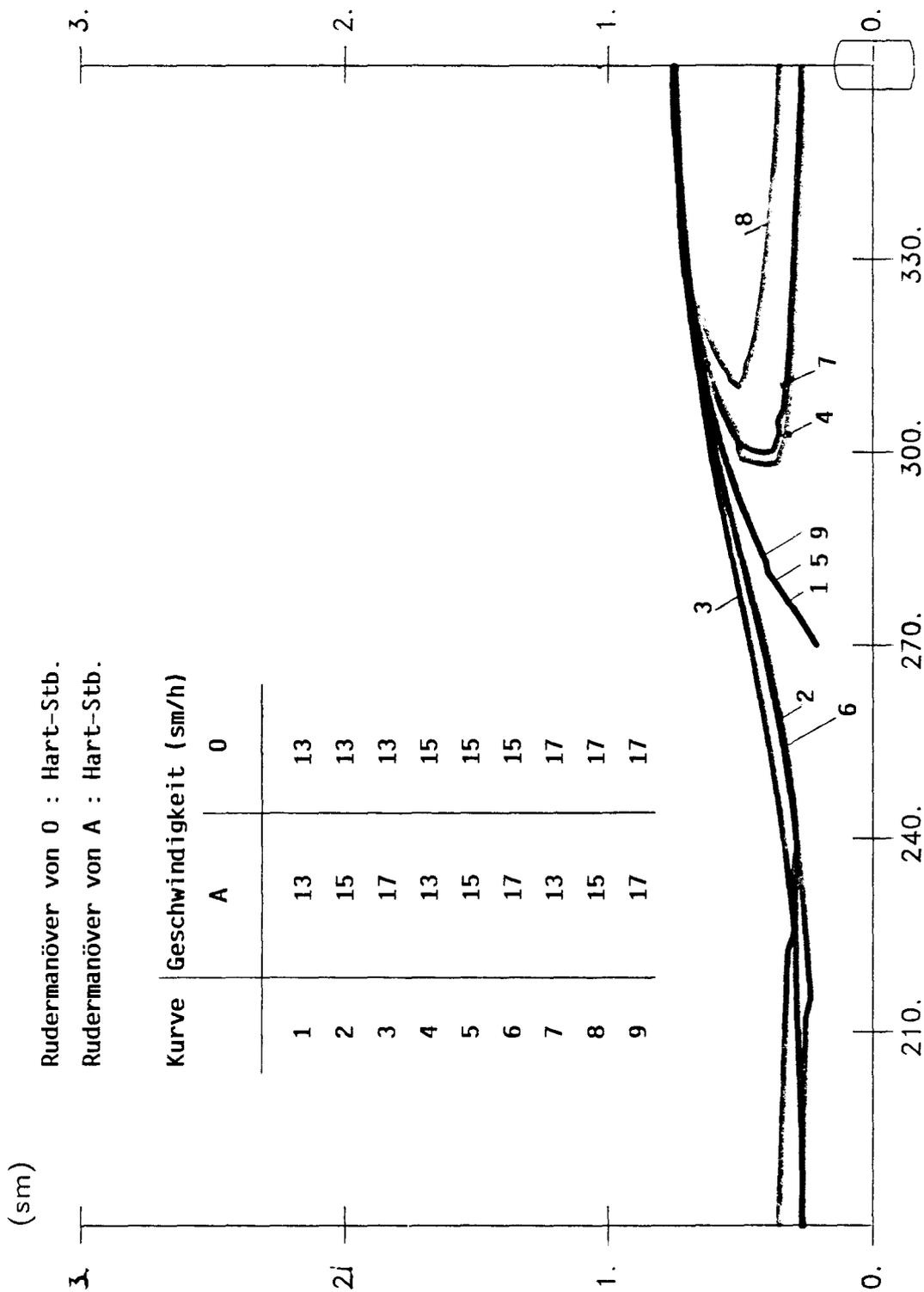
Manöverabstand



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 43

Manöverabstand



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 44

# Manöverabstand

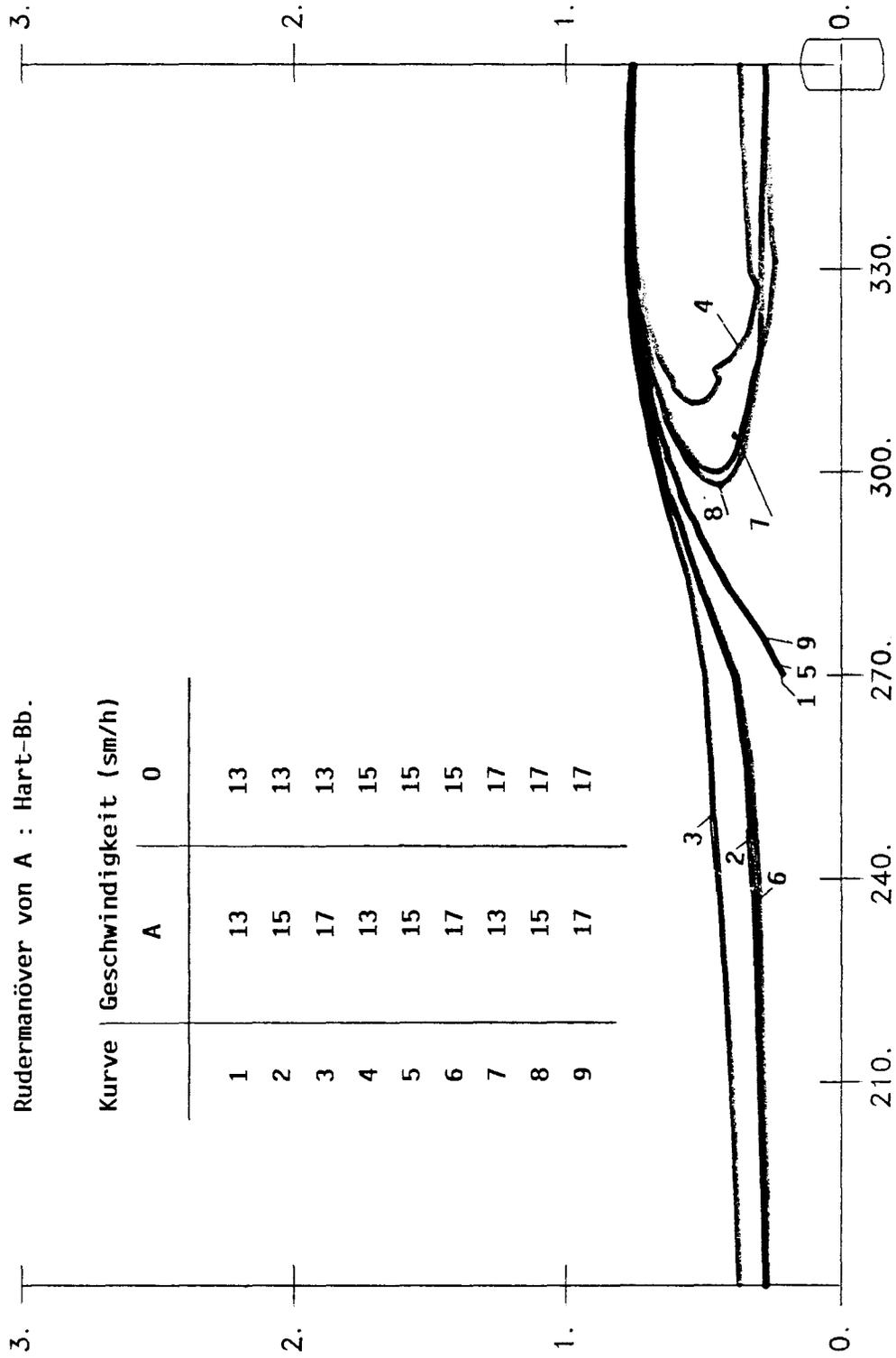
(sm)

Rudermanöver von 0 : Hart-Bb.

Rudermanöver von A : Hart-Bb.

Kurve | Geschwindigkeit (sm/h)

	A	0
1	13	13
2	15	13
3	17	13
4	13	15
5	15	15
6	17	15
7	13	17
8	15	17
9	17	17



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 45

# Manöverabstand

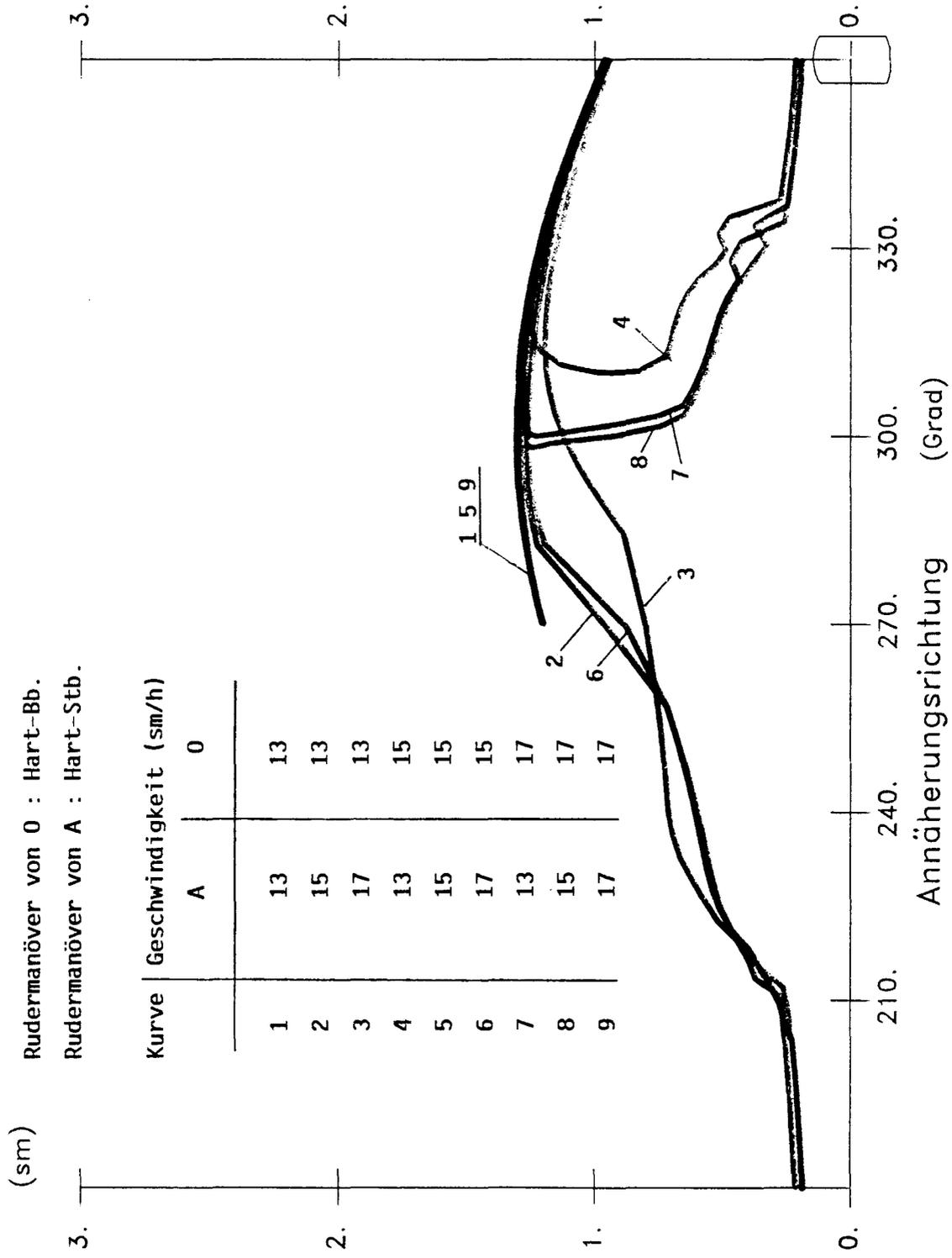


Bild 46

### Manöverabstand

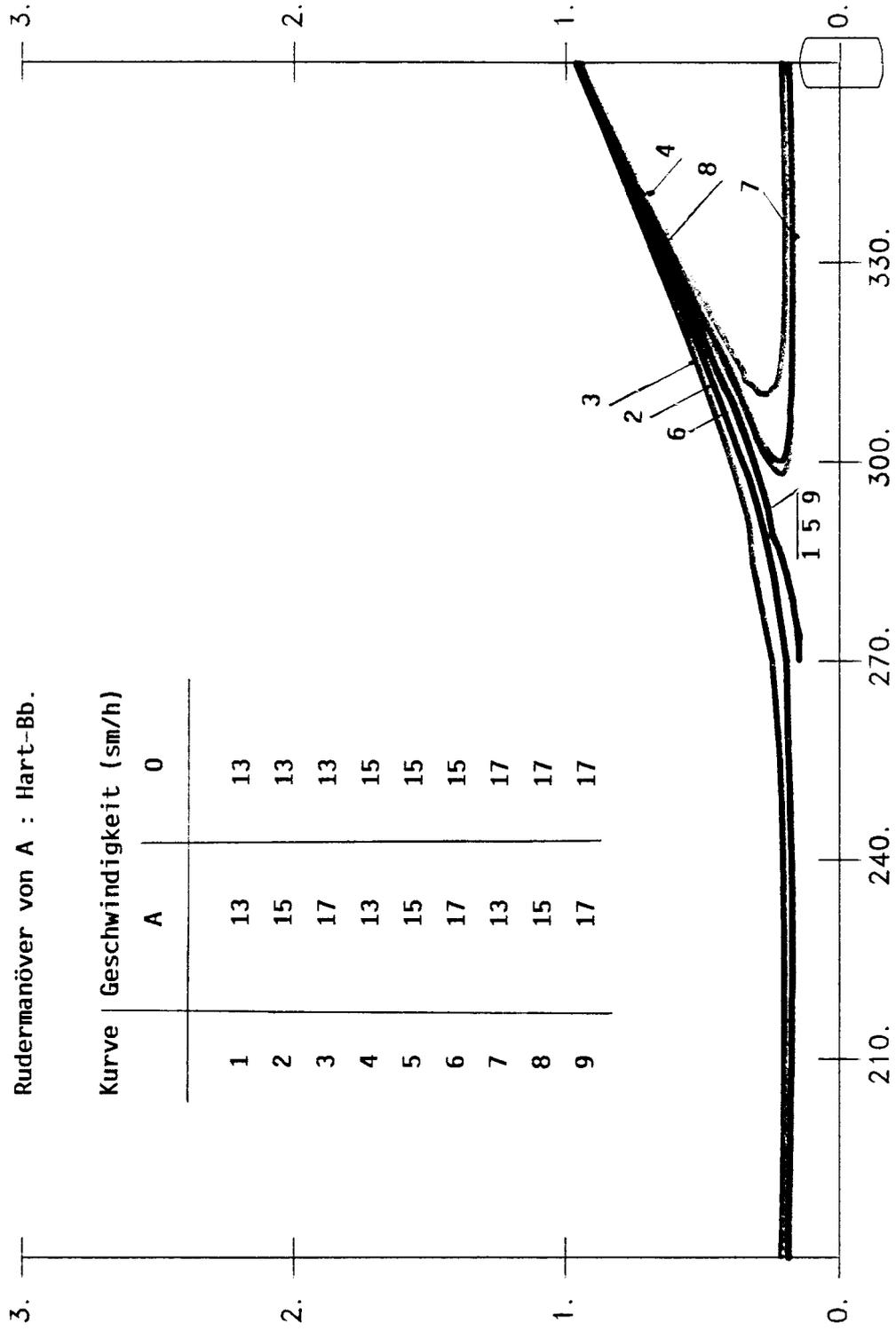
(sm)

Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Rudermanöver von A : Hart-Bb.

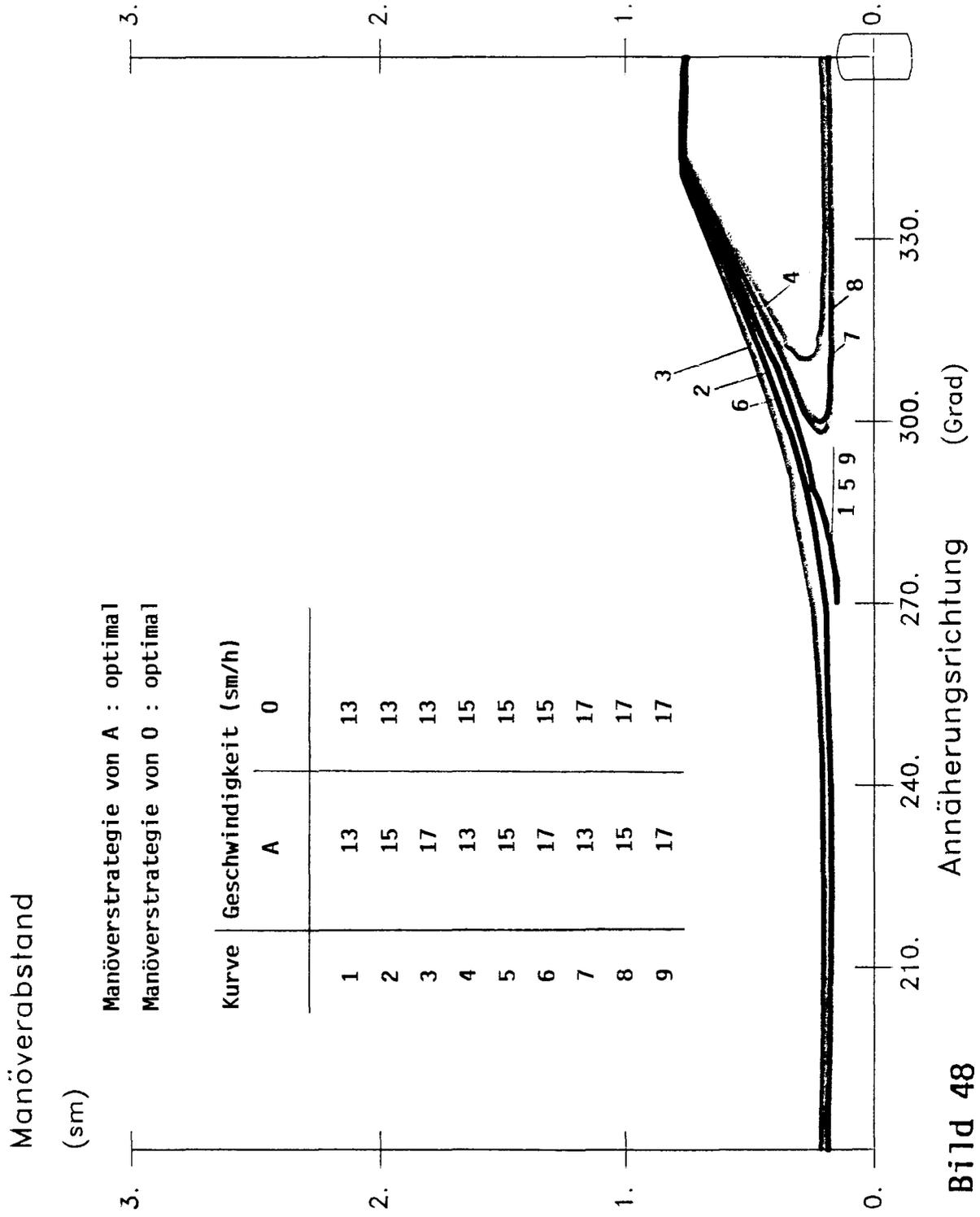
Kurve | Geschwindigkeit (sm/h)

	A	0
1	13	13
2	15	13
3	17	13
4	13	15
5	15	15
6	17	15
7	13	17
8	15	17
9	17	17



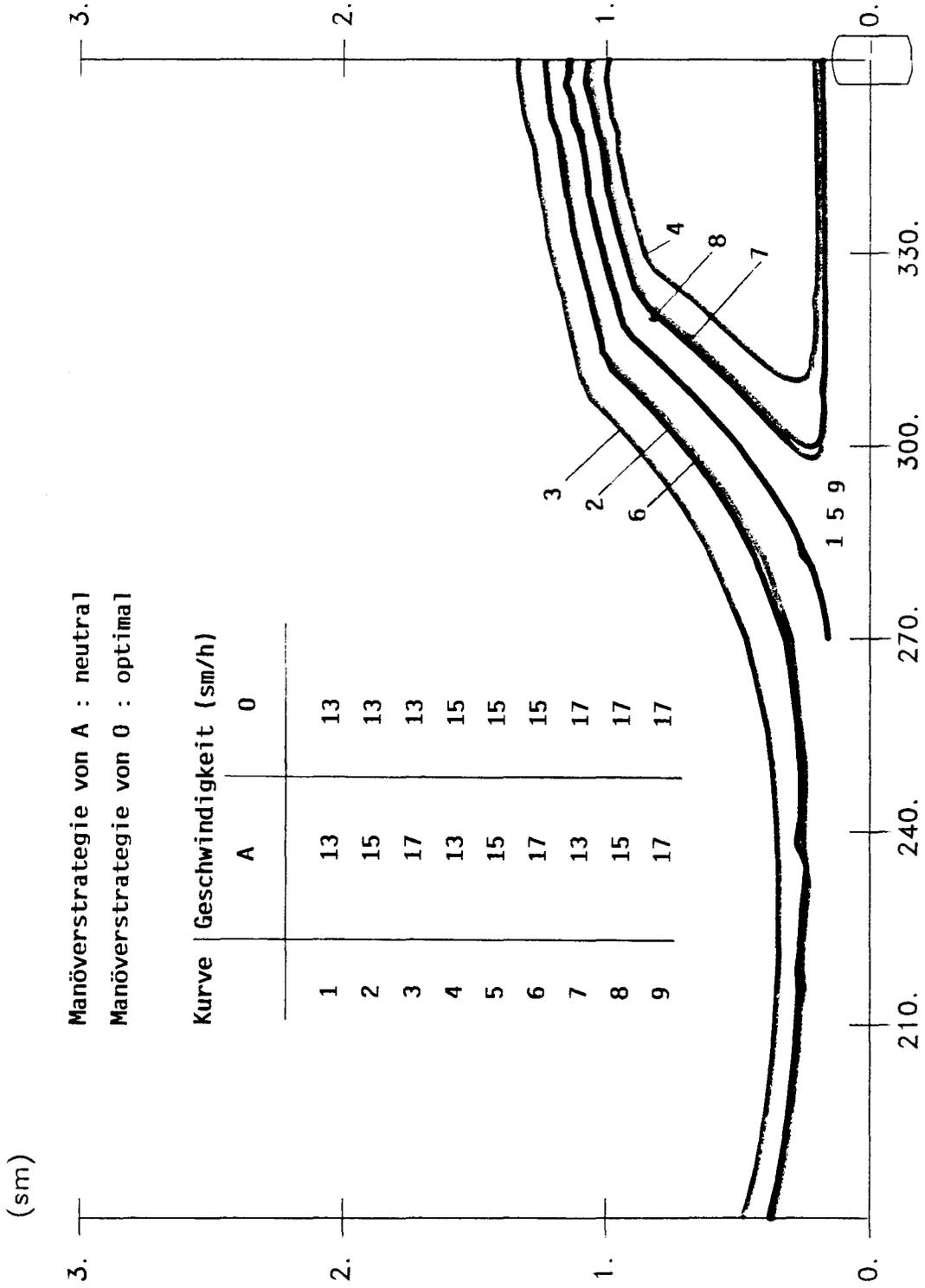
Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 47



**Bild 48**

Manöverabstand



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 49

Manöverstrategie von A : pessimal  
 Manöverstrategie von O : optimal

Manöverabstand  
 (sm)

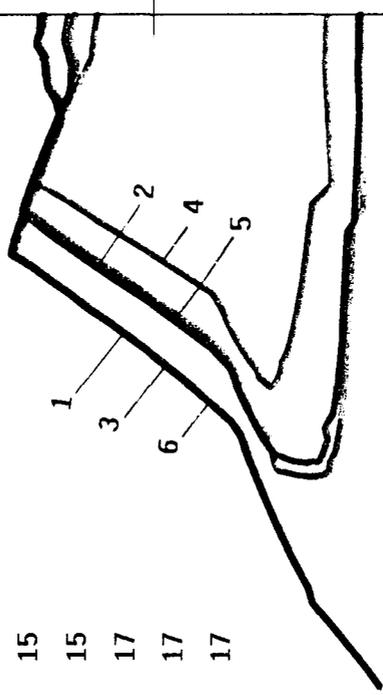
(sm)

Kurve Geschwindigkeit (sm/h)

Kurve	A	0
1	13	13
2	13	15
3	15	15
4	13	17
5	15	17
6	17	17

2.

1.



0.

270.

300.

330.

Annäherungsrichtung  
 (Grad)

Bild 50

$V_O = 15 \text{ sm/h}$

$V_A = 15 \text{ sm/h}$

Maschinenmanöver von 0 : Voll Zurück

Maschinenmanöver von A : Voll Voraus

Rudermanöver von A : Mittschiffs

Kurve	Rudermanöver von 0
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

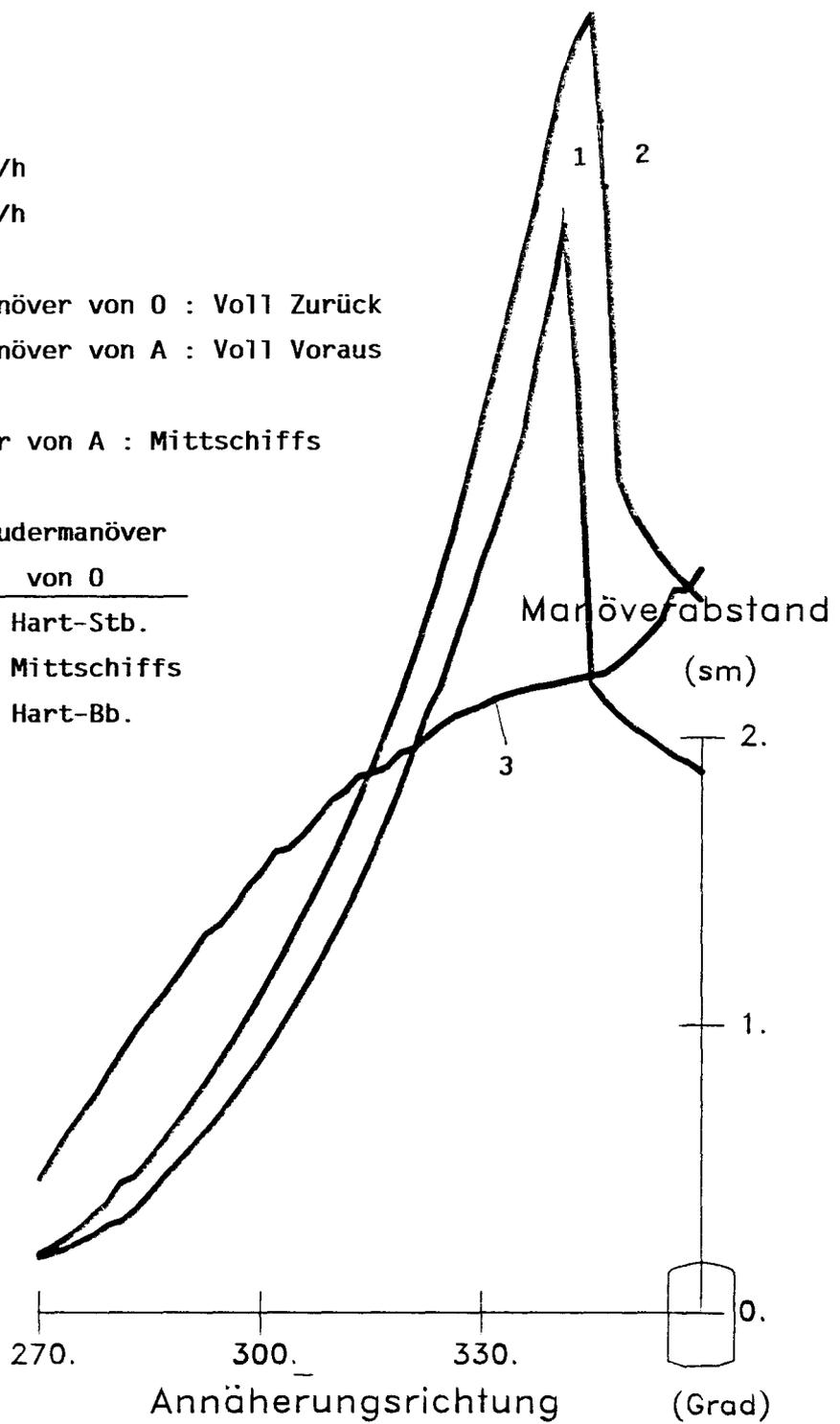


Bild 51

$V_O = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 15 \text{ sm/h}$

Maschinenmanöver von 0 : Voll Zurück  
 Maschinenmanöver von A : Voll Voraus

Manöverabstand

Rudermanöver von A : Hart-Bb.

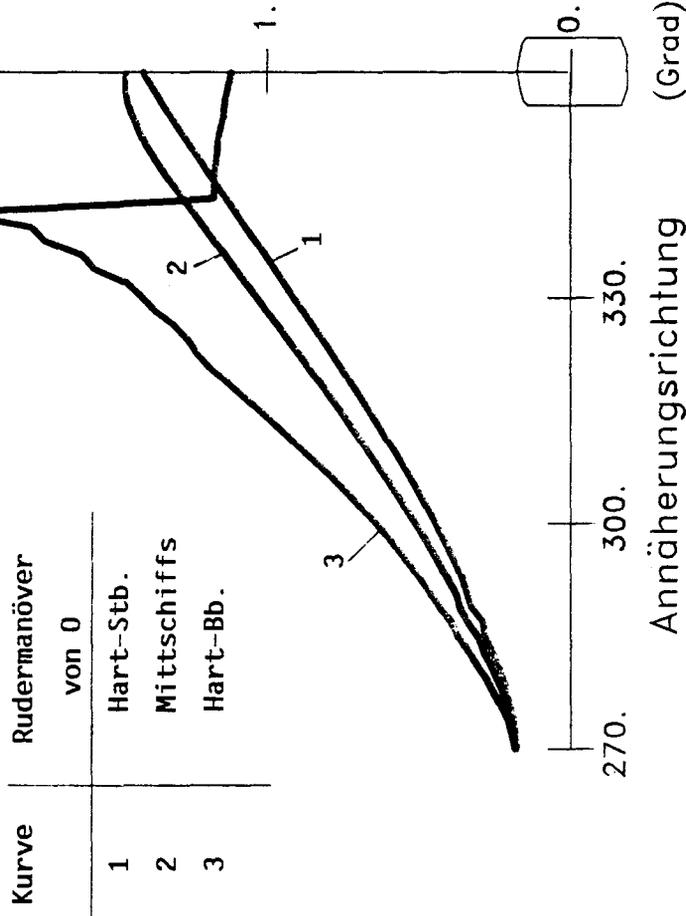


Bild 52

$V_O = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 15 \text{ sm/h}$

Maschinenmanöver von 0 : Voll Zurück  
 Maschinenmanöver von A : Voll Voraus

Manöverabstand

Rudermanöver von A : Hart-Stb.

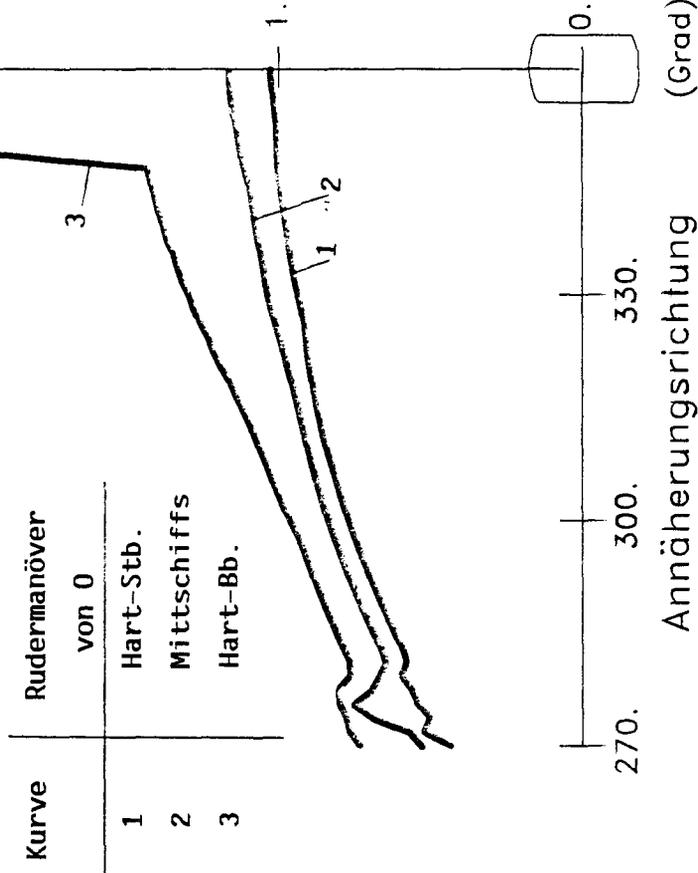


Bild 53

$$V_O = 15 \text{ sm/h}$$

$$V_A = 15 \text{ sm/h}$$

Maschinenmanöver von 0 : Voll Zurück

Maschinenmanöver von A : Voll Zurück

Rudermanöver von A : Mittschiffs

Kurve	Rudermanöver von 0
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

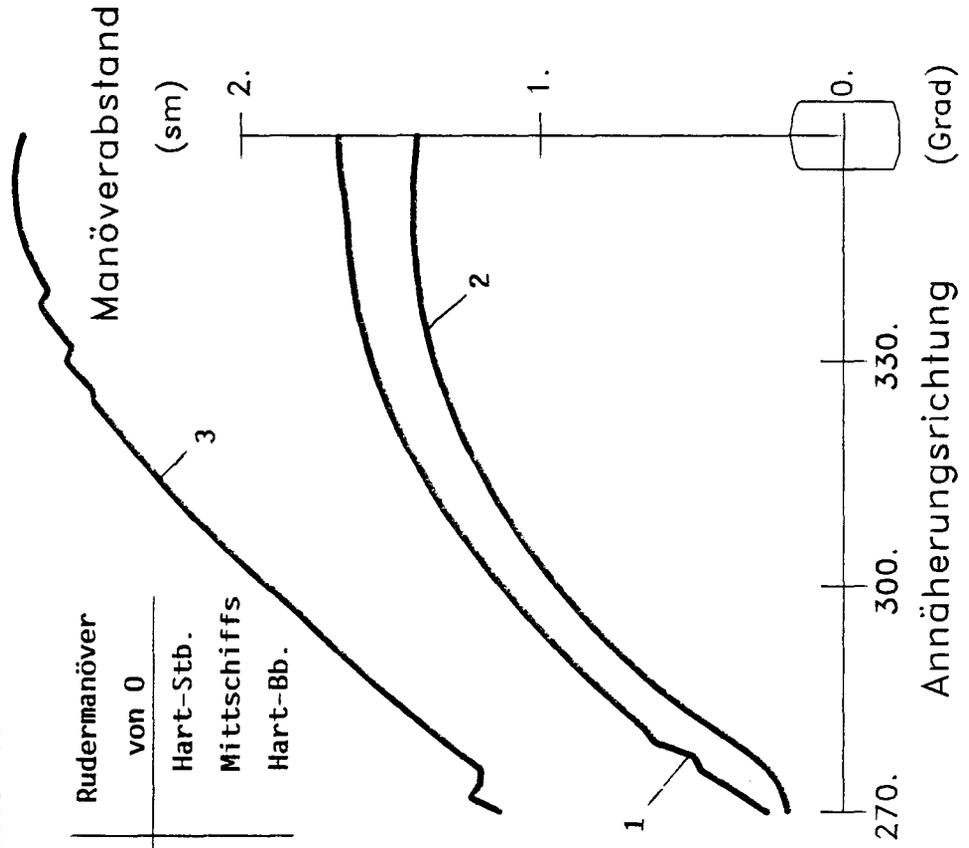


Bild 54

$$V_O = 15 \text{ sm/h}$$

$$V_A = 15 \text{ sm/h}$$

Maschinenmanöver von 0 : Voll Zurück

Maschinenmanöver von A : Voll Zurück

Rudermanöver von A : Hart-Bb.

Kurve	Rudermanöver von 0
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

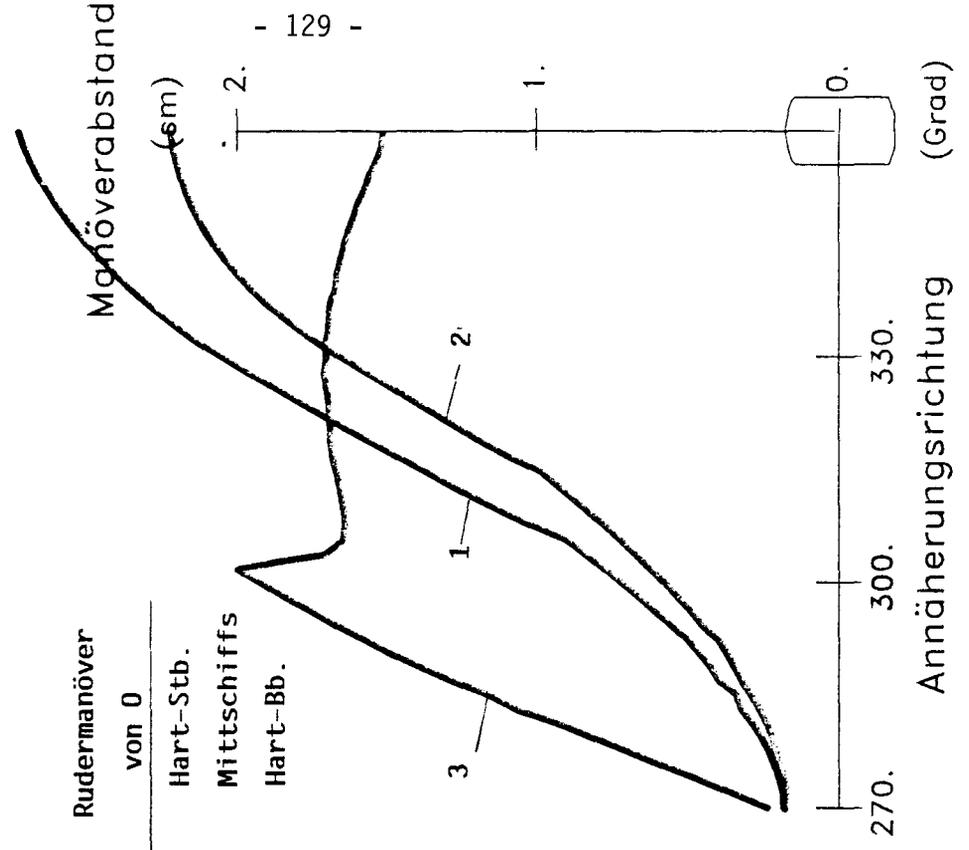


Bild 55

$V_0 = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 15 \text{ sm/h}$

Maschinenmanöver von 0 : Voll Zurück  
 Maschinenmanöver von A : Voll Zurück

Rudermanöver von A : Hart-Stb.

Kurve	Rudermanöver von 0
1	Hart-Stb.
2	Mittschiffs
3	Hart-Bb.

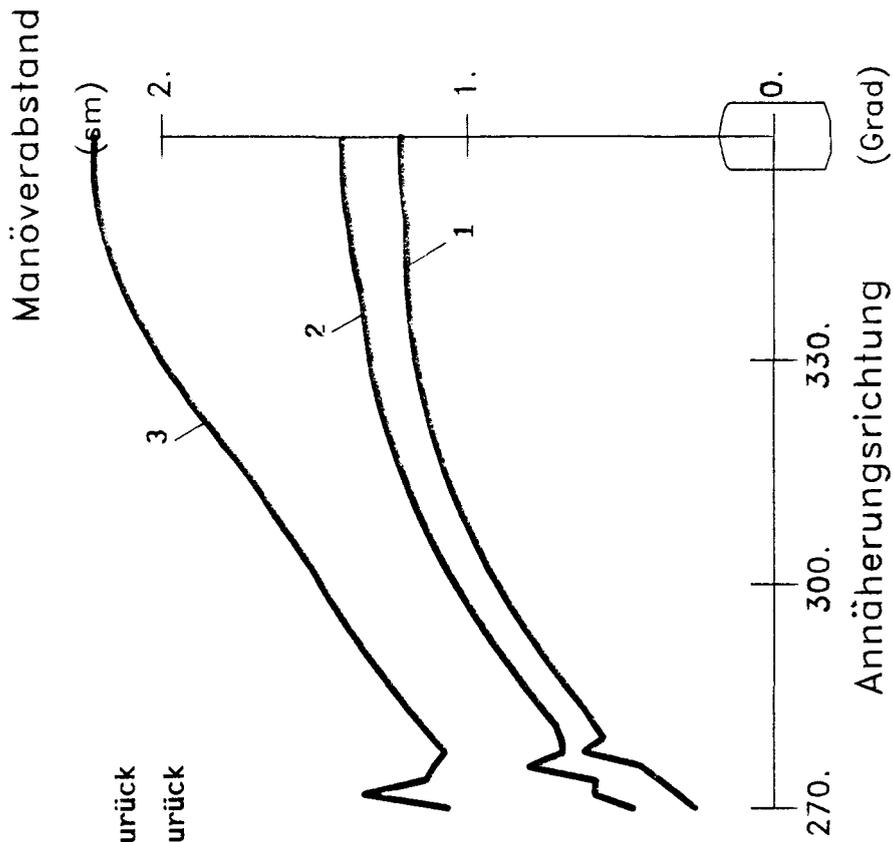
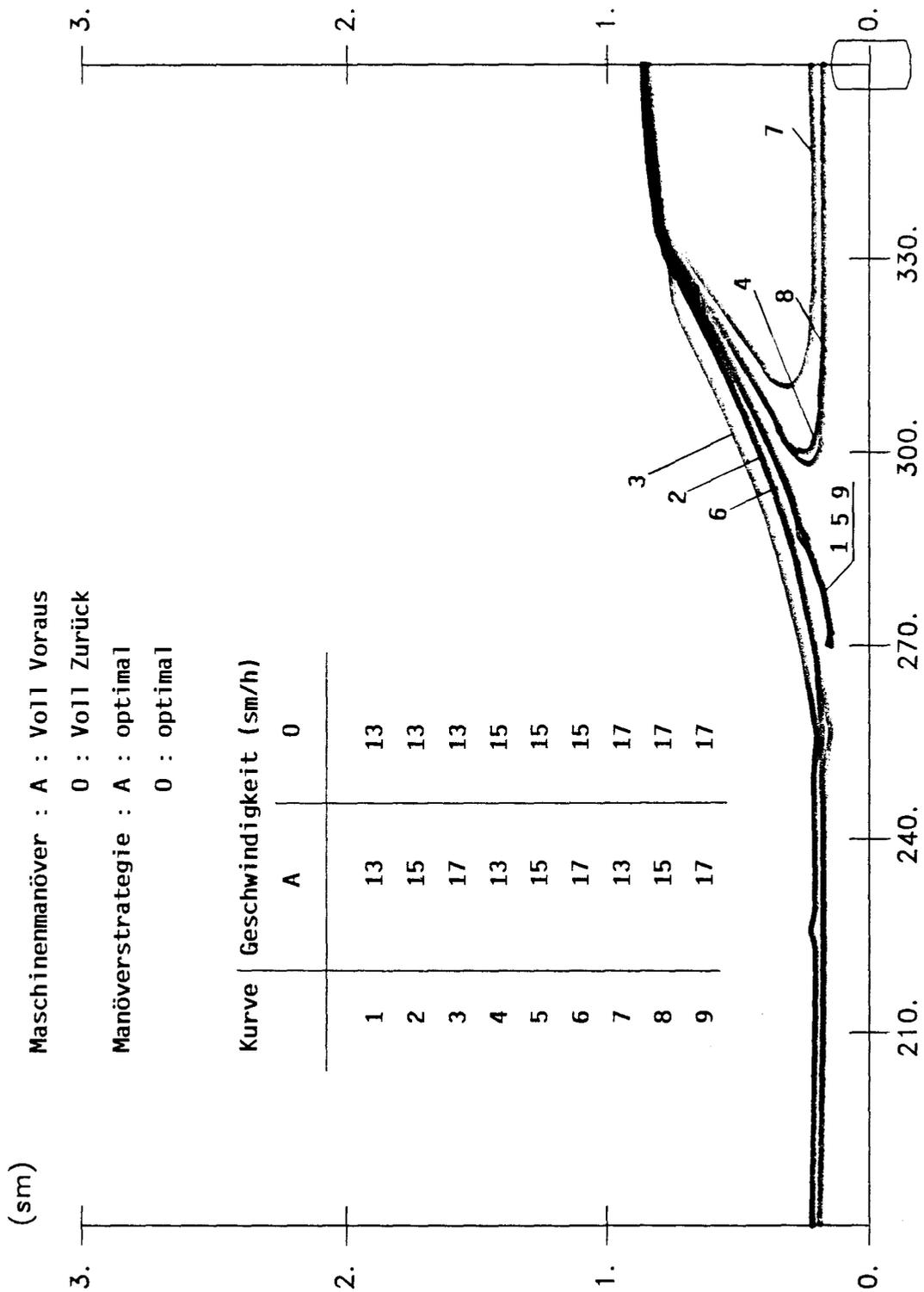


Bild 56

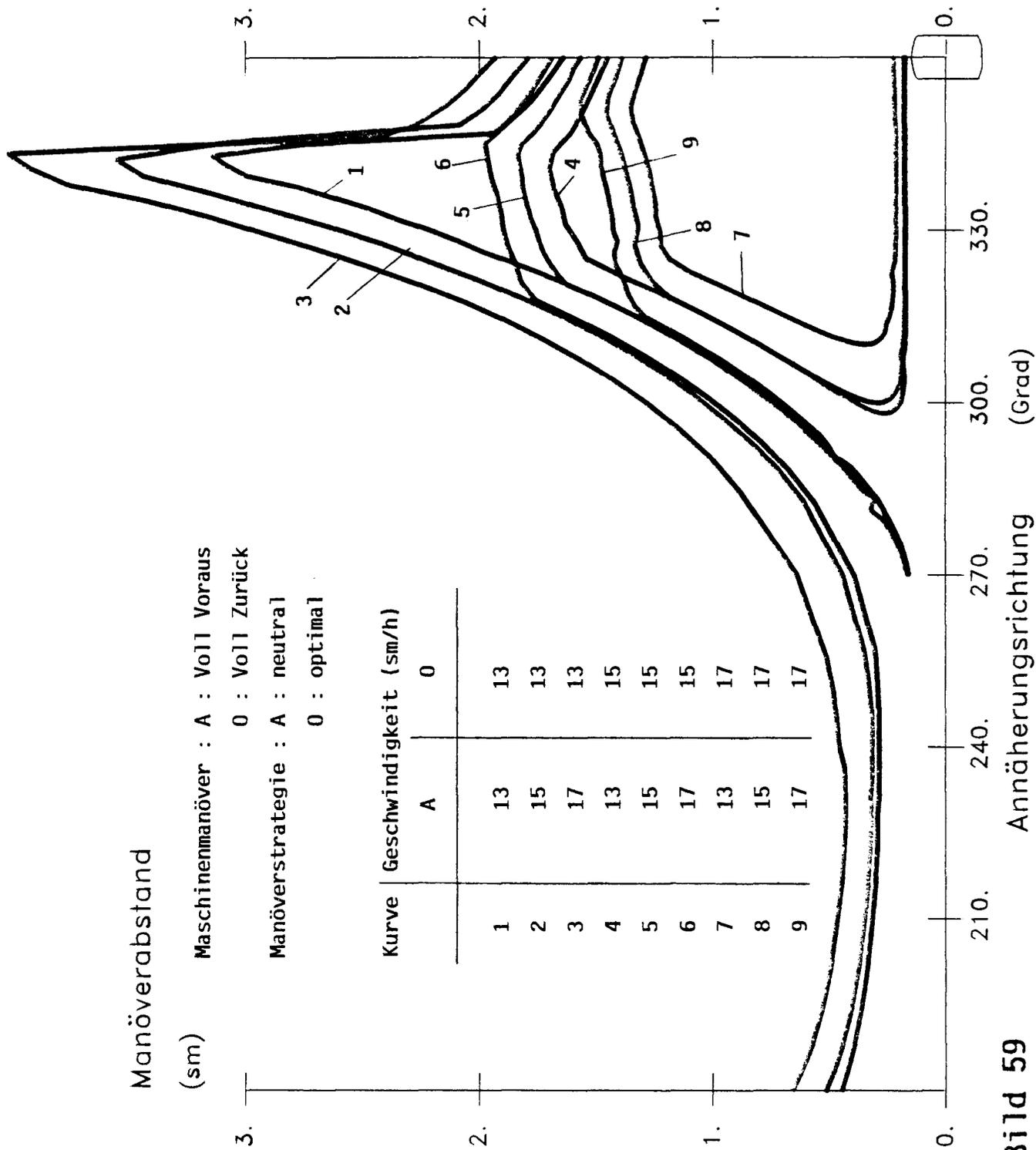
# Manöverabstand



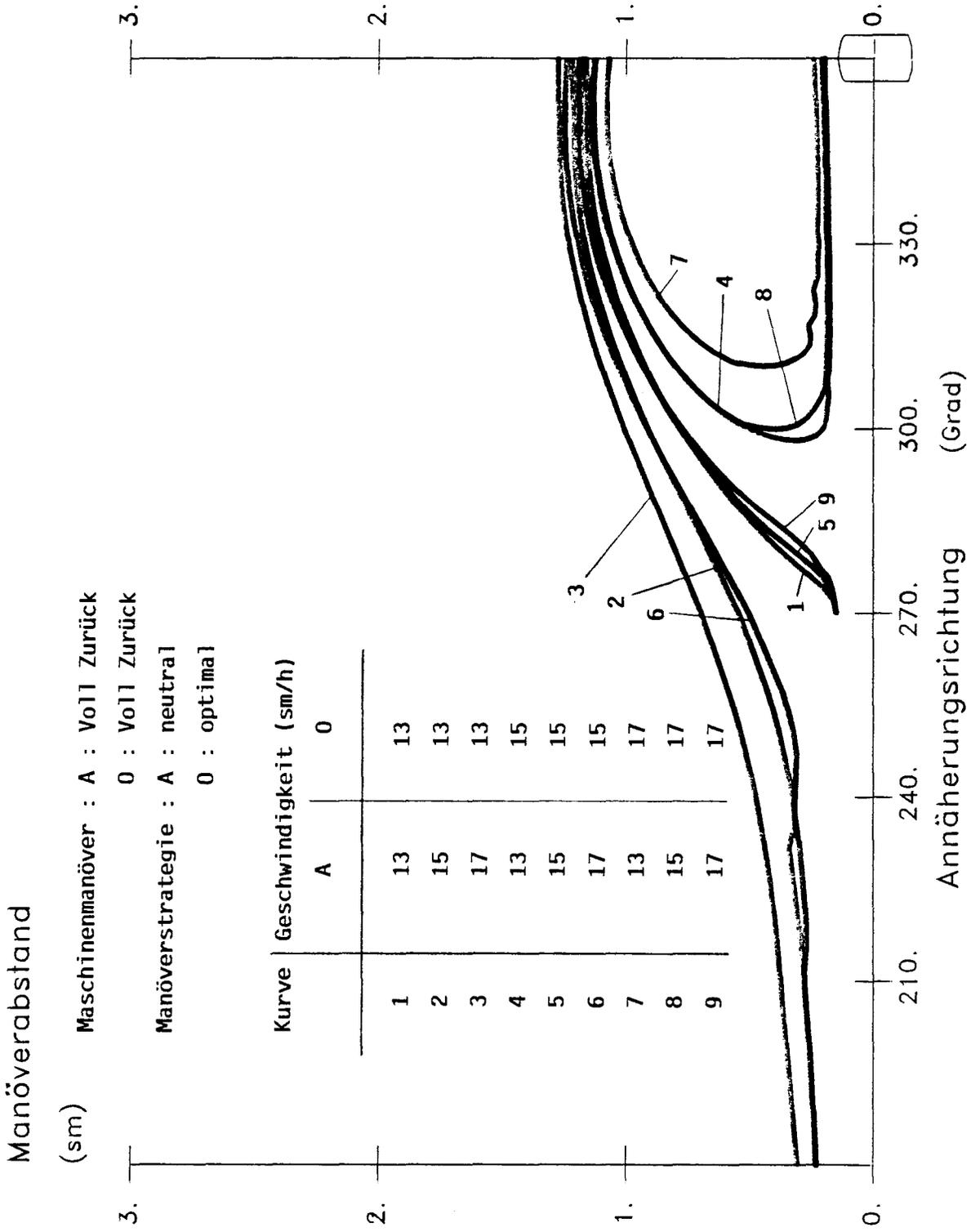
Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 57

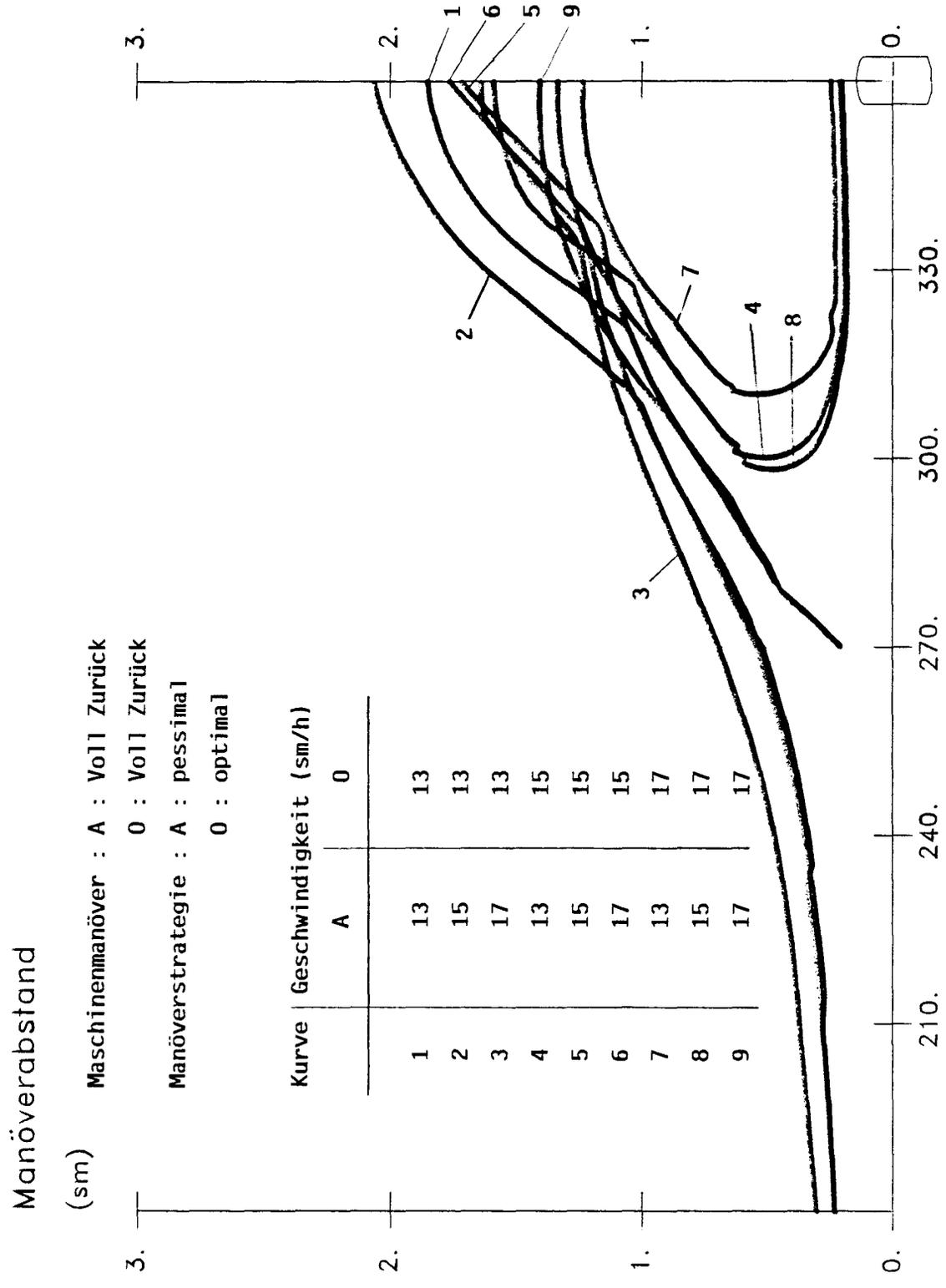




**Bild 59**



**Bild 60**



**Bild 61** Annäherungsrichtung (Grad)

Maschinenmanöver : A : Voll Voraus

0 : Voll Zurück

Manöverstrategie : A : neutral

0 : neutral

Manöverabstand

(sm)

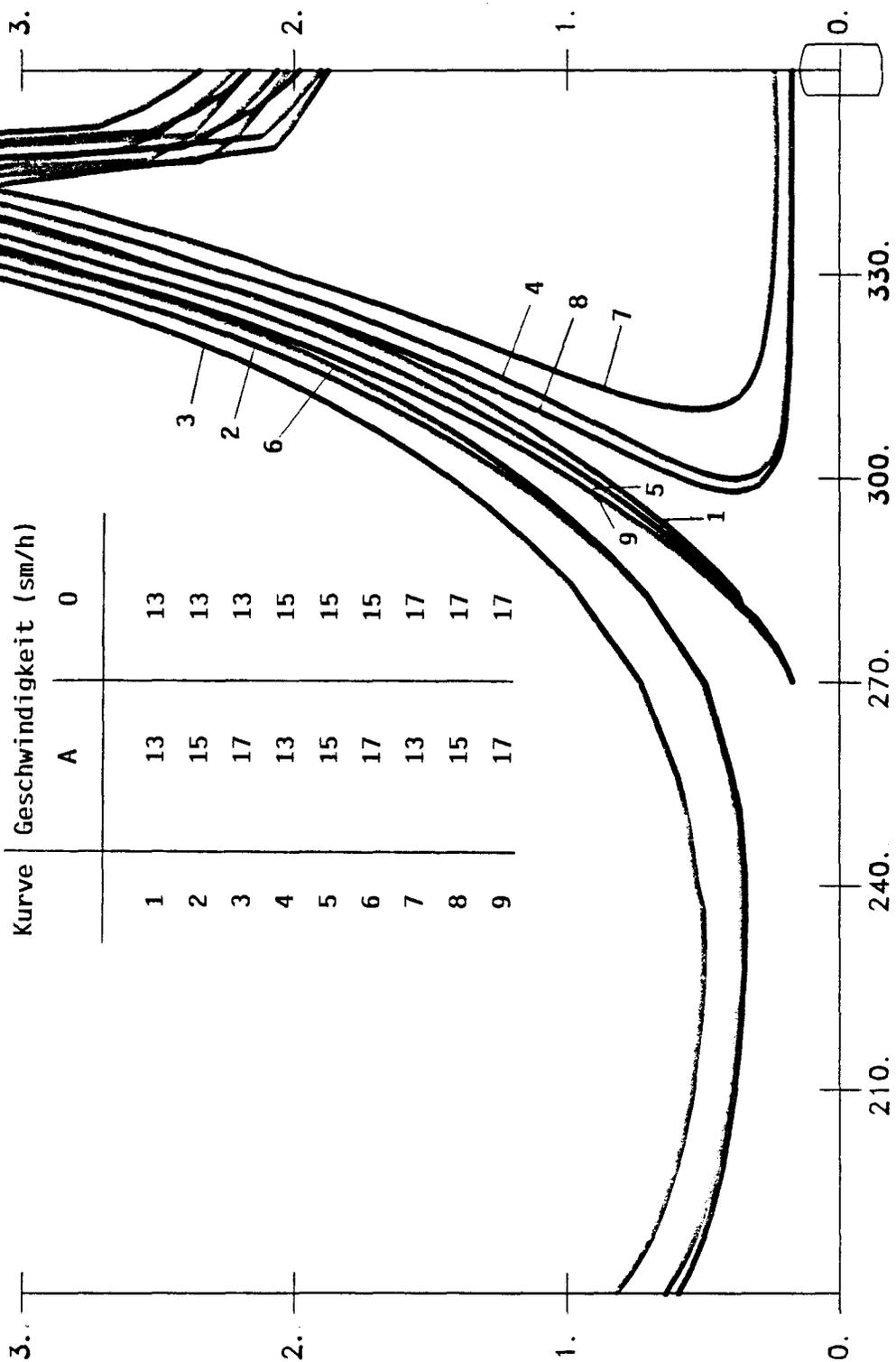


Bild 62 Annäherungsrichtung (Grad)

### Manöverabstand

(sm) Maschinenmanöver : A : Voll Zurück

0 : Voll Zurück

Manöverstrategie : A : neutral

0 : neutral

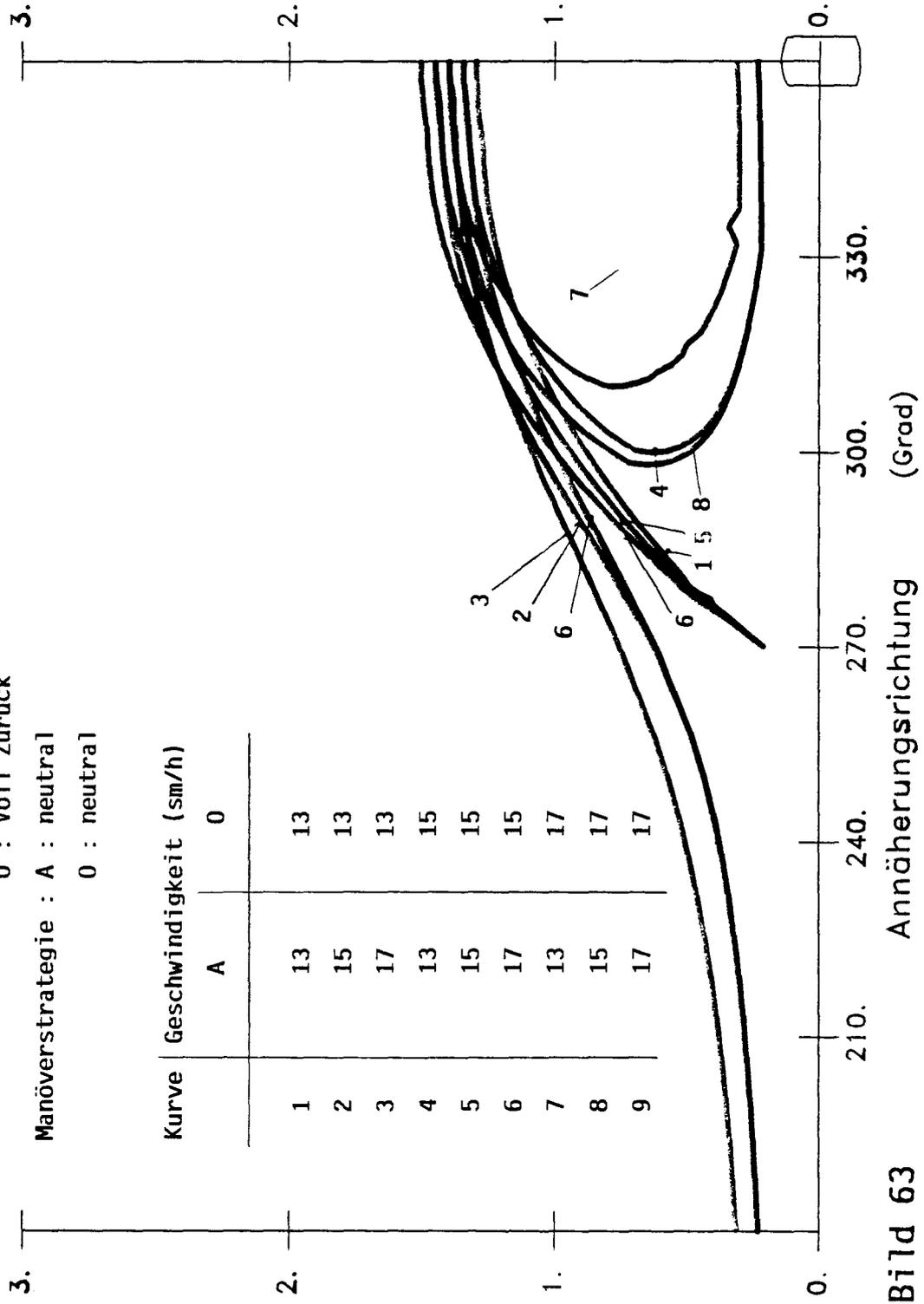


Bild 63

Annäherungsrichtung (Grad)

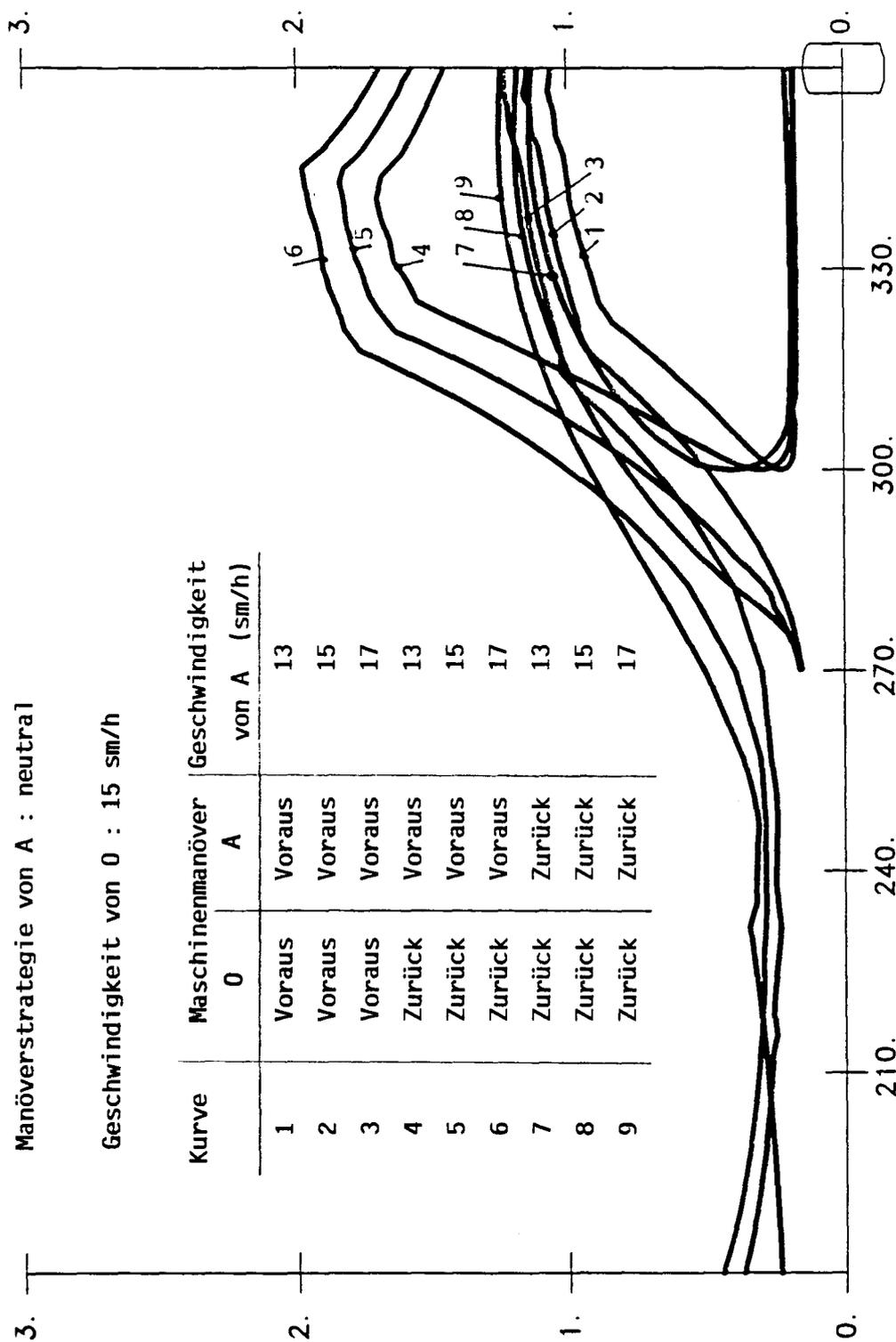
# Manöverabstand

(sm)

Manöverstrategie von 0 : optimal

Manöverstrategie von A : neutral

Geschwindigkeit von 0 : 15 sm/h



Kurve	Maschinenmanöver		Geschwindigkeit von A (sm/h)
	0	A	
1	Voraus	Voraus	13
2	Voraus	Voraus	15
3	Voraus	Voraus	17
4	Zurück	Voraus	13
5	Zurück	Voraus	15
6	Zurück	Voraus	17
7	Zurück	Zurück	13
8	Zurück	Zurück	15
9	Zurück	Zurück	17

Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 64

# Manöverabstand

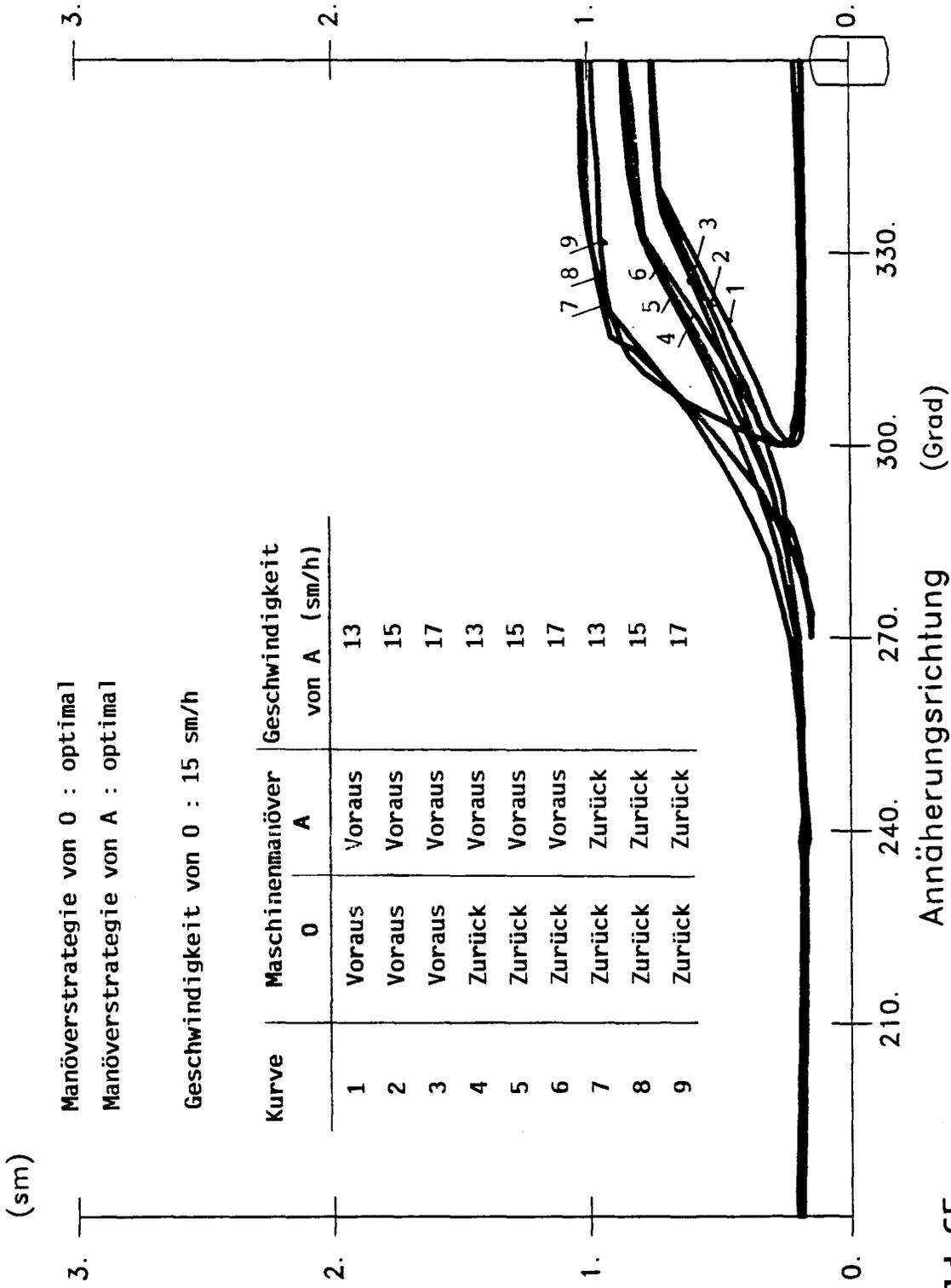


Bild 65

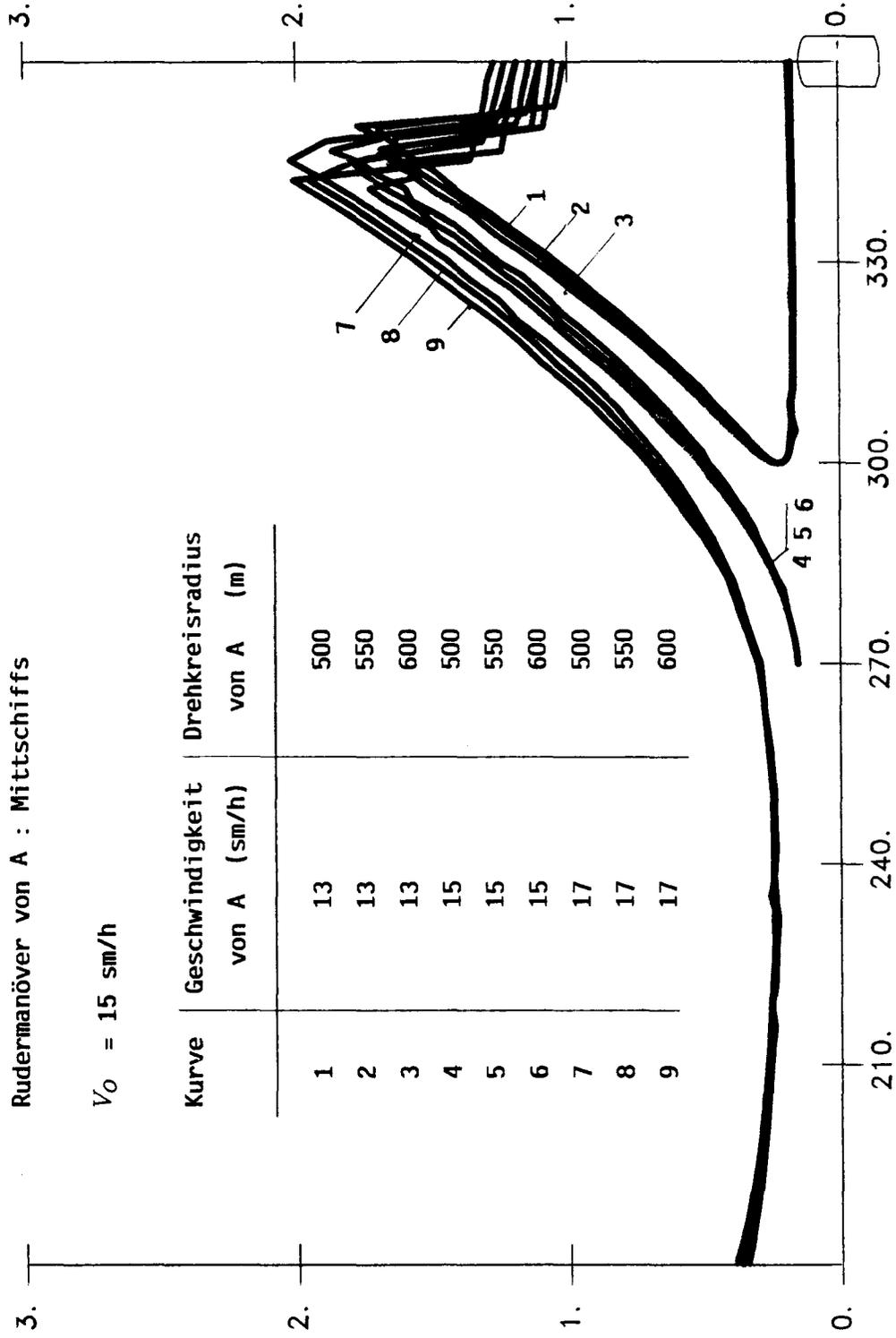
### Manöverabstand

(sm)

Rudermanöver von 0 : Hart-Stb.

Rudermanöver von A : Mittschiffs

$V_0 = 15 \text{ sm/h}$



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 66

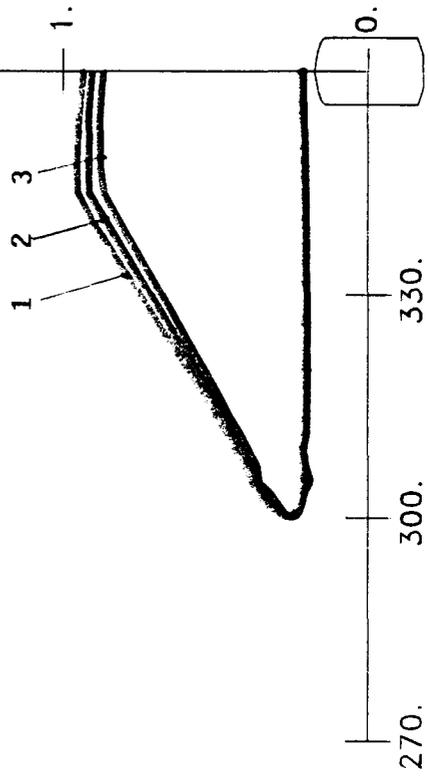
$V_O = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 13 \text{ sm/h}$

Manöverabstand (sm)

Manöverstrategie : A : optimal  
 0 : optimal

Kurve Drehkreisradius  
 von A (m)

- 1 500
- 2 550
- 3 600



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 67

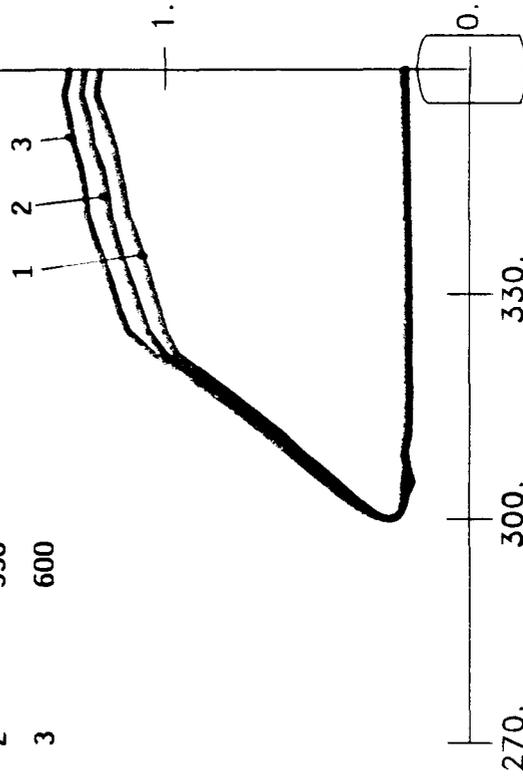
$V_O = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 13 \text{ sm/h}$

Manöverabstand (sm)

Manöverstrategie : A : neutral  
 0 : optimal

Kurve Drehkreisradius  
 von A (m)

- 1 500
- 2 550
- 3 600



Annäherungsrichtung (Grad)

Bild 68

Manöverabstand

$V_O = 15 \text{ sm/h}$   
 $V_A = 13 \text{ sm/h}$

Manöverstrategie : A : pessimal  
 0 : optimal

Kurve	Drehkreisradius von A (m)
1	500
2	550
3	600

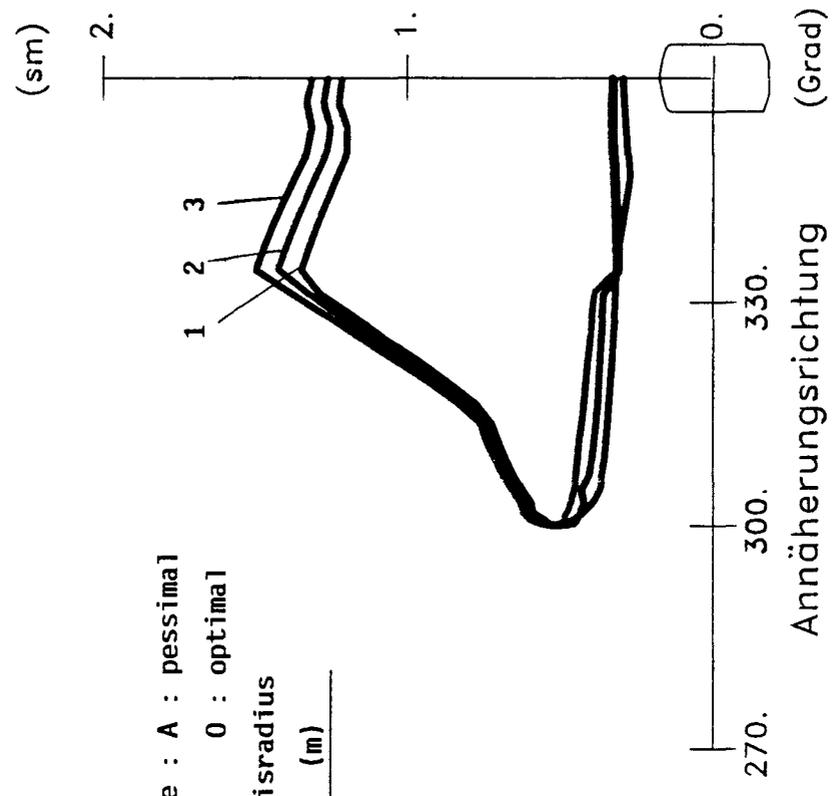
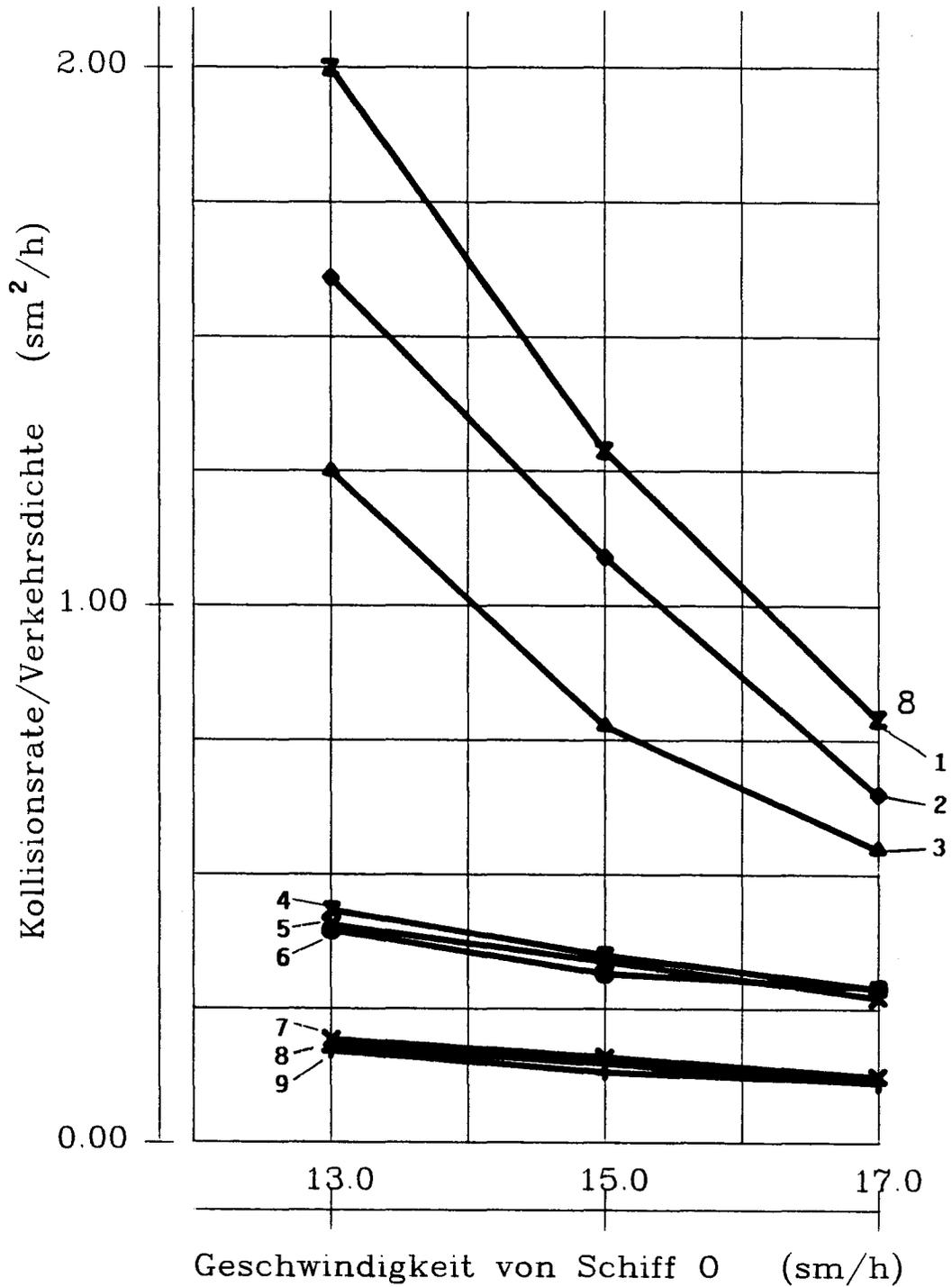


Bild 69

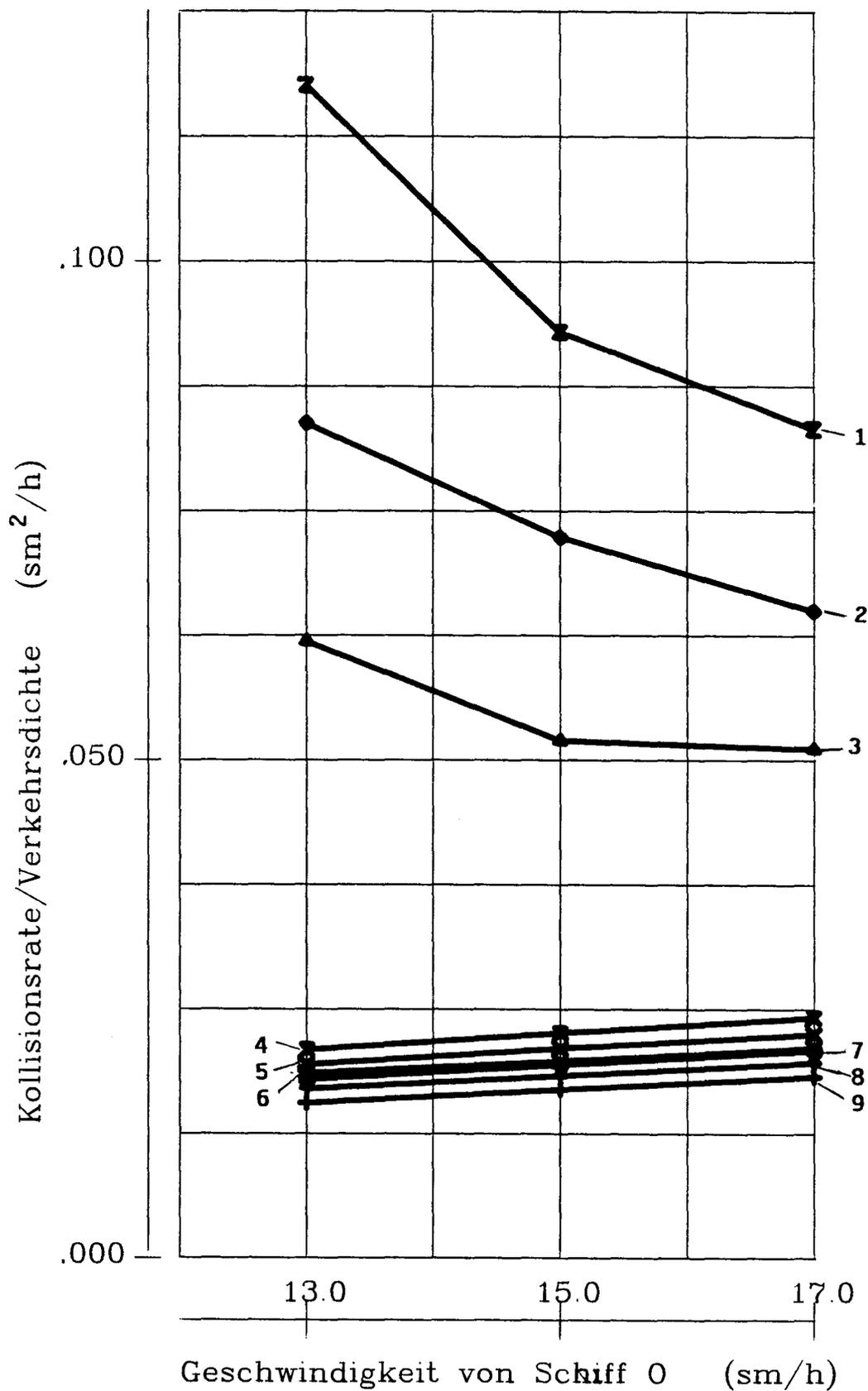


Kurve	Rudermanöver		Geschwindigkeit (sm/h)	
	A	0	A	0
1	Mittschiffs	Hart-Stb.	17	13
2	Mittschiffs	Hart-Stb.	15	13
3	Mittschiffs	Hart-Stb.	13	13
4	Hart-Stb.	Hart-Stb.	17	15
5	Hart-Stb.	Hart-Stb.	15	15
6	Hart-Stb.	Hart-Stb.	13	15
7	Hart-Bb.	Hart-Stb.	17	17
8	Hart-Bb.	Hart-Stb.	15	17
9	Hart-Bb.	Hart-Stb.	13	17

Bild 70

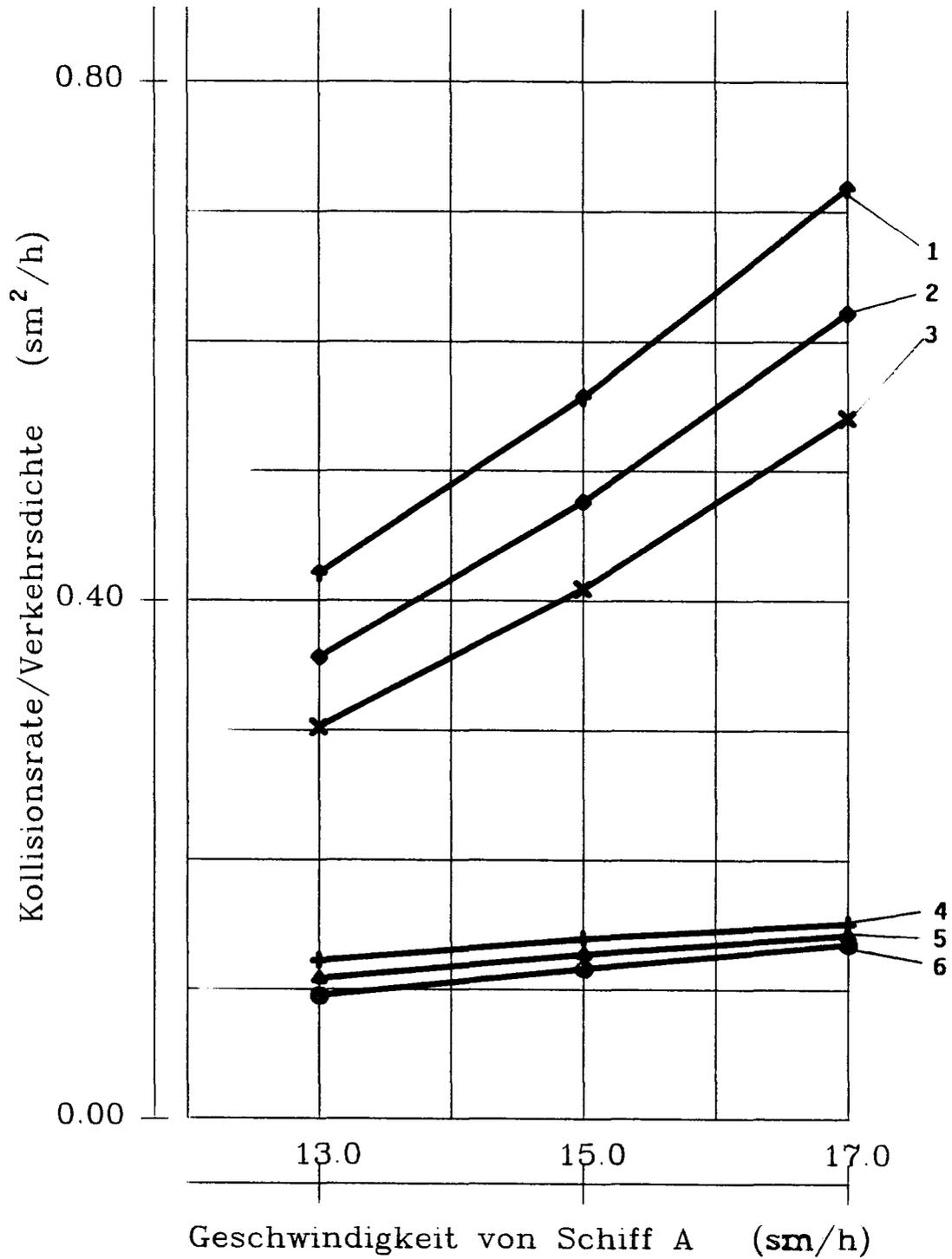
Kollisionsrate/Verkehrsdichte über Manöverzeit bestimmt

Kollisionsrate/Verkehrsdichte über Manöverabstand bestimmt



Kurve	Rudermanöver		Geschwindigkeit (sm/h)	
	A	0	A	0
1	Mittschiffs	Hart-Stb.	17	13
2	Mittschiffs	Hart-Stb.	15	13
3	Mittschiffs	Hart-Stb.	13	13
4	Hart-Stb.	Hart-Stb.	17	15
5	Hart-Stb.	Hart-Stb.	15	15
6	Hart-Stb.	Hart-Stb.	13	15
7	Hart-Bb.	Hart-Stb.	17	17
8	Hart-Bb.	Hart-Stb.	15	17
9	Hart-Bb.	Hart-Stb.	13	17

Bild 71

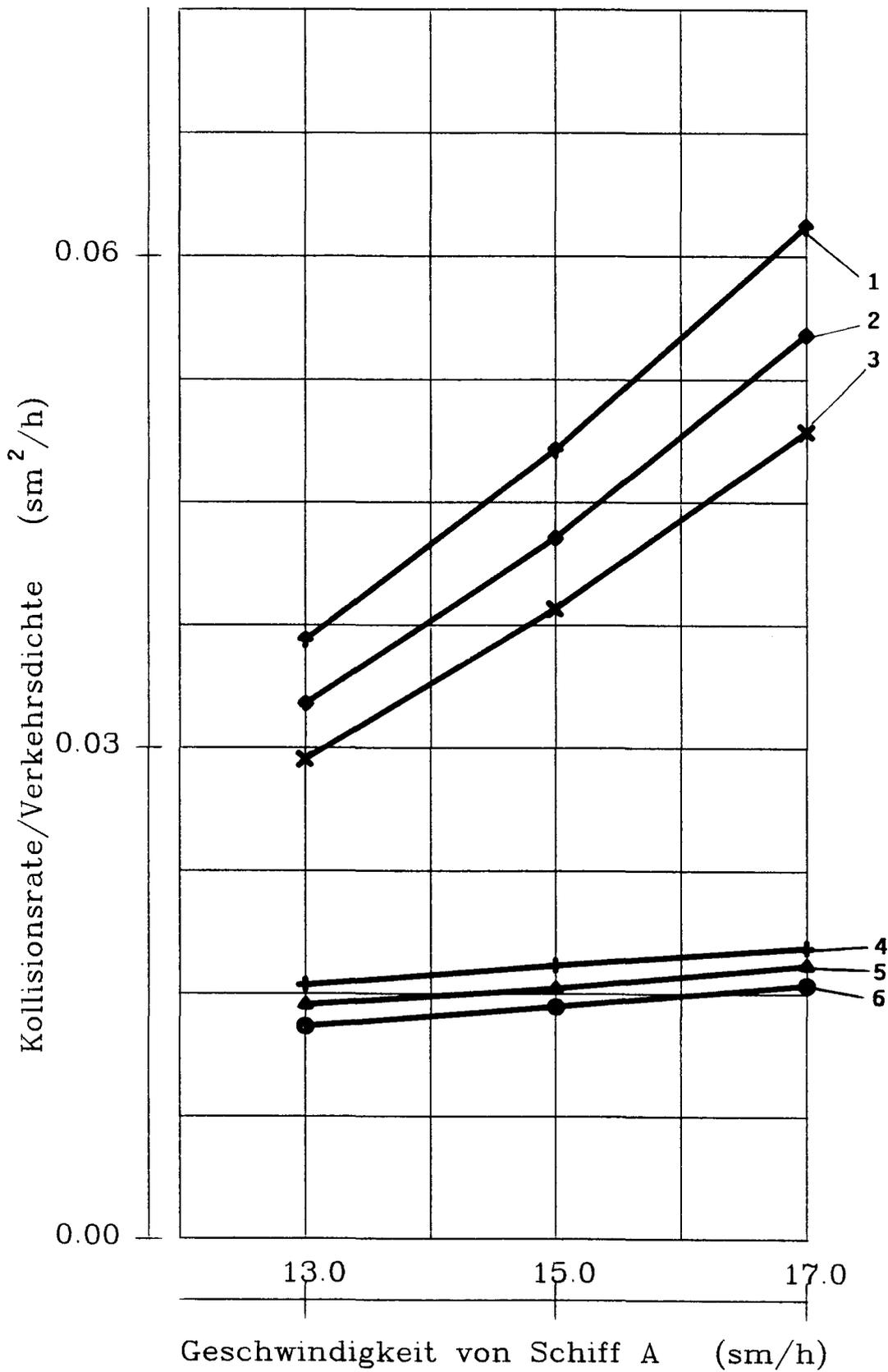


$V_0 = 15 \text{ sm/h}$

Kurve	Manöverstrategie		Drehkreisradius von 0 (m)
	A	0	
1	neutral	optimal	600
2	neutral	optimal	550
3	neutral	optimal	500
4	optimal	optimal	600
5	optimal	optimal	550
6	optimal	optimal	500

Bild 72

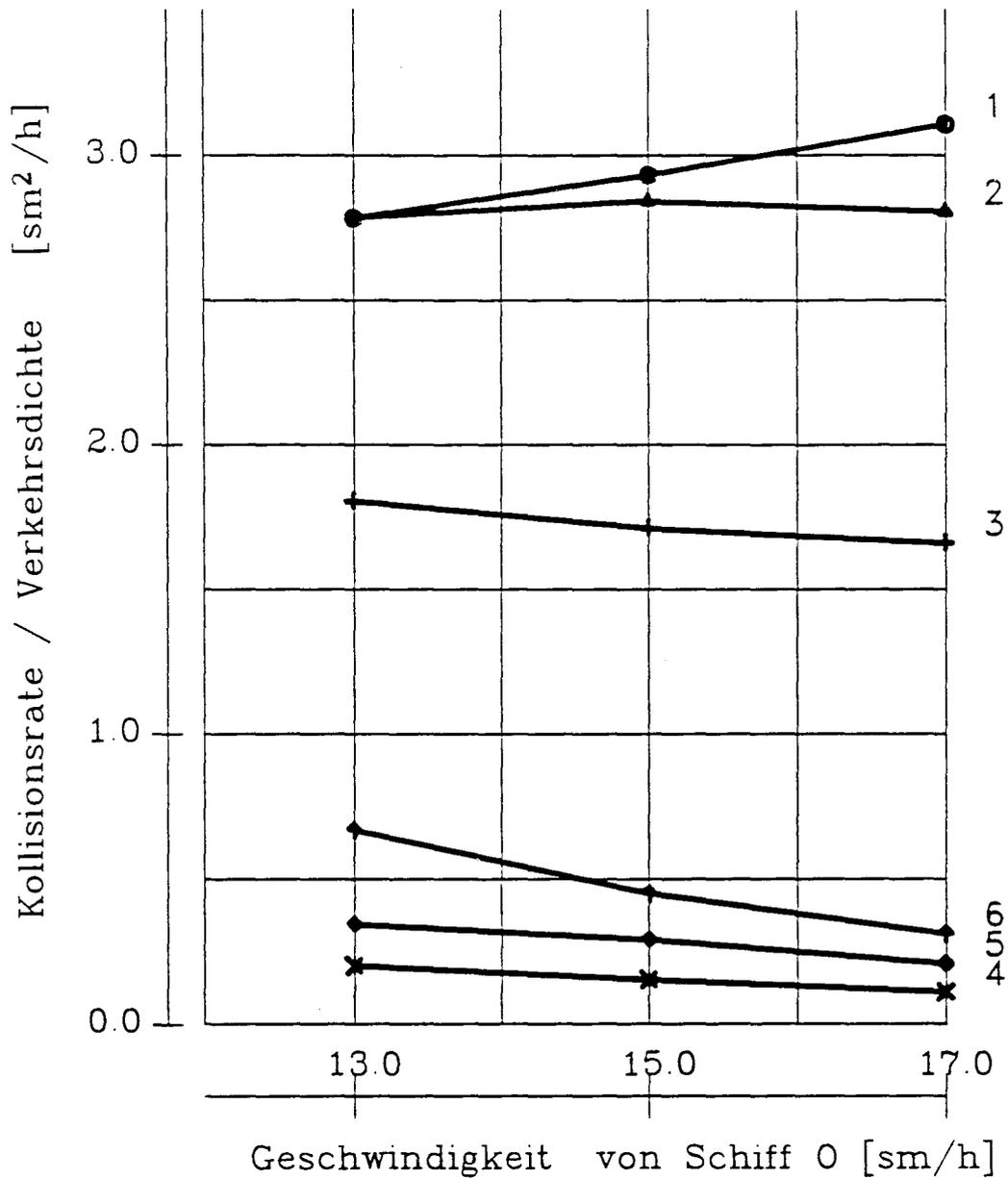
Kollisionsrate/Verkehrsdichte über Manöverzeit bestimmt



$V_0 = 15 \text{ sm/h}$

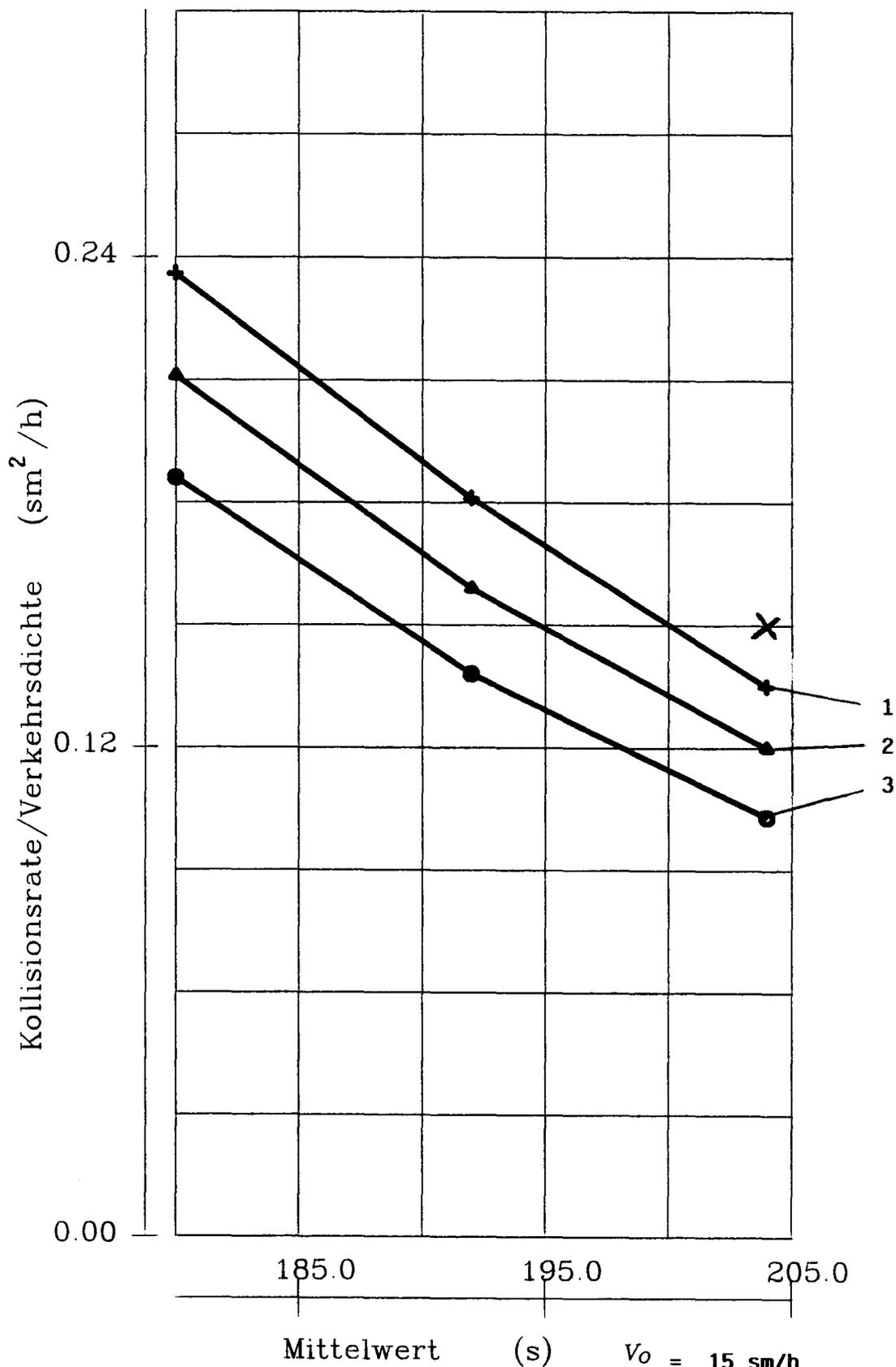
Kurve	Manöverstrategie		Drehkreisradius von 0 (m)	
	A	0		
1	neutral	optimal	600	1
2	neutral	optimal	550	2
3	neutral	optimal	500	3
4	optimal	optimal	600	4
5	optimal	optimal	550	5
6	optimal	optimal	500	6

**Bild 73** Kollisionsrate/Verkehrsdichte über Manöverabstand bestimmt



Kurve	Manöver			
	Ruder		Maschine	
	A	0	A	0
1	neutral	neutral	Voraus	Voraus
2	neutral	neutral	Voraus	Zurück
3	neutral	neutral	Zurück	Zurück
4	gemischt	optimal	Voraus	Voraus
5	gemischt	optimal	Voraus	Zurück
6	gemischt	optimal	Zurück	Zurück

Bild 74



$V_0 = 15 \text{ sm/h}$   
 $R_0 = 500 \text{ m}$   
 Manöverstrategie von 0 : optimal  
 Manöverstrategie von A : gemischt

Kurve	Standardabweichung (s)
1	72.0
2	68.5
3	65.0

Bild 75

Bezugspunkt x :  $R_0 = 550 \text{ m}$