

294 | September 1973

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K.H. Kwik

**Kinematik der Begegnung von  
Schiffen und Kollisionsverhütung mit  
einer Betrachtung der Fahrregeln**

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

# Kinematik der Begegnung von Schiffen und Kollisionsverhütung mit einer Betrachtung der Fahrregeln

K.H. Kwik, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1973

© Technische Universität Hamburg-Harburg

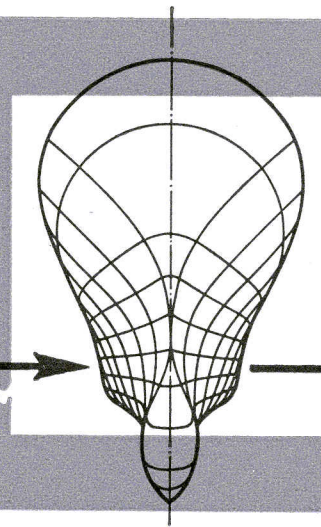
Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

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

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU  
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



Kinematik der Begegnung von Schiffen und  
Kollisionsverhütung mit einer Betrachtung  
der Fahrregeln

K.H. Kwik

September 1973

Bericht Nr.294

Diese Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 98 "Schiffstechnik und Schiffbau" entstanden und wurde unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel gedruckt.

Frühere Veröffentlichung aus dem SFB 98 zum gleichen Thema:

Krappinger, O.: Die Kollisionsrate als Element  
des Systemansatzes im Schiffbau  
(Vortrag beim 1. Kolloquium des SFB 98).  
IfS-Bericht Nr. 289

Kinematik der Begegnung von Schiffen  
und Kollisionsverhütung  
mit einer Betrachtung der Fahrregeln

K.H. Kwik

## I n n a l t

	Seite
1. Einführung	2
2. Kinematik der Begegnung bei konstanten Kursen und Geschwindigkeiten	3
3. Kinematik der Begegnung bei Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen	8
4. Folgerungen aus der Begegnungskinetik für die Kollisionsverhütung	17
5. Anmerkungen zu den Fahrregeln der Seestraßenordnung	22
6. Einfluß von Beobachtungsfehlern auf die Bestimmung von die Kollisionsgefahr kennzeichnenden Parametern	27
7. Zusammenfassung und Ausblick	37
8. Schlußbemerkung	37
9. Literatur	38

## 1. Einführung

Im Jahre 1972 waren in der ganzen Welt 2758 Schiffe über 500 BRT in Kollisionen einschließlich Strandungen und Schaden verursachender Berührungen verwickelt. Das entsprach rund 9 % aller existierenden Schiffe über 500 BRT. 2,6 % von ihnen gingen dabei verloren. Zu den tatsächlich eingetretenen Kollisionen kommt noch eine große Zahl gefährlicher Begegnungen (im letzten Augenblick verhüteter und Beinahe-Kollisionen), über die es in der Schifffahrt im Gegensatz zur Luftfahrt keine Statistik gibt. Obwohl in den letzten fünf Jahren trotz stetiger Zunahme der Schiffsgröße, Schiffsgeschwindigkeit und Verkehrsdichte keine Zunahme der aus Zusammenstößen, Strandungen und Schaden verursachenden Berührungen bestehenden Unfälle mehr stattfindet, ist die Kollisionszahl nach wie vor groß, und es müssen die größten Anstrengungen gemacht werden, um sie zu senken. Bedenkt man darüber hinaus, welche verheerenden Folgen eine einzige Schiffskollision haben kann, so sind verstärkte Bemühungen, Mittel und Wege zur Erhöhung der Sicherheit im Seeverkehr zu finden, erforderlich. Zur quantitativen Bestimmung der Kollisionsanfälligkeit eines Schiffes bietet sich die Kollisionsrate an /5/.

Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Begegnung zu einer Kollision führt, ist ein wesentlicher Bestandteil zur Ermittlung der Kollisionsrate. Zu ihrer Bestimmung ist es notwendig, das Zusammenspiel der Bewegungen der Schiffe beim Begegnen, Kreuzen, Überholen und Überholtwerden sowie beim Ausweichen zu kennen und rational zu erfassen. Die Kenntnis der Kinematik der Begegnung von Schiffen ist außerdem erforderlich, wenn man die Problematik der Kollisionsverhütung verstehen will. Die vorliegende Untersuchung bezieht sich auf die relative Bewegung von zwei Schiffen, die sich anfangs mit konstanten Geschwindigkeiten auf kollisionsgefährlichen Kursen bewegen, bei Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen.

Es wird zunächst die Begegnungskinetik erläutert und werden die Ergebnisse besprochen. Dann folgt eine kritische Betrachtung der geltenden Fahrregeln. Schließlich wird gezeigt, welche Zuverlässigkeit eine an Bord gewonnene Größe hat und welche Folgerungen daraus zu ziehen sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können die Grundlage bilden für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet.

## 2. Kinematik der Begegnung bei konstanten Kursen und Geschwindigkeiten

Bild 1 zeigt eine Skizze zur Geometrie der Schiffsbegegnung. (Wir wollen unter "Begegnen" auch Kreuzen, Überholen und Überholtwerden verstehen.)

$S_1$  und  $S_2$  sind die augenblicklichen Positionen zweier Schiffe, die auf konstanten Kursen und mit gleichbleibender Geschwindigkeit  $V_1$  und  $V_2$  so fahren, daß sich ihre Wege bei K kreuzen.

$S_1$  ist das eigene, betrachtete Schiff;  $S_2$  das andere Schiff oder der Gegner. Der Index 1 bezieht sich immer auf das eigene Schiff.

In dem Bild erkennt man das Wegdreieck  $S_1S_2K$ ,  
das Geschwindigkeitsdreieck  $S_1QR$ ,  
und das Gefahrendreieck  $S_1S_2M$ .

Letzteres wird so genannt, weil es unmittelbar die zur Beurteilung einer Gefahrenlage notwendigen Parameter enthält.

Doch zunächst weiter einige Bezeichnungen:

Der Winkel  $\psi$  ist der Winkel, den die Vorausrichtung des Schiffes  $S_1$  gegenüber der Vorausrichtung des Schiffes  $S_2$  bildet.

Der Winkel  $\alpha$  ist die augenblickliche relative Peilung des Schiffes  $S_2$  vom Schiff  $S_1$  aus.

Der Winkel  $\beta$  gibt die Richtung der relativen Geschwindigkeit bezogen auf  $V_1$  an.

Der Winkel  $\delta$  ist der Winkel, den die Richtung der Relativgeschwindigkeit gegenüber  $a$  bildet. Er wird als Gefahrenwinkel bezeichnet.

Die Strecke  $S_1S_2 = a$  ist der augenblickliche Abstand zwischen den Schiffen.

Der Vektor  $S_1R = V$  ist die relative Geschwindigkeit.

Die Richtung  $S_1M$  stellt den relativen Kurs dar.

Die Strecke  $S_2M = m$  ist der geringste Abstand beim Passieren: der Passierabstand.

Die Strecke  $S_1M$  ist der auf dem relativen Kurs bis zum Erreichen des Punktes größter Annäherung zurückzulegende Abstand; sie wird auch als Restabstand bezeichnet, wenn sie von dem Punkt an gemessen wird, an welchem das andere Schiff zum erstenmal beobachtet wird. Entsprechend wird mit Restzeit die Zeit von der ersten Beobachtung bis zum Erreichen des Punktes größter Annäherung bezeichnet.

In der Literatur wird mit CPA (Closest Point of Approach) oft nicht nur der Punkt größter Annäherung M bezeichnet, sondern auch die Strecke  $m$ . Für die Restzeit findet man auch die Bezeichnung TCA (Time to Closest Approach).

Im Wegdreieck bleibt mit Ablauf der Zeit nur  $v$  konstant; alles andere ändert sich.

Im Geschwindigkeitsdreieck ändert sich mit Ablauf der Zeit nichts; alle seine Teile bleiben gleich. Die Relativierung der Bewegung bringt den Vorteil, daß die Bewegung nur einem der Schiffe zugeschrieben werden kann, das andere Schiff wird dabei als feststehend angenommen. In Bild 1 sind die Verhältnisse so dargestellt, daß  $S_2$  als feststehend angenommen wird, während  $S_1$  mit der Geschwindigkeit  $V$  auf dem relativen Kurs  $S_1M$  fährt.

Es sei darauf hingewiesen, daß die relative Geschwindigkeit im allgemeinen nicht mit der Annäherungsgeschwindigkeit  $\frac{da}{dt}$  identisch ist. Nur wenn die Schiffe exakt auf Kollisionskurs liegen, ist die Annäherungsgeschwindigkeit konstant und gleich der relativen Geschwindigkeit. Sonst nimmt sie mit Verringerung des Abstandes ab.

Das Gefahrendreieck wird durch Einzeichnen einer Senkrechten von  $S_2$  zum relativen Kurs von  $S_1$  gebildet. Im Gefahrendreieck bleibt mit Ablauf der Zeit  $m$  nach Größe und Richtung konstant;  $S_1M$  bleibt der Richtung nach konstant, nimmt aber der Größe nach linear mit der Zeit ab. Der Abstand  $a$  kann daher nicht geradlinig abnehmen. Bezeichnen wir die Restzeit mit  $T$  und die laufende Zeit mit  $t$  und schreiben  $\tau = \frac{t}{T}$  mit  $0 \leq \tau \leq 1$ , so ist

$$a = \left[ m^2 + (vT)^2 (1-\tau)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Der Quotient zwischen  $a$  und  $\frac{da}{dt}$  wird bei der Kollisionsverhütung auch als Kollisionswarnzeit bezeichnet; entsprechend findet man für  $a$  auch die Bezeichnung Kollisionswarnabstand. Man geht dabei von der Vorstellung aus, daß bei Verwendung von computergestützten Kollisionsverhütungsanlagen Alarm gegeben werden kann, wenn  $a$  bzw.  $a:\frac{da}{dt}$  bestimmte Werte unterschreiten. In Bild 2 sind Warnabstand und Warnzeit über der realen Zeit für verschiedene  $\frac{m}{VT}$ -Werte aufgetragen. Für  $\frac{t}{T} = 1$  ist der Warnabstand gleich dem Passierabstand und die Warnzeit unendlich, da die Annäherungsgeschwindigkeit an dieser Stelle gleich Null ist. Die Warnzeit hat an der Stelle  $\frac{t}{T} = 1 - \frac{|m|}{VT}$  ein Minimum.

Wenn der Gefahrenwinkel  $\delta = 0$  ist, so hat man eine absolut steinende Peilung. Nimmt dabei der Abstand  $a$  mit Ablauf der Zeit ab, so befinden sich die Schiffe auf exaktem Kollisionskurs. Eine Kollisionssituation liegt dagegen vor, wenn der Passierabstand und die Restzeit bestimmte Werte unterschreiten. Der Passierabstand kann also durchaus von Null verschieden sein, damit eine Kollisionssituation vorliegt. Man könnte rechnerisch Mindestwerte für diese Größen angeben. In der Praxis kommen aber noch andere imponderable Faktoren hinzu, so daß die eine Kollisions-situation kennzeichnenden Werte je nach Umständen variieren können. Man wird in der Regel so navigieren, daß man Kollisionssituationen meidet. Gerät man einmal in solch eine Situation, so wird man sich bemühen, durch ein entsprechendes Manöver den Passierabstand auf das erforderliche Maß zu erhöhen.

Das Gefahrendreieck wird bei der Lösung von Kollisionsproblemen oft herangezogen werden, da es die beiden wichtigen Parameter  $m$  und  $S_1M$  enthält. Der Passierabstand  $m$  ist ein Maß für die Sicherheit. Je kleiner er ist, um so größer die Gefahr. Bei einem "idealen" Kollisionsfall ist  $m = 0$ . Der Abstand  $S_1M = V \cdot T$  ist ein Maß für die Möglichkeit, der Gefahr zu entgehen. Je kleiner er ist, um so enger der Raum bzw. kürzer die Zeit, die einem für das Ausweichmanöver zur Verfügung steht. Die Größen  $m$ ,  $V$  und  $T$  können nicht unmittelbar gemessen oder beobachtet werden; sie müssen aus anderen Daten abgeleitet werden.

Der Winkel  $\delta$  ist ein direktes Maß für den Passierabstand  $m$ . Statt mit  $m$  kann man alternativ mit  $\delta$  operieren. Die Benutzung von  $\delta$  anstelle von  $m$  bringt den Vorteil, daß der Abstand zwischen den Schiffen bei der Betrachtung des Problems zunächst nicht berücksichtigt zu werden braucht. Was das Vorzeichen betrifft, sei vereinbart, daß der Gefahrenwinkel  $\delta$  und der Passierabstand  $m$  positiv sind, wenn die Verbindungslinie zwischen den Schiffen mit Ablauf der Zeit sich gegen den Uhrzeigersinn dreht. Im anderen Fall sind sie negativ. In Bild 1 sind sie also positiv dargestellt.

Die relative Bewegung von Schiff  $S_1$  erfolgt auf dem Kurs  $S_1M$ , der in bezug auf Schiff  $S_2$  festliegt. Dabei bewegt sich  $S_1$  auf  $S_1M$  unter einem scheinbaren Driftwinkel. Die Strecke  $m$  ist dann genau der Passierabstand, wenn die Schiffe als punktförmig angenommen werden. Sind  $L_1$  und  $L_2$  die Längen der Schiffe und wird der Massenschwerpunkt als auf  $L/2$  gelegen angenommen, so ist der wirkliche Passierabstand bei Vernachlässigung der Breite der Schiffe

$$m' = m - \frac{L_1}{2} \sin \beta - \frac{L_2}{2} \sin (\psi + \beta) \quad (2)$$

Der Unterschied zum idealen Passierabstand kann bei kleinen Werten von  $m$  beträchtlich sein. In diesem Fall kann seine Vernachlässigung schwere Folgen nach sich ziehen. Der Unterschied zum idealen Passierabstand ist logischerweise um so größer, je größer die Schiffsabmessungen sind. Der relative Fehler im Restabstand bzw. in der Restzeit ist für praktische Fälle vernachlässigbar klein.

Die Relativbewegung kann selbstverständlich jedem der Schiffe zugeschrieben werden. Will man sie dem Schiff  $S_2$  zuschreiben, so braucht man nur so das Geschwindigkeitsdreieck durch den Punkt  $S_2$  zu bilden, daß der in der Richtung umgekehrte Vektor  $V_1$  am Ende des Vektors  $V_2$  angelegt wird. Man erhält so Kurs und die Relativgeschwindigkeit, mit der  $S_2$  am als ruhend betrachteten Schiff  $S_1$  vorbeifährt und deren Richtung umgekehrt ist zu dem vorher erwähnten Fall, bei dem  $S_1$  als fahrend und  $S_2$  als feststehend angenommen wurde. Größe der Relativgeschwindigkeit, Passierabstand und Restabstand bleiben dabei unverändert. Die Geometrie des Gefahrendrei-

ecks bleibt selbstverständlich gleich, einerlei, welches der Schiffe man als feststehend annimmt.

Der Punkt M ist nicht die geographische Lage des Punktes größter Annäherung, da die Schiffe sich in Wirklichkeit auf den Kursen  $S_1K$  und  $S_2K$  fortbewegen. Die geographische Lage von M findet man, indem man die Strecke  $S_2M$  parallel und in Richtung  $S_2K$  so weit verschiebt, bis der Endpunkt M auf  $S_1K$  zu liegen kommt. Dieser Punkt ist die geographische Lage des CPA; er gibt also die wahre Lage von  $S_1$  beim Passieren an. Der zugehörige Endpunkt  $S_2$  auf  $S_2K$  bzw. ihrer Verlängerung gibt die wahre Lage von  $S_2$  beim Passieren an. In Bild 1 sind die Verhältnisse so dargestellt, daß  $S_1$  hinter  $S_2$  passieren wird.

### 3. Kinematik der Begegnung bei Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen

Unter einem Manöver wollen wir jede gewollte Änderung von Kurs oder Geschwindigkeit oder von beidem verstehen. \*) Schon wenn nur eines der Schiffe manövriert, wird der relative Weg zur Kurve, wird die Kinematik viel komplizierter. Wir vereinfachen die Angelegenheit, indem wir ein idealisiertes Manöver zugrunde legen, bei dem Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen nicht allmählich, sondern abrupt erfolgen. Durch diese Vereinfachung wird das geometrische Modell und werden die Folgerungen daraus nicht grundsätzlich verändert. Abweichungen von der Realität können durch entsprechende Korrekturen behoben werden. Dies trifft insbesondere zu, wenn vorausgesetzt werden kann, daß zum Zeitpunkt des Passierens das Ausweichmanöver beendet worden ist.

Wenn nötig, ersetzen wir das wirkliche Manöver durch mehrere solche idealisierte Manöver. Bei der Kollisionsvermeidung kommt es weniger auf die genaue Kenntnis der Schiffsbahn an, als darauf, eine bestimmte Position und Lage innerhalb einer bestimmten Zeit nach einer bestimmten Kurs-/Geschwindigkeitsänderung zu erreichen. In den meisten Fällen wird es möglich sein, das wirkliche Manöver durch idealisierte, zu bestimmten Zeitpunkten einsetzende Manöver zu ersetzen, die am Zielpunkt zu einem Kurs und einer Geschwindigkeit führen, deren Abweichungen von der Wirklichkeit sich innerhalb gewisser Grenzen halten.

Bei der Kollisionsverhütung soll durch ein Manöver eine Änderung des Passierabstandes bewirkt werden. Eine richtige Wahl des Manövers vergrößert ihn und vermindert somit die Gefahr; eine falsche Wahl kann ihn vermindern und damit die Gefahr erhöhen. Die Relationen zwischen Passierabstandsänderung und Zeitpunkt, Art und Größe des Manövers können im idealisierten Fall exakt angegeben werden. Wann und wie das Manöver in Wirklichkeit

---

\*) Bei Einwirkung äußerer Kräfte kann auch jede gewollte Beibehaltung von Kurs oder Geschwindigkeit oder von beidem ein Manöver sein. Dies soll hier aber nicht betrachtet werden.

ausgeführt werden muß, um nach einer gegebenen Zeit die gleiche oder annähernd die gleiche Passierabstandsänderung wie im idealisierten Fall zu erhalten, hängt in erster Linie von den Manövriereigenschaften des Schiffes ab. Diese Frage soll hier aber nicht weiter verfolgt werden.

Bild 1 entnehmen wir:

$$m = a \sin \delta \quad (3)$$

$$V \cdot T = a \cos \delta \quad (4)$$

Die Fälle, die betrachtet werden müssen, sind die, bei denen  $a$  ein Vielfaches von  $m$  ist. Denn wenn  $m$  groß ist, besteht keine wirkliche Gefahr, und wenn  $a$  klein ist, kann es bereits zu spät sein.

Für  $a \gg m$  gelten

$$m \approx a \delta \quad (3a)$$

$$V \cdot T \approx a \quad (4a)$$

Für eine gegebene Entfernung  $a$  ist der Winkel  $\delta$  dem Abstand  $m$  proportional und daher auch ein Maß für die Sicherheit. Andererseits ist für einen gegebenen Passierabstand der Winkel  $\delta$  der Entfernung umgekehrt proportional. Der Winkel  $\delta$  ist bei entsprechend großer Entfernung, unabhängig von der Größe des Passierabstandes, immer klein und wird mit abnehmender Entfernung größer, wenn der Passierabstand von Null verschieden ist. Wenn er bei einer bestimmten Entfernung groß genug geworden ist, besteht keine akute Kollisionsgefahr, die Situation kann als sicher bezeichnet werden; ein Manöver ist dann nicht erforderlich. Bleibt  $\delta$  jedoch klein, so muß ein Manöver eingeleitet werden, um einen ausreichenden Passierabstand zu erzielen. Wenn  $\delta$  bei einer bestimmten, angemessenen Entfernung ungefähr Null ist, kann das Manöver theoretisch so gewählt werden, daß ein Passierabstand beliebig in einer der beiden Richtungen entsteht. Wenn  $\delta$  jedoch bei dieser Entfernung für die Sicherheit nicht groß genug ist, aber immer noch einen wesentlichen Teil des Sicherheitswertes ausmacht, wird eine Änderung, die den vorhandenen Wert auf die erforderliche Größe erhöht, leichter

und schneller erreichbar sein als diejenige, die erforderlich wäre, um den Sicherheitswert im umgekehrten Sinne über den Nullpunkt hindurch zu erreichen. Der Winkel  $\delta$  ist also ein Kriterium sowohl für die Notwendigkeit als auch für die Wahl des Manövers. Vom mathematischen Standpunkt aus sollte das Manöver also so sein, daß es einen vorhandenen Gefahrenwinkel dem Betrag nach vergrößert. Daß dies in der Praxis nicht immer realisierbar ist, werden wir später noch sehen. Führen beide beteiligten Schiffe ein Manöver aus, so sollten sich die Wirkungen gegenseitig addieren und nicht teilweise oder ganz aufheben.

Die Wirkung eines Manövers läßt sich leicht am Geschwindigkeitsdreieck verfolgen. Das Dreieck erfährt bei einem Manöver eine entsprechende Änderung.  $\mathcal{V}_1$  sei der Kompaßkurs des betrachteten Schiffes. Dann ist  $\mathcal{V}_1 + \beta$  die Kompaßpeilung der relativen Geschwindigkeit und  $\mathcal{V}_1 + \alpha$  die des Gegners. Da  $\mathcal{V}_1 + \beta = \mathcal{V}_1 + \alpha + \delta$  ist und  $\mathcal{V}_1 + \alpha$  im Augenblick des Manövers als unverändert angenommen wird, ist die Änderung von  $\mathcal{V}_1 + \beta$  gleich der Änderung von  $\delta$ . Ein Manöver bewirkt also im allgemeinen eine Änderung des Winkels  $\delta$ . Diese Änderung sei mit  $\Delta\delta$  bezeichnet. Sie sei positiv, wenn sie einer Drehung der Verbindungslinie zwischen den Schiffen gegen den Uhrzeigersinn entspricht. Aufgabe eines Manövers zur Kollisionsverhütung ist es, die Summe  $\delta + \Delta\delta$  dem Betrag nach ausreichend groß werden zu lassen.

Die Peilungen  $\alpha$  und  $\beta$ , der Kurs  $\mathcal{V}_1$  und der Winkel  $\mathcal{V}$  werden positiv im Uhrzeigersinn gemessen. Die bereits getroffene Vereinbarung für das Vorzeichen des Gefahrenwinkels beinhaltet, daß er bei kreuzenden Kursen positiv ist, wenn das Schiff, welches das andere an seiner Steuerbordseite hat, hinter dem anderen kreuzen würde. Einer Vergrößerung von  $\mathcal{V}_1 + \beta$  entspricht stets eine Vergrößerung von  $\delta$ , wenn  $\delta$  positiv ist. Andererseits entspricht einer Verkleinerung von  $\mathcal{V}_1 + \beta$  ebenfalls stets eine Vergrößerung des Absolutwertes von  $\delta$ , wenn  $\delta$  negativ ist.

Der Passierabstand wird dem Betrag nach immer vergrößert, wenn zu einem vorhandenen positiven Gefahrenwinkel durch ein Manöver eine positive Änderung  $\Delta \delta$  zustande kommt, und zu einem vorhandenen negativen Gefahrenwinkel eine negative Änderung.

Bei genau quer nach Steuerbord liegender Peilung des relativen Kurses hat jede Kursänderung des betrachteten Schiffes eine positive Gefahrenwinkeländerung zur Folge, bei genau quer nach Backbord liegender Peilung des relativen Kurses eine negative Gefahrenwinkeländerung.

Manövrieren beide Schiffe, so addieren sich die Aktionen in der Wirkung nur dann, wenn die Gefahrenwinkeländerung bei Manöver des einen Schiffes und zunächst Nichtmanövrieren des anderen, und die Gefahrenwinkeländerung durch das anschließende Manöver des anderen dasselbe Vorzeichen haben.

Nachstehend werden einige Formeln für die durch ein Manöver bewirkte Änderung des Gefahrenwinkels angegeben.

a) Schiff  $S_1$  ändert die Geschwindigkeit. Änderung  $\Delta V_1$  sei positiv bei Zunahme. Die Änderung des Gefahrenwinkels ergibt sich aus der Beziehung

$$\tan \Delta \delta = \frac{-\Delta v_1 \sin \beta}{(v_1 + \Delta v_1) \cos \beta + (v_2^2 - v_1^2 \sin^2 \beta)^{1/2}} \quad (5)$$

$\beta$  ist die Peilung des relativen Kurses, bezogen auf  $V_1$ . Die Änderung  $\Delta \delta$  trägt hier und in den nachfolgenden Formeln nur dann zur Vergrößerung von  $\delta$  bei, wenn das Vorzeichen von  $\Delta \delta$  dem von  $\delta$  entspricht. Unter Benutzung der Beziehung

$$\tan \beta = \frac{\sin \vartheta}{\frac{v_1}{v_2} - \cos \vartheta} \quad (6)$$

können wir  $\beta$  eliminieren. Wir erhalten dann

$$\tan \Delta\delta = \frac{-\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{\Delta v_1}{v_1} \sin \vartheta}{\left(\frac{v_1}{v_2} - \cos \vartheta\right)^2 + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{\Delta v_1}{v_1} \left(\frac{v_1}{v_2} - \cos \vartheta\right) + \sin^2 \vartheta} \quad (5a)$$

$\vartheta$  ist der Winkel, den die Vorausrichtung des betrachteten Schiffes gegenüber der Vorausrichtung des anderen bildet.

Von Interesse dürfte auch der Einfluß kleiner Geschwindigkeitsänderungen auf die Änderung des Gefahrenwinkels sein. Es ist

$$\Delta\delta = \frac{-\sin \beta}{v_1 \cos \beta + (v_2^2 - v_1^2 \sin^2 \beta)^{1/2}} \cdot \Delta v_1 \quad (7)$$

oder

$$\Delta\delta = \frac{-\sin \vartheta}{\frac{v_2}{v_1} + \frac{v_1}{v_2} - 2 \cos \vartheta} \cdot \frac{\Delta v_1}{v_1} \quad (7a)$$

b) Schiff  $S_1$  ändert den Kurs. Änderung  $\Delta \vartheta_1$  sei positiv bei Steuerborddrehung. Die Änderung des Gefahrenwinkels ergibt sich aus der Beziehung

$$\tan \Delta\delta = \frac{\sin \beta - \sin(\beta - \Delta \vartheta_1)}{\cos(\beta - \Delta \vartheta_1) + \left[\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 - \sin^2 \beta\right]^{1/2}} \quad (8)$$

oder nach Eliminierung von  $\beta$

$$\tan \Delta\delta = \frac{\frac{v_1}{v_2} \sin \Delta \vartheta_1 - \sin(\vartheta + \Delta \vartheta_1) + \sin \vartheta}{\frac{v_2}{v_1} + \frac{v_1}{v_2} \cos \Delta \vartheta_1 - \cos(\vartheta + \Delta \vartheta_1) - \cos \vartheta} \quad (8a)$$

Für den Einfluß kleiner Kursänderungen auf die Änderung des Gefahrenwinkels ergibt sich die Formel

$$\Delta \delta = \frac{\cos \beta}{\cos \beta + \left[ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 - \sin^2 \beta \right]^{1/2}} \cdot \Delta \vartheta_1 \quad (9)$$

oder

$$\Delta \delta = \frac{\frac{V_1}{V_2} - \cos \vartheta}{\frac{V_2}{V_1} + \frac{V_1}{V_2} - 2 \cos \vartheta} \cdot \Delta \vartheta_1 \quad (9a)$$

die zu

$$\Delta \delta = \frac{1}{2} \Delta \vartheta_1 \quad (9b)$$

wird, wenn  $V_1 = V_2$  ist.

Wenn die Geschwindigkeitsvektoren  $V_1$  und  $V_2$  nach Größe und Richtung gleich werden, wird die Relativgeschwindigkeit gleich Null, der Gefahrenwinkel ist unbestimmt und damit auch die Gefahrenwinkeländerung. (Der Grenzwert kann jedoch bestimmt werden.) Dies ist bei Benutzung der angegebenen Formeln zu beachten.

Mit den angegebenen Formeln kann das zur Erzielung einer bestimmten Gefahrenwinkeländerung erforderliche Manöver in jeder Situation bestimmt werden. Ein Blick auf Gleichung (5a) und (8a), aus denen unmittelbar hervorgeht, daß Geschwindigkeits- oder Kursänderung und Änderung des Gefahrenwinkels im allgemeinen nicht proportional zueinander sind, zeigt die durch die möglichen Kombinationen von Geschwindigkeiten und Kursen

bedingte große Mannigfaltigkeit der Manöver. Die Bedeutung dieser Gleichungen läßt sich am besten in einer graphischen Auftragung voll erkennen. In Bild 3 ist als Beispiel das Kursänderungsdiagramm nach Gleichung (8a) für  $\frac{V_1}{V_2} = 0,5$  dargestellt.

Man sieht, daß der Bereich des Winkels  $\psi$  (dieser Winkel kennzeichnet die Kursdifferenz zwischen den Schiffen) nicht überall zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  von den Kurven für die Kursänderung  $\Delta\psi_1$  ausgefüllt wird. Zum Beispiel kann für  $\psi$  etwa zwischen  $40^\circ$  und  $80^\circ$  eine Kursänderung des betrachteten Schiffes nur einen positiven Betrag für  $\Delta\delta$  liefern; war ein negativer Wert  $\delta$  vorhanden, so bewirkt hier jedes Manöver des betrachteten Schiffes zumindest im Anfang eine Verminderung des Betrages des Gefahrenwinkels. Ferner läßt sich für einen weiten Bereich des Winkels  $\psi$  nicht jeder möglicherweise erforderliche Wert von  $\Delta\delta$  erreichen. Das bedeutet eventuell, daß das betrachtete Schiff nicht immer allein in der Lage sein wird, den Gefahrenwinkel und damit den Passierabstand hinreichend zu vergrößern; es muß dann der Gegner mithelfen. All dies gilt unabhängig davon, wieviel Restzeit zur Verfügung steht.

Das Kursänderungsdiagramm ist übrigens stark vom Geschwindigkeitsverhältnis abhängig. Das Diagramm kann schnell Aufschluß darüber geben, unter welchen Bedingungen die Ausweichmöglichkeit begrenzt oder gar fraglich ist. Schon dieses einfache Beispiel, bei dem ein Schiff nur den Kurs ändert, birgt so viele Aspekte in sich, daß daraus klar wird, daß es nicht immer möglich ist, die richtige Entscheidung durch bloßes Abschätzen der Situation zu treffen. Darin mögen manche Kollisionen eine Erklärung finden, zumal dann, wenn man bedenkt, daß das Problem bei gleichzeitiger Kurs- und Geschwindigkeitsänderung noch schwerer überschaubar ist.

Das in Bild 3 gezeigte Diagramm ist charakteristisch für Fahrtunterlegenheit des betrachteten Schiffes. Ist eine bestimmte Gefahrenwinkeländerung durch Manöver des betrachteten langsameren Schiffes möglich, so ist sie meistens durch zwei verschiedene, manchmal vorzeichenungleiche Kursänderungen zu erzielen. Welche Kursänderungen im einzelnen die gleiche Wirkung haben, hängt von den Kursdifferenzen und/oder Geschwindigkeitsverhält-

nissen ab. Die kleinere dieser Änderungen ist, symmetrisches Verhalten vorausgesetzt, auf jeden Fall schneller zu realisieren. Es mag aber nicht immer praktisch sein, immer die kleinste Kursänderung zu wählen, da dies teilweise bedeuten würde, daß je nach Kursdifferenz und/oder Geschwindigkeitsverhältnis das Schiff einmal nach Steuerbord und ein andermal nach Backbord abdrehen würde, was zur Verwirrung der Situation beitragen könnte. Es kann jedoch vorkommen, daß eine der möglichen Änderungen bedeutend kleiner ist. Wenn nun ein Schiff aus irgendeinem Grund nur die kleinere Kursänderung auszuführen vermag, so kann eine Kollision unter Umständen nur dadurch vermieden werden, daß es diese Kursänderung in der entsprechenden richtigen Richtung ausführt. Eine Kursänderung in der anderen Richtung, z.B. als Folge einer Fehleinschätzung der Situation, oder weil eine Vorschrift es so verlangt, könnte zu einer Katastrophe führen, da die erforderliche Kursänderung in dieser Richtung vom betrachteten Schiff nicht erreicht werden würde.

Ferner ist aus Bild 3 ersichtlich, daß es für jeden  $\psi$ -Wert einen Höchstwert für die erreichbare Änderung  $\Delta\delta$  gibt, dem auch ein Höchstwert für die Kursänderung  $\Delta\psi_1$  entspricht. Noch höhere Kursänderungen führen wieder zu geringeren  $\Delta\delta$ -Werten.

Bild 4 zeigt ein Kursänderungsdiagramm bei Fahrtüberlegenheit des eigenen Schiffes. Man sieht, daß hier der ganze  $\psi$ -Bereich von den Kurven ausgefüllt wird und Überschneidungen der Kurven nicht stattfinden. Somit kann jede gewünschte, praktisch vorkommende Gefahrenwinkeländerung durch Kursänderung des eigenen Schiffes allein erreicht werden, wenn das Manöver frühzeitig genug eingeleitet wird.

Für Fahrtgleichheit erübrigt sich eine entsprechende graphische Darstellung, da in diesem Fall die Änderung  $\Delta\delta$  unabhängig vom  $\psi$ -Wert stets halb so groß ist wie die Kursänderung selbst.

Die Bilder 5, 6 und 7 zeigen Fahrtänderungsdiagramme nach Gleichung (5a) für Fahrtüberlegenheit, Fahrtunterlegenheit und Fahrtgleichheit. Da man die Fahrt nicht beliebig erhöhen kann,

sind den durch Fahrtänderungen erreichbaren Gefahrenwinkeländerungen Grenzen gesetzt. Aber auch dann, wenn man unterstellt, daß große Fahrtänderungen möglich sind, gibt es doch Bereiche, die nicht von den Kurven überdeckt werden. Praktisch bedeutet dies, daß bestimmte Gefahrenwinkeländerungen nicht durch Fahrtänderungen erreicht werden können. Eine drastische Fahrtminderung kann nennenswerte Gefahrenwinkeländerungen zustande bringen, jedoch liegt damit auch die Richtung der Gefahrenwinkeländerung fest.

In Bild 8 ist der Gradient  $\frac{\Delta \delta}{\Delta \psi_1}$  für kleine Kursänderungen über dem Winkel  $\psi$  nach Gleichung (9a) aufgetragen. Man erkennt die Symmetrie bei Gegnernäherung von Backbord und Steuerbord bei entsprechenden Kreuzungswinkeln. Das Extremum tritt, außer bei Fahrtgleichheit, bei Parallelkursen der Schiffe auf. Bei Fahrtgleichheit ist der Gradient konstant und gleich ein halb. Er kann nur bei Fahrtunterlegenheit Null sein.

In Bild 9 ist der Gradient  $\frac{\Delta \delta}{(\Delta v_1/v_1)}$  für kleine Fahrtänderungen nach Gleichung (7a) über dem Winkel  $\psi$  aufgetragen. Die Kurven für ein Geschwindigkeitsverhältnis und dessen reziproken Wert fallen jeweils stets zusammen. Der Gradient ist, außer bei Fahrtgleichheit, bei Parallelkursen gleich Null. Bei Fahrtgleichheit geht er bei parallelen und gleichgerichteten Kursen gegen unendlich. Die Gefahrenwinkeländerung geht dabei jedoch nicht gegen unendlich, da die Relativgeschwindigkeit hier Null ist.

#### 4. Folgerungen aus der Begegnungskinetik für die Kollisionsverhütung

Die Kinetik der Schiffsbegegnung ergibt zusammengefaßt folgende Ergebnisse im Hinblick auf die Kollisionsverhütung:

- a) Eine Geschwindigkeitsänderung hat bei querab liegenden Peilungen des relativen Kurses die beste, bei achterlichen oder vorlichen Peilungen die schlechteste Wirkung. Bei Peilungen recht von vorn oder achtern ist die Wirkung gleich Null (vorausgesetzt, das andere Schiff behält Kurs und Geschwindigkeit bei), es sei denn, die Geschwindigkeitsreserve ist so groß, daß bei Gefahr von hinten das Schiff flüchten kann.
- b) Eine Geschwindigkeitsänderung des langsameren Schiffes hat eine bessere Wirkung als eine gleich große Geschwindigkeitsänderung des schnelleren Schiffes.
- c) Eine Kursänderung hat, bei Fahrtunterlegenheit des betrachteten Schiffes, bei vorlichen oder achterlichen Peilungen des relativen Kurses die beste, bei querab liegenden Peilungen die schlechteste Wirkung. Bei Fahrtüberlegenheit hat man nur vorliche Peilungen der relativen Kurse. Hier ist die Wirkung einer Kursänderung um so besser, je kleiner die Relativgeschwindigkeit ist.
- d) Eine Kursänderung des schnelleren Schiffes hat eine bessere Wirkung als eine gleich große Kursänderung des langsameren Schiffes.
- e) Gleiche, aber entgegengesetzte Änderungen von Kurs oder Geschwindigkeit eines der Schiffe ergeben im allgemeinen keine gleichen Änderungen des Gefahrenwinkels. Manchmal ergeben sie nicht einmal entgegengesetzte Änderungen des Gefahrenwinkels.
- f) Bei gleichen Geschwindigkeiten ergibt eine Kursänderung eines der Schiffe eine Änderung des Gefahrenwinkels, die halb so groß wie die Kursänderung selbst ist. Bei sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten ergibt eine Kursänderung des schnelleren Schiffes eine fast gleich große Änderung des Gefahrenwinkels; eine Kursänderung des langsameren Schiffes ergibt fast keine Änderung des Gefahrenwinkels.

- g) Bei Fahrtunterlegenheit des betrachteten Schiffes kann ein bestimmter Passierabstand durch zwei verschiedene Kurse, durch einen einzigen Kurs oder gar nicht vom betrachteten Schiff allein erreicht werden. Ist bei Fahrtunterlegenheit ein bestimmter Passierabstand erreichbar, so gibt es meistens zwei Kurse, die dies zustande bringen können. Die entsprechenden Relativgeschwindigkeiten sind dabei verschieden groß.
- h) Für die Kursänderung des langsameren Schiffes gibt es einen Grenzwert, bei dessen Überschreitung die Änderung des Gefahrenwinkels wieder kleiner wird; größere Kursänderungen wären also sinnlos, da sie zu Änderungen des Gefahrenwinkels führten, die man ebensogut durch kleinere Drehungen hätte erreichen können.
- i) Das langsamere Schiff kann durch eine Kursänderung eine Gefahr nicht immer allein beseitigen; die Ausweichmöglichkeit ist um so geringer, je kleiner die Geschwindigkeit im Vergleich zu der des Gegners ist. Das schnellere Schiff hingegen hat grundsätzlich immer eine Ausweichmöglichkeit.  
Die folgenden Folgerungen beziehen sich auf den Fall, daß beide Schiffe manövrieren.
- j) Entgegengesetzte Geschwindigkeitsänderungen addieren sich in der Wirkung, gleichartige heben sich wenigstens teilweise auf.
- k) Wenn beide Schiffe jeweils den relativen Kurs vorlich peilen, addieren sich gleichgerichtete Kursänderungen in der Wirkung, heben sich entgegengesetzte wenigstens teilweise auf. Wenn jedoch eines der Schiffe den relativen Kurs achterlich peilt, addieren sich entgegengesetzte Kursänderungen in der Wirkung oder sie heben sich schlimmstenfalls nur teilweise auf, solange das langsamere Schiff keine zu großen Kursänderungen ausführt.
- l) In manchen Fällen kann eine Kursänderung in beliebiger Richtung des einen Schiffes durch eine Geschwindigkeitsverminderung des anderen in der Wirkung aufgehoben werden.
- m) Nur das schnellere oder mindestens gleich schnelle Schiff kann sich unabhängig von dem Verhalten des anderen schützen.

- n) Jedes Manöver des langsameren Schiffes kann durch ein entsprechendes Manöver des schnelleren in der Wirkung aufgehoben werden.
- o) Gleich große Kursänderungen in gleicher Richtung ergeben eine Änderung des Gefahrenwinkels, die gleich jeder Kursänderung selbst ist.

Die meisten Schiffe können die Geschwindigkeit nur ziemlich langsam erhöhen, außerdem ist bei Fahrt mit Dienstgeschwindigkeit die Geschwindigkeitsreserve meist gering. Wenn nur die Geschwindigkeit geändert wird, kommt als wirksame Maßnahme praktisch also nur eine Geschwindigkeitsverminderung in Frage. (Bei verminderter Sicht oder auf dem Revier wird so langsam gefahren, daß die Geschwindigkeitsreserve ausreichend wäre. Bleibt nur die Frage, ob man hier eine Geschwindigkeitserhöhung zur Unterstützung einer Kollisionsverhütungsmaßnahme wirklich empfehlen kann.)

Sehen wir zunächst vom "Manöver des letzten Augenblicks" ab, so sollten in einer Kollisionssituation bei normaler Fahrt Geschwindigkeitsverminderungen wegen des unter l) Gesagten unterbleiben. Im Gegenteil, man sollte den mit jeder Kursänderung verbundenen Fahrtverlust nach Möglichkeit durch Erhöhung der Propellerdrehzahl wettmachen. Einfach und wirksam sind Kursänderungen.

Ist nur eines der Schiffe ausweichpflichtig, und ist es das schnellere, das ausweichen muß, so kann im allgemeinen die Gefahr durch eine entsprechende Kursänderung in jeder gewünschten Richtung beseitigt werden. Ist jedoch das langsamere Schiff das ausweichpflichtige, so kann die richtige Wahl der Richtung der Kursänderung entscheidend sein. Es kann manchmal besser sein, die Kursänderung in jener Richtung vorzunehmen, so daß ein bereits vorhandener, wenn auch als zu gering angesehener Passierabstand dem Betrag nach vergrößert wird.

Sollen beide Schiffe durch Manövrieren zur Kollisionsverhütung beitragen und soll das Manöver nur aus Kursänderung bestehen, so ist das unter Buchstabe k) Gesagte zu beachten. Da in Kollisionssituationen im allgemeinen die Peilung des relativen Kurses annähernd gleich der Gegnerpeilung ist, kann man sich folgende Faustregel

zur Kollisionsverhütung merken: Kursänderungen in gleicher Richtung bei jeweils vorlicher Peilung des Gegners; in entgegengesetzter Richtung, wenn eines der Schiffe den Gegner achterlich peilt. Im erstgenannten Fall ergänzen sich gleichgerichtete Kursänderungen beider Schiffe in der Wirkung stets. Im letztgenannten Fall werden bei entgegengesetzten Kursänderungen entweder divergierende Kurse entstehen oder es kann das Manöver des schnelleren Schiffes im ungünstigsten Fall höchstens teilweise durch das des langsameren in der Wirkung aufgehoben werden, solange letzteres nicht in mörderischer Absicht zu weit zum Gegner hin abdreht. Im allgemeinen ist hier die Gefahrenwinkeländerung durch das Manöver des schnelleren Schiffes so groß, daß sie mit Leichtigkeit eine möglicherweise entgegengerichtete Änderung durch das des langsameren aufnehmen kann.

Zum Beispiel ergibt eine Steuerborddrehung beider einander vorlich peilender Schiffe jeweils eine positive Änderung des Gefahrenwinkels. Eine Steuerborddrehung des den Gegner vorlich peilenden Schiffes zusammen mit einer Backborddrehung des den Gegner achterlich peilenden Schiffes ist im allgemeinen auch genauso wirkungsvoll. Die Manöver beider Schiffe sind also im Hinblick auf die Kollisionsverhütung wirksam, wenn man jedem Schiff vorschreibt, daß der Kurs bei vorlicher Peilung des Gegners nur in einer bestimmten Richtung (z.B. nur nach Steuerbord) und bei achterlicher Peilung des Gegners nur in der entgegengesetzten Richtung (also z.B. nur nach Backbord) geändert werden darf. Das optimale gemeinsame Manöver, bei dem jedes Schiff zur Erreichung eines bestimmten sicheren Passierabstandes eine möglichst kleine Kursänderung ausführt, könnte unschwer ermittelt werden.

Die genannten Folgerungen bezogen sich auf die Kinematik des Problems. Die Kenntnis der rein akademischen, geometrischen Tatsachen ist ein wesentlicher Faktor bei der Gesamtbetrachtung und bildet eine solide Grundlage für systematische Untersuchungen. Es sei jedoch gleichermaßen betont, daß eine realistische Betrachtung die zahlreichen praktischen Gesichtspunkte mit einbeziehen muß. Solche Gesichtspunkte sind z.B. die geltenden Fahrregeln, die Manövriereigenschaften der Schiffe, verschiedene äußere Einflüsse, psycho-physische Probleme, Probleme bei der Bestimmung von Kurs,

Geschwindigkeit und Position des Gegners. Die Wahrscheinlichkeit für den Erfolg eines Ausweichmanövers hängt in hohem Maße auch von innerer Bewältigung ab. Von den genannten, bisher unberücksichtigt gebliebenen Gesichtspunkten sollen auf den nächsten Seiten die Fahrregeln und der Einfluß von Meßfehlern auf die Zuverlässigkeit der Situationsbestimmung, dessen Kenntnis für die Wahl bzw. den Erfolg eines Ausweichmanövers von Bedeutung ist, diskutiert werden.

## 5. Anmerkungen zu den Fahrregeln der Seestraßenordnung

Bei dem Versuch, das Kollisionsproblem transparent zu machen, ist es angebracht, auch die international anerkannten Fahrregeln einer Betrachtung zu unterziehen.

Die gegenwärtig geltende Seestraßenordnung ist eine internationale Verkehrsordnung, die von rd. 50 Seeschiffahrt treibenden Staaten als selbständiger Bestandteil des Internationalen Schiffssicherheitsvertrages, London 1960, mit der Bezeichnung "Regeln zur Vermeidung von Zusammenstößen auf See" vereinbart und am 1.9.1965 in Kraft gesetzt wurde. (Sie ist nicht mit der Seeschiffahrtstraßenordnung zu verwechseln, die die internationalen Vorschriften im Bereich der Hoheitsgewässer ergänzt oder abändert und ein nationales Verkehrsrecht darstellt.)

Nach der Seestraßenordnung ist das Ausweichen für mindestens eines der Schiffe obligatorisch, wenn "die Gefahr eines Zusammenstoßes besteht". In der Praxis wird die Gefahr eines Zusammenstoßes als gegeben angesehen, wenn die Peilung des Gegners sich nicht oder sich nur wenig ändert, der Abstand sich verringert und die Zeit bis zum Erreichen des Punktes größter Annäherung einen bestimmten Wert unterschreitet. Die wichtigsten Ausweichregeln nach der Seestraßenordnung, soweit sie für Maschinenfahrzeuge, die einander in Sicht haben, gelten, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Wenn zwei Schiffe sich in entgegengesetzter oder fast entgegengesetzter Richtung einander so nähern, daß die Gefahr eines Zusammenstoßes besteht, muß jedes seinen Kurs nach Steuerbord ändern.
2. Auf kreuzendem Kollisionskurs muß dasjenige Schiff ausweichen, welches das andere an seiner Steuerbordseite hat, wenn dieses vorlicher als  $112,5^{\circ}$  in Sicht gekommen ist. Das ausweichpflichtige Schiff muß, wenn es die Umstände gestatten, vermeiden, den Bug des anderen zu kreuzen. Praktisch bedeutet dies, daß es nach Steuerbord ausweichen soll.
3. Das vorfahrtberechtigte Schiff (der Kurshalter) muß Kurs und Geschwindigkeit beibehalten, es sei denn, das ausweichpflichtige

Schiff ist ihm so nahe gekommen, daß es allein die Kollision nicht vermeiden kann.

4. Ein Überholer muß ausweichen. Als Überholer gilt, wer sich einem anderen Fahrzeug aus einer Richtung achterlicher als  $112,5^{\circ}$  nähert.

Jede Kursänderung beim Ausweichen ist mit einem Schallsignal anzuzeigen.

Auszuweichen hat nach den Regeln also, außer bei entgegengesetzten oder fast entgegengesetzten Kursen und im äußersten Notfall, nur eines der beiden Schiffe. Vor allem die hier unter Punkt 3. niedergelegte Regel ist in der Vergangenheit Gegenstand heftiger Diskussionen gewesen. Deshalb hat eine internationale Konferenz im Oktober 1972 u.a. die Bestimmung dahingehend geändert, daß ein Schiff mit Vorfahrtsrecht früher als bisher ausweichen darf, falls das ausweichpflichtige Schiff nicht rechtzeitig eine Kursänderung einleitet. Diese und noch andere wichtige Änderungen, genannt sei z.B. noch die Bestimmung, daß kleinere Schiffe den sehr großen Schiffen nach Möglichkeit ausweichen müssen, werden ein Jahr, nachdem mindestens 15 Mitgliedsstaaten mit mindestens 65 % der Welthandelsflotte der Schiffe über 100 BRT, sei es nach der Tonnage oder der Anzahl der Fahrzeuge, je nachdem, welcher Fall früher eintritt, die Konvention ratifiziert haben, frühestens jedoch am 1.1.1976, in Kraft treten.

Nach den geltenden Fahrregeln ist also bei kollisionsgefährlichen Kursen auf offener See unter gleichartigen Schiffen das eine Schiff zum Ausweichen verpflichtet und das andere gehalten, Kurs und Geschwindigkeit beizubehalten. Es ist denkbar, daß, aus welchem Grund auch immer, das ausweichpflichtige Schiff nicht oder nicht ausreichend der Ausweichpflicht nachkommt. Der Kurshalter darf dann zwar noch im letzten Augenblick manövrieren; er darf diese gefährliche Begegnung aber nicht von vornherein ausschalten, indem er frühzeitig ausweicht. Woher weiß aber der Kurshalter, daß das ausweichpflichtige Schiff die Kollision allein nicht vermeiden kann? Ein Schiffsführer mag die Manövriereigenschaften seines Schiffes gut kennen, die des Gegners wird er nur raten können.

Nach der neuen, revidierten Seestraßenordnung darf der Kurshalter zwar früher als bisher ausweichen, es wird aber immer noch ausweichpflichtige und vorfahrtberechtigte Schiffe geben. Im Falle einer Kollision ist juristisch eines der Schiffe von vornherein in einer mißlichen Lage.

Es fällt auf, daß die Fahrvorschriften neben der Verwendung ungenauer Ausdrucksweisen wie "mäßige Geschwindigkeit", "Nahbereich" usw. nicht eindeutig bestimmen, wann eine Aktion erforderlich ist und daß auch die auszuführende Aktion selbst nicht immer eindeutig definiert ist. Zum Beispiel fehlen genaue Angaben darüber, ab wann eine Situation als gefährlich betrachtet werden muß. Die Folge ist, daß ein und dieselbe Situation von verschiedenen Schiffsführern anders beurteilt werden kann. In einer Kollisionssituation bei kreuzenden Kursen wird das ausweichpflichtige Schiff (freier Seeraum vorausgesetzt) im allgemeinen nach Steuerbord ausweichen, auch wenn ein negativer Passierabstand, der als zu gering für ein gefahrloses Vorbeifahren betrachtet wird, bereits vorhanden war, obwohl ein Ausweichen nach Backbord nicht ausdrücklich verboten ist. Es wird jedoch nicht riskieren, den Kurs nach Backbord zu ändern, um so den Passierabstand dem Betrag nach zu vergrößern; denn wenn trotzdem eine Kollision stattfindet, wird es ihm im Kollisionsprozeß schwerfallen, die alleinige Schuld des Gegners zu beweisen. Die Folge der Kursänderung nach Steuerbord ist aber möglicherweise, daß ein Passierabstand entsteht, der kleiner ist als er ursprünglich war. Unbefriedigend ist auch der Umstand, daß ein Schiff von einem physikalisch unbegründeten Winkel an von einem ausweichpflichtigen Fahrzeug zum Kurshalter wechseln kann. Gegen diese und ähnliche Kritik werden die Befürworter hervorheben, daß die Fahrvorschriften nicht mehr sein wollen und sollen, als den Schiffsführer zu "guter Seemannschaft" zu verpflichten; sie sollen Raum lassen für eigene verantwortungsvolle Entscheidungen der Schiffsführer.

Im Nebel oder bei verminderter Sicht muß das Fahrzeug laut Seestraßenordnung mit mäßiger Geschwindigkeit fahren, und wenn es anscheinend vorlicher als querab das Nebelsignal eines anderen hört, die Maschine stoppen und vorsichtig fahren. Es darf, wenn es vor dem Hören des Nebelsignals oder vor dem optischen Sichten

das andere Fahrzeug ortet (Radar), frühzeitig und durchgreifend handeln, um den Nahbereich zu meiden. Solange die Fahrzeuge einander nicht in Sicht haben, gibt es keine Ausweichvorschriften.

Dies ist auch eine schwache Stelle: bei guter Sicht gibt es Ausweichregeln, bei schlechter Sicht gibt es sie nicht. Da nicht eindeutig definiert wird, wann die Sicht als gut oder schlecht gilt, wird bei einer bestimmten Sicht möglicherweise der eine Schiffsführer die Ausweichregeln anwenden (da er die Sicht für gut hält), der andere aber nach freiem Ermessen manövrieren (da er nichts sieht). Es leuchtet ohne weiteres ein, daß leicht Unfälle entstehen können, wenn zeitweilig nur eines der Schiffe das andere optisch sieht und die Schiffe dabei keine konformen Regeln befolgen. Durch falsche Beurteilung der Sicht kann es also zu falschen Manövern kommen.

Dasselbe gilt auch bei Radarsicht, da in diesem Falle ebenfalls keine Ausweichregeln existieren. Nach der Seestraßenordnung befreit Radar ein Fahrzeug einerseits zwar nicht vom genauen Befolgen der Regeln, der Schiffsführer darf andererseits aber bei Radarortungen selbst entscheiden, nach welcher Seite er den Kurs ändern will. Eine Kursänderung nach Steuerbord sei aber im allgemeinen einer Kursänderung nach Backbord vorzuziehen.

Manöver, die bei verminderter oder Radarsicht nach Belieben ausgeführt werden, können folgende Nachteile haben:

- a) Es wird oft vorkommen, daß man ausweicht, obwohl ein ausreichender Passierabstand vorhanden und ein Manöver nicht echt erforderlich war.
- b) Ein bereits vorhandener Passierabstand kann zunichte gemacht werden.
- c) Die Aktionen beider Schiffe können sich aufheben.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Bestimmungen nach der Seestraßenordnung recht vage sind. Man sollte unzweideutige Regeln anstreben, die beim Benutzer Zweifel nicht aufkommen lassen können. Jedes Schiff muß in jeder Situation wissen, welche Aktion es ausführen muß und welche Aktion das andere Schiff ausführen wird.

Wie wir im vorigen Abschnitt gesehen haben, lassen sich genaue Ausweichregeln aufstellen, die sowohl bei guter Sicht als auch bei schlechter oder Radarsicht gleichermaßen anwendbar sind, wenn beide Schiffe grundsätzlich verpflichtet werden, auszuweichen. Dabei muß das Manöver so bemessen sein, daß auch dann ein ausreichender Passierabstand entsteht, wenn das andere Schiff, z.B. weil es kein Radar hat oder in der Manövrierfähigkeit behindert ist, nichts tut.

Soweit eine Betrachtung über die uns interessierenden, gegenwärtig geltenden Regeln der Seestraßenordnung. Zu bemerken wäre noch, daß eine Reihe Schiffahrt treibender Nationen darüber hinaus eine oder auch mehrere nationale Ordnungen für ihre Hoheitsgewässer erlassen hat. So gibt es z.B. allein für die Küsten- und Binnen- gewässer der U.S.A. vier verschiedene Ordnungen, die einander außerdem auch noch zum Teil widersprechen. Dieser Zustand ist sicher nicht befriedigend: die Vielfalt der Vorschriften kann nur verwirren und die Sicherheit beeinträchtigen.

Zum Abschluß dieses Abschnitts ist auf Bild 10 ein Flußdiagramm für die Kollisionsverhütung eines Maschinenschiffes nach der Seestraßenordnung bei der Begegnung mit einem anderen Schiff auf offener See dargestellt. Das Diagramm zeigt den logischen Ablauf einer Kollisionsverhütung nach den geltenden Fahrregeln. Es ist ersichtlich, daß schon bei einer einfachen Begegnung zwischen zwei Schiffen eine Vielzahl von Informationen und eine Reihe von Entscheidungen erforderlich sind. Dabei ist es zur Verhütung von Kollisionen wesentlich, daß man möglichst genaue Informationen erhält, sie richtig interpretiert und die richtigen Entscheidungen trifft.

## 6. Einfluß von Beobachtungsfehlern auf die Bestimmung von die Kollisionsgefahr kennzeichnenden Parametern

In den meisten Fällen sind Geschwindigkeit und Kurs des anderen Schiffes unbekannt; die relative Bewegung muß anhand von beobachteten Werten für Abstand und Peilung sowie ihrer Ableitungen nach der Zeit ermittelt werden. Die Beobachtungswerte sind systematischen und zufälligen Fehlern unterworfen; das Ergebnis der Rechnung kann daher auch nur eine zufällige Variable sein. Ebenso zufällig wird das Ergebnis des auf der Rechnung basierenden Manövers sein, auch wenn das in bezug auf die berechneten Daten richtige Manöver gewählt wird. Ob nun die Rechnung von Hand oder mit einem Computer erfolgt, als Eingangswerte hat man stets nur das, was vom eigenen Schiff aus gemessen werden kann; auch der Rechengang bleibt im Prinzip derselbe. Deshalb sind im Endergebnis auch etwa gleiche Fehler zu erwarten. Die Meßfehler gehen in beiden Fällen mit den Eingabedaten ein; bei der manuellen Berechnung kann außerdem menschliches Versagen hinzukommen.

Ein Beobachter auf einem fahrenden Schiff kann nur die relative Bewegung des anderen Schiffes direkt wahrnehmen. Das, was er unmittelbar beobachten und messen kann, sind Abstand  $a(t)$  und Seitenpeilung  $\alpha(t)$ ; wiederholte Beobachtungen liefern auch die Ableitungen nach der Zeit. Mit diesen Werten kann er den Passierabstand  $m$ , die Relativgeschwindigkeit  $V$  und die Zeit bis zum Punkt größter Annäherung  $T$  bestimmen. Daraus kann er in Verbindung mit den Daten seines Schiffes Kurs und Geschwindigkeit des Gegners ermitteln.

Aus der Annäherungsgeschwindigkeit

$$\dot{a} = -V \cos \delta \quad (10)$$

und der Quergeschwindigkeit

$$a \dot{\alpha} = -V \sin \delta \quad (11)$$

wobei  $\dot{\alpha}$  die Auswanderung der Peilung ist, ergibt sich zunächst die Beziehung

$$\tan \delta = \frac{a \dot{\alpha}}{\dot{a}} \quad (12)$$

aus der der Gefahrenwinkel ermittelt werden kann.

Da sich aus Gleichung (10) und (11) die Beziehung

$$\dot{\alpha} = \left( \frac{\ddot{a}}{a} \right)^{1/2} \quad (13)$$

ergibt, kann man den Gefahrenwinkel auch ohne Winkelmessung aus folgender Beziehung erhalten:

$$\tan \delta = \frac{(a\ddot{a})^{1/2}}{\dot{a}} \quad (14)$$

Es wäre in diesem Zusammenhang interessant zu wissen, welches Verfahren bei gegebenen Verteilungen der Fehler in der Abstands- und Winkelmessung zuverlässiger ist.

Die Größen  $m$  und  $V$  können nun aus Gleichung (3) bzw. (10) ermittelt werden; die Zeit  $T$  aus (4) und (10) nach Eliminierung von  $V$ .

In der Praxis werden die Abstands- und Winkelmessungen in annähernd gleichen Zeitintervallen durchgeführt und die Positionen des anderen Schiffes am Radarbildschirm verfolgt und (oder, falls kein Radar zur Verfügung steht, ausschließlich) auf einem Stück Papier graphisch aufgetragen. Bei Benutzung einer sogenannten Anti-Kollisionsanlage (diese besteht im Grunde aus einem mit einem Computer gekoppelten Radar) erfolgt die Ermittlung der kennzeichnenden Größen vollständig durch das Gerät. Dabei können die interessierenden Größen etwa als Vektoren graphisch auf dem Bildschirm dargestellt oder auch digital ausgegeben werden. Außerdem kann der Rechner unter Umständen auch Manövervorschläge liefern.

Die nachfolgende Betrachtung bezieht sich auf den Passierabstand. Er kann auch direkt, ohne den Gefahrenwinkel zunächst ermitteln zu müssen, bestimmt werden.

Sind  $a_1, \alpha_1$  die Polarkoordinaten bei einer ersten Beobachtung und  $a_2, \alpha_2$  die bei einer zweiten Beobachtung, so lautet der Ausdruck für den Passierabstand voll ausgeschrieben

$$m = \frac{a_1 a_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{[a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)]^{1/2}} \quad (15)$$

Der Nenner auf der rechten Seite der Gleichung stellt die vom anderen Schiff auf dem relativen Kurs während der Zeit zwischen der ersten und zweiten Beobachtung zurückgelegte Strecke dar. Offensichtlich ist  $m = 0$ , wenn die Peilung nicht auswandert. Wenn eine wirkliche Gefahr besteht, ist die Peilungsänderung klein und man kann schreiben:

$$m = \frac{a_1 a_2}{a_1 - a_2} (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (16)$$

In Bild 11 ist der Passierabstand über der Peilungsänderung nach Gleichung (15) für den uns interessierenden Fall  $a_2 < a_1$  aufgetragen. Der Bereich kleiner Peilungsdifferenz, für den der Passierabstand als proportional zur Peilungsdifferenz angenommen werden kann, wächst mit abnehmendem Verhältnis  $\frac{a_2}{a_1}$ . Bei einem Verhältnis  $\frac{a_2}{a_1}$  bis 0,8 kann der Passierabstand bei Peilungsdifferenzen bis etwa  $10^\circ$  sehr gut durch Gleichung (16) angenähert werden. Beobachtungs- und Meßfehler machen die Bestimmung von  $m$  unsicher. Es ist realistisch, Fehler in der Winkelmessung als konstant (unabhängig von der Größe des Winkels) und Fehler in der Abstandsmessung als zum Abstand proportional anzunehmen. Ein systematischer Fehler in der Winkelmessung wird keinen Einfluß auf  $m$  haben, da der Winkel in der Formel nur als Differenz auftritt. Ein systematischer Fehler in der Abstandsmessung von der Größe  $\alpha \cdot a$  verursacht dagegen einen Fehler in  $m$  von der Größe

$$\Delta m = \alpha \cdot m \quad (17)$$

Das heißt, daß der wahre Passierabstand im gleichen Verhältnis wie der Abstand zum Gegner über- oder unterbestimmt wird. Ein Kollisionskurs, d.h.  $m = 0$ , wird auch als solcher vorhergesagt

(was eigentlich selbstverständlich ist, da bei Peilungsdifferenz Null der Passierabstand ebenfalls Null ist, ganz gleich, welche Abstände man messen mag). Systematische Fehler lassen sich einfach durch Korrekturen beheben. Eine Gefahr können sie nur sein, wenn man sie nicht erkannt hat.

Wichtiger ist die Auswirkung zufälliger Fehler. Zu ihrer Bestimmung wird von folgender Beziehung Gebrauch gemacht:

Es sei  $u = h(x_1, \dots, x_n)$  eine Funktion von  $n$  Veränderlichen. Dann ist, wenn die Variablen unkorreliert sind, die Standardabweichung der Zufallsgröße  $u$  näherungsweise

$$\sigma_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (18)$$

Dabei ist  $\sigma_{x_i}$  die Standardabweichung der Variablen  $x_i$ .

Auf unseren Fall angewendet, ergibt sich mit Gleichung (15), mit der Standardabweichung der Winkelmessung  $\sigma_\alpha$  und der Standardabweichung der Abstandsmessung  $\sigma_a = \nu_a \cdot a$  ( $\nu_a$  ist der Variationskoeffizient), die Standardabweichung für den Passierabstand

$$\sigma_m = \left\{ \frac{2\sigma_\alpha^2 a_1^2 a_2^2 [a_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - a_2]^2 [a_1 - a_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)]^2}{[a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)]^3} + \frac{\nu_a^2 m^2 (a_1^2 + a_2^2 - 2m^2)}{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)} \right\}^{1/2} \quad (19)$$

Ist die Peilungsänderung  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  klein, so kann statt von Gleichung (15) von Gleichung (16) ausgegangen werden und man erhält

$$\sigma_m = \frac{[2\sigma_\alpha^2 a_1^2 a_2^2 + \nu_a^2 m^2 (a_1^2 + a_2^2)]^{1/2}}{a_1 - a_2} \quad (20)$$

die zu

$$\sigma_m = \frac{a_1 a_2}{a_1 - a_2} \sigma_\alpha \sqrt{2} \quad (21)$$

wird, wenn  $m = 0$  ist oder wenn der Term, der die Standardabweichung für den Abstand enthält, vernachlässigbar klein ist gegenüber dem Term, der die Standardabweichung für den Winkel enthält. Letzteres ist der Fall, wenn  $\sigma_\alpha$  und  $\nu_a$  von der gleichen Größenordnung sind und  $m$  gegenüber  $a$  klein ist. Wir wollen im folgenden voraussetzen, daß dies der Fall ist. (Realistische Werte sind z.B.  $1,5^\circ$  für die Standardabweichung der Winkelmessung und 2,5 % für den Fehler der Abstandsmessung. Mit diesen Werten ist  $\sigma_\alpha = 0,026$  und  $\nu_a = 0,025$ ).

Die Standardabweichung des Passierabstandes hängt also nicht nur von den Standardabweichungen der Messungen ab, sondern auch davon, in welchen Abständen die Messungen gemacht werden. Sie nimmt, für jede Standardabweichung der Messung, stetig mit kleiner werdendem Abstand, bei dem die letzte Messung vorgenommen wird, ab. Sie ist groß, wenn die Messungen in kleinen Zeitintervallen stattfinden. Je größer der Unterschied zwischen  $a_1$  und  $a_2$ , d.h. also, je länger das andere Schiff beobachtet wird, um so kleiner die Standardabweichung. Allerdings wird durch ein längeres Beobachten und Hinauszögern der Messung die für ein eventuelles Ausweichmanöver zur Verfügung stehende Zeit immer kürzer. Es wäre zu untersuchen, inwieweit es besser ist, eine kürzere Beobachtungszeit zu wählen mit größerer Standardabweichung und mehr Zeit für das Manöver, oder eine längere Beobachtungszeit mit kleinerer Standardabweichung und

weniger Zeit zum Manövrieren. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Ausweichmanöver tatsächlich zur Kollisionsvermeidung führt, wird abnehmen, wenn das Manöver entweder zu früh oder zu spät eingeleitet wird.

Man kann fürs erste annehmen, daß der berechnete Passierabstand normalverteilt ist mit dem Erwartungswert  $m_w$  und der Standardabweichung  $\sigma_m$ . Die Verteilungsdichte ist dann

$$f(m; m_w, \sigma_m) = \frac{1}{\sigma_m \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(m - m_w)^2}{2\sigma_m^2}} \quad (22)$$

$$-\infty < m < \infty, \quad -\infty < m_w < \infty, \quad \sigma_m > 0$$

Für die Lösung von Aufgaben wird die Dichtefunktion oft normiert, indem man  $m_w = 0$  und  $\sigma_m = 1$  einsetzt;

$$f(u; 0, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (23)$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß die Zufallsgröße vermindert um den Erwartungswert geteilt durch die Standardabweichung kleiner ist als eine Zahl  $z$ , ist gleich dem von  $-\infty$  bis  $z$  zu erstreckenden Integral über dieser Funktion;

$$W\left\{\frac{m - m_w}{\sigma_m} < z\right\} = \int_{-\infty}^z f(u; 0, 1) du \quad (24)$$

Dieses Integral ist tabelliert. Wenn also beispielsweise  $\sigma_m$  und  $m_w$  bekannt sind, so ist die Verteilung von  $m$  auch bestimmt.

Da der Passierabstand also eine Verteilung hat, kann ein Kollisionskurs als ungefährlicher Passierkurs und umgekehrt ein ungefährlicher Passierkurs als Kollisionskurs vorhergesagt werden. Ebenso kann ein Kreuzen vor dem Bug des Gegners als Kreuzen hinter dem Heck des Gegners oder umgekehrt ein Kreuzen hinter dem Heck als Kreuzen vor dem Bug festgestellt werden. Sowohl das Vorzeichen als auch die Größe des ermittelten Passierabstandes sind unsicher. Die Wahrscheinlichkeit, daß der wahre Passierabstand dasselbe

Vorzeichen hat wie der ermittelte, ist 0,9986 oder rund 700:1, wenn der ermittelte Passierabstand dreimal so groß ist wie die Standardabweichung. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt ab, wenn der ermittelte Passierabstand im Verhältnis zur Standardabweichung kleiner wird.

Ziel eines Ausweichmanövers ist es, einen ausreichenden Passierabstand entstehen zu lassen. Es wäre zu untersuchen, was hierzu unter Berücksichtigung der Beobachtungsfehler besser ist: nur eines der Schiffe manövriert oder beide Schiffe manövrieren, wenn entweder nur nach einer Seite oder je nach Situation auch nach der anderen Seite ausgewichen werden darf.

An einigen Beispielen sei gezeigt, was sich aus der Tatsache, daß die Meßdaten unsicher sind, konkret ergeben kann.

Die Wahrscheinlichkeit, daß auf Grund der Beobachtungen ein Kreuzen hinter dem (an Steuerbordseite befindlichen) Gegner festgestellt wird, obwohl in Wirklichkeit ein Kreuzen vor dem anderen Schiff mit der größten Annäherung  $m_w$  stattfinden wird, ist

$$W \{ m > 0 \} = \int_0^{\infty} f(m; m_w, \sigma_m) dm \quad (25)$$

In Bild 12 ist diese Wahrscheinlichkeit dargestellt für  $m_w = -1$  sm für Beobachtungen zu verschiedenen Abständen zum Gegner bei einer angenommenen Standardabweichung der Winkelmessung von  $1^\circ$ . Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Kreuzen vor als Kreuzen hinter dem Gegner vorhergesagt wird, nimmt sowohl mit kleiner werdendem Wert  $a_2$  für einen bestimmten Wert  $a_1$  als auch mit größer werdender Differenz ( $a_1 - a_2$ ) ab. Sie ist jedoch nur sehr klein, wenn  $a_2$  genügend klein ist. Beobachtungen bei größeren Abständen sind unzuverlässiger. Der Grenzfall  $a_1 = a_2$  (es findet nur eine Beobachtung statt) liefert einleuchtenderweise eine 50 %ige Wahrscheinlichkeit. Entscheidet bei diesem Beispiel ein Schiffsführer, der auf Grund seiner Beobachtungen ein knappes Kreuzen hinter dem Gegner errechnet, für ein Manöver, das den Passierabstand, wie es ihm scheint, dem Betrag nach vergrößern soll, so kann er sein

Schiff unter Umständen gerade dadurch auf Kollisionskurs bringen (vorausgesetzt, daß das andere Schiff nichts unternimmt).

Eine andere praktische Anwendung ist das Folgende: Nehmen wir an, das betrachtete Schiff sichtet einen potentiellen Kollisionsgegner und stellt dabei eine Peilungsauswanderung fest. Was ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine Kollision nicht stattfindet, wenn nicht manövriert wird ?

Einem bestimmten Passierabstand entspricht eine bestimmte Peilungsänderung bei bestimmten Abständen zum Gegner. Einem Mindestabstand  $m_k$ , dessen Unterschreitung mit einer Kollision gleichgesetzt wird, entspricht dann auch ein Mindestwert  $\Delta\alpha_k$  für die Peilungsänderung. Der wahre Wert  $\Delta\alpha_w$  ist unbekannt. Bei einem beobachteten Wert  $\Delta\alpha$  kann man also nicht unmittelbar feststellen, ob die Schiffe nicht auf Kollisionskurs sind, d.h. ob  $|\Delta\alpha_w| > |\Delta\alpha_k|$  ist. Man kann aber Bereiche angeben, die  $\Delta\alpha_w$  mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überdecken. Mit  $\sigma_{\Delta\alpha} = \sigma_{\alpha} \sqrt{2}$  gilt folgendes:

$$W \{ \Delta\alpha - z \sigma_{\Delta\alpha} < \Delta\alpha_w < \infty \} = \int_{-\infty}^z f(u; 0, 1) du \quad (26)$$

$$W \{ -\infty < \Delta\alpha_w < -\Delta\alpha + z \sigma_{\Delta\alpha} \} = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{2\Delta\alpha}{\sigma_{\Delta\alpha}} - z} f(u; 0, 1) du \quad (27)$$

Dabei wird angenommen, daß die Verwendung des angegebenen  $\sigma$ -Wertes als Teil der Bereichsgrenzen eine ausreichende Näherung ist.

Wählt man  $z$  so, daß die Bereichsgrenzen  $\Delta\alpha - z \sigma_{\Delta\alpha}$  und  $-\Delta\alpha + z \sigma_{\Delta\alpha}$  mit  $+\Delta\alpha_k$  bzw.  $-\Delta\alpha_k$  zusammenfallen, erhält man die Wahrscheinlichkeiten, daß die  $\Delta\alpha_w$  überdeckenden Bereiche über  $+\Delta\alpha_k$  bzw. unter  $-\Delta\alpha_k$  liegen. Die Summe dieser Wahrscheinlichkeiten ist auch die Wahrscheinlichkeit dafür, daß bei einer bestimmten Beobachtung  $\Delta\alpha$  die Bedingung  $|\Delta\alpha_w| > |\Delta\alpha_k|$  erfüllt wird oder mit anderen Worten, daß keine Kollision eintritt.

Bild 13 zeigt die Wahrscheinlichkeit, daß keine Kollision stattfindet, wenn bei einer Abstandsänderung von  $a_1 = 14$  sm auf  $a_2$  eine Peilungsänderung von  $\Delta\alpha$  beobachtet wird. Die Standardabweichung der Winkelmessung ist hier mit  $2^\circ$  angenommen, und der Passierabstand, dessen Unterschreitung eine Kollision bedeutet, mit  $1/4$  sm.

Das Diagramm zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit, daß keine Kollision stattfindet, erwartungsgemäß gering ist, wenn die beobachtete Peilungsänderung von der gleichen Größenordnung ist wie die Standardabweichung der Winkelmessung. Diese Wahrscheinlichkeit ist um so höher, je größer die beobachtete Peilungsänderung.

Wird bei einer bestimmten Abstandsänderung die Peilungsänderung vom Schiffsführer als zu gering betrachtet, wird er sich möglicherweise für ein Manöver entscheiden in der Hoffnung, dadurch eine ausgeprägte Peilungsauswanderung zu erhalten. Trifft er diese Entscheidung recht früh, so wird er mit mehr oder weniger hoher Wahrscheinlichkeit Manöver in Kauf nehmen, die nicht echt nötig sind. Genau so wie die Wahrscheinlichkeit, daß keine Kollision eintritt, kann man die Wahrscheinlichkeit dafür bestimmen, daß ein Manöver überflüssig ist. Man braucht dazu nur den kritischen Wert für den Passierabstand so groß zu wählen, daß bei seiner Überschreitung ein Manöver nicht erforderlich ist.

Bild 14 zeigt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Manöver nicht erforderlich ist, wenn bei einer Abstandsänderung von  $a_1 = 14$  sm auf  $a_2$  eine Peilungsänderung von  $\Delta\alpha$  beobachtet wird. Dabei ist angenommen, daß ein Manöver überflüssig ist, wenn der wahre Passierabstand größer ist als 1 sm. Dem Bild ist u.a. zu entnehmen, daß, je früher man eine bestimmte Peilungsänderung für unzureichend hält und manövriert, um so höher die Wahrscheinlichkeit, daß das Manöver nicht erforderlich ist.

Wir haben bisher festgestellt, welche unmittelbaren Konsequenzen gezogen werden können, wenn die an Bord gewonnenen Daten Zufallsgrößen sind. Dabei brauchen die Daten nicht nur dadurch Zufallsgrößen zu sein, weil die Messungen an sich ungenau sind, sondern sie können auch dadurch unzuverlässig sein, weil das andere Schiff während oder nach den Beobachtungen manövriert. Wir haben aber noch

nicht untersucht, wie ein Manöver die Kollisionswahrscheinlichkeit verändert.

Es ist aber jetzt schon ersichtlich, daß der Zeitpunkt, zu dem ein Manöver eingeleitet wird, ein wichtiger Faktor ist, wenn man das Manöver optimal gestalten will. Je früher das Manöver ausgeführt wird, um so kleiner die erforderliche Kursänderung, um einen bestimmten Passierabstand zu erreichen, um so höher aber die Wahrscheinlichkeit, daß es zur Erzielung dieses Passierabstandes gar keines Manövers bedarf. Da die Daten, auf denen die Entscheidung zum Manövrieren beruht, um so unzuverlässiger sind, je früher sie gewonnen werden, wird auch die Wahrscheinlichkeit, daß das Manöver nicht das bringt, was man sich erhofft, um so höher sein, je früher die Entscheidung zum Manövrieren getroffen wird.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Um zu einem mathematischen Modell zur Berechnung der Kollisionsrate zu kommen, ist es erforderlich, die Elemente zu kennen, die bei einer Kollision eine Rolle spielen. Eines dieser Elemente sind die Bewegungen der Schiffe beim Begegnen, Kreuzen, Überholen und Überholtwerden sowie beim Ausweichen. In diesem Bericht werden die Grundlagen zur Kinematik der Schiffsbegegnung und die sich daraus ergebenden Folgerungen, die für die Aufstellung einer optimalen Ausweichstrategie von Bedeutung sind, gegeben.

Im Hinblick auf die Kollisionsverhütung werden die Fahrregeln nach der Seestraßenordnung einer kritischen Betrachtung unterzogen. Der Einfluß von Beobachtungsfehlern an Bord auf die Situationsbestimmung, und damit auf das Erkennen einer eventuellen Kollisionsgefahr, wird diskutiert.

Auf Grund der Verteilungen der Meßdaten könnte man eine Ausweichstrategie bestimmen, bei der die Kollisionswahrscheinlichkeit am geringsten ist. Hierzu ist eine Untersuchung erforderlich, die auf die Beantwortung folgender Fragen hinzielt:

Wer soll ausweichen (eines der Schiffe oder beide),  
bei welcher Entfernung soll das Manöver eingeleitet werden,  
welches Manöver ist auszuführen.

Ferner ließen sich durch Hinzuziehung des Zeitverzugs und der Querversetzung beim Manövrieren die Ergebnisse der Begegnungskinematik verfeinern und die Manöviereigenschaften der Schiffe berücksichtigen.

## 8. Schlußbemerkung

Der Verfasser dankt den Mitarbeitern des SFB 98 für Diskussionen und Kritik, die an einigen Stellen zu klareren Formulierungen geführt haben; insbesondere möchte der Verfasser Herrn Professor Dr.-Ing. O. Krappinger danken.

9. Literatur

- /1/ Calvert, E.S.: Manoeuvres to ensure the avoidance of collision  
J. Inst. Navig., London, 13 (1960) 127-137
- /2/ Hollingdale, S.H.: The mathematics of collision avoidance in two dimensions  
J. Inst. Navig., London, 14 (1961) 243-261
- /3/ Jones, K.D.: Practical manoeuvres to avoid collision at sea  
J. Inst. Navig., London, 24 (1971) 60-66
- /4/ Krappinger, O.: Die quantitative Berücksichtigung der Sicherheit und Zuverlässigkeit bei der Konstruktion von Schiffen  
Jahrb. STG 61 (1967) 314-334
- /5/ Krappinger, O.: Die Kollisionsrate als Element des Systemansatzes im Schiffbau  
Vortrag beim 1. Kolloquium des SFB 98 im IfS am 31.1.1972, IfS-Bericht Nr. 289
- /6/ Morrel, J.S.: The physics of collision at sea  
J. Inst. Navig., London, 14 (1961) 163-184
- /7/ Müller/Krauß: Handbuch für die Schiffsführung, 7. Auflage, Bd. I, Kapitel II: Terrestrische Navigation, und Kapitel III: Funknavigation  
Springer-Verlag (1970)
- /8/ Müller/Krauß: Handbuch für die Schiffsführung, 7. Auflage, Bd. II, Kapitel I/1: Seestraßenordnung, und Kapitel II/1: Wichtige Manövrereigenschaften  
Springer-Verlag (1968)
- /9/ Padfield, P.: An agony of collisions  
Hodder and Stoughton, London (1966)

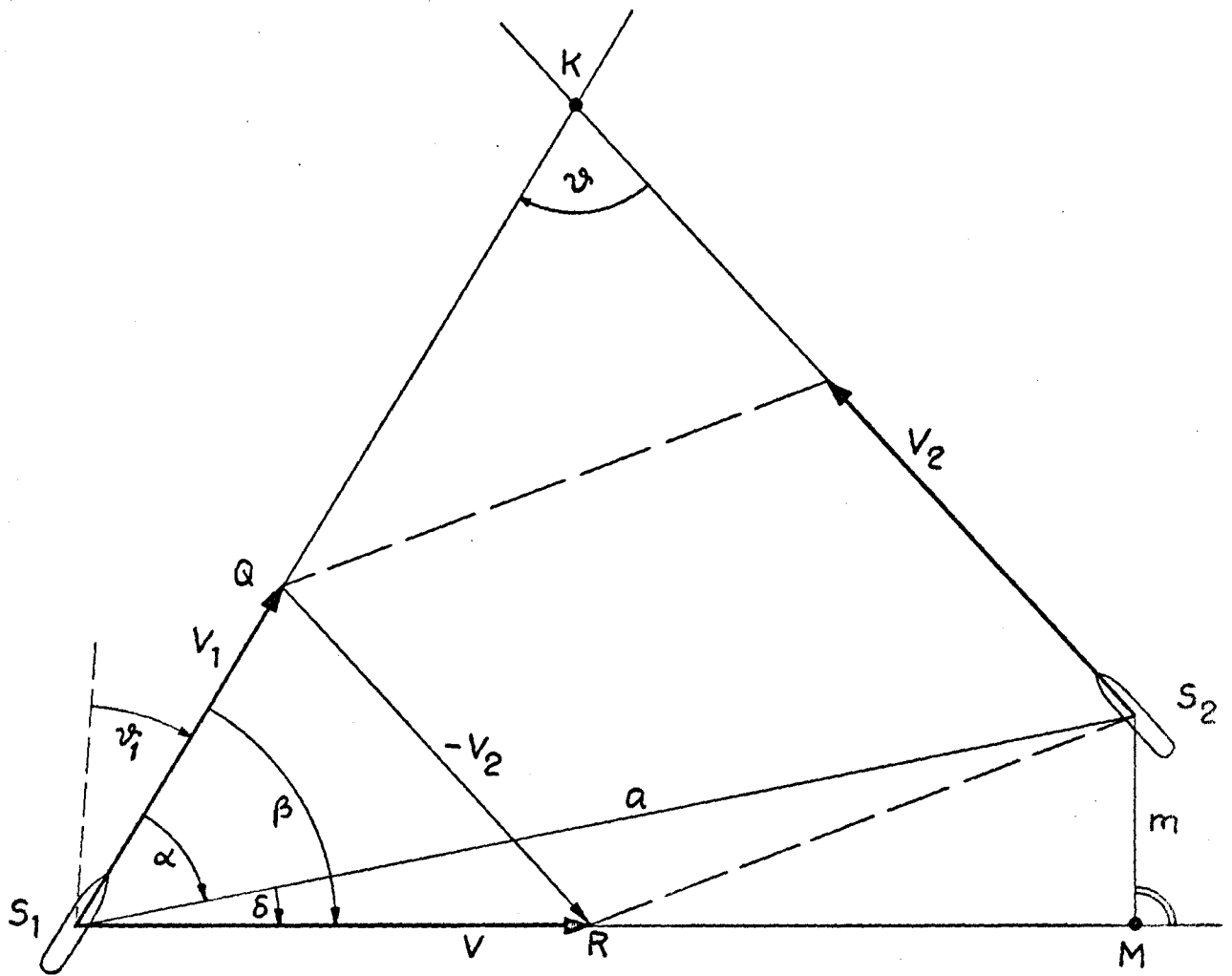


Bild 1  
 Skizze zur Geometrie der Schiffsbegegnung

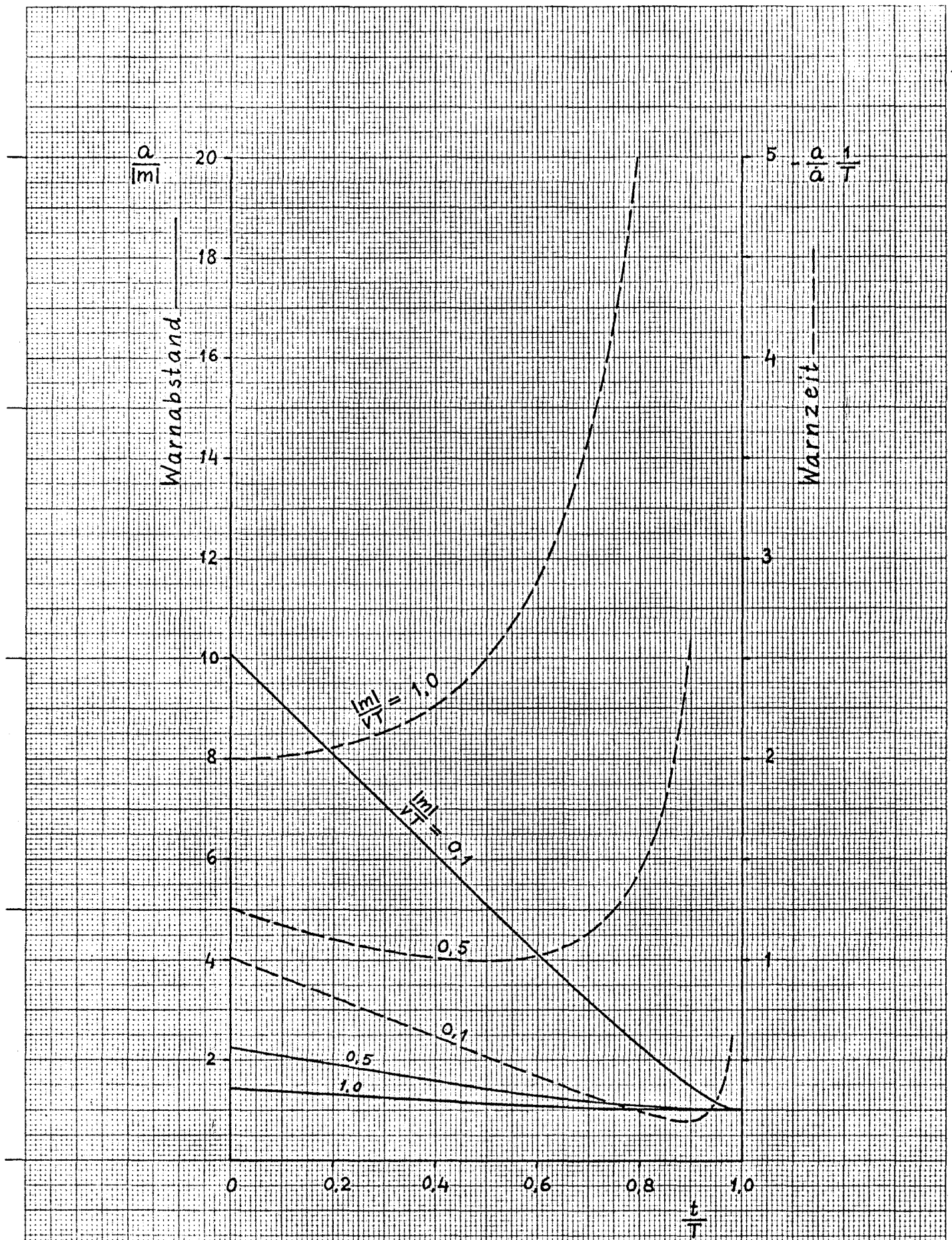


Bild 2

Kollisionswarnabstand und Kollisionswarnzeit  
als Funktion der realen Zeit ( $m \neq 0$ )

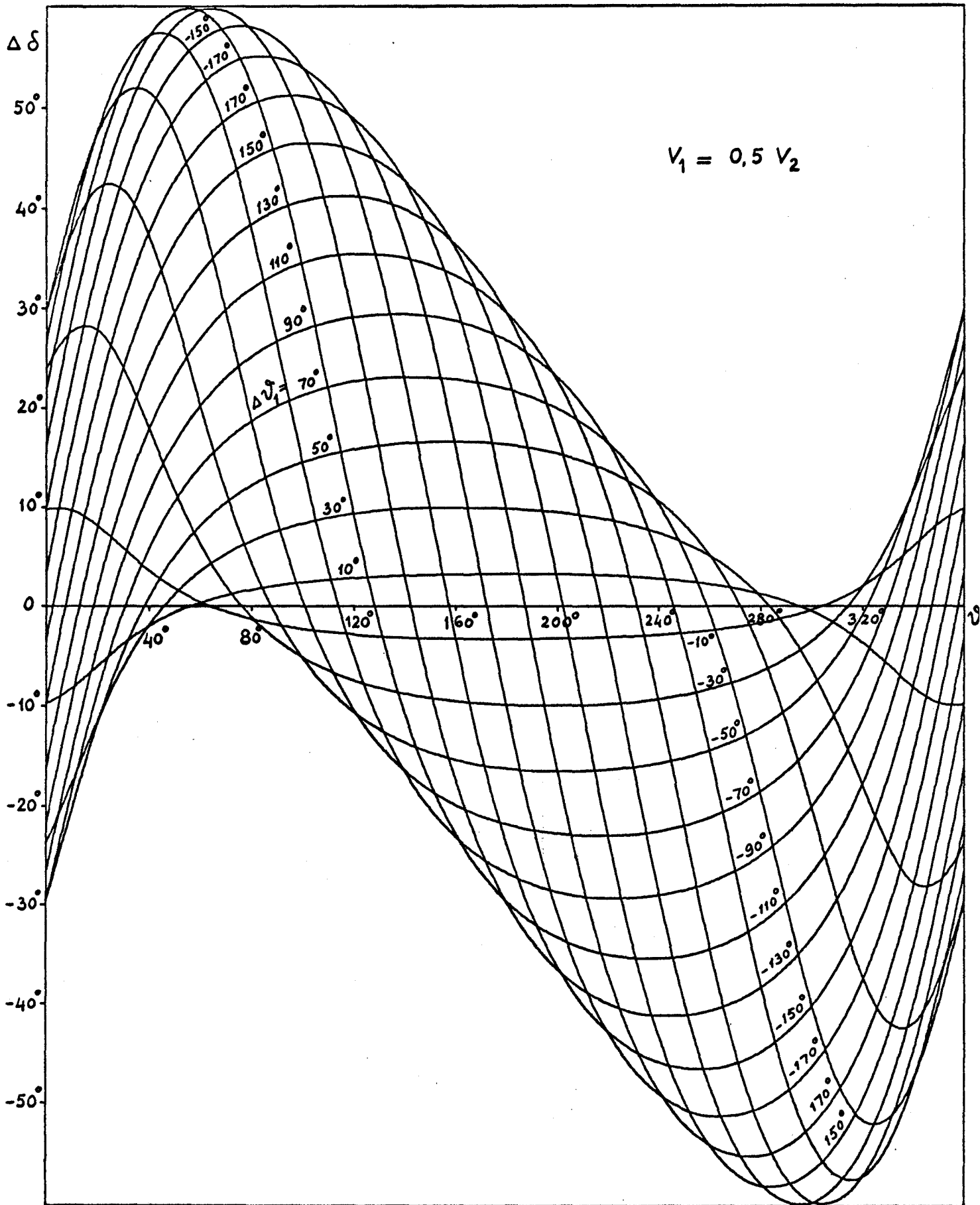


Bild 3  
 Kursänderungsdiagramm

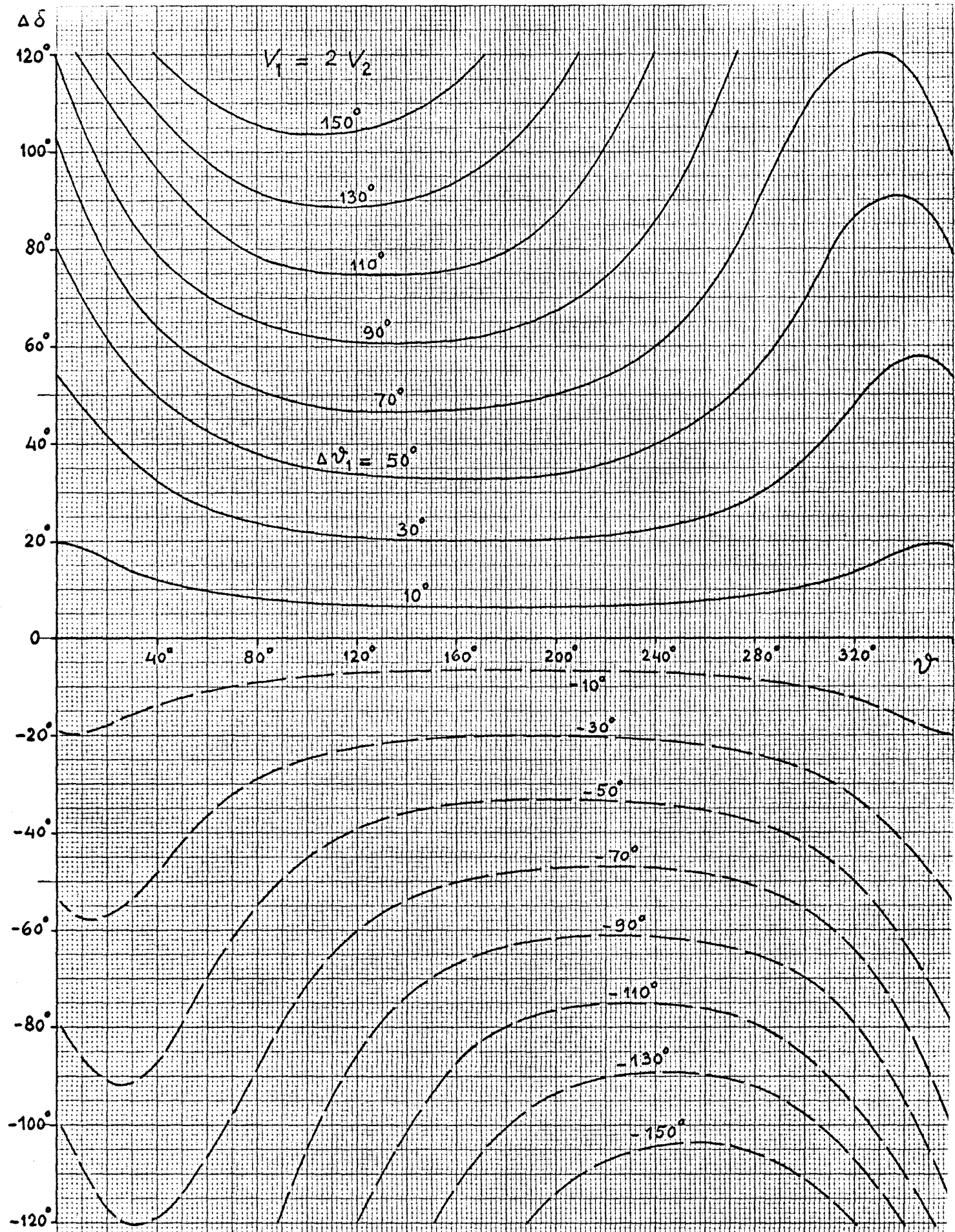


Bild 4  
Kursänderungsdiagramm

$\Delta \delta$

20°

16°

12°

8°

4°

-4°

-8°

-12°

-16°

-20°

$V_1 = 0,5 V_2$

-0,5

-0,3

$\frac{\Delta V_1}{V_1} =$

-0,1

40°

80°

120°

240°

280°

320°

0,1

0,3

0,5

Bild 5  
Fahrtänderungsdiagramm

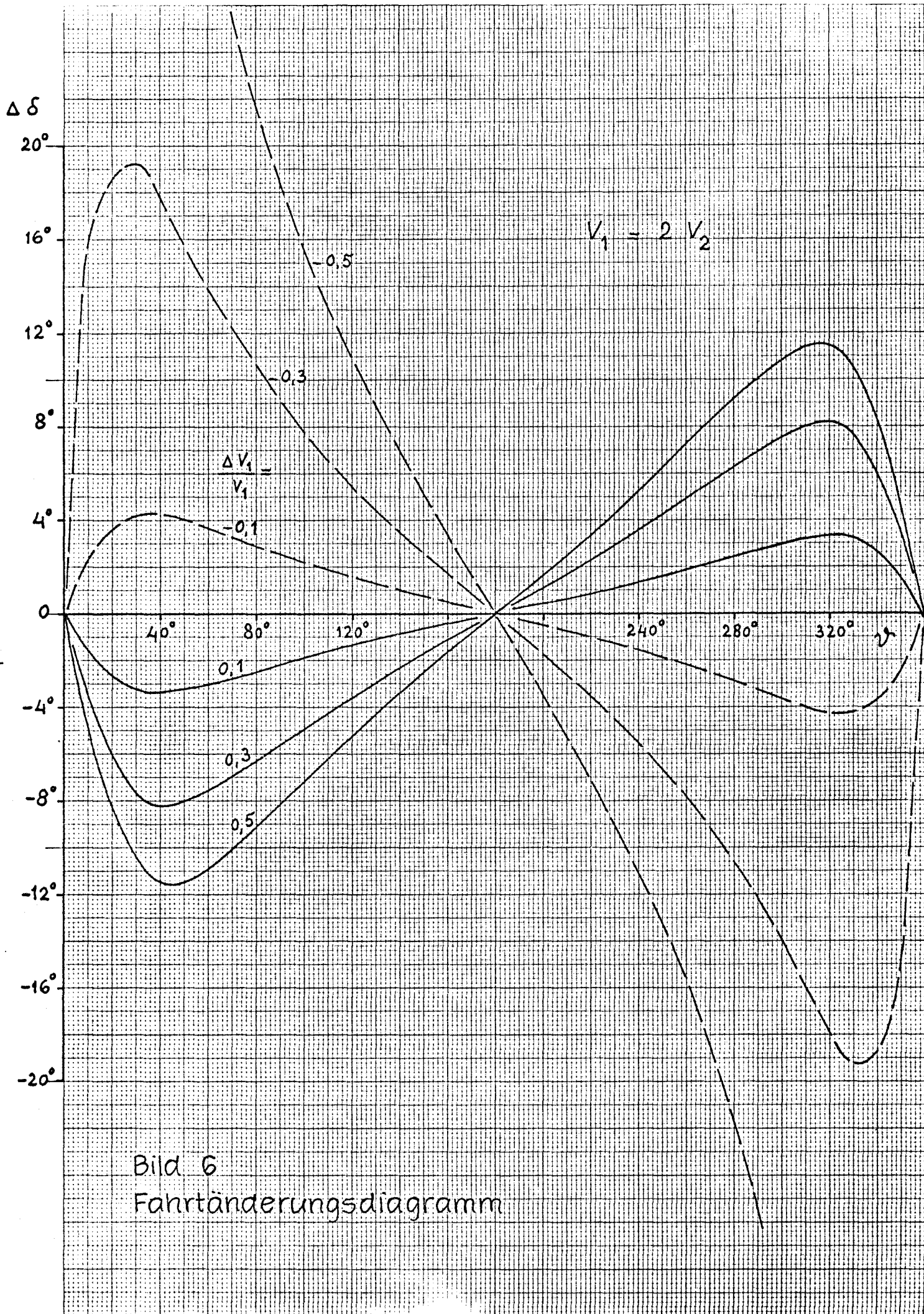


Bild 6  
 Fahrtänderungsdiagramm

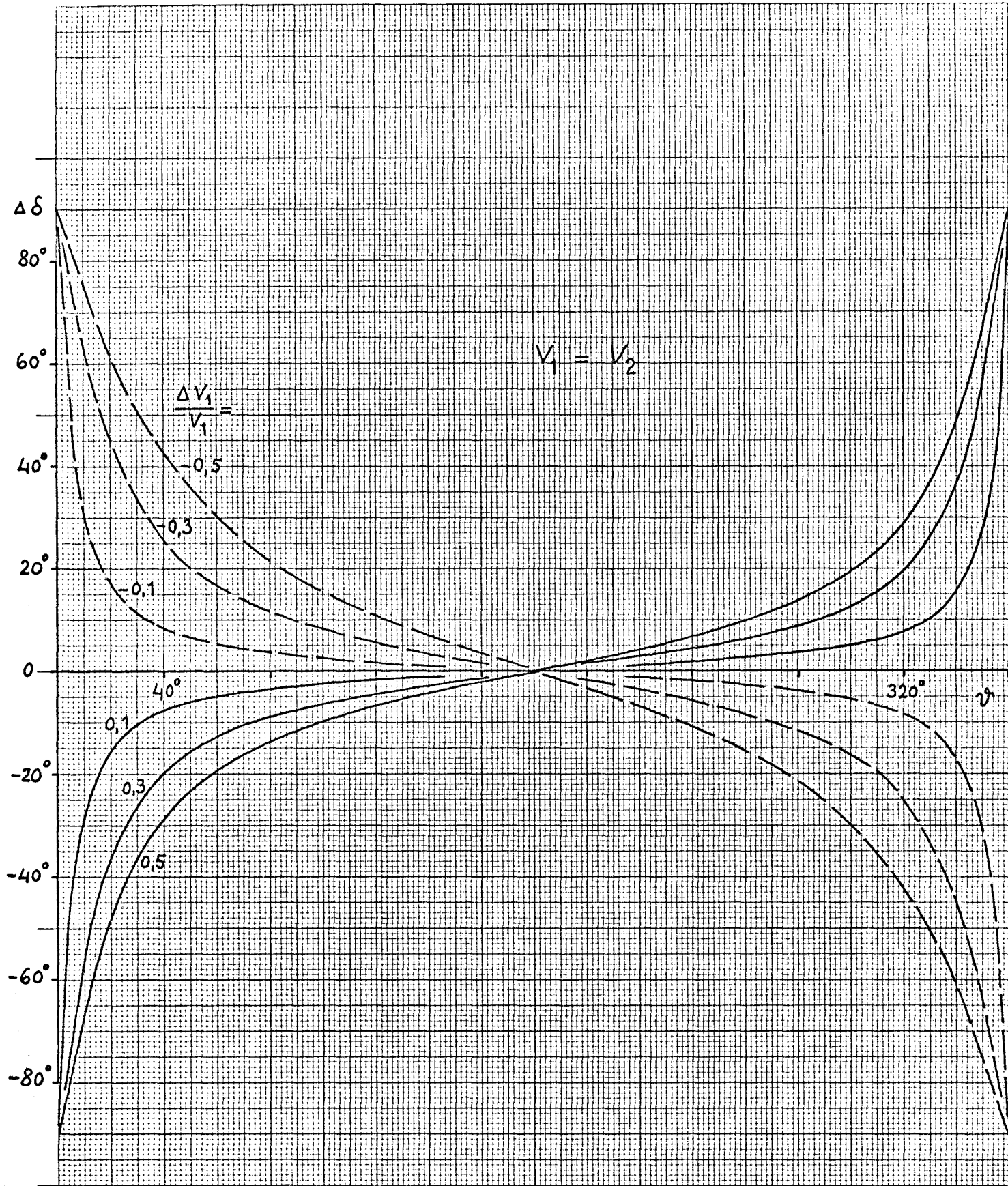


Bild 7  
Fahrtänderungsdiagramm

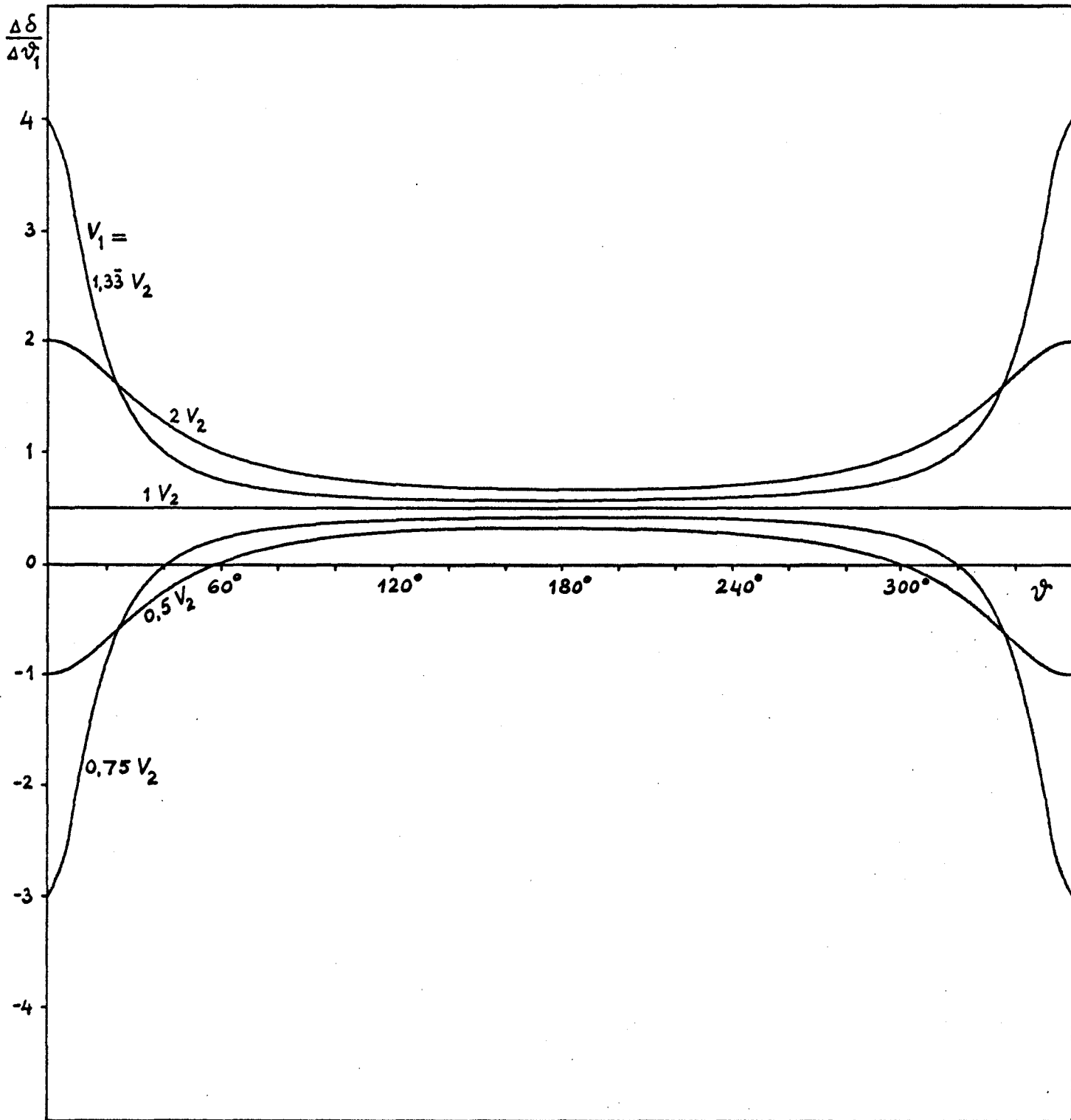


Bild 8

Einfluß kleiner Kursänderung auf die Gefahrenwinkel-  
änderung

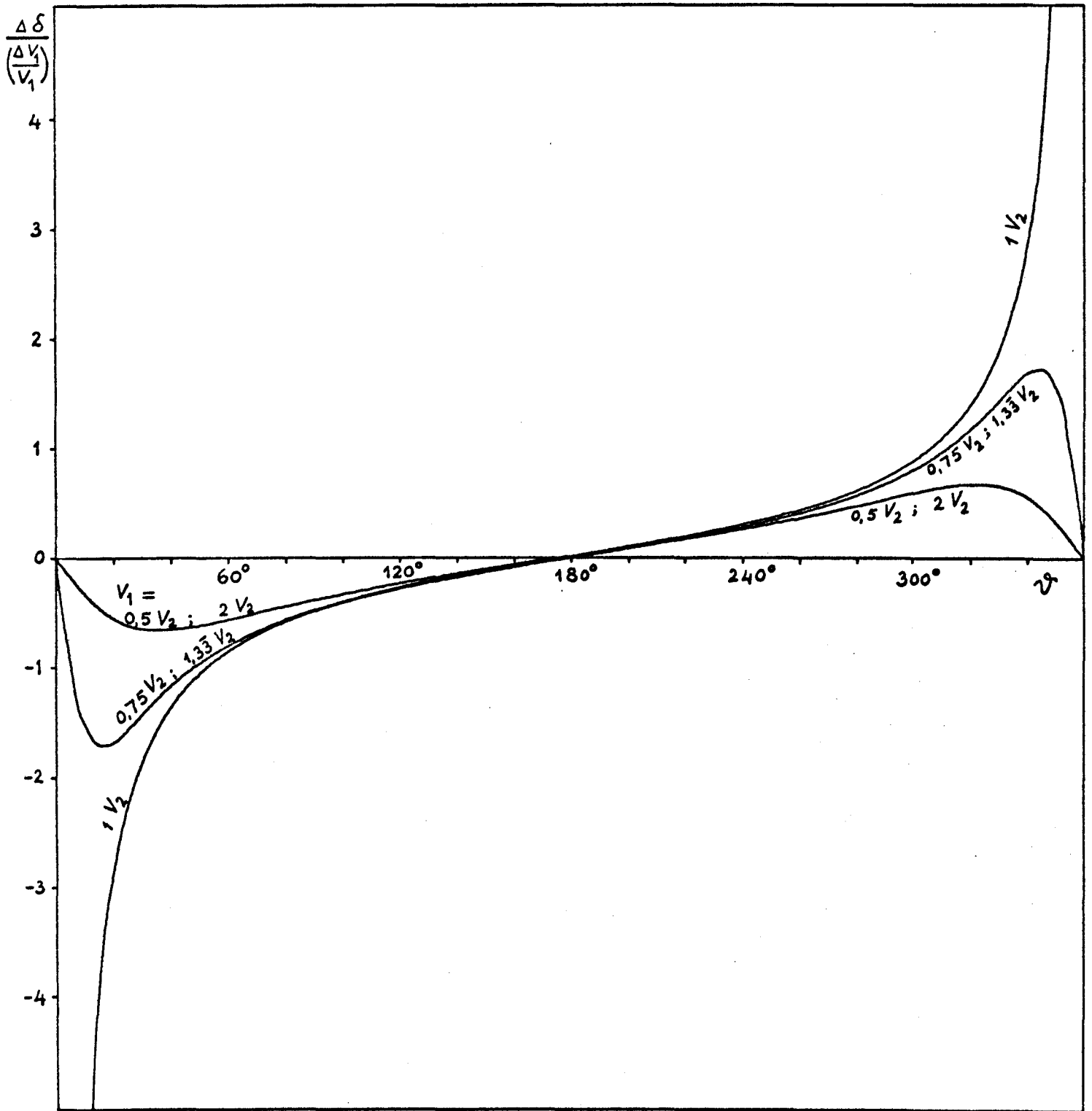


Bild 9

Einfluß kleiner Fahrtänderung auf die Gefahrenwinkeländerung

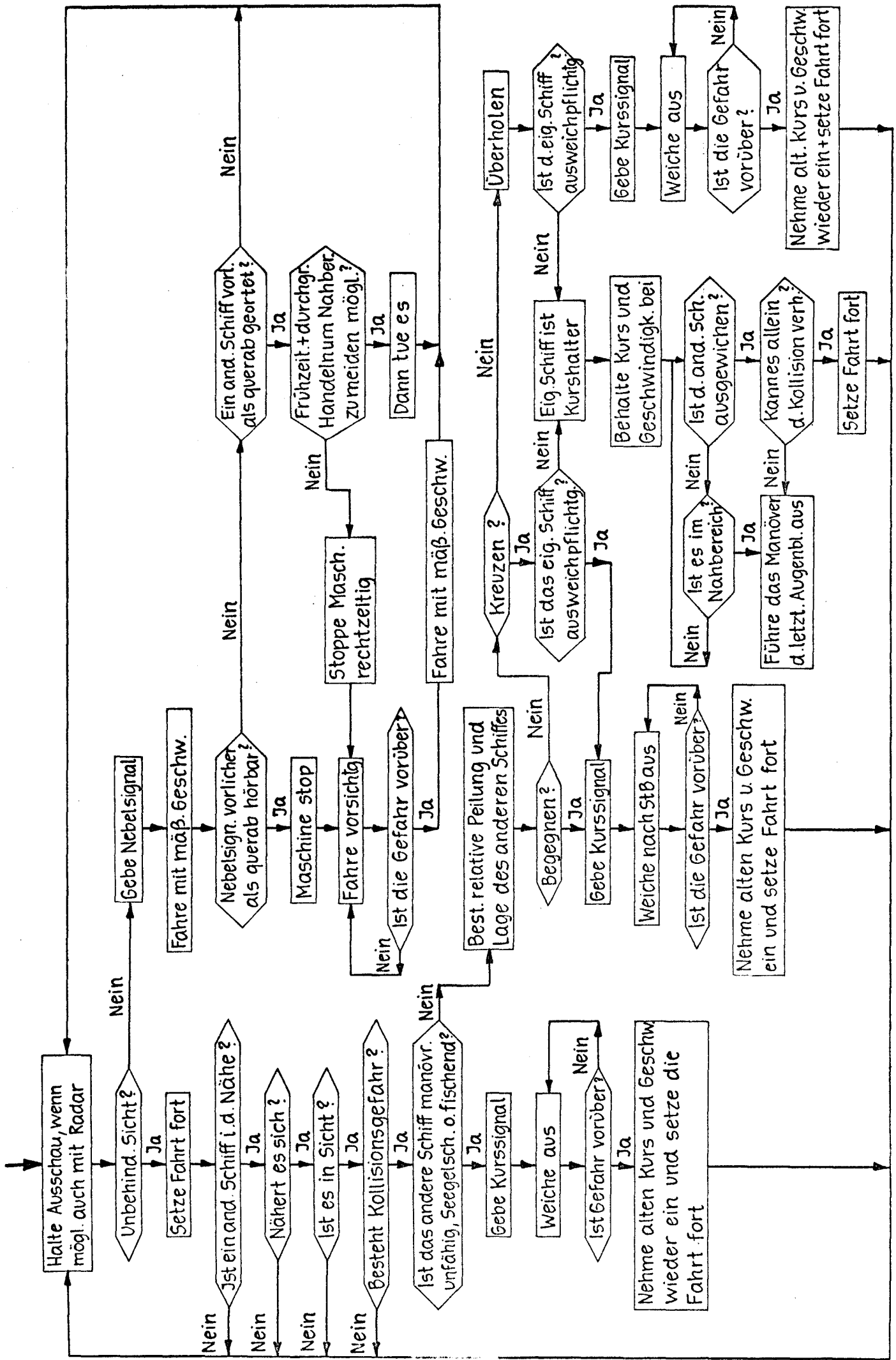


Bild 10 Flußdiagramm für die Kollisionsverhütung nach der Seestraßenordnung bei der Begegnung mit einem anderen Schiff auf offener See

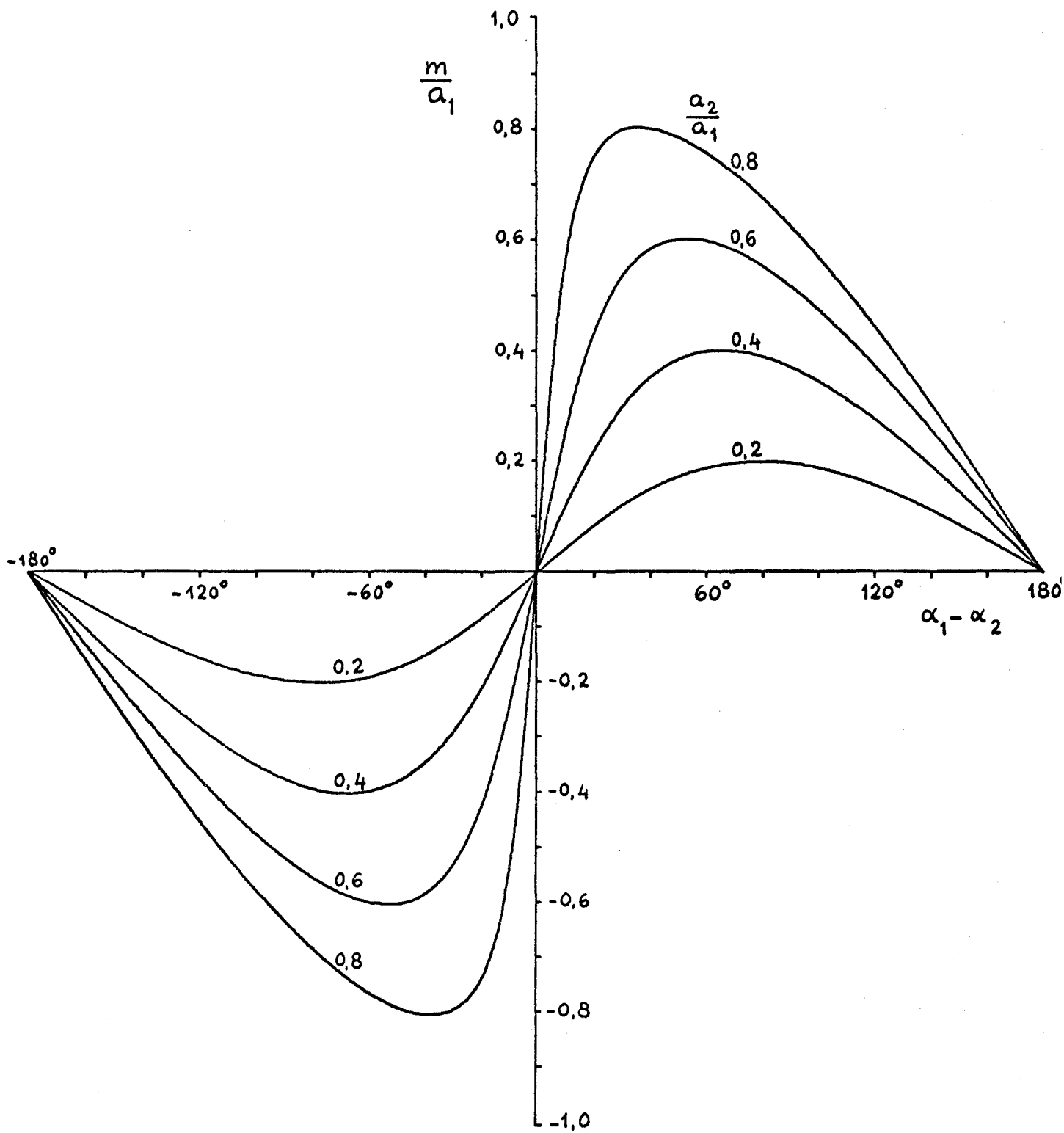
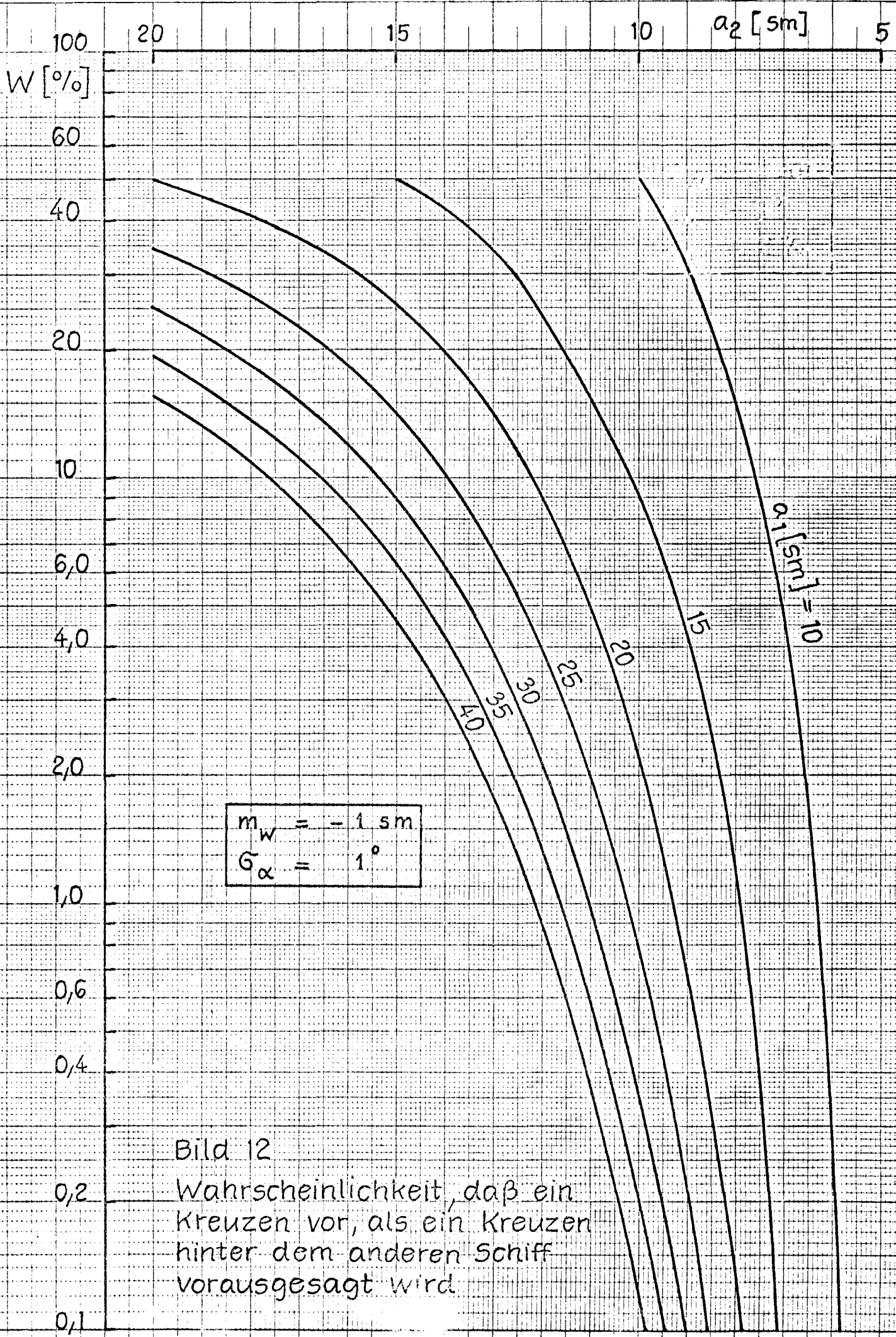


Bild 11  
 Passierabstand als Funktion der Peiländerung



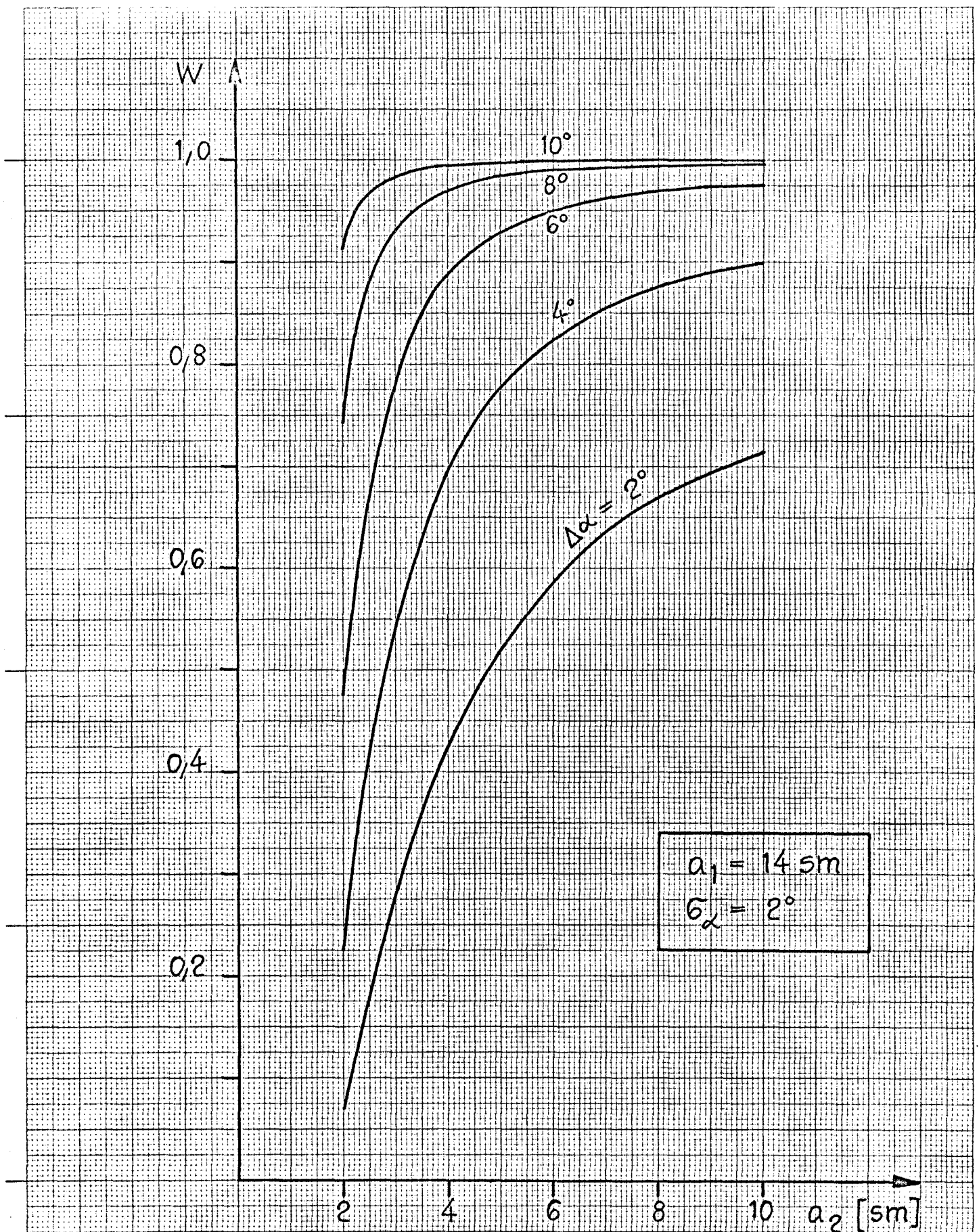


Bild 13

Wahrscheinlichkeit, daß eine Kollision nicht stattfindet

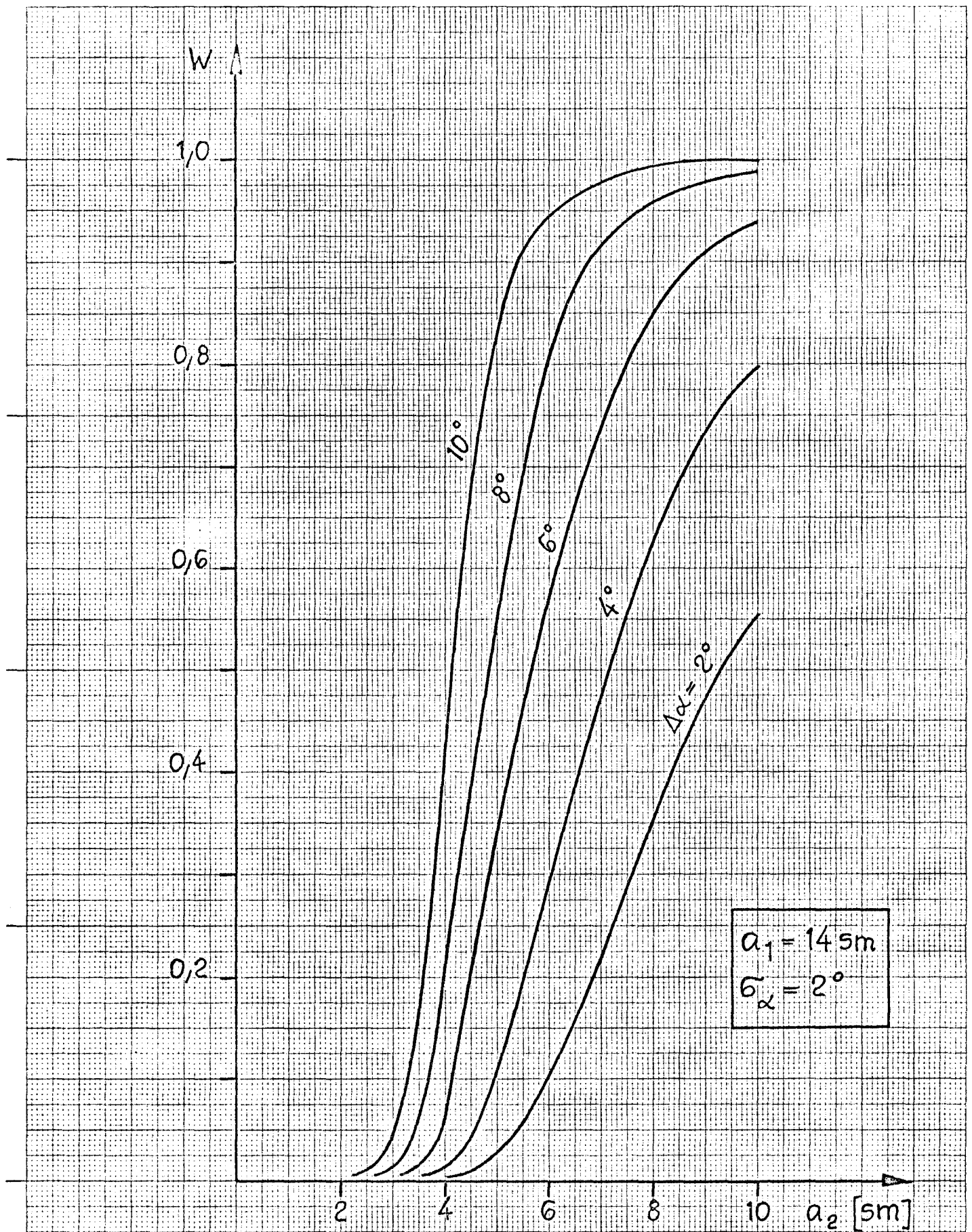


Bild 14

Wahrscheinlichkeit, daß ein Ausweichmanöver nicht erforderlich ist