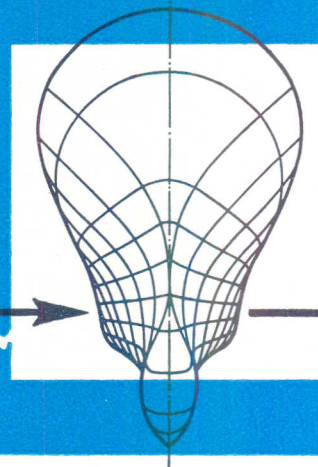


INSTITUT FÜR SCHIFFBAU
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



SICHERHEIT IN DER SCHIFFSTECHNIK

O. KRAPPINGER UND S.D. SHARMA

Manuskript für einen Vortrag zur 69. Hauptversammlung der
Schiffbautechnischen Gesellschaft e.V. im November 1974
in Berlin

OKTOBER 1974

Bericht Nr. 327

SICHERHEIT IN DER SCHIFFSTECHNIK^{x)}

O. Krappinger und S.D. Sharma

"Probably the most startling feature of twentieth-century culture is the fact that we have developed such elaborate ways of doing things and at the same time have developed no way of justifying any of the things we do" xx)

1. Einführung

In der Einleitung des Buches "Some Ship Disasters and Their Causes" vom K.C. Barnaby (1968) wird gesagt, dass die in diesem Band beschriebenen Schiffskatastrophen als Teil des Preises angesehen werden sollten, der für die heutzutage auf See erreichte Sicherheit bezahlt worden ist. Man könnte meinen, dass hier aus der Not eine Tugend gemacht wird, wenn man nicht feststellen müsste, dass die Entwicklung der Sicherheit in der Tat oft mehr eine Konsequenz von Desastern als von rationalen Überlegungen ist. Einige berühmt gewordene Beispiele dafür sind: Das Kentern der "Captain" im Jahre 1870 war der Ausgangspunkt für die Vorgabe von Mindestwerten für die aufrichtenden Hebelarme. Den Untergang des Schnell dampfers "Elbe" im Jahre 1895 infolge einer Kollision nahm die Seeberufsgenossenschaft zum Anlass für Unterteilungsvorschriften, die

x) Diese Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 98 "Schiffstechnik und Schiffbau" entstanden.

xx) Churchman (1961)

natürlich nur für deutsche Schiffe verbindlich waren. Die "Titanic"-Katastrophe im Jahre 1912 führte zur internationalen Regelung der Unterteilung und anderen Sicherheitsforderungen im ersten "Internationalen Vertrag zum Schutze menschlichen Lebens auf See", der allerdings wegen des Ersten Weltkrieges nicht zur Anwendung kam. Die Brände der "Lakonia" und der "Yarmouth Castle" Mitte der sechziger Jahre hatten teil am Zustandekommen von Teil G und H des Kapitels II des Internationalen Schiffssicherheitsvertrages. Die Strandung der "Torrey Canyon" im Jahre 1967 machte unübersehbar klar, dass die immer grösser werdenden Tanker Massnahmen zur Begrenzung der austretenden Ölmenge im Havariefall erfordern. Die Reihe könnte beliebig verlängert werden.

Bei Betrachtung dieser und auch anderer Fälle kann man feststellen, dass häufig schon vor Eintritt der Schadens- oder Unglücksfälle durchaus Mittel und Wege bekannt gewesen wären, um solche Fälle bzw. ihre Folgen zu vermeiden bzw. zu vermindern, dass man von diesen Möglichkeiten zunächst aber keinen oder keinen ausreichenden Gebrauch gemacht hat. Damit sie wirkungsvoll angewandt und evtl. sogar entsprechend vorgeschrieben wurden, bedurfte es des Anstosses (oder Schockes) durch einen Schadensfall. Warum dies so ist, lässt sich zu einem guten Teil erklären, wenn man beobachtet, dass die rationale Beschäftigung mit Sicherheitsfragen immer noch weitgehend gleichgesetzt wird mit Bemühungen um ein immer besseres Verständnis der für die Sicherheit relevanten physikalischen Zusammenhänge. Dabei wird - oft unbewusst, manchmal auch explizit - von vollkommener physikalischer Einsicht auf eine "vollkommene Sicherheit" geschlossen, die es aber tatsächlich

gar nicht gibt. Die Frage, wieviel Sicherheit vorgesehen werden sollte oder müsste, wird dabei verdrängt und nicht rational erfasst. Sie fällt freilich auch insofern aus dem Rahmen, als die dem Ingenieur als wissenschaftliche Basis vertraute Naturwissenschaft zu ihrer Behandlung nicht ausreicht. Dazu müssten auch wirtschaftliche, soziologische, psychologische und ökologische Erkenntnisse herangezogen werden.

Die Frage nach der notwendigen Sicherheit, oder mit anderen Worten, welche nachteiligen Nebenwirkungen der Technik durch die damit erzielten Vorteile gerechtfertigt werden, ist zu einem zentralen Problem unserer Zeit geworden; sie ist - von Einzelfällen, die es natürlich immer noch gibt, abgesehen - viel bedeutsamer als die Erhöhung der Genauigkeit physikalischer Beziehungen um eine weitere Stelle hinter dem Komma und von Antworten darauf wird es abhängen, wie sich unsere weitgehend durch die Technik bestimmte Welt weiter entwickeln wird (vergl. dazu auch Pestel (1970) und Jaeger (1970)). Bei der stürmischen Entwicklung der Schiffstechnik, die wir zur Zeit erleben, liegt ihre Bedeutung auch für unser Gebiet auf der Hand.

Als Beitrag zu einer vollständigeren rationalen Erfassung des Sicherheitsproblems werden im folgenden einige Gedanken zu einer Methodologie zur Behandlung der Sicherheit in der Schiffstechnik gebracht.

2. Sicherheitskonzepte

Seit Schiffe gebaut werden, werden dabei auch Vorkehrungen für ihre Sicherheit getroffen. Die Möglichkeiten, dies zu tun, haben sich von primitiven Anfängen bis zu recht anspruchsvollen Methoden entwickelt. Trotz der langen Entwicklung und der Vielfalt der behandelten Probleme kann man vier recht scharf unterscheidbare Bereiche von Sicherheitskonzepten feststellen. Im folgenden wird diese Einteilung gebracht und durch einige Beispiele erläutert werden.

1. Das erste und methodisch einfachste Konzept für Sicherheit zu sorgen war, technische Erzeugnisse nach bestimmten Angaben herzustellen. Wohl das älteste Beispiel dafür ist die Arche Noah: Ihr Erbauer hielt sich an die ihm gemachten Angaben mit dem Erfolg, dass Seefähigkeit, Stabilität, Festigkeit usw. offensichtlich ausgereicht haben. Später erzielte man eine Sicherheit, die von der Gesellschaft als ausreichend akzeptiert wurde, wenn man sich an gewisse in der handwerklichen Tradition begründete, d.h. im wesentlichen aus Erfahrungen abgeleitete Regeln hielt. So erreichte man z.B. bis ins 19. Jahrhundert Kentersicherheit nur dadurch, dass man die Schiffe nach bewährten Proportionen baute. Als weiteres Beispiel sei erwähnt, dass sich die Bauvorschriften der Klassifikationsgesellschaften bis vor nicht allzu langer Zeit darauf beschränkt haben, bestimmte Bauelemente (z.B. Spantprofile, Bodenwrangen) vorzuschreiben. Der Nachteil dieses Konzeptes ist, dass mit der Sicherheit auch

eine bestimmte Hardware-Lösung (oder ein sehr enger Bereich von solchen) festgelegt wird. Eine Entwicklung zu alternativen und u.U. besseren Lösungen ist hier nur in ganz kleinen Schritten möglich, wenn man grössere Risiken ausschliessen will.

2. Der nächste Schritt bestand darin, Sicherheit nicht durch unmittelbare Angaben über die Gestaltung der technischen Erzeugnisse, sondern durch solche über bestimmte physikalische Eigenschaften derselben vorzugeben. Als Beispiel dafür sei die Vorgabe von Mindesthebelarmen für das aufrichtende Moment zur Erzielung von Kentersicherheit genannt. Eine Verfeinerung, aber keine grundsätzliche Erweiterung dieses methodischen Konzepts ist die Vorgabe der Differenz von aufrichtenden und krängenden Hebeln, wie sie z.B. von Wendel (1958) vorgeschlagen worden ist.

Man kann wohl sagen, dass die Methode, Sicherheit über die Vorgabe bestimmter physikalischer Eigenschaften und bei deren Ermittlung zugrunde zu legender Umweltbedingungen (z.B. krängende Momente, Belastungen usw.) vorzugeben, die heute am meisten praktizierte ist. Ohne Zweifel erhält der Ingenieur dabei viel mehr gestalterische Freiheit als wenn Hardware-Lösungen direkt vorgegeben werden. Insbesondere in Fällen, in denen die Bestimmung physikalischer Eigenschaften sehr komplex und relativ undurchsichtig ist, entstand die Meinung, dass durch den Nachweis bestimmter Werte für diese Eigenschaften vollkommene Sicherheit erreicht wird. Tatsächlich ist "die Vorstellung vollkommener Sicherheit nichts als eine oft bequeme Fiktion" (Freudenthal

(1968)), die nur der Einsicht hinderlich ist, dass bei diesem Vorgehen völlig offen bleibt, welche Sicherheit erzielt wird und dass dabei Sicherheit - im eigentlichen Sinne des Wortes - gar nicht definiert wird.

3. Ein gewisser Zwang, Sicherheit explizit zu definieren und zu erfassen, entstand erst in jüngster Zeit mit der Einführung grosser elektronischer Systeme sowie der Entwicklung der Luft- und Raumfahrt (siehe dazu auch Freudenthal (1968) und Krappinger (1967)). Die Sicherheit wird hierbei als Wahrscheinlichkeit definiert, dass ein bestimmtes unerwünschtes Ereignis während einer bestimmten Zeit (häufig ist das die angestrebte Lebensdauer) nicht eintritt.

Es ist interessant, dass ein - wenn auch noch etwas primitiver - Ansatz zu diesem Konzept aus dem Bereich der Schiffstechnik kam: In einer Arbeit von Sir Wescott Abell (1919) findet sich der Vorschlag, Sinksicherheit im Kollisionsfall als Chance ("odds") für das Nichtsinken zu erfassen. Er fand mit dieser Idee zu seiner Zeit aber nicht das ihre praktische Einführung ermöglichende Verständnis. Den Anstoss zur Einführung dieses Konzeptes gab dann eine Arbeit von Wendel (1960). Von dieser ausgehend ist eine Unterteilungsvorschrift entwickelt worden, bei der zum ersten Mal in der Schiffstechnik die Sicherheit als Wahrscheinlichkeit vorgeschrieben wird. Mehr darüber können Sie heute in dem nachfolgenden Vortrag von Dipl.-Ing. Hormann hören; Einzelheiten über das Konzept sind bei Hormann und Krappinger (1974) zu finden.

Bei dieser Wahrscheinlichkeit handelt es sich allerdings nur um die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass das Schiff überlebt, wenn es zu einer Kollision kommt. Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schiff während z.B. 20 Jahren infolge einer Kollision nicht sinkt, müssten auch die - von Einsatzgebiet und Fahrplan des Schiffes abhängige - Wahrscheinlichkeit, dass es anderen Schiffen begegnet, sowie die Wahrscheinlichkeit, dass eine Begegnung zu einer Kollision führt - die u.a. von den Navigations- und Manövrereinrichtungen der Schiffe abhängt - bekannt sein. Zumindest andeutungsweise möchten wir für den Fall der Begegnungswahrscheinlichkeit zeigen, dass auch die hierbei eine Rolle spielenden Zusammenhänge rational erfasst werden können.

Hier wird nur auf den sehr einfachen Fall eingegangen, dass alle Schiffe, die als Begegner für das betrachtete Schiff infrage kommen könnten (sie werden im folgenden kurz als die "anderen Schiffe" bezeichnet), mit dem gleichen Kurs und der gleichen Geschwindigkeit fahren und auch das betrachtete Schiff Kurs und Geschwindigkeit beibehält (der allgemeine Fall, in dem all die hier gemachten Einschränkungen fallen gelassen werden, ist in Krappinger (1973) behandelt).

Man kann annehmen, dass die anderen Schiffe zu beliebigen Zeitpunkten völlig zufällig^{x)} über das betrachtete Seegebiet

x) "Zufällig" bedeutet hier, dass für jedes Flächenelement des Seegebietes die Wahrscheinlichkeit gleich gross ist, dass sich in dem Flächenelement zu einem beliebig vorgegebenen Zeitpunkt ein Schiff befindet.

verteilt sind. Als einzige Information wird die relativ leicht bestimmbare mittlere Zahl von Schiffen je Flächeneinheit ρ für das betrachtete Seegebiet benötigt. Die Zahl ρ wird auch als Schiffsdichte bezeichnet. Zur Vereinfachung wird hier vorausgesetzt, dass ρ zeitlich und räumlich stationär ist. Die Erweiterung auf den instationären Fall wäre ohne besondere Schwierigkeiten möglich.

Als "Begegnung" definieren wir den Fall, dass ein anderes Schiff einen gedachten Kreis um den Schwerpunkt des betrachteten Schiffes mit dem Radius a trifft. Der Radius a wäre dabei als die Entfernung anzunehmen, bei der die Führung eines Schiffes normalerweise ein anderes Schiff zu beachten beginnt mit dem Ziel, aus der Begegnung keine gefährliche Situation entstehen zu lassen.

Aus den Vektoren der Geschwindigkeit v_o des betrachteten und v_a der anderen Schiffe kann die Relativgeschwindigkeit v bestimmt werden, mit der sich das betrachtete Schiff gegenüber den als feststehend gedachten anderen Schiffen bewegt. Man kann sich nun leicht überlegen, dass die durchschnittliche Zahl von Begegnungen je Zeiteinheit λ (sie wird als Begegnungsrate bezeichnet) gleich dem Produkt aus Schiffsdichte mal der Fläche ist, die bei Verschieben des um das betrachtete Schiff gedachten Kreises mit dem Radius a um den relativen Weg je Zeiteinheit (d.h. um die Relativgeschwindigkeit v) überstrichen wird (vergl. Bild 1):

$$\lambda = 2 a v \rho$$

Bei völlig zufälliger Verteilung der anderen Schiffe kann aus der Begegnungsrates die Wahrscheinlichkeit, dass die Zeit zwischen zwei Begegnungen kleiner als ein beliebig vorgegebener Wert t ist, leicht bestimmt werden. Sie ist

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Auch die Wahrscheinlichkeit p , dass in einer vorgegebenen Zeit T eine Zahl von r Begegnungen ($r=0,1,2,\dots$) auftritt, kann angegeben werden:

$$p(r) = \frac{(\lambda T)^r}{r!} e^{-\lambda T}$$

Aus diesen Wahrscheinlichkeiten könnten gewisse Schlüsse über die Belastung der Schiffsführung gezogen werden. Sehr einfach kann man aber noch einen Schritt weiter gehen und nach Begegnungen mit bestimmter relativer Peilung α (d.i. der Winkel zwischen der Fahrtrichtung des betrachteten Schiffes und der Richtung von diesem zu einem anderen Schiff (s. Bild 2)) fragen.

Unter der gemachten Voraussetzung zufälliger Verteilung der anderen Schiffe sind die "Begegnungspunkte" (das sind die Schnittpunkte der relativen Bahnen der anderen Schiffe mit dem um das betrachtete Schiff gedachten Kreis) über dem zur Relativgeschwindigkeit senkrechten Durchmesser des um das betrachtete Schiff gedachten Kreises gleich verteilt. Die Verteilungsdichte des (zufälligen) Abstandes x der relativen Bahnen der begegnenden Schiffe ist

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2a} && \text{für } |x| \leq a \\ &= 0 && \text{für } |x| > a \end{aligned}$$

Jeder Bahn im Abstand x ($|x| < a$ vorausgesetzt) entspricht eine Begegnung mit einer bestimmten relativen Peilung α (vergl. Bild 3).

Es gilt:

$$x(\alpha) = a \sin(\alpha - \beta)$$

Damit erhält man für die relative Peilung zu den begegnenden Schiffen die Verteilungsdichte (siehe Bild 3, untere Hälfte)

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= f(x(\alpha)) \left| \frac{\partial x(\alpha)}{\partial \alpha} \right| \\ &= \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) && \text{für } -\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) < \alpha < \left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \\ f(\alpha) &= 0 && \text{für alle anderen Werte von } \alpha \end{aligned}$$

Damit kann man nun z.B. die Begegnungsrate für alle die Begegnungen bestimmen, bei denen der Passierabstand x (vergl. Bild 2) kleiner als ein kritischer Wert x_K werden würde, wenn die beteiligten Schiffe nicht manövrieren würden.

Mit
$$\delta_K = \arcsin \frac{x_K}{a}$$

erhält man für die Begegnungsrate für Begegnungen mit $x < x_K$

$$\lambda_K = \int_{\beta - \delta_K}^{\beta + \delta_K} \lambda f(\alpha) d\alpha$$

Ähnlich könnte auch die Begegnungsrate für solche kritische Begegnungen, bei denen das betrachtete Schiff ausweichpflichtig ist, berechnet werden usw.

An der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Begegnung zu einer Kollision führt, wird z.Z. im Rahmen eines Projektes des Sonderforschungsbereiches 98 im Institut für Schiffbau intensiv gearbeitet. Wenn diese Bemühungen Erfolg haben, wird es in absehbarer Zeit möglich werden, die Sicherheit gegen Sinken infolge von Kollisionen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte, den Navigations- und Manövriereinrichtungen sowie der Unterteilung und anderen konstruktiven Schiffsparemtern zumindest näherungsweise zu bestimmen.

Der Vorteil einer direkten Erfassung der Sicherheit gegenüber dem Bestreben, sie implizit durch Angaben über die Gestaltung von Erzeugnissen oder die Forderung nach Einhaltung bestimmter physikalischer Eigenschaften für diese zu erreichen, besteht darin, dass auf solche dem technischen Fortschritt häufig entgegenstehende Vorgaben verzichtet werden kann und dem Ingenieur weitgehende Freiheit zur Wahl der Mittel und Möglichkeiten eingeräumt wird, mit denen die notwendige Sicherheit am zweckmässigsten zu erreichen ist.

4. Die direkte Erfassung der Sicherheit führt zwangsläufig zur Aufgabe der Illusion einer vollkommenen Sicherheit. Gleichzeitig tritt hier aber auch unübersehbar die Frage auf, wie die Sicherheit zu bemessen ist oder wieviel Sicherheit "sicher genug" ist. Zunächst sei hier nur kurz erwähnt, dass es durchaus schon Ansätze für eine Beantwortung dieser Frage gibt:

In Fällen, in denen durch Unsicherheit nur materielle Werte, aber keine Menschenleben gefährdet werden, kann die optimale Sicherheit aufgrund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen - wie z.B. von Krappinger (1971) gezeigt - gefunden werden. Wenn Menschenleben betroffen werden, bietet das "Prinzip der geringsten Gesamtmortalität" ein Konzept zur Lösung dieses Problems. In Abschnitt 4 wird auf mit der Bemessung der Sicherheit zusammenhängende Fragen noch etwas eingehender eingegangen werden.

5. Im Vorstehenden ist die Entwicklung von Konzepten zur Erzielung bzw. Festlegung von Sicherheit chronologisch dargestellt worden. Es ist nun aber keineswegs so, dass die älteren Konzepte obsolet geworden wären und heute nur mehr das umfassendste Konzept dem Stand der Technik gerecht werden würde. Alle Konzepte haben auch heute noch ihre Anwendungsbereiche: Wenn man z.B. Treppen sicher begehbar machen will, reicht es voll und ganz aus, die zu verwendende Hardware, wie z.B. Handläufe, Warzenblech für die Stufen u. dergl. direkt vorzuschreiben.

In manchen Fällen konnte noch nicht festgestellt werden, ob die Anwendung eines moderneren Konzepts möglich und vorteilhaft ist. Zum Beispiel werden beim Feuerschutz noch bestimmte Sicherheitsvorkehrungen direkt vorgeschrieben. Uns ist aber bekannt, dass man in Polen an dem Problem arbeitet, auch hierbei die Sicherheit an sich zu erfassen.

Auch wenn sich in einem bestimmten Bereich aufgrund eines langjährigen trial and error-Prozesses ein Sicherheitsniveau eingestellt hat, von dem man feststellt, dass es akzeptabel ist, und wenn die Sicherheit im wesentlichen von bestimmten Hardware-Grössen (entweder direkten oder gewissen physikalischen) abhängt, kann man durch Festlegung dieser Grössen auf recht einfache Weise für Sicherheit sorgen. Hier bietet sich allerdings eine methodische Verbesserung an: Mittels der sogenannten Diskriminanzanalyse kann man eine einfache Funktion der massgeblichen Einflussgrössen objektiv so bestimmen, dass mit deren Hilfe dann in einem bestimmten Sinne optimal zwischen sicheren und unsicheren Fällen unterschieden werden kann. Damit kann ein Konzept, das zunächst nicht mathematisch fassbar scheint, auf eine etwas anspruchsvollere Grundlage gestellt werden. Die Diskriminanzanalyse scheint in vielen Fällen auch dann mit Vorteil anwendbar, wenn die exakte Feststellung, ob eine technische Lösung die erforderliche Sicherheit aufweist oder nicht, für praktische Zwecke zu aufwendig ist. Ähnlich wie oben angedeutet, wird auch hier eine Funktion der massgeblichen Einflussgrössen ermittelt, mittels der sich sichere und unsichere Fälle unterscheiden lassen.

3. Diskriminanzanalyse

1. Die Diskriminanzanalyse kann als ein typisches Instrument zur Behandlung von Sicherheitsfragen bezeichnet werden. Sie soll im folgenden an einem klassischen Beispiel aus dem Gebiet der Schiffssicherheit näher erläutert werden, nämlich an der Frage der Kentersicherheit. Es ist hinreichend bekannt, dass die Physik des Kenterns in der natürlichen Umwelt im Detail sehr kompliziert ist. Eine rein theoretische (d.h. analytische oder rechnerische) Vorhersage der physikalischen Eigenschaften, die ein Schiff haben müsste, um als kentersicher zu gelten, erscheint fast aussichtslos. Dazu müsste u.a. erst eine vollständige, nichtlineare, dreidimensionale Theorie des Seegangs und des Seeverhaltens entwickelt werden. Die Methode des Modellversuchs, die in der Schiffshydrodynamik immer dann herangezogen wird, wenn die Mittel der rationalen Mechanik nicht ausreichen, ist zwar gelegentlich auch zur Untersuchung der Kenter-sicherheit eingesetzt worden, hat sich jedoch als sehr aufwendig erwiesen. Die zu variierenden Parameter sind so zahlreich, dass systematische und umfassende Modellversuche zur Ermittlung allgemeiner Kenterkriterien kaum durchführbar sind. Die bisherigen Untersuchungen betreffen nur Einzelfälle. Die Praxis begnügt sich deshalb zumeist mit einfachen, empirischen Kriterien. Eins der bekanntesten beruht auf einer Idee von Rahola (1939). Nach dieser werden Grenzwerte für Stabilitätsparameter durch Gegenüberstellung der Parameter von in Stabilitätsunfälle verwickelten und von im Betrieb bewährten Schiffen abgeleitet, vergl. z.B. Seefisch (1965). Wir werden zeigen, wie

gerade dieses Verfahren durch die Diskriminanzanalyse erweitert und objektiviert werden kann.

2. Unser Beispiel stützt sich auf Daten, die einem Arbeitspapier^{x)} der IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization, London) entnommen wurden. In Tabelle 1 sind 10 Kennwerte (von *GM* bis *e*) der Hebelarmkurven für 19 "unsichere" Schiffe, die Stabilitätsunfälle erlitten haben, wiedergegeben. Die Zahlen gelten allerdings nicht für den Unfallzustand, sondern für den voll beladenen Ankunftszeitpunkt. In Tabelle 2 sind die entsprechenden Daten für 61 "sichere" Schiffe, die zumindest bis zum Zeitpunkt der Erfassung keine Stabilitätsunfälle erlitten haben, zusammengestellt.^{xx)} Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass aus der ursprünglichen IMCO-Liste gestrichen wurden: erstens sämtliche Unfälle, die nicht auf mangelnde Stabilität, sondern z.B. auf Verrutschen der Ladung infolge unsachgemässer Stauung zurückzuführen waren, zweitens sämtliche Schiffe mit Holzlast, da diese eine Sonderbehandlung erfordern, und drittens Schiffe mit unvollständigen Angaben. Ferner wurden sämtliche verbliebenen Daten durch Auftragen überprüft und einige offensichtlich fehlerhafte Zahlen durch Ausstraken der Hebelarmkurven so gut wie möglich korrigiert. Zusätzliche Einzelheiten über die angeführten Schiffe können an Hand der hier übernommenen Originalschiffsnummern aus dem angegebenen IMCO-Dokument bzw. aus dort zitierten früheren Dokumenten entnommen werden.

x) Document No. IS VI/3 dated 7 June 1966

xx) Aus Platzgründen muss darauf verzichtet werden, die Wahl gerade dieser Kollektive für den vorliegenden Zweck näher zu begründen. Es sei jedoch vermerkt, dass für eine Untersuchung der Ketersicherheit die Wahl auch anderer Kollektive zweckmässig sein kann.

3. Die Aufgabe besteht nun darin, durch Vergleich der Stabilitätsparameter in Tabellen 1 und 2 ein Stabilitätskriterium für "sichere" Schiffe zu bestimmen. In Anlehnung an Rahola (1939) liegt es nahe, zunächst die Häufigkeitsverteilungen (angenähert durch die Summenhäufigkeiten in den Stichproben) der verfügbaren Parameter in den beiden Gruppen zu vergleichen, siehe Bild 4a-i. Man erkennt sofort, dass einige Parameter (z.B. h_{40} oder e) die Gruppen zwar deutlicher trennen als andere (z.B. GM oder ϕ_m), jedoch in keinem Fall eine vollständige Trennung erzielt wird. Für die Überschneidung der Kurven F_1 und $(1 - F_2)$ in Bild 4 gibt es mindestens zwei verschiedene Deutungen: So kann man annehmen, dass manche der Schiffe in Tabelle 2 eigentlich gar nicht sicher sind, sondern bisher nur das Glück hatten, keiner wirklichen Gefahr ausgesetzt worden zu sein, oder auch folgern, dass keiner der vorliegenden Parameter einzeln genommen als Stabilitätskriterium ausreicht.

Für praktische Zwecke muss trotz der Überschneidung eine Trennung vorgenommen werden. So könnte man z.B. den jeweiligen Extremalwert aus Gruppe 1 als Grenzwert für notwendige Stabilität betrachten (langgestrichelte Linien in Bild 4). Sehr befriedigend ist es allerdings nicht, denn der Mindestwert für GM wäre dann 0,85 m und nur 15 % der Schiffe aus der "sicheren" Gruppe 2 würden ihn erreichen. Eine andere Möglichkeit wäre, den Grenzwert auf den Schnittpunkt der Kurven F_1 und $(1 - F_2)$ zu verlegen. In diesem Fall werden die Fehlentscheidungsquoten für beide Gruppen gleich (kurzgestrichelte Linien in Bild 4).

Dies wurde erstmals von der polnischen Delegation in dem o.a. IMCO-Dokument vorgeschlagen und führt immerhin zu einer richtigen Trennung (Diskrimination) der Gruppen in etwa 80 % der Fälle bei Verwendung eines der Parameter h_{30} , h_{40} , h_m oder ϵ . Aber auch dieses Verfahren befriedigt nicht ganz, da der Grenzwert und die "Erfolgsquote" zu stark von dem wegen des kleinen Stichprobenumfangs zufallsbedingten Verlaufs der Kurven F_1 und $(1 - F_2)$ in der Nähe des Schnittpunktes abhängen. Ein verhältnismässig unempfindlicher Grenzwert eines Merkmals x ist das Mittel

$$\bar{x} = \frac{1}{2} [\bar{x}^{(1)} + \bar{x}^{(2)}]$$

der beiden Mittelwerte

$$\bar{x}^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} x_i^{(k)} ; \quad k = 1, 2$$

wobei n_1 bzw. n_2 die Anzahl der Elemente in der Gruppe 1 bzw. 2 bedeuten. Die Werte $\bar{x}^{(1)}$, \bar{x} , $\bar{x}^{(2)}$ sind jeweils durch drei senkrechte Linien in den Bildern 4a-i dargestellt.

Ganz unabhängig von der Wahl des Grenzwertes stellt sich die Frage nach der diskriminatorischen Qualität eines Merkmals im Vergleich zu den anderen. Als statistisch relativ sicheres und auch anschauliches Mass dafür bietet sich der Quotient

$$\alpha = \frac{[\bar{x}^{(2)} - \bar{x}^{(1)}]^2}{\frac{1}{2} [v_x^{(2)} + v_x^{(1)}]}$$

wobei $v_x^{(1)}$ und $v_x^{(2)}$ die Varianzen des Merkmals innerhalb der Gruppen bedeuten:

$$v_x^{(k)} = \frac{1}{n_k - 1} \sum_{i=1}^{n_k} [x_i^{(k)} - \bar{x}^{(k)}]^2 ; \quad k = 1, 2$$

Je grösser der Wert von α , um so besser wird die Diskrimination, vergl. Bild 4. Nach diesem Mass α geordnet, erhalten die neun untersuchten Stabilitätsparameter die Rangfolge

$$h_{40}, h_m, h_{30}, e, h_{20}, \phi_m, \phi_v, h_{10}, \cdot GM$$

was durchaus unserer intuitiven Vorstellung über ihre Bedeutung für die Schiffsstabilität entspricht.

4. Es scheint lohnend, zu versuchen, die "Erfolgsquote" der Diskrimination zwischen den Gruppen durch Kombination mehrerer Merkmale zu verbessern. Eine naive Möglichkeit dazu wäre die Aufstellung mehrerer Kriterien nebeneinander. Das würde z.B. auf die Forderung hinauslaufen, dass die Hebelarmkurve eines "sicheren" Schiffes an jeder Stelle den jeweiligen Grenzwert in Richtung der Gruppe 2 überschreiten soll, siehe Bild 5. Es leuchtet sofort ein, dass das eine unrealistische, zumindest aber eine überzogene Forderung wäre. Es scheint besser, die m verschiedenen Merkmale x_j (wobei $j=1, m$) zu einem einzigen "Supermerkmal" zu kombinieren, etwa durch den Linearansatz

$$z = c_0 + \sum_{j=1}^m c_j x_j$$

Dabei entsteht die Frage, wie die Koeffizienten c_j gewählt werden sollen. Um sie zu beantworten, führen wir auch für z das bereits oben verwendete Diskriminanzmass α ein. Mit den Mittelwerten und Varianzen für z

$$\bar{z}^{(k)} = \sum_{j=1}^m c_j \bar{x}_j^{(k)} \quad ; \quad k = 1, 2$$

$$v_z^{(k)} = \sum_{j=1}^m \sum_{j'=1}^m c_j c_{j'} Q_{jj'}^{(k)}$$

$$Q_{jj'}^{(k)} = \frac{1}{n_k - 1} \sum_{i=1}^{n_k} [x_{ji}^{(k)} - \bar{x}_j^{(k)}] [x_{j'i}^{(k)} - \bar{x}_{j'}^{(k)}]$$

erhält man dafür

$$\alpha = \frac{[\bar{z}^{(2)} - \bar{z}^{(1)}]^2}{\frac{1}{2}[v_z^{(2)} + v_z^{(1)}]}$$

Eine in einem gewissen Sinne optimale Trennung der Gruppen wird dann erreicht, wenn die c_j so gewählt werden, dass α ein Maximum wird. Die bekannten Bedingungen dafür lauten

$$\partial\alpha/\partial c_j = 0 \quad ; \quad j = 1, \dots, m$$

Aus diesem Gleichungssystem können die c_j bis auf eine multiplikative Konstante bestimmt werden. Aus hier nicht weiter interessierenden Gründen wird diese sowie die Konstante c_0 so gewählt, dass

$$\bar{z}^{(2)} = -\bar{z}^{(1)} = \frac{1}{2} \alpha$$

wird. Damit ergibt sich (siehe z.B. Anderson (1958), Schmetterer (1966) und Weber (1972))

$$c_j = \sum_{j'=1}^m (Q_{jj'})^{-1} [\bar{x}_{j'}^{(2)} - \bar{x}_{j'}^{(1)}]$$

mit $Q_{jj'} = \frac{1}{2} [Q_{jj'}^{(1)} + Q_{jj'}^{(2)}]$

und $c_0 = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{j'=1}^m (Q_{jj'})^{-1} [\bar{x}_j^{(2)} + \bar{x}_j^{(1)}] [\bar{x}_{j'}^{(2)} - \bar{x}_{j'}^{(1)}]$

wobei $(Q_{jj'})^{-1}$ die Umkehrmatrix der Matrix $(Q_{jj'})$ bedeutet.

Die mit diesen Koeffizienten gebildete Linearkombination der Merkmale wird nach Fisher (1936) als Diskriminanzfunktion bezeichnet.

Man kann nun für alle Elemente das zusammengesetzte Merkmal z berechnen und dafür - so wie oben für die Einzelmerkmale - die Häufigkeitsverteilungen in den Gruppen und einen geeigneten Grenzwert z_G bestimmen. Um ein neues Element, von dem nur

die Merkmale x_j bekannt sind, einer Gruppe zuzuordnen, braucht nur der dafür berechnete z -Wert mit dem Grenzwert z_G verglichen zu werden; dabei gilt

$$\begin{aligned} z < z_G & : & \text{Gruppe 1} \\ z > z_G & : & \text{Gruppe 2} \end{aligned}$$

5. Für das oben behandelte Beispiel haben wir aus den 9 verfügbaren Stabilitätsparametern alle 502 denkbaren 2- bis 9-gliedrigen linearen Diskriminanzfunktionen mit Hilfe eines Computerprogramms ermittelt. Aus Platzgründen sollen hier nur einige ausgewählte Beispiele wiedergegeben werden, und zwar je drei 2- bzw. 3-gliedrige Diskriminanzfunktionen (Bild 6 bzw. 7). Man erkennt, dass höhere α -Werte erzielt werden als mit Einzelmerkmalen (Bild 4). Die höchsten α -Werte unter den 36 möglichen Merkmalpaaren ergaben die im Bild 6 gezeigten Fälle (a) und (b). Von besonderem Interesse dürfte der Fall (c) in Bild 6 sein, weil er die zwei üblichsten Stabilitätsparameter, nämlich GM und h_{40} kombiniert. Es mag in den Bildern 6a-c zunächst überraschen, dass die Parameter h_{10} , e bzw. GM negative Beiwerte haben. Die Erklärung liegt im Zusammenspiel der verschiedenen Parameter. Zum Beispiel sieht man aus Bild 8a, dass eine Erhöhung von GM bei festem h_{40} die Hebelarmkurve i.a. in einer Weise verändert, die intuitiv als Verminderung der Stabilität gewertet wird.^{x)} Genau dies wird aber durch den negativen Beiwert von GM (wie z.B. in dem in Bild 6c gezeigten

x) Bei der Hebelarmkurve mit dem grösseren GM steht einem geringeren Umfang eine stärkere Rollerregung gegenüber.

Fall) zum Ausdruck gebracht. Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse scheinen somit die Hypothese zu bestätigen, dass grössere GM -Werte durch grössere Hebel kompensiert werden müssen, um gleiche Sicherheit zu erreichen. Ähnliches gilt für die Wechselbeziehung zwischen h_{40} und e (vergl. Bild 6b und 8b).

Man kann die lineare Diskriminanzfunktion geometrisch als eine Schar von Hyperebenen $z = \text{const}$ im m -dimensionalen Raum der Merkmale x_j deuten. Die durch $z = z_G$ erzielte Trennung der Gruppen (bzw. Stichproben) lässt sich besonders leicht für $m = 2$ veranschaulichen. Dies wird in Bild 9a-c für die drei den Bildern 6a-e zugrunde liegenden Fälle gezeigt.

Zum Schluss sei noch bemerkt, dass man die lineare Diskriminanzanalyse nach verschiedenen Richtungen hin erweitern kann. So kann man ohne weiteres in den ursprünglichen Merkmalen x_j nichtlineare Ansätze nach dem obigen Algorithmus untersuchen, solange sie nur in den unbekanntem Koeffizienten a_j linear sind. Wir haben dies am Beispiel GM und h_{40} probiert mit dem Erfolg:

z	α
$-1,26 GM + 10,48 h_{40} - 2,22$	2,59
$-0,10(GM)^2 + 10,01 h_{40} - 2,67$	2,50
$-2,55\sqrt{GM} + 10,75 h_{40} - 1,18$	2,71

Man sieht, dass \sqrt{GM} eine bessere Ergänzung zu h_{40} darstellt als GM oder gar $(GM)^2$. Man könnte auch sagen, dass die beeinträchtigende Wirkung einer GM -Vergrösserung bei konstantem h_{40} schwächer als linear anwächst. Diese "nichtlineare" Diskriminanzfunktion ist in Bild 9c ebenfalls eingetragen.

4. Die Bemessung der Sicherheit

Wohl kaum ein Ingenieur möchte sich vorwerfen lassen, dass er bei den von ihm entworfenen Geräten oder Bauwerken nicht für ausreichende Sicherheit Sorge. Es ist deshalb verwunderlich, dass man unter ingenieurwissenschaftlichen Forschungsarbeiten kaum solche findet, die sich mit der Frage beschäftigen, welche Sicherheit in welchem Zusammenhang ausreichend ist, oder wie man ausreichende Sicherheit rational begründen bzw. mit welchen Methoden man sie ermitteln kann. Zum Teil mag das daher kommen, dass viele wichtige Sicherheitsfragen von einem "Gesetzgeber"^{x)} geregelt werden und dass dabei von vielen sowohl in der Praxis als auch in der Forschung tätigen Ingenieuren unterstellt wird, dass die Gesetze nicht nur im juristischen, sondern auch im wissenschaftlichen Sinne gültig sind, wobei in diesem Zusammenhang vielleicht mehr an die Ethik als an die Ingenieurwissenschaft gedacht wird. Für die Ingenieure fehlt damit die Motivation, an die Frage: "Wie sicher ist sicher genug?" heranzugehen.

Tatsächlich handelt es sich dabei aber zunächst durchaus um ein ingenieurwissenschaftliches Problem, bei dem erst im Laufe seiner Bearbeitung Fragen entstehen, die eine interdisziplinäre Bearbeitung erfordern, bzw. Fragen gestellt werden können, die eine solche sinnvoll machen würden. Hier sollen zwei Ansätze gebracht werden: Den einen könnte man als Anspruchserfüllung, den anderen als Systemoptimierung bezeichnen.

x) Als solcher kann auch ein internationales Gremium fungieren.

1. Bemessung der Sicherheit durch Systemoptimierung

Wie viele andere Eigenschaften von technischen Erzeugnissen ist auch die Sicherheit nicht Selbstzweck, sondern nur eines der Mittel, die dazu dienen, ein weitergehendes Ziel zu erreichen. Bei vielen Aufgabenstellungen kann nicht nur ein solches weitergehendes Ziel angegeben werden, sondern auch eine sogenannte Zielfunktion, die so definiert ist, dass sie um so höhere (bzw. auch niedrigere) Werte annimmt, je besser das Ziel erreicht wird. Diese Zielfunktion hängt unter den gemachten Voraussetzungen u.a. auch von der Sicherheit ab. Die optimale Sicherheit ist die, bei der sich ein Maximum bzw. Minimum für die Zielfunktion ergibt. Dies sei anhand von zwei Beispielen erläutert:

Im ersten Beispiel wollen wir zeigen, wie sich die optimale Sicherheit aus der Forderung nach maximaler Wirtschaftlichkeit ableiten lässt. Dazu betrachten wir eine kleine Ladungskühlanlage. Für diese kann entweder nur ein Kühlaggregat oder auch ein zweites als Reserve vorgesehen werden. Wenn die Ausfallrate^{x)} von den zu verwendenden Kühlaggregaten bekannt ist, kann für beide Fälle die Sicherheit (d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass die Kühlanlage in bestimmten vorgegebenen Zeiten nicht versagt) berechnet werden. Selbstverständlich erhält man bei Vorhalten eines Reserveaggregates eine höhere Sicherheit. Eine Aussage, ob aber nicht schon die mit nur einem Aggregat erreichbare Sicherheit ausreichend wäre, lässt sich in diesem Rahmen nicht machen. Man kommt weiter, indem man statt der Kühlanlage mit ihrer Eigenschaft Sicherheit das damit eigentlich angestrebte

x) Näheres darüber siehe z.B. Krappinger (1967).

Ziel, nämlich den wirtschaftlichen Transport von Kühlladung betrachtet. Als Rahmen für dieses Transportsystem wollen wir folgende Annahmen machen: Die Einnahmen über die Lebensdauer des Systems seien unabhängig von etwaigen Ausfällen, Bei einem Ausfall entsteht im Mittel ein Verlust A . Zahl und Zeitpunkte der möglichen Ausfälle sind zufällig. Die Wirtschaftlichkeit wird als mathematische Erwartung des Kapitalwertes (d.h. als Erwartung der Summe der auf die Gegenwart diskontierten Einnahmen und Ausgaben bzw. Verluste) erfasst. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen den beiden Anlagen (ohne bzw. mit Reserve) genügt es, die Beiträge zu den Kapitalwerten zu erfassen, die in beiden Fällen verschieden sind. Das sind die Erwartungen der Barwerte der Verluste, die bei Versagen der Kühlanlage eintreten, sowie der Barwert der Mehrkosten Z (Investition plus Instandhaltung) der Anlage mit Reserve. Bei Annahme einer Exponentialverteilung für die Ausfallverteilung eines einzelnen Kühlaggregates erhält man die in Bild 10 gezeigte Differenz der Erwartungen der Kapitalwerte (sie ist mit dem Mittelwert für die Höhe des Verlustes, der bei Ausfall der Kühlanlage eintritt, dimensionslos gemacht). Die für die zugehörigen Berechnungen notwendigen Angaben sind einer Arbeit von Krappinger (1971) entnommen. Weitere Beispiele, in denen die Sicherheit in Zusammenhang mit Wirtschaftlichkeitsüberlegungen gebracht wird, finden sich u.a. bei Freudenthal (1969) und Perras (1972).

Als zweites Beispiel bringen wir eine Anwendung des Prinzips der geringsten Gesamtmortalität. Es ist bereits zu einer Zeit, als dieser Begriff noch nicht gebräuchlich war, in einer Arbeit von Abrahamson (1962) zur Behandlung einer schiffbaulichen

Aufgabe herangezogen worden. Bei dieser geht es um die im Hinblick auf die Sicherheit optimale Dimensionierung von Schiffsverbänden. Die Frage wird allerdings nicht vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit behandelt (etwa wie bei einer vorgegebenen Belastung die Verbände im Hinblick auf Kosten optimal gestaltet werden können). Vielmehr strebt Abrahamson das Ziel an, die Zahl von tödlichen Unfällen infolge Versagens der Konstruktion zu minimieren. Dazu schätzt er aufgrund von Statistiken ab, dass von allen in der Schifffahrt vorkommenden tödlichen Unfällen nur etwa 10 % zu Lasten des Versagens der Konstruktion gehen. Würde man zwecks Erzielung einer höheren Festigkeit die Materialstärken und damit das Schiffsgewicht erhöhen, würde die Nutztragfähigkeit des Teils einer Flotte, der gewichtsmässig ausgelastet wird, um eben dieses Gewicht reduziert werden. Wenn man annimmt, dass die Schiffsgrösse in diesem Zusammenhang nicht wächst - die mit der Erhöhung des Schiffsgewichts ebenfalls steigenden Kapitalkosten sprechen dafür - benötigt man zum Transport der gleichen Ladungsmenge also mehr Schiffe.^{x)} Auf diesen würde zwar die Zahl tödlicher Unfälle durch Versagen der Konstruktion zurückgehen; die mit Ladungsarbeiten zusammenhängenden Unfälle würden aber etwa gleich bleiben und die anderen Unfälle entsprechend der grösseren Zahl benötigter Schiffe steigen. Hinzu kommt, dass bei der Erzgewinnung, der Stahlherstellung, dem Materialtransport und im Schiffbau ebenfalls tödliche Unfälle auftreten. Mittels

x) Diese Annahme wird durch eine Untersuchung von Schöttelndreyer (1974) bestätigt.

geeigneter Statistiken kann ihre Zahl je Tonne eingebauten Stahls abgeschätzt werden. Mit einer Erhöhung des eingebauten Stahlgewichts nimmt deshalb die Zahl tödlicher Unfälle ebenfalls zu.

Das Ergebnis der angestellten Überlegungen ist eine Funktion, die zeigt, wie die Zahl von tödlichen Unfällen je Million tdw und Jahr vom eingebauten Stahlgewicht abhängt. Letzteres wird dabei allerdings nicht absolut in die Rechnung einbezogen, sondern als Verhältnis des Gewichts bei veränderter Dimensionierung zu dem Gewicht der als Bezug gewählten Konstruktion. Diese Funktion ist in dem der Arbeit von Abrahamson (1962) entnommenen Bild 11 dargestellt. Es zeigt, dass diese Funktion ein ausgeprägtes Minimum hat. Das heisst, dass grössere Materialquerschnitte, durch die die Sicherheit gegen Versagen der Konstruktion erhöht wird, ebenso zur Erhöhung der Zahl der insgesamt auftretenden tödlichen Unfälle beitragen, wie eine Verminderung der Querschnitte, durch die die Sicherheit gegen Versagen verringert wird. Übertriebene Sicherheitsforderungen können also durchaus auch das Gegenteil des eigentlich angestrebten Zwecks zur Folge haben.

Die beiden Beispiele sind so gewählt worden, dass mit ihrer Hilfe einige Bemerkungen zur Systemoptimierung illustriert werden können, Ob die über eine Systemoptimierung gefundene Sicherheit "richtig" ist (etwa in dem Sinne, dass es als zwingend für rationales Verhalten anzusehen wäre, sie zu akzeptieren), hängt davon ab, ob System und Zielfunktion für die jeweils vorliegende Aufgabenstellung genügend umfassend und realistisch sind.

Bei dem ersten der beiden vorstehend gebrachten Beispiele kann man wohl davon ausgehen, dass dies zutrifft: Theoretisch kann man sich zwar viel weitergehende Konsequenzen der Wahl von jeweils einer der beiden behandelten Anlagen denken als betrachtet worden sind. Praktisch wäre es aber wohl ebenso unsinnig, nach dem Einfluss der in obenstehendem Beispiel behandelten Sicherheit einer kleinen Kühlanlage z.B. auf die gesamte Volkswirtschaft oder gar über diese hinaus auf die Entwicklung der Dritten Welt zu fragen, wie nach der von einer Fliege verursachten Durchbiegung einer Brücke. Ausserdem könnte die Zielfunktion hier ohne Schwierigkeiten auch so geändert werden, dass damit andere Zielvorstellungen des Readers (z.B. Minimierung des Baupreises, Maximierung des sog. Risikonutzens usw.) erfasst werden.

Bei dem zuletzt gebrachten Beispiel liegen die Verhältnisse etwas anders. Zunächst ist festzustellen, dass das betrachtete System für den angestrebten Zweck wohl nicht umfassend genug ist. Zwar werden in der Arbeit von Abrahamson weitergehende Zusammenhänge erwähnt, indem darauf hingewiesen wird, dass es dem Gemeinwohl dienlich wäre, wenn der mit der Vergrösserung von Materialquerschnitten verbundene Aufwand alternativ zum Bau von Schulen und Krankenhäusern oder für die Gesundheitsfürsorge, die Forschung usw. verwandt werden würde oder dass man ihn auch für andere Sicherheitsmassnahmen (Vorkehrungen gegen Feuer und Explosionen, Manövrierfehler sowie Kollisionsfolgen) einsetzen könnte. Sie werden dann aber doch nicht in die Betrachtung einbezogen. Wenn man versuchen würde, das betrachtete

System entsprechend zu erweitern, käme man nicht nur bezüglich der Informationsbeschaffung sowie der mathematischen Formulierung der Zusammenhänge in Schwierigkeiten: Man müsste dann wohl auch ein noch weiter gestecktes Ziel anstreben als das der Minimierung der Gesamtmortalität. Für ein solches hätten wir zwar einen Namen: man könnte es etwa "Lebensqualität" nennen; eine allgemein akzeptable Zielfunktion dafür zu formulieren, scheint allerdings kaum möglich. Sicher würde sie auch von der Gesamtmortalität in dem System abhängen. (Zu dem hierzu möglichen Einwand, dass die Minimierung der Gesamtmortalität vor allem anderen Vorrang haben müsste, sei vorsorglich bemerkt, dass er unrealistisch ist, weil er dem Wesen des Menschen nicht gerecht wird). Trotzdem sind wir der Ansicht, dass die hier als Beispiel gebrachte Arbeit von Abrahamson wichtige Erkenntnisse liefert, die z.B. bei der Aufstellung von Bauvorschriften recht nützlich sein könnten, auch wenn sie als Basis für eine solche nicht ausreichen.

2. Bemessung der Sicherheit durch Anspruchserfüllung

Die im vorangehenden Abschnitt angedeuteten Schwierigkeiten bei der Systemoptimierung treten nicht nur im Zusammenhang mit der rationalen Bestimmung der vorzusehenden Sicherheit auf: Auch in den Wirtschaftswissenschaften, wo man rational begründete Strategien durch Optimierung von mehr oder weniger umfassenden Systemen herauszufinden sucht, stösst man dabei auf Grenzen. Abhilfe ist - hier wie dort - sicher nicht von "individuals, clever and mathematically trained, who are interested in the technics

of making decisions but content to leave the selection of criteria to others" (Shelly 1964) zu erwarten. Eine andere Möglichkeit wäre, den Blick auf die Praxis zu richten und zu fragen, wie es sich bisher "ergibt", was sicher genug ist; freilich auf eine recht unwissenschaftliche, häufig mehr auf Intuition als auf rationalen Überlegungen beruhende Weise.^{x)} Eine darauf aufbauende Theorie könnte praktikabler sein als eine, die mehr auf mathematischen Möglichkeiten als realen Gegebenheiten beruht.

Bei Betrachtung der Praxis stellt man fest, dass keineswegs bezüglich aller Aspekte der Sicherheit simultan optimiert wird. Vielmehr wird angestrebt, auf den verschiedenen Einzelgebieten jeweils ein bestimmtes Niveau zu erreichen, das u.a. vom Stand der Technik und auch von der "öffentlichen Meinung" abhängt. Es geht also weniger um optimale Lösungen in einem "Gesamtsystem", als vielmehr um das Auffinden von solchen Lösungen, die bezüglich verschiedenster Aspekte gewissen Ansprüchen genügen. Diese Beobachtung lässt sich verallgemeinern: Bei ihren Entscheidungen streben Menschen wohl kaum nach einem absoluten und umfassenden Optimum (wer die "Brave New World" von A. Huxley gelesen hat, weiss, dass ein solches Bestreben letztlich zu einem wenig erstrebenswerten Ziel führt). Sie ziehen vielmehr Möglichkeiten, die jeweils "gut genug" scheinen, dem Suchen nach der besten Möglichkeit unter Einbeziehung aller Konsequenzen vor.

x) Um Missverständnissen vorzubeugen, sei wiederholt: es geht hier um die Frage, welche Sicherheit sicher genug ist; d.h. welche Sicherheit ein Gerät oder Bauwerk haben sollte und nicht darum, zu bestimmen, welche Sicherheit es hat.

Von ähnlichen Beobachtungen ausgehend sind von Simon (1957) Ansätze für ein Modell des "satisficing behavior" entwickelt worden. Es scheint, dass diese Ansätze auch zur Lösung des hier anstehenden Problems nützlich sein könnten: Im wesentlichen handelt es sich dabei um die Aufstellung von Anspruchsniveaus (aspiration levels), deren (systematische) Veränderung nach oben oder unten (Anspruchsanpassung) sowie das Auffinden von Lösungen, die den Anspruchsniveaus genügen (Anspruchserfüllung).

Zunächst sei auf eine gewisse Verwandtschaft dieses Konzeptes mit dem des Optimierens unter Nebenbedingungen (siehe z.B. Nowacki 1970) hingewiesen. Dabei können zumindest einige der Nebenbedingungen (constraints) formal als Anspruchsniveaus interpretiert werden. Tatsächlich treten sie aber gegenüber der von der Zielfunktion repräsentierten Zielkomponente in den Hintergrund: Dadurch wird u.U. ein recht "einseitiges" Optimum angestrebt und die Bedeutung anderer Aspekte vernachlässigt.

Wir müssen uns im folgenden darauf beschränken, auf einige im Zusammenhang mit der Sicherheit relevante Anspruchsniveaus einzugehen. Dies ist nur ein kleiner Teilbereich der anstehenden Aufgabe und seine Behandlung mag zunächst als trivial erscheinen. Es wird sich aber zeigen, dass dies nicht so ist, sondern man auch in einfach scheinenden Fällen zunächst noch auf viele offene Fragen stößt.

Bei der Ausarbeitung der bereits erwähnten Unterteilungsvorschrift konnten sich einige der Beteiligten nicht dazu befinden, sich mit der Wahrscheinlichkeit des Überstehens einer Kollision als alleiniges Sicherheitsmass zu begnügen. Sie bestanden darauf, dass "kleine Lecks" ein Schiff überhaupt nicht oder höchstens (bei kleinen Schiffen mit relativ wenigen Personen an Bord) an einzelnen Stellen über ein bestimmtes Mindestmass hinaus gefährden dürften. Dieser Anspruch rührt letztlich von der Überzeugung her, dass es immer zumutbar wäre, Massnahmen gegen so kleine Lecks vorzusehen.^{x)} Er hat sich in dem deterministischen Teil der Vorschrift niedergeschlagen. Das Anspruchsniveau bezüglich der Wahrscheinlichkeit für das Überstehen von Kollisionen (d.h. die geforderte Wahrscheinlichkeit) ist aufgrund der bei existierenden Schiffen im Mittel festgestellten Wahrscheinlichkeit festgelegt worden. Hierzu wären sicher noch weitergehende Überlegungen möglich und einer Anpassung - je nach Schiffstyp nach oben bzw. unten - als Folge einer Katastrophe bzw. als Konsequenz der Feststellung, dass Forderungen unzumutbar sind, vorzuziehen. Andererseits ist aber festzustellen, dass die durch die beiden erwähnten Ansprüche bedingte Zweigleisigkeit der Vorschrift (sie besteht aus einem deterministischen und einem stochastischen Teil) sich wohl kaum durch ein einheitliches Konzept ersetzen liesse.

x) Siehe hierzu auch Krappinger (1971a)

Wenn es einmal gelingen sollte, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kollisionen in gleichem Masse wie die Wahrscheinlichkeit für das Überstehen von solchen in den Griff zu bekommen, könnte ganz leicht die resultierende Wahrscheinlichkeit dafür berechnet werden, dass ein Schiff durch Kollision nicht verloren geht. Dieses "objektive" Sicherheitsmass würde allerdings der Tatsache nicht gerecht, dass es sicher nicht als gleichwertig empfunden werden würde, ob die Sicherheit durch Verhindern von Kollisionen oder durch Verhindern von Kollisionsfolgen erzielt wird. Viel praktikabler als die Ermittlung von Indifferenzen (d.h. die Feststellung, welche Änderung der Wahrscheinlichkeit, dass Kollisionen vermieden werden, einer Änderung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schiff eine Kollision übersteht, gleichwertig ist) wäre es auch hier, an die Höhe beider Wahrscheinlichkeiten getrennt bestimmte Ansprüche zu stellen.

Dass mit Unfallraten ein Anspruchsniveau realistisch (und auch überraschend genau) beschrieben werden kann, zeigt der folgende von Pugsley (1966) stammende Bericht. Vor dem letzten Krieg lag die Rate für das Versagen der tragenden Konstruktion von Militärflugzeugen bei 10^{-7} je Flugstunde. Als diese Rate infolge kriegsbedingter Veränderungen der Produktionsverhältnisse auf 5×10^{-7} anstieg, führte dies auf Proteste der Besatzungen, obwohl die auf anderen Ursachen wie sonstige technische Mängel, Fehler der Piloten und Feindeinwirkung beruhenden Unfallraten der Flugzeuge wesentlich höher waren. Pugsley bemerkt dazu, dass wir offensichtlich "an inherent distaste not only of death but especially of death due to the collapse of structures" haben.

Auch bezüglich der Mortalitätsrate sind Anspruchsniveaus bekannt. So wird z.B. bei Jäger (1970) festgestellt, dass die natürliche Mortalitätsrate einer Bevölkerung (bei uns etwas über 10^{-6} pro Stunde) eine Grenze für das Risiko darstellt, das z.B. bei verschiedenen Sportarten, aber auch bezüglich Autounfällen in Kauf genommen wird. Pugsley (1966) erwähnt, dass bezüglich eines bestimmten Schrittes (z.B. Besteigen eines Eisenbahnzuges) eine Todeswahrscheinlichkeit von 10^{-6} unter dem "eben wahrzunehmenden" Schwellwert liegt. Die gleiche Zahl nennt Borel (1962) als Schwellwert für die Wahrscheinlichkeit, an jeweils einem Tag einen tödlichen Unfall zu erleiden. Dies entspricht einer Unfallwahrscheinlichkeit von $0,365 \times 10^{-3}$ pro Jahr, ein Wert, der in der BRD festgestellten mittleren Wahrscheinlichkeit für tödliche Unfälle (ohne Verkehrsunfälle) sehr nahe kommt.

Ungeklärt scheint die Frage, welche Rolle die Zeit spielt, die eine Person einem Risiko ausgesetzt ist: Bei gegebener Unfallrate kann die für beliebige Zeiten geltende Unfallwahrscheinlichkeit leicht berechnet werden. Ob es auf diese jedoch ankommt, scheint fraglich. Es sieht so aus, als ob nur die Unfallrate als Gefährdungsmass "empfunden" wird. Ähnlich kann man fragen, ob die Wahrscheinlichkeit zur Beurteilung von Einzelrisiken auch dann massgebend bleibt, wenn diese sich wiederholen oder ob die Wahrscheinlichkeiten akkumuliert werden müssen. Vergleicht man die Reaktion auf Autounfälle (bei denen Todesfälle einzeln auftreten) mit der auf z.B. Flugzeugabstürze (bei denen meist eine grössere Zahl von Opfern zu beklagen sind), muss man

feststellen, dass die Mortalitätsraten verschieden beurteilt werden (in noch stärkerem Masse gilt das für die absolute durchschnittliche Zahl von Todesfällen je Zeiteinheit). Eine Antwort auf diese Frage wäre wichtig, wenn z.B. entschieden werden soll, ob weniger sehr grosse oder mehr kleinere Flugzeuge günstiger sind.

Die Reihe der hier nur angedeuteten Fragestellungen könnte beliebig verlängert werden. Wir hoffen, dass sie zumindest soweit beantwortbar sind, dass Ingenieure aus den Antworten einigen Nutzen ziehen könnten. Es wäre dabei sicher hilfreich, wenn Sozialpsychologen oder Vertreter ähnlicher Disziplinen ihr Forschungsinteresse auf solche Fragen richten würden. An den Ingenieuren läge es allerdings, dabei den technischen Kontext zu liefern, indem sie sich immer wieder mit den Fragestellungen und der Anwendbarkeit von Ergebnissen auseinandersetzen.

5. Schrifttum

- Abell, W.: Chances of Loss of Merchant Ships. Proc. of the Royal Soc. A. (1919) 671
- Abrahamson, E.: Structural Safety of Ships and Risks to Human Life. European Shipbuilding (1962) 134
- Alexandrow, M.: Probabilistic Approach to the Effectiveness of Ship Lifesaving System. Trans. SNAME 78 (1970) 391-410
- Anderson, T.W.: An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. John Wiley & Sons, New York (1958)
- Borel, E.: Probabilities and Life. New York (1962) (die französische Originalveröffentlichung ist bereits 1943 erschienen)
- Barnaby, K.: Some Ship Disasters and Their Causes. London (1968)
- Churchman, C.: Prediction and Optimal Decision. Englewood Cliffs, N.J. (1961)
- Fisher, R.A.: The use of multiple measurements in taxonomic problems. Annals of Eugenics 7 (1936) 179-188
- Freudenthal, A.: Critical Appraisal of Safety Criteria and Their Basic Concepts. 8. Kongress der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, New York (1968)
- Freudenthal, A. u. W. Gaither: Probabilistic Approach to Economic Design of Maritime Structures. XXII Intern. Navigation Congress, Paris (1969)
- Jaeger, Th.: Das Risikoproblem in der Technik. Schweizer Archiv für angew. Wissenschaft und Technik 36 (1970)
- Krappinger, O.: Die quantitative Berücksichtigung der Sicherheit und Zuverlässigkeit bei der Konstruktion von Schiffen, Jb. STG 61 (1967) 314-338
- Krappinger, O.: Zusammenhänge zwischen der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit von Schiffen. Schiffstechnik 18 (1971) 21-32
- Krappinger, O.: Zur Frage der Bewertung der Unterteilung von Schiffen. IfS-Bericht Nr. 281, Hamburg (1971a)

- Krappinger, O.: Ansätze zur Bestimmung der Kollisionsrate.
IfS-Bericht Nr. 295, Hamburg (1973)
- Krappinger, O.: u. H. Hormann: Neue IMCO-Regeln für die Unter-
teilung von Fahrgastschiffen. IfS-Bericht Nr. 311,
Hamburg (1974)
- Nowacki, H., F. Brusis u. P. Swift: Tanker Preliminary Design -
An Optimization Problem with Constraints.
SNAME 1970, S. 357
- Perras, P.T.: Technische-Ökonomische Probleme der Sicherheit von
Schiffen. Schiffstechnik 19 (1972) 67-87
- Pestel, E.: Neue Aufgaben für die Forschung an unseren Hochschulen.
Jubiläumsschrift 100 Jahre Hannoverscher Bezirks-
verein des VDI. Okt. (1970)
- Pugsley, A.: The Safety of Structures. London (1966)
- Rahola, J.: The Judging of Stability of Ships and the Determi-
nation of the Minimum Amount of Stability.
Helsinki (1939)
- Schmetterer, L.: Einführung in die mathematische Statistik
(2. Aufl.) Springer-Verlag, Wien-New York (1966)
- Schöttelndreyer, W.: Die Einwirkung von Umwelteinflüssen auf
die optimale Flottenstruktur bei Handelsschiffen
im Liniendienst. IfS-Bericht Nr. 314, Hamburg
(1974)
- Seefisch, F.: Stabilitätsbeurteilung in der Praxis. Jb. STG 59
(1965) 578-593
- Shelly, M.W. im Schlusswort (Part VII) von Human Judgement and
Optimality, herausgegeben von M.W. Shelly und
G.L. Bryan, New York (1964)
- Simon, H.A.: Models of Man; Mathematical Essays on Rational Human
Behavior in a Social Setting, New York (1957)
- Weber, E.: Grundriss der biologischen Statistik (7. Aufl.).
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1972)
- Wendel, K.: Sicherheit gegen Kentern. VDI-Z. (1958) 1523-33
- Wendel, K.: Die Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Ver-
letzungen. Schiffstechnik 7 (1960) 47-61

6. Symbolverzeichnis

A	Mittlerer Verlust
a	Entfernung zwischen sich begegnenden Schiffen
c_0	Additiver Term in der Diskriminanzfunktion
c_j	Der Beiwert für das Merkmal x_j in der linearen Diskriminanzfunktion
D	Displacement
$E[K_i]$	Erwartung des Kapitalwertes
e	Fläche unter der Hebelarmkurve bis $\phi = \text{Min}(\phi_m, 40^\circ)$
$F(t)$	Verteilungsfunktion der Zeit zwischen zwei Begegnungen (d.i. die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Zeit zwischen zwei Begegnungen kleiner als t ist)
F_1	Summenhäufigkeit eines Merkmals in der Gruppe 1
F_2	Summenhäufigkeit eines Merkmals in der Gruppe 2
$f(x)$	Verteilungsdichte von x (im Abschnitt 2)
$f(\alpha)$	Verteilungsdichte der relativen Peilung α (im Abschnitt 2)
GM	Metazentrische Höhe
h_ϕ	Aufrichtender Hebelarm bei Krängungswinkel ϕ
h_m	Maximaler Hebelarm
i	Elementnummer; in der k -ten Gruppe läuft i von 1 bis n_k
j	Merkmalnummer; läuft von 1 bis m
j'	Merkmalnummer; läuft von 1 bis m
k	Gruppennummer = 1 oder 2
L	Schiffslänge
m	Anzahl der Merkmale
n_k	Anzahl der Elemente in der k -ten Gruppe

$p(r)$	Wahrscheinlichkeit von r Begegnungen in Zeit T
$Q_{jj'}$	Summe $[Q_{jj'}^{(1)} + Q_{jj'}^{(2)}] / 2$
$Q_{jj'}^{(k)}$	Kovarianz zwischen den Merkmalen x_j und $x_{j'}$ in der k -ten Gruppe
T	Zeitabschnitt
t	Zeit
v	Relative Geschwindigkeit sich begegnender Schiffe (im Abschnitt 2)
v_a	Geschwindigkeit des anderen Schiffes
v_o	Geschwindigkeit des eigenen Schiffes
$v_x^{(k)}$	Varianz von x in der k -ten Gruppe
$v_z^{(k)}$	Varianz von z in der k -ten Gruppe
x	Abstand relativer Bahnen sich begegnender Schiffe = Passierabstand (im Abschnitt 2)
x	Einzelmerkmal (im Abschnitt 3)
x_i	Wert des Merkmals x für das i -te Element
x_j	j -tes Merkmal
$x_{ji}^{(k)}$	Wert des j -ten Merkmals x_j für das i -te Element in der k -ten Gruppe
x_K	Kritischer Passierabstand (im Abschnitt 2)
$\bar{x}^{(k)}$	Mittelwert des Merkmals x in der k -ten Gruppe
\bar{x}	Mittel von $\bar{x}^{(1)}$ und $\bar{x}^{(2)}$
Z	Barwert von Mehrkosten
z	Zusammengesetztes Merkmal
$\bar{z}^{(k)}$	Mittelwert von z in der k -ten Gruppe
z_G	Grenzwert zur Diskrimination von Gruppen
α	Relative Peilung eines begegnenden Schiffes (im Abschnitt 2)

α	Diskriminanzmaß (im Abschnitt 3)
β	Winkel zwischen v und v_0
δ	$\arcsin(x/a)$ (im Abschnitt 2)
δ_K	$\arcsin(x_K/a)$ (im Abschnitt 2)
θ	Relativer Kurs des begegnenden Schiffes
λ	Begegnungsrate (im Abschnitt 2)
λ	Ausfallrate (im Abschnitt 4)
ρ	Mittlere Anzahl der Schiffe je Flächeneinheit
ϕ	Krängungswinkel
ϕ_f	Wert von ϕ , bei dem Öffnungen zu Wasser kommen
ϕ_m	Wert von ϕ für h_m
ϕ_v	Umfang der Hebelarmkurve

Tabelle 1 Stabilitätsdaten von 19 "unsicheren" Schiffen

Nr	Typ	$10^2 \times$ L	$10 \times$ D	$10^3 \times$ GM	$10^3 \times$ h_{10}	$10^3 \times$ h_{20}	$10^3 \times$ h_{30}	$10^3 \times$ h_{40}	$10^3 \times$ h_m	$10^2 \times$ ϕ_m	$10^2 \times$ ϕ_v	$10^2 \times$ ϕ_f	$10^4 \times$ e	
		m	t	m	m	m	m	m	m	Grad	Grad	Grad	m	
1	2	F	4300	8840	580	85	152	213	274	335	5500	8700	600	1030
1	7	F	5500	13160	632	97	100	120	145	150	4500	6600	808	704
1	10	F	4600	9892	850	150	260	330	350	350	4000	8000	600	1625
1	16	F	5800	20710	610	150	235	235	170	250	2500	6100	1200	668
1	19	F	4132	7000	550	95	175	245	285	290	4500	7700	508	1160
1	22	S	2970	2530	450	23	1	-50	-100	23	1000	2000	460	66
1	31	Q	6538	23560	130	24	55	52	3	61	2500	4100	900	132
1	32	S	4297	3300	400	64	116	70	-64	119	2200	3500	1600	273
1	34	F	3018	3980	270	49	94	180	232	232	4000	6200	400	780
1	36	F	4440	8153	530	60	107	150	200	220	4500	7000	700	765
1	37	F	3100	3925	518	70	115	160	175	175	4000	7200	800	730
1	38	F	5200	11180	480	110	140	140	180	200	4500	6100	850	850
1	48	Q	5333	16000	380	69	122	158	187	190	4500	7050	510	780
1	49	F	4655	10200	510	75	98	23	-45	100	1800	3300	560	200
1	51	S	8160	45700	260	60	160	260	255	290	3600	5800	2050	912
1	62	F	5040	13420	610	70	135	180	180	190	3500	7500		690
1	64	F	5669	18930	350	65	74	70	62	75	1500	6400	1092	132
1	67	Q	5655	19610	410	60	80	70	60	80	1600	6200	942	150
1	68	F	5900	20635	410	94	170	200	190	200	3000	7600	1425	634

Typ: F = Volldecker
 S = Schutzdecker
 Q = Quarterdecker

Tabelle 2 Stabilitätsdaten von 61 "sicheren" Schiffen

Nr	Typ	$10^2 \times$ L	$10 \times$ D	$10^3 \times$ GM	$10^3 \times$ h_{10}	$10^3 \times$ h_{20}	$10^3 \times$ h_{30}	$10^3 \times$ h_{40}	$10^3 \times$ h_m	$10^2 \times$ ϕ_m	$10^2 \times$ ϕ_v	$10^2 \times$ ϕ_f	$10^4 \times$ e	
		m	t	m	m	m	m	m	m	Grad	Grad	Grad	m	
2	1	P	4650	4171	760	155	295	355	345	360	3500	7820	1920	1340
2	2	P	8000	20570	920	150	280	366	230	370	2950	4850	2200	1110
2	3	P	3500	1480	940	130	310	390	380	400	3500	6350	2900	1470
2	4	P	8250	36393	530	92	230	420	640	750	5350	9100	3270	1930
2	5	C	16093	196850	640	190	460	810	910	910	4000	6400	2400	3500
2	6	F	8400	29960	1210	250	520	660	480	670	3100	5500	900	1910
2	7	C	12000	62390	1080	200	400	512	390	512	3000	5220	1940	1490
2	8	C	11000	51810	590	90	250	500	770	850	4900	8500	3530	2180
2	9	C	9400	27970	840	180	410	650	790	810	4200	7400	3440	2930
2	10	C	7200	32472	780	135	230	258	250	260	3100	7080	8100	950
2	11	C	6760	19179	120	40	110	260	310	320	3700	5900	2500	870
2	12	B	5500	14720	250	50	130	270	365	365	4000	6800	2510	1180
2	13	C	13500	128070	200	50	140	320	460	480	4500	7200		1260
2	14	C	6180	20880	380	60	190	250	240	250	3200	7400		780
2	15	C	14650	149550	210	40	130	360	540	580	4500	7400		1470
2	16	C	5500	11600	330	60	130	220	320	340	4500	6400		1010
2	17	C	10850	61120	400	80	190	350	450	460	4400	7300		1500
2	18	C	5900	15660	300	90	180	280	380	380	4000	7200		1290
2	19	C	12690	132980	160	30	145	275	340	340	4000	6700	2250	1080
2	20	C	9640	60020	410	100	190	260	260	280	3500	6600	1400	920
2	21	C	8250	45810	130	35	120	250	410	450	4600	7700	2100	1040
2	22	C	12585	99920	550	100	250	440	530	530	4000	7400	2210	1880
2	23	B	4680	8460	210	50	120	245	350	360	4500	8100	2930	1120
2	24	B	9296	47810	91	10	40	125	170	170	3800	5650	2350	400
2	25	C	14326	162540	694	210	530	840	890	898	3700	8000	400	3070
2	26	C	14335	181950	305	130	340	590	650	657	4150	6300	6700	2440
2	27	S	16124	190960	512	120	295	470	590	600	4350	7000	2027	2090
2	28	C	6200	22080	760	150	310	440	530	550	4650	9000	6100	2020
2	29	C	14926	151940	10	20	104	305	356	363	3800	6200	2340	880
2	30	C	4726	10180	950	140	200	250	290	310	5000	8400	600	1330
2	31	C	5490	14190	170	60	120	210	240	240	3900	6300	1500	880
2	32	C	4320	8110	630	80	130	180	250	260	4500	7200	500	910
2	33	C	4907	11540	430	80	130	200	300	320	4900	8300	300	980
2	34	C	7619	32200	520	110	190	240	310	350	4800	7700	1150	1220
2	35	B	9120	41230	1090	230	430	610	690	690	3850	7400	3600	2700
2	36	C	15240	177960	80	20	120	200	200	220	3500	5300	2150	610
2	37	C	7975	36250	450	80	150	210	210	225	3500	6200	1200	800
2	38	C	11800	96030	380	80	180	270	320	330	4400	7000	1500	1210
2	39	C	10100	66880	320	80	190	330	450	470	4500	7550	1700	1500
2	40	C	8260	39020	570	110	210	295	355	370	4800	8200	770	1330
2	42	B	14058	192460	710	160	370	610	830	990	5300	9000	2310	2790
2	43	C	14170	130550	180	40	150	370	520	530	4150	6600	2720	1470
2	44	C	2682	3540	400	50	80	120	190	270	5800	9000	510	700
2	45	C	5270	11830	710	80	180	210	180	210	3000	5900	800	630

siehe Fortsetzung

Tabelle 2 (Fortsetzung)

2 46 C	5100	10960	1200	190	280	300	300	310	3500	6800	600	1370
2 47 C	4100	6490	880	130	200	240	260	260	4000	7000	500	1260
2 48 C	4700	9790	560	90	130	170	230	320	5200	8000	700	910
2 49 C	5410	13160	810	140	240	280	290	300	3800	7400	900	1290
2 50 C	4650	8560	750	130	180	190	210	210	4400	7000	700	1040
2 51 C	8952	41230	930	230	470	620	690	690	4000	7600	1400	2860
2 52 C	7920	29580	340	70	160	280	360	360	4000	6240	2350	1250
2 53 C	5500	11990	100	30	110	230	300	300	3800	6520	2800	860
2 54 C	6705	21000	360	40	130	270	340	350	3850	6600	2300	1020
2 55 C	5600	15050	160	100	250	410	510	510	4200	7300	2850	1820
2 56 C	8260	39270	520	105	210	225	200	225	2900	5850	670	710
2 57 C	5900	15500	99	40	110	230	300	300	4000	6700	2550	940
2 58 C	6180	20270	220	40	140	210	180	210	3300	6800	1950	610
2 59 C	5900	16450	355	70	150	320	340	345	3800	6170	2380	1200
2 60 C	5500	11730	290	60	130	200	280	290	4350	6440	3000	910
2 61 B	5200	13100	690	120	260	307	290	307	3150	7400	820	1040
2 62 C	4700	6970	440	70	180	290	355	360	3900	7400	1220	1230

Typ: B = Massengutschiff
C = Frachtschiff
F = Fähre
P = Passagierschiff
S = Inspektionsfahrzeug
T = Holzschiff

Bild 1

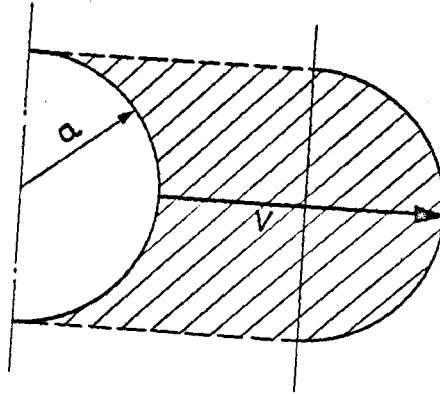
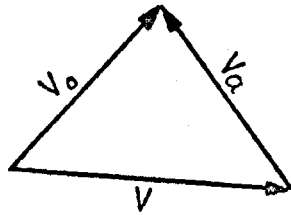
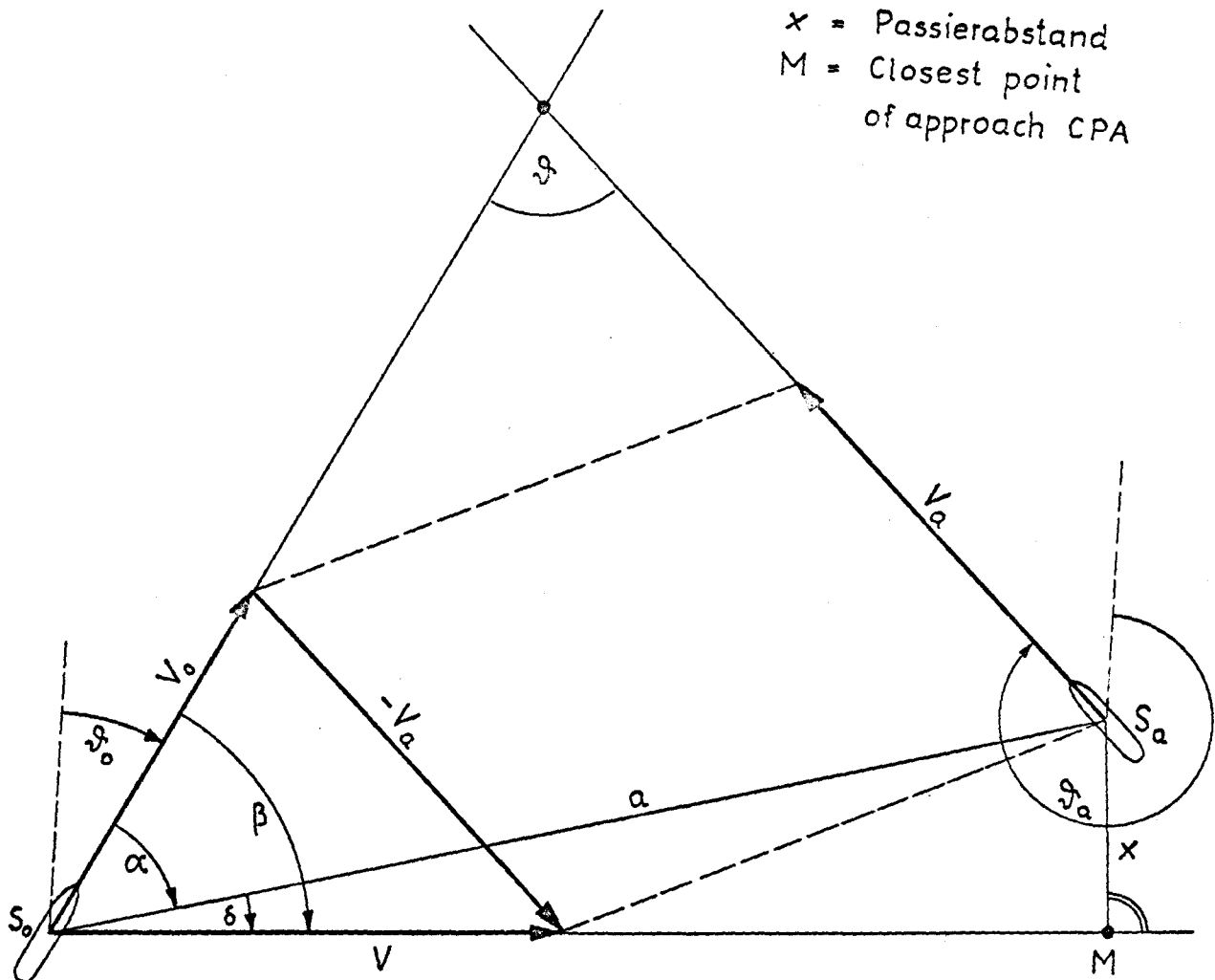
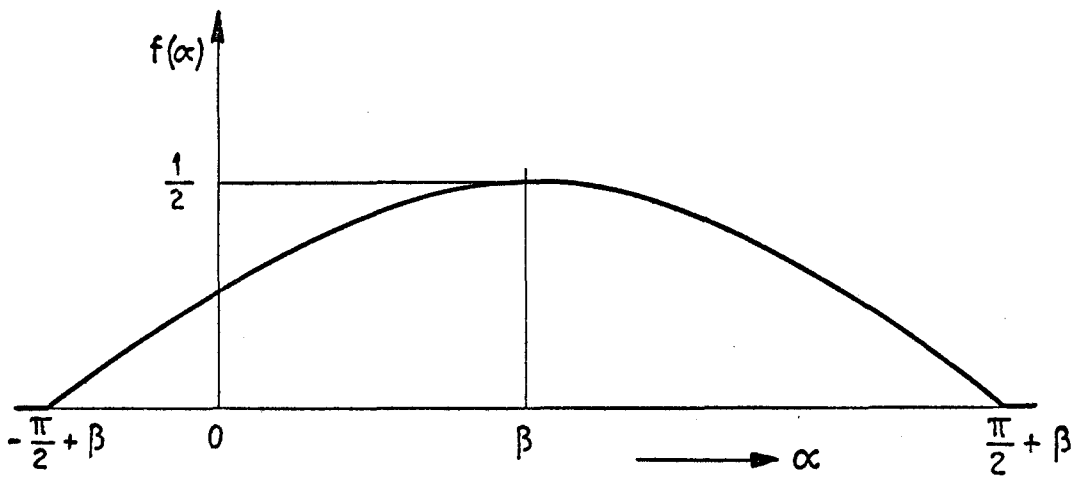
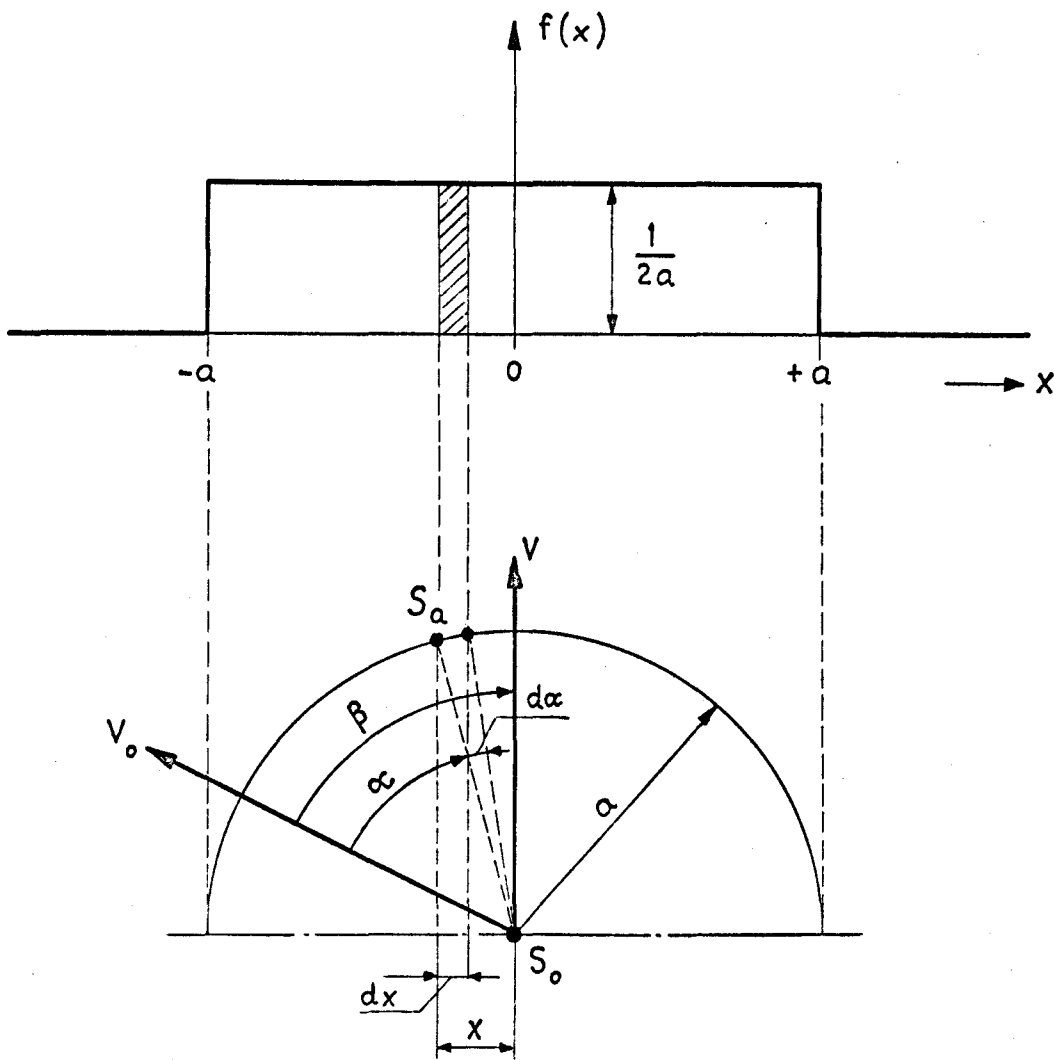


Bild 2



x = Passierabstand
 M = Closest point
of approach CPA

Bild 3



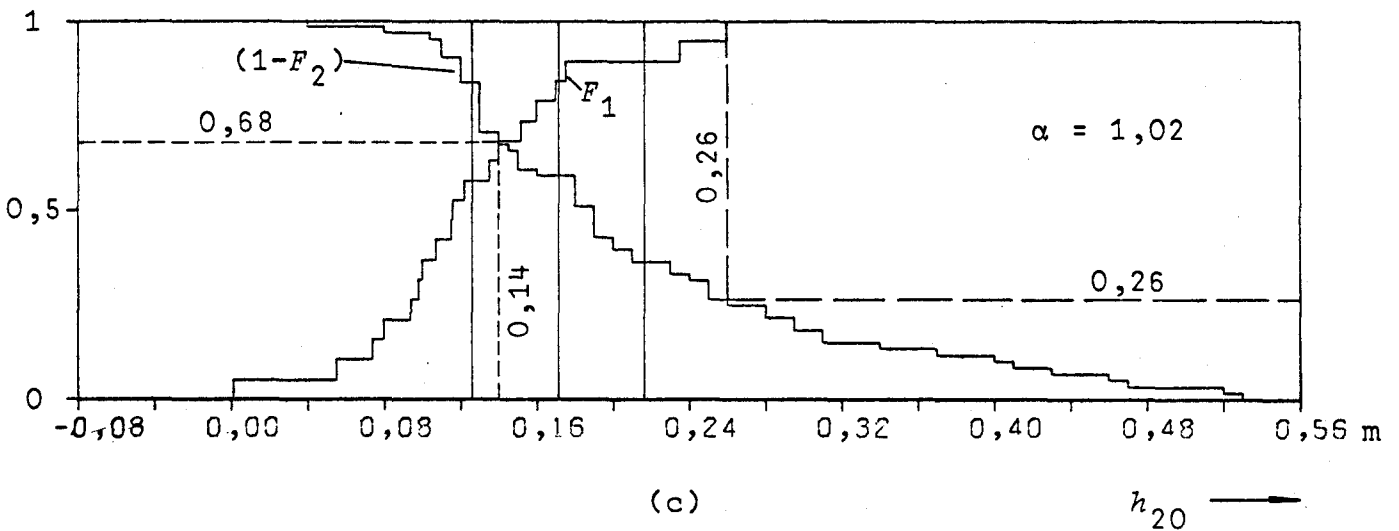
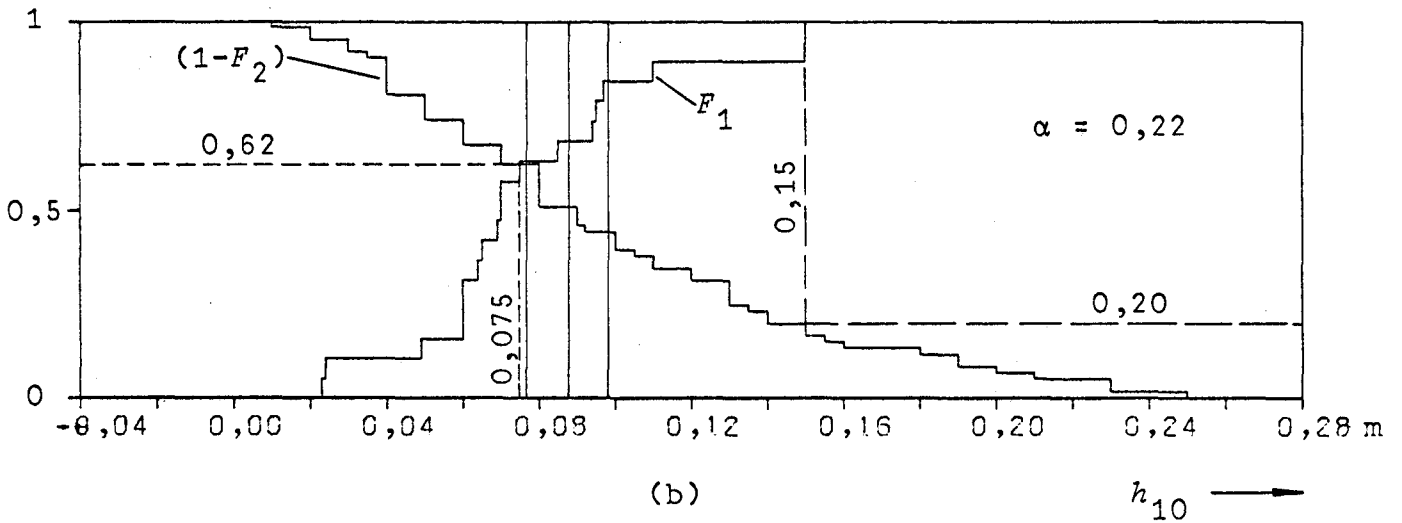
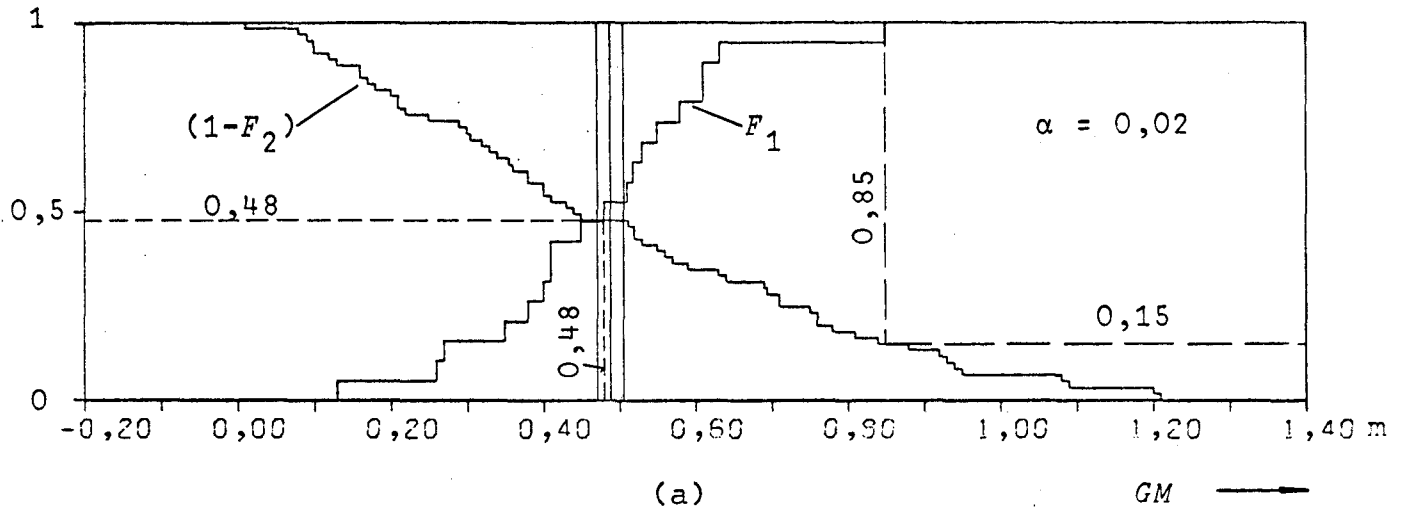


Bild 4a-i: Häufigkeitsverteilungen der untersuchten Stabilitätsparameter in den vorliegenden Stichproben "unsicherer" und "sicherer" Schiffe

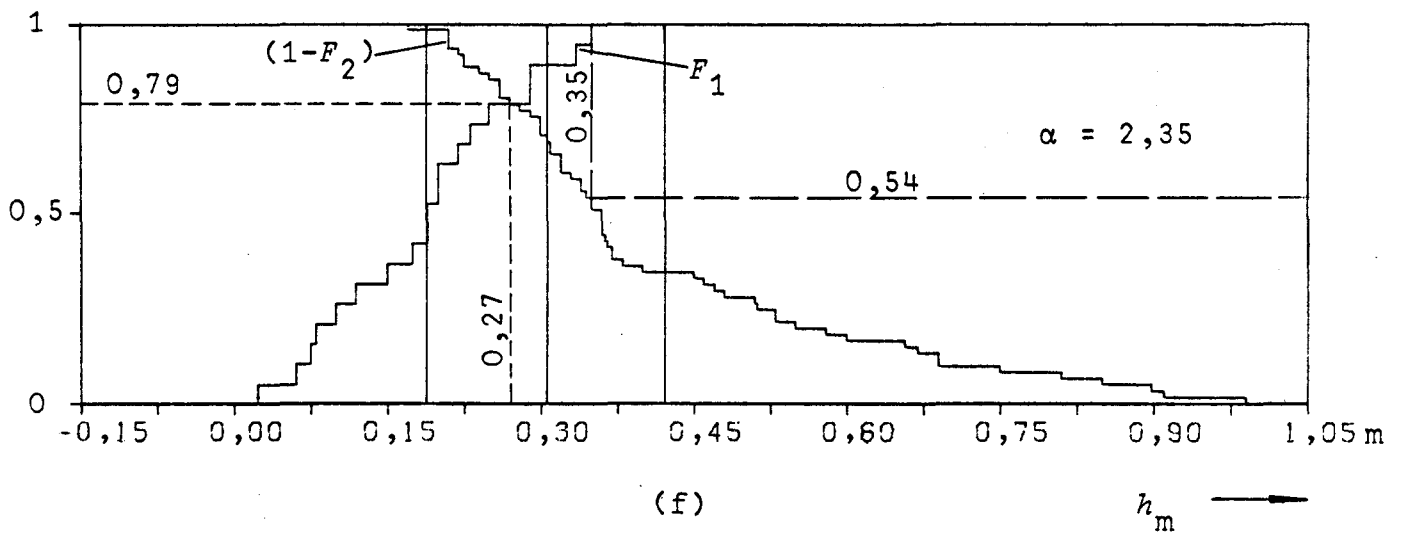
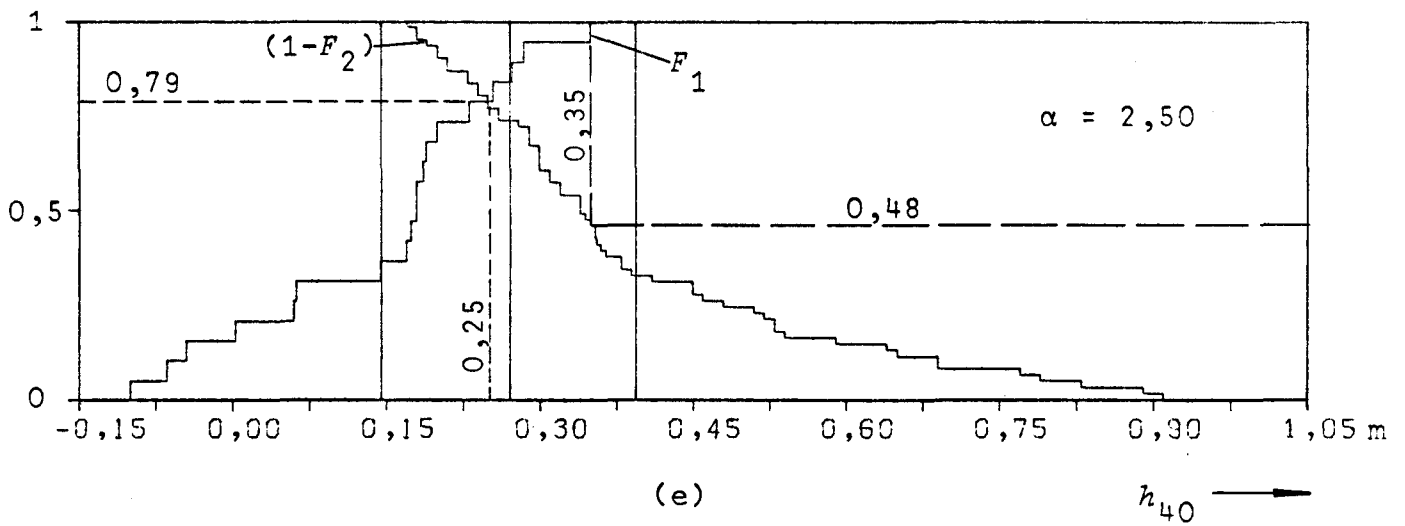
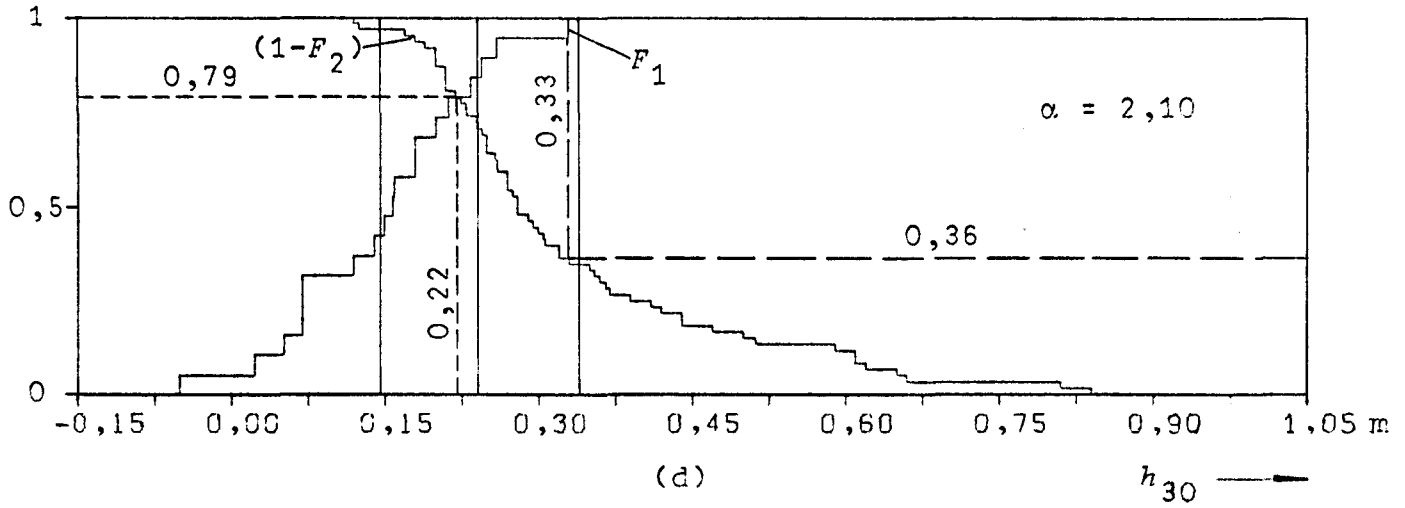


Bild 4 (Fortsetzung)

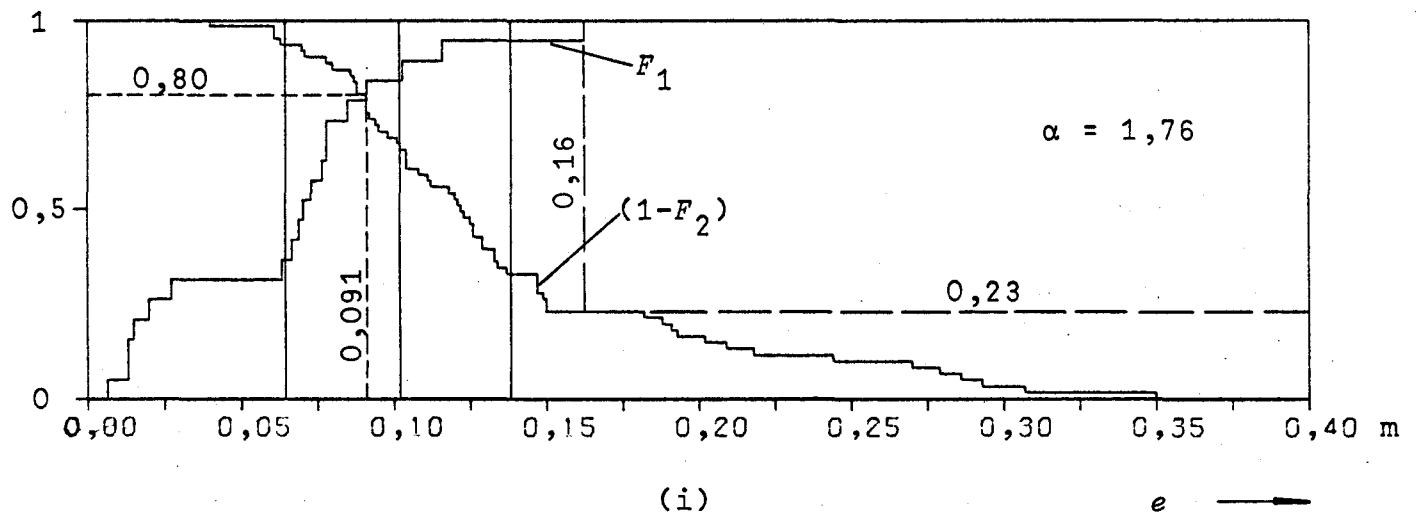
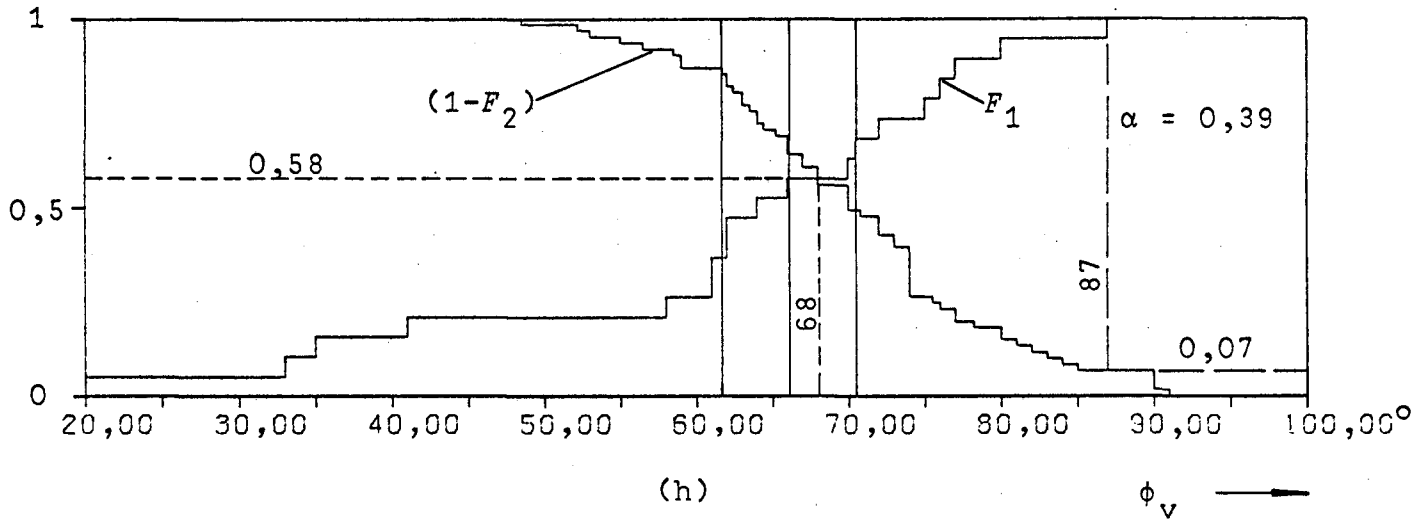
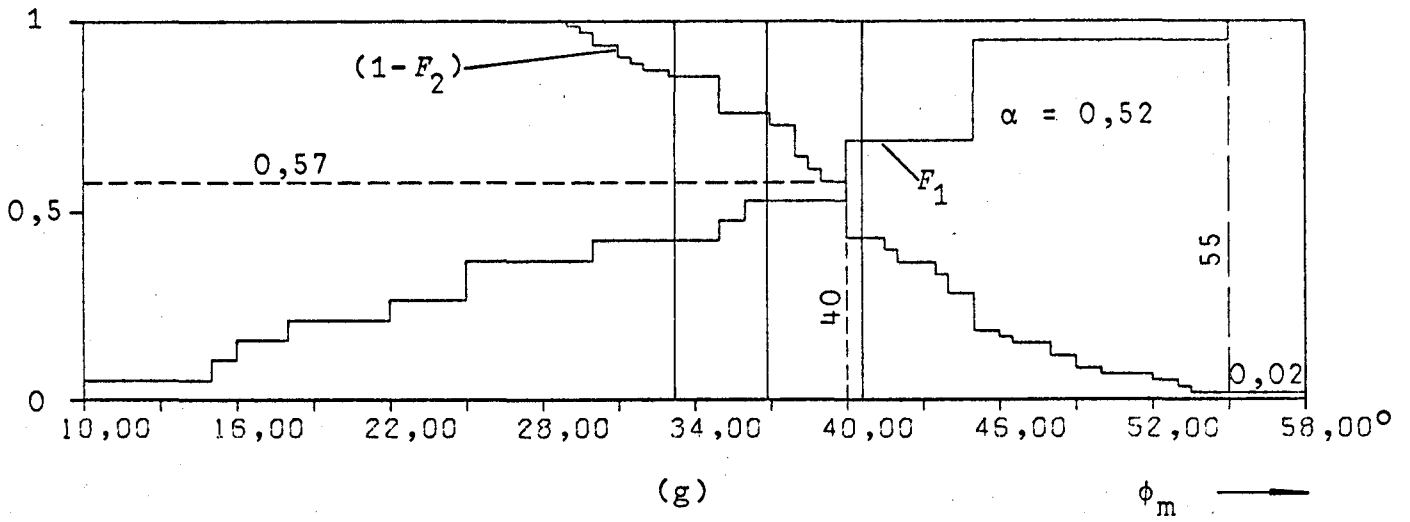


Bild 4 (Fortsetzung)

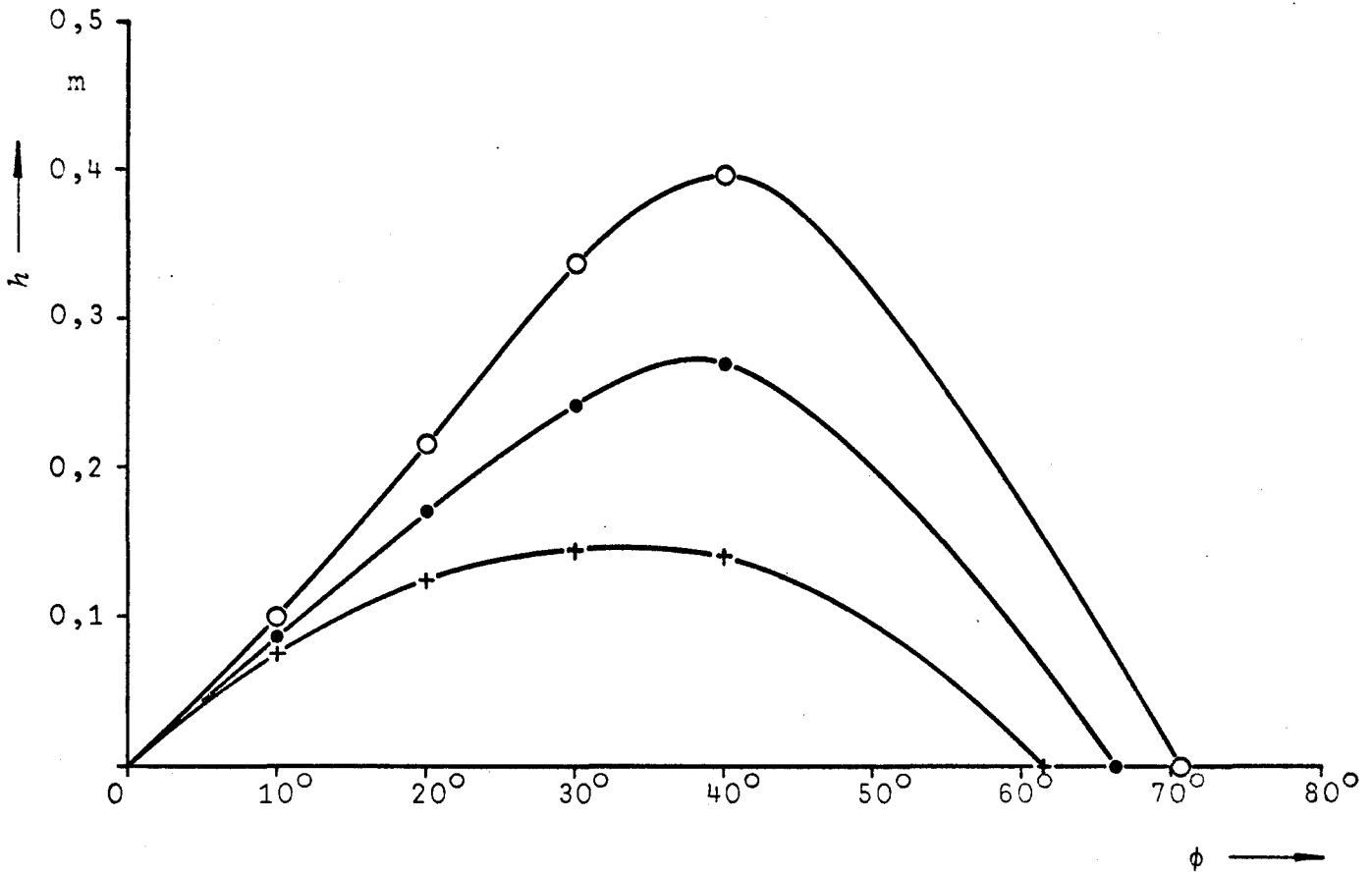


Bild 5: Darstellung der Mittelwerte der Stabilitätsparameter

Zeichen:	+	○	●
Mittelwert:	$\bar{x}^{(1)}$	$\bar{x}^{(2)}$	\bar{x}

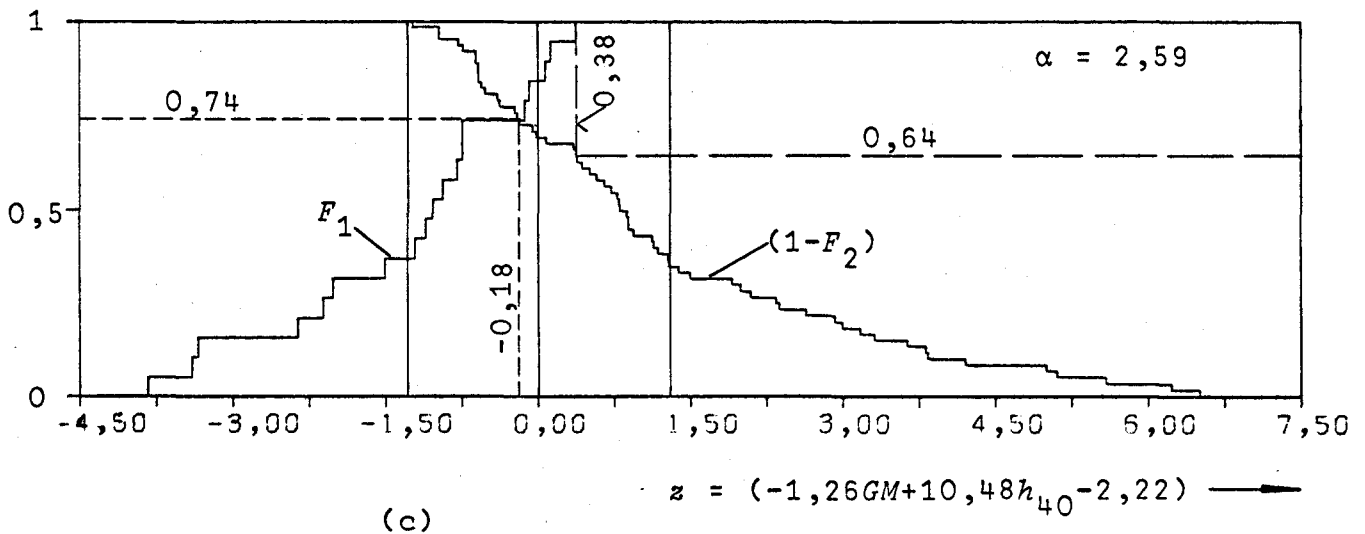
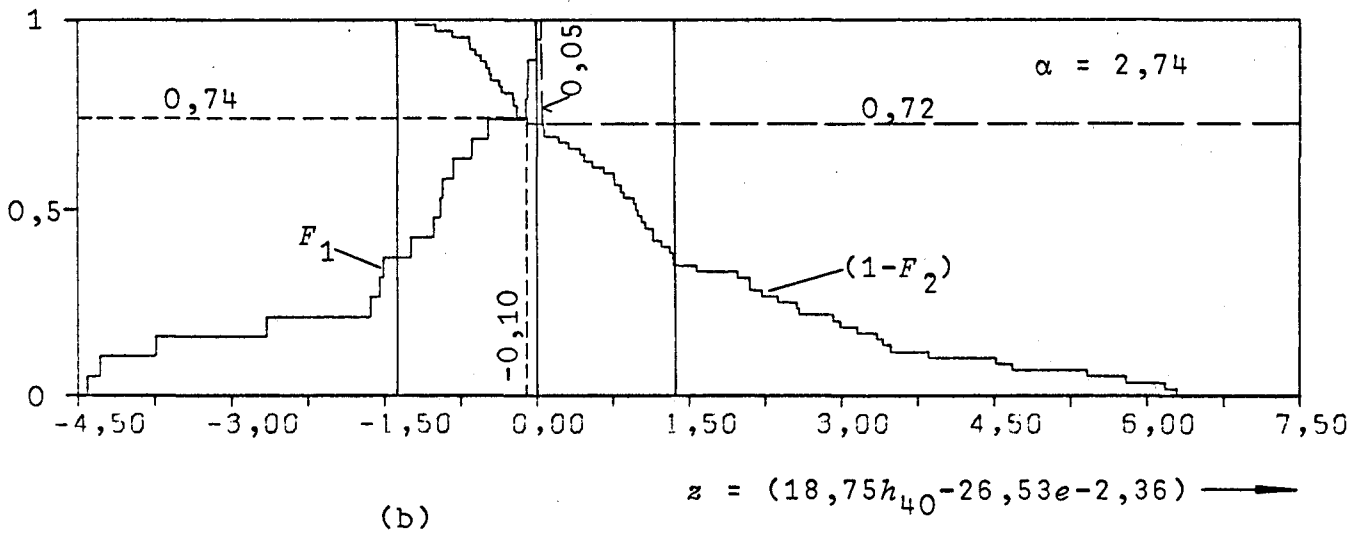
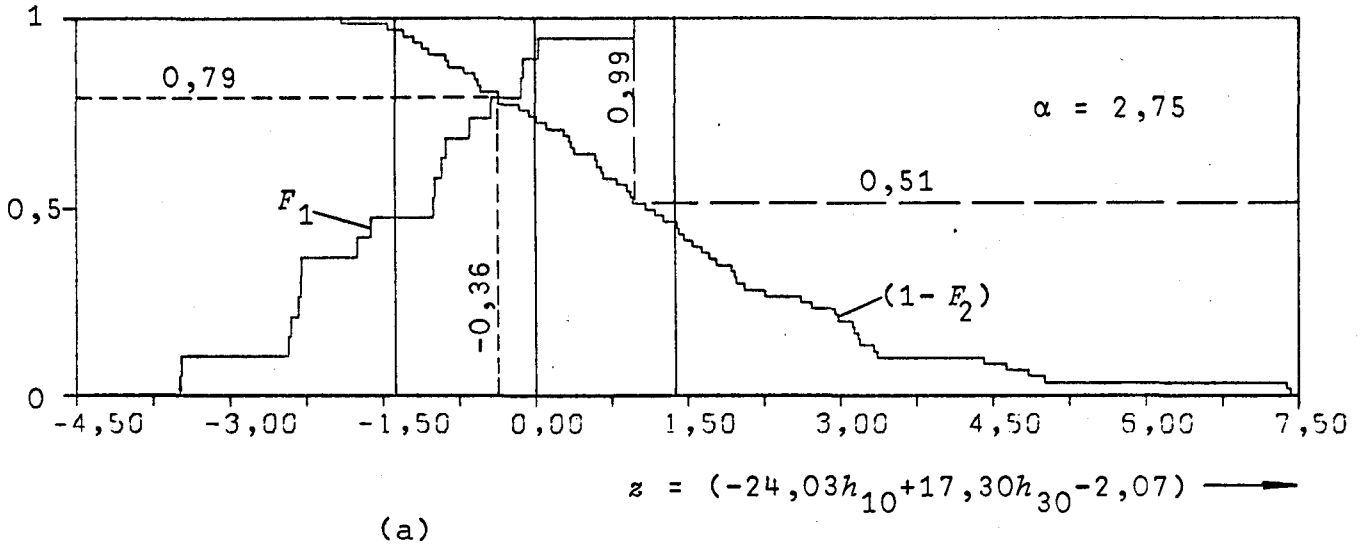


Bild 6: Häufigkeitsverteilungen einiger aus jeweils zwei Stabilitätsparametern zusammengesetzter Merkmale

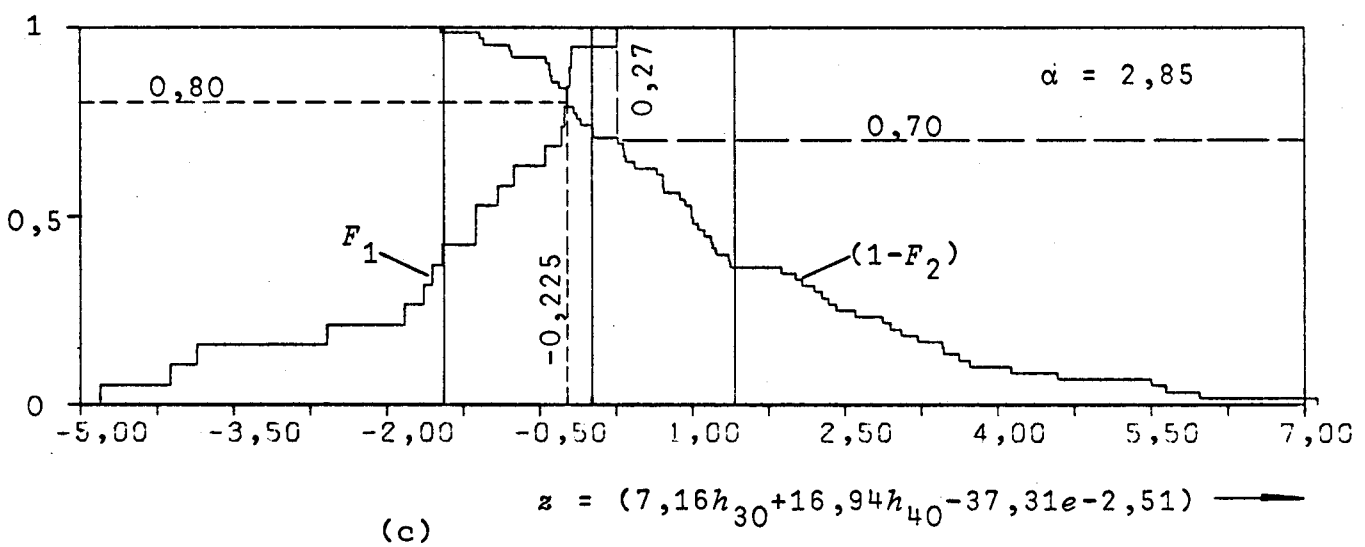
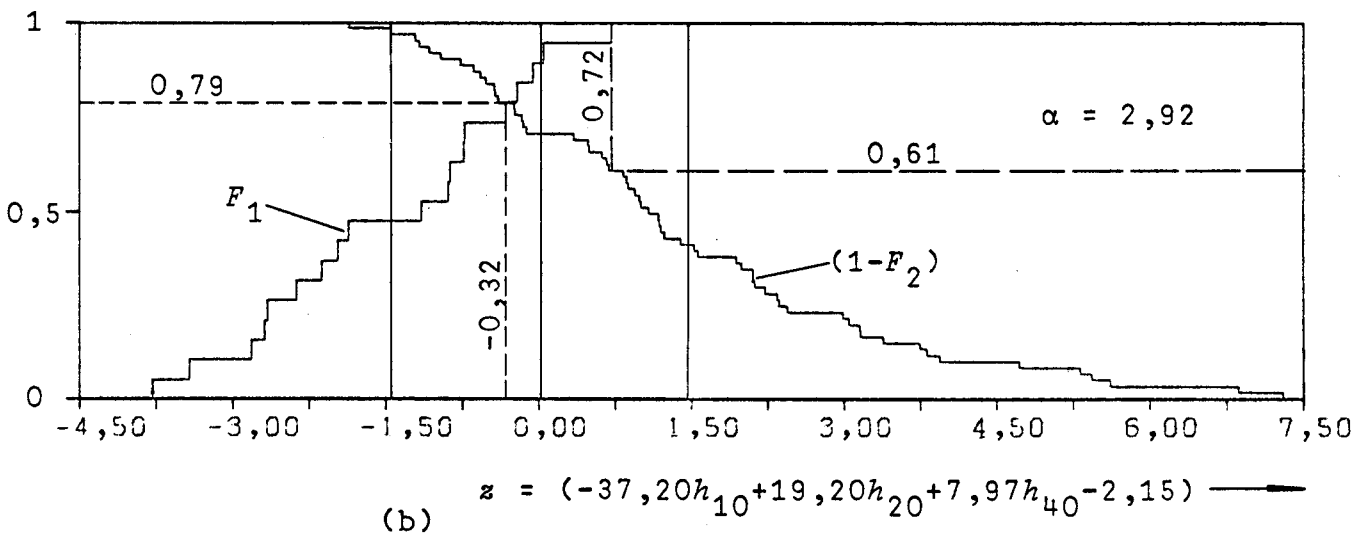
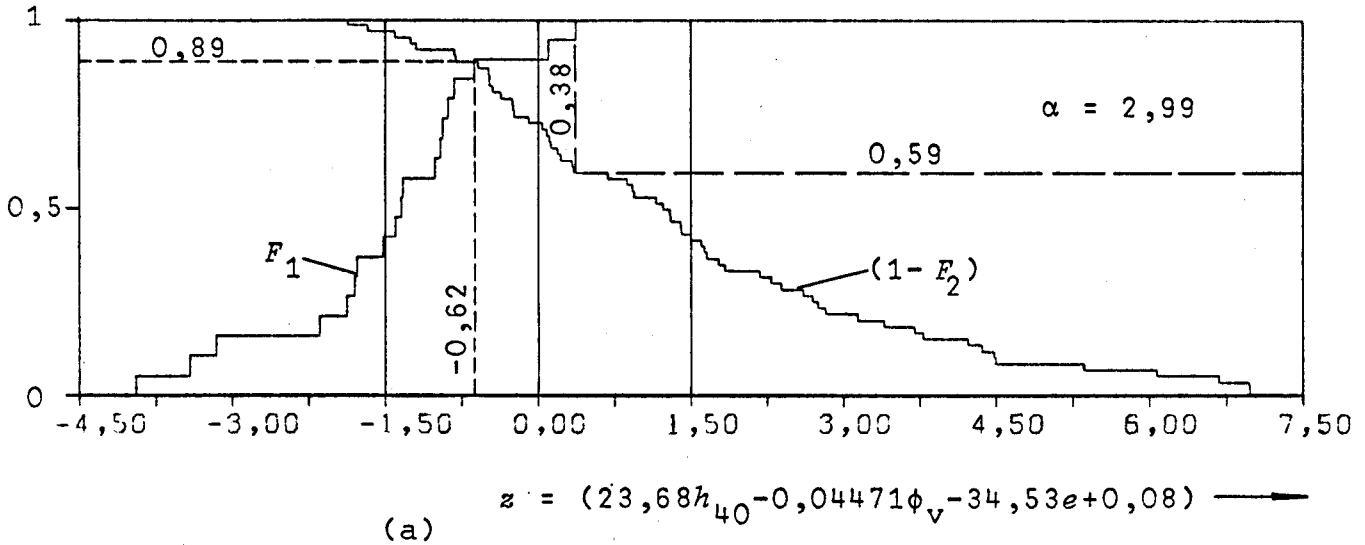


Bild 7: Häufigkeitsverteilungen einiger aus jeweils drei Stabilitätsparametern zusammengesetzter Merkmale

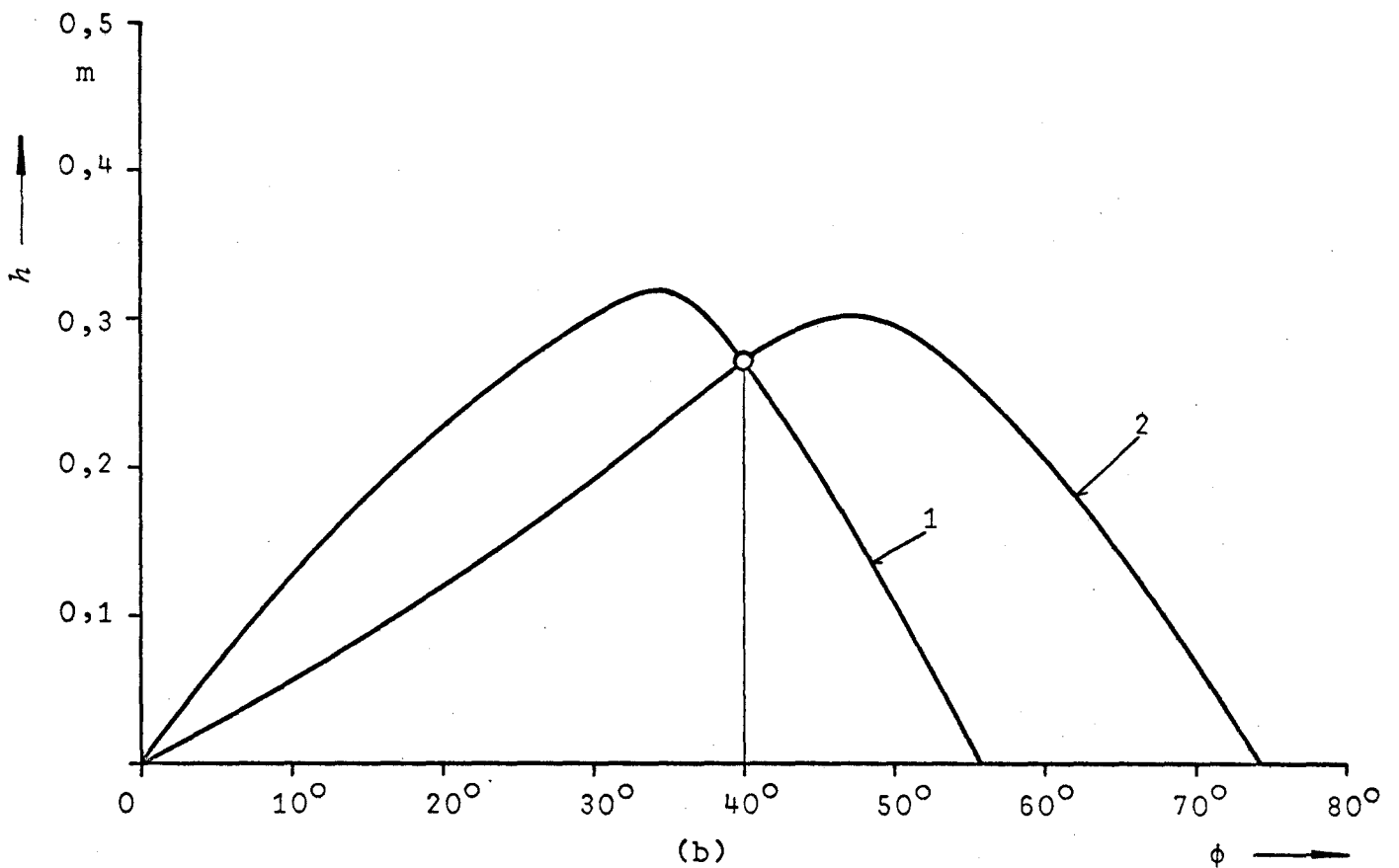
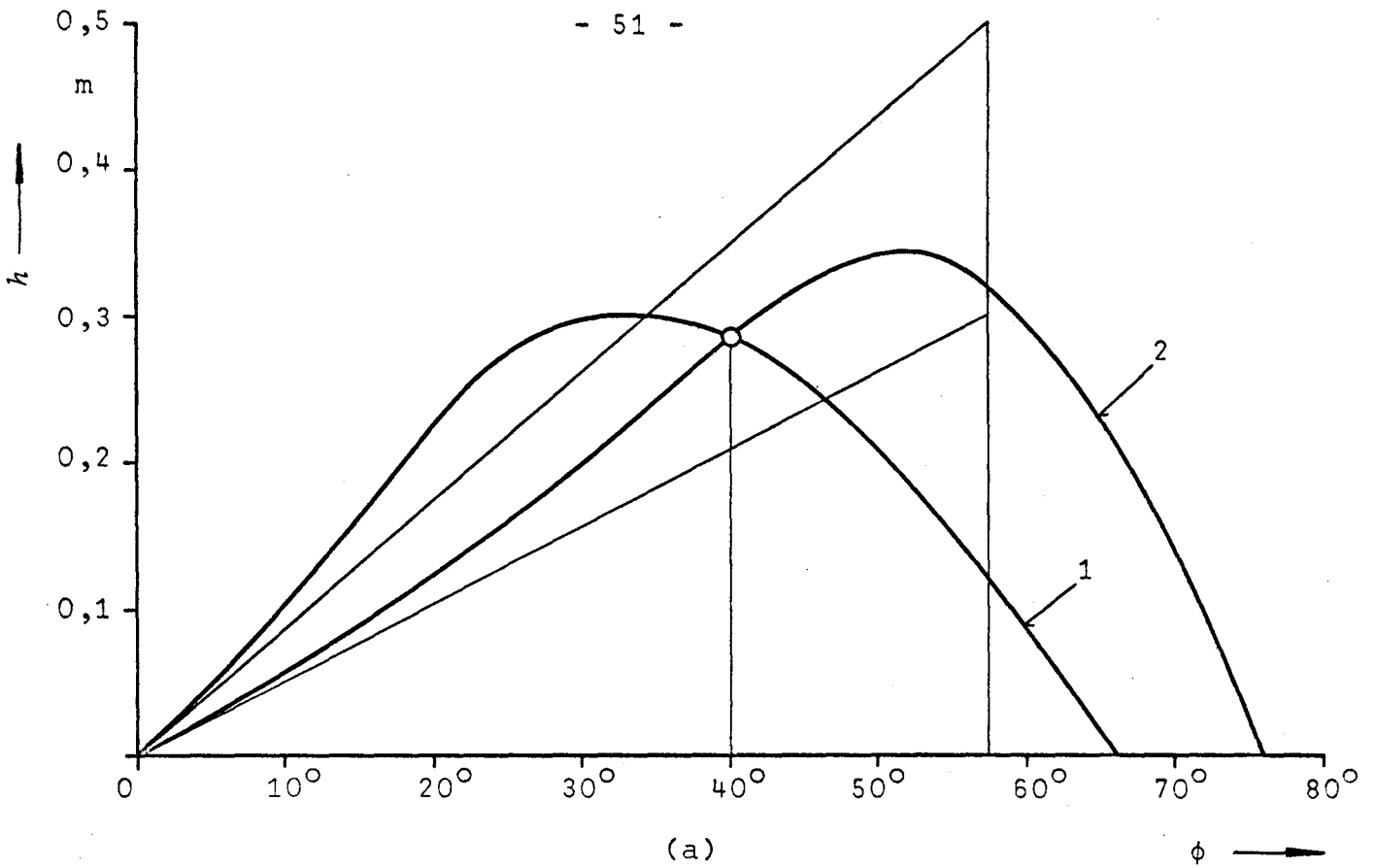


Bild 8: Prinzipskizze zur Erklärung der negativen Beiwerte in Diskriminanzfunktionen
Im Fall (a) hat das Schiff 2 geringeres GM als Schiff 1 bei gleichem h_{40} und erscheint sicherer.
Im Fall (b) hat das Schiff 2 geringeres e als Schiff 1 bei gleichem h_{40} und erscheint sicherer.

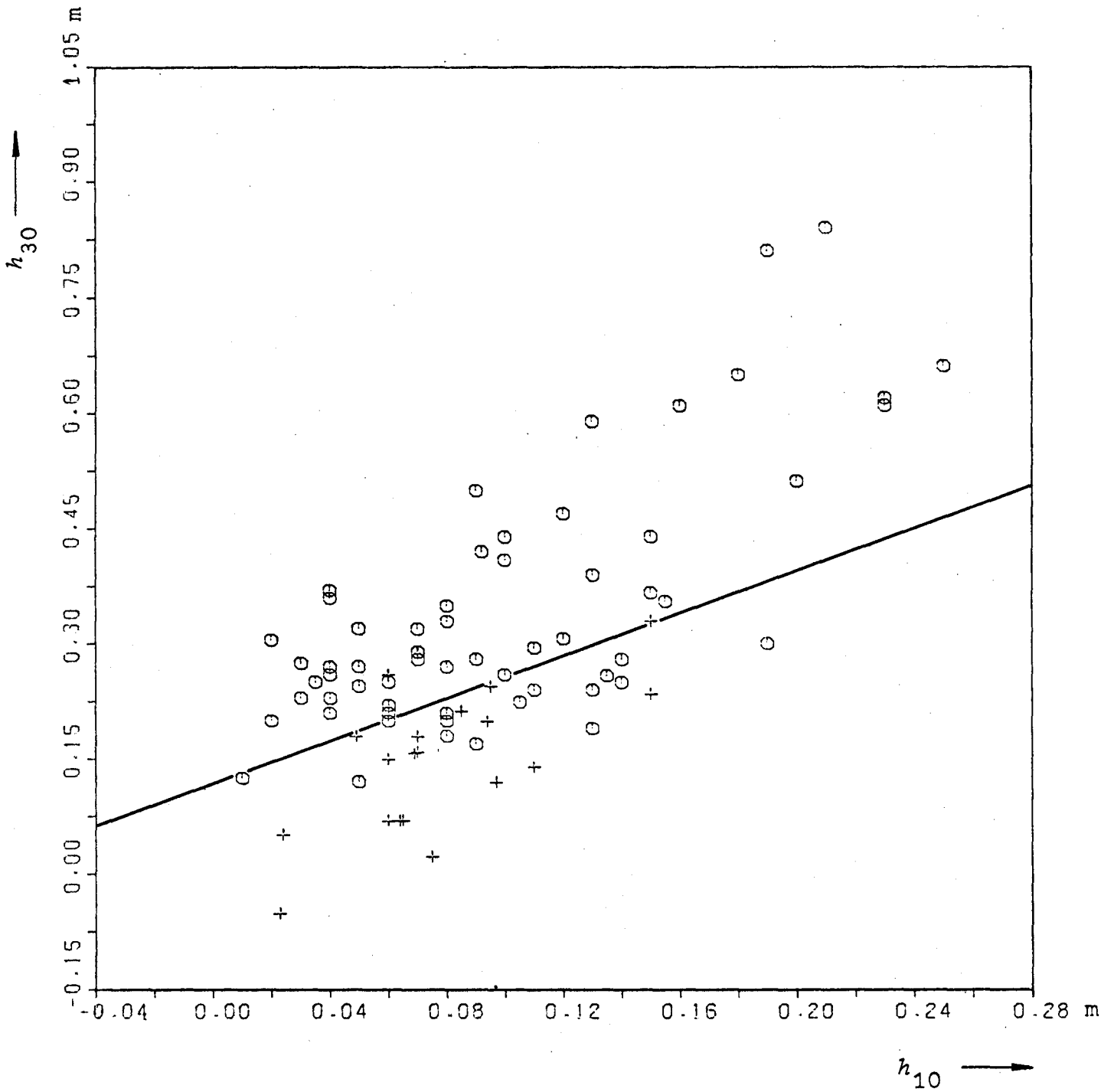


Bild 9a: Graphische Darstellung der Verteilung der Schiffe in den Gruppen 1 (Zeichen +) und 2 (Zeichen o) sowie der nach der Diskriminanzanalyse ermittelten Trenngeraden $(-24,03h_{10} + 17,30h_{30} - 2,07) = 0$

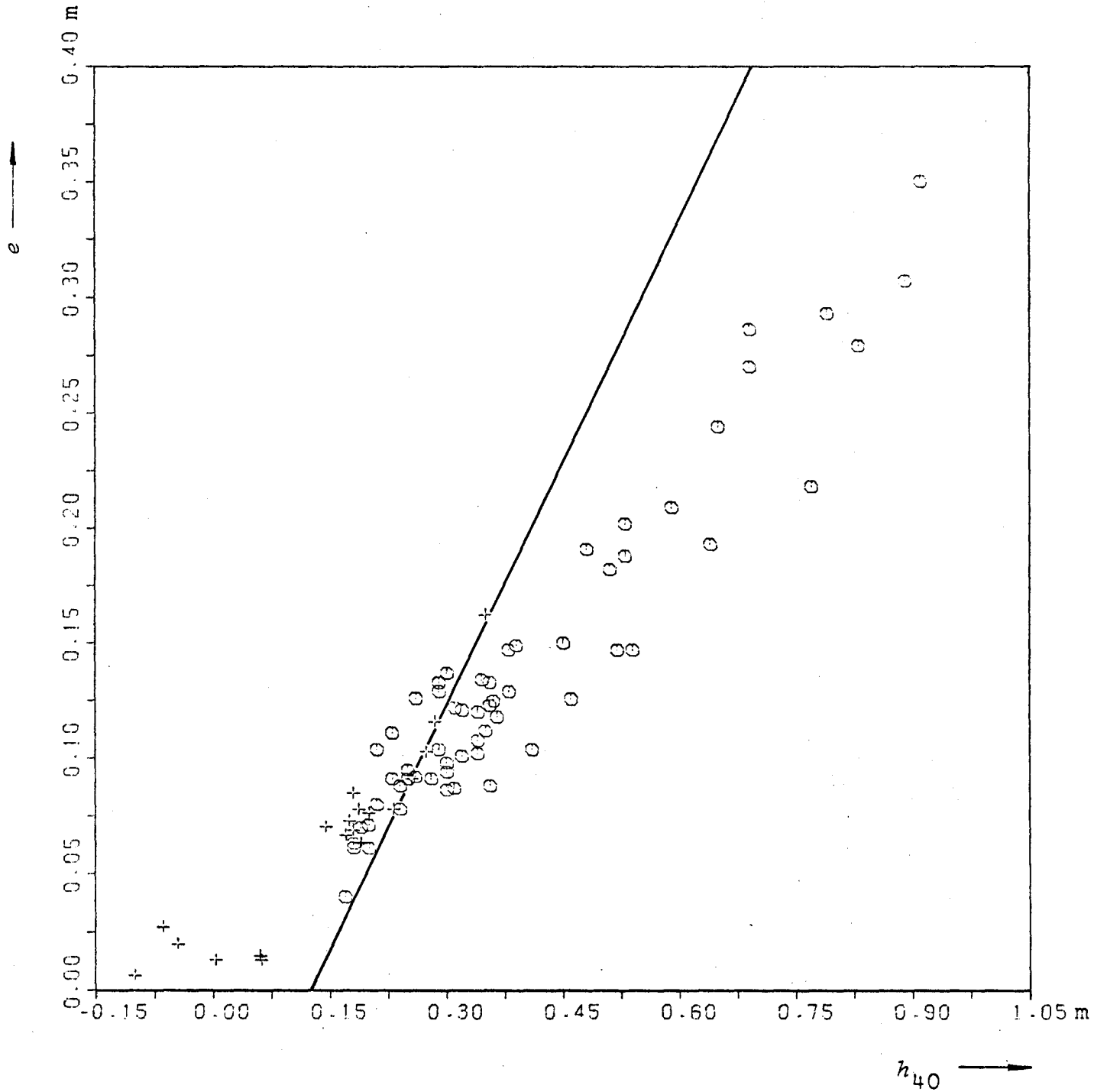


Bild 9b: Graphische Darstellung der Verteilung der Schiffe in den Gruppen 1 (Zeichen +) und 2 (Zeichen o) sowie der nach der Diskriminanzanalyse ermittelten Trenngeraden $(18,75h_{40} - 26,53e - 2,36) = 0$

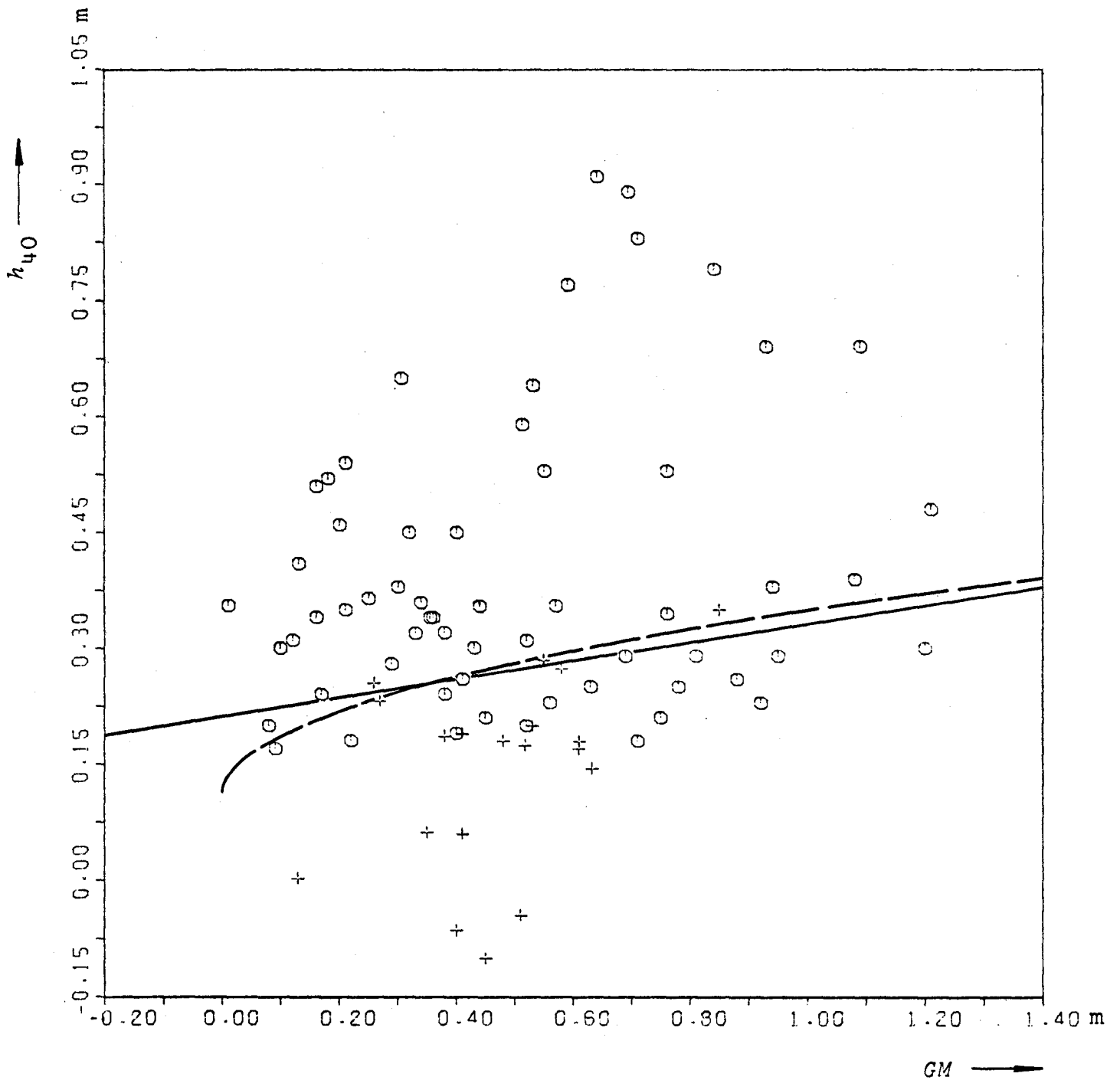


Bild 9c: Graphische Darstellung der Verteilung der Schiffe in den Gruppen 1 (Zeichen +) und 2 (Zeichen o) sowie der nach der linearen Diskriminanzanalyse ermittelten Trenngeraden
 $(-1,26GM+10,48h_{40}-2,22) = 0$ (ausgezogen)
und der nach der nichtlinearen Diskriminanzanalyse ermittelten Trennlinie
 $(-2,55\sqrt{GM}+10,75h_{40}-1,18) = 0$ (gestrichelt)

Bild 10

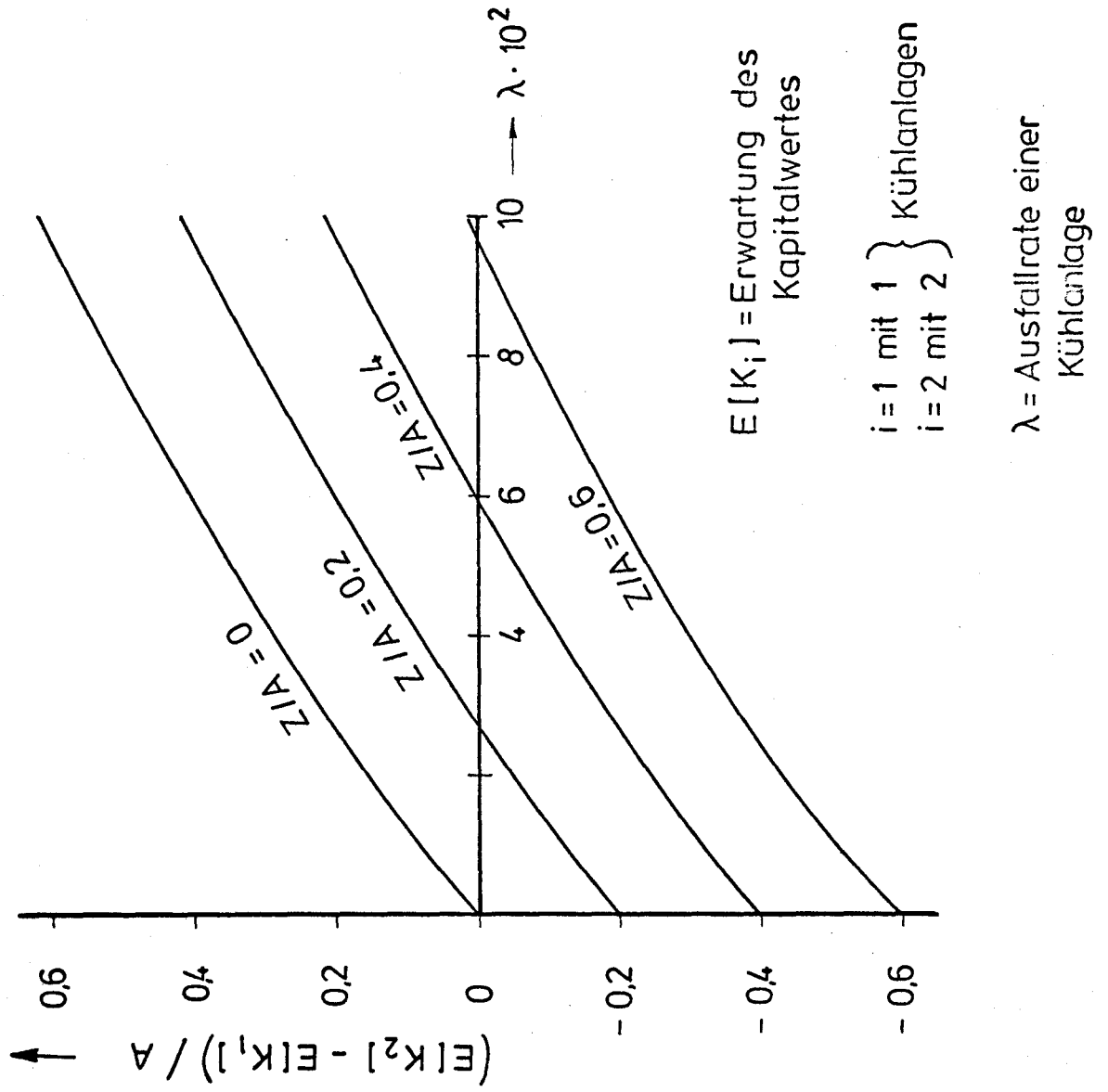


Bild 11

