144 | 1964

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dr.-Ing. O. Krappinger

Freibord und Freibordvorschrift

TUHH
Technische Universität Hamburg-Harburg

Freibord und Freibordvorschrift

Von Dr.-Ing. **O. Krappinger,** Hamburg

1. Einführung

Über Freibord und Freibordvorschrift ist vor unserer Gesellschaft schon mehrfach vorgetragen worden. Auch ausländische Fachgesellschaften haben dieses Thema sehr ausgiebig diskutiert. Wenn man die Veröffentlichungen darüber durchblättert (vgl. das Schrifttumsverzeichnis am Ende der Arbeit), fällt auf, daß sich die Art, wie man sich mit der Freibordfrage befaßt hat, im Laufe der Zeit stark verändert hat. Man kann die Entwicklung in drei große Abschnitte einteilen:

Bis kurz nach der Jahrhundertwende — etwa 30 Jahre lang — waren Freibord und Freibordvorschrift heiße Eisen, an denen sich die Gemüter verschiedenster Leute erhitzten. In den nächsten 30 Jahren — bis zum Zustandekommen der Internationalen Freibordkonvention im Jahre 1930 — ging man viel nüchterner an diese Fragen heran, und die wenigen seither erschienenen Arbeiten erwecken den Eindruck, als ob nur noch akademisches Interesse für die Bestimmung des „richtigen Freibords" bzw. die Frage, ob die Freibordvorschriften „richtige Freiborde" ergeben, übriggeblieben wäre.

Angesichts dieser Entwicklung liegt es nahe, zu fragen, ob es sich heute überhaupt noch lohnt, mehr grundsätzliche Untersuchungen über den Freibord anzustellen. Kann man nicht daraus, daß man nun schon mehr als ein Menschenalter lang das Freibordgesetz in der Praxis ebenso anwendet wie auch physikalische Gesetze, schließen, daß es — wenigstens im Prinzip — richtig ist, daß man zwingenderweise den Freibord als Funktion der Länge bestimmen und Korrekturen für Aufbauten, Seitenhöhe, Völligkeit, Sprung und Bucht usw. anbringen muß?

Meiner Ansicht nach sind solche Fragen und Folgerungen recht oberflächlich und treffen auch nicht den Kern der Sache. Die Freibordvorschrift ist ein administratives Gesetz, kein physikalisches. In der Technik wurden und werden sehr häufig Konstruktionsregeln verwendet, die man nicht als physikalische Gesetze bezeichnen kann. Die rasche Entwicklung der Technik in der Neuzeit ist ohne Zweifel auch darin begründet, daß man sich ständig bemüht hat, diese Konstruktionsregeln aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse zu verbessern. Sicher sind heute innerhalb der Technik auch administrative Regeln notwendig. Auch sie müssen — sollen sie nicht den Fortschritt hemmen und zu Anachronismen werden — ständig verbessert werden, indem man dabei neue wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigt und sie den neuen Gegebenheiten anpaßt.

Wenn man die Freibordmessung aus diesem Blickwinkel betrachtet, fragt man sich, ob es auf diesem Gebiet wirklich jahrzehntelang keinen Fortschritt der Wissenschaft gegeben hat und ob auch die Voraussetzungen, von denen man vor langer Zeit bei der Aufstellung von Freibordvorschriften ausging, heute noch gültig sind. Ich glaube, daß weder das eine noch das andere der Fall ist und daß man heute bessere Freibordvorschriften machen könnte als vor 35 Jahren.

Der Frage, warum man dies bisher nicht getan hat, will ich nicht weiter nachgehen. Ebenso will ich darauf verzichten, einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung des Freibordproblems zu geben und mich damit begnügen, auf die Arbeit von Rosenstiel [*10*] im STG-Jahrbuch 1901 sowie auf die Arbeit von Sanders [*19*] in den TINA 1931 hinzuweisen, die beide ausgezeichnete historische Überblicke (Rosenstiel natürlich nur über die erste Entwicklungsperiode des Freibords) geben. Auch der Abschnitt über Freibord von Neuerburg in [*25*] ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen.

2. Gründe für die Freibordbegrenzung

Als man vor 100 Jahren damit begann, Regeln zur Bemessung des Freibords aufzustellen, steckte die Schiffstheorie noch in ihren Kinderschuhen. Man wußte zwar, daß sich ein großer Freibord günstig auf die Festigkeit der Schiffe, auf die Sicherheit gegen Kentern, auf die

Schwimmfähigkeit im Leckfall sowie im Hinblick auf das Überkommen von Wasser im Seegang Freibord als pauschales Kriterium für die Sicherheit zu verwenden und eine Erhöhung der Sicherheit auf dem Wege über Freibordvorschriften anzustreben.

Inzwischen haben wir jedoch wesentlich eingehendere Kenntnisse über die im Hinblick auf die Sicherheit eine Rolle spielenden Zusammenhänge. Um sie auszunutzen, ist es notwendig, von der Auffassung des Freibords als pauschales Sicherheitsmaß abzugehen und klar zwischen den sich nach den verschiedenen Gesichtspunkten ergebenden Freiborden zu unterscheiden.

Diese Forderung ist nicht immer genügend beachtet worden. Vor allem wurden bis in die jüngste Zeit immer wieder Forderungen laut, bei einer etwaigen Revision der Tafelfreiborde bzw. bei der Aufstellung von Freibordwerten für Fischereifahrzeuge auch die Stabilität zu berücksichtigen. Ich will versuchen zu zeigen, daß eine solche Verquickung verschiedener Gesichtspunkte nicht zweckmäßig wäre.

Aber auch die Auffassung, daß — wenn es nur Vorschriften für die Stabilität gäbe oder wenn es auch für Frachtschiffe Unterteilungsvorschriften gäbe — man auf besondere Freibordvorschriften überhaupt verzichten könnte, halte ich nicht für richtig. Es wäre zwar möglich, daß in vielen Fällen gerade diese Gesichtspunkte für die Bestimmung des Mindestfreibords maßgebend wären. Dies ist aber kein Grund, andere Gesichtspunkte außer acht zu lassen.

Im folgenden will ich die zur Erfüllung verschiedener Sicherheitsforderungen notwendigen Freiborde etwas näher erläutern und dabei auch kurz darauf eingehen, ob bzw. in welcher Form Vorschriften über den Freibord zweckmäßig sind.

Freibord und Sinksicherheit bei Beschädigungen. Damit Schiffe im Leckfall möglichst nicht verlorengehen, müssen u. a. die folgenden beiden Gesichtspunkte beachtet werden:

1. sollen die flutbaren Längen möglichst groß sein und
2. soll nach Überflutung von Abteilungen bzw. Abteilungsgruppen noch ein ausreichender Restfreibord übrigbleiben. Diese Forderungen können um so besser erfüllt werden, je größer der Freibord des intakten Schiffes ist.

Freilich hängt die Sicherheit im Leckfall nicht nur vom Freibord des intakten Schiffes ab; die Schottstellung, der Inhalt der Räume (Flutbarkeit) und auch die Stabilität sind von großem Einfluß auf die Sicherheit. Es wäre deshalb eine unzulässige Vereinfachung, wenn man versuchen würde, Sicherheit im Leckfall dadurch zu erreichen, daß man bestimmte Werte für den Freibord vorschreibt.

Viel geeignetere Kriterien für die Sicherheit sind in diesem Falle die Wahrscheinlichkeit für das Überstehen von Verletzungen sowie die Forderung bestimmter Mindestwerte für Freibord und Stabilität im Endzustand der Überflutung. (Auf die Frage, wie groß der Freibord von lecken Schiffen sein soll, will ich hier nicht näher eingehen.)

Es ist dann die Aufgabe des Konstrukteurs, den Freibord so zu wählen, daß sowohl diese Kriterien als auch andere Forderungen erfüllt werden. Je nach der Art dieser Forderungen können sich dabei verschiedene Freiborde als am zweckmäßigsten erweisen.

Der Zweck einer Freibordvorschrift kann in diesem Fall nur darin bestehen, daß die Einhaltung des *gewählten* Freibords in den Fällen sichergestellt wird, in denen nicht aus anderen Gründen ein größerer Freibord notwendig ist. Eine solche Vorschrift existiert bereits im Kap. II, Regel 10, des Internationalen Übereinkommens zum Schutze menschlichen Lebens auf See (Schottenfreibord).

Freibord und Festigkeit. Im Hinblick auf ausreichende Längs- und Querfestigkeit besteht ebenfalls keine Notwendigkeit, bestimmte Freiborde a priori vorzuschreiben. Für jeden beliebig gewählten Freibord kann man die Verbandsteile so bemessen, daß die Beanspruchungen innerhalb zulässiger Grenzen bleiben. Dem wird durch die Klassifikationsvorschriften für Schiffe, die die Klasse „mit Freibord" erhalten, Rechnung getragen.

Es muß natürlich sichergestellt werden, daß der bei der Konstruktion zugrunde gelegte Freibord auch später beim Betrieb der Schiffe nicht unterschritten wird. D. h. eine Freibordvorschrift kann auch in diesem Falle nur die Einhaltung des Freibords zum Gegenstand haben. Regeln für die Schiffsfestigkeit sind m. E. eigentlich nicht Sache einer Freibordvorschrift.

Freibord und Kentersicherheit. In den geltenden Freibordvorschriften wird die Stabilität ausdrücklich ausgeklammert, indem die Verantwortung dafür, daß die Schiffe ausreichend sicher gegen

Kentern sind, den Kapitänen übertragen wird. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß der Freibord auch vom Standpunkt ausreichender Stabilität keine primär vorzuschreibende Größe ist.

Dies bedeutet natürlich nicht, daß kein Zusammenhang zwischen Freibord und Kentersicherheit besteht. Wenn man die Bedingungen, unter denen man ein Schiff als kentersicher ansehen will, vorgibt, dann kann man als Funktion der Höhe des Gewichtsschwerpunktes über Kiel den Freibord angeben, der nicht unterschritten werden darf, wenn die vorgegebenen Bedingungen erfüllt sein sollen. (Für die praktische Anwendung wäre es vielleicht zweckmäßiger, Mindestmaße für die metazentrische Höhe in Abhängigkeit vom Tiefgang vorzuschreiben. Beide Möglichkeiten sind jedoch gleichwertig.)

In diesem Fall ist es nicht möglich, zur Überwachung des Freibords Freibordmarken zu verwenden, da man — je nach der jeweiligen Lage des Gewichtsschwerpunktes (die von der Ladungsverteilung, den Vorräten und dem Ballast abhängt) — verschiedene Freiborde (bzw. zulässige Tiefgänge) erhält. Man könnte aber trotzdem eine Kontrolle vorschreiben; z. B. indem man fordert, daß vor jeder Ausreise Tiefgang und metazentrische Höhe im Logbuch registriert werden müssen.

Freibord und Überkommen von Wasser im Seegang. In den vorstehend behandelten drei Fällen — Sicherheit bei Beschädigungen, Festigkeit und Stabilität — ist die Rolle, die der Freibord dabei spielt, weitgehend bekannt: Die Zusammenhänge sind ja aus den allen Schiffbauern geläufigen Leckrechnungen, Festigkeitsrechnungen und Stabilitätsrechnungen ohne weiteres zu ersehen.

Im Hinblick auf das Überkommen von Wasser liegen die Verhältnisse jedoch völlig verschieden: Die Gefährdung von Schiff und Besatzung durch Seeschlag wird bis jetzt beim Schiffsentwurf nicht explizit beachtet. Man kann sogar die Meinung hören, die damit zusammenhängenden Fragen nur wenig praktische Bedeutung hätten.

Wir haben aber guten Grund, anzunehmen, daß gerade der Wunsch, das Überkommen von Wasser möglichst so weit einzuschränken, daß Schiff und Besatzung nicht zu sehr gefährdet werden, bei der Festsetzung der z. Zt. geltenden Mindestfreiborde Pate gestanden hat. Ich habe bereits erwähnt, daß der Schottenfreibord aus anderen Überlegungen folgt und daß man auch die Schiffsverbände immer so dimensionieren kann, daß sie auch bei sehr kleinem Freibord nicht überbeansprucht werden. Es gibt auch Schiffe, die bei kleinerem als dem nach Freibordvorschrift sich ergebenden Freibord ausreichend kentersicher wären. Es bleibt also nur übrig, anzunehmen, daß die vorgeschriebenen Mindestfreiborde das Überkommen von Wasser einschränken sollen.

Diese Auffassung wird auch durch zahlreiche Hinweise im Schrifttum über den Freibord gestützt. Als Beispiel für viele andere ähnliche Äußerungen will ich aus dem Vortrag, den Rosenstiel 1901 vor dieser Gesellschaft gehalten hat, zitieren [*10*]: „Und so besteht denn auch die Hauptgefahr für jedes beladene Schiff ... darin, daß überbrechende Seen und vornehmlich schnell aufeinanderfolgende auf Deck kommen, Decköffnungen sowie Luken etc. einschlagen und in den Schiffsraum eindringen, wodurch einerseits das Schiff, andererseits die Mannschaft stark gefährdet werden könnte. Dieser Gefahr begegnet man durch die Schaffung eines genügend großen, gleichmäßig verteilten Reservedeplacement."

Aus der Tatsache, daß einerseits der Zusammenhang zwischen Freibord und Überkommen von Wasser in der Praxis noch nicht explizit berücksichtigt wird, daß andererseits aber die Freibordvorschriften diese Lücke füllen sollen, glaube ich folgern zu können, daß der Schwerpunkt einer Arbeit mit dem Titel „Freibord und Freibordvorschrift" gerade dieses Gebiet berücksichtigen sollte.

Ich will mich deshalb im folgenden auf die Untersuchung der hierbei eine Rolle spielenden Zusammenhänge beschränken. Damit keine Mißverständnisse auftreten, möchte ich aber nochmals betonen, daß man den Freibord aufgrund verschiedener Sicherheitsforderungen bestimmen muß. Dabei wird man im allgemeinen auch verschiedene erforderliche Freibordwerte erhalten. Es muß dann dafür Sorge getragen werden, daß der jeweils größte nicht unterschritten wird.

3. Entwicklung eines Maßes für die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser

Wann ist ein Schiff ausreichend sicher gegen Überkommen von Wasser? Es wäre sicher unbillig zu fordern, daß dazu das Deck auch bei stärkstem Seegang trocken bleiben soll. Das wird auch mit den zur Zeit geltenden Freibordvorschriften nicht angestrebt. Im Gegenteil — man hat ausdrücklich damit gerechnet, daß trotz Anwendung der vorgeschriebenen Mindestfreiborde Wasser überkommt und deshalb in die Freibordvorschrift sogenannte „Bedingungen zur Erteilung des Freibords“ aufgenommen, die in den Fällen, in denen Wasser überkommt, sicherstellen sollen, daß Luken, Maschinenschächte, Ventilatoren usw. ausreichende Festigkeit haben, um der Wirkung der See widerstehen zu können.

Die Frage, ob es unter diesen Umständen überhaupt notwendig ist, durch Mindestwerte für den Freibord das Überkommen von Wasser einzuschränken, ist — wohl aufgrund langjähriger Erfahrung — durch die Praxis bejaht worden. Offenbar macht es doch einen Unterschied, ob schon bei relativ leichtem Seegang Wasser überkommt oder nicht und ob bei schwerem Seegang mehr oder weniger häufig Brecher auf Deck schlagen.

Sicher kann der durch überkommendes Wasser entstehenden Gefährdung des Schiffes heute besser begegnet werden als in früheren Zeiten. So lange aber das Deck von den Seeleuten als Verkehrsweg benutzt werden muß — man also nicht Laufgänge unter Deck oder Laufbrücken wie bei Tankern vorsieht — glaube ich nicht, daß es gerechtfertigt wäre, auf die Einhaltung von Mindestfreiborden zu verzichten.

Bei der hierbei angestrebten Sicherheit handelt es sich nicht um eine Alternative (es kommt Wasser an Deck gleich „unsicher“ gegenüber es kommt kein Wasser an Deck gleich „sicher“). Es soll vielmehr nur ein gewisser Grad an Sicherheit erreicht werden. Bevor man danach fragt, wieviel Sicherheit notwendig ist, muß geklärt werden, wie man diese Sicherheit „messen“ kann. Es hätte sonst keinen Sinn von mehr oder weniger Sicherheit zu sprechen oder zu sagen, daß zwei verschiedene Schiffe gleich sicher im Hinblick auf das Überkommen von Wasser sind.

„Sicherheit“ ist zunächst ein mehr oder weniger subjektiver Begriff, der auch nicht meßbar ist. Wir kommen weiter, wenn es uns gelingt, physikalische und logische (objektive) Kriterien für die Sicherheit zu finden oder besser gesagt, uns auf solche zu einigen.

Um die Wirkung des überkommenden Wassers zu erfassen, könnte man beispielsweise die Menge des überkommenden Wassers feststellen. Mehr oder weniger sichere Fälle wären dabei durch kleinere oder größere überkommende Wassermengen gekennzeichnet. Eine differenziertere Erfassung der Wirkung des überkommenden Wassers wäre möglich, wenn man außer der Menge auch seine Energie feststellen würde. (Die Wassermenge geht zwar bei der Bestimmung der Energie mit ein. Da aber — bei gleicher Energie des überkommenden Wassers — die Wirkung sicher verschieden ist, je nachdem, ob viel Wasser mit kleiner oder weniger Wasser mit größerer Geschwindigkeit überkommt, ist die Angabe von allen beiden Größen nicht überflüssig.) Ein sehr einfaches, wenn auch gröberes Maß für das Überkommen von Wasser wäre die Eintauchung des Schiffes bzw. des Decks relativ zu den Wellen.

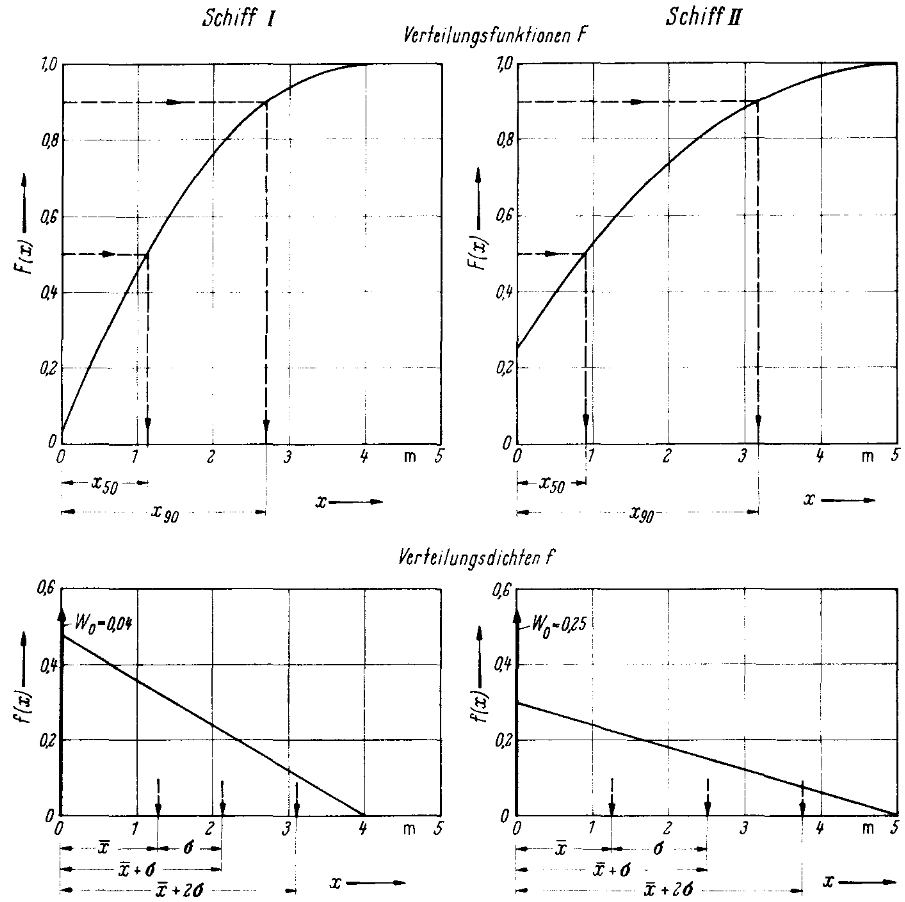
Zur Beurteilung der Sicherheit genügt es hier jedoch nicht, nur die eine Rolle spielenden physikalischen Größen zu ermitteln und zu messen. Es muß auch noch ein anderer Zusammenhang beachtet werden; wenn wir z. B. die Menge des überkommenden Wassers für zwei verschiedene Schiffe jeweils für verschiedene Wellen bestimmen, so werden wir im allgemeinen feststellen, daß in einigen Fällen das eine, in anderen das andere Schiff weniger Wasser übernimmt. Wir erhalten mit Hilfe der physikalischen Kriterien also noch keine eindeutige Reihung der Schiffe im Hinblick auf die Sicherheit. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, scheint folgender Weg geeignet:

In einem bestimmten Seegebiet treten verschiedene Seegänge mit verschiedener Wahrscheinlichkeit auf. Aufgrund einer Seegangsstatistik kann diese Wahrscheinlichkeit abgeschätzt werden. Aus der Wahrscheinlichkeit für verschiedene Seegänge kann man die Wahrscheinlichkeit bestimmter Wirkungen des Seegangs (z. B. Eintauchung des Decks oder überkommende Wassermenge oder Menge und Energie des überkommenden Wassers usw.) berechnen. Als Ergebnis erhalten wir dann für jedes Schiff die Verteilungsfunktion bzw. Verteilungsdichte[1] für die Größe, mit der wir die Wirkung des überkommenden Wassers messen (beispielsweise also die überkommende Wassermenge. Wenn wir die Wirkung des überkommenden Wassers mit zwei Größen — z. B. Energie und Menge — oder mehreren Größen messen, erhalten wir eine zwei- oder mehrdimensionale Verteilungsfunktion bzw. -dichte).

Als Beispiel sind in Abb. 1 solche Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichten für zwei Schiffe, die im gleichen Seegebiet operieren, schematisch dargestellt. Als Abszisse ist die Größe, mit der wir die Wirkung des Seegangs messen, aufgetragen. Wir wollen annehmen, daß der Abszissenwert x in unserem Falle die relative Eintauchung des Decks an seiner bestimmten Stelle der Schiffslänge bedeutet (siehe Abb. 2); (wenn wir ein anderes Kriterium als die Eintau-

[1] In Anhang 1 sind einige Begriffe und Definitionen der Wahrscheinlichkeitsrechnung zusammengestellt. Es werden dort auch die Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte näher erklärt.

chung wählen, gilt das im folgenden Gesagte entsprechend). Die Verteilungsfunktion $F(x)$ ist dann gleich der Wahrscheinlichkeit dafür, daß die relative Eintauchung des Decks kleiner oder gleich x ist. Mit der Verteilungsdichte $f(x)$ kann man die Wahrscheinlichkeit dafür bestimmen,



	Schiff I	Schiff II
$W_0 = F(0)$	0,04	0,25
Median x_{50}	1,11	0,90
Ober. Dezil x_{90}	2,70	3,18
Mittel $\bar{x}$	1,28	1,25
Mittel + Str. $\bar{x} + \sigma$	2,24	2,5
$\bar{x} + 2\sigma$	3,20	3,25

Abb. 1. Schema der Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte der Eintauchung x des Decks von zwei Schiffen

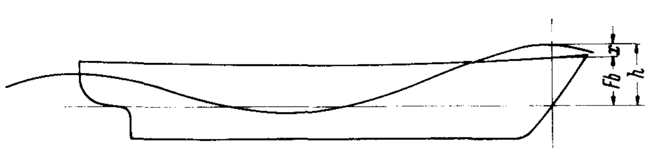


Abb. 2.

daß die Eintauchung zwischen x und $x + dx$ liegt. Sie ist gleich $f(x)\,dx$. Für die Wahrscheinlichkeit, daß Eintauchungen zwischen x_1 und x_2 vorkommen, erhält man

$$W\,(\text{Eintauchung zwischen } x_1 \text{ und } x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)\,dx.$$

Die Verteilungen beschreiben quantitativ was geschieht und wie häufig es geschieht. So kann man z. B. anhand von Abb. 1 feststellen, daß das Schiff I häufiger Wasser an Deck nimmt als das Schiff II (die Wahrscheinlichkeit, daß das Deck eintaucht, ist bei Schiff I 0,96 und bei Schiff II 0,75). Andererseits sind die großen Eintauchungen bei Schiff II wahrscheinlicher, die ganz großen Werte kommen überhaupt nur bei diesem Schiff mit von Null verschiedener Wahrscheinlichkeit vor.

Welches der beiden Schiffe ist nun sicherer im Hinblick auf das Überkommen von Wasser? Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir noch die Aussagen, die mit den Verteilungen gemacht werden, deuten; d. h. wir müssen mit den Verteilungen bestimmte Präferenzenvorstellungen verbinden. Solche Vorstellungen kann man sich nur aufgrund von Erfahrungen bilden. Aus Gründen der Einfachheit ist es dabei zweckmäßig, nur bestimmte Kennwerte der Verteilungen, die für diese charakteristisch sind, zu verwenden. Als solche kommen z. B. in Frage (s. Abb. 1):

Eintauchung des Decks, die mit der Wahrscheinlichkeit 0,5 nicht überschritten wird (Medianwert x_{50})

Eintauchung des Decks, die mit der Wahrscheinlichkeit 0,9 nicht überschritten wird (oberes Dezil x_{90})[1]:

Mittelwert der Eintauchung des Decks (Erwartungswert $\bar{x}$)

Summe aus Mittelwert plus der n-fachen Streuung σ der Eintauchung des Decks $\bar{x} + n \cdot \sigma$

Wahrscheinlichkeit W_0, daß das Deck nicht eintaucht.

Als Sicherheitsmaß könnte man einen oder mehrere der Werte S_1 bis S_5 verwenden, die wie folgt definiert sind (siehe Abb. 3):

$$S_1 = -x_{50};\ S_2 = -x_{90};\ S_3 = -\bar{x};$$
$$S_4 = -(\bar{x} + n \cdot \sigma);\ S_5 = W_0.$$

Das negative Vorzeichen für S_1 bis S_4 wurde gewählt, damit dem Abnehmen der Eintauchung eine Zunahme des Sicherheitsmaßes entspricht. Bei der Wahl des bzw. der geeignetsten Sicherheitsmaße ist anzustreben, daß folgende Forderungen möglichst gut erfüllt werden:

Für zwei Schiffe A und B, die aufgrund der Erfahrung als gleich sicher angesehen werden, sollten die Kennwerte gleich groß sein: $S_A = S_B$.

Wenn Schiff A sicherer und Schiff C unsicherer als Schiff B beurteilt wird, soll $S_A > S_B > S_C$ gelten.

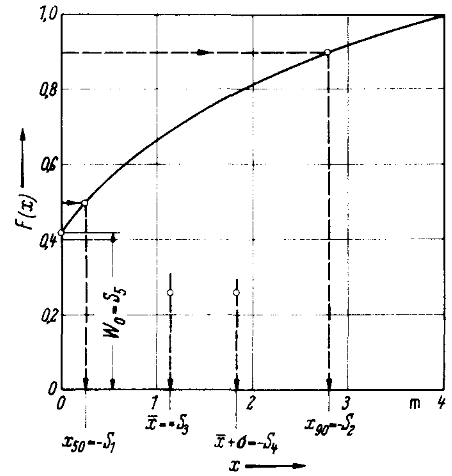


Abb. 3. Definition der Sicherheitsmaße S_1 bis S_5.

Zum Schluß dieses Abschnitts möchte ich noch ein paar Worte zu der hier vorgeschlagenen Methode zur Bewertung der Sicherheit sagen: Zumindest die komplizierteren, wenn nicht alle Arten von Messungen beruhen zu einem guten Teil auf Vereinbarungen. Ich möchte hierzu nur an die verschiedenen Richtlinien für Leistungsmessungen an Motoren erinnern. Man kann z. B. Automotoren im Hinblick auf ihre Leistung nur dann richtig beurteilen, wenn man weiß, ob die Leistung nach DIN oder SAE-Norm bestimmt worden ist. Auch um die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser objektiv beurteilen zu können, bedarf es gewisser Vereinbarungen. Ich habe mich deshalb bewußt darauf beschränkt, zunächst nur einige Möglichkeiten wie z. B. die Eintauchung des Decks oder die überkommende Wassermenge usw. aufzuzeigen (weiter unten werde ich mir allerdings noch einen konkreten Vorschlag erlauben).

Daraus, daß es viele Möglichkeiten gibt, darf man aber nicht schließen, daß es nicht möglich wäre, die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser objektiv zu bewerten. Wenn man sich auf eine Möglichkeit einigt, kommt man vielleicht nicht zu einer vollkommenen und umfassenden Bewertung, sicher aber zu einer objektiven. Um beim Beispiel des Motors zu bleiben: Die nach bestimmten Regeln ermittelte Motorleistung ist sicher ein objektives und auch brauchbares Maß, um seine Eignung zum Antrieb eines Autos zu beurteilen. Sie wird im Alltag nahezu

[1] Statt des Deziles kann auch ein anderes Quantil, z. B. x_{95}, benutzt werden.

ausschließlich verwandt. Für den gleichen Zweck gibt es aber auch noch andere Kriterien, wie z. B. den Verlauf des Drehmomentes über der Drehzahl. Dem Vorteil dieser Angabe — etwas mehr auszusagen — steht der Nachteil gegenüber, daß sie komplizierter ist als die Leistungsangabe.

Auch die Tatsache, daß zur Interpretation der Verteilung der das Überkommen von Wasser kennzeichnenden Größe auf die — notwendigerweise immer mehr oder weniger subjektive — Erfahrung zurückgegriffen wird, kann nicht gegen die Objektivität der hier vorgeschlagenen Methode zur Bewertung der Sicherheit angeführt werden. Daß es notwendig ist, ausdrücklich auf die Erfahrung Bezug zu nehmen, liegt daran, daß uns die Verwendung von Verteilungsfunktionen bzw. -dichte als Kriterium noch ungewohnt ist. Auch mit allen anderen Maßen verbinden wir nur aufgrund unserer Erfahrungen eine gewisse Vorstellung; weil uns da die Erfahrung aber selbstverständlich geworden ist, wird sie nicht besonders erwähnt.

4. Anwendung des Sicherheitsmaßes: Die Bemessung des Freibordes im Hinblick auf das Überkommen von Wasser

Um Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser vorzuschreiben, könnte man wie folgt vorgehen: Es wird — für jeweils bestimmte Schiffe — ein bestimmtes Maß für die Sicherheit, das nach den im vorstehenden Abschnitt beschriebenen Prinzipien aufgebaut ist, vorgegeben. Gleichzeitig müssen auch Angaben über den zugrunde zu legenden Seegang (Seegangsstatistik) gemacht werden (dabei könnte man jahreszeitliche und geographische Zonen berücksichtigen).

Es wäre dann die Aufgabe des Konstrukteurs, den Freibord (bzw. verschiedene Freiborde, wenn man verschiedenen Seegang für verschiedene Zonen vorgibt) so festzulegen, daß das geforderte Maß eingehalten wird. Dabei würde automatisch berücksichtigt werden, daß das Überkommen von Wasser nicht nur vom Freibord, sondern auch von vielen anderen Eigenschaften des Schiffes (Abmessungsverhältnisse, Spantcharakter, Verdrängungsverteilung usw.) abhängt.

Dieses Vorgehen wäre im Prinzip gleich wie im Falle der Sicherheit gegen Kentern, gegen Sinken im Leckfall sowie der Festigkeit. In allen Fällen wird der Freibord nicht explizit vorgeschrieben; er ergibt sich daraus, daß gewisse Kriterien, die als Maß für die jeweilige Sicherheit gewählt worden sind, erfüllt werden müssen. In diesem Zusammenhang möchte ich auch nochmals auf die im Abschn. 3 vorgeschlagenen Möglichkeiten, die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser zu messen, zurückkommen. Als Maß für die Kentersicherheit wird weitgehend die Kurve der für glattes Wasser berechneten Hebel des aufrichtenden Momentes verwendet. Es werden aber auch noch andere Kriterien herangezogen, um die Kentersicherheit zu beurteilen (z. B. Momentenbilanz, Energiebilanzen). Es gibt also mehrere Möglichkeiten, die Kentersicherheit zu messen — ähnliches war in Abschn. 3 auch in bezug auf die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser festgestellt worden. Weiter kann man feststellen, daß man zur Beurteilung der Kentersicherheit vielfach mit die physikalischen Zusammenhänge nur sehr unvollkommen berücksichtigenden Kriterien wie z. B. der Glattwasserhebelarmkurve auskommt. Wir können deshalb erwarten, daß uns im Hinblick auf das Überkommen von Wasser auch schon einfache und relativ grobe Kriterien gute Dienste leisten können.

Die hier aufgezeigten Parallelismen zwischen Kentersicherheit und Überkommen von Wasser gelten in ähnlicher Weise, wenn man von der Sinksicherheit oder Festigkeit ausgeht. Es bestehen aber auch Unterschiede; ich habe sie bereits am Ende des Abschn. 2 erwähnt: Die Kenntnisse, die zur Berechnung der relativen Eintauchung des Schiffes oder der überkommenden Wassermenge und dgl. erforderlich sind, sind mangels genügender Beschäftigung mit der Schiffstheorie noch nicht so weit verbreitet, als daß man derartige Rechnungen fordern könnte, so, wie z. B. Leckrechnung, Stabilitätsrechnung oder Längsfestigkeitsrechnung gefordert werden. Dies ist ein Grund, der es gerechtfertigt erscheinen läßt, den Freibord statt Kriterien für das Überkommen von Wasser vorzuschreiben, obwohl es a priori nicht auf den Freibord, sondern auf die Sicherheit gegen das Überkommen von Wasser ankommt.

Ein weiterer Grund ist, daß in diesem Zusammenhang der Freibord gegenüber anderen Einflüssen auf die Sicherheit dominiert. Nicht zuletzt ist hierzu auch anzuführen, daß sich die Freibordvorschriften während langer Zeit im großen und ganzen doch bewährt haben. Es scheint mir deshalb richtig, das bisherige Konzept im Großen beizubehalten, Einzelheiten jedoch — entsprechend dem Stand unserer Erkenntnisse — zu verbessern. Dabei wären folgende Schritte notwendig:

Zunächst müßte man ein Maß für die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser festlegen. Wie ein solches definiert werden könnte, habe ich in Abschn. 3 angedeutet. Sodann wäre zu entscheiden, nach welchen Gesichtspunkten die Sicherheit bemessen werden soll: Sollen alle Schiffe gleich sicher sein, oder soll man die Sicherheit z. B. von der Schiffsgröße abhängig machen, derart, daß bei großen Schiffen mehr Sicherheit gefordert wird als bei kleinen? (Es sei erwähnt, daß die Sicherheit im Leckfall von der Schiffsgröße und der Art des Schiffes — ob Fracht- oder Fahrgastschiff — abhängig gemacht wird). Ich glaube, daß es am zweckmäßigsten wäre, sich auch hierbei nach den herrschenden Gepflogenheiten zu richten. Man kann qualitativ sagen, daß die kleinen Schiffe häufiger Wasser übernehmen als die großen, d. h. daß sie weniger sicher sind im Hinblick auf das Überkommen von Wasser. Die Sicherheit ist also längenabhängig. Mit dem definierten Maß für die Sicherheit könnte man feststellen, welche Sicherheit heute den verschiedenen Schiffslängen im allgemeinen zugeordnet wird.

Wenn nun bekannt ist, welches Maß an Sicherheit Schiffe bestimmter Länge haben sollen, kann man feststellen, welcher Freibord notwendig ist, um dieses vorgegebene Maß an Sicherheit zu erreichen. Die in Abschn. 3 vorgeschlagenen Sicherheitsmaße S sind bei gegebenen Seegangsverhältnissen Funktionen des Freibords, der Schiffsabmessungen, der Schiffsform, der Abmessungsverhältnisse der Schiffe usw. Wenn man die letztgenannten Größen als konstant annimmt — also von Standardschiffen mit konstanten δ, L/B, B/T usw. und gleicher Form ausgeht — kann der für verschiedene Schiffslängen notwendige Freibord eindeutig aus dem von der Schiffslänge abhängigen Sicherheitsmaß bestimmt werden. Falls es zweckmäßig erscheint, können Abweichungen vom Standardschiff durch Korrekturen berücksichtigt werden. Wir hätten damit ein Verfahren zur Freibordbestimmung, das formal dem heute üblichen entsprechen würde.

5. Beispiel für ein Maß für die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser

Die in den beiden vorstehenden Abschnitten aufgezeigte Methode, die durch den Freibord erzielte Sicherheit zu messen bzw. zu bemessen, will ich nun anhand eines einfachen Beispiels noch näher erläutern. Dabei will ich mich auf die Betrachtung des Freibords an einer einzigen Stelle des Schiffes beschränken. Dies hat zur Folge, daß über den Verlauf des Freibords über die Schiffslänge und deshalb auch über den Einfluß von Sprung sowie von verschieden langen Aufbauten noch nichts ausgesagt werden kann. Am gefährdetsten im Hinblick auf das Überkommen von Wasser ist der Bug eines Schiffes, das gegen die See fährt. Es ist daher naheliegend, bei unserem Beispiel vom Freibord (es wird darunter der Abstand des Wetterdecks von der Wasserlinie in glattem Wasser verstanden) am vorderen Lot auszugehen. Wenn im folgenden von Freibord die Rede ist, wird damit immer der Freibord am vorderen Lot gemeint.

Als Kriterium für die Gefährdung durch überkommendes Wasser will ich die Eintauchung des Decks wählen. Um Schwierigkeiten bei der Berechnung der Eintauchung aus dem Wege zu gehen, wird folgende vereinfachende Annahme gemacht: Es wird von einem „hohen Schiff" ausgegangen, d. h. wir betrachten ein Schiff mit beliebig großer Seitenhöhe. Über dem Deck am vorderen Lot können wir uns einen Maßstab angebracht denken, an dem die Eintauchung des Decks gemessen wird (Abb. 4).

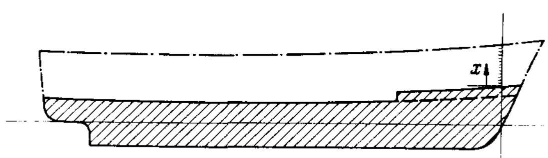


Abb. 4.

Die Bewegungen eines solchen „hohen Schiffes" im Seegang sind natürlich etwas verschieden von denen, die wirkliche Schiffe mit begrenztem Freibord machen würden. Die Unterschiede werden jedoch — insbesondere wenn der Freibord der wirklichen Schiffe nicht zu klein ist — nicht allzu groß sein. Die Nachteile dieses vereinfachten „Modells" scheinen mir daher — besonders im Hinblick auf den ihnen gegenüberstehenden Vorteil großer Einfachheit — tragbar zu sein.

Die Eintauchung x des Decks an einer bestimmten Stelle ist gleich der Eintauchung h des Schiffes abzüglich des Freibordes Fb an dieser Stelle (s. Abb. 2):

$$x = h - \mathrm{Fb}.$$

Wir betrachten zunächst die Eintauchung des Schiffes[1]. Sie hängt ebenso wie die Schiffsbewegungen vom Seegang ab. Wenn wir wirklichkeitsnahe Ergebnisse haben wollen, dann müssen wir bei der Bestimmung der Eintauchung von natürlichem — unregelmäßigem — Seegang ausgehen.

Die den Seegang bestimmenden Verhältnisse (Wind, Windbahn, Dauer des Windes usw.) ändern sich mit der Zeit und dem Ort. Als Folge davon ändert sich auch der Seegang. Es ist heute noch nicht möglich, diese Veränderung exakt zu berücksichtigen. Sie geht aber so langsam vor sich, daß man den Seegang über einen nicht zu großen Zeitabschnitt bzw. in einem nicht zu großen Gebiet als stationär ansehen kann. Wir dürfen deshalb mit guter Näherung den wirklichen Seegang, den das Schiff antrifft und der sich kontinuierlich ändert, durch Abschnitte von verschiedenen fiktiven stationären Seegängen ersetzen.

Was können wir nun über die Eintauchung eines Schiffes, das in einem solchen stationären unregelmäßigen Seegang fährt, aussagen? Wir wissen, daß wir, wenn wir die Eintauchung h messen und über der Zeit t auftragen, eine Funktion h (t) erhalten, die scheinbar völlig regellos ist. Diese Eigenschaft hat sie mit der Seegangsfunktion[2] oder auch dem Verlauf der Schiffsbewegungen über der Zeit gemeinsam. Ebenso wie für die Seegangsfunktion bzw. die die Schiffsbewegungen darstellenden Funktionen kann man auch für die Funktion h (t) gewisse statistische Gesetzmäßigkeiten angeben und Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Funktionswerte machen: So sind z. B. die zu verschiedenen Zeiten gemessenen Funktionswerte h (t) normal verteilt (s. a. Abb. 5). Die entsprechend Abb. 5 definierten Amplituden sind unter bestimmten Voraussetzun-

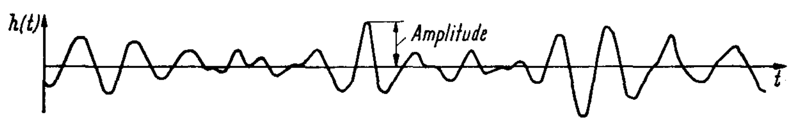


Abb. 5. Verlauf der Eintauchung h eines im unregelmäßigen Seegang fahrenden Schiffes über der Zeit t.

gen nach Rayleigh verteilt. Man kann auch die Verteilung der jeweils größten Amplituden aus einer bestimmten Anzahl von Amplituden angeben usw (siehe z. B. [*31, 32, 33, 34*]).

Für den hier verfolgten Zweck wollen wir zur Beschreibung der Eintauchung davon Gebrauch machen, daß die Werte der Funktion h (t) normalverteilt sind. Eine Normalverteilung wird durch Mittelwert und Streuung vollständig gekennzeichnet. In unserem Fall wird der Mittelwert gleich Null, wenn wir die Eintauchung von der Wasserlinie in glattem Wasser aus messen. Die Streuung $\sigma = \sqrt{m_0}$ hängt bei einem bestimmten Schiff nur von dem Seegang ab (Näheres über ihre Bestimmung wird in Anhang 2 gesagt).

Abb. 6a zeigt ein Beispiel für die Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion der Eintauchung eines Schiffes, das in unregelmäßigem Seegang fährt. Wir wollen sie noch etwas modifizieren: Da wir die Eintauchung als Maß für die Gefährdung des Schiffes verwenden, kommt es auf die negativen Werte von h, die ja einer Austauchung entsprechen, nicht an. Wenn wir nur die Eintauchung im eigentlichen Sinn des Wortes, d. h. nur die positiven Werte von h betrachten, erhalten wir als Verteilungsdichte der Eintauchung des Schiffes

$$f(h) = \sqrt{\frac{2}{\pi m_0}}\, e^{-\frac{h^2}{2 m_0}} \quad \text{für } h \geqq 0$$
$$f(h) = 0 \qquad \text{für } h < 0$$

und als Verteilungsfunktion

$$F(h) = \sqrt{\frac{2}{\pi m_0}} \int_0^h e^{-\frac{h^2}{2 m_0}}\, dh \quad \text{für } h \geqq 0$$
$$F(h) = 0 \qquad \text{für } h < 0.$$

Diese Funktionen sind in Abb. 6b dargestellt. Sie gelten für einen ganz bestimmten Seegang, nämlich den, der bei der Bestimmung von $\sigma = \sqrt{m_0}$ zugrunde gelegt worden ist. In Wirklichkeit verändert sich der Seegang aber — die Abschnitte verschiedenen, über die Länge der Abschnitte jeweils als stationär angenommenen Seegangs treten verschieden häufig auf. In Anhang 3 wird gezeigt, wie man aus einer Seegangsstatistik die Verteilung g (σ) der Werte $\sigma = \sqrt{m_0}$ bestimmen

[1] Über die Bestimmung der Eintauchung s. Anhang 2.

[2] Die Seegangsfunktion erhält man, wenn man die vertikale Bewegung der Wasseroberfläche mißt und über der Zeit aufträgt. Siehe hierzu auch z. B. [*34, 35*].

Die Wahrscheinlichkeit, daß in einem Seegang, der einen bestimmten Wert für $\sigma = \sqrt{m_0}$ ergibt, die Eintauchung einen Wert zwischen h und $h + dh$ annimmt, ist $f(h, \sigma)\, dh$.

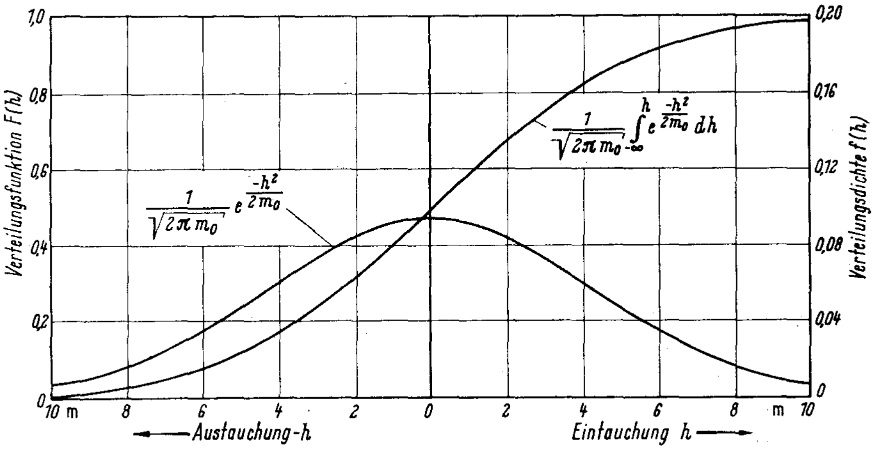


Abb. 6a. Verteilungsdichte und -funktion der Eintauchung h eines Schiffes in unregelmäßigem Seegang. Es handelt sich dabei um eine Normalverteilung. Sie wurde bestimmt für Seegang mit Neumann-Spektrum entsprechend Windstärke 7 Bft und für ein 120 m langes Schiff mit $L/B = 7$, $B/T = 17{,}5$, $\delta = 0{,}7$, $i/L = 0{,}24$, U-Spanten, $F = 0{,}2$, Begegnungswinkel $\chi = 170°$ (d. h. der Seegang kommt fast von vorn).

Die Wahrscheinlichkeit, daß Seegang herrscht, für den $\sqrt{m_0}$ zwischen den Werten σ und $\sigma + d\sigma$ liegt, ist $g(\sigma)\, d\sigma$.

Die Wahrscheinlichkeit, daß beide vorgenannten Ereignisse eintreten, ergibt sich nach einem bekannten Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu

$$w^*(h, \sigma)\, dh\, d\sigma = f(h, \sigma) \cdot g(\sigma)\, dh\, d\sigma.$$

Aus der zweidimensionalen Verteilungsdichte $w^*(h, \sigma)$ findet man die Verteilungsdichte der Eintauchung h, die nun nicht mehr für relativ kurze Zeitabschnitte und begrenzte Gebiete, son-

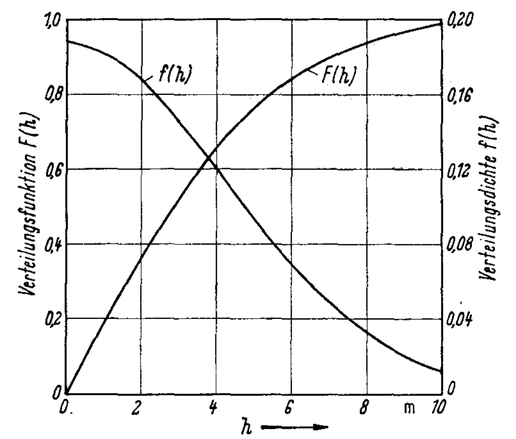


Abb. 6b. Verteilungsdichte und -funktion der Eintauchung, wenn negative Werte von h (d. h. Austauchungen) nicht berücksichtigt werden.

dern für die bei der Ermittlung von $g(\sigma)$ zugrunde gelegten Zeit- und Seeräume gilt, indem man die Randverteilung von h bestimmt:

$$f^*(h) = \int_{-\infty}^{+\infty} w^*(h, \sigma)\, d\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} f(h, \sigma)\, g(\sigma)\, d\sigma$$

[1] Es wird dort auch Näheres über die hier benutzte Funktion $g(\sigma)$ gesagt.

(Vgl. dazu auch Abb. 7.) Die entsprechende Verteilungsfunktion ist

$$F^*(h) = \int_0^h f^*(h)\,dh = \int_0^h \int_{-\infty}^{+\infty} f(h,\sigma)\, g(\sigma)\, d\sigma\, dh.$$

Aus der Verteilung der Eintauchung des S c h i f f e s können wir nun leicht die Verteilung der Eintauchung des D e c k s an der betrachteten Stelle herleiten. Es handelt sich dabei um eine ge-

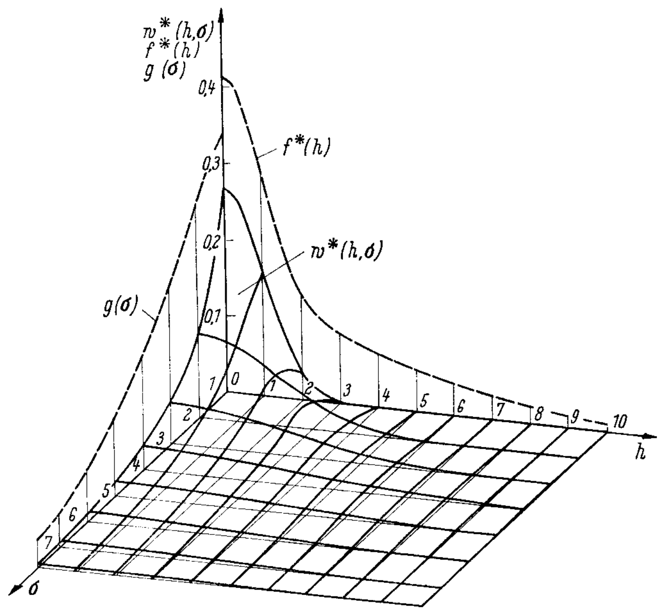


Abb. 7. Verteilungsdichte $w^*(h, \sigma)$ und Dichte der Randverteilungen $f^*(h)$ und $g(\sigma)$. (Die Abb. gilt für $g(\sigma)$ nach Abb. 19 (Anhang 3) und für das Abb. 6a bzw. 6b zugrunde liegende Schiff).

mischte Verteilung, die aus einer diskreten Wahrscheinlichkeit und aus einer Verteilung vom stetigen Typ besteht. Die diskrete Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Deck nicht eintaucht[1], d. h.

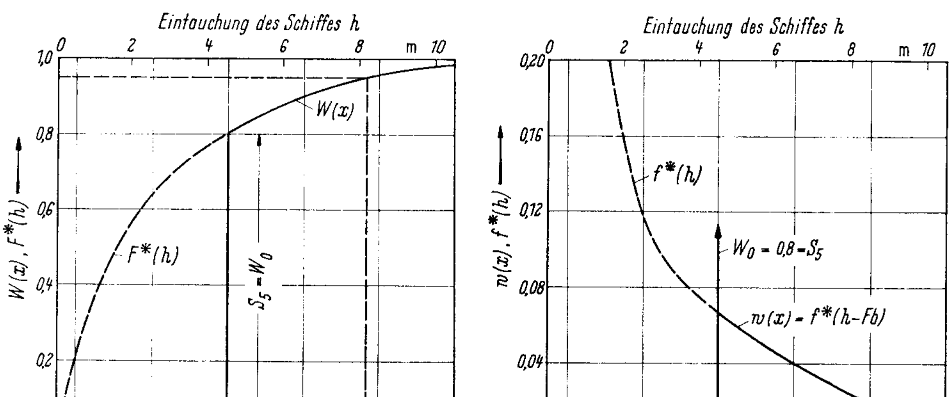


Abb. 8. Wahrscheinlichkeit W_0, daß das Deck nicht eintaucht, (d. h. daß $x \leqq 0$), Verteilungsdichte $w(x)$ und -funktion $W(x)$ für die Deckseintauchung x. (Der Abb. liegt das gleiche Schiff wie den Abb. 6 und 7 zugrunde).

[1] Man darf hier nicht die Fälle, in denen das Deck nicht eintaucht, unberücksichtigt lassen, so wie wir die Austauchung des Schiffes außer acht gelassen haben. Die Wahrscheinlichkeit, daß das Schiff austaucht (d. h. daß h negativ wird) ist für alle Schiffe und Seegänge gleich 0,5. W_0 bzw. $(1 - W_0)$ — das ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Deck eintaucht — kann für verschiedene Schiffe verschieden sein, es kennzeichnet die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser.

daß die Deckseintauchung $\leqq 0$ ist, ist

$$W_0 = F^*(\mathrm{Fb}) = \int_0^{Fb} f^*(h)\,dh$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte für die Eintauchung x des Decks ist

$$\begin{aligned} w(x) &= f^*(x + \mathrm{Fb}) \quad \text{für } x \geqq 0 \\ w(x) &= 0 \qquad\qquad\quad \text{für } x < 0. \end{aligned}$$

Die Verteilungsfunktion von x ist

$$W(x) = W_0 + \int_0^x w(x)\,dx = \int_0^{Fb} f^*(h)\,dh + \int_{Fb}^x f^*(x + \mathrm{Fb})\,dh.$$

Abb. 8 zeigt W_0, $w(x)$ und $W(x)$ für das in Abb. 7 gezeigte Beispiel sowie für einen Freibord von 4,5 m.

Im folgenden wollen wir als Sicherheitsmaß die Wahrscheinlichkeit W_0 sowie die Eintauchung x_{95}, die mit 95% Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird, benutzen. Entsprechend dem in Abschn. 3 Gesagten schreiben wir für die Sicherheitsmaße

$$\begin{aligned} S_2 &= -x_{95} \text{ und} \\ S_5 &= W_0 \end{aligned}$$

S_2 und S_5 sind in Abb. 8 eingetragen.

6. Sind die Freibordvorschriften „richtig"?

Es wäre sicher voreilig, wenn man schon aufgrund vorstehender Ausführungen, in denen einige Möglichkeiten zur Freibordbemessung aufgezeigt worden sind, versuchen würde, neue Freibordvorschriften zu formulieren. Dazu müßten noch weitere Untersuchungen, in deren Rahmen die geeignetste unter den hier nur angedeuteten Möglichkeiten festzustellen wäre, angestellt werden.

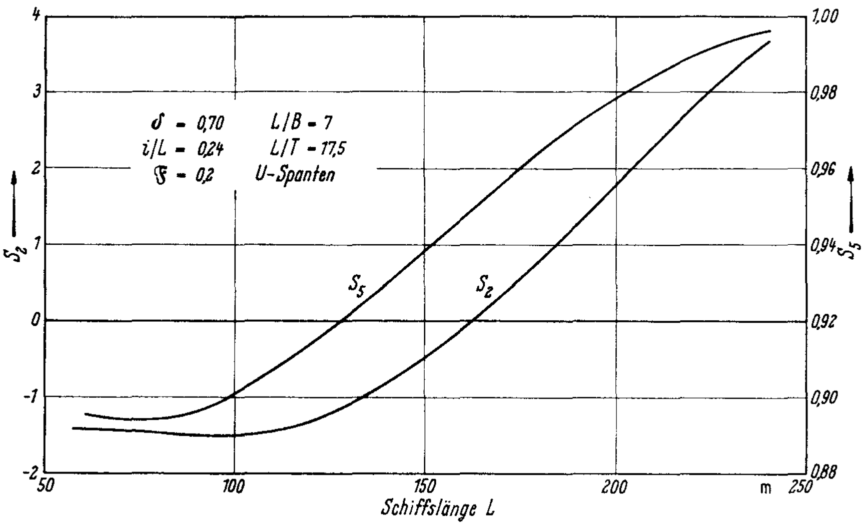


Abb. 9. Sicherheitsmaße S_2 und S_5 über der Schiffslänge L für Schiffe mit nach Vorschrift bestimmtem Freibord (s. a. Abb. 10).

Ich glaube aber, daß man bereits mit den vorliegenden Ergebnissen einige interessante Aussagen über die zur Zeit geltenden Freibordvorschriften machen kann. Selbstverständlich gelten diese Aussagen nur für den zunächst ausschließlich betrachteten Freibord am vorderen Lot. Sie sind deshalb mit einigen Vorbehalten zu versehen. Es scheint mir jedoch sehr wahrscheinlich zu sein, daß zukünftige Untersuchungen eher zu einer Ergänzung und Verbesserung als zu einer grundsätzlichen Änderung der hier gemachten Feststellungen führen werden.

Der nach den geltenden Vorschriften sich für das vordere Lot ergebende Freibord setzt sich zusammen aus dem Freibord am Hauptspant Fb_1 (d. i. der nach Vorschrift bestimmte Freibord[1]), dem Sprung am vorderen Lot s_v und der Höhe der Back h_B:

$$\mathrm{Fb} = \mathrm{Fb}_1 + s_v + h_B.$$

Zunächst berechnen wir für geometrisch ähnliche Schiffe verschiedener Länge den Freibord am vorderen Lot und — nach den Angaben im vorstehenden Abschn. 5 — unter Zugrundelegung dieser Freiborde die Sicherheitsmaße S_2 und S_5. Die Ergebnisse dieser Rechnung zeigt Abb. 9, in die auch Angaben über Völligkeit, Abmessungsverhältnisse usw. der zugrunde gelegten Schiffe (wir wollen sie als Basisschiffe bezeichnen) eingetragen sind. Abb. 9 kann man entnehmen, daß

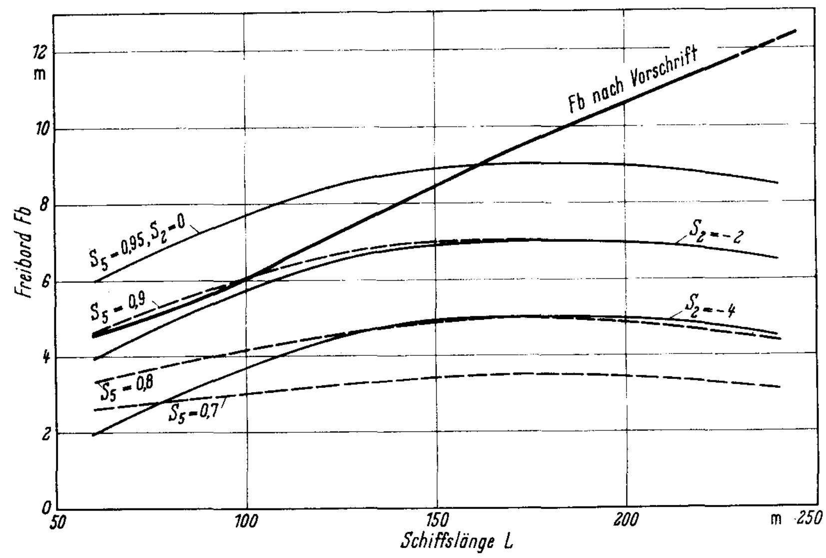


Abb. 10. Freibord nach Vorschrift und Freiborde für S_2 = const und S_5 = const.

— beginnend mit der kleinsten hier untersuchten Schiffslänge von 60 m — die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser zunächst abfällt und erst bei größeren Schiffslängen wieder zunimmt. Interessant ist dabei, daß die beiden Sicherheitsmaße — die Wahrscheinlichkeit, daß das Deck eintaucht einerseits und diejenige Eintauchung, die mit der Wahrscheinlichkeit 0,95 nicht überschritten wird andererseits — zu einer fast gleichen Beurteilung der Sicherheit führen.

Aus der Tatsache, daß die Sicherheit im Hinblick auf das Überkommen von Wasser zunächst abfällt und dann mit steigender Länge anwächst, kann man nicht ohne weiteres schließen, daß die Freibordvorschriften keine „richtige" Zuordnung von Freibord und Länge ergeben: Grundsätzlich sollte die Sicherheit möglichst groß sein. Es kommt dabei aber nicht nur auf die technischen Möglichkeiten an — man muß auch berücksichtigen, was wirtschaftlich möglich ist.

Weil für große Schiffe relativ weniger Aufwand für die Sicherheit notwendig ist, kann man sie — ohne ihre Wirtschaftlichkeit zu sehr zu beeinträchtigen — sicherer machen als kleine. Der sich bei Anwendung der Vorschrift ergebende Anstieg der Sicherheit mit der Schiffslänge bei großen Schiffen ist daher — zumindest tendenzmäßig — richtig. Dagegen liegt es nahe zu vermuten, daß die geltenden Freibordvorschriften für Schiffe mit einer Länge von etwa 70 bis 100 m keinen ganz befriedigenden Kompromiß zwischen Sicherheit einerseits und Wirtschaftlichkeit andererseits darstellen.

In Abb. 10 ist der sich nach Vorschrift für die gewählten Basisschiffe ergebende Freibord am vorderen Lot über der Schiffslänge aufgetragen. Ihm sind diejenigen Freiborde gegenübergestellt, die notwendig sind, damit bestimmte Werte für das Sicherheitsmaß S_2 bzw. S_5 erreicht werden. Es mag vielleicht überraschend sein, daß für 150 und 200 m lange Schiffe gleiche Sicherheit mit gleich großem Freibord erzielt werden kann und daß bei noch größeren Schiffen der Freibord

[1] Bei der Berechnung von Fb_1 wird hier eine kurze Back von solcher Länge angenommen, daß sich keine Freibordkorrektur ergibt.

sogar etwas vermindert werden kann, ohne daß die Sicherheit verschlechtert wird. Dies läßt sich aber leicht erklären: Seegang, der sehr große Schiffe zu großen Tauch- und Stampfbewegungen erregt, ist sehr selten; das Deck wird bei diesen Schiffen also meist nur eintauchen, wenn sehr hohe Wellen am Schiff vorbeilaufen. So hohe Wellen sind aber ebenfalls recht selten.

Als nächstes wollen wir untersuchen, wie sich unsere Sicherheitsmaße verändern, wenn wir bei Schiffen konstanter Länge (wir wählen für unser Beispiel eine Schiffslänge von 120 m) den Freibord sowie die Völligkeit δ, die Verhältnisse Länge zur Breite L/B und Länge zum Tiefgang L/T

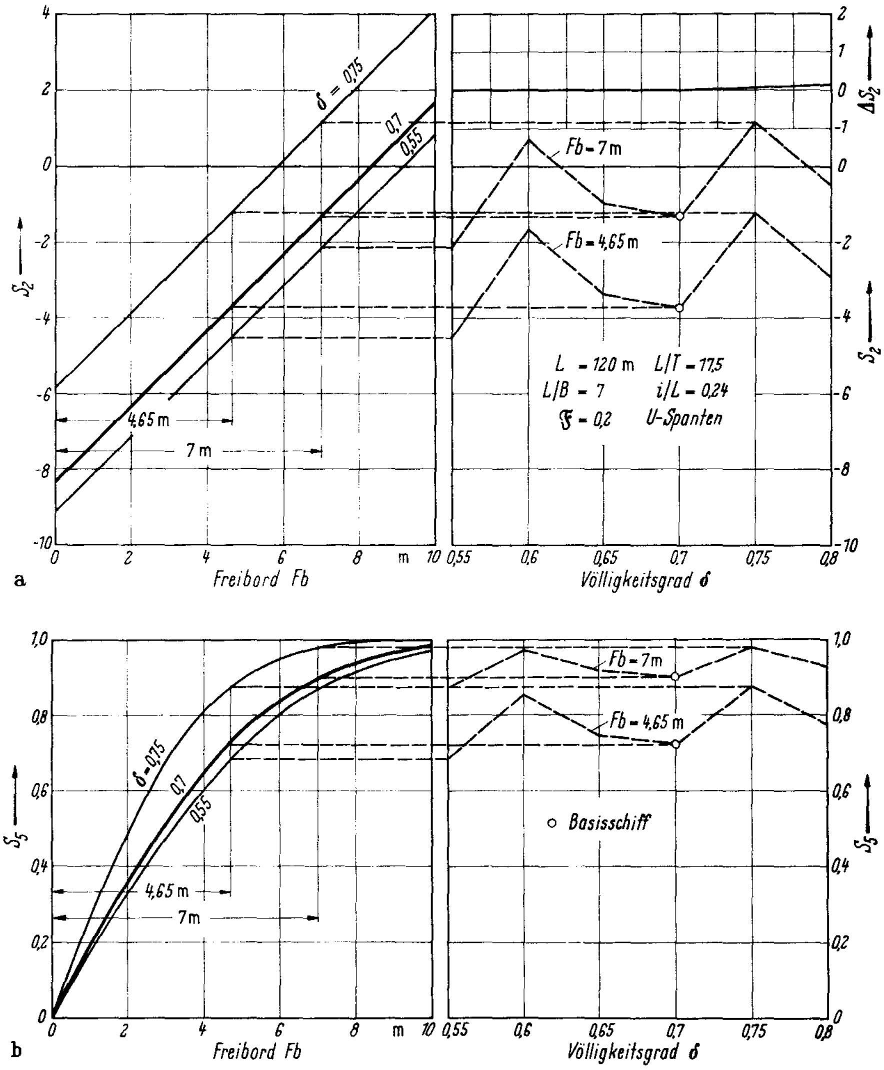


Abb. 11a. Abhängigkeit von S_2 von Freibord und Völligkeitsgrad δ.
Abb. 11b. Abhängigkeit von S_5 von Freibord und Völligkeitsgrad δ.

(bei konstantem Freibord entspricht einem bestimmten L/T auch ein bestimmtes Verhältnis Länge zur Seitenhöhe L/H), die Schiffsform und schließlich noch das Längenträgheitsmoment (bzw. den Trägheitsradius i) variieren. Wenn wir festgestellt haben, wie sich unsere Sicherheitsmaße mit dem Freibord einerseits und mit den anderen genannten Kenngrößen der Schiffe andererseits ändern, können wir leicht die Zuschläge bzw. Abzüge vom Freibord des Basisschiffes ermitteln, die notwendig sind, damit wir für vom Basisschiff abweichende Schiffe die gleichen Werte S_2 bzw. S_5 wie für das Basisschiff erhalten. Ferner können wir auch feststellen, wie sich die Freibordkorrekturen nach Vorschrift (ich will hier nur die δ-Korrektur und die L/H-Korrektur betrachten) auf die Sicherheit auswirken.

In Abb. 11a bis Abb. 15a ist in der jeweils linken Hälfte S_2 als Funktion des Freibords und in der rechten Hälfte als Funktion von δ, L/T, L/B, der Schiffsform und vom Trägheitsradius i dargestellt. Die hier zugrunde gelegten Basisschiffe sind in den Abbildungen gekennzeichnet. In den Abb. 11b bis 15b wird die Abhängigkeit von S_5 von den genannten Größen gezeigt.

Wenn man Schiffe gleicher Länge vergleicht, erhält man zumindest tendenzmäßig die gleichen Ergebnisse, wenn man bei der Berechnung der Sicherheitsmaße nicht verschiedene, verschieden häufig auftretende Seegänge, sondern einen mittleren Seegang zugrunde legt. Wegen der damit

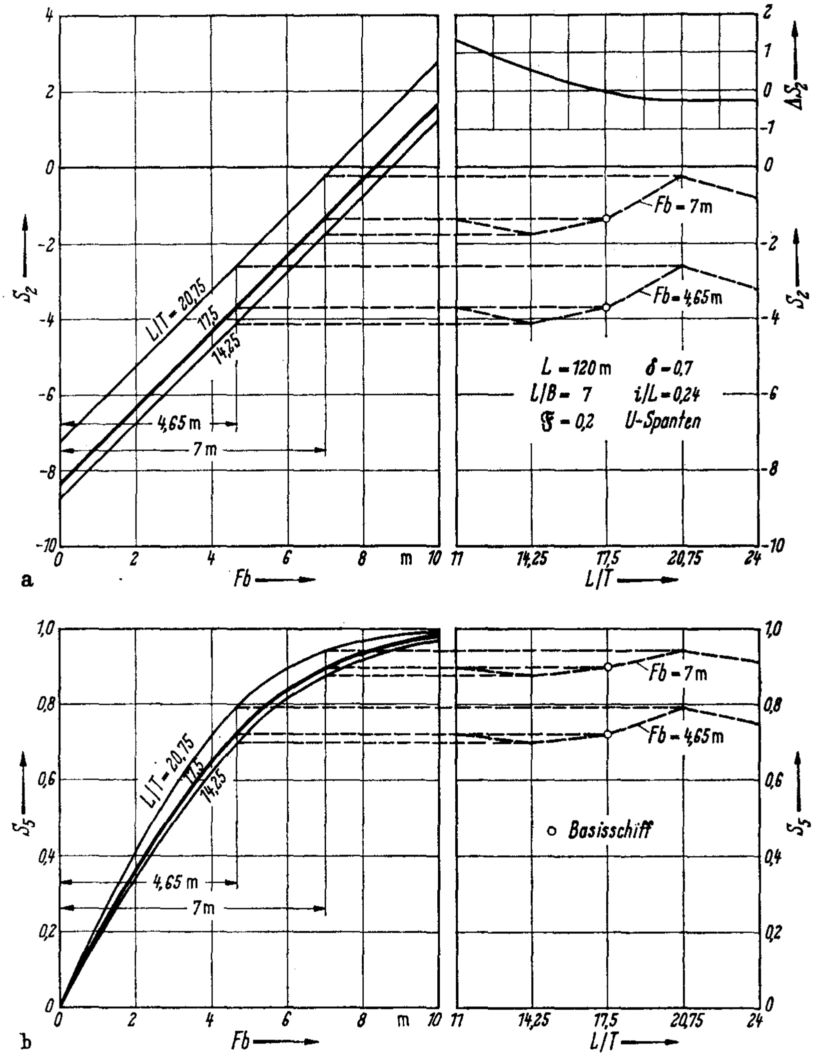


Abb. 12a. Abhängigkeit von S_2 vom Freibord und dem Verhältnis Länge zum Tiefgang L/T.
Abb. 12b. Abhängigkeit von S_5 vom Freibord und dem Verhältnis Länge zum Tiefgang L/T.

verbundenen Einsparung von Rechenaufwand ist deshalb bei der Berechnung von S_2 bzw. S_5 in Abb. 11 bis 15 von Seegang mit einem Neumann-Spektrum entsprechend Windstärke 7 Bft. ausgegangen worden.

Abb. 11a zeigt, daß wir für das Basisschiff ($\delta = 0{,}7$) mit einem Freibord von z. B. 7 m einen Wert $S_2 = -1{,}3$ erhalten. Denselben Wert für S_2 erhalten wir bei Schiffen mit $\delta = 0{,}75$ bzw. $\delta = 0{,}55$, wenn ihr Freibord 4,55 bzw. 7,85 m beträgt (für diese Völligkeiten ergeben sich für unser Beispiel die größten Unterschiede im Freibord). Wenn wir für alle Schiffe den Freibord von 7 m beibehalten, dann erhöht sich S_2 von $-1{,}3$ beim Basisschiff ($\delta = 0{,}7$) auf $+1{,}15$ bei Schiffen mit $\delta = 0{,}75$. Den niedrigsten Wert — $S_2 = -2{,}15$ — finden wir für Schiffe mit $\delta = 0{,}55$ (vgl. Abb. 11a, rechts).

Wenn wir von dem Sicherheitsmaß S_5 ausgehen (Abb. 11 b), kommen wir zu der Tendenz nach gleichen Ergebnissen. Die Freibordänderung, die notwendig ist, um bei Schiffen mit von der Völligkeit des Basisschiffes abweichendem δ den gleichen Wert für S_5 zu erhalten, hängt in diesem Fall auch von dem Freibord des Basisschiffes ab.

In die rechte Hälfte von Abb. 11 a ist auch die Änderung ΔS_2 des Sicherheitsmaßes S_2 eingetragen, die sich aus der Freibordkorrektur für δ, wie sie in den Vorschriften vorgesehen ist, ergibt. Sie ist so aufgetragen, daß für das hier gewählte Basisschiff mit $\delta = 0{,}7$ $\Delta S_2 = 0$ wird. Man sieht,

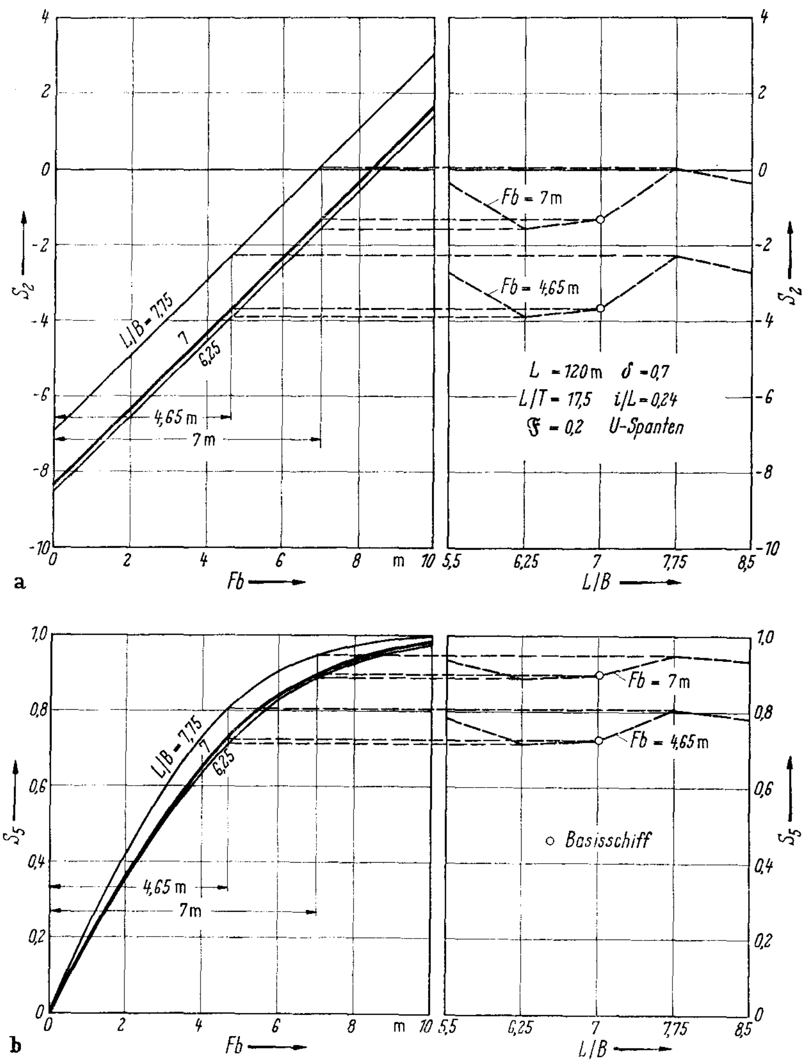
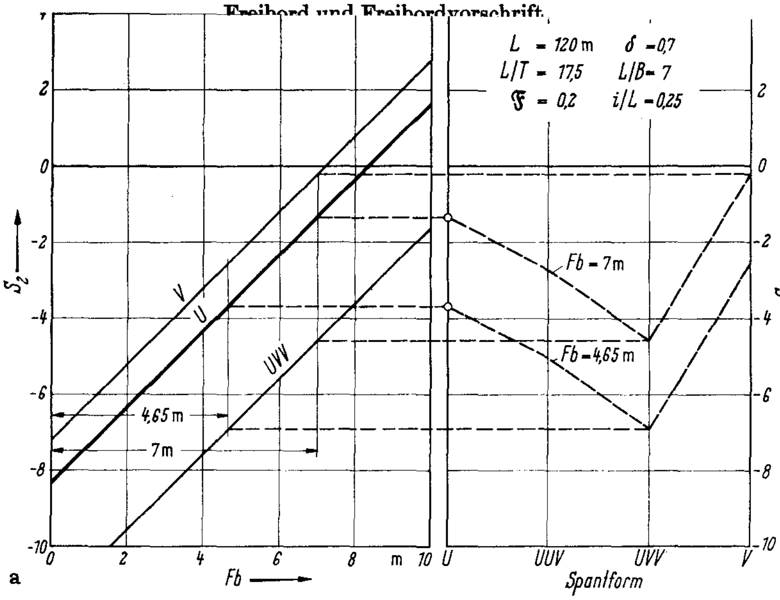
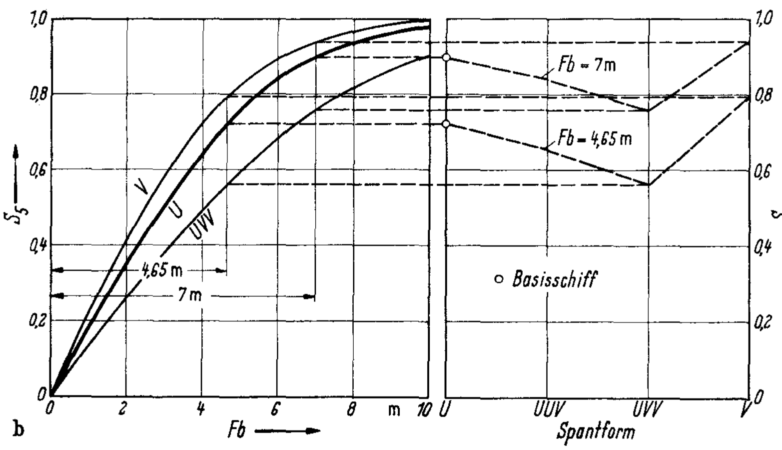


Abb. 13a. Abhängigkeit von S_2 vom Freibord und dem Verhältnis Länge zur Breite L/B.
Abb. 13b. Abhängigkeit von S_5 vom Freibord und dem Verhältins Länge zur Breite L/B.

daß die Korrektur weder ihrer Tendenz noch ihrer Größenordnung nach dem angestrebten Zweck gerecht wird.

Was eben über den Einfluß der Völligkeit auf die Sicherheit im Hinblick auf überkommendes Wasser gesagt wurde, gilt entsprechend für den Einfluß von L/T (Abb. 12a u. 12b). Bei konstantem Freibord entspricht jedem Verhältnis L/T auch ein bestimmtes Verhältnis L/H. Für von $L/H = 15$ abweichende Verhältnisse L/H ist laut Freibordvorschrift der Freibord zu korrigieren, wodurch sich das Sicherheitsmaß S_2 um die in Abb. 12a, rechts, eingetragenen Werte ΔS_2 ändern würde. Die durch die Freibordkorrektur erzielten Werte ΔS_2 liegen in diesem Falle größenordnungs- und tendenzmäßig etwas besser als im Falle der Korrekturen für den Völligkeitsgrad.





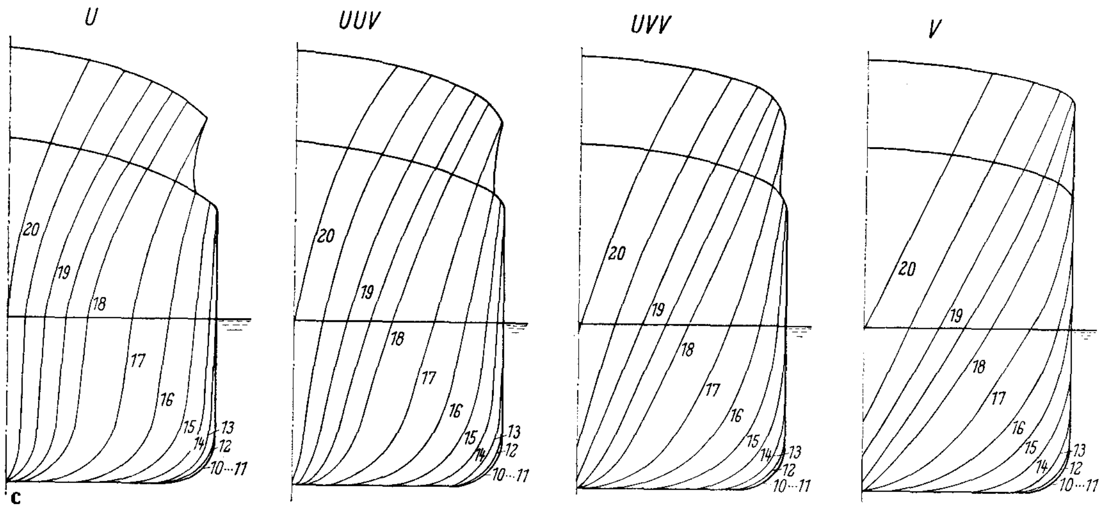


Abb. 14a. Abhängigkeit von S_2 von Freibord und Spantform (s. Abb. 14c).
Abb. 14b. Abhängigkeit von S_5 von Freibord und Spantform (s. Abb. 14c).
Abb. 14c.

Die Abb. 13 bis 15 zeigen, daß die Sicherheit im Hinblick auf überkommendes Wasser recht erheblich vom Längen-Breitenverhältnis, vom Längenträgheitsmoment und ganz besonders stark auch von der Schiffsform abhängt. In der geltenden Freibordvorschrift werden diese Zusammenhänge nicht berücksichtigt. Vergleicht man z. B. die Änderung der Sicherheit in Abhängigkeit von der Schiffsform (Abb. 14) mit den durch die vorgeschriebenen Freibordkorrekturen erzielten ΔS_2-Werten (die in die jeweils rechte Hälfte von Abb. 11a und 12a eingetragen sind), so muß man feststellen, daß man ebenso „richtige" Freiborde erhalten würde, wenn man auf diese Freibord-

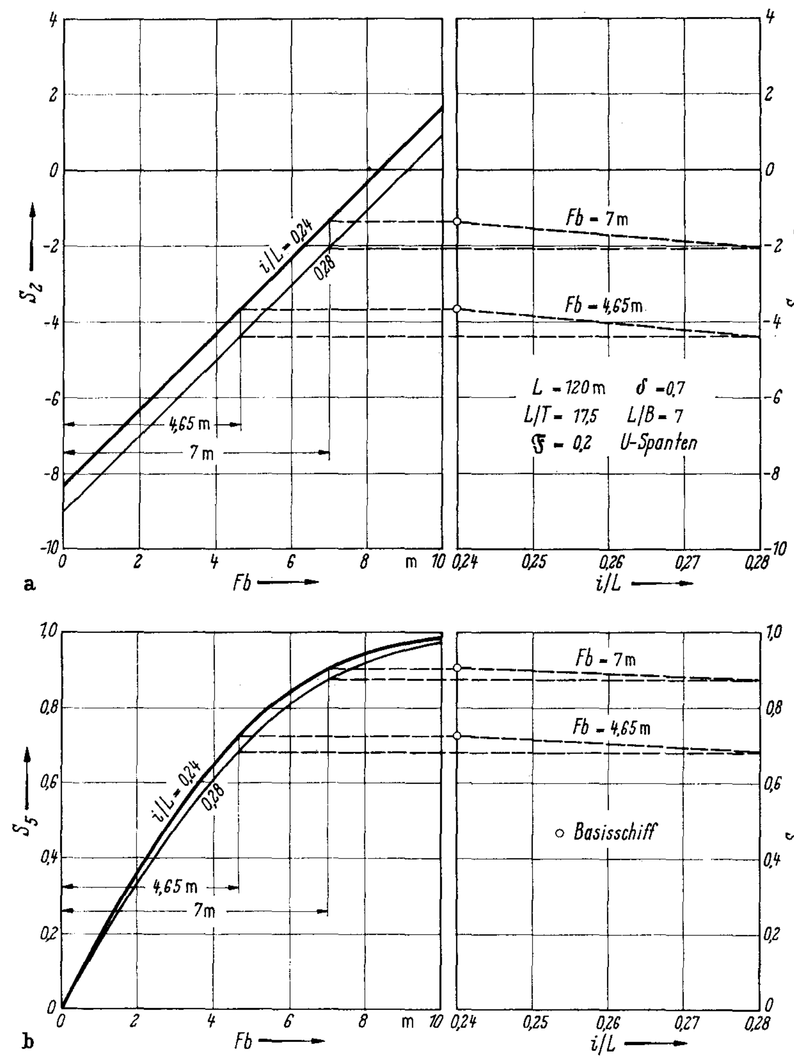


Abb. 15a. Abhängigkeit von S_2 vom Freibord und dem auf die Länge bezogenen Trägheitsradius i.
Abb. 15b. Abhängigkeit von S_5 vom Freibord und dem auf die Länge bezogenen Trägheitsradius i.

korrekturen ganz verzichten würde. Korrekturen hätten nur einen Zweck, wenn damit alle Einflüsse gleicher Größenordnung wenigstens tendenzmäßig richtig erfaßt werden würden. Andernfalls sind sie nur überflüssiges oder sogar schädliches Beiwerk. Die auf Millimeter genau zu berechnenden Korrekturen für δ und L/H der geltenden Freibordvorschriften erwecken den falschen Eindruck einer großen Genauigkeit; in Wirklichkeit führen sie jedoch meist dazu, daß entweder die Sicherheit willkürlich vermindert wird oder dem Reeder unbegründete Beschränkungen auferlegt werden.

Den Schöpfern der Freibordvorschrift kann man deswegen keinen großen Vorwurf machen: Sie waren gezwungen, ein administratives Gesetz zu machen, ohne die dabei eine Rolle spielenden

physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu kennen. Es herrschte — noch bis 1930, vgl. [18] — die Vor-
Wellen hinwegzuheben, so daß das Deck nicht überflutet wird. Als Kriterium für die Sicherheit gegen überkommendes Wasser sah man deshalb das Verhältnis Reserveverdrängung zur Verdrängung (die gleich dem Schiffsgewicht ist) an. Die Freibordvorschrift basiert weitgehend auf dieser falschen Vorstellung.

Es mag auch heute noch nicht möglich sein, ein restlos befriedigendes Kriterium für die Sicherheit gegen überkommendes Wasser anzugeben; daß man leicht besseres als das den jetzigen Vorschriften zugrunde liegende finden kann, hoffe ich mit meinem Vortrag gezeigt zu haben. Forderungen, die Freibordvorschriften zu ändern, sind m. M. nach sicher begründet — vom Standpunkt unserer Erkenntnisse aus scheint mir eine Änderung logisch notwendig zu sein. Freilich stehen einem solchen Bestreben nicht unerhebliche Hindernisse entgegen.

Eine Schwierigkeit, die Freibordvorschrift grundsätzlich zu ändern, liegt sicher darin begründet, daß es sich dabei um ein internationales Vertragswerk handelt. Daran ist nichts zu ändern. Ich glaube aber, daß ein sehr gewichtiger Grund dafür, daß wir noch immer eine auf altem Aberglauben gegründete Freibordvorschrift haben, darin zu suchen ist, daß bei der Ausbildung der Schiffbauer die Schiffstheorie häufig zu kurz kommt. Es gilt auch im Zusammenhang mit der Freibordbemessung: Das praktischste ist immer eine gute Theorie.

Anhang 1. Einige Begriffe und Definitionen der Wahrscheinlichkeitsrechnung

1. Die Wahrscheinlichkeit eines „Ereignisses" A ist eine eindeutig bestimmte Zahl $W(A)$, die der Bedingung $0 \leqq W(A) \leqq 1$ genügt. Die Wahrscheinlichkeit des sicheren Ereignisses S (d. h. eines Ereignisses, das mit Sicherheit eintritt), ist $W(S) = 1$. Das unmögliche Ereignis U hat die Wahrscheinlichkeit $W(U) = 0$.

Die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis A sei $W(A)$, die für das Ereignis B sei $W(B)$. Die Ereignisse schließen einander aus. Für die Wahrscheinlichkeit, daß mindestens eines der beiden Ereignisse A oder B eintritt (man schreibt dafür $A + B$), gilt:

$$W(A + B) = W(A) + W(B).$$

Wenn A und B voneinander unabhängige Ereignisse sind, dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß sowohl A als auch B eintreten (für dieses Ereignis wird AB geschrieben):

$$W(AB) = W(A) \cdot W(B).$$

Das Gesagte gilt nicht nur für zwei Ereignisse, sondern auch für eine beliebige Zahl von Ereignissen.

2. Eine Größe ξ, die verschiedene Werte annehmen kann, wobei es vom Zufall abhängt, welchen sie in einem bestimmten Fall annimmt, heißt zufällige oder stochastische Variable. Für eine solche Größe kann man natürlich keinen bestimmten Wert angeben. Man kann aber Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Werte, die ξ annehmen kann, machen.

Wenn ξ endlich oder abzählbar unendlich viele Werte x_i ($i = 1, 2 \ldots$) annehmen kann, betrachten wir Ereignisse $\{\xi = x_i\}$. Jedes dieser Ereignisse hat eine Wahrscheinlichkeit p_i:

$$W(\xi = x_i) = p_i.$$

Kann ξ beliebige Werte aus einen Intervall $a \leqq x \leqq b$ annehmen, so betrachten wir Ereignisse $\{x_1 < \xi \leqq x_2\}$, d. h. daß ξ in ein bestimmtes Intervall fällt. Auch diese Ereignisse haben eine bestimmte Wahrscheinlichkeit. Um sie anzugeben, gehen wir von Ereignissen $\{-\infty < \xi \leqq x\}$ aus. Die Wahrscheinlichkeit $W(-\infty < \xi \leqq x)$ hängt offenbar nur von x ab, ist also eine Funktion $F(x)$ von x:

$$W(-\infty < \xi \leqq x) = F(x).$$

$F(x)$ heißt Verteilungsfunktion der zufälligen Variablen ξ. Sie ist eine monoton nicht abnehmende Funktion, die in $-\infty < x + \infty$ nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

Es gilt auch

$$W(x_1 < \xi \leqq x_2) = F(x_2) - F(x_1)$$

und

$$W(x < \xi \leqq x + dx) = \frac{F(x + dx) - F(x)}{dx}\, dx = \frac{dFx}{dx}\, dx = f(x)\, dx$$

$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ heißt Verteilungsdichte der zufälligen Variablen ξ. Man kann damit für die Wahrscheinlichkeit $W(-\infty < \xi \leqq x)$ bzw. $W(x_1 < \xi \leqq x_2)$ auch schreiben:

$$W(-\infty < \xi \leqq x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)\,dx$$

$$W(x_1 < \xi \leqq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)\,dx$$

Weiter ist

$$W(-\infty < \xi < +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,dx = 1$$

Auch wenn ξ nur diskrete Werte x_i annimmt, kann man die Verteilungsfunktion angeben:

$$F(x) = \sum_{x_i \leqq x} p_i$$

D. h. daß über alle i zu summieren ist, für die es x_i, die kleiner x sind, gibt. $F(x)$ ist in diesem Fall eine Treppenfunktion, die an den Stellen x_i Sprungstellen der Höhe p_i besitzt und zwischen je zwei solcher Sprungstellen konstant ist.

Das hier Gesagte gilt entsprechend, wenn es sich um eine mehrdimensionale zufällige Variable handelt.

3. Häufig gibt man statt der Verteilung zufälliger Variabler bestimmte statistische Kennwerte an. Einige sind im folgenden zusammengestellt:

Mittelwert für stetig verteilte zufällige Variable $\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x\, f(x)\,dx$

für diskret verteilte zufällige Variable $\bar{x} = \sum x_i\, p_i$

Die Summe ist über alle i zu erstrecken.

Varianz:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 f(x)\,dx \text{ oder}$$

$$\sigma^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2\, p_i.$$

Die Streuung σ ist die Wurzel aus der Varianz.

Quantil x_q: Die Quantile ergeben sich aus der Beziehung

$$F(x_q) = \frac{q}{100}.$$

Die Quantile x_q sind diejenigen Werte, die ξ mit der Wahrscheinlichkeit $q/100$ nicht überschreitet. Das Quantil für $q = 50$ heißt Median oder Zentralwert.

Wegen ausführlicherer Angaben über die Wahrscheinlichkeitsrechnung siehe z. B. [*27*, *53*, *54*]; über stochastische Prozesse [*49*, *55*].

Anhang 2. Eintauchung eines Schiffes in regelmäßigem und unregelmäßigem Seegang. Bestimmung der Streuung der Eintauchung bei unregelmäßigem Seegang

Es würde zu weit führen, wenn ich hier auf die Berechnung der Schiffsbewegungen bzw. der Eintauchung des Schiffes im Seegang ausführlich eingehen würde. Deshalb will ich mich im folgenden kurz auf die Zusammenstellung einiger Beziehungen, die bei den Rechnungen, über die in Abschnitt 5 und 6 vorstehender Arbeit berichtet wird, eine Rolle spielen, beschränken. Wegen weitergehender Angaben verweise ich auf das Schrifttum (z. B. [*42* bis *44*]).

1. Die durch Wellen verursachte relative Eintauchung h am vorderen Lot, das den Abstand l vom Schwerpunkt des Schiffes habe, setzt sich zusammen aus der Bewegung r der Wasseroberfläche an dieser Stelle, der Tauchbewegung z und einer dem Stampfwinkel ψ proportionalen Vertikalbewegung:

$$h = r - z + l\,\psi$$

z und r sind nach oben, ψ ist im Sinne des Uhrzeigers positiv. Die Rollbewegung kann wegen der am vorderen Lot geringen Schiffsbreite vernachlässigt werden.

Für den Fall regelmäßiger Wellen kann man für die komplexen Amplituden von z, ψ und r schreiben:

$$\bar{z} = \bar{Y}_z \cdot r_0$$
$$\bar{\psi} = \bar{Y}_\psi \cdot r_0/L$$
$$\bar{r} = \bar{Y}_r \cdot r_0$$

Dabei ist r_0 der Betrag der Wellenamplitude, L die Schiffslänge und $\bar{Y}_i$ $(i = z, \psi, r)$ sind komplexe Einflußzahlen. Mit $\bar{Y}_r$ wird berücksichtigt, daß die Bewegung der Wasseroberfläche am vorderen Lot gegenüber der am Hauptspant phasenverschoben ist und daß der Betrag der Amplitude $\bar{r}$ durch das Schiff gegenüber der Amplitude der ungestörten Welle r_0 verändert wird.

Für die komplexe Amplitude der relativen Eintauchung h gilt:

$$\bar{h} = r_0 \,(\bar{Y}_r - \bar{Y}_z + l/L \,\bar{Y}_\psi) = r_0 \bar{Y}_h$$

$\bar{Y}_h$ ist die komplexe Einflußzahl für die relative Eintauchung. Außer von l hängt $\bar{Y}_h$ ab von der Wellenlänge λ (oder wegen $\lambda = 2\pi g/\omega^2$ auch von der Kreisfrequenz ω), dem Winkel zwischen Wellenfortschrittsrichtung und Fahrtrichtung des Schiffes (Begegnungswinkel) χ und der Schiffsgeschwindigkeit v:

$$\bar{Y}_h = \bar{Y}_h \,(\omega, \chi, v).$$

Es sei noch vermerkt, daß nichtlineare Einflüsse unberücksichtigt bleiben. Der Anteil der Eintauchung der — abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit — auch in glattem Wasser auftritt (Fahrtwelle, Vertrimmung und Absenkung des Schiffes), bleibt hier ebenfalls unberücksichtigt.

2. Zur Bestimmung der Einflußzahl der relativen Eintauchung $\bar{Y}_h$ gibt es mehrere Möglichkeiten:

a) Theoretische Berechnung der Schiffsbewegungen und aus diesen der relativen Eintauchung: Obwohl die Bemühungen auf diesem Gebiet schon weit zurückreichen, ist es erst in jüngster Zeit gelungen, die Theorie so weit zu vervollkommnen, daß damit genügend genaue Ergebnisse erzielt werden können. Ein guter Überblick über die Theorie der Schiffsbewegungen im Seegang ist in [*42* u. *43*] zu finden. Insbesondere in [*42*] werden auch zahlreiche Hinweise auf das auf diesem Gebiet erschienene Schrifttum gegeben. An neueren Arbeiten möchte ich besonders eine von Grim [*45*] erwähnen.

b) Halbempirische Bestimmung der Schiffsbewegungen bzw. der relativen Eintauchung: Bei dieser Methode werden die hydrodynamischen Eigenschaften des Schiffes empirisch bestimmt. Man erhält damit die Koeffizienten der die Bewegungen beschreibenden Differentialgleichungen. Als Beispiel für diese Methode sei eine Arbeit von Gerritsma [*46*] genannt.

c) Bestimmung der Schiffsbewegungen und der Eintauchung mit Hilfe von Modellversuchen: Diese Methode ist die älteste und dem Anschein nach einfachste. Die Ermittlung verläßlicher Ergebnisse macht jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Die erzielbare Genauigkeit ist wesentlich geringer als bei den üblichen Modellversuchen zur Widerstandsermittlung. Dies gilt sowohl für Versuche in regelmäßigen Wellen als auch — in noch viel höherem Maße — für Versuche in unregelmäßigem Seegang.

In dieser Arbeit werden die von Vossers, Swaan und Rijken [*47*] und die von Swaan und Vossers [*48*] mitgeteilten Versuchsergebnisse verwendet. Die zugrunde liegenden Versuche sind in der Wageninger Versuchsanstalt durchgeführt worden. Dabei ist u. a. auch die Eintauchung des Bugs gemessen worden. Man kann annehmen, daß die Eintauchamplituden am vorderen Lot nicht sehr stark von den direkt am Bug gemessenen abweichen. Deshalb wurde hier der von Vossers und seinen Mitarbeitern angegebene Betrag der Einflußfunktion für die Eintauchung des Buges (er wird mit s/r bezeichnet) gleich dem Betrag der Einflußfunktion der Eintauchung am vorderen Lot $|\,\bar{Y}_h\,(\omega, \chi, v)\,|$ gesetzt. In [*47*] gibt Vossers als Genauigkeit der Versuchsergebnisse $\pm 5\%$ an. Selbstverständlich sind die in meiner Arbeit erzielten Ergebnisse nicht genauer als die Ausgangsdaten. Ich glaube aber, daß die Genauigkeit für den angestrebten Zweck, ein Beispiel für ein Kriterium für die Freibordbemessung zu bringen, ausreicht. Deshalb kann hier auch auf eine kritische Untersuchung der aus [*47*] und [*48*] übernommenen Daten verzichtet werden.

3. Unregelmäßiger Seegang kann durch das Seegangsspektrum $s_r\,(\omega, \chi)$ gekennzeichnet werden. Wenn wir uns den Seegang durch Überlagerung von voneinander unabhängigen infinitesimalen harmonischen Wellen entstanden denken, können wir $2 s_r\,(\omega, \chi)\; d\omega\; d\chi$ als Amplitudenquadrat

einer solchen Elementarwelle mit der Frequenz ω und der Fortschrittsrichtung χ deuten. Alle diese Elementarwellen verursachen infinitesimale harmonische Schiffsbewegungen bzw. Eintauchungen des Schiffes, die durch Überlagerung die Bewegungen bzw. Eintauchung des Schiffes $h\ (t)$ in unregelmäßigem Seegang ergeben. Für unsere Zwecke genügt es, den Grenzwert der Summe der halben Amplitudenquadrate dieser infinitesimalen Eintauchungen des Schiffes zu bestimmen. Dafür gilt (s. a. Abb. 16, S. 255):

$$m_0 = \int_0^\infty \int_{-\pi}^{+\pi} s_r\ (\omega, \chi)\ |\ \overline{Y}_h\ (\omega, \chi, v)\ |^2\ d\omega d\chi$$

Es kann gezeigt werden, daß die Wurzel aus m_0 gleich der Streuung der Funktionswerte $h\ (t)$ der über der Zeit aufgetragenen relativen Eintauchung ist.

m_0 hängt außer vom Seegang auch von der Schiffsgeschwindigkeit ab. In dieser Arbeit wird durchweg mit einer der Froudeschen Zahl $F = \frac{v}{\sqrt{gL}} = 0{,}2$ entsprechenden Geschwindigkeit gerechnet. Nähere Angaben über die Berechnung der hier benutzten m_0-Werte werden von Bakenhus in [*37*] mitgeteilt (s. a. [*35, 36, 38*]).

Anhang 3. Ermittlung der Verteilung von $\sigma = \sqrt{m_0}$

1. Wenn wir die vertikale Bewegung eines Punktes der Meeresoberfläche messen und über der Zeit auftragen, erhalten wir die sogenannte Seegangsfunktion $r\ (t)$.

Es handelt sich dabei um eine zufällige Funktion, d. h. es sind beliebig viele verschiedene Funktionen $r\ (t)$ möglich, und es hängt vom Zufall ab, welche davon man in einem bestimmten Fall beobachtet. Einen solchen Vorgang, der nicht durch eine bestimmte Funktion beschrieben werden kann, weil eine Menge von anderen Funktionen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten können, nennt man stochastischen Prozess [*49*].

Zur Beschreibung stochastischer Prozesse dienen statistische Kennwerte. Ein solcher ist z. B. der Mittelwert aus allen zu einer bestimmten Zeit t möglichen Werte $r_1\ (t), r_2\ (t), r_3\ (t) \ldots r_n\ (t)$. Im Falle des Seegangs kann man die Meßbasis immer so wählen, daß der Mittelwert

$$\overline{r}\ (t) = \frac{r_1\ (t) + r_2\ (t) + \ldots r_n\ (t)}{n}$$

gleich Null wird. Ein anderer Kennwert ist die Varianz der Funktionswerte. Unter der Annahme $\overline{r} = 0$ gilt dafür:

$$\overline{r^2}\ (t) = \frac{r_1^2\ (t) + r_2^2\ (t) + \ldots r_n^2\ (t)}{n}$$

Es gibt noch eine Reihe weiterer Kennwerte, auf die ich hier aber nicht näher eingehen will.

Wenn alle Kennwerte unabhängig von der Zeit sind, man also für beliebige Zeiten t_1, t_2 usw. gleiche Kennwerte erhält, handelt es sich um einen stationären stochastischen Prozess. Der Seegang ist jedoch ein instationärer Prozess: zwar ist $\overline{r}$ praktisch zeitunabhängig[1], $\overline{r^2}$ ändert sich aber mit der Zeit. Man kann qualitativ abschätzen, daß die Änderung über mehrere Stunden oder Tage recht beachtlich sein kann, daß sie aber im Verlauf einer halben oder ganzen Stunde meist vernachlässigbar gering sein wird. Das Gleiche gilt sicher auch für andere Kennwerte.

Es ist deshalb anzunehmen, daß man keinen sehr großen Fehler macht, wenn man etwa $^1/_2$- bis 1-stündige Abschnitte der Seegangsfunktion als Ausschnitte von verschiedenen, jeweils stationären stochastischen Prozessen ansieht. Diese Prozesse können auch als ergodisch angenommen werden. D. h. daß dabei $\overline{r^2}$ und andere Kennwerte entweder mit den für einen bestimmten Zeitpunkt t_1 geltenden Werten $r_1\ (t_1), r_2\ (t_1) \ldots r_n\ (t_1)$, die von den verschiedenen möglichen zufälligen Funktionen stammen, berechnet werden können oder auch aus den zu verschiedenen Zeiten $t_1, t_2 \ldots t_i \ldots t_n$ bestimmten Funktionswerten $r\ (t_i)$ einer ganz bestimmten der möglichen zufälligen Funktionen. In beiden Fällen würde man die gleichen Ergebnisse erhalten. Dies ist ein großer Vorteil, weil man aus einer registrierten Seegangsfunktion leicht die Funktionswerte zu verschiedenen Zeiten entnehmen kann; man kann dagegen nicht die Werte der verschiedenen möglichen Funktionen zu einem bestimmten Zeitpunkt realisieren und messen.

Daß man auf diese Weise nur Ausschnitte aus fiktiven stationären Prozessen erhält, ist kein großer Nachteil: Auch wenn man es mit wirklichen stationären Prozessen zu tun hätte, würde man

[1] Wenn man $\overline{r}$ während über Jahrhunderte gehende Zeiträume betrachten würde, wäre es auch zeitabhängig. Die Änderung geht aber so langsam vor sich, daß sie für unsere Zwecke immer vernachlässigt werden kann.

davon nur Ausschnitte (Stichproben) verwenden, um ihre statistischen Kennwerte abzuschätzen.

Ein für uns besonders wichtiger statistischer Kennwert ist die Autokovarianzfunktion

$$\varphi_r(\tau) = \overline{r(t) \cdot r(t+\tau)} = \frac{r_1(t)\, r_1(t+\tau) + \ldots r_i(t)\, r_i(t+\tau) + \ldots r_n(t)\, r_n(t+\tau)}{n}$$

oder wegen der Ergodizität auch

$$\varphi_r(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} r(t)\, r(t+\tau)\, dt$$

($2T$ ist die Länge der als stationär angenommenen Seegansgabschnitte. Auf die Probleme, die dadurch entstehen, daß T endlich ist, will ich nicht näher eingehen; s. a. [*50, 51*]).

Mit Hilfe der Autokovarianzfunktion kann man das Seegangsspektrum bestimmen ([*31, 49*]). Der natürliche instationäre Seegang kann also beschrieben werden, indem man die für kleine Abschnitte daraus mit guter Näherung geltenden Spektren angibt.

2. Für praktische Zwecke ist diese Beschreibung des Seegangs aber noch ungeeignet: Für den im Laufe von z. B. einem Jahr auftretenden Seegang würde man eine Folge von mehreren tausend Spektren erhalten. Es ist dies eine sehr unhandliche Information.

Zu einer besseren Übersicht über die Seegangsverhältnisse im Laufe von längeren Zeiträumen kommen wir, wenn wir statt der Folge der Spektren statistische Angaben über die Spektren verwenden. Dazu kann man wie folgt vorgehen: Zunächst müssen die Spektren durch eine Anzahl von Werten näherungsweise beschrieben werden. Man könnte dafür eine Reihe von Spektraldichten verwenden. Eine andere Möglichkeit wäre, die Spektren durch eine geeignete Funktion anzunähern. Zur Beschreibung der verschiedenen Spektren wären dann die Parameter dieser Funktion zu verwenden. Schließlich könnte man auch die Autokovarianzfunktion durch eine Näherungsfunktion ersetzen. Wenn man die Parameter dieser Funktion angibt, sind auch die Spektren festgelegt.

Für jedes Spektrum hätte man also m Werte, die es zumindest näherungsweise beschreiben. Diese Werte fassen wir als mehrdimensionale zufällige Variable $\mathfrak{x} = (x_1, x_2, \ldots x_m)$ auf. Da wir für einen längeren Zeitraum eine große Zahl von Spektren und damit Realisierungen der zufälligen Variablen erhalten, können wir leicht nach bekannten Methoden die Verteilungsfunktion $P(\mathfrak{x})$ bzw. die Verteilungsdichte $p(\mathfrak{x})$ abschätzen.

Der Unterschied gegenüber den schon heute verfügbaren Seegangsstatistiken (z. B. [*39*]) besteht bei diesem Vorgehen im Grunde nur darin, daß statt der Verteilung von kennzeichnender Wellenhöhe, Wellenlänge und Wellenrichtung (es handelt sich hierbei um eine dreidimensionale zufällige Variable) die Verteilung von bestimmten, Seegangsspektren kennzeichnenden Größen bestimmt wird.

Zur Zeit steht dem geschilderten Vorgehen noch eine gewisse Schwierigkeit im Wege: Es ist sehr aufwendig, den Seegang zu messen bzw. Seegangsspektren zu bestimmen. Ich glaube jedoch, daß es gelingen wird, geeignete Seegangsmeßgeräte, mit denen dann die Wetterschiffe ausgerüstet werden könnten, zu entwickeln. (Von Jasper wird in [*52*] über die Messung von Wellenhöhen mit einem shipborn wave recorder berichtet, die Darbyshire auf den Wetterschiffen I und J im Nordatlantik über längere Zeit durchgeführt hat.)

3. Aus der Verteilungsdichte $p(\mathfrak{x})$ der die Spektren kennzeichnenden Größen $\mathfrak{x}$ kann man leicht die Verteilungsdichte $g(\sigma)$ der Streuung $\sigma = \sqrt{m_0}$ der relativen Eintauchung des Schiffes bestimmen[1]. m_0 bzw. σ kann — wie in Anhang 2 angedeutet — aus den Seegangsspektren bestimmt werden.

Wir betrachten zunächst die m-dimensionale Größe $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \ldots \sigma_m)$. Dabei ist σ_1 die Streuung der Eintauchung. Da σ_1 eine Funktion der das Spektrum kennzeichnenden Werte $\mathfrak{x}$ ist, schreiben wir $\sigma_1 = \varphi_1(\mathfrak{x})$. Für $\sigma_2, \ldots \sigma_m$ wird willkürlich $\sigma_2 = \varphi_2(\mathfrak{x}) = x_2, \ldots \sigma_m = \varphi_m(\mathfrak{x}) = x_m$ gesetzt. Man kann also auch schreiben:

$$\hat{\sigma} = \varphi(\mathfrak{x}).$$

Die dazu inverse Funktion sei

$$\mathfrak{x} = \bar{\varphi}(\hat{\sigma}) \text{ oder } \begin{aligned} x_1 &= \bar{\varphi}_1(\hat{\sigma}) \\ x_2 &= \bar{\varphi}_2(\hat{\sigma}) = \sigma_2 \\ &\ldots\ldots \\ &\ldots\ldots \\ x_m &= \bar{\varphi}_m(\hat{\sigma}) = \sigma_m. \end{aligned}$$

[1] Über die dabei verwendeten Methoden siehe z. B. [*27*].

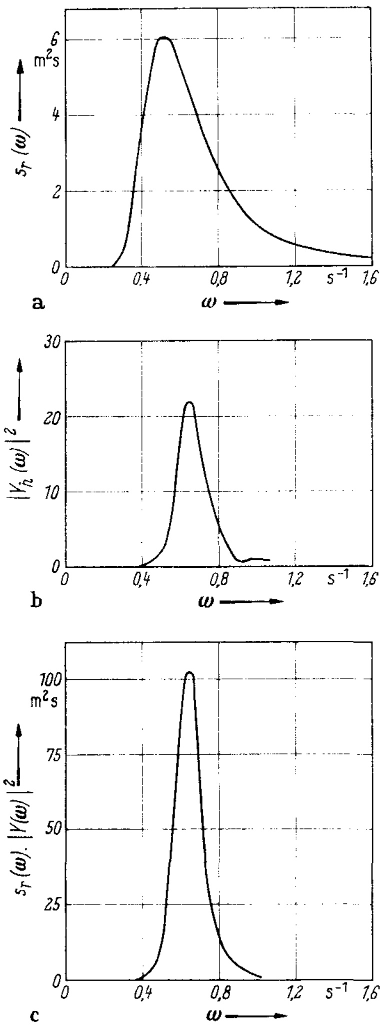
Zwischen der Verteilungsdichte $g^*(\hat\sigma)$ der Variablen $\hat\sigma$ und der Verteilungsdichte $p(\psi)$ besteht die Beziehung (vgl. [27]):

$$g^*(\hat\sigma) = p(\bar\varphi(\hat\sigma)) \left| \frac{\partial \bar\varphi(\hat\sigma)}{\partial \hat\sigma} \right|$$

($\partial\bar\varphi(\hat\sigma)/\partial\hat\sigma$ ist die Jacobische Determinante).

Aus der Verteilungsdichte $g^*(\hat\sigma)$ finden wir die gesuchte Dichte $g(\sigma_1)$ der Streuung der Eintauchung, indem wir zur Randverteilung übergehen (dabei schreiben wir statt σ_1 wieder σ):

$$g(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} g^*(\hat\sigma) \cdot d\sigma_2 \dots d\sigma_m = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p(\bar\varphi_1(\hat\sigma), \sigma_2, \dots \sigma_m)\, d\sigma_2 \dots d\sigma_m$$



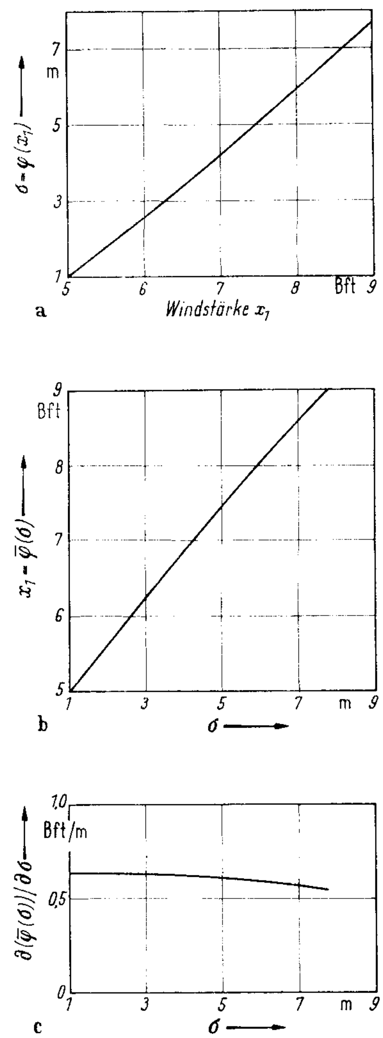


Abb. 16 a – c. Bestimmung der Varianz m_0 der Eintauchung h. Seegang und Schiffsdaten wie in Abb. 6.
Abb. 17 a) Streuung der Eintauchung als Funktion der Windstärke; b) Inverse Funktion; c) Werte der Funktionaldeterminante.

Es wurde hier vorausgesetzt, daß $p(\mathfrak{x})$ schon für bestimmte Routen gilt. Wenn zunächst die Verteilung von $\mathfrak{x}$ für bestimmte Orte (z. B. Positionen von Wetterschiffen) gegeben ist, macht es keine großen Schwierigkeiten, sie für bestimmte Routen umzurechnen.

4. Da noch keine Statistik von Seegangsspektren vorliegt, mußte $g(\sigma)$ für das in Abschnitt 5 vorstehender Arbeit gebrachte Beispiel unter Verwendung vereinfachender Annahmen abgeschätzt werden. Die Schätzung ist sicher sehr roh — ich glaube aber, daß man damit dennoch zu tendenzmäßig richtigen Ergebnissen kommt.

Es wird angenommen, daß der Seegang immer durch ein Neumann-Spektrum gekennzeichnet werden kann. Diese Spektren werden durch eine einzige Größe — die Windgeschwindigkeit — bestimmt. Wenn man weiter annimmt, daß das Auftreten einer bestimmten Windgeschwindigkeit immer ein bestimmtes Seegangsspektrum zur Folge hat (was sicher nicht stimmt, da zur Entwicklung eines bestimmten Seegangs auch eine bestimmte Dauer des Winds gehört), ist die Verteilungsdichte der die Spektren kennzeichnenden Größe $p\ (\mathfrak{x})$ gleich der Verteilungsdichte der Windgeschwindigkeit $p\ (x_1)\ (x_1 = \text{Windgeschwindigkeit})$. Die Verteilungsdichte der Windgeschwindigkeit für den Nordatlantik kann einer Arbeit von Roll [*41*] entnommen werden.

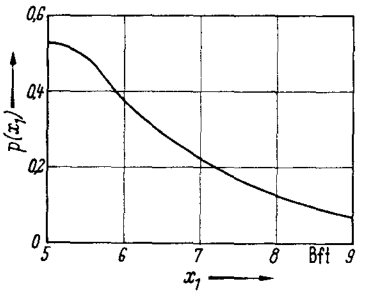


Abb. 18.
Verteilungsdichte der Windstärken x_1 (nach Roll [*41*]).

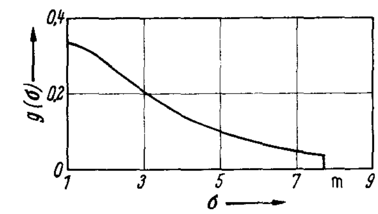


Abb. 19. Verteilungsdichte der Streuung σ der Eintauchung eines Schiffes (Schiffsdaten gleich wie bei Abb. 6, 7 u. 8).

Da für unseren Zweck, Schiffe im Hinblick auf das Überkommen von Wasser zu beurteilen, die Zeiten guten Wetters ohne Interesse sind, wollen wir nur mit der Verteilung der Windstärken über 5 Bft arbeiten[1] (truncated distribution).

Zunächst berechnen wir die Abhängigkeit der Streuung σ von der Windstärke x_1. Dazu sind folgende Rechenschritte notwendig:

1. Berechnung des Neumann-Spektrums für Werte von x_1
2. Multiplikation der Spektrumswerte mit dem Quadrat der Einflußfunktion für die Eintauchung des betrachteten Schiffes (vgl. Anhang 2).
3. Integration des Produktes gibt m_0. Daraus wird $\sigma = \sqrt{m_0}$ berechnet.

Abb. 17a zeigt die so ermittelte Funktion $\sigma = \varphi\ (x_1)$ für ein bestimmtes Schiff. Aus Abb. 17b ist die inverse Funktion $x_1 = \bar{\varphi}\ (\sigma)$ ersichtlich und aus Abb. 17c die Werte der Jacobischen Determinante $\partial \bar{\varphi}\ (\sigma)/\partial \sigma = \partial x_1/\partial \sigma$. Damit und mit Hilfe der Beziehung

$$g\ (\sigma) = p\ (\bar{\varphi}\ (\sigma)) \left| \frac{\partial \bar{\varphi}\ (\sigma)}{\partial \sigma} \right|$$

kann man nun aus der in Abb. 18 gezeigten Verteilungsdichte $p\ (x_1)$ die Verteilungsdichte der Streuung der Eintauchung $g\ (\sigma)$ ermitteln. Sie ist in Abb. 19 dargestellt.

Schrifttum

[*1*] Rundell, W. W.: On the load-draught of merchant vessels, TINA 1870, S. 30/47.
[*2*] Mitzlaff, G. A.: Rule for determining the freebord of sailing and steamships. TINA 1872, S. 55/59.
[*3*] Rundell, W. W.: On the load-draught of steamers, Part I: TINA 1873, S. 21/27; Part II: TINA 1874, S. 130/138.
[*4*] Richardson, W.: On the overloading of steamers, TINA 1873, S. 28/31.
[*5*] Withy, E.: An investigation of various proposals for fixing the load line of vessels, TINA 1873, S. 32/43.
[*6*] Martell, B.: On freebord. TINA 1874, A. 102/129.
[*7*] Rundell, W. W.: Tonnage measurements, moulded depth, and the official register in relation to the freebord of iron vessels. TINA 1883, S. 191/201.
[*8*] West, H.: On the assessment of deck erections in relation to freebord. TINA 1883, S. 205/212.
[*9*] Nixon, L.: Regulations for loading vessels. SNAME 1897, S. 33/46.
[*10*] Rosenstiel, R.: Die Entwicklung der Tiefladelinie an Handelsdampfern. STG 1901, S. 295/322.
[*11*] Schmidt, A.: Die Feststellung einer Tiefladelinie. STG 1904, S. 79/93.
[*12*] King, J. F.: Notes on the freebord rules. TINA 1906, S. 157/164.
[*13*] Watts, Ph.: The load lines of merchant ships: Work of the Load Line Committee (1915). TINA 1916 S. 1/15.

[1] Die wirkliche Verteilung der Windstärken wurde hier noch weiter modifiziert: Die sehr seltenen Windstärken über 9 Bft wurden nicht berücksichtigt. Dafür wurde die Häufigkeit der Windstärke 9 Bft und etwas darunter entsprechend erhöht.

[15] Abell, W. S.: Some [illegible] freeboard. SNAME 1920, S. 121/142.
[16] Bruhn, J.: Some considerations regarding international load line regulations. TINA 1929, S. 82/97.
[17] Arnott, D.: Load line regulations with special reference to the International Load Line Convection. SNAME 1930, S. 77/93.
[18] Erbach, R.: Freibord und Seefähigkeit. STG 1930, S. 68/80.
[19] Sanders, C. J. O.: The establishment of an international load line. TINA 1931, S. 52/59.
[20] King, J. F.: International load lines. TINA 1931, S. 60/66.
[21] Erbach, R.: Vermessung und Freibord der Frachtschiffe. STG 1931, S. 289/309.
[22] Nilsson, N. G.: Freibord und Schiffsvermessung. STG 1931, S. 310/327.
[23] „Verordnung über den Freibord der Kauffahrteischiffe", Reichsgesetzblatt, Bd. II 1932, S. 278.
[24] Schnadel, G.: Ocean waves, freebord and strength of ships. TINA 1938, S. 387/407.
[25] Neuerburg, E. M.: "Freebord" in: The design of merchant ships. Haarlem 1953.
[26] Newton, R. N.: Wetness related to freebord and flare. TINA 1959.
[27] Schmetterer, L.: Einführung in die mathematische Statistik. Wien 1956.
[28] Wendel, K.: Sicherheit gegen Kentern. VDI-Z. 1958, S. 1523/33.
[29] Wendel, K.: Bewertungen von Unterteilungen. STG 1961, S. 192/208.
[30] Abicht, W.: Über den Zusammenhang zwischen Freibord und aufrichtendem Moment. Hansa 1964.
[31] Rice, S. O.: Mathematical analysis of random noise. Abgedruckt in: "Selected paper on noise and stochastic processes". New York 1954.
[32] Longuett-Higgins, M. S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves. Journ. of Marine Res. Yale Univ. 1952.
[33] Cartwright, D. E., u. M. S. Longuett-Higgins: The statistical distribution of the maximum of a random function. Proc. Royal Soc. A, 1956.
[34] Bartsch, H.: Statistische Methoden zur Untersuchung der Bewegungen eines Schiffes im Seegang. Schiffstechnik 1959, S. 1/8 und 85/92.
[35] St. Denis, M., u. W. J. Pierson: On the motion of ships in confused seas. SNAME 1953, S. 280/332.
[36] Tick, L. J.: Certain probabilities associated with bow submergence and ship slamming in irregular seas. Journal of Ship Research 1958, S. 30/36.
[37] Bakenhus, J.: Die Eintauchung von Schiffen im unregelmäßigen Seegang. Hansa 1964.
[38] Krappinger, O.: Zur Bestimmung des Freibords von Schiffen. Unveröffentlichter Bericht an das BVM, Hamburg 1963.
[39] Roll, H. U.: Höhe, Länge und Steilheit der Meereswellen im Nordatlantik. Hamburg 1956.
[40] Neumann, G.: Zur Charakteristik des Seegangs. Archiv für Met. Geophysik und Biokl. 1954, S. 352/377.
[41] Roll, H. U.: Die Größe der Meereswellen in Abhängigkeit von der Windstärke. Hamburg 1954.
[42] Vossers, G.: Behaviour of ships in waves (Teil C von: v. Lammeren u. a.: Resistance, propulsion and steering of ships). Haarlem 1962.
[43] Korvin-Kroukovsky, B. V.: Theory of seakeeping. New York 1961.
[44] Krappinger, O.: Schiffsstabilität und Trimm in Handbuch der Werften 1960. Hamburg 1960.
[45] Grim, O.: A method for a more precise computation of heaving and pitching motions. III. Symp. Nav. Hydrod. Office of Nav. Res., Washington 1960.
[46] Gerritsma, J.: Experimental determination of damping added mass and added mass moment of inertia of a shipmodel. Internat. Shipbuilding Progress 1957, S. 505/19.
[47] Vossers, G., W. A. Swaan u. H. Rijken: Experiments with Serie 60-models in waves. SNAME 1960, S. 364/435.
[48] Swaan, W. A. u. G. Vossers: The effect of forebody section shape on ship behaviour in waves. TINA 1961, S. 297/319.
[49] Bendat, J. S.: Principles and applications of random noise theory, New York 1958.
[50] Keil, H.: Über die Bestimmung von Spektren des Seegangs und der Schiffsbewegungen. Unveröffentlichter Bericht, Hamburg 1963.
[51] Blackman, R. B., and J. W. Tukey: The measurement of power spectra. New York 1958.
[52] Jasper, N. H.: Statistical distribution patterns of ocean waves and of wave induced shipstresses and motions, with engineering applications. SNAME 1956, S. 375/415.
[53] Cramer, H.: Mathematical methods of statistics. Princeton 1951.
[54] Gnedenko, B. W.: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 1951.
[55] Doob, J. L.: Stochastic processes, New York — London 1953.
[56] Krappinger, O.: Über den Freibord. Hansa 1962, S. 570/575.