

415 | Januar 1981

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

O. Krappinger

**Wo liegen die Grenzen der Sicherheit
in der Schiffstechnik?**

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Wo liegen die Grenzen der Sicherheit in der Schiffstechnik?

O. Krappinger, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1981

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

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

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 415

WO LIEGEN DIE GRENZEN DER SICHERHEIT IN DER SCHIFFSTECHNIK ?

O. Krappinger

Vortrag vor dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI),
Ortsgruppe Darmstadt, am 29. Januar 1981

Inhalt

1. Einführung

- 1.1 Grenzen durch die "Übermacht der Elemente"?
- 1.2 Grenzen durch mangelndes Wissen?
- 1.3 Vorgabe von Grenzen!

2. Sicherheitskonzepte

- 2.1 Vorgabe der Hardware
- 2.2 Vorgabe physikalischer Eigenschaften
- 2.3 Vorgabe der Sicherheit

3. Bemessung der Sicherheit durch Systemoptimierung

- 3.1 Optimierung der Wirtschaftlichkeit
- 3.2 Minimierung der Gesamtmortalität
- 3.3 Bemerkungen zur Systemoptimierung

4. Bemessung der Sicherheit durch Anspruchserfüllung

- 4.1 Risiko-Akzeptanz
- 4.2 Akzeptierte Mortalitätsraten
- 4.3 Mortalitätsraten zur Bemessung der Schiffssicherheit?
- 4.4 Beispiel für Anspruchsniveaus bezüglich der Schiffssicherheit

5. Schlußwort

6. Schrifttum

Wo liegen die Grenzen der Sicherheit in der Schiffstechnik ?

Immer wieder gehen mehr oder weniger spektakuläre Meldungen über Schiffsverluste durch die Presse. Daran anschließend wird häufig gefragt, warum man solche Verluste nicht mit Hilfe heute verfügbarer technischer Mittel zu vermeiden trachtet; manchmal wird aber auch resignierend festgestellt, daß der Mensch gegenüber extremen Naturgewalten eben machtlos ist. Solche Kommentare lassen - ebenso wie Reaktionen auf andere mit unserer Technik zusammenhängende Sicherheitsprobleme - erkennen, daß man der Frage nach den Grenzen der Sicherheit in der Öffentlichkeit ziemlich hilflos gegenüber steht. Obwohl wir von befriedigenden und umfassenden Antworten auf die Frage: "Wie sicher ist sicher genug" noch weit entfernt sind, gibt es doch genügend Ansätze zu einer rationalen Behandlung dieses häufig mehr emotionell diskutierten Problems.

Schiffe als sicherheitsmäßig weitgehend selbständige Systeme, die - obwohl komplex - doch gut überschaubar sind, bieten einen guten Ausgangspunkt zur Behandlung der Frage nach den Grenzen der Sicherheit. Die grundsätzliche 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 und damit weit über den Rahmen der Schiffstechnik hinaus von Bedeutung.

Wo liegen die Grenzen der Sicherheit in der Schiffstechnik ?

O. Krappinger, Hamburg

1. Einführung

1.1 Im Dezember 1978 ist der Barge-Carrier "München", ein 260 m langes, modernes und in jeder Beziehung dem heutigen Stand der Technik entsprechendes Schiff, im Atlantik während eines Orkanes verschollen. Mit ihm blieben 28 Menschen auf See. Anläßlich der Trauerfeier für die Besatzung sagte der Hamburger Theologe Prof. Helmut Thielicke u.a.: "In den schrecklichen Tagen des Hoffens und Bangens, bis uns die Endgültigkeit der Katastrophe gewiß wurde, haben wir alle eine Erfahrung gemacht, die noch weit über den Umkreis dieses einen "Falles" hinausging: wie der Stolz auf die allmächtige Technik gebrochen wurde und unser Fortschrittsglaube an die Machbarkeit aller Dinge seine Grenze erfuhr. Die Perfektion menschlichen Könnens scheiterte an der Übermacht der Elemente. Die Hand des Menschen erwies sich in ihrer Ohnmacht."

Nach der damit zum Ausdruck gebrachten - und übrigens weit verbreiteten - Meinung wären die Grenzen der Sicherheit bei der "Übermacht der Elemente" zu suchen, der die Technik ohnmächtig gegenübersteht. Dem kann ich mich aber nicht anschließen: Zwar sehe ich durchaus den Einfluß der Naturgewalten auf die Sicherheit; gleichzeitig ist aber festzustellen, daß man in der Schiffstechnik im allgemeinen keineswegs an den Grenzen des technisch Machbaren liegt.

1.2 Die Grenzen für die Sicherheit können auch durch ungenügende Erforschung der physikalischen Grundlagen der Technik bedingt sein. Ich muß leider zugeben, daß in der Schiffstheorie (die sich mit dem Verhalten von Schiffen einschließlich ihrer Festigkeit beschäftigt) durchaus noch viele Fragen offen sind: Wenn man nicht seit Jahrtausenden zur See gefahren wäre und wenn man mit der Seefahrt heute ebenso wie vor einigen Jahrzehnten mit der Raumfahrt bei Null beginnen würde, würde man die heute verfügbaren theoretischen Grundlagen sicher nicht für ausreichend halten, um sich allein damit auf das Abenteuer Seefahrt einzulassen zu können. Weil aber Schifffahrt seit eh und je betrieben worden ist, gibt es einen umfangreichen Erfahrungsschatz, der es zusammen mit dem beschränkten Wissen über relevante physikalische Zusammenhänge erlaubt, Schiffe zu bauen,

die man als genügend sicher ansieht.^{+) Das verfügbare Werkzeug - Theorie und Erfahrung - würde es auch erlauben, noch weitergehende Vorkehrungen für die Sicherheit zu treffen, als heute für notwendig erachtet werden. Deshalb lassen sich die praktisch relevanten Grenzen der Sicherheit auch nicht aus einer Untersuchung der Grenzen unseres Wissens ableiten. Diese Feststellung schließt natürlich nicht aus, daß mehr Forschung auch der Sicherheit dienen würde: nicht so sehr, weil dadurch die Grenzen des Erreichbaren verschoben werden könnten, sondern weil man sich damit auch im praktischen Bereich, der mehr oder weniger weit unter dem liegt, was theoretisch machbar wäre, etwas leichter täte.}

1.3 Vor Entstehen der modernen Naturwissenschaft und Technik war der Mensch sehr weitgehend der "Übermacht der Elemente" ausgeliefert. Mit der sehr erfolgreichen Entwicklung dieser Gebiete entstand auch ein euphorischer Fortschrittsglaube. Dabei wurde das Erreichen hundertprozentiger Sicherheit nur als eine Frage der Zeit gesehen: Unfälle erschienen als Kinderkrankheiten der modernen Technik; von der Vervollkommnung der Wissenschaft erwartete man vollkommene Sicherheit. Erst nach dem zweiten Weltkrieg mit der Entwicklung umfangreicher elektronischer Systeme sowie der Raumfahrt begann man einzusehen, daß das Streben nach vollkommener Sicherheit eine Utopie ist. Aus dieser Einsicht folgt unmittelbar eine neue Aufgabe: Wenn es nicht sinnvoll ist oder sein kann, nach vollkommener Sicherheit zu streben - wie viel Sicherheit soll man dann vorsehen? Es geht hier also nicht mehr so sehr darum, extern vorgegebene Grenzen (die aus der Übermacht der Elemente oder der Unvollkommenheit unseres Wissens folgen), immer weiter hinauszuschieben, sondern für alle technischen Aktivitäten die jeweils "richtigen" Grenzen für die Sicherheit zu finden.

Ich meine, daß die Frage nach der notwendigen Sicherheit - oder mit anderen Worten - welche nachteiligen Nebenwirkungen der Technik durch die damit erzielten Vorteile gerechtfertigt werden, zu einem zentralen Problem unserer Zeit geworden ist. Es ist eigentlich nicht zu verstehen, daß weder die Erkenntnis, daß wir mit unvollkommener Sicherheit leben müssen, noch die Frage, wie man sich am besten auf diese Tatsache einstellen kann (d.h. welche Sicherheit jeweils vorgesehen werden sollte), die Beachtung gefunden haben, die sie verdienten: Die Beschäftigung mit diesem Thema findet - wenn überhaupt - nur ganz am Rande der Ingenieurausbildung statt; als Folge u.a. auch davon wird diese Problematik in der

+) Es wäre interessant, würde aber weit über den hier vorliegenden Rahmen hinausführen, den Vorlauf an Forschung und Entwicklung, der beim Bau von Luft- und Raumfahrzeugen für notwendig gehalten wird, mit dem zu vergleichen, der im Schiffbau üblich ist.

Öffentlichkeit meist am eigentlichen Thema vorbei, unwissenschaftlich und emotionell diskutiert. Ein Grund für diese Situation könnte sein, daß die Frage nach der notwendigen Sicherheit sich nicht allein mit der den Ingenieuren vertrauten wissenschaftlichen Basis, nämlich der Naturwissenschaft, behandeln läßt. Als eine kleine "Brücke" zu den Geisteswissenschaften möchte ich zwei Zitate bringen: Wenn Ernst Jünger sagt [1]: "Menschliche Vollkommenheit und technische Perfektion sind nicht zu vereinbaren. Wir müssen, wenn wir die eine wollen, die andere zum Opfer bringen", liefert er damit auch eine Begründung, warum es keine vollkommene Sicherheit geben kann. Einen Hinweis auf die Vernachlässigung der Behandlung der Frage nach der "richtigen Sicherheit" enthält die Feststellung von C. Churchman [2]: "Die bestürzendste Eigenschaft der Kultur des 20. Jahrhunderts ist, daß wir überaus viele und auch komplexe Möglichkeiten für unser Tun geschaffen haben, daß wir aber gleichzeitig nichts vorzuweisen haben, um das was wir tun, zu rechtfertigen."

2. Sicherheitskonzepte

Wir wollen uns nun der Frage zuwenden: Wie kann man "Sicherheit" erfassen bzw. ein bestimmtes Maß an Sicherheit vorgeben? Man kann dabei drei Konzepte unterscheiden, die ich aus Zeitgründen hier allerdings nur andeutungsweise beschreiben kann.

2.1 Das erste und methodisch einfachste Konzept, für Sicherheit zu sorgen, war, technische Erzeugnisse ganz bestimmten Angaben folgend herzustellen. Wohl das älteste Beispiel dafür ist die Arche Noah: Ihr Erbauer hielt sich an die ihm gemachten Angaben mit dem Erfolg, daß Kentersicherheit, Festigkeit usw. offenbar 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 Regeln hielt. So erzielte man z.B. bis ins 19. Jahrhundert Kentersicherheit nur dadurch, daß man die Schiffe nach bewährten Proportionen baute (Bild 0).

Der Nachteil dieses Konzeptes ist, daß mit der Sicherheit auch eine bestimmte Hardware-Lösung festgelegt wird. Eine Entwicklung zu alternativen und u.U. besseren Lösungen ist hier nur in ganz kleinen Schritten möglich, wenn man größere Risiken vermeiden will.

2.2 Der nächste Schritt bestand darin, Sicherheit nicht durch unmittelbare Angaben über die Gestaltung der technischen Erzeugnisse, sondern solche über bestimmte physikalische Eigenschaften derselben vorzugeben. So ist z.B. festgestellt worden, daß bei Schiffen, die gekentert sind, die Hebel des aufrichtenden Momentes in glattem Wasser bei 30° und 40° Neigung (vergl. Bild 1) im allgemeinen kleiner waren als die von Schiffen, die nicht gekentert sind. Es handelt sich hierbei um eine statistische Aussage (vergl. Bild 2). Obwohl aus den Glattwasserhebelarmen keine physikalische Erklärung des Kentervorganges (bei dem Seegang, überkommendes Wasser, Wind sowie die dynamischen Eigenschaften des Schiffes eine Rolle spielen) abgeleitet werden kann, kann man aufgrund der Statistik erkennen, daß eine Vergrößerung der aufrichtenden Hebel offenbar zu mehr Kentersicherheit führt. Man kann nun aber nicht beliebig große Hebel vorschreiben, weil damit eine wirtschaftliche Einsetzbarkeit der Schiffe verhindert würde. Die Festlegung der Grenzwerte könnte man als eine "implizite Anpassung" ⁺⁾ bezeichnen: Man legt die Grenzwerte so fest, daß damit Kentern zwar nicht verhindert wird, aber doch "selten genug" auftritt. Das Anspruchsniveau, d.h. was "selten genug" ist, ergibt sich daraus, was die Öffentlichkeit als höhere Gewalt zu akzeptieren bereit ist; dies wiederum hängt sicher ab von der Unfallhäufigkeit, an die man sich in der Vergangenheit gewöhnt hat.

Es sei noch erwähnt, daß hier die Festlegung der Kentersicherheit etwas vereinfacht dargestellt worden ist, was aber für den mit dem Beispiel verfolgten Zweck ohne Belang ist. Ferner ist zu sagen, daß man sich natürlich auch bemüht hat, den Kentervorgang wirklichkeitsnäher physikalisch zu beschreiben. Es gibt dafür recht komplexe Modelle, mit denen man auch einzelne, ganz bestimmte Kenterfälle erklären könnte. Generelle Aussagen, die auch - ähnlich wie in Bild 2 gezeigt - statistisch abgesichert sind, lassen sich aber bisher nicht machen.

Man kann wohl sagen, daß die Methode, Sicherheit durch Angabe bestimmter physikalischer Eigenschaften und bei deren Ermittlung zugrunde zu legende Umweltbedingungen vorzugeben, die heute am meisten praktizierte ist. Vielfach stehen dazu wesentlich wirklichkeitsnähere Methoden als die oben für den Fall der Kentersicherheit angedeutete zur Verfügung. Dabei wird aber weder geklärt, was "Sicherheit" eigentlich ist, noch welche Sicherheit tatsächlich erreicht wird.

+) Von "impliziter Anpassung" spreche ich deshalb, weil dieses Konzept hier nicht explizit angewendet wird.

2.3 Um die Sicherheit gegen den Eintritt eines unerwünschten Ereignisses (z.B. Kentern, Kollision, Schiffsverlust durch Kollision, Ausfall der Maschinenanlage) meßbar zu machen, wird sie als die Wahrscheinlichkeit dafür definiert, daß dieses Ereignis in einem bestimmten Zeitraum nicht eintritt. Zur formalen Behandlung des offensichtlich zwischen Zeit und Wahrscheinlichkeit bestehenden Zusammenhanges wird allerdings die komplementäre Wahrscheinlichkeit, d.h. die, daß das unerwünschte Ereignis in einer bestimmten Zeit eintritt, benutzt.

Die Wahrscheinlichkeit, daß das unerwünschte Ereignis E im Zeitintervall (0,t) eintritt oder mit anderen Worten die Wahrscheinlichkeit, daß die zufällige Zeit τ bis zum Eintreten des Ereignisses E kleiner oder gleich t ist, wird durch die Verteilungsfunktion F(t) der zufälligen Variablen τ bestimmt:

$$W\{E \text{ tritt in } (0,t) \text{ ein}\} = W\{\tau \leq t\} = F(t)$$

F(t) wird meist als Ausfallverteilungsfunktion bezeichnet. Die Ableitung der Verteilungsfunktion nach der Zeit

$$f(t) = dF(t)/dt$$

heißt Ausfallverteilungsdichte. Mit ihr kann man u.a. die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, daß das Ereignis E im Zeitintervall (t, t+dt) eintritt:

$$W\{E \text{ tritt in } (t,t+dt) \text{ ein}\} = W\{t < \tau \leq t+dt\} = f(t)dt.$$

Von Nutzen ist schließlich noch die Ausfallrate (je nach dem betrachteten Ereignis E auch als Kollisionsrate, Verlustrate, Kenterrate u.s.w. bezeichnet). Sie ist die durchschnittliche Anzahl je Zeiteinheit der Objekte, bei denen E auftritt, bezogen auf die Zahl der jeweils vorhandenen Objekte, bei denen E eintreten kann:

$$\lambda(t) = f(t) / (1-F(t))$$

Zwischen Ausfallrate und Ausfallverteilung kann man folgende Beziehung ableiten:

$$F(t) = 1 - \exp(-\Lambda(t))$$

$$f(t) = \lambda(t) \cdot \exp(-\Lambda(t))$$

mit

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t) dt.$$

Bild 3 zeigt ein Beispiel für einander entsprechende Funktionen $\lambda(t)$, $f(t)$ und $F(t)$. Es gilt für ein Gerät, bei dem infolge Abnutzung die Ausfallrate mit der Zeit linear ansteigt.

Als weiteres Beispiel sei die Wahrscheinlichkeit für den Verlust eines Schiffes durch eine Kollision gebracht. Zunächst ist die Kollisionsrate zu bestimmen (siehe Bild 4). Da meist die für einen längeren Zeitraum geltende Verlustwahrscheinlichkeit interessiert, kann man die für die Liegezeit im Hafen, die Revierzeiten bzw. die Zeit auf hoher See (Bereiche a, b und d bzw. c in Bild 4) geltenden unterschiedlichen Kollisionsraten $\lambda_0(t)$ durch eine mittlere Kollisionsrate $\bar{\lambda}_0 = \text{const}$ ersetzen. Ob eine Kollision zum Verlust eines Schiffes führt, hängt außer von Schiffseigenschaften von einer Reihe zufälliger Größen ab: Lage und Ausdehnung des bei der Kollision entstehenden Lecks, Beladungszustand zum Zeitpunkt der Kollision, Wetterverhältnisse. Mit Hilfe geeigneter statistischer Daten kann man für jedes Schiff die Wahrscheinlichkeit W berechnen, daß das Schiff - nachdem es in eine Kollision verwickelt war - nicht verloren geht. Damit läßt sich die Verlustrate (d.h. der Anteil an Kollisionen per Schiff und Zeiteinheit) und schließlich die Verlustwahrscheinlichkeit berechnen. Bild 5 zeigt, wie diese Wahrscheinlichkeit einerseits von der Wahrscheinlichkeit W (die konstruktiv beeinflussbar ist) und andererseits von der Kollisionsrate $\bar{\lambda}_0$ (die u.a. von dem Ausbildungsstand der Besatzung sowie der nautischen Ausrüstung des Schiffes bestimmt wird) abhängt.

2.4 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 begehrbar machen will, reicht es voll und ganz aus, die zu verwendende Hardware, wie z.B. Handläufe, Warzenblech für die Stufen und dergl. direkt vorzuschreiben.

3. 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:

3.1 Im ersten Beispiel will ich 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 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 Reserveaggregats 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 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 (siehe Bild 6). Die Wirtschaftlichkeit wird als mathematische Erwartung des Kapitalwerts (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 Kühlaggregats erhält man die in Bild 7 gezeigte Differenz der Erwartungen der Kapitalwerte (sie ist mit dem Mittelwert für die Höhe des Verlusts, der bei Ausfall der Kühlanlage eintritt, dimensionslos gemacht). Die für die zugehörigen Berechnungen notwendigen Angaben sind aus [3] entnommen.

3.2 Mit dem zweiten Beispiel soll eine Anwendung des Prinzips der geringsten Gesamtmortalität gezeigt werden. Es ist bereits zu einer Zeit, als dieser Begriff noch nicht gebräuchlich war, in einer Arbeit von Abrahamson [4] 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. 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 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 [4] entnommenen Bild 8 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.

3.3 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.)

4. Bemessung der Sicherheit durch Anspruchserfüllung

4.1 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. Bei Betrachtung der Praxis stellt man fest, daß man dort insbesondere bei komplexen Zusammenhängen keinesfalls bezüglich aller Aspekte optimiert. Vielmehr wird angestrebt, auf verschiedenen involvierten Einzelgebieten ein jeweils akzeptables Niveau zu erreichen. 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. Mit anderen Worten: Bei ihren Entscheidungen streben Menschen wohl kaum nach einem absoluten und umfassenden Optimum. Sie ziehen vielmehr Möglichkeiten, die jeweils "gut genug" scheinen, dem Suchen nach der besten Möglichkeit unter Einbeziehung aller Einflüsse und Konsequenzen vor.

Von ähnlichen Beobachtungen ausgehend sind von Simon [5] Ansätze für ein Modell des "satisfying behaviour" entwickelt worden. Es scheint, daß diese Ansätze auch zur Bemessung der Sicherheit nützlich sein könnten. Im wesentlichen handelt es sich dabei um die Aufstellung von Anspruchsniveaus, deren (systematische) Veränderung nach oben oder unten (Anspruchsanpassung) sowie das Auffinden von Lösungen, die den Anspruchsniveaus genügen (Anspruchserfüllung). Bei der Bemessung der Sicherheit ist es üblich, anstelle von Anspruchsniveaus von Risiko-Akzeptanz zu sprechen.

Was wissen wir über Risiko-Akzeptanz ? Daß die von einer Gefahr Betroffenen eine überraschend präzise Vorstellung des akzeptablen Risikos haben, zeigt der folgende Bericht von Pugsley [6]: Vor dem letzten Krieg lag die Rate für das Versagen der tragenden Konstruktion von Militär-Flugzeugen bei 10^{-7} je Flugstunde. Als diese Rate infolge kriegsbedingter Veränderungen der Produktionsverhältnisse auf 5×10^{-7} anstieg, führte dies zu Protesten 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. Letztere Bemerkung kann man als Hinweis darauf nehmen, daß das Problem der Risiko-Akzeptanz sehr vielschichtig ist. Deshalb kann es notwendig sein, bei der Frage der Risiko-Akzeptanz nicht das Gesamtrisiko zugrunde zu legen, sondern bestimmte Teilrisiken für sich zu betrachten.

4.2 Ein sehr wesentlicher Beitrag zur Frage der Risiko-Akzeptanz ist von Ch. Starr [7] geleistet worden. Als Maß für das Risiko bei verschiedenen Aktivitäten verwendet er die Mortalitätsrate (Zahl von Todesfällen je Stunde und Zahl der dem Risiko ausgesetzten Personen). Ziel seiner Überlegungen ist es, Mortalitätsraten zu bestimmen, die aufgrund eines impliziten, auf trial and error beruhenden Prozesses als "optimal" akzeptiert werden und für diese Raten geltende Gesetzmäßigkeiten aufzuzeigen. Aufgrund solcher Einsichten sollte es möglich sein, auch für andere Fälle Grenzen der Sicherheit in Form akzeptierter Mortalitätsraten anzugeben. Starr stellt fest, daß die "natürliche Mortalitätsrate" (infolge Krankheit) ein wichtiger Grenzwert ist. Sie liegt bei uns ebenso wie in U.S.A. bei etwa 10^{-6} /Person und Stunde. Bei vielen sportlichen Aktivitäten liegt die Mortalitätsrate eben unter diesem Wert. Starr meint, daß es sich hierbei um eine Grenze zwischen Mut und Dummheit handeln könne.

Als Hinweis darauf, daß die Risiko-Akzeptanz bei einer Aktivität von deren Nutzen abhängt, bringt er den Zusammenhang zwischen Stundenlohn und Verletzungsrate im Bergbau (Bild 9). Eine Zusammenfassung der von Starr untersuchten Zusammenhänge zwischen akzeptiertem Risiko und Nutzen ist in Bild 10 dargestellt. Es zeigt, daß bei freiwillig eingegangenen Risiken die akzeptierte Mortalitätsrate 10^3 mal größer ist als bei solchen, die unfreiwillig übernommen werden müssen (z.B. durch Nachbarschaft eines Kraftwerkes).

Von Interesse ist auch, daß ein Zusammenhang zwischen dem Risiko einer Aktivität und ihrer Verbreitung besteht (Bild 11): Je mehr Personen sich beteiligen, desto kleiner wird das akzeptierte Risiko (für mich stellt sich hier allerdings die Frage, was hier "Ursache" und was "Wirkung" ist).

Obwohl bisher nicht quantitativ belegt, hängt die Größe des akzeptablen Risikos auch davon ab, ob es sich um ein bekanntes oder unbekanntes Risiko handelt. Auch das "sich bewußt sein" über den Nutzen (benefit-awareness) spielt eine Rolle (siehe hierzu Bild 12, das ebenfalls der Arbeit von Starr [7] entnommen ist).

Obwohl die Arbeit von Starr viel zitiert wird, findet man in der Literatur kaum kritische Auseinandersetzungen mit seinen Ergebnissen oder weiterführende Überlegungen. Man kann da eigentlich nur über die Passivität derjenigen staunen, die sich davon angesprochen fühlen sollten.

4.3. Um Grenzen für die Sicherheit von Schiffen vorzugeben, scheint die Mortalitätsrate nicht ohne weiteres geeignet. Die Verlustrate von Schiffen (Zahl der Totalverluste je Stunde und Zahl der im Einsatz befindlichen Schiffe) für alle Handelsschiffe über 100 BRT beträgt 0.8 bis $0.9 \cdot 10^{-6}$ pro Schiff und Stunde. Selbstverständlich hängt diese Rate vom Schiffstyp ab: So findet man z.B. für Tanker mit einer Tragfähigkeit zwischen 30 und 50.000 Tonnen eine Verlustrate von $0.3 \cdot 10^{-6}$ pro Schiff und Stunde und für solche mit einer Tragfähigkeit über 100.000 Tonnen eine Rate von $0.075 \cdot 10^{-6}$ pro Schiff und Stunde. Die Wahrscheinlichkeit, daß beim Totalverlust eines Schiffes ein Besatzungsmitglied ums Leben kommt, dürfte um 25 % liegen. Damit wird die Mortalitätsrate infolge von Totalverlusten von Schiffen etwa ein Viertel der Verlustrate der Schiffe. Aus den sich ergebenden recht kleinen Werten für die Mortalitätsrate kann man aber nicht ableiten, daß das Sicherheitsniveau (im Hinblick auf Totalverluste) als übermäßig hoch eingeschätzt wird. Die Erfahrung lehrt nämlich, daß die Gesellschaft das Sicherheitsniveau, aus dem eine bestimmte Mortalitätsrate resultiert, akzeptiert, wenn die Unfälle jeweils einzelne Menschen betreffen, daß sie aber bei gleicher Mortalitätsrate das Sicherheitsniveau für zu niedrig hält, wenn durch einen Unfall jeweils eine größere Zahl von Menschen ums Leben kommt. Dieser Tatsache wird z.B. in einer Studie über Reaktorsicherheit [8] Rechnung getragen: Zur Bewertung des Risikos wird dabei nicht die Mortalitätsrate, sondern die Häufigkeit von Unfällen pro Jahr, bei denen bestimmte Zahlen von Todesopfern überschritten werden, benutzt. Dieser Zusammenhang zwischen Unfallhäufigkeit und Zahl von Todesopfern ist in dem aus [8] entnommenen Bild 13 dargestellt. Zusätzlich ist in das Bild noch eine für Schiffsunfälle gültige Kurve eingetragen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei dieser die Unfälle auf der ganzen Welt berücksichtigt sind, die übrigen Kurven sich aber nur auf Unfälle in U.S.A. beziehen.

Eine weitere Schwierigkeit der Bewertung der Schiffssicherheit durch die Mortalitätsrate sehe ich darin, daß diese sich aus Teilraten für verschiedene Unfallursachen zusammensetzt, wie z.B. Schiffsverluste durch Seegangsbeanspruchung, Kentern, Kollisionen, Grundberührung, Feuer und Explosionen, sowie den Einzelnen betreffende Risiken wie z.B. über Bord gespült werden, Arbeitsunfälle und dergl. mehr. Bei der Bewertung eines Risikos spielt aber sicher neben der Todesrate auch die Art, wie man ums Leben kommt, eine Rolle. Insofern stellt die Mortalitätsrate ein zu pauschales Risikokriterium dar, zumindest wenn es um die Grenzen der Sicherheit für so komplexe Systeme wie Schiffe geht.

Ohne näher darauf einzugehen, möchte ich noch ein weiteres Problem erwähnen: Die Mortalitätsrate beschreibt das augenblickliche Risiko. Kommt es bei der Bewertung des Risikos aber tatsächlich auf die zeitlich nur sehr begrenzt auftretende extreme Mortalitätsrate an oder sollte man besser auf die Todeswahrscheinlichkeit für einen längeren Zeitraum abstellen? Sind vielleicht nicht Risikospitzen sogar so etwas wie das Salz des Lebens? (Vergl. das oben gebrachte Zitat von E. Jünger.)

Einigen der genannten Schwierigkeiten kann man entgehen, wenn man das Anspruchsniveau nicht als Mortalitätsrate vorgibt, sondern es auf einer etwas "niedrigeren Ebene" formuliert. Im folgenden soll anhand eines Beispiels angedeutet werden, wie dabei vorgegangen werden kann.

4.4 Oben ist gezeigt worden, daß die Wahrscheinlichkeit von Schiffsverlusten infolge von Kollisionen von der Kollisionsrate einerseits und der Wahrscheinlichkeit, daß ein Schiff eine Kollision übersteht, andererseits abhängt. Demnach kann man eine bestimmte Verlustwahrscheinlichkeit auf verschiedene Weise erreichen (s. Bild 14): z.B. könnte man eine übermäßig hohe Kollisionsrate zulassen, wenn gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit für das Überstehen einer Kollision entsprechend groß gemacht wird. Man könnte aber auch mit einer recht kleinen Wahrscheinlichkeit für das Überstehen einer Kollision auskommen, wenn die Kollisionsrate entsprechend reduziert wird. Beide Möglichkeiten würden aber wohl nicht akzeptiert werden, weil "man" (d.h. die Gesellschaft) sowohl bezüglich der Häufigkeit von Kollisionen als auch bezüglich der Fähigkeit der Schiffe, Kollisionen zu überstehen, bestimmte Anspruchsniveaus hat. Die "Sicherheitsansprüche" gehen aber noch weiter: Bei der Ausarbeitung der Equivalent International Regulations on Subdivision and Stability of Passenger Ships konnten sich einige der Beteiligten nicht dazu bereitfinden, sich mit der Wahrscheinlichkeit für das Überstehen 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. Er hat sich in dem deterministischen Teil der Vorschrift niedergeschlagen. (Zur formalen Begründung dieses Anspruchs siehe [9]).

5. Schlußwort

Ich mußte bei allen Beispielen darauf hinweisen, daß ich die Zusammenhänge immer nur sehr verkürzt bringen konnte. Ich muß zum gesamten Vortrag feststellen, daß ich nur ganz wenige Aspekte der gesamten Problematik herausgreifen konnte - es blieb viel mehr unerwähnt, als angesprochen worden ist. Trotzdem hoffe ich, einige Anregungen zur Beschäftigung mit der oder zum Nachdenken über die Sicherheit gegeben zu haben.

6. Schrifttum

- [1] Jünger, E.: Gesammelte Werke.
Bd.9, S. 476, Stuttgart 1957
- [2] Churchman, C.: Prediction and Optimal Decision.
Englewood Cliffs, N.J. (1961)
- [3] Krappinger, O.: Zusammenhänge zwischen der Wirtschaftlichkeit
und Sicherheit von Schiffen.
Schiffstechnik 18 (1971), S.21-32
- [4] Abrahamson, E.: Structural Safety of Ships and
Risks to Human Life.
European Shipbuilding 6 (1962), S.134-137, 146
- [5] Simon, H.A.: Models of Man; Mathematical Essays on Rational
Human Behavior in a Social Setting.
New York (1957)
- [6] Pugsley, A.: The Safety of Structures.
London (1966)
- [7] Starr, C.: Social Benefit Versus Technological Risk.
Science, Vol. 165 (1969), pp. 1232-1238
- [8] Reactor Safety Study, WASH 1400, U.S. NRC, Wash. D.C.,
Oct. 1975
- [9] Krappinger, O.: Zur Frage der Bewertung der Unterteilung
von Schiffen.
IfS-Bericht Nr. 281, Hamburg (1971)

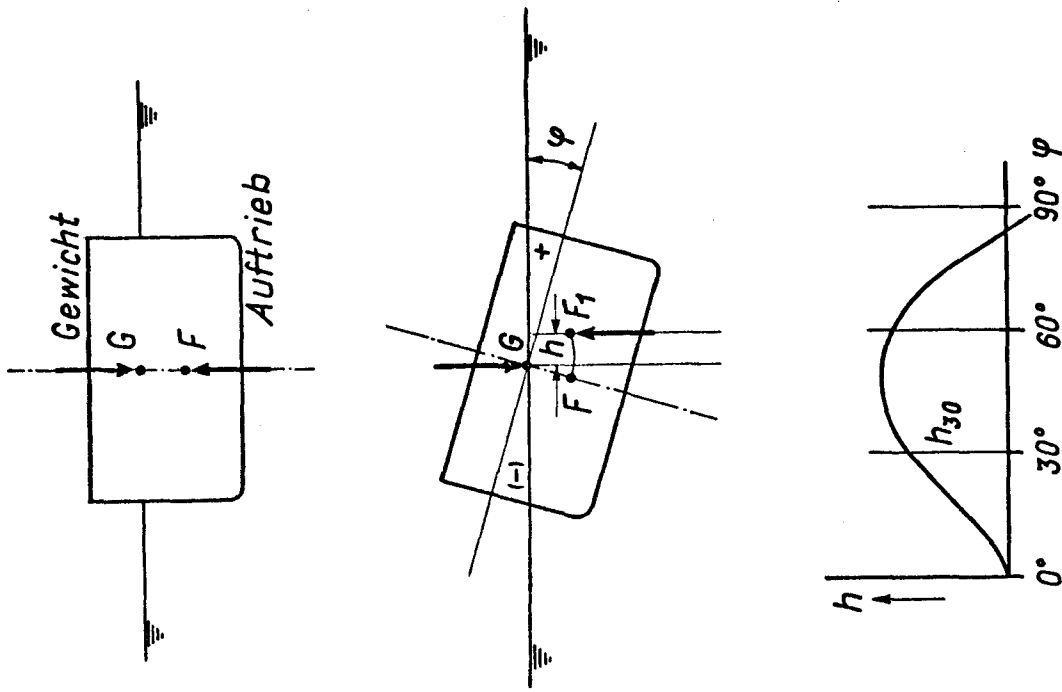


Bild 1

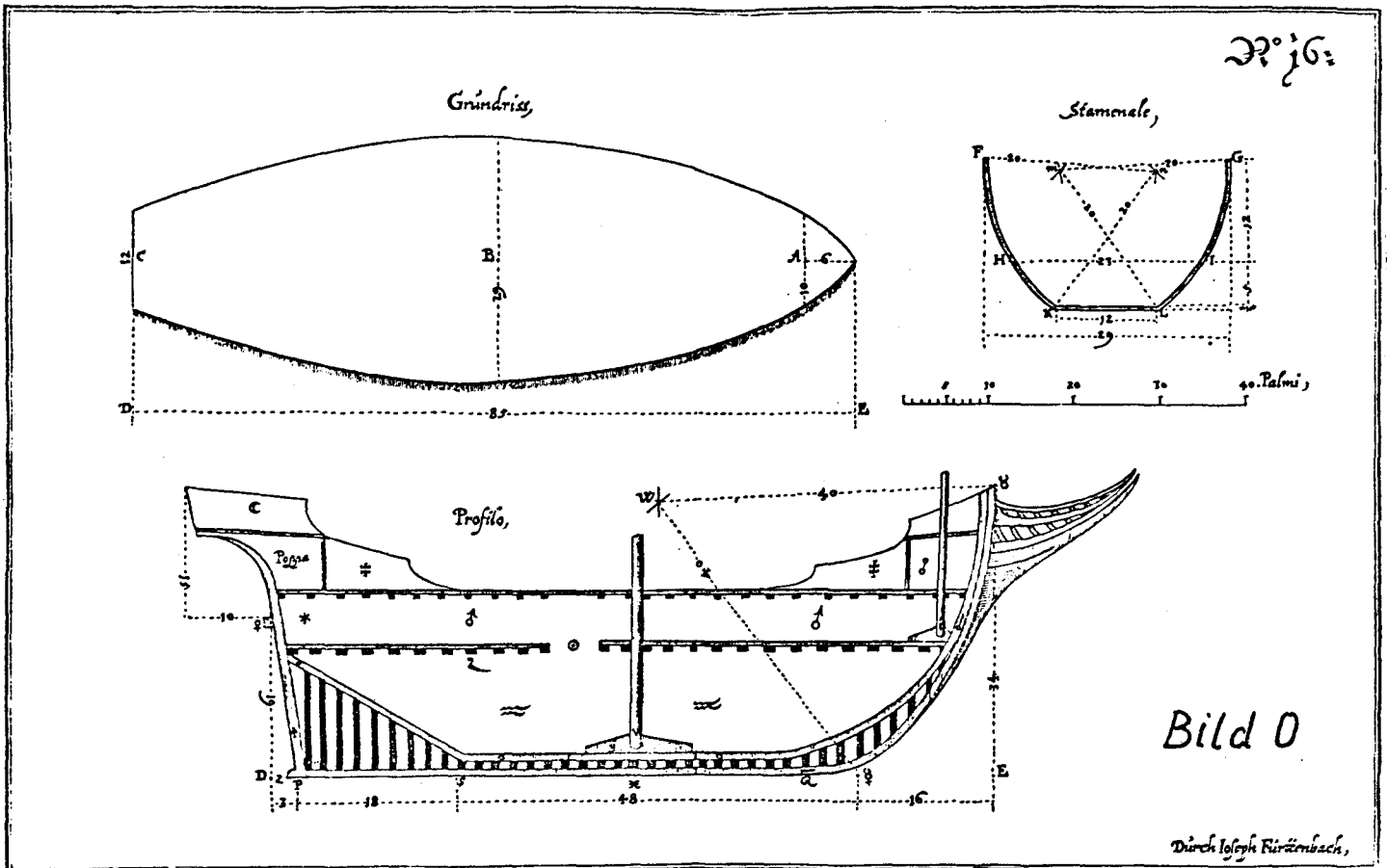
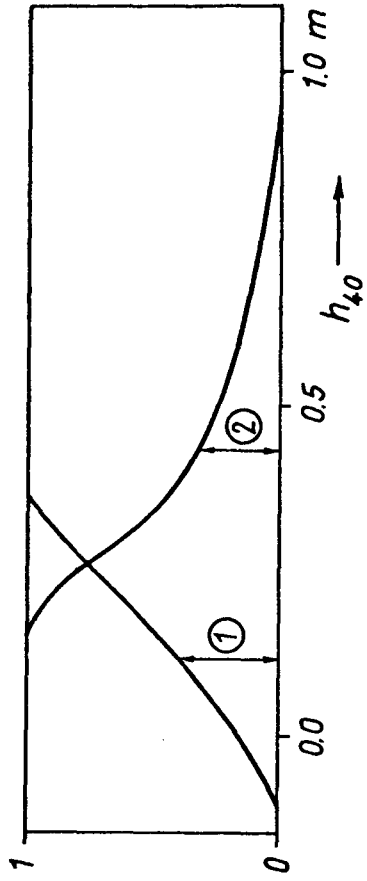


Bild 0

Durch Joseph Fürstbisch,



- ① = W {Hebel von unsicheren Schiffen $< h_{40}$ }
- ② = W {Hebel von sicheren Schiffen $> h_{40}$ }

Bild 2

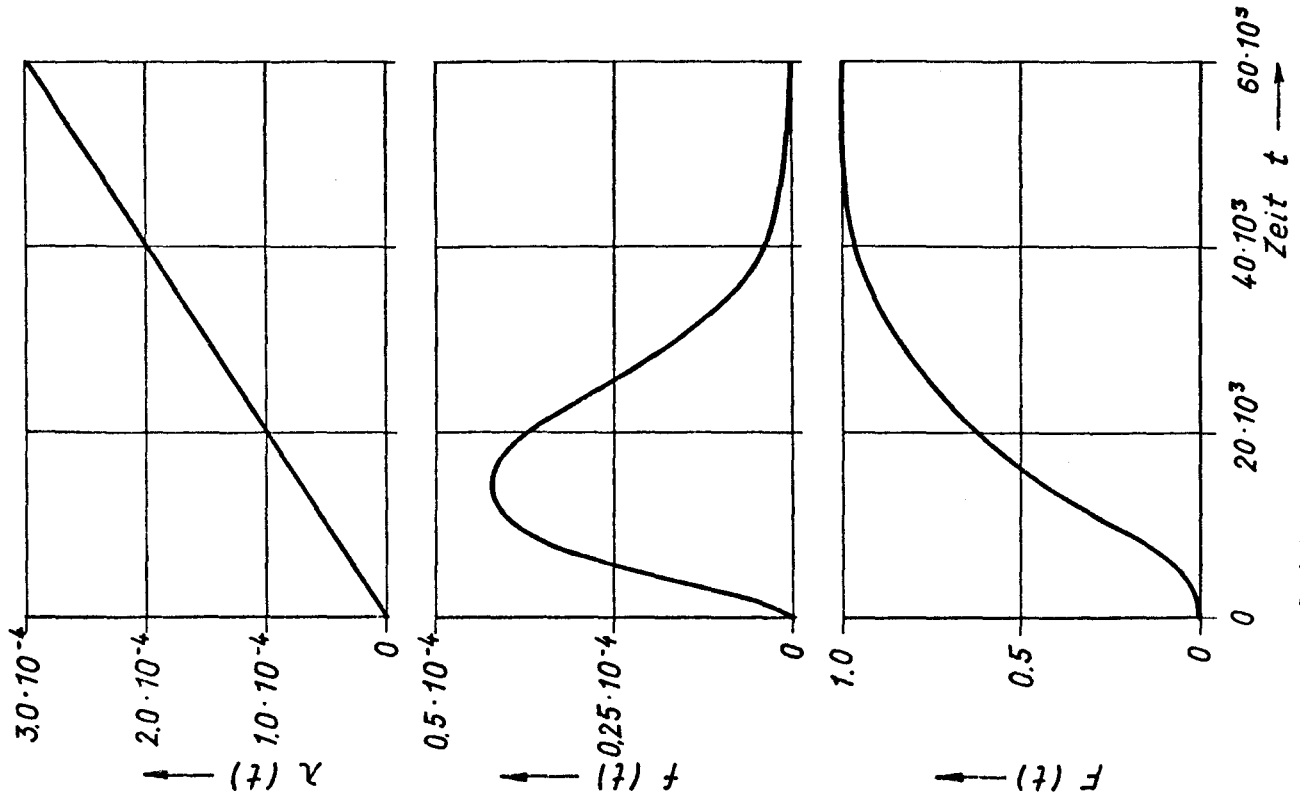
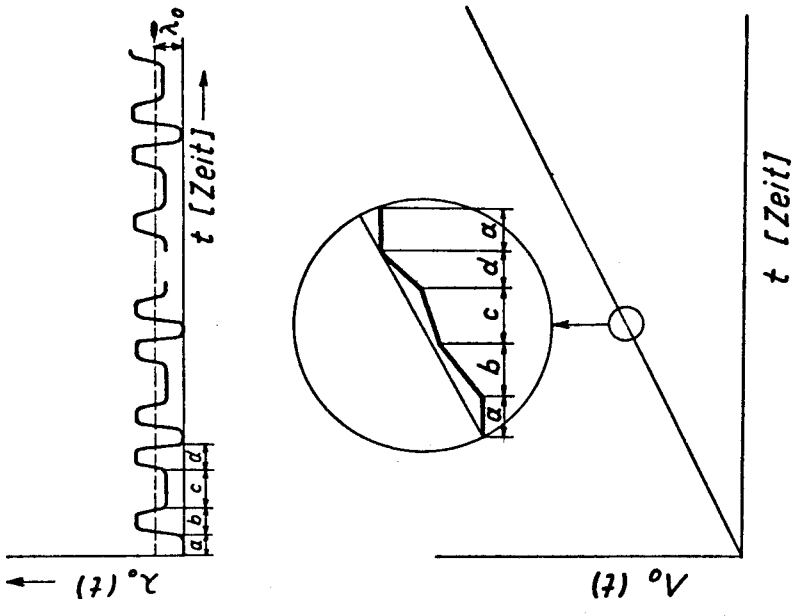
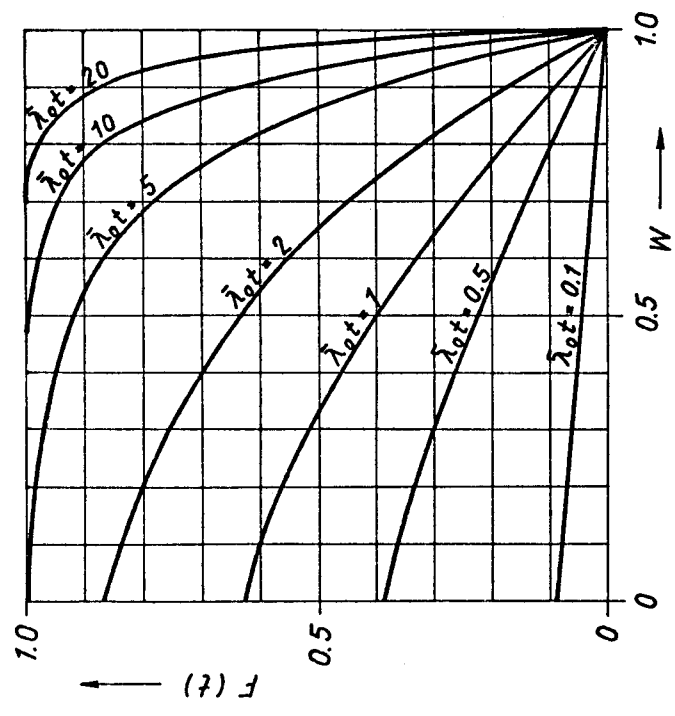


Bild 3



$$\Lambda_0(t) = \int_0^t \lambda_0(t) dt \doteq \bar{\lambda}_0 \cdot t, \quad \bar{\lambda}_0 = \frac{n_K}{n \cdot T}$$

Bild 4



Wahrscheinlichkeit für Nichtsinken nach einer Kollision = W
 Verlustrate infolge Kollision = $\lambda(t) =$
 $= \lambda_0(t) (1-W) \doteq \bar{\lambda}_0 (1-W)$

Verlustwahrscheinlichkeit infolge Kollision =
 $F(t) = 1 - e^{-\bar{\lambda}_0 (1-W) \cdot t}$

Bild 5

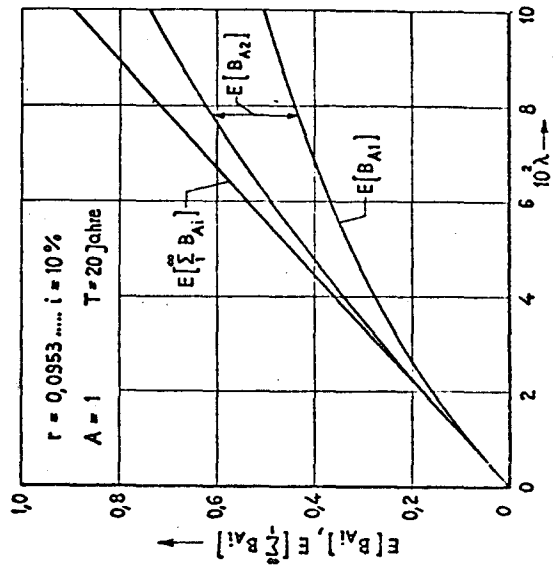
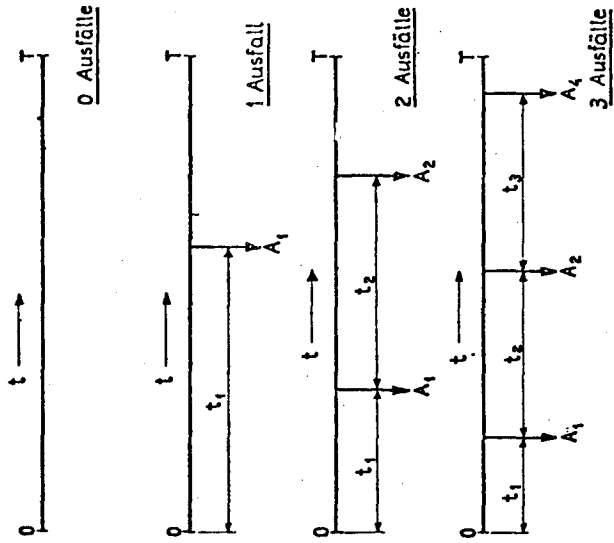
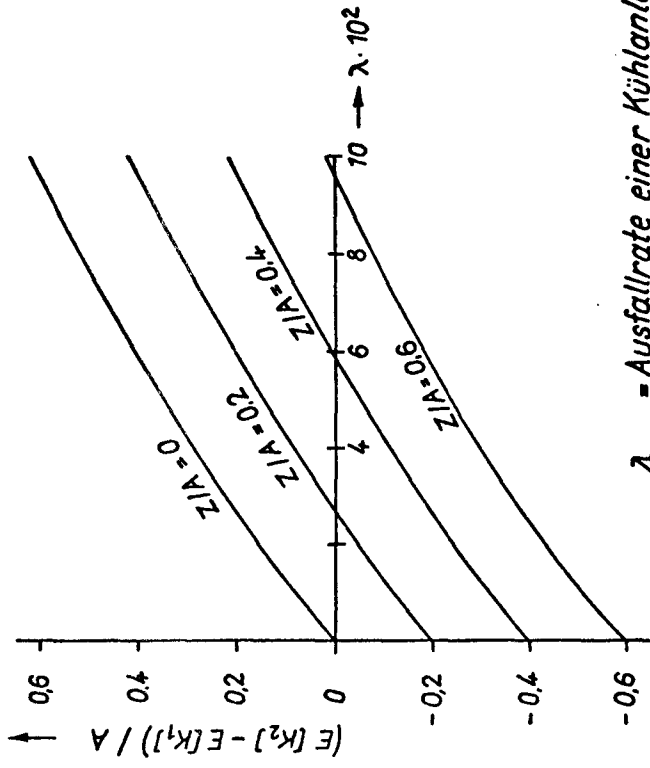


Bild 6



λ = Ausfallrate einer Kühlanlage

Z = Mehrkosten für eine Reservekühlanlage

A = Mittlerer Verlust bei Ausfall der Kühlanlagen

$E[K_1]$ = Erwartung des Kapitalwertes mit 1 Kühlanlage

$E[K_2]$ = Erwartung des Kapitalwertes mit 2 Kühlanlagen

Bild 7

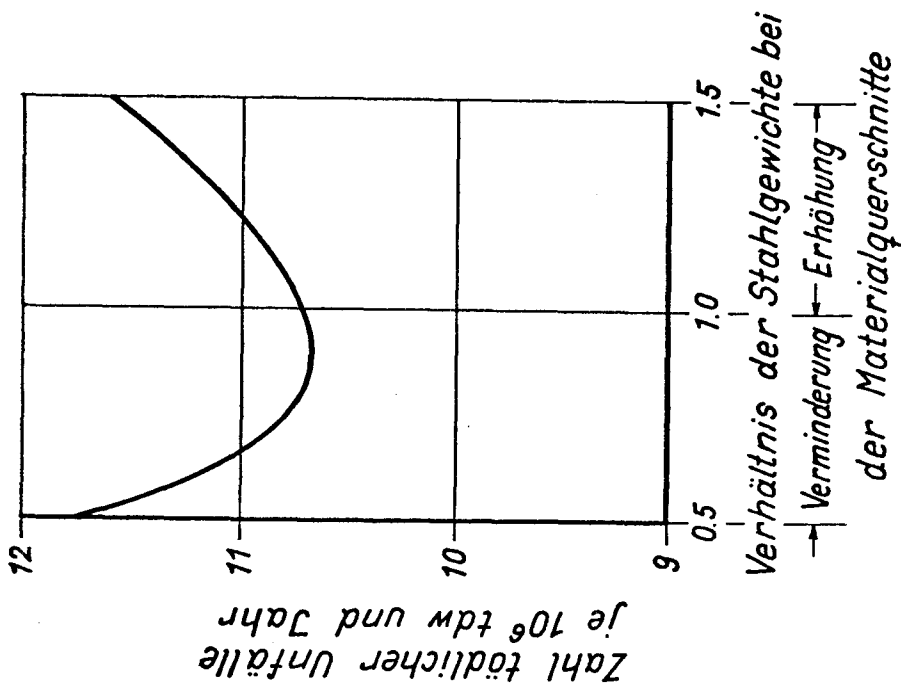


Bild 8

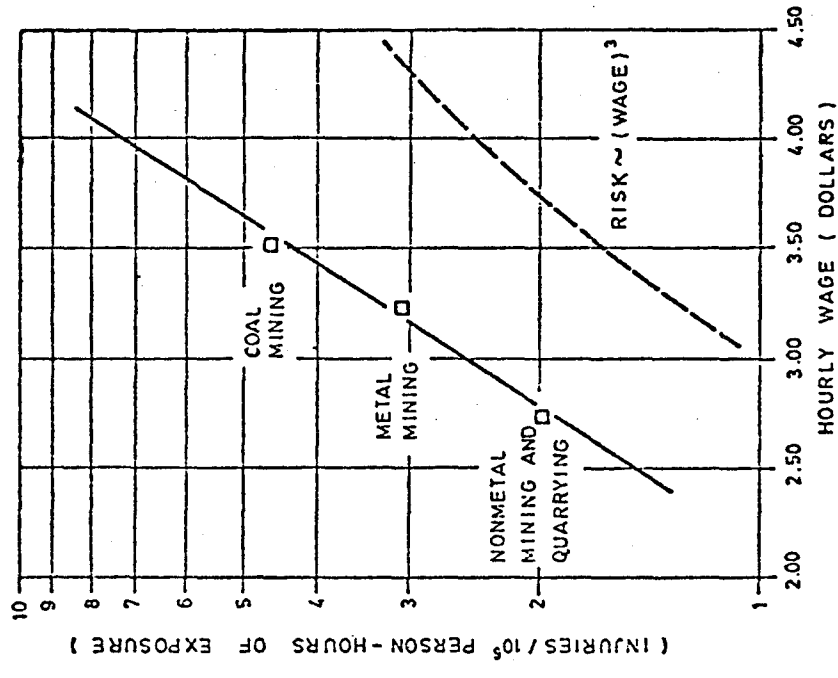


Bild 9

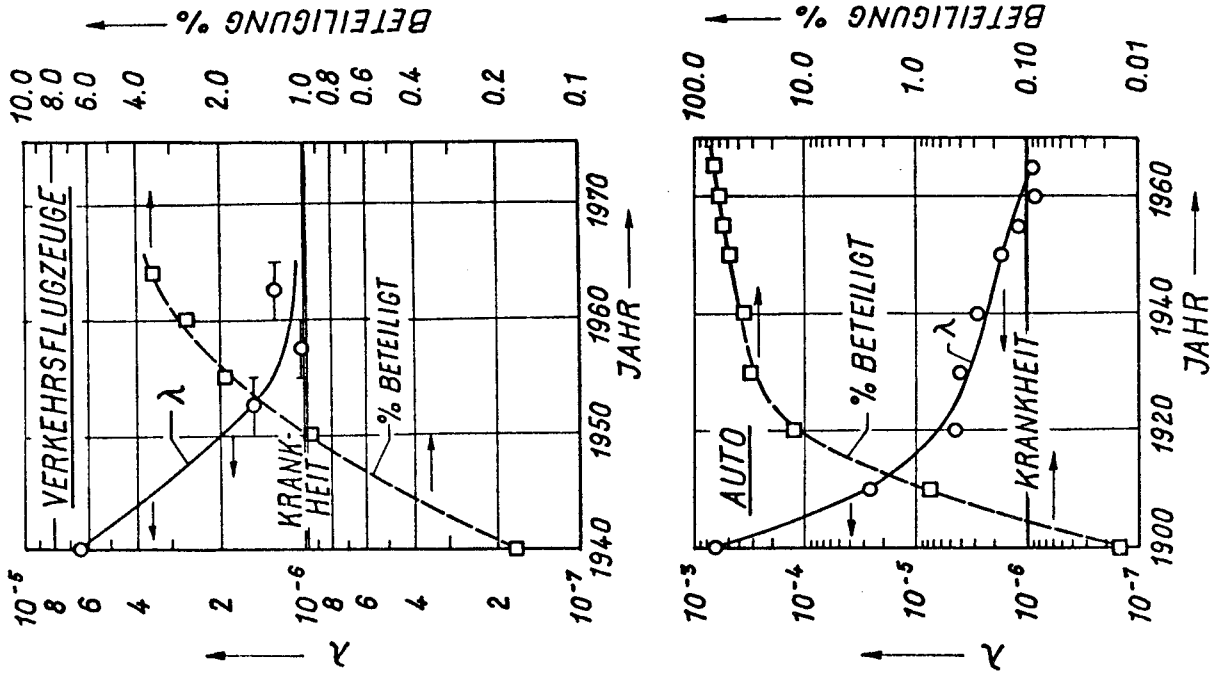


Bild 11

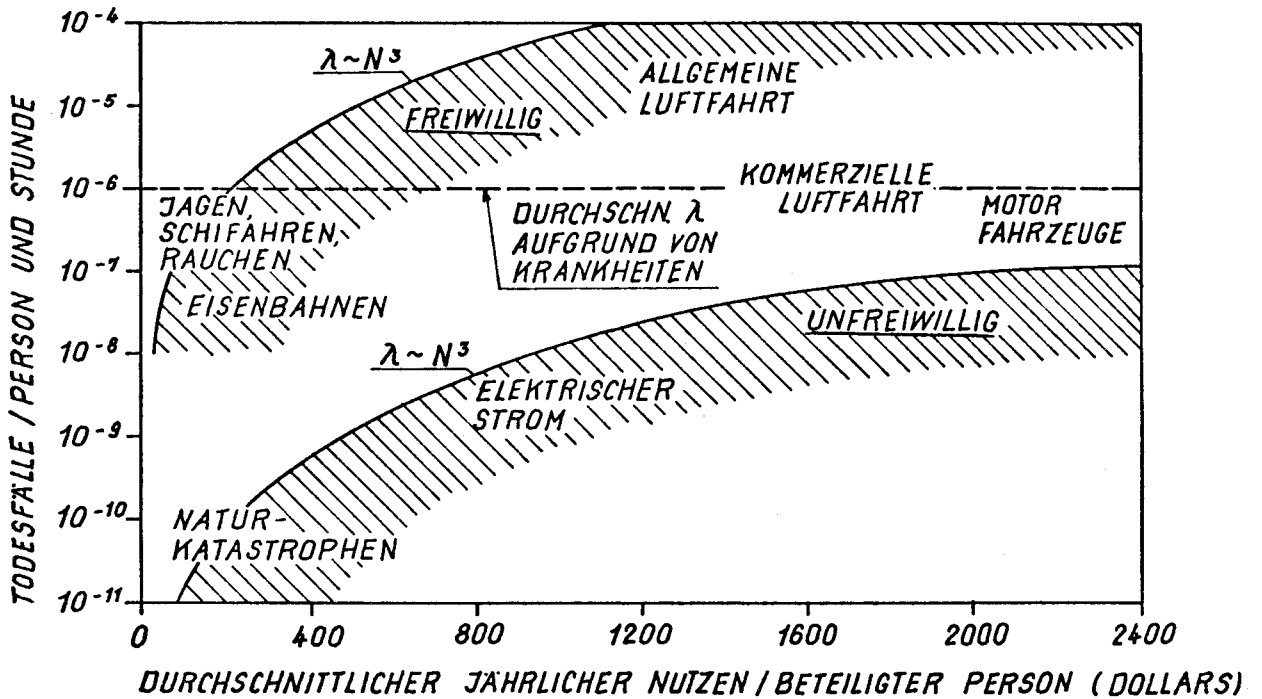


Bild 10

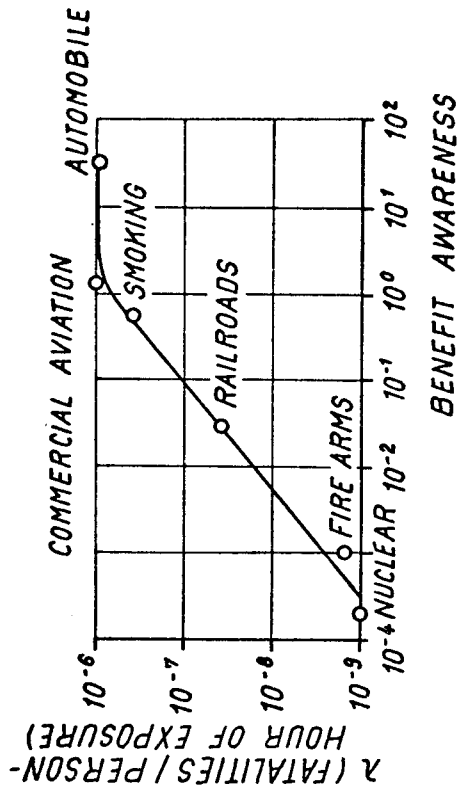


Bild 12

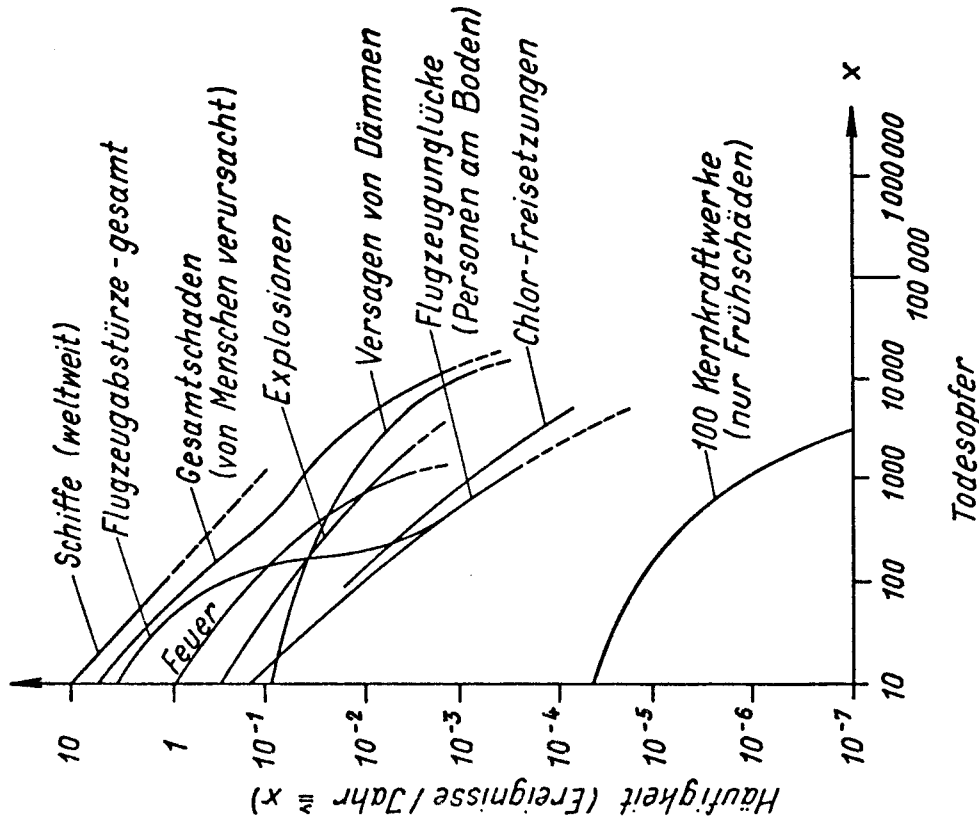


Bild 13

$$W \{ \text{Verlust durch Kollision} \} = 1 - e^{-\bar{\lambda}_0(1-W) \cdot t}$$

$$W \{ \text{Kollision} \} = 1 - e^{-\bar{\lambda}_0 t}$$

Kollisionsrate $\bar{\lambda}_0$

$$W \{ \text{Überstehen einer Kollision} \} = W =$$
$$= \frac{\text{Menge der ertragbaren Lecks}}{\text{Menge der möglichen Lecks}}$$

Zusätzliche Forderung:

Kleine Lecks müssen "fast immer"
ertragen werden können!

Bild 14