

ZUR TECHNIK VON MODELLVERSUCHEN MIT DEN KOLLISIONSSCHUTZSTRUKTUREN VON REAKTORSCHIFFEN

G. WOISIN,

*Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH,
Geesthacht, Germany*

Abstract

Collision tests using a bow and a side model have been carried out in Japan and in Italy and in 1967 in a small series of three tests in Western Germany. These are continued now after a two years stop. The models were structures almost exactly simulated to the real ships in the potentially damaged zones. The model scale of 1 to 7.5 was really tall against the Japanese and the Italian tests. The reason was to be able to weld all the joints in the models, without simplifications of the structure too much, and without dislocations in fabrication too big. The tests took place at Hamburg on a test stand specially build, with a truck of up to 23 tons weight and with the bow model on its front side, accelerated up to 10 m/s by running down an inclined rail. At the end of the rail the truck ran into horizontal direction and hit the side model fixed to the ground.

The ends of the models must be stretched equivalent to the responses in the real ships, as far as the kind of damages is influenced by them. No special arrangements are needed in this respect to the bow model, in the normal case of a test simulating a right-angled collision without speed of the rammed ship. According to the side model a special bending girder has approved, which simulates the horizontal bending of the rammed ship to the side shell of the model. In that way the tensile-tie effect of the side shell observed many times before in similar foreign tests, which apparently does not appear in real collisions, was avoided.

As far as in tests of this kind the bow models are folded in a symmetrical and regular way like an accordion, as has happened in one case of our tests in a part of the bow height, the damages seem to be unrealistic. But in reality exactly right-angled impacts without any speed of the rammed ship are just very seldom. In collision model testing there is no chance to simulate other collisions because those would need still much more expensive testing arrangements.

Gliederung

1. Einleitung
2. Art des Versuchsstandes
 - 2.1 Führung der Modelle
 - 2.2 Erzeugung der Verformungsarbeit
 - 2.3 Art des simulierten Stoßes
3. Die Modelle
 - 3.1 Der Modellmaßstab
 - 3.2 Art und Größe der Modellausschnitte
 - 3.3 Mögliche starre Modellformteile
 - 3.4 Die Modellherstellung
4. Befestigung der Modelle am Versuchsstand
 - 4.1 Befestigung des Vorschiffsmodells
 - 4.2 Befestigung des Seitenmodells
5. Durchführung, Messung, Auswertung der Versuche
 - 5.1 Durchführung statisch oder in einem oder mehreren Stößen
 - 5.2 Messen und Auswerten bei einem Versuch in einem Stoß
 - 5.3 Zur Alternative mehrerer kleinerer Stöße
 - 5.4 Zur Alternative eines statischen Verfahrens
 - 5.5 Streuung des Versuchsergebnisse
6. Umrechnung auf wirkliche Kollisionen
 - 6.1 Maßstabsgesetze und Maßstabseffekte
 - 6.2 Individuelle Modelleffekte
 - 6.3 Berücksichtigung der Wasserdruckkräfte
 - 6.4 Nachahmung einer wirklichen Kollision
7. Schluß
8. Schrifttum

1. Einleitung

Kollisionen zwischen Schiffen können nach dem augenblicklichen Entwicklungsstand der Kollisionsverhinderungssysteme nicht aus den für die Bau- und Betriebsgenehmigung eines Schiffsreaktors erforderlichen Unfallbetrachtungen ausgeschlossen werden. Die Häufigkeitsrate liegt z. Zt. in der Größenordnung von ca. 10^{-2} bis 10^{-3} Kollisionen je Schiff und Jahr.

Die Kollisionsschutzstruktur in einem Reaktorschiff dient dazu, die Reaktoranlage im Fall einer Kollision gegen unmittelbare Beschädigung zu schützen, indem rammende Vorschiffe an einer Eindringung bis zur Reaktoranlage gehindert werden. Der Schutz soll so gut sein, daß er die Wahrscheinlichkeit einer unmittelbaren Kollisionsbeschädigung eines bestimmten Schiffsreaktors theoretisch zu 0 oder doch sehr klein macht, z. B. 10^{-6} je Jahr.

Infolge der größeren für die Eindringung in die Kollisionsschutzstrukturen erforderlichen Stoßkraft scheint ein Durchbrechen des gerammten Reaktorschiffes möglich; der Bruch soll durch entsprechende Ausbildung des Schiffs-

körpers nicht im Reaktorbereich erfolgen.

Der Zweck von Modellversuchen ist nun, für die unmittelbare Wirkung von verschiedenen Kollisionsschutzstrukturen Unterlagen zu erhalten. Denn sie ist heute noch nicht oder doch höchstens sehr genau berechenbar. Die mittelbaren Auswirkungen, wie Stoßbeschleunigungen und Durchbruchgefahr, lassen sich dann daraus weitgehend ableiten.

Die Versuche beschränken sich auf die Untersuchung der inneren Mechanik, so genannt im Unterschied zur äußeren Mechanik. Die innere Mechanik betrifft das Ausmaß der elastischen oder plastischen Verformungen bei einem gewissen umzusetzenden Stoßenergiebetrag und die äußere Mechanik betrifft die Ermittlung der Größe dieser Energie.

Es sind in Italien, Japan und der Bundesrepublik Deutschland auch besondere Versuche mit schwimmenden Modellen zu einer Frage der äußeren Mechanik, und zwar nach der Größe der Wasserdruckkräfte bei einer Schiffskollision angestellt worden. Die betreffenden Modelle hatten keine inneren Strukturnachbildungen und die Versuchstechnik war ganz anderer Art. Ihre ebenfalls spezielle Problematik wird hier nicht behandelt.

Zum Fragenkreis der inneren Mechanik wurden inzwischen vielerlei Versuche durchgeführt:

- a) Statische und Stoßversuche mit einzelnen Bauteilen oder sogar nur möglichen Elementen einer Kollisionsschutzstruktur in Japan, Großbritannien und in der Bundesrepublik Deutschland [1 - 3] ;
- b) Kollisionsstoßversuche mit ganzen, aber stark vereinfachten Strukturmodellen in sehr kleinem Modellmaßstab in Japan [4 - 6] ;
- c) Kollisionsstoßversuche mit ganzen und nicht oder nur wenig vereinfachten Schiffsteilmodellen in Italien und in der Bundesrepublik Deutschland [7-9].

Hier geht es nur um die zuletzt unter c) genannte Gruppe von Versuchen, die schwierig durchzuführen sind.

Die Italiener, mit denen wir über die seinerzeitige EURATOM-Kommission [10 - 12] engen Kontakt hatten, führten ihre Versuche z. T. vor unseren aus. Die Zusammenarbeit ging soweit, daß nicht nur die Versuche vielfach gegenseitig besucht und ihre Ergebnisse gemeinsam diskutiert wurden, sondern daß auch Bugmodelle z. T. nach denselben wirklichen Schiffen angefertigt wurden. Der Zweck war, die Versuchsergebnisse besser miteinander vergleichen zu können. Durch die Zusammenarbeit, die übrigens völlig freiwillig zustande kam, konnten bei den deutschen Versuchen Erfahrungen von den italienischen Versuchen z. T. von vornherein berücksichtigt werden.

Es entwickelte sich regelrecht ein besonderes "know how" von Kollisionsmodellversuchen. Dieses "know how" soll in diesem Beitrag systematisch dargestellt werden.

Nicht der Wert, jedoch die Zweckmäßigkeit dieser Versuche mit genauen Nachbildungen von Schiffsstrukturen ist wegen ihrer hohen Kosten teilweise umstritten, zumal sie überwiegend oder ausschließlich aus öffentlichen Geldern finanziert werden müssen. Kritiker sind der Meinung, die nötigen Erkenntnisse könnten auch mit einfacheren Modellen billiger und, bei statischer Versuchsdurchführung, aufschlußreicher gewonnen werden. Wegen unserer Erfahrungen, die wir mit einfacheren und z. T. auch statischen Versuchen gemacht haben, bin ich jedoch vom Gegenteil überzeugt: nur aufgrund von regelrechten Stoßversuchen mit genau nachgebildeten Modellen in ausreichend großem Modellmaßstab lassen sich ohne zu viele Einschränkungen und Zweifel die nötigen Übertragungen auf wirkliche Schiffskollisionen durchführen. Versuche mit vereinfachten Modellen oder statisch durchgeführte Versuche sind nur für die Beantwortung von Detailfragen wie die der gültigen Ähnlichkeitsgesetze nützlich.

Die geschaffene Versuchsmethode hat ihren Wert nicht nur für die Durchführung von allgemeinen Entwicklungs- und Forschungsarbeiten. Vielmehr kann mit ihr im konkreten Fall eines Reaktorschiffes die Schutzwirkung eines vorgeschlagenen Kollisionseindringungsschutzes der staatlichen Genehmigungsstelle oder dessen Vertreter, z. B. einer Schiffsklassifikationsgesellschaft, experimentell nachgewiesen werden.

Das American Bureau of Shipping sieht in seinen Richtlinien für die Klassifikation von Kernenergieschiffen eine solche Behandlung des Kollisionsschutzproblems ausdrücklich für den Fall vor, daß der rechnerische Nachweis - etwa aufgrund von Erfahrungen bei wirklichen Kollisionen oder bei allgemeinen Modellversuchen - von ihr nicht als ausreichend angesehen wird [13].

2. Art der Versuchsstände

2.1 Führung der Modelle

Die Modelle, die bei einem Versuch zum Zusammenstoß gebracht werden, werden - beide oder eines von ihnen - auf einer Linie starr geführt. Eine Bewegung ist ihnen während des Stoßvorgangs nur in der Form einer Translation auf dieser Linie möglich. Es steht beim Versuch also stets nur ein Freiheitsgrad anstelle der im allgemeinen zumindestens 3 Freiheitsgrade, in denen sich wirkliche Schiffe bei einer Kollision bewegen können, zur Verfügung. Im allgemeinen werden im Versuch nur die Bewegungen des rammenenden Schiffes in seiner Längsrichtung und des gerammten Schiffes im Reaktorbereich in seiner Querrichtung simuliert.

2.2. Erzeugung der Verformungsarbeit

Die auszuwertenden Modellschäden werden durch die Umsetzung kinetischer Energie in Verformungsarbeit erzeugt, Kinetische Energie entsteht durch die Beschleunigung des stoßenden Modells und der an ihr befestigten Masse beim Ablauen von einer schiefen Ebene. Die Umsetzung eines Teils oder des ganzen Betrages der kinetischen Energie in Verformungsarbeit erfolgt beim Zu-

sammenstoß mit dem in Ruhe befindlichen gestoßenen Modell. Dieses ist entweder starr an einem Prellbock oder an einer beweglichen Masse befestigt.

Beim Versuchsstand in Neapel [21] war zumindestens ursprünglich letzteres der Fall und dann die rammende und die gerammte Masse maßstäblich zu den Massen der wirklichen Schiffe ausgebildet. Am beweglichen gerammten Modell wurde dort zusätzlich der Wasserwiderstand gegen die Querbewegung des gerammten Schiffes simuliert, indem von ihm Bremsplatten in 2 Wassertanks zu beiden Seiten der Gleisführung eintauchten (Abb. 1). Die Stoßgeschwindigkeit wurde jeweils - durch entsprechende Veränderung der Beschleunigungsstrecke - im Maßstab 1 zur Wirklichkeit nachgebildet. Die Verformungsarbeit ΔE ergibt sich bei dieser Versuchsanordnung nur zu einem Bruchteil der zunächst erzeugten kinetischen Energie.

Beim Versuchsstand in Hamburg wird das gerammte Modell jeweils an einem starren Prellbock befestigt (Abb. 2). Die am rammenden Modell befestigte Masse und ihre Geschwindigkeit sind im wesentlichen dadurch bedingt, daß die kinetische Energie in vollem Betrag in Verformungsarbeit umgesetzt wird. Im Fall gleicher Versuchsgeschwindigkeit ist die stoßende Masse also kleiner als bei der Versuchsanordnung in Neapel.

Wird das gerammte Schiff exzentrisch gestoßen, so ist mit einer reduzierten Schiffsmasse m_{red} anstelle von m zu rechnen:

$$m_{red} = m \frac{i^2}{i^2 + p^2}$$

mit i = Trägheitsradius und p = Abstand der Stoßlinie vom \odot von m .

2.3 Art des simulierten Kollisionsstoßes

Es können mit den Versuchsständen in der Regel nur - mechanisch gesehen - axialsymmetrische Kollisionen simuliert werden. Durch die Stoßkraft, die die Modelle aufeinander ausüben, kann deren Relativbewegung nur abgebremst, aber nicht in der Richtung verändert werden. Im allgemeinen unsymmetrischen Fall einer Kollision ist es dagegen wahrscheinlich, daß die Stoßkraft nicht parallel zur Relativgeschwindigkeit ist.

Die Axialsymmetrie einer Kollision ist weitgehend gewährleistet, wenn

- 1) die plastisch verformte Struktur beider Schiffe axialsymmetrisch ist, und
- 2) die Richtung der Stoßkraft, d. h. nach 1) diejenige der Relativgeschwindigkeit, an beiden Schiffen mit der Richtung eines Minimums oder eines Maximums der Massenträgheit zusammenfällt (d. h. praktisch, wenn die Stoßkraft am gerammten Schiff nur quer- und am rammenden nur längsschiffsgerichtet ist).

Der Kollisionsstoß kann dabei für das gerammte Schiff exzentrisch sein, da die Änderung des Kurswinkels beider Schiffe zueinander während der Stoßdauer vernachlässigbar klein bleibt. Praktisch kann jeder Fall eines recht-

winkligen Rammstoßes in ein Schiff ohne eigene Geschwindigkeit simuliert werden. Das ist eine gewisse Einschränkung mit folgenden Nachteilen:

- 1) Es treten bei den Versuchen weit häufiger ziehharmonikaartige regelmäßige und symmetrische Zusammenfaltungen des Vorschiffsmodells auf als in Wirklichkeit bei Kollisionen zu beobachten (s. beispielsweise Abb. 3 und 4 vom Vorschiffsmodell nach dem 2. Versuch in Hamburg und [10]).
- 2) Die Festigkeit der Kollisionsschutzstrukturen gegen Kraftkomponenten in Längsrichtung des gerammten Schiffes oder auch eines Vorschiffes in Schiffsquerrichtung bleibt im Versuch ungeprüft.
- 3) Es kann sein, daß ein anderer Kollisionsstoß im Reaktorbereich ungünstiger ist, als der zur Außenhaut des gerammten Schiffes rechtwinklige Stoß. Z. B. wird durch die eigene Geschwindigkeit des Reaktorschiffes die umzusetzende Energie vielfach größer. Damit wird u. U. auch die Eindringtiefe zur Reaktoranlage hin größer.

Es gibt die folgenden Ausnahmen von der Regel, daß keine unsymmetrischen Stöße simuliert werden können:

- 1) Der erste Augenblick eines unsymmetrischen Stoßes kann auch im Versuch simuliert werden, z. B. mit entsprechend verringerter Energie, nämlich solange der Geschwindigkeitsvektor der Relativbewegung im Auftreffbereich auch im wirklichen Kollisionsfall noch nicht erheblich aus der anfänglichen Richtung kommen würde (dies interessiert für Kollisionsfälle, bei denen der erste Augenblick entscheidend ist, z. B. für das Entstehen eines Loches in der seitlichen Außenhaut).
- 2) Wenn vorausgesetzt werden kann, daß fast ausschließlich das rammende Vorschiffsmodell beschädigt wird, kann unter Vernachlässigung der Reibungskräfte in der Längsrichtung der seitlichen Außenhaut, die bei einem solchen "streifenden" Stoß entstehen, auch diese Kollision simuliert werden.

Bei 1) muß man die Modelle so schräg zum Versuchsgeschwindigkeitsvektor anordnen wie die Schiffe in Wirklichkeit zur Relativgeschwindigkeit liegen. Bei 2) ist dagegen nur die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Außenwand des Seitenmodells im Versuch nachzubilden und die Modellanordnung dementsprechend vorzusehen. Es ist in beiden Fällen ein Moment um die Hochachse am Wagen dadurch möglich, daß in der Draufsicht die Stoßkraft nicht durch den Massenmittelpunkt des Wagens samt Modell und Gewicht zielt. Dieses Moment muß die Führung des Wagens aufnehmen können.

3. Die Modelle

3.1 Der Modellmaßstab

Der Maßstab der Modelle war bei den Versuchen in Neapel meistens 1:15, bei denjenigen in Hamburg bisher 1:7,5. Er war in Hamburg aus den folgenden Gründen so groß gewählt worden:

- 1) Dadurch waren keine so großen Vereinfachungen wirklicher Schiffsstrukturen nötig.
- 2) In den Modellen konnten alle Verbindungsstellen geschweißt werden, was sich als für die Ähnlichkeit plastischer Verformungen zur Wirklichkeit nötig herausgestellt hat.
- 3) Es traten dennoch keine zu großen Verwerfungen der Modelle bei der Herstellung auf.
- 4) Die Kapazität des Versuchsstandes in Hamburg reichte bei den bisherigen Modellversuchen für den Modellmaßstab 1 : 7,5 gerade aus.

Bei dem Modellmaßstab 1:7,5 ergaben sich die dünnsten Blechdicken in den Modellen zu ca. 1,0 mm. Diese Blechdicke ist nach Vorversuchen in Hamburg die untere Grenze zur Erfüllung der Punkte 1) bis 3). Es wird andererseits nicht für zweckmäßig gehalten, die Modelle noch größer auszuführen, weil die Kosten für den Versuchsstand usw. erheblich steigen.

Der Versuchsstand in Hamburg hat eine maximale Stoßmasse von 23 t und eine maximale Fallhöhe von 5,7 m.

Bei größeren Schiffen als denen, die bis jetzt auf dem Versuchsstand in Hamburg simuliert wurden, kann ein kleinerer Modellmaßstab als 1:7,5 genommen werden, sofern die genannten Blechdicken 1,0 mm nicht wesentlich unterschreiten. Nicht der abstrakte Modellmaßstab, sondern die konkreten Blechdicken sind das Kriterium für die Ausführbarkeit.

3.2 Art und Größe der Modellausschnitte

Die Modellausschnitte sollten prinzipiell so groß sein, daß die möglicherweise bleibend verformten Bereiche von ihnen erfaßt sind. Ferner sollten die Modelle in diesem Bereich symmetrisch ausgebildet sein.

Problematisch sind dabei die für die betreffenden Entscheidungen erforderlichen Vermutungen über die Stellen bleibender Verformungen, da die bisherigen Erfahrungen aus Kollisionen wirklicher Schiffe sich weitgehend auf seitlich nicht besonders verstärkte Schiffskörperstrukturen beschränken. Es ist z. B. denkbar, daß das gerammte Schiff durchbricht oder zumindestens plastisch verbiegt, und daß am rammenden Vorschiff weitab von der Auftreffstelle Falten in der Außenhaut und in den Längsverbänden hervorgerufen werden.

Bleibend können verformt werden:

- 1) die Auftreffstelle;
- 2) die Abstützungsbereiche, d. h. die Stellen der Kräfteinleitung in die Schiffskörper;
- 3) die Stellen, an denen die Schiffskörper im ganzen, z. B. infolge Längsbiegung, überbeansprucht und bleibend verformt werden, evtl. sogar auseinanderbrechen;

4) die Abstützungen schwerer Teile in den Schiffen.

Man beschränkte sich bisher auf die naturgetreue Nachbildung der unter 1) und 2) genannten Bereiche und rechnerische Untersuchungen zu 3).

Auch wurden die Auftreffbereiche nur ohne Reaktorbauteile simuliert; lediglich bei einem Versuch in Hamburg wurde eine Betonabschirmwand, die zwischen den Kollisionsschutzstrukturen und dem Sicherheitsbehälter liegt, simuliert.

Die Nachbildung einer Reaktoranlage oder von Teilen derselben wird wegen der erforderlichen naturgetreuen Wiedergabe der Abstützungen im Schiffskörper sehr teuer. Die Nachbildungen haben auch nur Sinn, wenn bei großen Kollisionsgeschwindigkeiten die Kollisionsschutzstrukturen durchbrochen werden könnten. In solchen Fällen muß versucht werden, die Ergebnisse von Modellversuchen weniger schwerer Kollisionen auf schwere Kollisionen mit Schäden am Reaktor zu extrapolieren.

Das Vorschiffsmodell hat meistens ungefähr die Länge bis zum ersten Querschott, dem sogenannten Kollisionsfrontschott, das in einem Abstand von mindestens $1/20$ der Schiffslänge vom vorderen Lot eines Schiffes stehen muß. Das Seitenmodell des geramnten Schiffes reicht üblicherweise in Richtung der Eindringtiefe bis zum Seitenlängsschott oder sogar bis zur Schiffsmittlebene, in der Länge über die Enden des Reaktorraumes einschließlich der Querschotte hinaus und in der Höhe über die volle Seitenhöhe eines Schiffes vom Schiffsboden bis zum obersten durchlaufenden Deck, evtl. sogar bis zu einem Aufbaudeck.

Handelt es sich um spezielle Fragestellungen, die nur den einen oder anderen Schadensbereich betreffen, so kann ein Versuch mit Teilmodellen dieses Bereichs genügen.

3.3 Mögliche starre Modellformteile

Teile der Modelle, von denen sicher angenommen werden kann, daß sie unbeschädigt bleiben, und die auch keinen speziellen Einfluß, etwa durch elastische Einspannwirkung, auf das plastische Verhalten anschließender Teile haben, können durch starre Modellformteile ersetzt werden.

Verkehrt wäre es jedoch, ein ganzes Vorschiffsmodell, obwohl es zumindestens örtlich beschädigt werden könnte, als starre Form (z. B. in Stahlbeton) herzustellen. Es wäre zwar die Überlegung, daß damit die gesamte Stoßenergie im geramnten Modell in Verformungsarbeit umgesetzt werden müßte, richtig, nicht jedoch die Folgerung, daß dies deswegen auch der ungünstigste Fall einer Kollision sei (s.z.B. [2]). Vielmehr dürfte der Bremsweg eines rammenden Modells dadurch kürzer werden und damit möglicherweise auch die größte örtliche Eindringtiefe. Gegen das Argument einer leichteren theoretischen Analyse der Schäden in diesem Fall wäre anzuführen, daß die Versuche und die Theorie keinen Selbstzweck haben.

3.4 Die Modellherstellung

Die Herstellung der Modelle betrifft hauptsächlich die Frage der Verbindungsverfahren. Im Flugzeugbau sind Festigkeitsversuche mit weichgelöteten Modellen üblich. Die Lötverbindung ist dann allerdings flächig. Der Vorteil gegenüber Hartlötten oder Schweißen ist die geringe Wärmezufuhr und die dementsprechend geringe Größe von Verwerfungen bei dünnen Blechen. Die nicht ganz modellähnliche Form der Verbindungen und das andere Festigkeitsverhalten - bei Beanspruchungen im plastischen Bereich und bis zum Bruch - als bei den wirklichen Schweißnähten macht das Weichlöten zum ungeeigneten Verbindungsverfahren für Kollisionsstrukturmodelle. Nach [2] ist diese Erfahrung sogar bei harter Lötung mit Silberlot gemacht worden.

Die Modelle für den Versuchsstand in Hamburg werden bei der Fa. Sachse u. Co. in Berlin hergestellt. Dabei wird ein Schutzgasschweißverfahren angewendet, bei dem der Zusatzwerkstoff automatischen Vorschub hat und aus der Schweißpistole selbst hervortritt, so daß auch an nur für eine Hand zugänglichen Stellen in den Modellen geschweißt werden kann. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die beiden Modelle des ersten Versuches in Hamburg Ende 1966 in der Fertigung in Berlin.

Unrealistisch scheinende ziehharmominkaartige, regelmäßige Zusammenfaltungen von Vorschiffsmodellen, die im Abschnitt 2.3 erwähnt wurden, können auch durch mangelhafte Werkstoffverbindungen im Vorschiffsmodell begünstigt werden ([19] - Anhang).

Noch ein Wort zum Modellwerkstoff. Schiffbaustahl gibt es in den im wesentlichen 3 Gütegraden A, B/C, D/E. Dünnere Bleche gibt es nur in Gütegrad A, d. h. ohne die gewisse besondere Behandlung bei der Herstellung, die die anderen Gütegrade erfahren. Die für die Modellherstellung benötigten Bleche von 1,0 bis 3,5 mm Dicke sind in Schiffbaustahl (St 42 S) überhaupt nicht handelsüblich und müssen für die Modellherstellung besonders angefertigt werden. Dabei wird vom Walzwerk erfahrungsgemäß eine Abnahme von mindestens 6 t je Blechdicke verlangt. Die eigentlich nötigen Blechdicken müssen deswegen zu wenigen Blechdicken zusammengelegt werden.

4. Befestigung der Modelle am Versuchsstand

Die Modelle werden in Hamburg mittels an den Modellenden angeschweißten Randwinkeln, Laschen oder "Spannrahmen" und mittels Paßschraubenbolzen und Muttern an dem Wagen und dem Prellbock befestigt, wobei eine Verspannung der Modelle allerdings vermieden werden muß, was ggfs. mit Futterblechen möglich ist.

4.1 Befestigung des Vorschiffsmodells

Das Vorschiffsmodell wird an einer "Grundplatte" von ca. 50 mm Dicke ohne elastische Unterlegscheiben befestigt. Die elastische Zusammendrückung des rammenden Schiffes in seiner Längsrichtung ist u. E. nämlich unbedeutend.

Das Vorschiffsmodell muß dabei jedoch möglichst "satt" an der Grundplatte anliegen, damit keine unwirklichen Kräfteinleitungskonzentrationen entstehen, die zum Beulen der Außenhaut an diesen Stellen führen könnten.

4.2 Befestigung des Seitenmodells

Das Seitenmodell wird in Hamburg an seinen Enden in Schiffslängsrichtung ebenfalls an 50 mm dicken ebenen Stahlplatten befestigt. An diesen quasi starren Querscheiben werden die durchlaufenden Längsverbände des Modells, also Außenhaut, Längsschotte, Hauptdeck, weitere durchlaufende Decks, Doppelbodentankdecke und Schiffsboden mit ihren Längsversteifungen und -Trägern, alle in den erwähnten Spannrahmen gesammelt, angeschlossen. Die Verbindung mit diesen Querscheiben ist ebenfalls ohne besondere Elastizität ausgebildet.

Das Seitenmodell wird aber außerdem "zur anderen Schiffseite hin" abgestützt, und zwar an einer Konstruktion, die den Verformungswiderstand der anderen, dem Seitenmodell fehlenden Schiffseite nachbildet. Dabei wird vor allem auch die neutrale Faser bei waagerechter Biegung in der Schiffsmittellebene für das Seitenmodell simuliert, zumindestens solange die Außenhaut noch nicht aufgerissen ist. Das Seitenmodell muß dabei lang genug sein, um die Decks und den Schiffsboden mit einer der Wirklichkeit entsprechenden Schubsteifigkeit zur anderen Schiffseite hin anschließen zu können. Die erwähnten Scheiben an den Enden des Modells sind mit dieser Konstruktion verschweißt.

Diese Aufspannvorrichtung des Seitenmodells ist ihrerseits nur an den auskragenden Enden gegen den Prellbock abgestützt. Sie bildet so einen an zwei Punkten frei drehbar und verschieblich aufgelagerten Biegeträger, der zusammen mit dem montierten Seitenmodell für dieses und insbesondere für seine seitliche Außenhaut die Durchbiegung des ganzen Schiffskörpers bei einer Kollision simuliert (s. Abb. 7 und [15]).

Bei Verwendung dieser Aufspannvorrichtung für das Seitenmodell traten bei den bisherigen Versuchen in Hamburg keine unrealistischen Schadensbilder am Seitenmodell auf. Die andernorts bei Modellversuchen beobachteten Eindrückungen der Außenhaut des Seitenmodells außerhalb des unmittelbaren Auftreffbereiches sind bei wirklichen Kollisionen von uns nicht festgestellt worden und zumindestens nicht typisch. Sie dürften in den Modellversuchen evtl. auf eine falsche Membranwirkung der an den Enden fixierten Außenhaut des Seitenmodells zurückzuführen sein.

Obwohl sich mit der Auftreffstelle auf der Schiffslänge das Biegemoment sehr ändert, wurde bisher keine Änderung der Art des Außenhautschadens mit der Stelle auf der Schiffslänge bei wirklichen Kollisionen beobachtet. Daher wird vom Verfasser angenommen, daß zumindestens eine genaue Simulation des Biegemomentes, wie sie noch in den 3 ersten Versuchen in Hamburg angestrebt wurde, nicht nötig ist.

Es kann übrigens sein, daß uer andernorts an Vorschiffsmodellen häufiger beobachtete "Ziehharmonika - Effekt" außer oder statt auf die Einschränkung auf symmetrische Stöße und auf Weichlötung im Vorschiffsmodell auch auf einen zu großen Membraneffekt in der Außenhaut des Seitenmodells zurückgeht.

Abb. 8 (nach [16]) und Abb. 9 geben je ein Beispiel für einen Modell-außenhautschaden mit und ohne Membraneffekt. Der Membranschaden schließt nicht aus, daß die Außenhaut auch aufreißt, wenn es offenbar auch erst bei größerer Eindringtiefe eines rammenden Vorschiffes geschieht, als im Fall ohne Membraneffekt. Die beiden statischen Wirkungsweisen mit und ohne Membraneffekt sind in Abb. 10 vereinfacht dargestellt. Dabei ist im Fall "ohne Membraneffekt" zur Verdeutlichung sogar eine Druckspannung an den Enden der Außenhaut angenommen. Nach bisherigen Dehnungsmessungen gibt es dort jedoch im Versuch eine, wenn auch geringe Zugspannung.

Durch eine zu elastische Befestigung eines oder beider Modelle an den Wagenmassen bzw. am Prellbock, oder - bei einer Versuchsanordnung wie in Neapel - auch gegen die Bremsplatten, an denen die hydrodynamischen Zusatzmassen wirken, kann sich übrigens folgendes ereignen: durch ein Auseinanderfedern der Modelle nach der Kompressionsperiode des Stoßes werden ein großer Elastizitätsanteil der Verformungsarbeit und dadurch Phänomene vorgetäuscht, die in Wirklichkeit gar nicht gegeben sind [16] . Dabei kann es im Versuch dann unrealistischerweise auch zu einem oder mehreren Nachstößen kommen.

5. Durchführung, Messung, Auswertung der Versuche

5.1 Durchführung statisch oder in einem oder mehreren Stößen?

Ein Nachteil der Versuchsdurchführung durch einen dynamischen Stoß gegenüber einem statischen Zerstörungsversuch ist die schlechtere Meß- und Auswertbarkeit der Aufeinanderfolge der einzelnen Verformungen. Ferner ist es nicht möglich, einen bestimmten kritischen Zustand der Verformungen, z. B. einen maximal zulässigen Eindringweg, vorzugeben und dafür die kritische Energie bzw. Geschwindigkeit anzugeben. Vielmehr muß stets die Energiegröße vorgegeben werden.

Ein statischer Versuch dürfte jedoch nicht nur ca. 30 % kleinere Stoßkräfte anzeigen, sondern möglicherweise auch qualitativ ein anderes Schadensbild liefern als die zu simulierende Kollision. Es treten beim statischen Versuch nämlich keine, an den einzelnen Teilen möglicherweise unterschiedlich große, Schlagverfestigungen und Schlagversprödungen auf. Dagegen sind bei ihm sonst fehlende Kriechvorgänge möglich.

Wenn kein Verklemmen der Modelle ineinander erfolgt und die gegebenen Führungstoleranzen die Schäden nicht beeinflussen, sind mehrere kleinere Stöße anstelle eines großen Stoßes möglich, also ein Mehrschlagverfahren, wie es manchmal auch bei Kerbschlagbiegeproben angewendet wird.

5.2 Messen und Auswerten bei einem Stoß

Im Fall eines Stoßes kann durch die Messung der Verzögerung der Stoßgeschwindigkeit während der Stoßdauer und durch ihre Multiplikation mit der Stoßmasse einerseits auf die Stoßkraft $P = f(t)$ geschlossen werden. Durch zweifache Integration der Beschleunigung (Verzögerung) $b = f(t)$ ergibt sich andererseits der jeweilige zugehörige Stoßweg $s = f(t)$. Nun kann $P = f(s)$ festgestellt werden. Die Messung und diese Auswertung des $b = f(t)$ -Scriebes ist durch Vergleich mit den ebenfalls meßbaren Größen Auftreffgeschwindigkeit v_0 (meßbar z. B. mittels Fotozellen, sogenannten Lichtschranken) und Stoßweg (Bremsweg) s_0 (nach dem Versuch unmittelbar meßbar) nachprüfbar. Dabei ist zu beachten, daß das Ende des Beschleunigungsscriebes dort, wo die Beschleunigung ungefähr linear abfällt, bereits das elastische Rückfedern anzeigt, und nicht in das Integral einzuschließen ist, wenn mit s_0 und v_0 verglichen wird. s_0 ist der maximale Bremsweg vor der Rückfederung.

Auf diese Weise sind beliebige Zwischenpunkte der Energieumsetzung E in Abhängigkeit von der gegenseitigen Annäherung beider Modelle $\int_0^s P(s) \cdot ds = E(s)$ ableitbar, allerdings nicht die genauen zugehörigen Schadensbilder. Immerhin wurden wegen dieser Meß- und Auswertungsmöglichkeit auf dem Versuchsstand in Hamburg Versuche mit höherer Energie gefahren, als die Kollisionsschutzstrukturen vor der Beschädigung z. B. der Reaktorraumlängswand voraussichtlich aufnehmen, weil die entsprechenden "kritischen Energien" bzw. die zugehörigen "kritischen Geschwindigkeiten" weitgehend rekonstruierbar sind.

Soweit das Vorschiffsmodell außerhalb des Seitenmodells gestaucht wird, sind diese Schadensvorgänge durch Filmaufnahmen mit einer oder mehreren Hochgeschwindigkeitskameras mit z. B. 3000 Bildern je Sekunde auch im einzelnen gut nachträglich festzustellen, Leider kann man die Kameras nicht in den Modellen anordnen.

5.3 Zur Alternative mehrerer kleinerer Stöße

Um Zwischenstadien der Zerstörung feststellen zu können, um das Versuchsrisiko zu verringern, oder aber um die Stoßenergiesumme noch über die normale Kapazität des Versuchsstandes zu steigern, sind mehrere in Abständen nacheinander durchgeführte Stöße - die nach dem ersten Stoß folgenden also mit den bereits beschädigten Modellen - möglich. Voraussetzung ist allerdings, wie bereits gesagt, die Modelle verklemmen nicht und die Führung der Modelle ist ausreichend genau. Es ist dann mit zwei Fehlereinflüssen zu rechnen:

- 1) Die Dehnungsgeschwindigkeit nimmt während des ganzen Zerstörungsvorganges mehrfach anstatt nur einmal bis auf 0 ab. Die Schlagverfestigung ist also nicht wie in Wirklichkeit kontinuierlich abnehmend, sondern sägezahnartig unstetig verteilt.
- 2) Die elastisch aufgenommene Energie muß mehrfach aufgebracht werden. Sie

ist erfahrungsgemäß ziemlich gering und aufgrund der aus den Beschleunigungsschrieben jeweils auswertbaren oder direkt meßbaren Rückstoßgeschwindigkeit sogar abschätzbar. Dieser Fehler kann also ungefähr korrigiert werden.

Insgesamt gesehen scheint ein solches Verfahren anwendbar zu sein. In Hamburg wurde der 4. Versuch im Juni und August 1971 auf diese Weise durchgeführt.

5.4 Zur Alternative eines statischen Verfahrens

Statische Versuche mittels hydraulischer Pressen o. ä. haben, wie erwähnt, den Vorteil einer leichten meßtechnischen Verfolgung der zunehmenden Zerstörungen. Man kann dabei die Druckkraft messen und über dem Weg auftragen und die Verformungsarbeit als Integral dieser Kurve erhalten.

In Großbritannien sind statische Versuche mit einzelnen Kollisionsschutzdecks ausgeführt worden [2]. In Japan wurden dynamische Kollisionsversuche mit vereinfachten Strukturmodellen mit gleichen Modellen statisch wiederholt [5 - 6]. Dabei war das Schadensbild qualitativ jeweils das gleiche.

Prinzipiell sind beim statischen Versuch auch andere Erscheinungsformen der Zerstörung möglich; z. B. ein Ausbeulen, das beim dynamischen Vorgang unterbleibt. Ferner ist die Schlagverfestigung bei zwei aufeinander treffenden Strukturen, von denen eine stärker als die andere, oder überhaupt nur eine von beiden verformt wird, an beiden Strukturen ebenfalls unterschiedlich groß. Das führt z. B. im dynamischen Versuch mit 2 gleichdicken Platten, deren Kanten aufeinandertreffen, zum Einschneiden beider Platten ineinander, während es im statischen Versuch nur zum Einschneiden in eine Platte kommen dürfte [3]. Beim statischen Versuch wird evtl. eine Schlagversprödung unterdrückt oder es kommt infolge von Kriechvorgängen erst bei größeren Verformungen zum Bruch.

5.5 Streuung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind durch Wiederholung zweifellos reproduzierbar. Eine offene Frage ist allerdings, wie groß die Streuung der Versuchsergebnisse anzunehmen ist und demgemäß, mit welcher Genauigkeit sie oder evtl. nur statistische Mittelwerte reproduzierbar sind [20]. Für eine Streuung, die quantitativer und qualitativer Natur sein kann, sind folgende Gründe denkbar:

- Toleranzen in der Beschaffenheit des Modellwerkstoffes,
- Abweichungen in den Abmessungen (Blechdicken usw.),
- verschiedene Oberflächenbeschaffenheit (Walzhaut, Korrosion usw.),
- individuelle Herstellungsunterschiede (handwerkliche Herstellung),
- Führungsspiel des Wagens,
- Einbautoleranzen der Modelle am Stand und am Wagen,
- verschiedene Witterung bei der Versuchsdurchführung.

Besonders groß wird die Streuung der Versuchsergebnisse im Unstetigkeits-

bereich bei der sogenannten Übergangstemperatur für die Kaltversprödung [17].

Es ist zu vermuten, daß ohne Kaltversprödungserscheinungen und etwas verschiedene Auftreffstellen usw., also qualitative Unterschiede, die Streuung quantitativer Natur sehr wesentlich geringer ist als die Streuung von z. B. ± 10 oder ± 20 % bei der Energieaufnahme in z. B. 100 Zerreißproben. Dies ist so, weil ein Kollisionsversuch z. B. diesen 100 Zerreißproben entspricht und statistische Mittelwerte von je 100 Zerreißproben allenfalls nur wenige %te differieren dürfte. Auch die Ergebnisse wirklicher Kollisionen streuen übrigens aus ähnlichen Gründen.

In Neapel ist ein Versuch wiederholt worden bei fast ($\pm 5\%$) gleichen Ergebnissen [11d]. Zweck dieser Wiederholung war die Gleichwertigkeit der dortigen beweglichen Anordnung des Seitenmodells mit einer starren Anordnung bei entsprechend verringerter Masse des rammenden Wagens experimentell zu bestätigen.

6. Umrechnung auf wirkliche Kollisionen

6.1 Maßstabsgesetze und Maßstabeffekte

Mit der elementaren Ähnlichkeitsmechanik sind die folgenden Maßstäbe leicht abzuleiten. Bei einem Längenmaßstab λ ändern sich [14, 22]:

die Energiebeträge mit	λ^3 ,
die Kräfte mit	λ^2 ,
die Spannungen mit	1 .

Es gibt jedoch noch Maßstabseinflüsse, die zu Abweichungen von diesen elementaren Umrechnungsregeln führen. Diese Maßstabeffekte sind zurückzuführen:

- a) auf andere Dehnungsgeschwindigkeiten und d. h. andere Schlagverfestigung als bei wirklichen Kollisionen,
- b) auf die nicht modellähnlich veränderbare konstante Korngröße des stählernen Werkstoffes,
- c) evtl. auf nicht ähnliche Temperaturverhältnisse infolge der Erwärmung bei den Stoßvorgängen, und
- d) im Zusammenhang mit b) und evtl. c) auf unterschiedlich liegende Übergangstemperaturen für die Kaltversprödung.

Die Einflüsse a) und b) können mit den vom Verfasser in [17] angegebenen Korrekturverfahren berücksichtigt werden. Für die Bestätigung dieser Verfahren fehlt allerdings noch eine ausreichende Erfahrung.

6. 2 Individuelle Modelleffekte

Es gibt möglicherweise eine systematische Abweichung einer wirklichen Kollision von einem Kollisionsversuch, die nicht allgemein zwischen wirklichen Kollisionen und Kollisionsversuchen einer bestimmten Art auftritt.

Es handelt sich dann nicht um allgemeine Maßstabseffekte, sondern sozusagen um individuelle Modelleffekte. Sie rühren z. B. von bestimmten Vereinfachungen der wirklichen Schiffe in den Modellen her. Z. B. kann bei den Blechdicken nur zwischen einigen wenigen gewählt werden (s. 3.4), die höchstens zufällig mit den wirklichen Dicken genau maßstäblich sein werden. Weitere kleinere Modellvereinfachungen anderer Art sind auch aus Gründen der Kostenersparnis und teilweise der Durchführbarkeit überhaupt erforderlich.

6.3 Berücksichtigung der Wasserdruckkräfte

Die Wasserdruckkräfte wachsen z. B. auch bei konstanter Beschleunigung während des Kollisionsstoßes stark an [18]. Es wird dann, je nachdem ob es sich um Beschleunigung bzw. Kraft, Impuls oder Energie handelt, mit verschiedenen Größen der hydrodynamischen Zusatzmasse gerechnet [23, 24].

6.4 Simulation einer stattgehabten wirklichen Kollision?

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Versuche auf wirkliche Kollisionen ist eine solche Simulation auf dem Versuchsstand in Neapel versucht worden [11 d]. Die Vorschiffsschäden wurden auch ähnlich zur Wirklichkeit, dagegen blieb die Außenhaut des geramten Modells unbeschädigt, während sie in Wirklichkeit in erheblichem Maße eingedrückt und aufgerissen war. Dieser Unterschied kann in den Einspannungsverhältnissen für die Außenhaut des Seitenmodells, in der Herstellung des Vorschiffsmodells (Verbindungsverfahren) oder in der Unsymmetrie der Kollision durch den Kurswinkel von 76° , der auf dem Versuchsstand durch entsprechend schräge Anordnung des Seitenmodells bei gleichzeitig starrer Führung des Vorschiffsmodells berücksichtigt werden sollte, begründet gewesen sein.

Eine prinzipielle Schwierigkeit für eine Simulation ist, daß nicht nur die genauen Umstände der Kollision bekannt sein müssen, sondern daß diese auf dem jeweiligen Versuchsstand auch ausreichend genau simuliert werden müssen. Es wurde daher vorgeschlagen, einen experimentellen Nachweis für die Übertragbarkeit der Versuche auf wirkliche Kollisionen durch den Vergleich statistischer Auswertungen einer größeren Anzahl geeigneter Kollisionsfälle einerseits und von Kollisionsversuchen andererseits mit demselben Verfahren zu versuchen [17].

7. Schluß

Die Kollisionsversuche werden in Hamburg von der Howaldtswerke - Deutsche Werft AG (HDW) auf ihrem Werksgelände in Finkenwerder, wo der Versuchsstand errichtet wurde, im Auftrag der GKSS durchgeführt. Herrn Dipl.-Ing. F. K. Kayser von den HDW danke ich für die gute Zusammenarbeit, ohne die auch die vorliegende Untersuchung nicht denkbar wäre. Ich danke ferner besonders Herrn Dipl.-Ing. H. Boos von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in Brüssel, der hervorragend den Erfahrungsaustausch zwischen den Herren, die die Versuche in Neapel durchführten, und uns vermittelte.

8. Schrifttum

- 1 T. Harima, S. Yamada und Y. Tokuda: Research on the Collision - Resisting Construction of the Sides of a Nuclear - Powered Ship (Report No.2), Mitsubishi Nippon Heavy Industries Technical Review 2 (1962), p. 147 (in Jap., Engl. abstract) - (B.S.R.A.-Translation No. 1373 into English)
- 2 Naval Construction Research Establishment (NCRE): Protection Structures for Marine Reactors. In: Third International Ship Structures Congress, Oslo, 11.-15.9.67, Volume I, pp. 228 - 290.
- 3 G. Woisin: Kollisionsversuche mit Platten hauptsächlich aus Schiffbau-stahl bei zur Stoßrichtung parallelen Ebenen entsprechend z. B. Schiffss-decks. Schiffstechnik 15,79 (1968), S. 111 - 126.
- 4 K. Kagami, et al.: Research on the Collision-resisting Construction of Ships Sides. Nuclear Ship Propulsion. IAEA, Wien 1961, pp. 485 - 502. (Proceedings of the First Intern. Symposium on Nuclear Ship Propulsion, Taormina 1960) - Deutsche Übersetzung in "HANSA" 1962, 21, S.2174-80
- 5 T. Sakai and S. Ushioda: Investigation into the Strength of Ship Hull in Collision. Trans. of West Japan Naval Architects Association No. 115 (1964) pp. 19 - 29 (In Jap., Engl. abstract).
- 6 Y. Akita et al.: The Report of the Collision Barrier of Nuclear Powered Ships. Journal of the Society on Naval Architects of Japan Vol. 118 (1965) pp. 259 - 270 (In Jap., Engl. abstract).
- 7 R. Faresi et al.: Collision tests. In: The Fiat - Ansaldo - Euratom Association Program for Nuclear Ship Propulsion, Hamburg 1971, preprint.
- 8 F. Spinelli et V. Belli: Protection du compartiment du réacteur nu-cléaire d'un navire contre les abordages. Resultats de 24 essais sur modèles. ATMA, Paris 1971, preprint.
- 9 G. Woisin: Kollisionsversuche mit Schiffsteilmodellen. Kerntechnik, Isotopentechnik und -Chemie 9,8 (1967) S. 372 - 374.
- 10 Die Optimalisierung des Kollisionsschutzes.
In: Euratom, Bulletin der Europäischen Atomgemeinschaft 1,4 (1965) S. 20 - 22 .
- 11 Euratom: Dokumentationen zu den Gesamtberichten über die Tätigkeit der Gemeinschaft.
 - a) März 1964, S. 82 - 83
 - b) März 1965, S. 79
 - c) Vorläufige Ausgabe April 1966, S. 4 - 5
 - d) April 1967, S. 86 - 87
- 12 Esperienze di collisione. In: Euratom-Fiat-Ansaldo, CNEN: Nave cisterna a propulsione nucleare. Complemento al rapporto sul progetto intermedio. 1968, S. 17 - 1 ff.

- 13 American Bureau of Shipping: Guide for the Classification of Nuclear Ships, New York 1962, pp. 4 - 5
- 14 F. Spinelli: Défense des réacteurs nucléaires de navire contre les abordages. ATMA, Paris 1962.
deutsch: Schiff und Hafen 16,2 (1964) S. 148 - 154
- 15 Bundesrepublik Deutschland: Patentschrift 1248 333, 31.3.66 (Anmeldetag): Vorrichtung zur Zerstörungsprüfung von Kollisionsschutzbauteilen von Schiffen.
- 16 F. Spinelli: Protection du compartiment du réacteur nucléaire contre les abordages. Résultats d'essais sur modèles. ATMA, Paris, 1964.
- 17 G. Woisin; Eine Untersuchung der Ähnlichkeitsgesetze bei Stoßschäden, besonders Schiffskollisionen und Kollisionsmodellversuchen. Schiff und Hafen 20, 11 (1968) S. 740 - 747.
- 18 H. G. Hattendorff und H. Espenhain: Versuche zur Bestimmung der hydrodynamischen Zusatzmasse bei Kollisionsvorgängen auf flachem Wasser. Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH., Bericht Nr. F 17/69 (September 1970) (Unveröffentlicht)
- 19 D.J. Nicholas: R. u. T.A. Report No. 5049; "The Collision Protection of Nuclear-Powered Ships", prepared under United States Coast Guard Contract by Lloyds Register of Shipping, London 1967.
Distributed by Clearinghouse, Springfield, Va. 22151.
- 20 O. Krappinger: Collision Protection of Nuclear Ships. A Survey of the State of the Art. The University of Michigan, Ann Arbor 1966. Office of Research Administration Project No. 07990, under contract with Maritime Administration, USA.
- 21 A. Guida: Analisi della similitudine nelle prove di collisione. Tecnica Italiana 1964, S. 213 - 222.
- 22 E. Langhaar: Dimensional Analysis and Theory of Models. John Wiley and Sons Inc., New York and Chapman and Hall Ltd., London, Third print, 1957
- 23 S. Motora et alt.: Equivalent Mass of Ships in Collisions. The Journal of the Society of Naval Architects of Japan 126, Dec. 1969 (Also in: Selected Papers from J. S. N. A. Vol. 7 (1971) pp.138 - 148)
- 24 G. Woisin: Schiffbauliche Forschungsarbeiten für die Sicherheit kernenergiegetriebener Handelsschiffe. Demnächst in Jb. der Schiffbau-technischen Gesellschaft, 65 Bd., 1971, Springer - Verlag, Berlin.

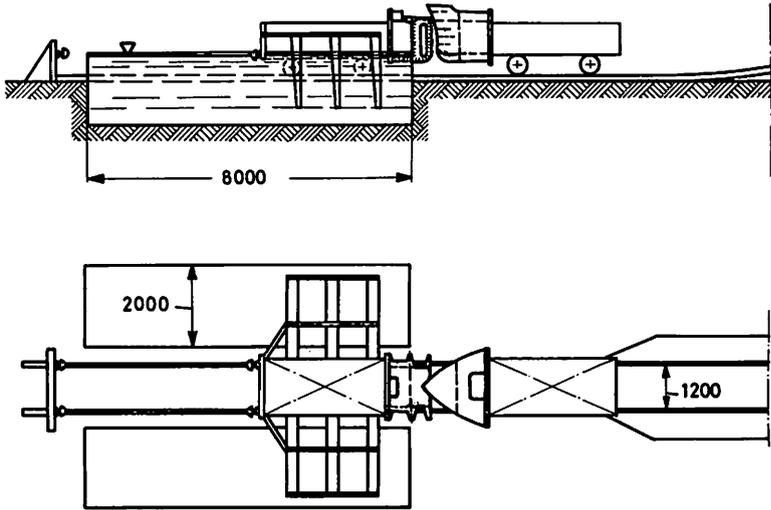


Abb1: Versuchsstand in Neapel [14]

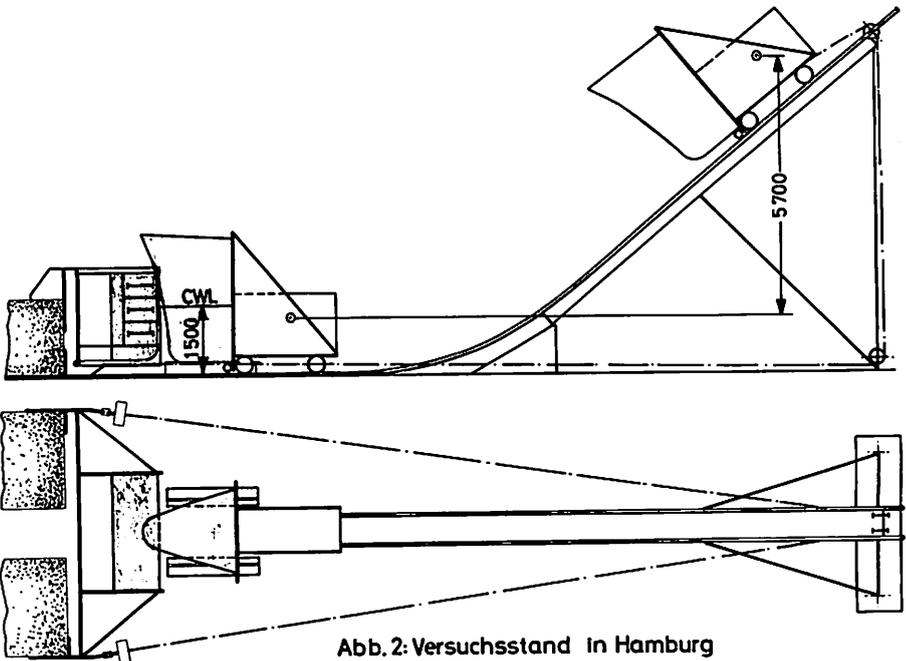


Abb.2: Versuchsstand in Hamburg

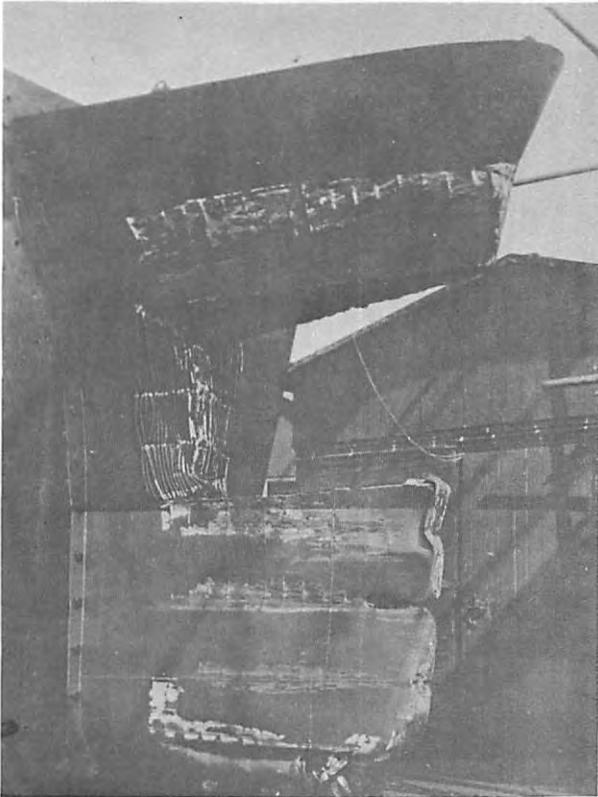


Abb. 3: Vorschiffsmodell beim 2. Versuch in Hamburg,
mit Ziehharmonikaeffekt

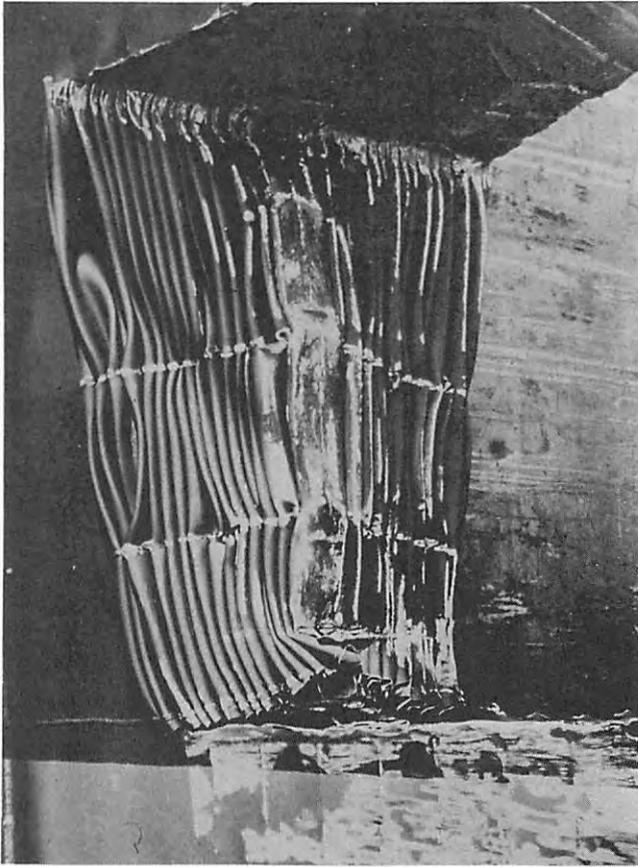


Abb. 4: Vorschiffsmodell beim 2. Versuch
in Hamburg, Teilansicht

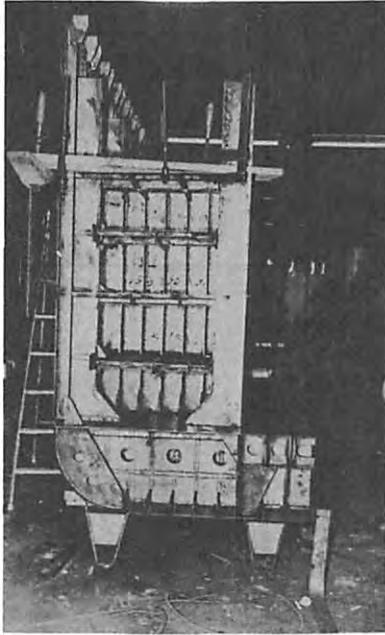


Abb.5: Seitenmodell vom 1.Versuch in Hamburg
in der Fertigung in Berlin



Abb.6: Vorschiffsmodell vom 1.Versuch in Hamburg
in der Fertigung in Berlin

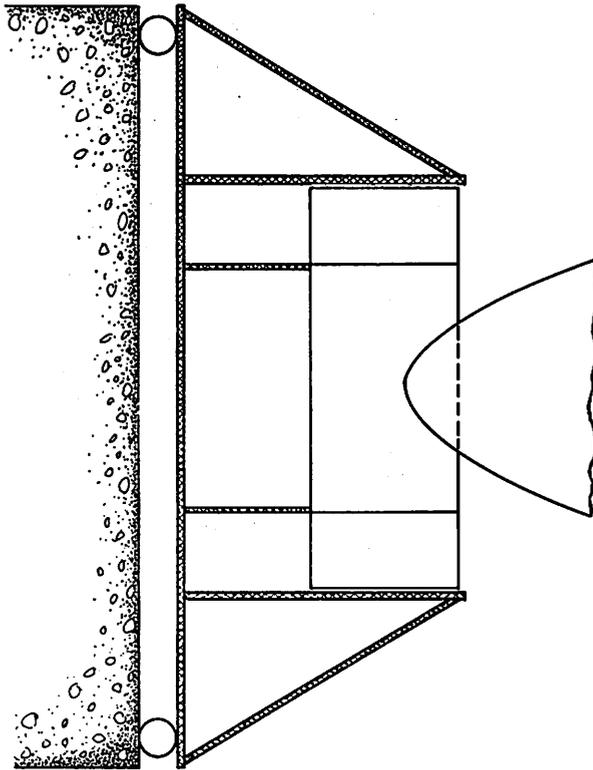


Abb.7:Prinzip der Aufspannvorrichtung für das Seitenmodell in Hamburg

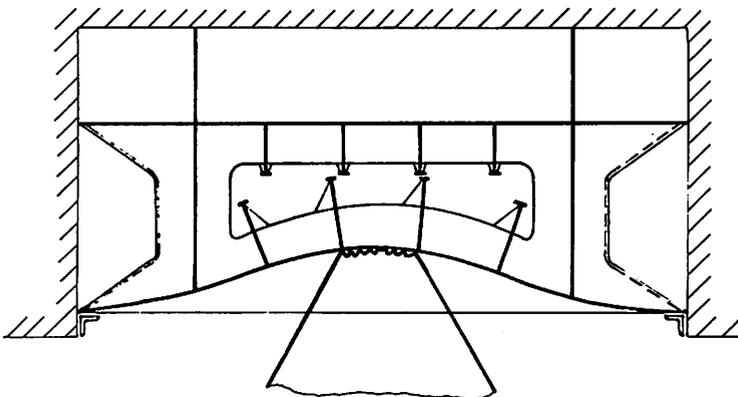


Abb.8: Typischer Membranschaden nach [16]
(3.Versuch in Neapel,Vorschiff von Verf. angedeutet)

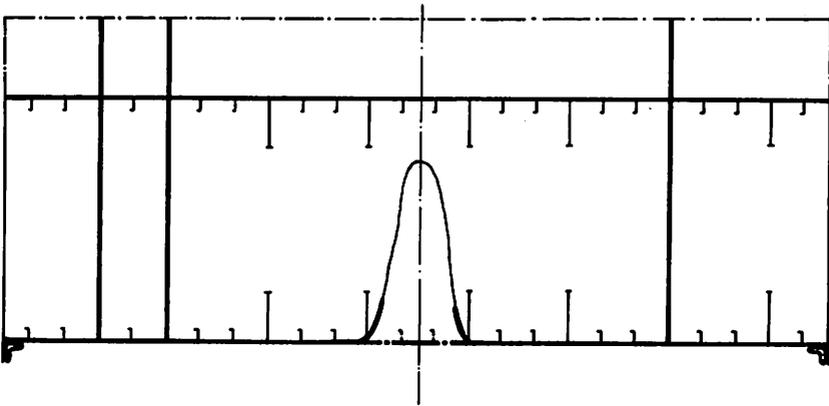


Abb. 9: Beschädigung der Außenhaut und eines oberen Kollisionsschutzdecks beim 1. Versuch in Hamburg: kein Membranschaden

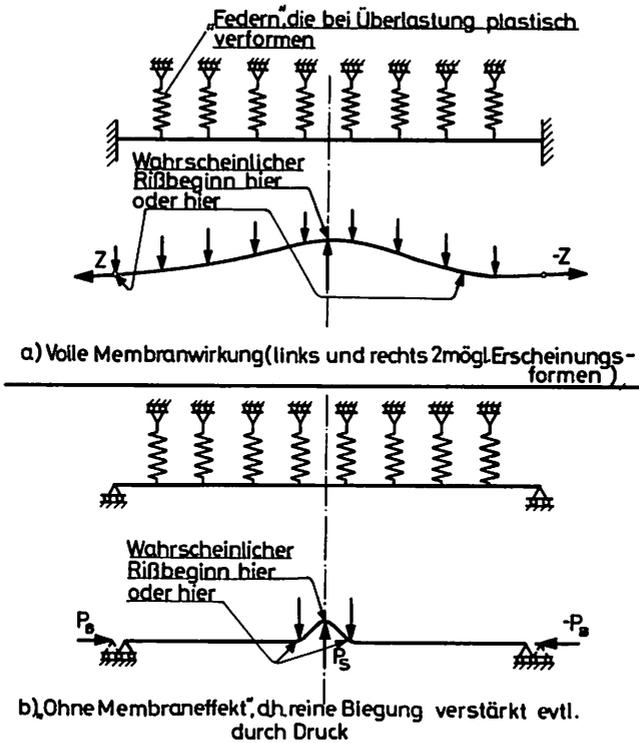


Abb. 10: Statisches Wirkungsprinzip der Einspannung der Außenhaut des Seitenmodells

DISCUSSION

Q K. A. RECKLING, Germany

Is there not a considerable strengthening effect in the longitudinal direction by the outer hull which you cannot simulate by your test ?

A G. WOISIN, Germany

No, I believe there is just also in reality a only very little "tensile tie effect" by the side shell. In case of the three first tests we made in Hamburg we have measured the absolute lengthening of the model's side shell to be 14 to 30 mm. This small lengthening before fracture happens means in the case of the three tests an energy amount absorbed in the side shell by membrane strain of only 3 to 5% of the overall energy absorbed. From experiences with real ships' collision damages I am sure that also in reality there is only little energy absorption by longitudinal strengthening by the hull, just as is simulated by our tests.

Q Y. AKITA, Japan

I would like to ask a simple question. What kind of stiffening system of deck did you use ? Was it similar to real ship ?

A G. WOISIN, Germany

We had transverse stiffening of the decks of the NS "Otto Hahn" in frame distance of 800 mm in full scale and that means a little more than 100 mm in models.