

14 | 1954

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dr. phil. Hellmut Baumann

### Ein Wellentilger für Modell-Seegangversuche

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

#### XIV. Ein Wellentilger für Modell-Seegangversuche.

Von Dr. phil. Hellmut Baumann, Hamburg.

**Einleitung.** Erkenntnisse über das Verhalten der Schiffe im Seegang können nicht ausschließlich aus Meßfahrten und Beobachtungen auf See gewonnen werden, weil diese, abgesehen von ihrem beträchtlichen Aufwand an Zeit und Kosten, zu sehr von Wind und Wetter abhängen. Auch darf man das Schiff nicht in Gefahr bringen, muß also kritische Situationen vermeiden. Man ist daher meist auf Modellversuche angewiesen, sei es zur Vorbereitung und Ergänzung von Großversuchen oder bei der Planung von Schiffsneubauten. Da die Modellähnlichkeit für Wellenvorgänge sauber erfüllt ist, kann man sich über einschlägige Fragen der Festigkeit, der Stabilität und Schwingungen sowie der Propulsion auch im Laboratorium gut orientieren. Gegenüber Meß- und Versuchsfahrten auf See bietet sich hier die vorteilhafte Möglichkeit zu stetigen Versuchsreihen unter jederzeit reproduzierbaren Bedingungen; außerdem sind Modell-Seegangversuche verhältnismäßig schnell und billig durchführbar und absolut ungefährlich.

Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit solcher Versuche ist die Erzeugung einer fortschreitenden Welle vom permanenten Typ. Hier liegt nun die Hauptschwierigkeit bei der notwendigen Vernichtung der Welle am Ende der Versuchsrinne. Reflektierte Wellen würden nämlich den Versuchsablauf in unkontrollierbarer Weise stören. Mit den bislang angewandten Mitteln, wie Strandanlagen, Dämpfungssieben und ähnlichen Einrichtungen kann eine ausreichende Wirkung nicht erzielt werden, da sie der Welle ein Hindernis bieten, welches zwar Energie absorbiert, aber doch auch einen großen Teil reflektiert. Auch der Auslauf der Wellen in einen größeren Tank ist nur eine Behelfslösung. Denn da die Dämpfung dort auch nicht besser ist, werden die Wellen zum Teil im Tank gespeichert und kehren nach einiger Zeit doch wieder in die Versuchsrinne zurück. Übrigens findet auch schon an der Mündung der Rinne in den Tank Reflexion statt. In der Schiffbau-Versuchstechnik sind diese Schwierigkeiten bekannt. Sie führen zu kurzen Versuchszeiten (die Messung muß vor Eintreffen der reflektierten Wellen erfolgen) und zu langen Wartezeiten zwischen den Versuchen (das Wasser beruhigt sich nur langsam). Je länger die Versuchsrinne ist, umso länger werden diese Zeiten. Die Rinne darf also weder zu kurz noch zu lang sein.

##### 1. Reflexionslose Absorption von Wasserwellen.

Die Vernichtung der Wellen kann jedoch theoretisch exakt und praktisch befriedigend erreicht werden. Dazu muß man am Ende der Versuchsrinne einen Mechanismus haben, welcher gegenüber den auftretenden Wellen dasselbe Verhalten zeigt wie die unendlich fortgesetzte Versuchsrinne, als deren Ersatz er dann wirkt. In analogen Fällen der Elektrotechnik spricht man von „Anpassung eines Leitungsabschlusses“. Eine einfache Ausführung besteht aus einem Querschott, welches am Boden der Rinne so gelagert ist, daß es sich unter der Einwirkung der Wellen vor und zurück neigen kann. Dies liefert einen Angriffspunkt zur Beeinflussung der Wellen durch Ankoppeln geeigneter mechanischer Elemente (Federn, Massen, Dämpfung). Da das Schott an den Seiten nicht dicht gemacht werden kann, ohne daß störende Reibung auftritt, befindet sich in einigem Abstand dahinter eine feste Rückwand (Bild 1). Zur „Anpassung“ muß an das schwingende Schott eine Dämpfung (z. B. Wirbelstrombremse) angeschlossen und so bemessen werden, daß sie die ankommende Wellenenergie verzehrt. Damit jedoch wirklich nur eine dämpfende Kraft auftritt, müssen die trägen und elastischen Kräfte des Schotts, der mitschwingenden Wassermasse und des Wasserraums zwischen Schott und Rückwand zum Verschwinden gebracht

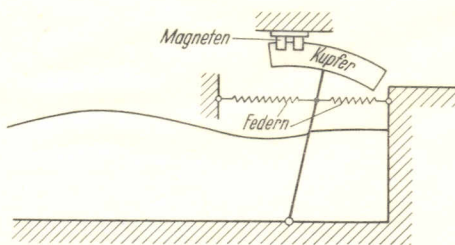
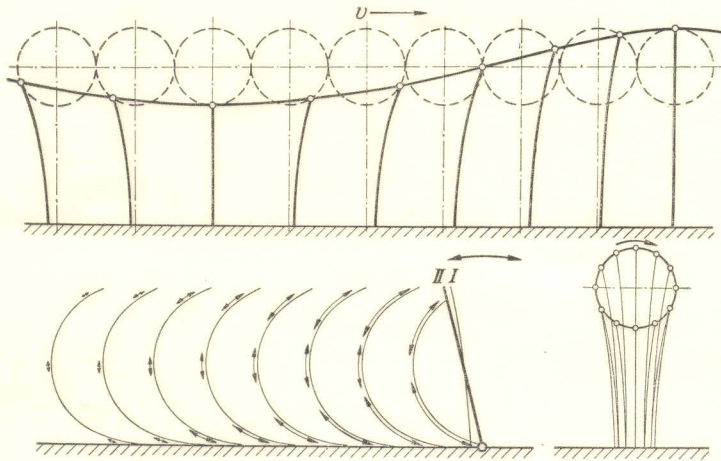


Bild 1. Prinzip einer Anordnung zur Absorption von Wasserwellen.

werden. Das geschieht, indem man die Eigenfrequenz des Systems durch Anschließen von Federn und gegebenenfalls auch Massen auf die Frequenz der ankommenden Welle abstimmt.

Eine mathematische Behandlung dieses Mechanismus wird an anderer Stelle gegeben<sup>1</sup>. Hier soll seine Funktion physikalisch erklärt werden.

Bild 2 zeigt das bekannte Bild einer nach rechts fortschreitenden Welle. Sie stellt die sog. Orbitalbahnen einiger Wasserteilchen, sowie die Lagen einer sog. Substanzfläche, nämlich derjenigen Wasserteilchen, die im Ruhezustand einen ebenen Querschnitt der Rinne bilden, dar. Wir kommen nun sehr schnell zu einem Gedankenmodell für einen ange-



teilchen, die im Ruhezustand einen ebenen Querschnitt der Rinne bilden, dar. Wir kommen nun sehr schnell zu einem Gedankenmodell für einen ange-

Bild 2. Schematische Darstellung einer Welle.

a) Momentbild.

b) Bewegung einer „Substanzfläche“.

Bild 3. Schematische Darstellung einer Strömung zum Ausgleich zwischen den Auslenkungen von Substanzfläche I und Schott II.

2 b

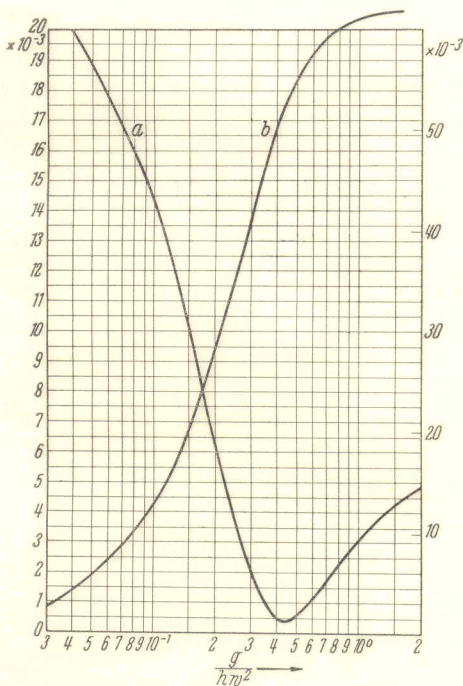


Bild 4. Beiwerte der mitschwingenden Wassermasse (a) und der Dämpfung (b), berechnet für ein schwingendes Schott wie Bild 1. — Die Beiwerte sind mit  $4 \rho b h^3$  bzw.  $\frac{4 \gamma b h^3}{\sqrt{g h}}$  zu multiplizieren.  
 $\rho$  = Dichte,  $\gamma$  = Raumgewicht des Wassers;  
 $b$  = Breite,  $h$  = Wasserstand der Rinne.

paßten Abschluß der Rinne, wenn wir eine Substanzfläche durch ein masseloses Blech ersetzen, welches genau dieselbe Bewegung ausführt, sich aber allen anderen Deformationen „quasistarr“ widersetzt. Dadurch wird die Welle bei idealer Flüssigkeit nicht beeinflusst. Unser Blech überträgt, genau wie jede flüssige Substanzfläche, die von links ankommende Wellenenergie nach rechts. Es wirkt also auf seiner linken Seite absorbierend, auf der rechten emittierend. Im Gegensatz zu einer flüssigen Fläche ist jedoch das quasistarre Blech zur Aufnahme von Einzelkräften geeignet. Infolgedessen können wir nun die ankommende Energie völlig absorbieren, wenn wir uns den rechten Teil der Rinne fortdenken und seine Wasserdrücke durch geeignete Einzelkräfte ersetzen. Neben einer konstanten Kraft als Ersatz für den hydrostatischen Druck benötigen wir dann eine dem Wellendruck entsprechende periodische Kraft. Da nun der Wellendruck der Oberflächenenerhebung proportional ist und diese wiederum der Geschwindigkeit des quasistarren Blechs, so muß die periodische Kraft der Geschwindigkeit proportional und entgegengesetzt sein. Sie kann also durch eine lineare Dämpfung dargestellt werden, deren Stärke sich nach der Frequenz der Welle und natürlich nach dem Querschnitt der Rinne richtet. Hiermit ist die Aufgabe physikalisch bereits gelöst.

Wir führen nun unser Gedankenmodell in zwei Schritten einer technischen Lösung zu. Erstens verwenden wir jetzt an Stelle des masselosen, quasistarren Blechs ein am Boden der Rinne gelagertes,

<sup>1</sup> Demnächst in „Schiffstechnik, Forschungshefte für Schiffbau und Schiffsmaschinenbau“.

ebenes Schott. Dessen Trägheit würde das Gleichgewicht zwischen der Dämpfung und den Wellendrüken stören. Sie läßt sich jedoch für jede vorgegebene Frequenz dadurch ausschalten, daß man das Schott federnd befestigt, so daß es als freischwingendes Pendel wirkt.

Zweitens geben wir dem schwingenden Schott an den Seiten ein wenig Luft, damit es dort nicht reibt, und setzen dahinter eine Rückwand, damit das Wasser nicht ausfließt. Dann ist der statische Wasserdruck vor und hinter dem Schott derselbe, die konstante Einzelkraft unseres Gedankenmodells fällt also nun fort. Es bildet sich aber jetzt zwischen Schott und Rückwand eine stehende Welle. Diese verzehrt keine Energie, ändert also nichts an der Dämpfung; sie ändert jedoch die Federabstimmung, da sie je nach dem Verhältnis der Wellenlänge zu dem Abstand zwischen Schott und Rückwand elastische oder träge Kräfte auf das Schott ausübt. — Unter Umständen muß sogar zur Frequenzabstimmung die Masse des Schotts vergrößert werden, damit die Gleichgewichtslage des Schotts stabil bleibt.

Die Trägheit des Schotts kommt übrigens nicht nur von seiner Masse, sondern auch von einer sog. mitschwingenden Wassermasse und zwar aus folgendem Grund: Das ebene Schott kann nicht die Gestalt einer Substanzfläche der freien Welle annehmen; seine Auslenkung ist vielmehr am Boden kleiner, weiter oben größer als diejenige der Substanzfläche. Infolgedessen überlagert sich jetzt in seiner Nachbarschaft der fortschreitenden Welle (Bild 2) noch eine Ausgleichströmung, welche das oben zuviel verdrängte Wasser nach unten und beim Rückgang des Schotts wieder nach oben befördert. Bild 3 zeigt schematisch die Bahnen einer solchen Strömung, die mit der Bewegung des Schotts phasengleich erfolgt, also einen reversiblen Massetransport bedeutet. In Bild 4 ist der theoretisch errechnete hydrodynamische Massenzuschlag über der dimensionslosen Größe  $g/h\omega^2$  aufgetragen worden ( $g$  = Schwerebeschleunigung,  $h$  = Wasserstand,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  = Kreisfrequenz der Welle). — Gleichzeitig ist dort auch die angepaßte Dämpfung aufgetragen worden.

Die Wirkung des beschriebenen Absorptionsmechanismus besteht somit im wesentlichen in dem Abschluß der Versuchsrinne durch ein angepaßtes Dämpfungssystem. Die mit der technischen Ausführung notwendig verbundenen, starren und flüssigen Trägheiten und Elastizitäten komplizieren die Sache etwas; sie werden mittels Federn (gegebenenfalls auch Massen) für die Frequenz der ankommenden Welle kompensiert.

## 2. Der „Wellentilger“ des Instituts für Schiffbau.

Im Institut für Schiffbau der Universität Hamburg ist ein Mechanismus der beschriebenen Art in eine etwa 8,5 m lange Versuchsrinne von 1 m Breite und 40 cm Wasserstand eingebaut worden.

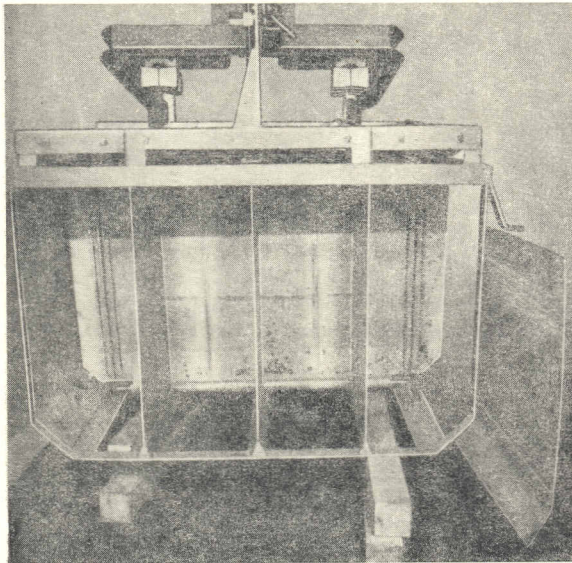
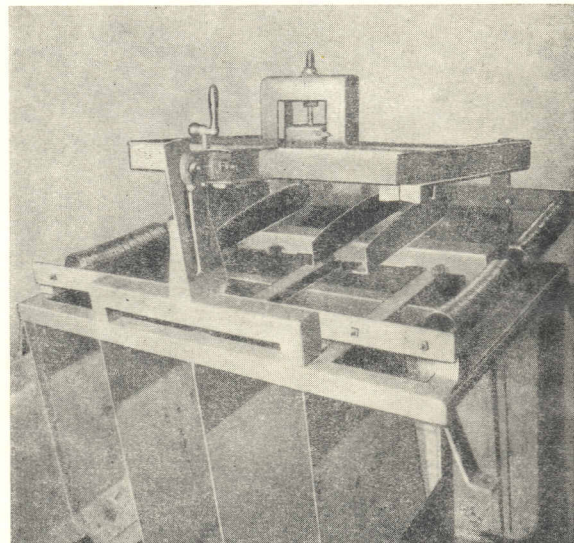


Bild 5. Wellentilger, ausgebaut. a) Stirnansicht,



b) Schrägansicht. Leitbleche zur Vermeidung von Querwellen.

Der Abstand zwischen dem schwingenden Schott und der Rückwand beträgt in der Mittellage 16 cm. Wie Bild 5 zeigt, trägt das Schott oben eine Traverse mit den zum Einhängen von Federn

nötigen Haken und mit einer Anzahl von Kupferblechen, die in den Luftspalten von Permanentmagneten schwingen. Zur Einstellung der Dämpfung werden die Magneten mittels Spindel der Anpassung entsprechend über die Kupferbleche geschoben. Die Frequenzabstimmung geschieht in der Weise, daß am Schott Stahlfedern angehakt werden, welche die Frequenz der optimal absorbierten Welle festlegen. Diese wird dann am Wellenerzeuger (Bild 6) mittels eines stufenlosen Getriebes eingestellt. Zur Kontrolle dient ein automatischer 10 Periodenstopper.

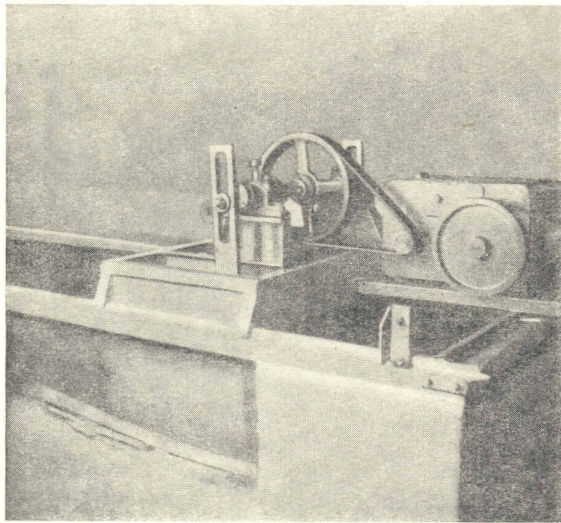


Bild 6. Antrieb des Wellenerzeugers.

Zur Kontrolle dient ein automatischer 10 Periodenstopper.

Der Absorptionsgrad dieses sog. „Wellenfilter“ wurde folgendermaßen untersucht: Mittels einer elektrischen Sonde wurde die Auf- und Abbewegung des Wasserspiegels, auf der Längsachse der Rinne um jeweils 25 mm fortschreitend, in vergrößertem Maßstab oszillographiert. Aus den gefundenen Größt- und Kleinstwerten der örtlichen Wellenhöhe  $a$  wurde die Größe

$$r = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{a_{\max} + a_{\min}} \quad \text{gebildet.}$$

In Bild 7 ist das Resultat für 3 Tilger-Einstellungen über der Wellenperiode aufgetragen worden. Es zeigt sich, daß bei Anpassung  $r < 2\%$  ist. Unter idealen Bedingungen (konstanter Querschnitt der Rinne, konstante Drehzahl des Wellenerzeugers, fehlerfreie Aufzeichnung und Auswertung der Oszillogramme) würde die Größe  $r$  den Reflexionskoeffizienten des Wellenfilters bedeuten.

Die Anordnung reflektiert also eine Welle von weniger als 2% der ursprünglichen Höhe. Vergleichsweise sei angeführt, daß eine 137 cm-Welle deren „Vernichtung“ durch Auslaufen in einen Dämpfung-Tank von über 30 m Länge, 6,5 m Breite, 2,5 m Tiefe, der ringsum einen kleinen Strand hat, angestrebt wurde, bereits  $1\frac{1}{2}$  Minuten nach dem Einschalten durch zurückkehrende Wellen von etwa 13% der ursprünglichen Höhe gestört wurde. Eine in der 7. bis 10. Minute durchgeführte Reflexionsmessung ergab einen noch immer ansteigenden Wert von im Mittel 24%. Zur Beurteilung des in Bild 7 dargestellten Resultats ist zu sagen, daß die beschriebene Erstausführung des Wellenfilters maschinenbaulich ziemlich grob ist; auch ist die Breite der Versuchsrinne bei näherem Hinsehen keineswegs konstant, sie macht sogar an den Rändern der eingesetzten Beobachtungsfenster Sprünge bis zu 10 mm (d. s. 1% der Breite). Bild 8 zeigt, daß eine 137 cm-Welle durch solche Sprünge beeinflußt wird. Ein weiterer, das Resultat verschlechternder Versuchsfehler ergibt sich aus dem Umstand, daß — wie Bild 7 zeigt — die Resonanz des Wellenfilters reichlich scharf ist. Der Grund dafür liegt in der ungeschickten Befestigung der Abstimmfedern und Dämpfungsbleche. Diese mußten der Einfachheit halber mittels einer Traverse oben am schwingenden Schott angebracht werden. Dadurch ist

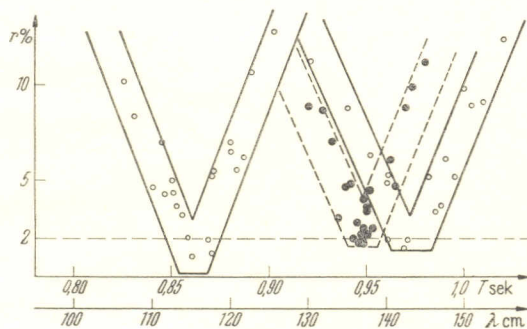


Bild 7. Abhängigkeit der Reflexion des Wellenfilters von der Periode

dessen Trägheitsmoment unnötig groß geworden. Da nun der Wellenerzeuger von einem Synchronmotor angetrieben wird, führen die Frequenzschwankungen des Drehstromnetzes möglicherweise zu Wellengruppen, die bei der scharfen Resonanz weniger gut absorbiert werden.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß unser primitives Modell eines Wellenfilter das physikalische Prinzip voll bestätigt hat. Die gemessene Reflexion von weniger als 2% der ursprünglichen Wellenhöhe (d. i. weniger als  $0,4\frac{0}{100}$  der Wellenenergie) kann als Folge technischer Ungenauigkeiten der Gesamtanlage und zu geringer Resonanzbreite des Wellenfilters ungedrungen erklärt werden.

Um auch das nichtstationäre Verhalten des Wellentilgers zu prüfen, wurden die in Bild 9 wiedergegebenen Oszillogramme von Ein- bzw. Ausschaltvorgängen aufgenommen, und zwar zum Vergleich auch bei freiem Auslauf der Wellen in den oben erwähnten „Dämpfungstank“. Zu ihrer Erklärung ist zu sagen, daß beim Ein- oder Ausschalten des Wellenerzeugers stets

Bild 8. Verteilung der Wellenhöhe längs der Versuchsrinne ( $\lambda = 137$  cm). — a) und b) mit Wellentilger. Kurve (a) zeigt deutliche Maxima und Minima der Grundwelle; bei Kurve (b) überwiegen Querschwingungen der Rinne. c) ohne Wellentilger. d) mit Wellentilger, aber in einem anderen Teil der Rinne. Beeinflussung durch Ungleichmäßigkeiten der Wand. Die Zeichen + und - deuten die mutmaßliche Lage der Maxima und Minima an, welche durch den Wandeinfluß verdeckt sind.

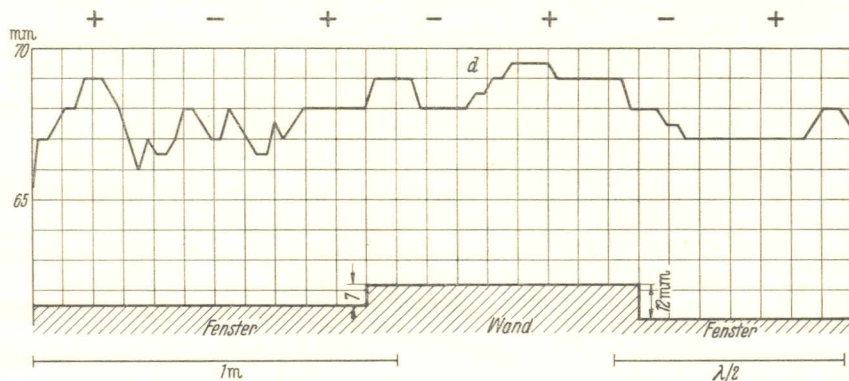


Bild 8 a.

Wellen aller Frequenzen entstehen, auch wenn die Schaltdauer praktisch gleich Null ist. Diese falschen Wellen werden vom Tilger nur unvollkommen absorbiert; sie klingen also erst nach mehrfachem Durchlaufen der Versuchsrinne genügend ab. Das Oszillogramm a) zeigt die ersten 90 sec nach dem Einschalten einer 137 cm-Welle in der 8,5 m langen Rinne. Im Abschaltoszillogramm b) ist die Nutzwelle nach Verlauf von etwa 50 sec nicht mehr zu erkennen, es sind nur noch Wellen höherer Frequenz mit geringer Amplitude vorhanden. Die Oszillogramme c) und d) zeigen dieselben Vorgänge ohne Wellentilger. In den ersten  $1\frac{1}{2}$  Minuten ist die Welle beim freien Auslauf in den großen Tank als besser zu beurteilen, wenn man von einer Überlagerung der Grundschwingung des Tanks mit einer Periode von etwa 20 sec und einer Amplitude von 7% der Nutzwelle absehen kann. Nach Verstreichen der Gruppenlaufzeit von etwa 100 sec zeigt sich jedoch plötzlich das Eintreffen einer reflektierten Welle von etwa 13% der ursprünglichen Höhe. (Wie bereits erwähnt, stieg die Amplitude der reflektierten Welle noch erheblich an und war nach 10 Minuten noch nicht stationär geworden.) Nach dem Abschalten verbleibt die reflektierte Welle, deren Höhe nun auf etwa 30% angestiegen ist, und bei deren Abklingen sich die Gruppenlaufzeit wieder deutlich heraushebt. Noch nach 5 Minuten beträgt die Wellenhöhe 3,5% des ursprünglichen Wertes. Fremde Frequenzen sind hier nicht zu erkennen.

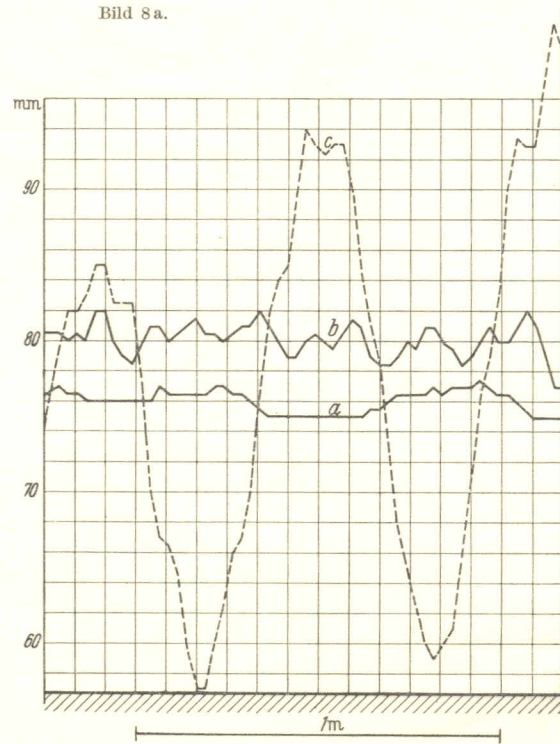


Bild 8 b.

### 3. Zur Entwicklung einer Seegangversuchs-Anlage.

Nachdem die physikalische Wirkungsweise des Wellentilgers experimentell und theoretisch gesichert ist, kann man zur technischen Entwicklung einer Versuchsrinne schreiten, bei welcher sich gegenüber früheren Anlagen, die mangels Anpassung der eingangs erwähnten provisorischen Dämpfungseinrichtungen immer nur als Kompromißlösung gelten konnten, drei Vorzüge ergeben, nämlich

beliebig lange Versuchsdauer,  
kurze Einstellzeit zwischen den Versuchen,  
beliebig lange oder kurze Versuchsrinne.

Beim Entwurf einer solchen Anlage wäre besonders folgendes zu beachten:

a) Nicht nur am Ende, sondern auch am Anfang der Rinne muß sich ein Wellenilger befinden;

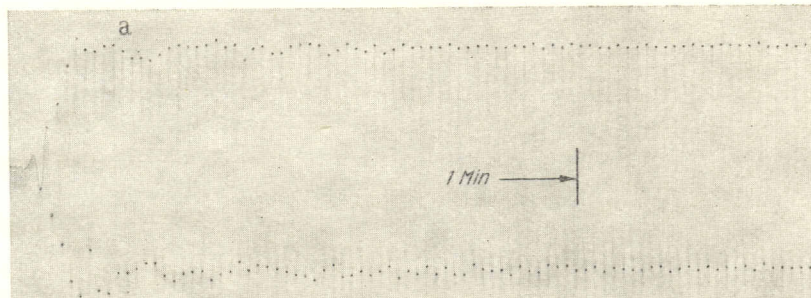


Bild 9a.

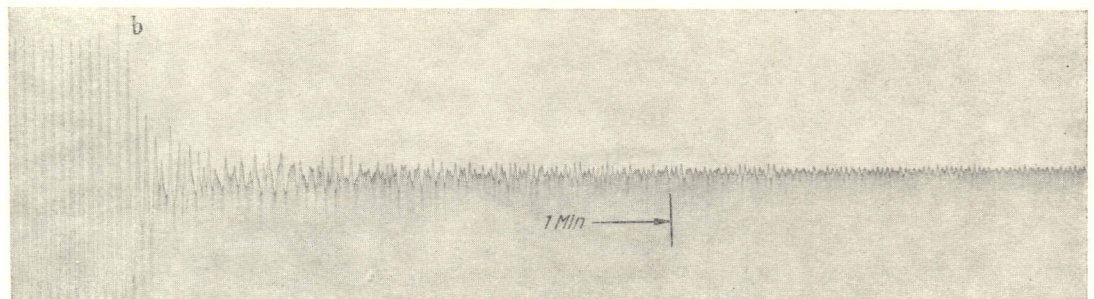


Bild 9b.

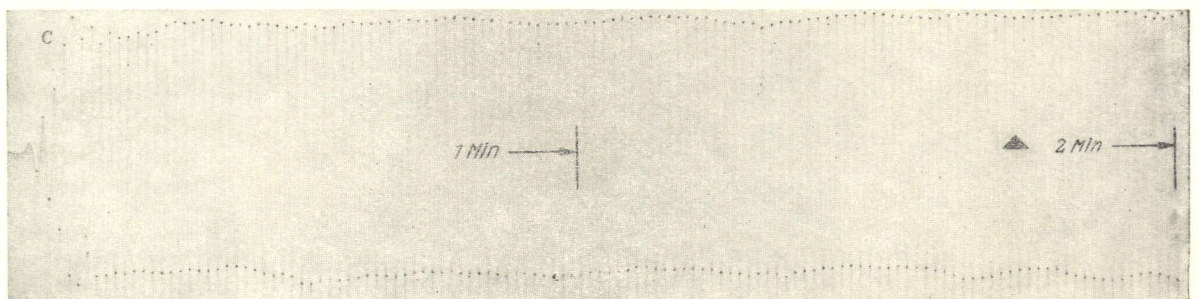


Bild 9c.

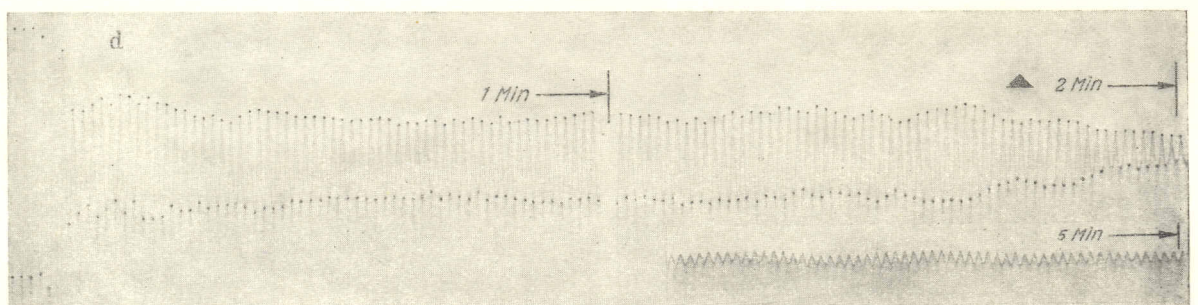


Bild 9d.

Bild 9. Ein- und Ausschalten einer Welle. a) und b) mit Wellenilger. c) und d) ohne Wellenilger, ▲ Einsatz reflektierter Wellen.

denn von jedem Versuchsobjekt strahlen Sekundärwellen nach beiden Seiten aus. Es muß also ein Wellenerzeuger verwendet werden, der gleichzeitig auch einfallende Wellen absorbiert. Ein

solcher entsteht aus dem Wellentilger, wenn man die sonst festen Dämpfungsmagnete periodisch bewegt.

b) Außer der eingestellten müssen auch Wellen benachbarter Frequenz noch befriedigend absorbiert werden, damit keine zu große Einstellgenauigkeit von Erzeuger und Tilger erforderlich wird, und damit die beim Ein- und Ausschalten auftretenden längeren Wellen schnell genug verschwinden. Das Mittel hierzu ist die Vermeidung aller überflüssigen Trägheiten. Vor allem sind zwei Maßnahmen zu empfehlen. Erstens soll das schwingende Schott recht leicht sein, und die zur Anpassung notwendigen mechanischen Elemente können an der verlängerten, wasserdicht durch die Seitenwand der Versuchsrinne geführten Lagerachse angreifen, wobei auf kleinste Trägheitsmomente zu achten ist. Das Schott braucht nicht unbedingt am Boden der Rinne gelagert zu werden; es genügt, wenn das Lager etwa  $\frac{1}{6}$  Wellenlänge unterhalb des Wasserspiegels liegt. Zweitens kann der Wasser- raum zwischen Schott und Rückwand, der ja nur aus Dichtungsgründen entstanden ist, in der Breite wesentlich verringert werden, wenn man z. B. in der Nähe der beiden Seitenwände wasserdichte Faltenwände (Ziehharmonika) einbaut, so daß das Wasser nur die beiden relativ kleinen Räume zwischen Schott, Faltenwand, Rückwand und Seitenwand erfüllt.

In Bild 10 ist ein diesen Gesichtspunkten entsprechender Entwurf skizziert worden. Bei einigermaßen sorgfältiger Ausführung, wozu auch die Beachtung der linearen Kraftgesetze gehört, kann im Optimum sicher mit einer viel kleineren Reflexion gerechnet werden, als bei der Erstausführung. In der Praxis kommt es jedoch nicht so sehr auf das Optimum an, als auf die Breite des Wellenlängenintervalls, in dem die Reflexion bei fester Einstellung des Tilgers unterhalb eines zulässigen Wertes bleibt.

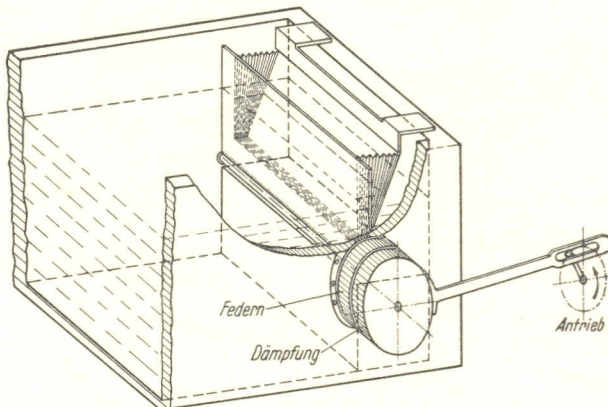


Bild 10. Entwurfsskizze für einen kombinierten Wellenerzeuger und -tilger.

### Zusammenfassung.

Die für Modell-Seegangversuche notwendige Vernichtung der Wellen am Ende der Versuchsrinne kann durch Einbau eines passenden mechanischen Systems theoretisch ohne Reflexion erreicht werden. — Die erste primitive Ausführung eines „Wellentilgers“ im Institut für Schiffbau reflektiert trotz technischer Unvollkommenheiten weniger als  $0,4\frac{0}{00}$  der Wellenenergie. — Das physikalische Prinzip wurde erläutert und es wurden Hinweise für seine technische Entwicklung gegeben.

Die dargelegten Arbeiten wurden mit großzügiger finanzieller Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Institut für Schiffbau der Universität Hamburg durchgeführt. Das Bundesministerium für Verkehr stellte wesentliche Meßeinrichtungen, darunter einen großen Oszillographen, zur Verfügung. Der Verfasser verdankt diesen Institutionen die materielle Grundlage seiner Arbeit.

Herrn Professor Weinblum ist er für das mit diesem Auftrag erwiesene Vertrauen sowie für mancherlei Förderung ideeller und materieller Art aufrichtig verbunden.

Den Mitarbeitern spricht er an dieser Stelle seine Anerkennung aus, insbesondere Herrn cand. arch. nav. Josef Schmid, der die numerischen Rechnungen und schwierigen Messungen mit Verständnis und Sorgfalt durchgeführt hat.

### Erörterung.

Dr.-Ing. F. Gutsche, Berlin.

In Ergänzung der Ausführungen des Vortragenden möchte ich hier auf eine kleine Versuchsreihe hinweisen, die ich in meiner früheren Tätigkeit auf der Schleuseninsel in Berlin selbst durchgeführt habe, und zwar auch zur Projektierung einer Wellenrinne. Ich hatte einfach zwei Wellenerzeuger des Verdrängertyps genommen, diese dicht an die beiden, an den Enden der Rinne befindlichen Schottwände gestellt, so daß der eine Verdrängungskörper die Wellen erzeugte, während der zweite sie wieder vernichtete und ihre Energie aufnahm.

Die beiden Verdrängungskörper wurden durch zwei Synchronmotoren synchron gesteuert, so daß ich also die Abstimmung, die hier bei der Anordnung des Vortragenden noch durch Federn und Massekörper erforderlich ist, vermied, und somit eine Anpassung der Wellenrinne an jede gewünschte Wellenlänge erzielte. Leider mußte ich die Versuche nach kurzer Zeit abbrechen, da wir seinerzeit mit anderen, vordringlichen Aufgaben beschäftigt waren; und heute stehen mir leider auch keine Unterlagen mehr zur Verfügung, die ich zur Dokumentierung dieser Untersuchung hier vortragen könnte. Als Anregung für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet wollte ich aber doch an dieser Stelle auf diese Anordnung hinweisen, die ja noch einen Schritt weitergeht, als es hier vom Vortragenden gezeigt wurde.

Ziviling. **H. Hoppe**, Hamburg (schriftlich eingesandt).

Bei dem Wellentilger oder dem gespiegelten oder negativen Wellenerzeuger, handelt es sich zweifelndfrei um eine interessante und erstmalige Lösung, die Dr. Baumann erdacht und mit Erfolg bereits praktisch erprobt hat. Man könnte sie mit einer dynamischen Methode bezeichnen.

Aus der Anschauung ähnlicher Vorgänge in der Natur und — da Modellversuche angesprochen worden sind — möchte ich aus dem Bereich eigener Erfahrungen eine statische Methode daneben stellen, nämlich die Wellentilgung am Strand, für die es — wie auch in dem Vortrag schon angedeutet ist — in Versuchsanstalten bereits Anwendungen gibt. Welche dieser beiden Wellentilgungs-Methoden für die praktischen Belange einer Versuchsanstalt die technisch einfachere und für den Bau und Betrieb billigere ist, möge dahin gestellt bleiben.

Der Wellentilger, wie er bislang benutzt wurde, besteht aus einem festen Strand, der gegenüber der Horizontalen eine Neigung von etwa  $10^\circ$  besitzt, dessen untere Kante aber bis auf etwa zwei Wellenhöhen unter Wasser reichen sollte, damit sich die anlaufende Welle am Tankende schon möglichst früh mehr und mehr aufrichtet, schließlich zum Brechen kommt und dabei ihre Energie weitgehend verliert. Die obere Kante sollte vorteilhafterweise nur etwas über das Ruheniveau des Wassers reichen, damit der Wellenberg überweggleitet und somit gewissermaßen gekappt wird. Er läuft in ein Auffangbecken hinein, welches unterhalb des Ruheniveaus mit der Versuchsrinne drosselbar, also auch regelbar, wieder verbunden ist. Auf diese Weise wird der Volumenverlust von dem Schlepptank her (oben) zum Schlepptank hin (unten) wieder ausgeglichen. Es entsteht auf diese Weise, auf eine einfache Form zurückgeführt, ein U-Rohr und damit hydraulisches Schwingungssystem, wofür ohne Dämpfung gilt  $T = 2F \sqrt{l/2g}$ . Mit weiteren Mitteln kann noch eine Phasenverschiebung zum Wellenbild von  $180^\circ$  erzwungen werden.

Die Strandmethode hat sich in der früheren HSVA im großen Schlepptank, besser noch im Flußschiffahrtstank und sodann noch im Manövrierteich ausreichend bewährt. In einem Falle wurden mit einstellbaren Strandneigungen systematische Versuche durchgeführt, die der Aufgabe der Unterdrückung von reflektierten Wellen in Wellenbädern dienen, und dabei recht gute Ergebnisse erzielt. Nach dem Abschalten des Wellenerzeugers, wobei während der Auslaufzeit bis zum Stillstand noch eine Reihe länger werdender Wellen mit höheren Fortschrittsgeschwindigkeiten abgestrahlt wurden, wurde trotzdem fast unmittelbar nach dem Stillstand des Wellenerzeugers eine glatte und ruhige Wasseroberfläche erzielt. Es muß also aus Erfahrung gesagt werden, daß Strandanlagen eine für die allgemeine Praxis der Versuchsanstalten ausreichende Unterdrückung von Wellenreflexionen ergeben. Die Strandmethode läßt sich meines Erachtens aber noch verbessern.

Gegenüber früheren Bauweisen mit quer zur Längsrichtung des Schlepptanks liegendem Strand möchte ich vorschlagen: Das Ende der Versuchsrinne wird mit einem Strand versehen, der von jeder Seite aus unter  $45^\circ$  zur Tankmitte hin zusammenläuft. Bei einer steilen Wand würde es eine volle Reflexion geben, derart, daß die ankommenden Wellen um  $90^\circ$  ihrer Fortschrittsrichtung umgelenkt werden und von links und rechts gegeneinander laufen. Es entstehen dann innerhalb des dreieckigen Tankendes etwa stehende Wellen von teilweise doppelter Höhe, ganz besonders im inneren Winkel, teilweise aber auch Interferenzen. In Verbindung mit einem Strand würden die gegeneinander laufenden Oberflächen-Unruhen erheblich kleiner werden.

Es ist anzunehmen, daß aus der inneren Ecke eines solchen Trichterbereiches eine größere Unruhe in die Versuchsrinne zurückstrahlt. Um diese zu unterdrücken, könnte der Trichtereinlauf etwa in der Größe von ein Viertel bis ein Drittel Tankbreite geöffnet bleiben. Es entsteht gewissermaßen ein Tor, durch welches der Mittelteil der anlaufenden Welle hindurchläuft, dann an einem Keil eine jetzt nach außen wirkende  $45^\circ$ -Reflektionsfläche findet, von der sich die Wellenreste nach den Seiten abstoßen und in einem querliegenden Becken wiederum an einem Überlaufstrand weitgehend verschwinden.

Daß solche Reflexionen in Tatsache auftreten, läßt sich beispielhaft an der norwegischen Küste in Fjordeingängen deutlich beobachten. Diese Erscheinung ist besonders den nach Narvik fahrenden Erzschiffen im Lofjottenfjord unangenehm bekannt. Sie sind auch an Hafentürmen an offenen Küsten zu beobachten und bei Rollversuchen mit Schiffen zu beachten.

Parallel an Kaimauern liegend, sind ungestörte, durch Hin- und Herlaufen der Mannschaft künstlich erzeugte Rollbewegungen nicht erzielbar, auch nicht bei einem größeren Abstand des Schiffes von der Kaimauer, und zwar eben darum nicht, weil von dieser aus die reflektierten Wellen die freie Rollschwingung stören. Da die Anfangsperioden beim „Anrollen“ lang sind, sind die Fortschrittsgeschwindigkeiten der Welle nach  $v = 1,561 \cdot T$  entsprechend schnell und erreichen das Schiff meistens schon wieder, ehe eine Untersuchung überhaupt beginnen kann.

Bei solchen Untersuchungen legt man die Schiffe bekanntlich unter  $45^\circ$  zur rechtwinkligen Hafenecke, bei kleineren oder größeren Winkeln auf die Winkelhalbierende.

Wenn ein statischer Wellenschlucker vielleicht nicht in dem Maße wirkt wie der dynamische, der die Energie angeblich bis auf  $0,4\%$  vernichtet, so kann dazu gesagt werden, daß die vom statischen Wellentilger verbleibende zurückgestrahlte Unruhe 1. ohnehin bald verschwindet, daß aber 2. die natürliche See selbst unregelmäßige Überlagerungen kleiner und kleinster Wellen besitzt, wodurch man sich bei Modellversuchen in einem gewissen Grade dem tatsächlichen Stand der Natur sogar wieder nähern würde.

Bei Modellversuchen im Seegang ist aber noch ein anderer Fall zu bedenken, den ich 1929 in einem Vortrage dargestellt habe und der m. E. gleichermaßen bearbeitungswürdig ist, wie vielleicht auch die oben angeführten Strandmethoden und Zwischenbauarten davon.

Die im Schlepptank fortschreitende Welle wird an den Tankwänden „gebremst“. Ihr wird durch Reibung der auf- und niederschwingenden Wasserteilchen an der Tankwand Energie entzogen. Die Welle verliert in der Nähe der Tankwand an Höhe. Dadurch wird das Gleichgewicht in der Querrichtung gestört. Dieses versucht sich natürlich wieder auszugleichen und es beginnt sehr bald schon eine Querschwingung. Sie ist meßbar, wenn man der Bewegungsrichtung der Welle entgegenfährt und mit einem Fühlstift die Wellenköpfe anschneidet. Diese Erscheinung ist auch optisch in Spiegelungen erkennbar, wobei gesagt werden muß, daß es sich bei dem gebogenen Spiegelbild nicht um Überlagerungen von den ersten langperiodigen und demnach schnellaufenden Anfangswellen handelt, die bei dem langsamen Anlaufen des Wellenerzeugers entstehen und auch sehr schnell zurückgestrahlt werden. Die Unterdrückung der Querschwingung einer Welle wäre denkbar dadurch, daß der „Schlepptank für Wellenversuche“ zum Ende hin um das Volumen des Abfalles des „Wellenprofil  $\times$  Einflußbereich“ stetig schmaler wird. Über das quantitative Maß könnte m. E. die Grenzschichtdicke etwas aussagen. Ich möchte Einrichtungen zur selbsttätigen Unterdrückung dieser Querschwingung als eine untersuchungswürdige Aufgabe bezeichnen.

Professor Dr.-Ing. G. Weinblum, Hamburg.

Wissenschaft ist milieubedingt und als solche auch der Mode unterworfen. Diese Mode hat aber auch eine ernste Seite. In der Schiffbauversuchstechnik und -wissenschaft ist das Studium der Seefähigkeit jetzt die große Mode. Im Ausland werden neue Laboratorien eigens zu diesem Zwecke gebaut, wobei Millionen investiert werden. Die erste Voraussetzung, daß dabei etwas Vernünftiges herauskommt, d. h. Ergebnisse, die man verallgemeinern kann, heißt, daß wir wohldefinierte reproduzierbare Wellen erzeugen. Ich war deswegen Herrn Dr. Baumann sehr dankbar für seinen Vorschlag. Als technischer Physiker hat er nämlich ein Plus gegenüber den Schiffbauern — er beherrscht das Gebiet der Elektrizität. Dr. Baumann hat seine Ideen durchgeführt, und wir müssen sagen, die Sache ist „auf Anhieb“ eigentlich recht nett geworden. Im Ausland hat der Gedanke auch schon Beachtung gefunden. Ich hoffe, daß wir auf diese Weise mit der Zeit ein brauchbares neues Instrument für unsere Versuchstechnik finden werden.

Schlußwort Dr. Baumann.

Zunächst danke ich Herrn Dr. Gutsche für seinen interessanten und instruktiven Erörterungsbeitrag. Herr Dr. Gutsche hat, wenn ich recht verstehe, mit dem ersten Verdrängungskörper eine Welle erzeugt, welche am Ende der Wasserrinne total reflektiert wurde. Gleichzeitig erzeugte er mittels eines dort befindlichen zweiten Verdrängungskörpers eine Welle, die bei richtiger Einstellung ihrer drei Kenngrößen (Amplitude, Frequenz, Phase) zur Kompensation der reflektierten Primärwelle diente, so daß eine fortschreitende Welle entstand.

Dies hübsche Experiment ist nur mit außerordentlicher Geschicklichkeit durchführbar. Denn da dem System eine echte Dämpfung fehlt, braucht jede irgendwie entstandene Störwelle sehr lange Zeit, bis sie abgeklungen ist. Überdies setzt es einen so extrem konstanten Antrieb voraus, daß das öffentliche Drehstromnetz nicht ausreicht. Dies wird nämlich in den Grenzen  $50 \pm 0,5$  Hz dauernd geregelt und ist praktisch fast nie konstant, zeigt also Frequenzschwankungen von  $\pm 1\%$ . Aus den entsprechenden Drehzahlschwankungen der Synchronmotore ergäbe sich dann eine Wellenlängenschwankung von  $\pm 2\%$ . Wenn nun die Länge der Versuchsrinne beispielsweise nur fünf Wellenlängen beträgt, so würde am Ort des zweiten Verdrängungskörpers eine Phasenschwankung von ein Zehntel Wellenlänge, also  $\pm 36^\circ$  eintreten. Da sich die Phase zwischen den beiden Synchronmotoren nicht von selbst ändert, würden sich also zwischen den Schwingungsvektoren der eingestellten und der erforderlichen Kompensationswelle Abweichungen vom Betrag  $2a \cdot \sin 18^\circ$  ( $a$  = Amplitude), d. h. Reflektionskoeffizienten bis zu  $2 \cdot \sin 18^\circ = 61,8\%$  ergeben. Ich glaube daher nicht, daß das Experiment von Herrn Dr. Gutsche ohne großen regeltechnischen Aufwand zu einer praktisch brauchbaren Versuchsanlage weiterentwickelt werden kann. — Vergleichsweise sei noch angeführt, daß der Reflektionsfaktor meines „Wellentilger“-Modells durch die gleiche Drehzahlschwankung um  $2,5\%$  verschlechtert wird. Dieser Wert ergibt sich aus der Flankensteilheit der in Bild 7 gezeigten V-förmigen Meßpunktbereiche. Er ist von der Länge der Versuchsrinne unabhängig.<sup>1</sup>

Mit der Abstimmung verhält es sich so, daß Herr Dr. Gutsche bei seinem Experiment doch die drei Kenngrößen der Welle auch am Antrieb des zweiten Verdrängungskörpers richtig einstellen mußte, wobei sich allerdings infolge des synchronen Antriebs die Frequenz von selbst ergab. Es waren aber dann — ebenso wie bei mir — noch zwei Einstellungen nötig: Amplitude und Phase bei ihm, Eigenfrequenz und Dämpfung bei mir.

Ein wesentlicher Unterschied liegt aber darin, daß die Einstellung des „Wellentilgers“ von Amplitude und Phase der ankommenden Welle unabhängig ist. Er wird praktisch entscheidend, wenn man ein Schiffsmodell in der Versuchsrinne hat. Dann sind nämlich Amplitude und Phase der am zweiten Verdrängungskörper eintreffenden Welle am Beginn des Versuchs noch unbekannt, können also dort nicht im voraus eingestellt werden.

Übrigens sind unsere beiden Anordnungen nicht etwa technische Varianten, sondern sie verkörpern durchaus verschiedene physikalische Prinzipien. Während die Anordnung von Herrn Dr. Gutsche auf Kompensation, also Herstellung des Gleichgewichts mit der einfallenden Welle beruht, verfolge ich mit dem „Wellentilger“ das Prinzip der gleichzeitigen Absorption aller Wellen; ich kann es allerdings nur für jeweils eine feste Frequenz, aber beliebige Amplituden und Phasen theoretisch streng erfüllen. — Ob ein bewegliches Schott oder ein Verdrängungskörper verwendet wird, ist eine rein technische Frage.

Herr Hoppe weist in seiner Zuschrift mit Recht darauf hin, daß die Wahl der Dämpfungsmittel für eine Versuchsrinne auch von wirtschaftlichen, betriebstechnischen und anderen Gesichtspunkten beeinflusst wird, und daß auch Strandanlagen in vielen Fällen ihre Berechtigung haben.

Hierzu wäre zu sagen: Der wirtschaftliche und betriebstechnische Aufwand für einen Wellentilger nach dem von mir benutzten Prinzip des angepaßten Rinnenabschlusses liegt völlig in dem bei Versuchsanstalten üblichen Rahmen. Seine Dämpfungswirkung ist derjenigen von Strandanlagen deshalb überlegen, weil diese

<sup>1</sup> Dieser Punkt wurde weiter erörtert in „Schiff und Hafen“, 7. Jahrgang (1955), S. 130.

die Anpassungsbedingung (mechanischer Ersatz für unendliche Rinne) grundsätzlich nicht erfüllen können; ihre Wirkung beruht im wesentlichen auf Zerstörung der Welle durch Überlauf und Brandung. Damit soll aber nicht bestritten werden, daß sich Strandanlagen dort bewähren, wo reflektierte Wellen den Versuchsablauf nicht maßgeblich beeinflussen; wo aber doch etwas für baldige Beruhigung des Wassers getan werden muß (z. B. bei Propulsions- und Manövrierversuchen). — Ein typisches Gegenbeispiel wäre ein Schlingerversuch in ruhigem Wasser oder in künstlicher Dünung. Hier beruht die Dämpfung des Schiffsmodells überwiegend auf Wellenabstrahlung; die gemessene Schlingerdämpfung ist demnach praktisch gleich der Wellendämpfung an den Enden der Rinne. Eine für solche Versuche ausreichende Dämpfung kann durch Strandanlagen nicht erzielt werden.

Zu den weiter von Herrn Hoppe erwähnten Erscheinungen kann ich hier nur sagen: Ein Wasserbecken ist ja ein höchst kompliziertes System mit unendlich vielen Freiheitsgraden; es ist erstaunlich, was man bei sauberer Messung und Beobachtung an unbeabsichtigten und störenden Effekten entdeckt. Aus diesem Grunde sind Präzisionsversuche immer nur in wenigen bestimmten Wellenbereichen möglich. Beim Entwurf einer Versuchsrinne muß man daher alle Resonanzmöglichkeiten und Sekundäreffekte berücksichtigen und danach die Abmessungen so wählen, daß sich brauchbare Wellenbereiche ergeben. — Ich danke Herrn Hoppe für seine anregende Zuschrift.

Meinem verehrten Chef, Herrn Professor Weinblum, danke ich für seine anerkennenden Worte. Ich darf dazu sagen, daß das Anpassungsprinzip schon seit Jahrzehnten zum Bestand der Wechselstrom-Leitungstechnik gehört. Seine Anwendung auf Wasserrinnen ist dadurch erschwert, daß die „schädlichen Massen“ verhältnismäßig groß sind und daß zusätzlich noch für Abdichtung der Rinne gesorgt werden muß.

Professor Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. **F. Horn**, Berlin. (Dankwort)

Die Wichtigkeit des Vortrages von Dr. Baumann ist, wie ich in kurzen Worten noch betonen möchte, in folgendem begründet: Bei der systematischen Erforschung des Verhaltens der Schiffe im Seegang sehen wir uns einer überaus umfassenden und verwickelten Aufgabe gegenüber, deren Lösung immer noch stark in den Anfängen steckt. Anerkanntermaßen hat dabei die Theorie eine ausschlaggebende richtungweisende Rolle zu spielen, sie hat aber, wie überall bei komplexen technischen Problemen, nur dann Aussicht, erfolgreich vorwärtszukommen, wenn sie Hand in Hand mit dem Experiment arbeitet. Der Vergleich der Ergebnisse von Theorie und Experiment wird naturgemäß am einfachsten und klarsten in dem von der Theorie am leichtesten zu erfassenden Grundfall gleichförmigen Seegangs definierter Form; er wird aber nur dann schlüssig, wenn im Experiment, d. h. also in unseren Versuchstanks, die Erzeugung gleichförmiger künstlicher Wellen von definierter Form mit solcher Exaktheit gelingt, daß die Versuche jederzeit reproduzierbar sind. Daran hat es, wie auch die Verhandlungen bei der diesjährigen Internationalen Konferenz der Schiffbauversuchsanstalten in Skandinavien erwiesen haben, bisher in hohem Maße gefehlt, und daher ließen auch die Ergebnisse der Gemeinschaftsversuche, die in zahlreichen Anstalten mit ein und derselben Schiffsform in als gleichförmig vorausgesetzten Wellen bestimmter Längen und Höhen vorgenommen worden sind, an Einheitlichkeit durchaus zu wünschen übrig und konnten daher kaum zur Förderung systematischer Forschung beitragen.

Angesichts dieser bisherigen Schwierigkeiten ist die Lösung, die dem Institut für Schiffbau der Universität Hamburg und insbesondere Herrn Dr. Baumann in Gestalt des von ihm in erheblicher wissenschaftlicher Leistung entwickelten und in seinem Vortrag dargestellten Wellentilgers für Modell-Seegangversuche gelungen ist, als ein bedeutender Fortschritt anzusehen, der geeignet scheint, die Forschung über das Seeverhalten von Schiffen in Zukunft wesentlich fruchtbarer zu gestalten.

Die Schiffbautechnische Gesellschaft ist Herrn Dr. Baumann für seinen wertvollen Vortrag zu großem Dank verpflichtet, den auszusprechen mir eine Freude ist. (Lebhafter Beifall)