

# Studium von Wellenformen und Wellenkräften bei unterschiedlichen Wellenanlaufrichtungen

Von Martin Hager<sup>\*)</sup>

Neuere Beobachtungen haben gezeigt, daß die Veränderung der Wellenform von Wasserschwerewellen bei der Bewegung entlang einer lotrechten oder geneigten Wand durch die bei der Überschallströmung in der Gasdynamik auftretende analoge Erscheinung der *Machreflexion* gedeutet werden kann. Die Machreflexion tritt bei spitzem Winkel zwischen Wellenfortschrittsrichtung und reflektierender Wand besonders deutlich hervor. Beim Verdichtungsstoß strebt der

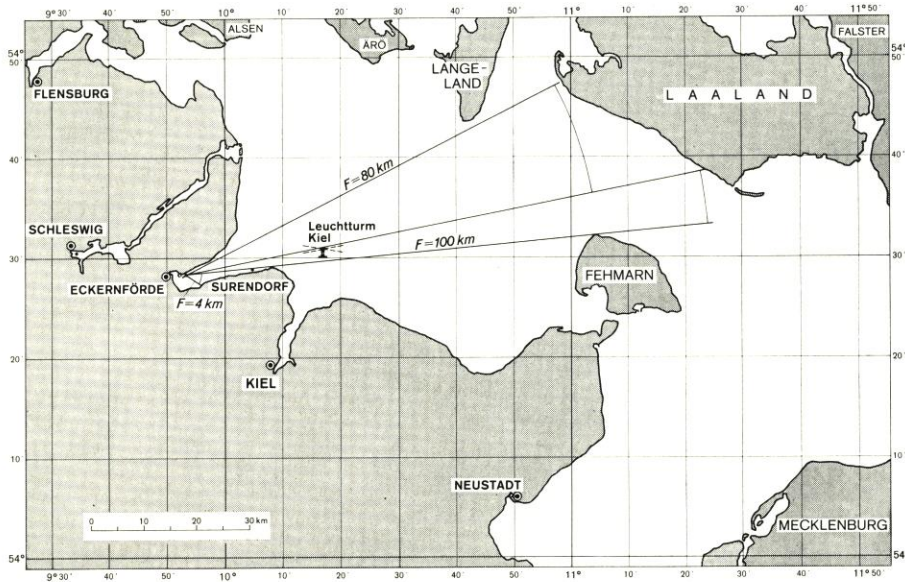


Abb. 1. Westliche Ostsee – Windwirkwege

Druck während der Fortbewegung entlang eines Keiles oder einer unendlichen Halbscheibe in genügend großer Entfernung von der Kante des Hindernisses dem doppelten Anfangswert zu. Durch den sogenannten Mach-stem-Effekt wird die ankommende Welle rechtwinklig gegen die Wand gebeugt. Diese Erscheinung entsteht nach Veröffentlichungen von FRIEDLANDER (1940) und LIGHTHILL (1949) in der Gasdynamik durch Überlagerung eines Verdichtungsstoßes mit einer Beugungswelle, die von der Kante der Scheibe oder einer einspringenden Ecke ausgeht. Der Reflexionsdruck in Größe des zweifachen Anfangswertes wird infolge der Überlagerung erst in großer Entfernung von der Kante der Scheibe erreicht, wobei der Druckverlauf wesentlich von der Gestalt des Druckstoßes abhängt.

Bei den Wasserschwerewellen kann sich eine Beugungswelle nur in einem begrenzten Bereich auswirken, weil diese je nach der Weite des Wellenspektrums von den ankommenden und reflektierten Wellen überlagert wird.

<sup>\*)</sup> Diplom-Ingenieur, Regierungsbaudirektor im Bundesverkehrsministerium, Bonn.

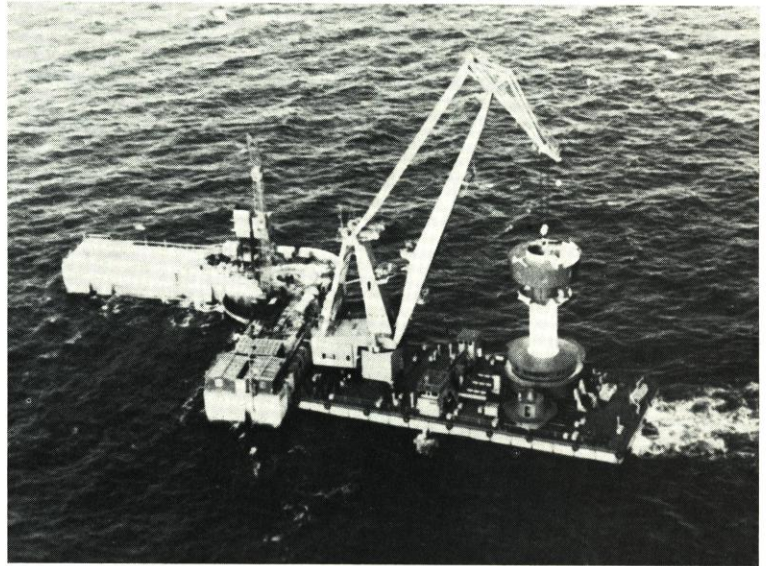


Abb. 2  
Leuchtturm Kiel im  
Bau – Luftbild

Im Jahre 1964 hat WIEGEL über Beobachtungen der Machreflexion und über Modellstudien von PERROUD, NIELSEN, SIGURDSSON und WIEGEL berichtet, die an der University of California in Berkeley ausgeführt worden sind. Ähnliche Beobachtungen beim Bau eines Hafens an der Ostseeküste gaben Veranlassung, die Erscheinungen der Machreflexion unter Naturbedingungen näher zu untersuchen und die hieraus entstehenden Bauwerksbelastungen nachzuweisen. Hierüber ist beim XXII. Internationalen Schiffahrtskongreß berichtet worden. Es standen zwei nach Lage und Gestalt geeignete Bauwerke zur Verfügung. Die Gesamtsituation ist aus Bild 1 zu erkennen. Die Bilder 2 und 3 zeigen das Fundament des Leuchtturms Kiel und die Hafenanlage Eckernförde, die beide mit den notwendigen Meßeinrichtungen ausgerüstet waren. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die 520 m lange senkrechte Hafenanlage, die bei der 15-m-Tiefenlinie in



Abb. 3  
Hafenanlage Eckern-  
förde – Luftbild



den Seegrund einbindet und damit für das Auftreten der Machreflexion besonders günstige Voraussetzungen bot. Durch geeignete Anordnung von Meßpunkten auf ganzer Länge der Wand war es möglich, die Veränderungen des Wellenbildes beim Auftreffen der schräg anlaufenden Tiefwasserwellen und beim Fortschreiten entlang der Molenwand zu verfolgen und die dabei auftretenden Wellenkräfte zu messen. Durch Erfassung der Meßwerte mit selbstschreibenden Registriergeräten war eine eindeutige zeitliche Zuordnung möglich. Im Verlauf eines Jahres wurden mit diesen Einrichtungen alle für die Auswertung wichtigen Meßdaten erfaßt.

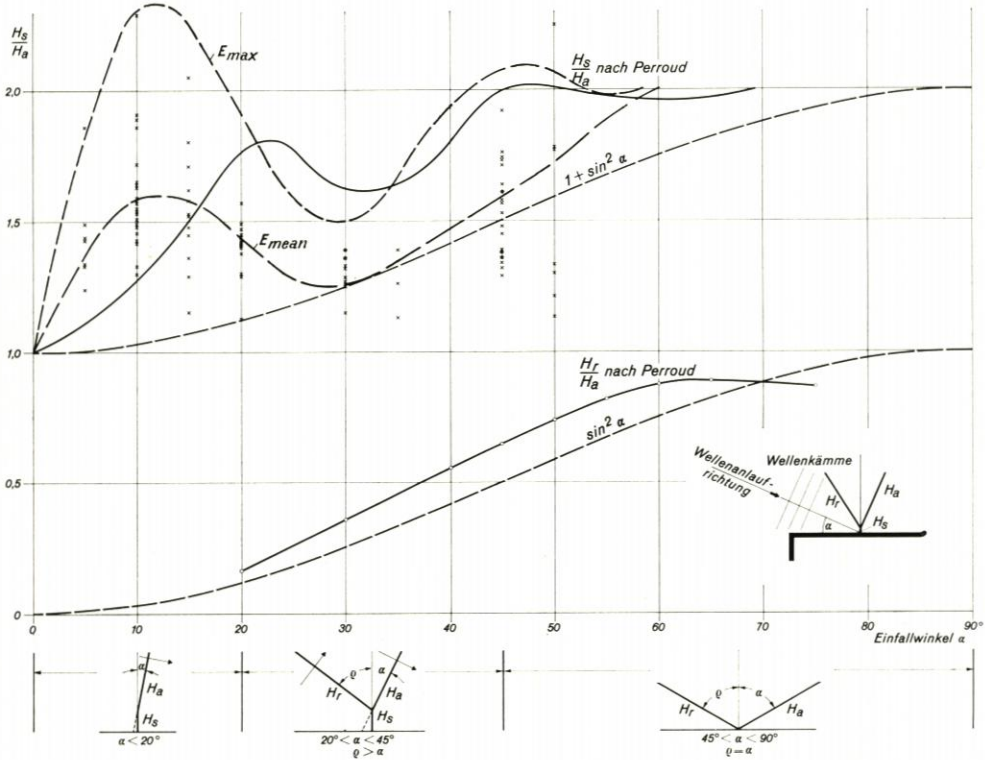


Abb. 4. Vergrößerung der Wellenhöhen an lotrechter Wand in Abhängigkeit von der Wellenanlauf-richtung; Meßergebnisse an der Ostmole - Eckernförde und Vergleich mit Modellmessungen von Perroud

- $H_a$  = Wellenhöhe der ankommenden Welle
- $H_s$  = Wellenhöhe der aufgestellten Welle
- $H_r$  = Wellenhöhe der reflektierten Welle
- $\alpha$  = Einfallswinkel zwischen Wellenfortschrittsrichtung und Bauwerkswand
- $\varrho$  = Reflexionswinkel zwischen Fortschrittsrichtung der reflektierten Welle und Bauwerks- wand

In Abb. 4 sind einige Ergebnisse der Wellenhöhenmessungen dargestellt. Dabei sind solche Messungen ausgewählt worden, bei denen die Wellenspektren der ankommenden Wellen mög- lichst wenig voneinander abweichen, weil die Aufsteilung der Wellen beim Reflexionsvorgang von der Weite des Spektrums abhängt. Die Vergrößerung der Wellenhöhen an der lotrechten Wand wurde in Abhängigkeit von der Wellenanlauf- richtung aufgetragen. Zum Vergleich mit früheren Untersuchungen sind die von Perroud im Labor mit Einzelwellen gefundenen Werte als ausgezogene Linie eingetragen. Die über den Maximalwerten der Eckernförder Messungen gezeichnete Hüllkurve  $E_{max}$  und die durch statistische Auswertung gefundene Regressionskurve

$$E_{\text{mean}} = \frac{3}{\pi} \alpha + \frac{1}{4} \left( \sin 6\alpha + \frac{\sin 12\alpha}{3} \right) + \frac{1}{6} \left( \cos 6\alpha - \frac{\cos 12\alpha}{2} \right)$$

zeigen eine gleichartige Tendenz der Wellenaufsteilung. Allerdings liegt die maximale Wellenaufsteilung bei einem Wellenanlaufwinkel von 10 bis 15° gegenüber 22° bei den mit einer Einzelwelle durchgeführten Laboruntersuchungen. Infolge der Energieübertragung in der Mach-

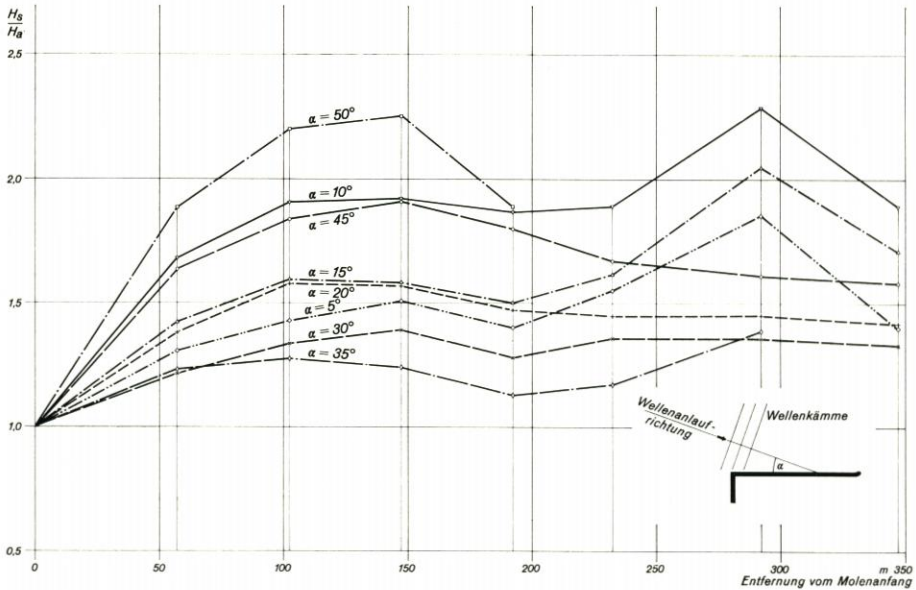


Abb. 5. Veränderung der Wellenhöhen beim Fortschreiten an der lotrechten Wand für verschiedene Wellenanlaufrichtungen nach Meßergebnissen an der Ostmole

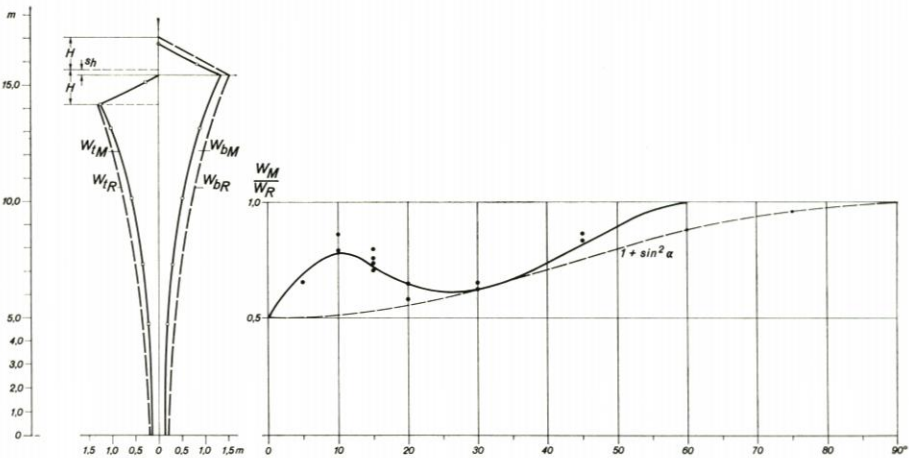


Abb. 6. Wellendruck an lotrechter Wand. Vergleich von Meßergebnissen bei schrägem Wellenangriff mit errechneten Werten bei rechtwinkligem Wellenangriff

- W = Wellendruck in m WS
- W<sub>M</sub> = Gemessener Wellendruck bei schrägem Wellenangriff
- W<sub>R</sub> = Errechneter Wellendruck bei rechtwinkligem Wellenangriff
- W<sub>b</sub> = Druckanstieg unter dem Wellenberg
- W<sub>t</sub> = Druckabnahme unter dem Wellental

bogenwelle wird die Wellenaufsteilung im ungünstigsten Fall die Größe der Totalreflexion sogar um 20 v. H. überschreiten. Es genügt deshalb nicht, die Normalkomponente der Wellenkräfte beim Reflexionsvorgang anzusetzen, vielmehr muß mit einem Lastbild gerechnet werden, welches bei Anlaufwinkeln zwischen 0 und 60° der Aufsteilung

$$1 + \frac{3}{\pi} \alpha + \frac{\sin^2 6\alpha}{\frac{12}{\pi} \alpha}$$

entspricht.

Ein Maximum der Wellenaufsteilung tritt in einer Entfernung von etwa 100 m bis 150 m von der Bauwerkskante und ein weiteres Maximum in etwa doppelter Entfernung auf, wie in Abb. 5 gezeigt wird. Hier wird der Einflußbereich der von der Bauwerksecke ausgehenden Beugungswelle deutlich, die bei steileren Einfallwinkeln durch Kreuzseebildung abgebaut wird.

Die bei den jeweiligen Seegangssituationen vorhandene Druckverteilung an der Wand wurde durch Wellendruckmessungen festgestellt. Die Verhältnismerte einiger Wellendruckauswertungen zu dem rechnerischen Gesamtdruck bei rechtwinklig reflektierter Welle in Abb. 6 bestätigen die Übereinstimmung zwischen dem Wellenbild der Machreflexion und den hieraus zu erwartenden Druckwerten.

Wichtig ist auch die Feststellung, daß die Aufsteilung im Machbogen von der Oberflächen-gestalt und Rauigkeit des Bauwerks verhältnismäßig wenig beeinflusst wird. Dagegen hängt die Aufsteilung nicht allein wesentlich vom Anlaufwinkel, sondern auch von der Dichte und Verteilung des Wellenspektrums ab.

Im übrigen werden die Beugungserscheinungen und damit die Größe der Aufsteilung von der Gestalt des Bauwerksendes beeinflusst, welches der Wellenfront zugekehrt ist.

Die Bauwerksform am entgegengesetzten Ende ist von Bedeutung, wenn die weiter fortschreitende Welle in der veränderten Form für andere Anlagen an der Küste maßgebend ist.