

Komplexe Reflexionskoeffizienten (CRC) bei irregulären Wasserwellen an steilen Uferböschungen

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching
ehem. Bielefeld University of Applied Sciences, Fluid Dynamics Laboratory Minden
ehem. Leichtweiß-Institut, Technische Universität Braunschweig, Germany

Zugehörige Veröffentlichungstitel des Autors:

[I] „Komplexe Reflexionskoeffizienten für Wasserwellen -Zur Klassifizierung von Brandungseffekten an Küstenschutzbauwerken-“, <http://www.digibib.tu-braunschweig.de/?docid=00047022>

[II] Complex Reflection Coefficients Applied to Steep Sloping Structures <http://www.digibib.tu-braunschweig.de/?docid=00045521>

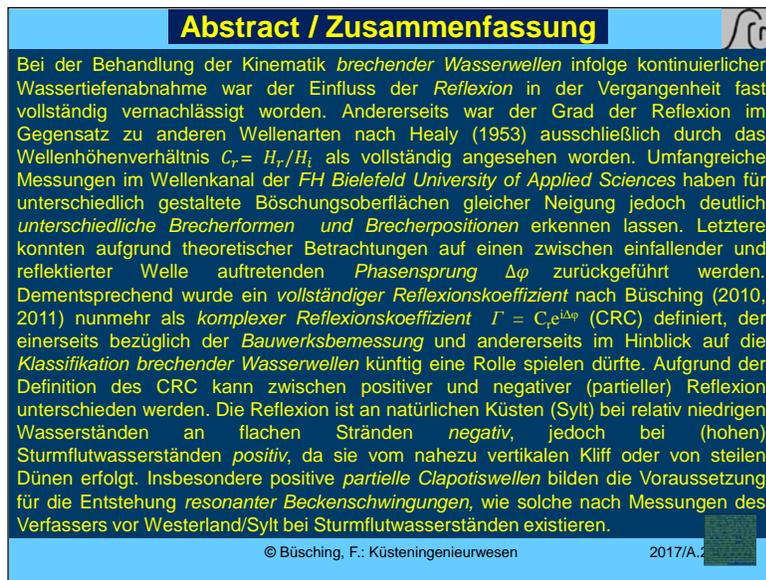
[III] Sturmbrandungsphänomene an der Westküste der Insel Sylt <http://www.digibib.tu-braunschweig.de/?docid=00058823>

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.1

Folie 1 Meine Damen und Herren, mit dieser Präsentation im Rahmen meines Repetitoriums “Küsteningenieurwesen” möchte ich auf die hier genannten Veröffentlichungstitel aufmerksam machen. Anlässlich der internationalen Konferenz Coastlab10 (2010) in Barcelona hatte ich das Wellenhöhenverhältnis „reflektierte Wellenhöhe dividiert durch die eingefallene Wellenhöhe“ H_r/H_i durch eine von mir an Böschungen

nachgewiesene Phasenverschiebung **ergänzt**. Demnach tritt bei der Reflexion zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle nicht nur eine Änderung der Wellenhöhe auf, sondern auch eine Phasenverschiebung **Deltaphi** $\Delta\varphi$. Bis dahin war das genannte Wellenhöhenverhältnis nach Healy (1953) **ausschließlich** als Reflexionskoeffizient verwendet worden.

Das aktuelle Thema betrifft jedoch den **komplexen Reflexionskoeffizienten**, den ich im Folgenden kurz als **CRC** bezeichnen werde und anlässlich der internationalen Konferenz Coastlab12 (2012) in Ghent als die **geeignete Definition bezeichnet** habe.



Abstract / Zusammenfassung

Bei der Behandlung der Kinematik *brechender Wasserwellen* infolge kontinuierlicher Wassertiefenabnahme war der Einfluss der *Reflexion* in der Vergangenheit fast vollständig vernachlässigt worden. Andererseits war der Grad der Reflexion im Gegensatz zu anderen Wellenarten nach Healy (1953) ausschließlich durch das Wellenhöhenverhältnis $C_r = H_r/H_i$ als vollständig angesehen worden. Umfangreiche Messungen im Wellenkanal der *FH Bielefeld University of Applied Sciences* haben für unterschiedlich gestaltete Böschungsoberflächen gleicher Neigung jedoch deutlich *unterschiedliche Brecherformen und Brecherpositionen* erkennen lassen. Letztere konnten aufgrund theoretischer Betrachtungen auf einen zwischen einfallender und reflektierter Welle auftretenden *Phasensprung* $\Delta\varphi$ zurückgeführt werden. Dementsprechend wurde ein *vollständiger Reflexionskoeffizient* nach Büsching (2010, 2011) nunmehr als *komplexer Reflexionskoeffizient* $\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi}$ (CRC) definiert, der einerseits bezüglich der *Bauwerksbemessung* und andererseits im Hinblick auf die *Klassifikation brechender Wasserwellen* künftig eine Rolle spielen dürfte. Aufgrund der Definition des CRC kann zwischen positiver und negativer (partieller) Reflexion unterschieden werden. Die Reflexion ist an natürlichen Küsten (Sylt) bei relativ niedrigen Wasserständen an flachen Stränden *negativ*, jedoch bei (hohen) Sturmflutwasserständen *positiv*, da sie vom nahezu vertikalen Kliff oder von steilen Dünen erfolgt. Insbesondere positive *partielle Clapotiswellen* bilden die Voraussetzung für die Entstehung *resonanter Beckenschwingungen*, wie solche nach Messungen des Verfassers vor Westerland/Sylt bei Sturmflutwasserständen existieren.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.2

Folie 2

Abstract

In the treatment of the kinematics of breaking water waves due to decreasing water depth, the influence of *reflection* in the past had been almost completely neglected. On the other hand, the degree of reflection as defined by Healy (1953) does include the wave height ratio $C_r = H_r/H_i$ only. However, extensive measurements in the wave channel of the FH Bielefeld University of Applied Sciences have shown clearly different breaker types and different breaker positions for differently designed slope surfaces of the same slope angle. Due to theoretical considerations, the latter could be attributed to a phase jump $\Delta\varphi$ occurring between the incident wave and the reflected wave. Accordingly, a *complete reflection coefficient* according to Büsching (2010, 2012) has now been defined as a complex reflection coefficient $\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi}$ (CRC), which in turn is likely to play a role in *demensioning sloping structures* and, on the other hand, with respect to the *classification of breaking water waves*. Due to the definition of the CRC, a distinction can be made between positive and negative (partial) reflection. The reflection is negative on natural shores (Sylt) at relatively low water levels on shallow beaches, but positive at storm water levels, as it occurs from almost vertical cliff or steep dunes. In particular, positive partial clapotis waves form the necessary condition for the formation of resonant basin oscillations, as exist according to measurements by the author in front of Westerland / Sylt Island.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2002/06.3

Folie 3

Übersicht

- **Vorbemerkung** A.5
- **Theoretische Ableitung des komplexen Reflexionskoeffizienten (CRC) $\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi}$** A.7
- **Partieller Reflexion im Labor und in der Natur** A.12
- **Informationsgehalt von Energiespektren in der Natur: Phänomene: Resonanz, Reflexion und Wellenbrechen** A.19
- **Reflexion an geneigten Uferböschungen (Labor)** A.23
- **Spezielle Untersuchungsmethode im Wellenkanal** A.25
- **Spektrale Analyse reflexionsbehafteter Wasserspiegelauslenkungen** A.28
- **CRC nach Betrag $C_r = H_r/H_i$ und Phase $\Delta\varphi$** A.35
- **Darstellungsarten des CRC** A.44
- **Ausblick** A.51

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.4

Folie 4 Zunächst eine Übersicht über den Inhalt der Präsentation:
 Nach einer Vorbemerkung folgt die theoretische Ableitung des komplexen Reflexionskoeffizienten. Mit Bezug auf die **Veränderlichkeit** des **Wellenhöhenverhältnisses** werden sowohl eine teilweise durchlässige Struktur im **Wellenkanal** als auch ein fast **vertikales Steilufer** und ein **veränderliches Ufer** in der **Natur** betrachtet.

Die **technisch** wichtigste Struktur ist aber die geneigte Wand.

Es wird die spezielle spektrale Untersuchungsmethode im Wellenkanal behandelt, und zwar **vonseiten der Wellenerzeugung** und der **Analyse der Messdaten**.

Schließlich die Ermittlung von **Betrag** und **Phaseninformation** des Komplexen Reflexionskoeffizienten.

Alternative Darstellungsmöglichkeiten des CRC werden gezeigt und zuletzt einige Bemerkungen gemacht zu **künftigen** Forschungserfordernissen.

Vorbemerkung

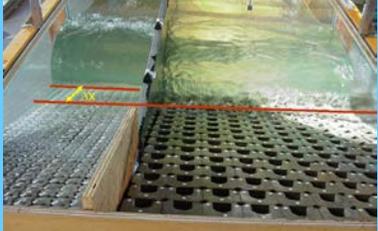
- Basierend auf den Veröffentlichungstiteln [I], [II], [III] wird hier die Verwendung des komplexen Reflexionskoeffizienten vornehmlich am Beispiel der **Neigung 1:2** dargestellt.
- Bezüglich der Neigung 1:3 wird auf den Volltext verwiesen.
- Zur Erleichterung der Bezüge zu den Ursprungstexten wurden die Nummern für **Abbildungen und Gleichungen** aus dem jeweiligen Original beibehalten.
- **Zum Gegenstand:** Die Thematik des **Phasensprunges** partiell reflektierender Wasserwellen ist in der internationalen Laborforschung bisher *fast vollständig* ignoriert worden.
- Auch das spezielle **Verfahren zur Analyse** irregulärer Wellen im Wellenkanal ist bisher nur vom Autor verwendet worden.
- **Die vorliegende Präsentation ist als Lehrveranstaltung ausdrückbar unter:** <http://hydromech.de/Repetitorien/Repetitorien.html>

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.5

Folie 5 Die Phasenverschiebung (auch als Phasensprung bezeichnet) war bisher messtechnisch schwer nachweisbar. Der Verfasser hat aber seit einiger Zeit bei Laboruntersuchungen mit unregelmäßigen Wellen ein Verfahren angewandt, das auch hierfür geeignet ist. Mit dieser Präsentation ist beabsichtigt, dass nicht nur die Quintessenz der Thematik vermittelt wird, sondern auch anhand des ausgedruckten Textes weitergehende Zusammenhänge

erarbeitet bzw. überprüft werden können.

Nach durchgeführten Untersuchungen im Wasserbaulabor der FH Bielefeld waren **Hohldeckwerke** - gegenüber Glattdackwerken - nicht nur durch das Auftreten **geringerer Brecherhöhen** und **veränderter Brecherformen** gekennzeichnet, sondern auch durch eine **veränderte Lage** der brechenden Wellen relativ zum Bauwerk und durch einen **verminderten Wellenauflauf**.



Infolgedessen traten **Abstände Δx** zwischen den Brecherfronten auf, welche ihrerseits **Phasenverschiebungen $\Delta \varphi$** zwischen einfallender und reflektierter Welle vermuten ließen.

Abb.2: **Sturzbrecher** an einer Vergleichsanordnung (quasi glatte Böschung, links) und partieller Sturzbrecher (collapsing breaker) an einem Hohldeckwerk (rechts). Hier Neigung 1:n = 1:3

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.6

Folie 6 Nach durchgeführten Untersuchungen im Wasserbaulabor der FH Bielefeld waren **Hohldeckwerke** - gegenüber Glattdackwerken - nicht nur durch das Auftreten **geringerer Brecherhöhen** und **veränderter Brecherformen** gekennzeichnet, sondern auch durch eine **veränderte Lage** der brechenden Wellen relativ zum Bauwerk und durch einen **verminderten Wellenauflauf**. Infolgedessen traten **Abstände Δx** zwischen den Brecherfronten auf,

welche ihrerseits Phasenverschiebungen $\Delta \varphi$ zwischen einfallender und reflektierter Welle vermuten ließen.

Nur beim **Sturzbrecher (plunging breaker, links)** besteht die Gefahr, dass massive Zerstörungen des Deckwerkes durch das Auftreten von **Druckschlägen** entstehen. Sie sehen hier, dass durch die Anordnung insbesondere einer Hohlstruktur die zu erwartende Brecherform beeinflusst werden kann.

Mathematische Vorbetrachtung für reguläre Wellen [I], [II]

Für den allgemeinen Fall **regulärer** (monochromatischer) Wellen kann die mathematische Formulierung für die **einfallende Welle** der Amplitude A nach EULER wie folgt angegeben werden:

$$y(x, t) = A \cos(\omega t - kx) = \operatorname{Re}[A \cos(\omega t - kx) + i A \sin(\omega t - kx)] \\ = \operatorname{Re}[A e^{i(\omega t - kx)}] = A e^{i(\omega t - kx)} \quad (4)$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = \frac{2\pi}{T}$ und der Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{L}$.

$$y(x, t) = A \cos(\omega t - kx) = A e^{i(\omega t - kx)}$$

Es handelt sich dabei demnach sowohl um die Darstellungsvariante als sog. Kosinus-Welle als auch um die *komplexe Vektordarstellung*, bei der nach der üblichen Regel der Ref]-Operator – wie auch hier im Folgenden - nicht geschrieben wird.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen

2017/A.7

Realteil des zweiten. Andererseits ist der **letzte** Term (rot) gleich dem Realteil des dritten Terms (schwarz).

Folie 7 Mathematische Vorbetrachtung für reguläre Wellen:

Einmal experimentell gefunden, wird hier die mathematische Formulierung für

monochromatische Wellen auf den nächsten Folien dargestellt: Die **Kosinuswelle** ist der **erste** Term (rot). Der zweite und der dritte Term (schwarz) bilden dann die Euler-Identität bzw. den Moivre-Satz jeweils noch mit Re-Operator davor. Blickt man auf den ersten und den zweiten Term, dann ist der erste gleich dem

Daraus entsteht der Ausdruck für die **reflektierte Welle** einfach durch Multiplikation mit dem *Reflexionskoeffizienten* unter Berücksichtigung einer *Phasenverschiebung* $\Delta\varphi$ und eines negativen Vorzeichens für die Wellenzahl k, weil die reflektierte Welle sich entgegengesetzt zur Richtung der einfallenden Welle bewegt.

Wird zudem vorausgesetzt, dass die Reflexion am Ort $x = 0$ stattfindet, der auf der rechten Seite liegen möge, sodass alle Wellenaktivität im negativen x-Bereich stattfindet, dann lautet der Ausdruck hierfür

$$y(x, t) = C_r A \cos(\omega t + kx + \Delta\varphi) = C_r \cdot A e^{i(\omega t + kx + \Delta\varphi)} \\ = (C_r e^{i\Delta\varphi}) \cdot A e^{i(\omega t + kx)} = \Gamma \cdot A e^{i(\omega t + kx)} \quad (5)$$

Der komplexe Reflexionskoeffizient lautet demnach

$$\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi} \quad (6)$$

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen

2017/A.8

Gleichung 5 schließlich direkt die Formel (6).

Folie 8 Aus der einfallenden Welle entsteht der Ausdruck für die *reflektierte Welle* einfach durch Multiplikation mit dem *Reflexionskoeffizienten*, d.h. durch Multiplikation mit dem Wellenhöhenverhältnis C_r (rot) unter Berücksichtigung der *Phasenverschiebung* $\Delta\varphi$ (+ $\Delta\varphi$) (rot) und eines *negativen Vorzeichens* für die Wellenzahl k (rot), weil die reflektierte Welle sich entgegengesetzt zur Richtung der einfallenden Welle bewegt. Nach einigen Umformungen ergibt die

Γ ist hier also als komplexer Reflexionskoeffizient definiert, d.h., als der Quotient aus der komplexen reflektierten Welle dividiert durch die komplexe einfallende Welle.

$$\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi}$$

mit dem **Betrag** $C_r = H_r/H_i$ = dem Quotienten aus den Höhen (bzw. Amplituden) der reflektierten und der einfallenden Welle und dem **Phasenunterschied** $\Delta\varphi$, der zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle am Ort der Reflexion auftritt.

Es sei vermerkt, dass im Unterschied zu dem in der Signalübertragungstechnik üblichen Gebrauch der polar komplexen Vektordarstellung hier $\Delta\varphi$ anstelle des bloßen Winkels φ verwendet wird.



Folie 9 In der komplexen Schreibweise ist *Gamma* gleich *Betrag* mal e hoch i-Winkel. Der **Betrag ist H_r/H_i** (also die Höhe der zurückgeworfenen Welle dividiert durch die Höhe der einfallenden Welle) und der Winkel ist die **Phasenverschiebung $\Delta\varphi$** zwischen der einfallenden (incident) und der reflektierten Welle.

Das gesamte Wellenfeld besteht aus der Summe der Gleichungen (4) und (5)

in der Kosinus-Darstellung:

$$y(x, t) = A \cos(\omega t - kx) + C_r A \cos(\omega t + kx + \Delta\varphi) \quad (7)$$

einfallende Welle + reflektierte Welle

und in polar komplexer Vektordarstellung:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= A e^{i(\omega t - kx)} + C_r A e^{i(\omega t + kx + \Delta\varphi)} = (e^{-ikx} + C_r e^{i\Delta\varphi} e^{ikx}) A e^{i\omega t} \\ &= (e^{-ikx} + \Gamma e^{ikx}) A e^{i(\omega t)} \quad (8) \end{aligned}$$



Folie 10 Das gesamte Wellenfeld besteht dann aus der Summe der Gleichungen (4) und (5). Das Wellenfeld ist wichtig, weil es schließlich die Gestalt der resultierenden (partiell stehenden) Welle beschreibt, und zwar in Abhängigkeit von Ort und Zeit und von der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$.

Insbesondere liefert ihre Auswertung die nachfolgenden wichtigen Spezialfälle:

Positive Totalreflexion für $\Delta\varphi = 0^\circ$ und $C_r = 1$.
Dann ist auch $\Gamma = 1$
$$y(x, t) = (e^{ikx} + e^{-ikx})Ae^{i\omega t} = 2A \cos kx e^{i\omega t} \quad (9)$$

Dies ist die Gleichung einer **perfekt stehenden Welle ohne Phasensprung**.

Negative Totalreflexion für $\Delta\varphi = 180^\circ$ und $C_r = 1$.
Dann ist $\Gamma = -1$
$$y(x, t) = (e^{-ikx} - e^{ikx})Ae^{i\omega t} = -2i \sin kx e^{i\omega t} \quad (10)$$

Auch dies ist die Gleichung einer **perfekt stehenden Welle**, jedoch **mit einem Phasensprung von 180° (π)** zwischen einfallender und reflektierter Welle.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.11

Folie 11 Insbesondere können zwei Spezialfälle angegeben werden: **Positive und negative Totalreflexion**. Gleichung (9) liefert für $\Delta\varphi = 0^\circ$ und $C_r = 1$ die **perfekt stehende Welle ohne Phasensprung**, für die bisher auch die Bezeichnung „Clapotis“ allein gegolten hat, also für die Totalreflexion von einer vertikalen Wand.

Gleichung (10) liefert aber für $\Delta\varphi = 180^\circ$ und $C_r = 1$ ebenfalls eine **perfekt stehende Welle**, jedoch mit der **Phasenverschiebung (von**

$\Delta\varphi = 180^\circ$ (π)). Das bedeutet, dass eine solche stehende Welle gegenüber der ersteren um $\Delta\psi = 90^\circ$ ($\pi/2$) verschoben ist. Man kann sie auch als **negative Clapotis** bezeichnen. Praktisch wird ein Wellenkamm durch ein Wellental reflektiert und umgekehrt.

Das sind dann auch die beiden Fälle, die insbesondere für die **Reflexion von Seilwellen** bekannt sind: (einerseits für unbefestigtes Seil an seinem freien Ende und andererseits gelenkig aufgelagertes Seilende.)

Partiell stehende Wellen an einer teilweise durchlässigen Struktur.

Nebenstehende Bilder zeigen die Veränderungen der **Orbitalbewegungen** mit zunehmendem Betrag C_r des Reflexionskoeffizienten ($0,00 < C_r < 1,00$) im Wellenkanal.

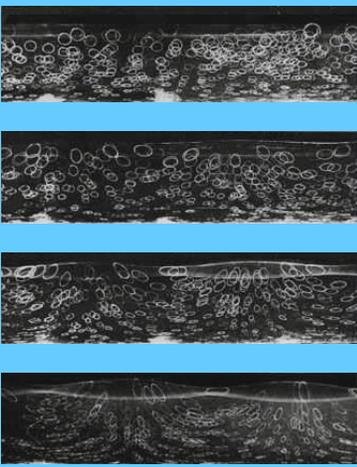
Oben: Kreise
Unten: Ellipsen
Ellipsen mit geneigten Hauptachsen
Ellipsen
Ellipsen deren eine Hauptachse auf Kosten der anderen Hauptachse zunimmt
Linien bei fast perfekter Reflexion

Wallet and Ruellan: Houille Blanche, Nr. 4, 1950, Grenoble
© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.12

Folie 12 Zur weiteren Einführung in die Materie die Versuchsergebnisse im Labor nach Wallet and Ruellan (1950): Es handelt sich um photographische Zeitaufnahmen von reflektierenden Schwebkörpern (mit gleicher Wichte des Wassers) während der Wasserwellen-Reflexion. Sie beschreiben die welleninduzierten momentanen Orbitalbahnen der Flüssigkeitspartikel. Oben für eine noch weitgehend ungehindert fortschreitende Welle mit etwa kreisförmigen

Orbitalbahnen nahe der Wasseroberfläche.

Mit zunehmender Reflexion entstehen Ellipsen mit unterschiedlichen Neigungen der Hauptachsen. Schließlich wachsen die Längsachsen auf Kosten der Querachsen, bis die Längsachsen zu gekrümmten Linien entarten. So wie die Potentialtheorie diese auch für perfekt stehende Wellen erfordert.



$H_r / H_i = 0,00$
 $H_r / H_i = 0,24$
 $H_r / H_i = 0,38$
 $H_r / H_i = 0,53$

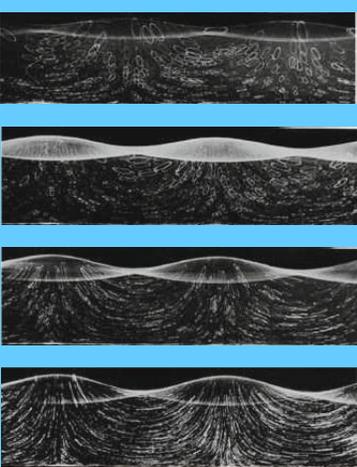
Perfekt von links nach rechts *fortschreitende* lineare Welle.

Zunehmende Reflexion von einer Struktur mit abnehmender Durchlässigkeit.

Bilder: nach Wallet and Ruellan: Houille Blanche, Nr. 4, 1950, Grenoble.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.13

Folie 13 Dieselben Bilder etwas größer. Die Zunehmende **Behinderung** des Wellenfortschritts bzw. zunehmende **Reflexion** von der Struktur wird hier allein durch das zunehmende Wellenhöhenverhältnis beschrieben.



$H_r / H_i = 0,53$
 $H_r / H_i = 0,71$
 $H_r / H_i = 0,85$
 $H_r / H_i = 1,00$

Sollten die Aufnahmen vom *selben Standort* aufgenommen worden sein, *könnte* die *Knotenverlagerung* auf die Existenz von **Phasensprüngen $\Delta\varphi$** schließen lassen.

Keine Aussage über die relative Lage der (partiellen) Clapotis-Wellen zum Bauwerk.

Bilder: nach Wallet and Ruellan: Houille Blanche, Nr. 4, 1950, Grenoble.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.14

Folie 14 Hier setzt sich die zunehmende **Wasserwellen-Reflexion** bis zur vollständigen Reflexion mit $H_r / H_i = 1,0$ fort. Sie wird zwar durch die **Lichtreflexion** an den eingestreuten Schwebkörpern recht deutlich. Leider wurde von den Verfassern aber die exakte relative Lage der (partiellen) Clapotis-Wellen offenbar **nicht für bedeutend gehalten und nicht dokumentiert**.

Wellenreflexion an vertikaler Wand:

Unterkritische Wellensteilheit: Stabile Clapotis = perfekt stehende Welle mit *ortsfesten* Knoten (nodes) und Schwingungsbäuchen (loops) mit der Doppelamplitude $2H$.

Überkritische Wellensteilheit: Gebrochene Clapotis = aufgerissene Clapotis mit austretendem Wasser an den Schwingungsbäuchen; *Doppelamplitude* $> 2H$.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.15

Folie 15 Zu dem sich in der Natur wirklich abspielenden Vorgang der Reflexion: Eine nahezu **perfekt stehende Welle** – wie links durch die beiden maximalen Auslenkungsphasen dargestellt – ist in der Natur kaum zu sehen, da dazu die kritische Wellensteilheit H/L , die u.a. von der Wassertiefe vor dem Bauwerk abhängig ist, nicht überschritten werden darf. Meistens kommt es zur aufgerissenen Clapotis (rechts), bei der Wasser an den (partiellen) Bäuchen austritt. Am Bauwerk schießt das austretende

Wasser dann viel höher als $2H$ senkrecht über die Bauwerkshöhe hinaus.

Die Folge sind massive Schäden am Bauwerk, wenn das Wasser zurückfällt und dabei das Bauwerk von oben trifft. Weitere Schäden durch sog. Druckschläge treten auf, wenn es bei überkritischer Wellensteilheit zum Wellenbrechen an der vertikalen Wand kommt.

Generell ist das **Gefährdungspotential** bei senkrechten Wänden ein **Maximum**, weil die resultierende Wellenhöhe zumindest gegen das 2-fache der einfallenden Wellenhöhe beträgt. Daraus abgeleitete Bemessungsverfahren werden an anderer Stelle dargestellt.

Aufgerissene (partielle) Clapotis (Westmole/Helgoland)

Örtlich und zeitlich geringfügig unterschiedliche Phasen um den oberen Totpunkt der Schwingbewegung am Bauwerk. Einesteils hat der vertikale Schussstrahl etwa seine maximale Höhe erreicht, andernteils hat das herabfallende Wasser bereits das Bauwerk getroffen.

Vermutet werden kann, dass **geringe Phasenverschiebungen** zwischen einfallenden und reflektierten Wellen um $\Delta\varphi \approx \pm 0$ örtlich unterschiedliche Effekte bewirken.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.16

Folie 16 2 Bilder dazu: Gezeigt wird hier eine aufgerissene Clapotis links im Bild. Der vertikale Schussstrahl hat etwa seine maximale Höhe erreicht, andernteils hat rechts das herabfallende Wasser bereits das Bauwerk getroffen. Es sind hier offenbar örtlich und zeitlich geringfügig unterschiedliche Phasen um den **oberen Totpunkt** der Schwingbewegung am Bauwerk zu sehen.

Aufgerissene (partielle) Clapotis an einer Steilküste

By permission of: Nikolai Speranzki



Gezeigt ist die Phase, in der einerseits am Steilufer der untere Totpunkt der Schwingung erreicht ist und andererseits Wasseraustritt am seewärtigen Schwingungsbauch erfolgt.

Vermutet werden kann, dass **geringe Phasenverschiebungen** zwischen einfallenden und reflektierten Wellen um $\Delta\varphi \approx \pm 0$ örtlich unterschiedlich aber etwa gleichzeitig landwärtiges oder seewärtiges Wellenbrechen am Schwingungsbauch bewirken.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.17

Folie 17 Gezeigt ist die Phase, in der einerseits am Steilufer der untere Totpunkt der Schwingung erreicht ist und andererseits Wasseraustritt am seewärtigen Schwingungsbauch erfolgt. **Instabile Phasenverschiebungen zwischen einfallenden und reflektierten Wellen** bewirken, dass örtlich unterschiedlich aber etwa gleichzeitig **landwärtiges** oder **seewärtiges Wellenbrechen** am Schwingungsbauch erfolgt. Ähnliche Erscheinungen – jedoch einschließlich ggf. auftretender

Druckschläge – sind für die Schwingungsphase des oberen Totpunktes an der Steilwand des Ufers zu erwarten.

Dünenabbruch infolge Sturmfluteinwirkung auf Sylt



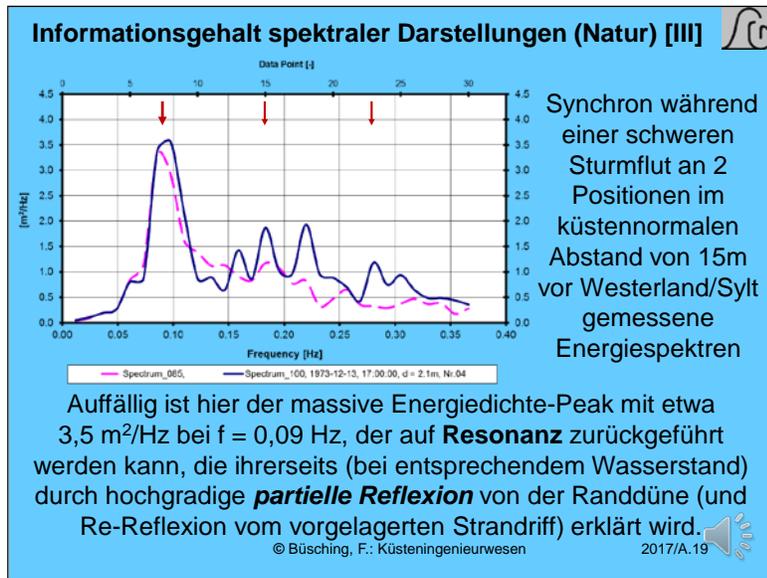
Am Dünenfuß aufgetretene Erosionen sind als Folge resonanter **Beckenschwingungen** bei hohem Wasserstand anzusehen. Dabei spricht die Steilheit der Böschungsneigung für den Effekt **massiv positiver partieller Reflexion**.

Zustand unmittelbar nach Ablauf der Sturmtiden-Kette vom 13./14.12.1973. Vor Beginn derselben waren die dünenseitigen Laufstegstützen nicht sichtbar im Sand verborgen gewesen.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2002/06.18

Folie 18 Jetzt zu den eigenen Forschungsergebnissen, die während einer schweren Sturmflut an der Westküste der Insel Sylt erhalten wurden. Es handelt sich dabei um **Energiespektren**, die im Brandungsgebiet seewärts der hier gezeigten Randdüne an 2 Positionen synchron aufgezeichnet wurden. Tatsächlich hat es etwa 30 Jahre gedauert, bis der Autor solche sehr energiereichen Spektren als Resonanzspektren klassifiziert hat. Dabei wird von resonanten Beckenschwingungen ausgegangen, deren Anregung

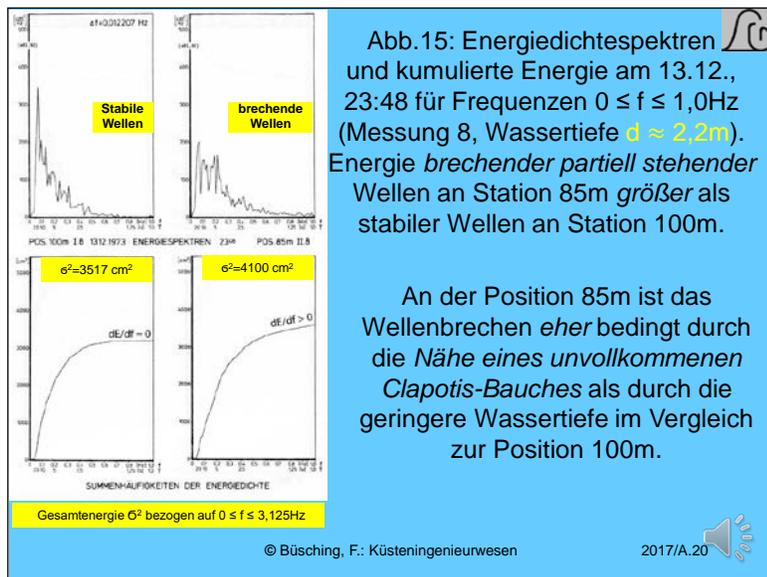
durch die von See kommenden Sturmflutwellen erfolgt. Voraussetzung dafür sind vorzugsweise Randbedingungen, die eine **effektive Reflexion** bewirken. Das war insbesondere *bei hohen Wasserständen* an der Düne vor Westerland (südlicher Bereich) der Fall.



Folie 19 Reflexionsspektren stellen **zusammengesetzte Spektren** (*composite spectra*) dar, weil sich in ihnen die Spektren der einfallenden Wellen und der reflektierten Wellen überlagern. In Laboratorien lässt sich auch noch der zusätzliche Effekt der Reflexion vom Wellenerzeuger (der Wellenklappe) nachweisen. Falls in der Natur *entsprechende* reflektierende Strukturen vorhanden sind, wie das vorgelagerte Riff vor Sylt, können resonante Beckenschwingungen dann noch ausgeprägter auftreten.

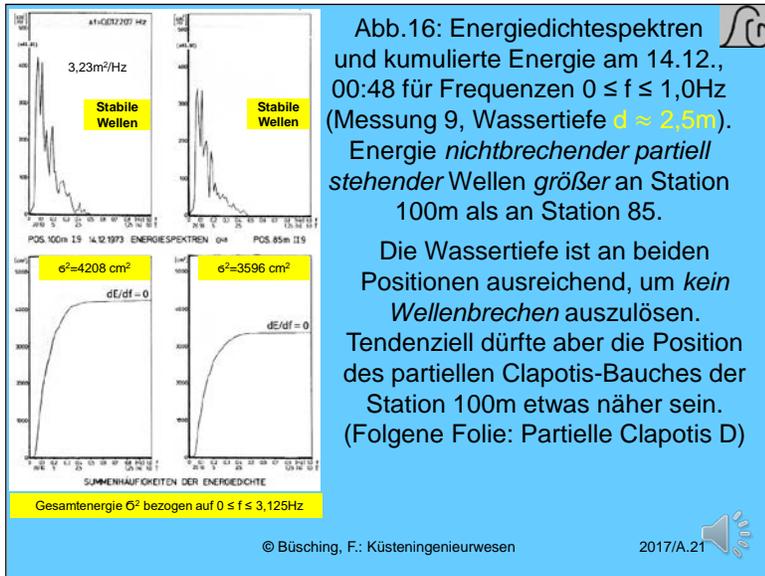
Resonanz kann aber auch *ohne vollständig erkennbare Beckenberandungen auftreten*. Näheres an anderer Stelle.

Hier ist der maximale Peak als Grundschwingung anzusehen, die zusammen mit der 1. und der 2. Oberschwingung auftritt. Dazu noch die nächsten beiden Folien.

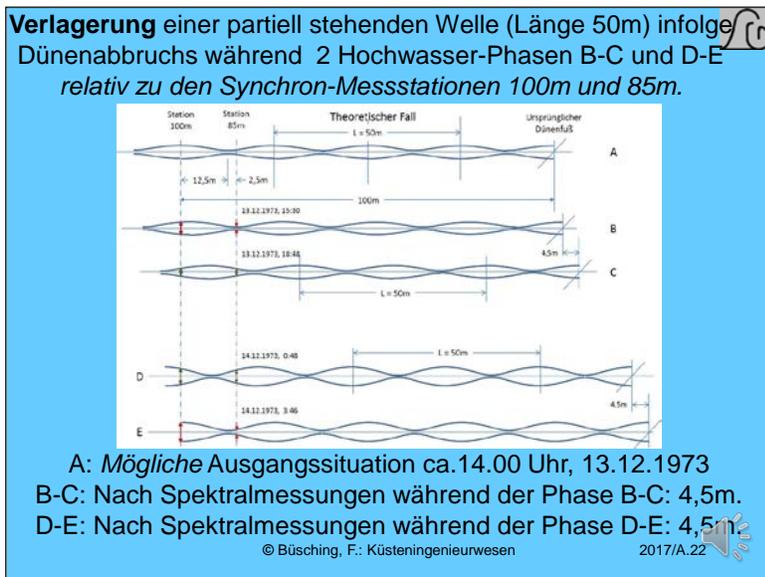


Folie 20 Dies sind **2 synchron gemessene Energiespektren**, wie sie im stündlichen Abstand an 2 Positionen in einem Strandprofil vor Westerland/Sylt während des Ablaufes der betreffenden schweren Sturmflut gemessen worden sind. Es handelt sich also dabei um die Verteilung der Wellenenergiedichte über der Frequenz. Darunter sind die Summenlinien, also die Integrialkurven der Energiedichte dargestellt. Die gesamte Wellenenergie entspricht dann der Fläche unter dem Spektrum.

Die Verteilung der Energie über der Frequenz ist markant unterschiedlich. Das ist insbesondere auch an den Summenlinien zu erkennen. Bemerkenswert ist zunächst, dass die Gesamtenergie (σ^2 -quadrat –Werte bis $3,125 \text{ Hz}$) hier an der Messstation 85m seewärts von der Düne größer ist als an der Position 15m weiter seewärts. Während die Energie für nicht brechende Wellen an der Position 100m von der Düne sich hier auf das Frequenzband bis etwa $0,7 \text{ Hz}$ verteilt, erstreckt sich die Energie für brechende Wellen infolge der Turbulenzentwicklung auf ein Frequenzband bis weit jenseits von 1 Hz . Deswegen hätte man hier eigentlich eine geringere Gesamtenergie als an Position 100m erwartet. In diesem Falle überwiegt aber offenbar der Effekt der Reflexion von der (steilen) Abbruchböschung der Düne.



nächste Folie.



verlagert sich diese insbesondere bei relativ **hohem** Wasserstand mit dem durch sie *verursachten Dünenabbruch weiter landwärts*. Der Zustand D, der etwa um 0:48 des nächsten Tages (während der 2. Hochwasserphase) erreicht ist, entspricht etwa den gemessenen Energiegehalten der zuletzt gezeigten Spektren. Weitere Erläuterungen sind in der betreffenden Veröffentlichung (III) enthalten.

Messung D: Grüne Pfeile, *geringe Unterschiede größerer Wasserspiegelauslenkungen* an Station 100m und 85m.

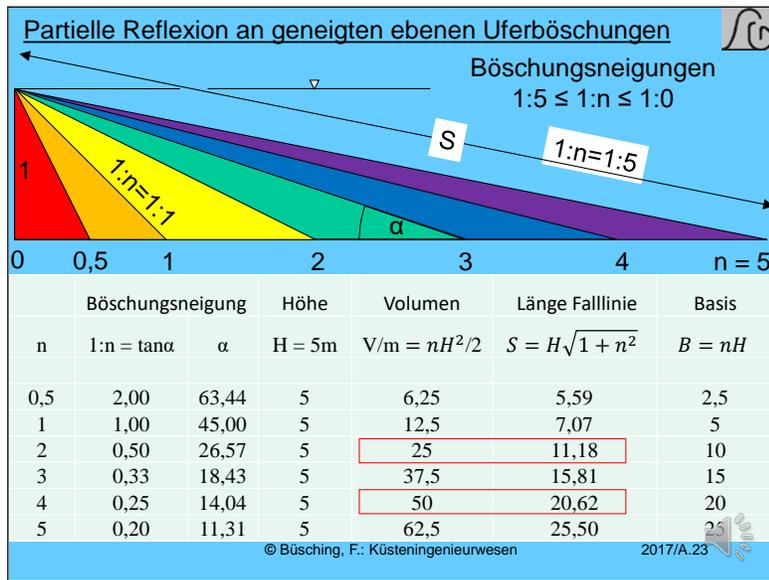
Somit ist also der Mechanismus des **Küstenrückganges** an Dünen- bzw. Kliffküsten mit vorgelagerten flachen Sandstränden im Wesentlichen auf die **massive positive Wellenreflexion** bei Hochwasserständen zurückzuführen, die zudem noch die Voraussetzung für das Auftreten von resonanten Beckenschwingungen bietet.

Andererseits ist sehr wohl bekannt, dass es umgekehrt in den Sommermonaten bei ruhigen Wetterlagen an flach geneigten Stränden bei **ausgeprägt negativer Reflexion** zu **Anlandungen** kommt.

Folie 21 Das sieht bei diesen beiden Energiespektren, die eine Stunde später gemessen wurden, anders aus. Einerseits ist der Energiegehalt hier an der Position 100m größer als an Position 85m und andererseits kommt es bei der Wassertiefe von 2,5m **nicht zum Wellenbrechen**. Die Energie bleibt auf die Frequenzen bis etwa 0,5Hz beschränkt.

Die Frage, warum die Energie eine Stunde früher (vorige Folie) an der Position 15m näher zur Küste höher war als an der anderen Station 100m, beantwortet die

Folie 22 Bei dieser Betrachtung handelt es sich um eine **Abschätzung** der Verlagerung einer partiell stehenden Welle unter Berücksichtigung der **Beträge der spektralen Energien** an den beiden Messpositionen (100m und 85m) **relativ zueinander**. (Maxima sind den Bäuchen und Minima den Knoten zugeordnet). Ausgehend von der gezeigten Lage (A) einer partiell stehenden Welle der Länge 50m relativ zu den dargestellten Stationen 85m bzw. 100m vom Dünenfuß um etwa 14.00Uhr,

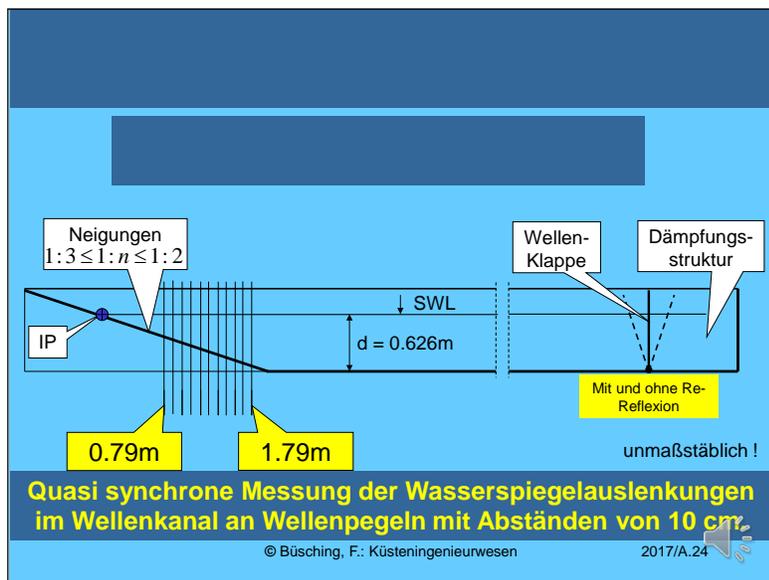


Folie 23 Mit abnehmender Neigung des Ufers werden die Lasteffekte geringer. Technisch von besonderer Bedeutung ist deshalb die **geneigte Ebene** als sog. Böschung. Hier kommt es generell zum **Wellenbrechen** vor allem in Abhängigkeit von der Wellensteilheit H/L, der Böschungsneigung 1:n und der Beschaffenheit der Oberfläche. Wellenbrechen ist hierfür (ggf. einschließlich Druckschlag) die Hauptbelastung. Insbesondere zeigt die Abbildung exemplarisch,

wie für einen Böschungskeil der Massenbedarf **V** und die Böschungslänge **S** mit abnehmender Neigung zunimmt. Exemplarisch sind für die Bauwerkshöhe H=5m die entsprechenden Werte angegeben.

Demnach verdoppelt sich das Keilvolumen **V**, wenn statt einer Neigung 1:2 die Neigung 1:4 gewählt wird, und ähnliches gilt auch für die **zu befestigende** Böschungslänge **S**.

Hier sollen nur die **Phasenverschiebung** und das **Wellenhöhenverhältnis** $C_r = H_r/H_i$ das Thema sein. Und zwar speziell für **Bauwerke mit der Neigung 1:2**. Untersuchungsergebnisse anderer Forscher zur Thematik der Böschungsbauwerke werden an anderer Stelle dargestellt.



Folie 24 Hier geht es um die Ausmessung partieller Clapotis-Wellen. Für die Neigung 1:3 hatten unsere Untersuchungen mit Wellenpegeln im gesamten Kanal (ca. 90) begonnen (I). Es ist aber ausreichend, die Erfassung auf etwa 2L/3 der langen Wellen vor dem Bauwerk zu beschränken, und dafür zu sorgen, dass die auftretende Re-Reflexion ggf. nicht mitgemessen wird. (Z.B., durch Verkürzung der einfallenden irregulären Wellensequenz.) Auf den Messbereich von 0,79m bis

1,79m (mit 11 Wellenpegeln) wird nachfolgend Bezug genommen werden.

Für **reguläre Wellen** war es früher üblich, insbesondere die maximalen und minimalen Wasserspiegelauslenkungen über bestimmte Zeiträume (auch aus Schwärzungsdiagrammen) *analog* zu ermitteln. Hier wurde dagegen mit der Aufnahme von Spektren eine spezielle *digitale* Methode gewählt.

Da die Frequenzabhängigkeit bei *Wellenvorgängen* die *fundamentale* Eigenschaft darstellt, lag es nahe, diese nicht nur bei der *Wellenerzeugung* in Form von Spektren zu berücksichtigen, sondern auch die zu messenden Wasserspiegelauslenkungen im Anströmbereich der Teststruktur unter Verwendung von *Spektren* nach Frequenzen zu analysieren.

Dabei konnte in zweifacher Hinsicht vorteilhaft auf die *Naturuntersuchungen* vor Sylt Bezug genommen werden: Einerseits wurde der Frequenzbereich der vor Sylt gemessenen Sturmflutpektren unter Verwendung des Froude'schen Modellgesetzes auf die Frequenzen der Erzeuger-Wellensequenz übertragen.

Andererseits war bestätigt worden, dass es sich **auch in der Natur vor Sylt** je nach Seegang und Wasserstand um unterschiedliche Arten *partieller Reflexion* und *Resonanz* handelt, [III].

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen

2017/A.25

Folie 25

Im Zusammenhang mit den Untersuchungen der Wirksamkeit patentierter *Hohldeckwerke* hat der Autor damit *auch* eine bis dahin *nicht angewandte Analysemethode* für die Wirkungen *irregulärer Wellen an Bauwerken* verwendet.

Demnach werden im Wellenkanal für die Beurteilung der *Retro-Reflexion* vom Versuchsobjekt (Böschung) im Anströmbereich an einer *Vielzahl* von Pegelpositionen die Wasserspiegelauslenkungen quasi synchron gemessen. Im Gegensatz zur direkten Analyse analoger Wasserspiegelauslenkungen wurden letztere aber zunächst der *Spektralanalyse* unterzogen.

Damit stehen sog. **Energiespektren** für jede Pegelposition zur Verfügung, aus deren Integration für *vorgegebene Frequenzbänder* **Energiewerte** berechnet werden können.

Somit ist es möglich, aus der Energieverteilung seewärts des Bauwerkes auf Charakteristika der Wellenaktivität zu schließen.

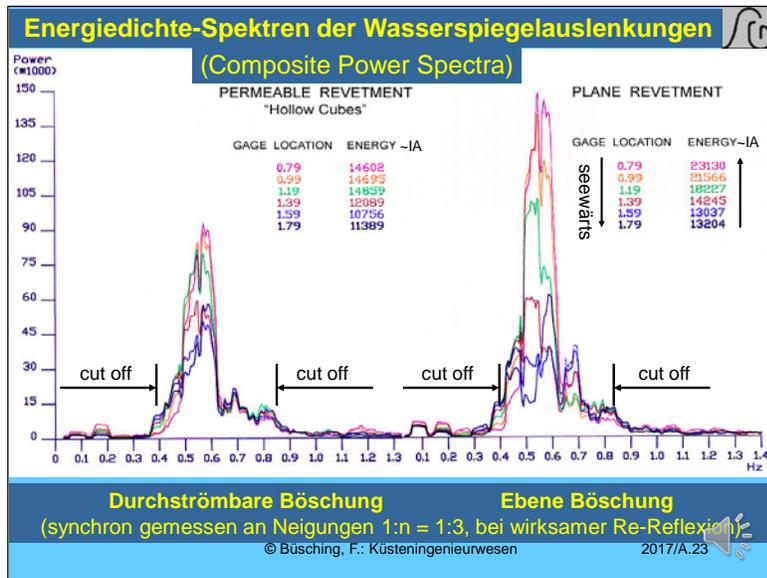
© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen

2017/A.26

Folie 26 Eine Wellensequenz, die die betreffenden Frequenzen und Amplituden enthielt, wurde immer wieder verwendet.

Retroreflexion betrifft den **Sonderfall**, dass die Wellen im Wellenkanal nur in die Richtung der einfallenden Wellen zurückgeworfen werden. Im Vergleich mit schräg auf das Bauwerk treffenden Wellen also der **ungünstigste Fall**.

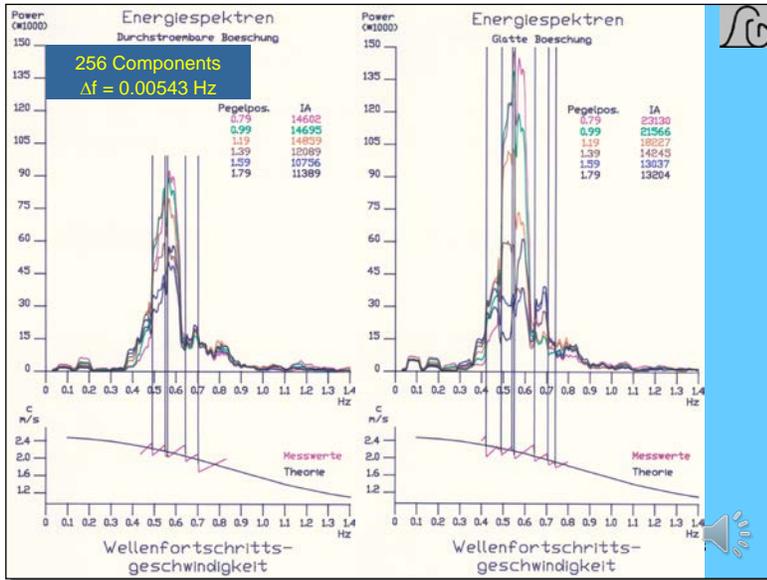
Ausführungen dazu an anderer Stelle.



Folie 27 Hier sind exemplarisch für zwei unterschiedliche, 1:3 geneigte Böschungsstrukturen an jeweils 6 Messpositionen die quasi synchron im Wellenkanal gemessenen Energiespektren einer unregelmäßigen Wellensequenz wiedergegeben. Dabei handelt es sich auf der rechten Seite um ein ebenes Deckwerk und auf der linken Seite um ein durchströmtes Bauwerk, etwa so wie diese auf Folie 6 nebeneinander zu sehen waren. Die Fläche unter dem jeweiligen Spektrum repräsentiert

die gesamte Energie des Spektrums und ist hier kurz als IA (integrated area) bezeichnet. Bezogen auf das Glatdeckwerk ist die gesamte Energie sowie die maximale Energiedichte am Hohldeckwerk hier um etwa 1/3 geringer! Generell nimmt die Energie etwa vom Brechpunkt seewärts ab. Auch bei diesen Labormessungen handelt es sich um zusammengesetzte Spektren (composite spectra), in denen sich die einfallenden Wellen mit reflektierten und hier eben auch noch mit den von der Wellenklappe re-reflektierten überlagern. Letzteres hatte dazu geführt, dass Teilfrequenzbänder mit unterschiedlicher Verformung deutlicher voneinander abgegrenzt werden konnten. Insbesondere gibt es benachbarte Frequenzbereiche, deren Energiedichten sich mit der Entfernung von IP stark unterschiedlich verändern.

Im Modell mit dem geometrischen Maßstab 1:5 wird unter Verwendung des Froude'schen Modellgesetzes aus dem Frequenzbereich 0,09 – 0,4 Hz in der Natur der zu untersuchende Frequenzbereich 0,4 – 0,85Hz. Mit der eingesteuerten Wellensequenz konnten sehr wohl Energiedichtewerte dargestellt werden, die etwa mit den vor Sylt gemessenen Sturmflutwellenspektren korrespondierten.



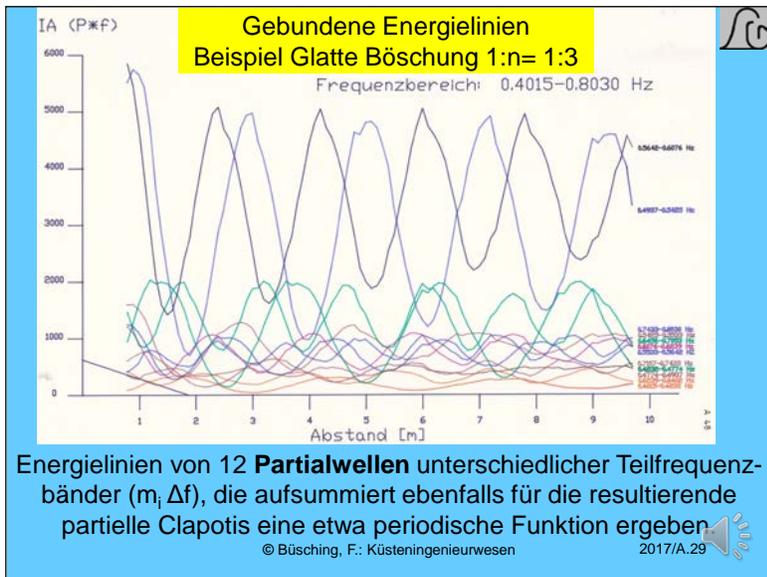
Folie 28 Die hier gezeigte stark unterschiedliche Unterteilung des Frequenzbereiches war bedingt durch die beabsichtigte Erzeugung resonanter Beckenschwingungen im Wellenkanal infolge von Re-Reflexion und kann hier nicht näher erläutert werden. Für Strukturen der Neigung 1:2, die nachfolgend behandelt werden, war dagegen der Effekt der Re-Reflexion ausgeschlossen worden, sodass sich die hierfür gewählte Unterteilung des Spektrums an

anderen Vorgaben orientieren konnte.

[Kann der Effekt der Re-reflexion ausgeschlossen werden, kann sich die Unterteilung an anderen Eigenschaften der Spektren orientieren.

Insbesondere kann bei Ausschluss der Re-Reflexion auch eine Unterteilung mit gleichen Teilfrequenzbändern (konstantem $n \times \Delta f$) oder etwa gleichen Teilenergien gewählt werden...

Folie nur im Bedarfsfalle zeigen: Infolge der absichtlichen Re-reflexion von der Wellenklappe wurden hier resonante Beckenschwingungen im Wellenkanal erzeugt. Dabei handelt es sich um 6 Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen 4 bis 9. Der Nachweis der Resonanz konnte hier durch das Auftreten anomaler Dispersion $dc/df > 0$ erbracht werden, vergl. die Plots der Phasengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz (Phasengeschwindigkeitsspektren). Näheres an anderer Stelle.]



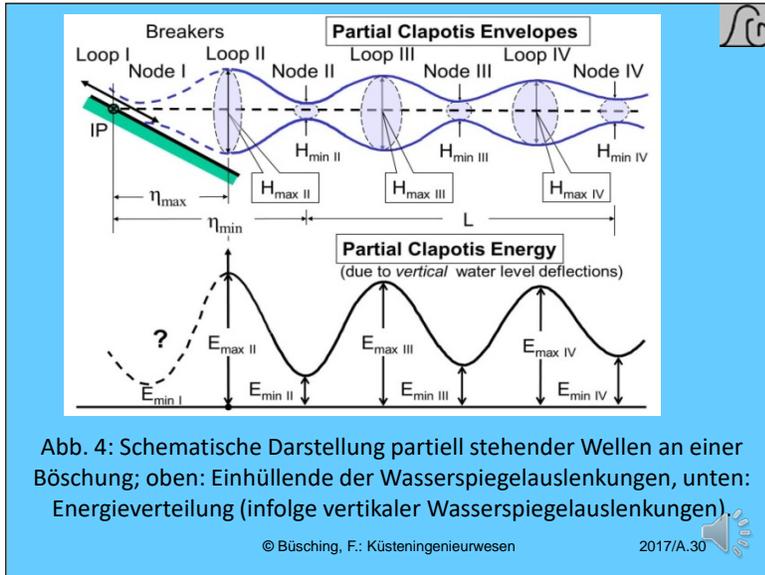
Energielinien von 12 Partialwellen unterschiedlicher Teilfrequenzbänder ($m_i \Delta f$), die aufsummiert ebenfalls für die resultierende partielle Clapotis eine etwa periodische Funktion ergeben © Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.29

Folie 29 Den in abgegrenzten Teilfrequenzbändern aufaddierten Energiedichtewerten wird über die Distanz der durchgeführten Pegelmessungen der Begriff Partialwelle zugeordnet. Hier wurde der Frequenzbereich 0,4015 – 0.8030 Hz in 12 benachbarte Teilfrequenzbänder mit unterschiedlichem Frequenzumfang unterteilt, sodass 12 Partialwellen unterschieden werden können. Alle 12 Partialwellen überlagert ergeben also den Energieverlauf

der resultierenden Wasserspiegelauslenkungen, der seinerseits auch eine etwa fast periodische Funktion ergeben würde.

Im vorliegenden Fall hat etwa die langwelligste (etwa 6m lange) Partialwelle die geringste

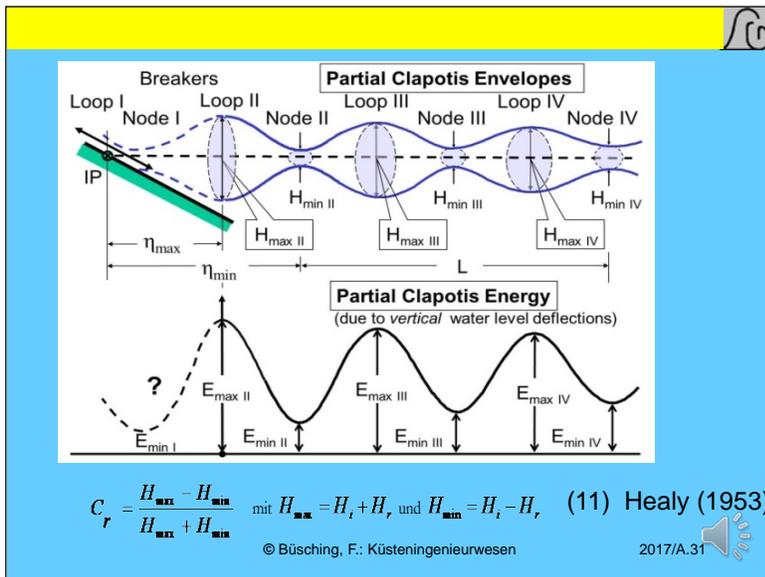
Energie, während die **maximalen Energien** einer etwa 3,7m langen Partialwelle zuzuordnen sind.



Folie 30 Mit dieser schematischen Darstellung, die auf der vorigen Folie basiert, ist beabsichtigt, den Zusammenhang zwischen den Einhüllenden der Wasserspiegelauslenkungen einer partiellen Clapotis (oben) mit deren Energie (unten) herzustellen. Da Messungen der Wasserspiegelauslenkungen in unmittelbarer Nähe der Böschungsoberfläche bei flach geneigten Böschungen meistens nur unsicher durchgeführt werden können, sind hier die vermuteten Kurvenverläufe gestrichelt dargestellt.

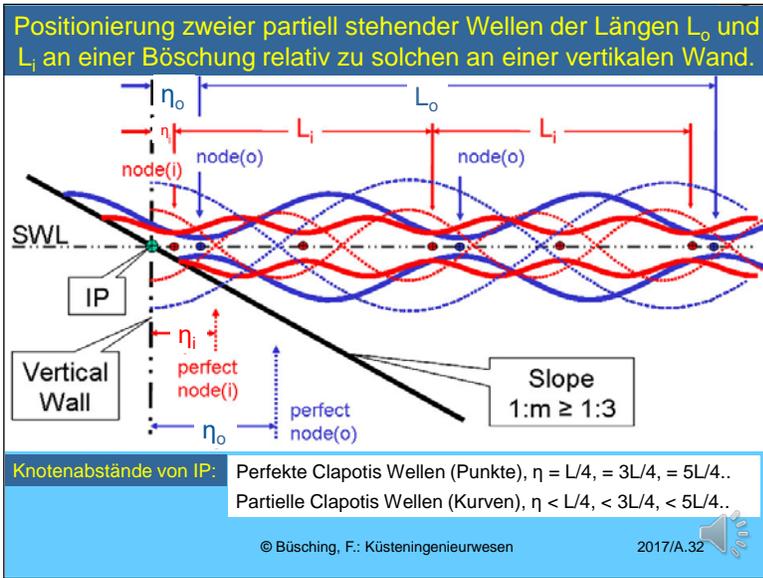
Insbesondere wurden die folgenden Eigenschaften aus den der vorigen Folie übernommen:

1. Seewärtige *Abnahme* der Energiemaxima E_{max} zusammen mit der *Zunahme* der E_{min} –Werte.
2. Stauchung der Kurvenverläufe in Annäherung an die Böschung im Sinne einer horizontalen/vertikalen Wellenasymmetrie.



Folie 31 Wie bei anderen Wellen bildete bekanntlich auch bei Wasserwellen die *möglichst präzise Ausmessung* des bauwerksnahen Energiefeldes bis in die 1980er Jahre die Grundlage für die Ermittlung der Reflexionskoeffizienten, vergl. die Einhüllenden der Wasserspiegelauslenkungen im oberen Teil der Folie. Nach Healy waren dafür die Abstände der Einhüllenden am Bauch H_{max} und am Knoten H_{min} der partiellen Clapotis

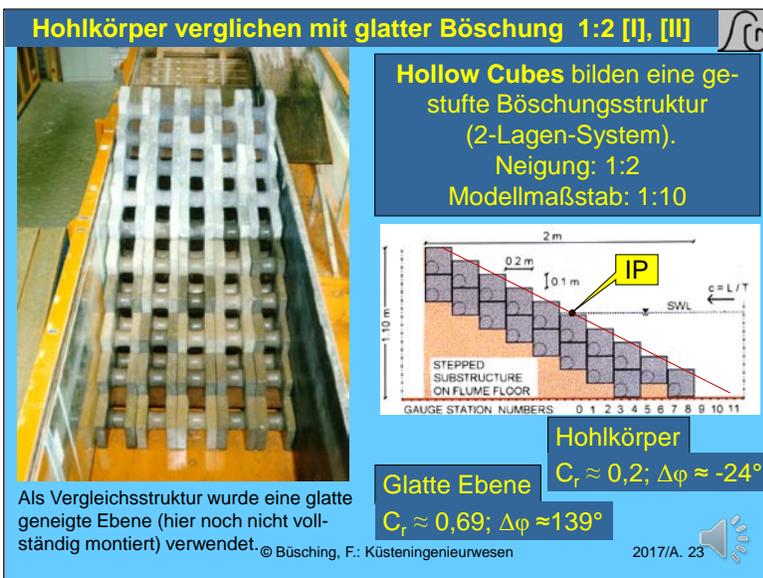
ausreichend. Für die Ermittlung der Phasendifferenz kommt für den CRC jetzt noch die Wellenlänge L und entweder die Distanz des Bauches (η_{max}) oder/und des Knotens (η_{min}) vom Bezugspunkt IP hinzu.



Folie 32 In dieser Schemaskizze werden (unter Voraussetzung weiter unten näher erläuteter Untersuchungsergebnisse) die unterschiedlichen Positionierungen von perfekt stehenden Wellen eines aus 2 unterschiedlich langen Wellen bestehenden Satzes an einer vertikalen Wand mit einem Satz partiell stehender Wellen an einer ebenen Böschung miteinander verglichen. Dabei bildet der Bezugspunkt IP (grün) nicht nur den Schnittpunkt des Ruhewasserspiegels mit der

Böschung sondern auch den Durchstoßpunkt der Oberfläche der vertikalen Wand durch den Ruhewasserspiegel. (Somit könnte auch die vertikale Wand als Sonderfall der geneigten Wand betrachtet werden). An der vertikalen Wand (mit Strich-Doppelpunkt-Signatur) sind die „Einhüllenden“ der zwei unterschiedlich langen Clapotis-Wellen blau bzw. rot punktiert dargestellt. Ihre perfekten Knoten sind im unteren Teil des Bildes mit den Entfernungen η_o bzw. η_i von IP vermaßt.

Demgegenüber liegen bei den beiden an der Böschung auftretenden partiellen Clapotis-Wellen mit etwa gleichem Längenverhältnis die bauwerksnahesten Schwingungsknoten (mit roten bzw. blauen Punkten) deutlich näher bei IP.



Folie 33 Kommen wir nun zu den im **Wellenkanal synchron** vor zwei **unterschiedlichen 1:2 geneigten** Böschungen zu messenden Spektren. Dazu war der Kanal - wie auch aus Folie 6 zu entnehmen - in seiner Breite in 2 Teilkanäle unterteilt. In dem einen Teilkanal war an ihrem Ende wiederum eine geneigte **glatte Ebene** als Böschung eingebaut (im Bild noch nicht vollständig montiert), während sich im anderen Teilkanal die hier dargestellte durchströmbare **Hohlformkörper-**

Struktur befand. In diesem Falle waren die Wasserspiegelauslenkungen ausgehend vom Punkt IP jeweils an 31 Stationen bis zu einer Weite von 3,1m gemessen worden.

In Vorwegnahme eines Ergebnisses sind hier bereits die sehr unterschiedlichen Komponenten des CRC angegeben. Die Spezifikation erfolgt weiter unten.

Nachfolgend werden die einzelnen Operationen zur Ermittlung des komplexen Reflexionskoeffizienten (CRC) dargestellt.

Dabei wäre bezüglich des Betrages des CRC wohl die von Healy (1953) erstmals für reguläre Wellen benutzte Formel zur Bestimmung des Wellenhöhenverhältnisses

$$C_r = H_r/H_i \text{ möglich.}$$

$$C_r = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad \text{mit } H_{\max} = H_i + H_r \text{ und } H_{\min} = H_i - H_r \quad (11)$$

Hierbei beziehen sich die Werte H_{\max} und H_{\min} auf die Abstände der Einhüllenden für die Wasserspiegelauslenkungen der partiell stehenden Wellen, wie diese etwa im oberen Teil der Folie 31 schematisch dargestellt sind.

(Die heute für unregelmäßige Wellen übliche 3-Pegel- Methode etwa n. Mansard und Funke (1980) wird hier nicht diskutiert, da diese eine Bestimmung der Phasendifferenz bisher nicht zulässt.)

Folie 34

Für die Analyse **irregulärer Wellen** (und ihrer Fourier-Komponenten) hat der Autor sich jedoch **nicht direkt** auf das Wellenfeld der Wasserspiegelauslenkungen (Einhüllende der Wasserspiegelauslenkungen) sondern prinzipiell auf deren **Quadratwerte** bezogen, die der **Wellenenergie** proportional sind. Solche werden bei der **Integration** der (in Teilbereiche zerlegten) **Energiedichte-Spektren** als Energiewerte erhalten, da sie an jeder Pegelposition die überlagerten vertikalen Wasserspiegelauslenkungen der vom Wellenerzeuger kommenden und der von der Böschung reflektierten Wellen repräsentieren.

Statt der Healy-Formel wird somit auf die allgemeinere Formulierung unter Bezug auf die Energien zurückgegriffen.

Folie 35

$$C_{r,i} = \frac{\sqrt{E_{\max,i}} - \sqrt{E_{\min,i}}}{\sqrt{E_{\max,i}} + \sqrt{E_{\min,i}}}$$

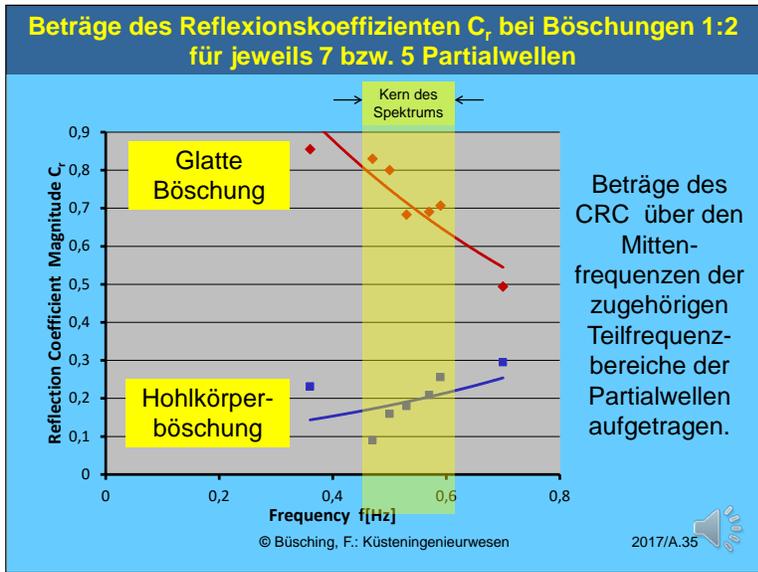
! auf Folie 30/31

$E_{\max,i}$ = Betrag des Energiemaximums der zur Partialwelle beitragenden Frequenzkomponenten am Schwingungsbauch i,

$E_{\min,i}$ = Betrag des Energieminimums der zur Partialwelle beitragenden Frequenzkomponenten am Schwingungsknoten i,

i = Ordnungszahl des Schwingungsbauches bzw. Schwingungsknotens.

Folie 36



Folie 37 Während hier für die Beträge des CRC noch jeweils 7 Partialwellen analysiert wurden, wird im Folgenden bezüglich der Auswertungen der Phaseninformation des CRC nur noch der Kern der Spektren mit jeweils 5 abgrenzbaren Partialwellen betrachtet. Dies erscheint sinnvoll, da in der Abb. 8 für die Beträge der CRC unterhalb von 0,4Hz und oberhalb von 0,6Hz die betreffenden Ergebnisse nicht den Daten des spektralen Kerns folgen und die Vertrauenswürdigkeit wegen der geringen Energiewerte ohnehin geringer ist.

Folie 38

Weiterhin ist für die Bestimmung der *Phase des Reflexionskoeffizienten* neben der **Wellenlänge L** noch die Kenntnis zumindest der *Entfernung* des effektiven Reflexionspunktes IP von einem (imperfekten) Schwingungsbauch (loop) η_{max} bzw. die Entfernung η_{min} von einem Schwingungsknoten (node) erforderlich, vergl. Abb. 4.

Die Phase(nverschiebung) $\Delta\varphi$ des Reflexionskoeffizienten wird dann aus der folgenden Betrachtung erhalten:

Für jeden Ort im Abstand η vom Reflexionspunkt beträgt der Phasenabstand, der von der einfallenden Welle bis zum Ort der Reflexion zurückzulegen ist, $k\eta = 2\pi(\eta/L)$.

Dort tritt bei der Reflexion örtlich die gesuchte Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ auf und daran anschließend für die reflektierte Welle zurück bis zum Ausgangsort wiederum der Phasenabstand $k\eta$

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.38

Folie 39

Demnach beträgt der Phasenunterschied zwischen einfallender und reflektierter Welle an diesem Ort $2k\eta + \Delta\varphi$.

Soll es sich bei dem betrachteten Ort um einen *Schwingungsbauch* der partiellen Clapotis handeln, muss diese Phasendifferenz einem ganzzahligen Vielfachen von 2π gleichen, (damit sich die einfallende mit der reflektierten Welle im Sinne der Verstärkung überlagern können.)

Somit ergibt sich die Formel

$$2k\eta_{max} + \Delta\varphi = n2\pi \quad (12)$$

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.39

und mit $n = 1$ für den ersten Schwingungsbauch

$$\Delta\varphi = 2\pi - 2k\eta_{max} \quad \text{bzw.}$$

$$\Delta\varphi [^\circ] = 360 \left(1 - \frac{2\eta_{max}}{L}\right) \quad (13a)$$

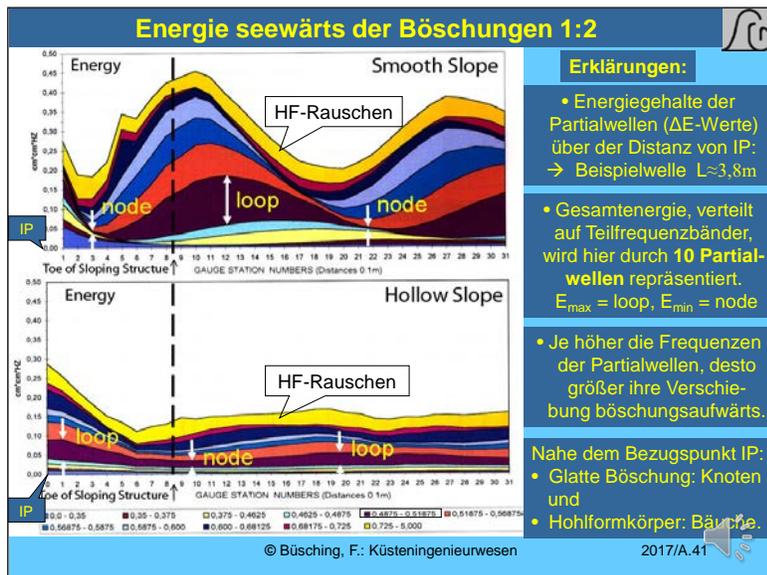
Für den Fall, dass es sich bei dem einzumessenden Ort um einen (*unvollkommenen*) *Knoten* handeln sollte, muss die betreffende Phasendifferenz einem ungeraden Vielfachen von 180° (bzw. π) entsprechen, damit sich einfallende und reflektierte Welle tendenziell auslöschen können.

Die analoge Formel lautet dann bezogen auf den bauwerksnahesten (ersten) partiellen Knoten:

$$\Delta\varphi [^\circ] = 180 \left(1 - \frac{4\eta_{min}}{L}\right) \quad (13b)$$

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.40

Folie 40

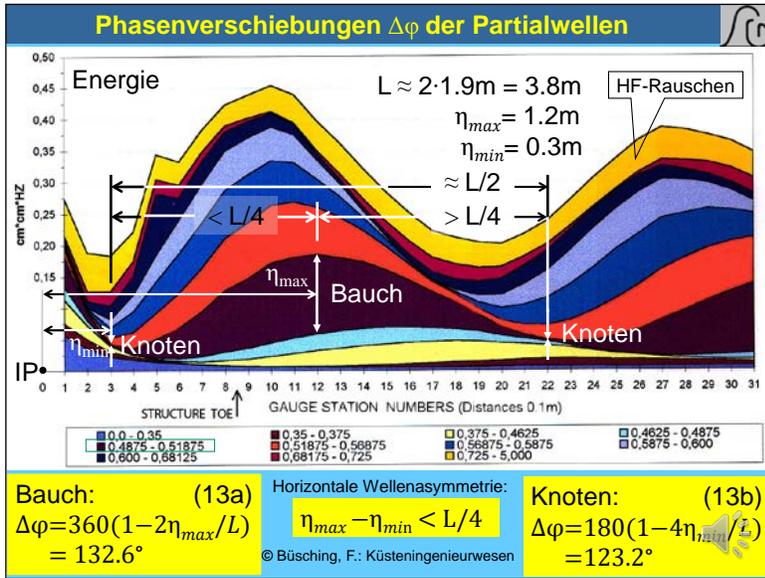


Folie 41 Für den oben dargestellten Fall des **ebenen** 1:2 geneigten Deckwerkes sind die Energiegehalte von 10 Partialwellen übereinander (gestapelt) angeordnet und durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. In gleicher Weise wurde im unteren Teil des Bildes für die synchron gemessenen Energiewerte der Hohlwürfelstruktur verfahren. Man sieht den eklatanten Unterschied, d.h. den großen Vorteil der

Hohlformkörperstruktur: Die Energie, die in der Wellenbewegung vor der reflektierenden Struktur steckt, ist vor den Hohlformkörpern wesentlich geringer.

Der Abstand der Messpositionen beträgt 0,1m; die Messstrecke umfasst also 3,1m.

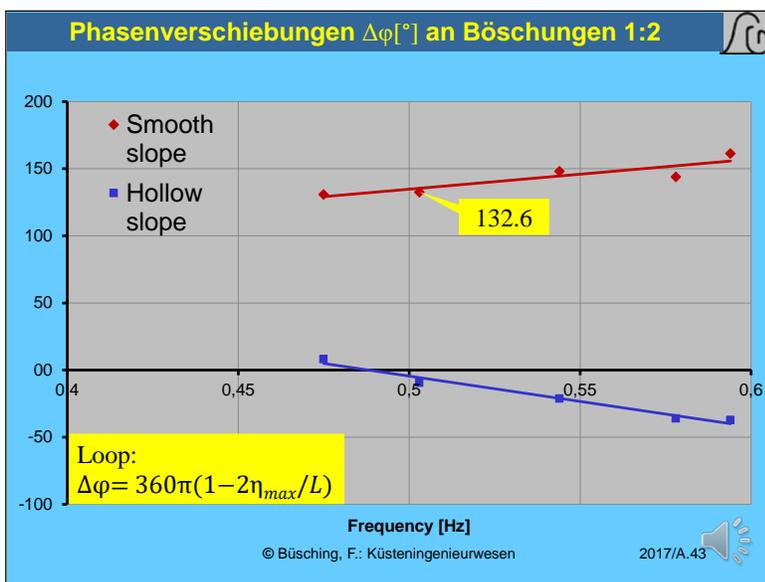
Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier (wie beim Betrag des CRC) nachfolgend nur die 5 Teilfrequenzbänder des Spektrum-Kerns ausgewertet werden. **Exemplarisch** ist davon die Energieverteilung der Partialwelle des Frequenzbereiches 0,488 bis 0,518 Hz (dunkle Einfärbung) mit der Angabe der Schwingungsbäuche (loops) und –knoten (nodes)) kenntlich gemacht.



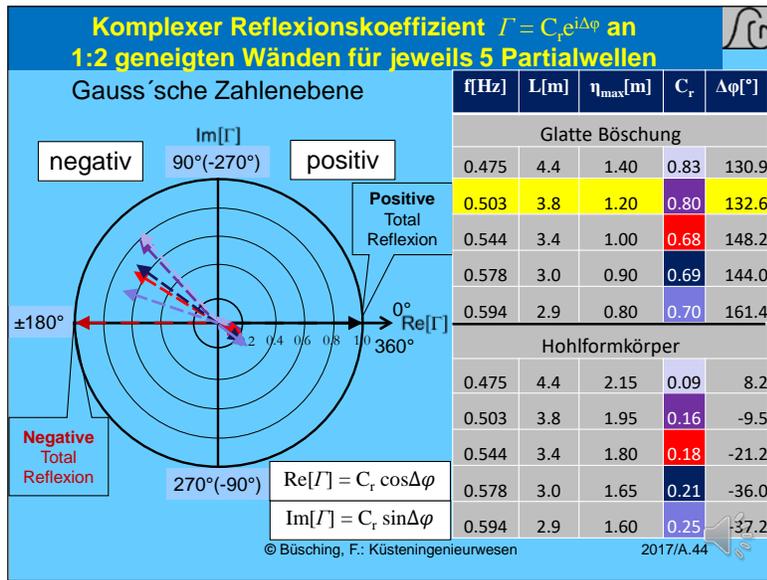
Folie 42 Für die Beispiel-Partialwelle ist im Messbereich (der 3,1m) ausgehend von IP (an der Böschung) die Folge „Knoten – Bauch – Knoten“ erfasst. Damit kann die örtliche **halbe Wellenlänge** zwischen den beiden Knoten mit **etwa 2,2 – 0,3 = 1,9m** abgegriffen werden. Da aber $\eta_{max} = 1,2m$ kleiner ist als der Mittelwert der beiden η_{min} – Werte, nämlich $(0,3+2,2)/2 = 1,25m$, ist hierdurch die **horizontale Wellenasymmetrie** dokumentiert, die zusammen mit anderen Parametern letztlich über die

Brecherform entscheidet. Die horizontale Wellenasymmetrie wird an dieser Stelle nur aus dem Grunde thematisiert, weil diese offenbar die Ursache für eine **unscharfe Bestimmung** der Phasenverschiebung $\Delta\phi$ darstellt (gegebenenfalls als arithmetischer Mittelwert aus den Formeln (13a) und (13b)). Andererseits kann die hier verwendete Analysemethode auch einen neuen Ansatzpunkt für die weitere Erforschung der **Wellendeformation** im Einflussbereich des reflektierenden Bauwerks bieten. Die horizontale Wellenasymmetrie ist schließlich der Grund dafür, dass die Ergebnisse für die Ermittlung der Phaseninformation des CRC sich **nicht nur** je nach gewählten Abständen η_{min} – oder η_{max} – Werten unterscheiden sondern auch bei benachbarten η_{min} – bzw. benachbarten η_{max} – Werten *untereinander* je nach Entfernung von der reflektierenden Struktur.

Bezüglich der hier beabsichtigten Präsentation des CRC wurde jedoch in der folgenden Tabelle (Folie 44) beispielhaft ausschließlich der **bauwerksnaheste η_{max} – Wert** nach Formel 13a verwendet.



Folie 43 Hier sind die Ergebnisse für $\Delta\phi$ nach der **Formel 13a** jeweils für die 5 Partialwellen über der Frequenz dargestellt. Dabei sind als Bezugsfrequenzen die Mittelwerte der Teilfrequenzbänder der Partialwellen verwendet worden. Im Mittel beträgt der Unterschied der Phasenverschiebungen bei den beiden untersuchten Böschungsbauwerken also fast **180°**.



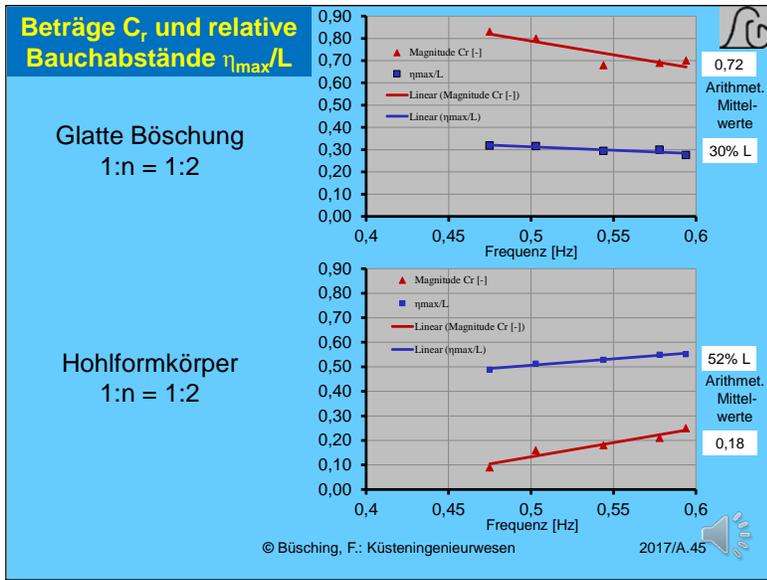
Folie 44 Darstellungsmöglichkeiten des CRC:

Zunächst zu den Werten der Tabelle: Alle Werte waren oben bereits ermittelt bzw. verwendet worden und sind hier für die mittleren Frequenzen der 5 Partialwellen aufgelistet. Die ersten 5 Zeilen betreffen das Glattdackwerk 1:2 und die daran anschließenden 5 Zeilen das Hohlkörperbauwerk jeweils mit den 5 unterschiedlichen Frequenzen. Die Wellenlängen wurden für beide Bauwerkstypen jeweils etwa gleich ausgemessen.

Die η_{\max} -Werte und damit die $\Delta\varphi$ -Werte sind aber für gleiche Frequenzen bezüglich der beiden Bauwerkstypen **extrem unterschiedlich**. Dasselbe gilt auch für die Beträge C_r .

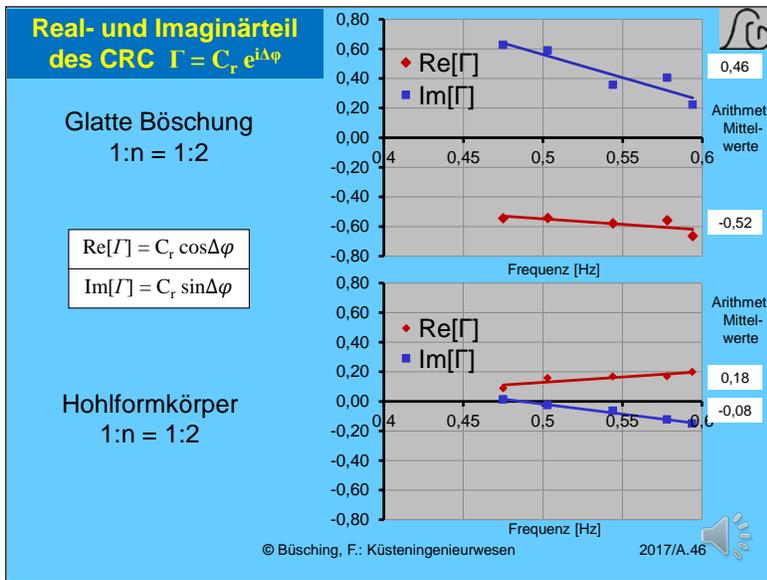
Links ist die dazugehörige Darstellung in der Gauss'schen Zahlenebene (GZE) zu sehen, die **vorteilhaft** die **gesamte Information** bezüglich des CRC (Betrag und Phase) enthält. Der **Betrag** ausgehend vom Koordinatenursprung und die **Phasenverschiebung** $\Delta\varphi$ ausgehend von der **positiven realen Achse**. Die Endpunkte der Pfeile sind dann bestimmt durch Realteil $C_r \cos \Delta\varphi$ und Imaginärteil $C_r \sin \Delta\varphi$. Zur Orientierung sind noch hinzugefügt: Der rechte schwarze Pfeil steht für die positive Totalreflexion (Betrag +1 nach rechts zeigend) und der rote Pfeil mit Betrag -1 (nach links zeigend) steht für die negative Totalreflexion.

Die 5 **großen Pfeile** (nach links oben weisend) bedeuten beim Glattdackwerk negative **partielle** Reflexion, bei der dem Bauwerk (Punkt IP) ein unvollkommener Knoten näher liegt als ein unvollkommener Schwingungsbauch. D.h., dass die größten Wasserspiegelauslenkungen des Bauches mehr als eine $\frac{1}{4}$ Wellenlänge entfernt vom Bauwerk stattfinden. Das ist bei dem Hohlkörperbauwerk (kleine etwa nach rechts unten gerichtete Pfeile) umgekehrt: Ein (partieller) Schwingungsbauch liegt bei positiver Reflexion zwar dem Bauwerk näher (als ein partieller Knoten), der Bauch beinhaltet aber nur relativ kleine Beträge.



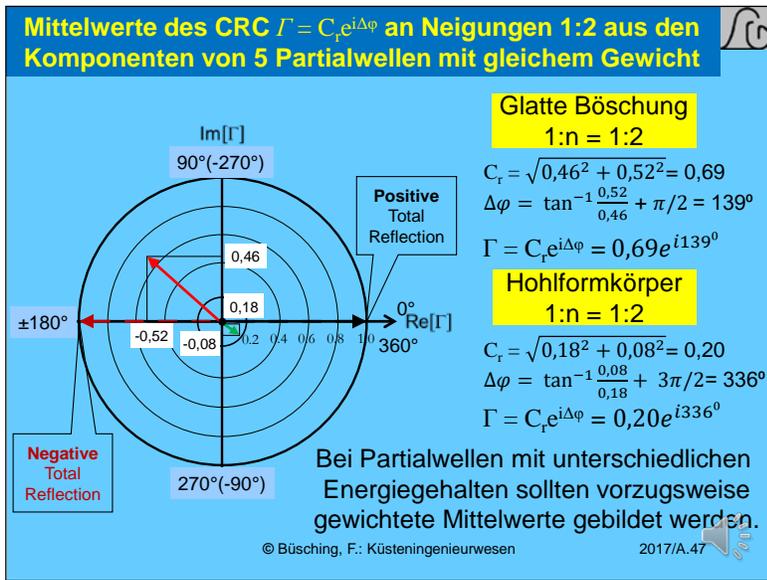
Folie 45 Eine andere Präsentationsmöglichkeit besteht in der gemeinsamen Auftragung der Beträge C_r und den relativen Bauchabständen η_{max}/L . Auch hier wird die unterschiedliche Wirkung der Bauwerke deutlich. Die linearen Darstellungen lassen vorteilhaft etwa Aussagen über die **Mittelwerte** am rechten Rand zu. Während die roten Geraden unterschiedliche Beträge C_r als Mittelwerte abschätzen lassen, wie etwa 0,72 für die glatte Böschung und 0,18 für die Hohlkörper, ergeben die blauen Geraden für die

glatte Böschung mittlere Bauchabstände von IP von 30% der Wellenlänge und für die Hohlkörper etwa 52% der Wellenlänge.

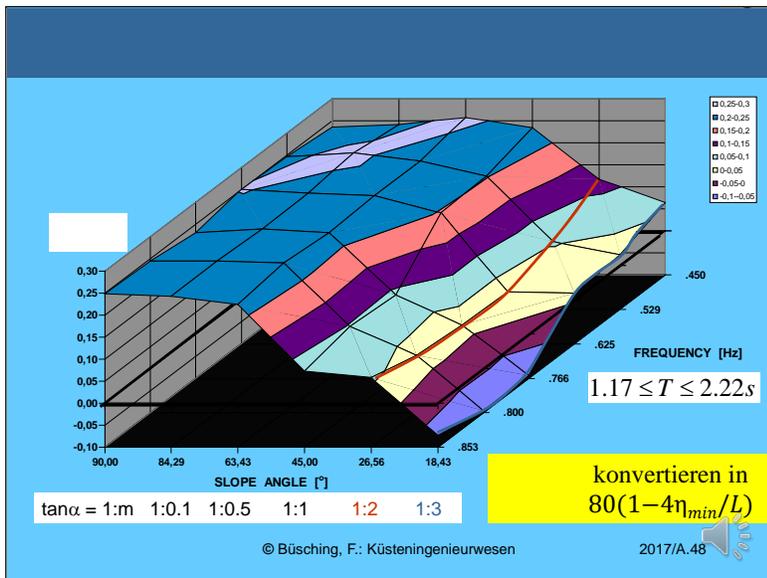


Folie 46 Als weitere Möglichkeit der Darstellung für komplexe Zahlen ist hier noch die getrennte Auftragung der Realteile und der Imaginärteile zu sehen: Während für die glatte Böschung im Mittel die Realteile negativ und die Imaginärteile positiv sind, ist das bei den Hohlformkörpern gerade umgekehrt. Diese am Rand notierten Mittelwerte werden in der folgenden Folie verwendet, um in die Gauss'sche Zahlenebene die zugehörigen Vektoren als

mittlere CRC-Werte einzutragen.



Folie 47 Hier wurden die Mittelwerte aus der vorigen Folie in die Gauß'sche Zahlenebene übernommen und daraus die Vektoren nach Betrag und Richtung konstruiert. Empfehlung: Anders als hier geschehen sollten **CRC-Mittelwerte** vorzugsweise als **gewichtete arithmetische Mittel** unter Berücksichtigung der Energieinhalte ΔE der Teilfrequenzbänder der beteiligten Partialwellen gebildet werden.



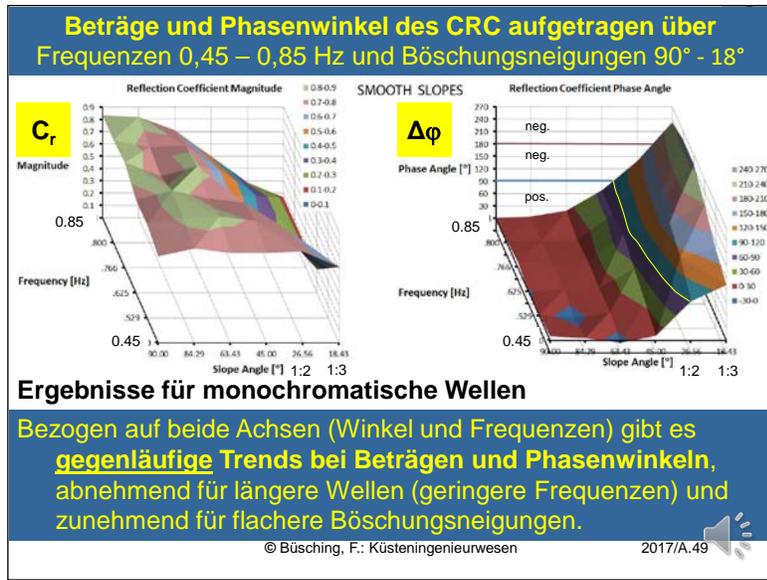
Folie 48 Zum Vergleich der gefundenen Werte mit anderen Messungen im Rahmen von Diplomarbeiten: Monochromatische Wellen wurden bereits 1995 in unserem Labor untersucht. Dabei waren die partiell reflektierten Wellen noch **konventionell** ausgemessen worden, d.h., es waren die bauwerksnahesten relativen Knotenabstände η_{\min}/L (η_{\min} als Bruchteil der Wellenlänge) gemessen worden. Und zwar für 6 Wellen mit den angegebenen Frequenzen zwischen

0,45Hz und 0,85Hz, also für Wellen mit Perioden zwischen 1,17 bis 2,22s. Insgesamt jedoch für 6 Böschungsneigungen, wie an der horizontalen Achse angegeben. Insgesamt sind also $6 \times 6 = 36$ untersuchte Fälle dargestellt.

Für die **vertikale Wand 90°** (1:0) ist also erwartungsgemäß $\eta_{\min}/L \approx 0.25$ im Mittel für alle Frequenzen gemessen worden. Generell sieht man für alle Neigungen aber den generellen Anstieg für **längere Wellen** (also abnehmende Frequenzen).

Bei der Neigung 1:3 sind die Abstände für höhere Frequenzen sogar **negativ**. Das bedeutet, dass der partielle Knoten **oberhalb von IP** beobachtet wurde, die Verschiebung demnach noch größer ist als in Folie 32 dargestellt! Für die Neigung 1:2 sind die Werte zwar positiv aber hier liegen die partiellen Knoten ebenfalls noch sehr nahe bei IP. Das bedeutet ausgeprägt negative Reflexion.

Die nächste Folie enthält die Konvertierung der η_{\min}/L -Werte nach der hier angegebenen Formel in entsprechende $\Delta\varphi$ [°]- Werte des CRC.



Folie 49 Die konvertierten Phasenwerte sind auf der rechten Seite zu sehen zusammen mit den Beträgen auf der linken Seite. Beide in axonometrischen Darstellungen. Während die **Beträge** erwartungsgemäß im Bereich der Messungen anderer Autoren liegen, ist für die Phasenwinkel herauszustellen, dass zumindest für 1:2 (und flacher) geneigte glatte Böschungen **negative Reflexion** auftritt.

Korrelieren Typen brechender Wellen mit dem CRC ?

Der Phasenwinkel $\Delta\phi$ bestimmt die Positionierung der partiell stehenden Welle an der reflektierenden Struktur und damit die Brechposition.

Schlussfolgerung: Der Phasenwinkel $\Delta\phi$ ist notwendig für eine vollständige Beschreibung des Brechvorganges an einer Neigung

Vermutungen zur Korrelation der Brechertypen mit $\Delta\phi$:

Phasenwinkel $\Delta\phi$	Brechertyp	Weitere Bedingung
$\approx \pm 0^\circ$	Gebrochene Clapotis	Überkritische Steilheit
1. oder 4. Quadrant (Positive Reflexion)	Kein identifizierbarer Brechertyp	Dissipation > Transmission
$\approx 180^\circ$	surging breaker	Geringe Dissipation
2. oder 3. Quadrant (Negative Reflexion)	collapsing oder plunging breaker	Dissipation und Transmission

Weitere Messungen erforderlich für deutlichere Aussagen !

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen 2017/A.50

Folie 50 Es ist offensichtlich, dass der Phasenwinkel $\Delta\phi$ die Positionierung der partiell stehenden Welle auf der Böschung und damit die Brechertiefe kontrolliert. Deshalb ist der Phasenwinkel für eine vollständige Beschreibung des Brechvorganges an einer geneigte Ebene notwendig. Zurzeit sind aber nur Vermutungen zur Korrelation der Brechertypen mit der Phasenverschiebung $\Delta\phi$ erlaubt, die der Bestätigung bedürfen.

- Bei **starker positiver** Reflexion ($\Delta\phi$ nahe 0) existiert bei steilen Wellen eine aufgerissene Clapotis.
- Für **schwache positive** Reflexion mit $\Delta\phi$ im ersten oder vierten Quadranten konnte kein bestimmter Brechertyp ausgemacht werden.
- Bei **starker negativer** Reflexion ($\Delta\phi$ nahe 180°) wird vermutlich eine **surging wave** existieren, d.h. eine fast perfekte Clapotis mit einem Schwingungsknoten bei IP.
- Für **schwache negative** Reflexion wurden je nach Oberflächengestaltung Sturzbrecher oder partielle Sturzbrecher (plunging oder collapsing breakers) gefunden.



Folie 51

Empfehlungen zur weiteren Erforschung des **verbundenen Effektes** von **Reflexion, Transmission und Dissipation** bei brechenden Wellen an geneigten Uferböschungen:

Verifikation vorliegender Ergebnisse im Naturmaßstab.
Spezifikation des Phasensprunges für längere Wellen und schwächer geneigte Böschungen

Künftige Klassifikation von Brechertypen in Abhängigkeit vom komplexen Reflexionskoeffizienten und als Funktion der *Iribarren* Zahl

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen

2017/A.51



Schriftumsangaben



Folie 52

F. Büsching, „Hollow Cubes“, HANSA, Nr.10, S. 62-65, 2001; Digibib TUBS, 2013

<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054244>

F. Büsching, „Sturmwellenresonanz an der Westküste der Insel Sylt“, Die Küste, H. 67, pp. 51-82, 2003, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047046>

F. Büsching, „Phasensprung bei der partiellen Reflexion irregulärer Wasserwellen an steilen Uferböschungen“, HANSA, H.5 sowie Binnenschifffahrt, H. 9 & 10, pp. 87-98 bzw. 73-77, 2010, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056885>.

F. Büsching, „Komplexe Reflexionskoeffizienten für Wasserwellen - Zur Klassifizierung von Brandungseffekten an Küstenschutzbauwerken -“, Die Küste, H. 78, pp. 235-258, 2011, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047022>

F. Büsching, „Sturmbrandungsphänomene an der Westküste der Insel Sylt“, *Digitale Bibliothek Braunschweig, Publikationsserver der TU Braunschweig*, pp. 29 bzw. 32 Seiten; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00058823>, 2013, 2014.

Beitragende Diplomarbeiten (unveröffentlicht), Bielefeld University of Applied Sciences:

Kramer, M., Hagemeyer, K.(1992): Reflexion irregulärer Wellen an geböschten Uferschutzbauwerken.

Thienelt, W. (1994), Meyer, O. (1995): Partiiell stehende Wellen an unterschiedlich geneigten Böschungsbauwerken.

Lemke, S., Nicolai, A. (1997): Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern bestehenden Böschung mit der Neigung 1:2.

© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen

2017/A.52

