

# **NICHTLINEARE WELLENEFFEKTE ÜBER GETAUCHTEN STRUKTUREN UNTER VERWENDUNG VERSCHIEDENER ANALYSEVERFAHREN – METHODIK UND ERSTE ERGEBNISSE**

von

Markus Brühl<sup>1</sup>  
Hocine Oumeraci<sup>2</sup>

## **ABSTRACT**

The interaction of shallow water waves with coastal structures such as submerged reefs is affected by nonlinear and non-stationary effects. To understand these processes, it is necessary to analyse the wave parameters before and after this interaction. Different frequency and time-frequency analysis methods with different approaches, basic components and output parameters are available. To investigate the influence of the selected method on the results of wave analysis, hydraulic model tests with a simple rectangular submerged reef are analysed comparatively using Fast Fourier Transform (FFT), Wavelet transform (WT) and Hilbert Huang Transform (HHT). The examples discussed here contain the calculation of reflection and transmission coefficients and the fission of solitary waves over a submerged reef.

## **1. EINLEITUNG**

Zur Untersuchung bislang unzureichend erforschter komplexer Prozesse, wie z.B. der Interaktion zwischen Wellen und Bauwerk im Flachwasser, sind in der Regel gut kontrollierte Laborexperimente unverzichtbar. Eine effektive Aufbereitung und anschließende Analyse der Messdaten sind für das Verständnis der ablaufenden Prozesse unabdingbar. Die Analyse von Messdaten im Zeitbereich reicht meist nicht aus, um die o.g. Prozesse richtig verstehen und sinnvoll interpretieren zu können, da viele hydrodynamische Prozesse von der Wellenperiode und somit von der Frequenz der Wellen abhängig sind. Die Analyse im Frequenzbereich (Fast-Fourier-Transformation (FFT)) sowie im Zeit-Frequenzbereich (Wavelet- und Hilbert-Huang-Transformation (WT und HHT)) ist daher für die Auswertung der Versuchsdaten unverzichtbar. Diese

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI), TU Braunschweig, Beethovenstr. 51a, 38106 Braunschweig, Email: m.bruehl@tu-bs.de

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing., LWI, TU Braunschweig, Beethovenstr. 51a, 38106 Braunschweig

Analyseverfahren unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen bei der Erfassung der instationären und nichtlinearen Eigenschaften der Zeitreihen sowie durch die a priori angenommenen (FFT: Cosinuswellen, WT: Wavelets) bzw. aus dem Originalsignal adaptiv ermittelten Basiskomponenten (HHT: Intrinsic Mode Functions (IMF)) (HUANG, 1998). Da gerade die Prozesse im Flachwasser jedoch häufig stark nichtlineare Eigenschaften aufweisen, entsprechen die Basiskomponenten der Frequenz- und Zeit-Frequenzanalyseverfahren nicht den natürlichen physikalischen Flachwasserwellen und können daher immer nur einen Näherungsansatz für die Analyse nichtlinearer Wellen darstellen. Vor diesem Hintergrund werden experimentell gewonnene Daten zur Wellentransformation über einem getauchten Riff vergleichend mit den drei oben genannten Analysemethoden ausgewertet um aufzuzeigen, ob und wenn ja, welche Unterschiede sich bedingt durch die gewählte Analysemethode ergeben (s. Abb. 1). Das Ziel ist es, nichtlineare Effekte, wie z.B. die Aufspaltung (Fission) von Solitonen über getauchten Riffen, besser untersuchen zu können. Zunächst erfolgt jedoch mit der Berechnung von Energiekoeffizienten ein quantitativer Vergleich der Verfahren.

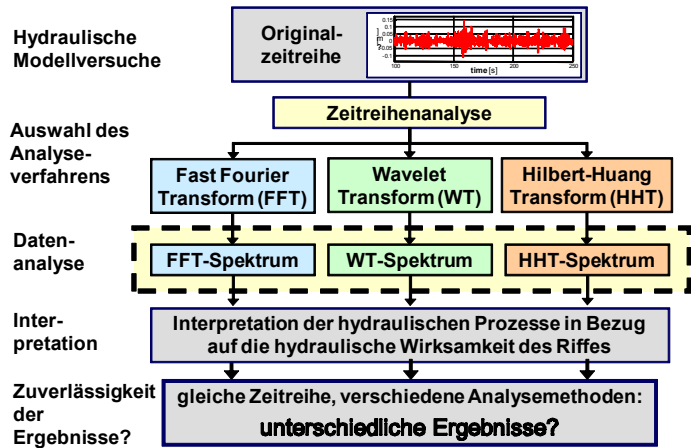
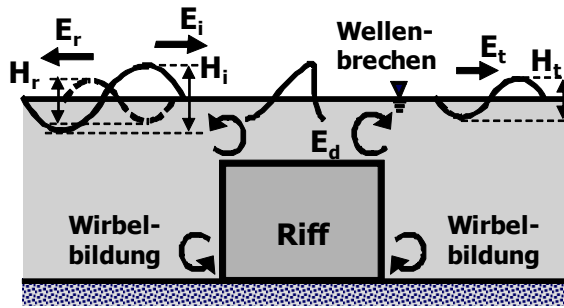


Abb. 1: Vorgehensweise zur vergleichenden Datenanalyse

## 2. ERMITTLUNG VON ENERGIEKOEFFIZIENTEN



Indizes: i=einlaufend r=reflektiert  
t=transmittiert d=dissipiert

Abb. 2: Energieanteile bei Wellentransformation an einem getauchten Riff (nach OUMERACI und BLECK (2000))

Die hydraulische Wirksamkeit von Strukturen zur Wellendämpfung kann anhand der Energiekoeffizienten für Reflexion  $C_r$ , Transmission  $C_t$  und Dissipation  $C_d$  angegeben werden. Ausgangspunkt für die Berechnung der Koeffizienten ist die Betrachtung der Wellenenergie vor und hinter dem Riff (s. Abb. 2). Mit dem Energieerhaltungssatz folgt:

$$E_i = E_r + E_t + E_d, \quad (1)$$

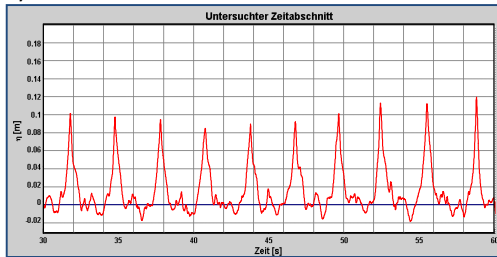
wobei  $E \sim H^2$  und

$$H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}. \quad (2)$$

Für die Koeffizienten gilt:

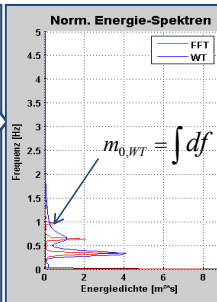
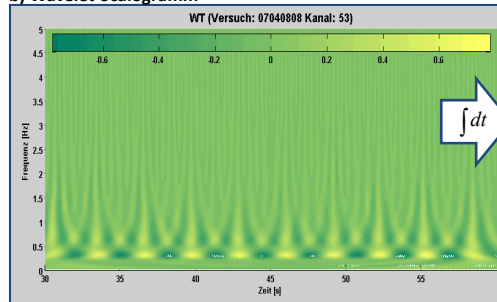
$$C_r = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} = \frac{H_r}{H_i} = \sqrt{\frac{m_{0,r}}{m_{0,i}}} \quad (3), \quad C_t = \sqrt{\frac{E_t}{E_i}} = \frac{H_t}{H_i} = \sqrt{\frac{m_{0,t}}{m_{0,i}}} \quad (4), \quad C_d = \sqrt{1 - C_r^2 - C_t^2} \quad (5).$$

a) Untersucher Zeitabschnitt



**Berechnung von  $m_0$**   
 → Ermittlung der Zeit-Frequenz-Spektren  
 → Integration über die Zeit  
 → Integration über die Frequenz  
 → Spektrale Momente  $m_{0,WT}$

b) Wavelet-Scalogramm



c) Hilbert-Spektrum

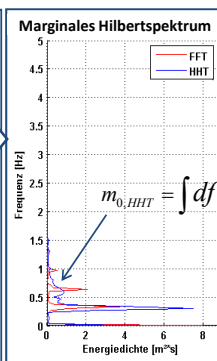
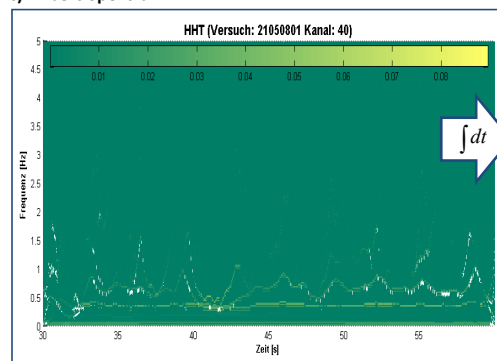


Abb. 3: Ermittlung der spektralen Momente bei WT und HHT

betrug  $h = 0,7\text{m}$ . Eingesteuert wurden regelmäßige Wellen mit Wellenhöhen zwischen  $H = 0,08\text{m}$  und  $0,24\text{m}$  und Perioden zwischen  $T = 1,1\text{s}$  und  $6,0\text{s}$ . Die Pegelharfen befanden sich jeweils im Nahfeld vor (für einlaufende und reflektierte Wellen) und hinter dem Riff (für transmittierte Wellen). Die mit der WT ermittelten Reflexionskoeffizienten zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, obwohl die angewendete kontinuierliche WT als redundantes Verfahren, bei dem die einzelnen Datenpunkte bei der Analyse mehrfach erfasst werden, viel größere Momente liefert. Durch die Division der Momente nach Gl. (3) und (4) hebt sich dieser Effekt jedoch wieder. Für die Berechnung der Koeffizienten der HHT

In der spektralen Darstellung der Energiedichte  $S(f)$  über der Frequenz  $f$  beschreibt das Moment  $m_0 = \int S(f) df$  die Fläche unterhalb der Kurve. Üblicherweise wird für die Berechnung der spektralen Momente das Fourierspektrum verwendet. Doch auch aus dem Wavelet- und dem Hilbertspektrum (Zeit-Frequenz-Spektren) lassen sich durch Integration über die Zeit entsprechende Spektren ermitteln (s. Abb. 3). Durch erneute Integration dieser Spektren über die Frequenz erhält man die sog. Momente  $m_{0,WT}$  und  $m_{0,HHT}$ , aus denen nun analog zum Verfahren bei der FFT nach Gl. (3) bis (5) die jeweiligen Energiekoeffizienten bestimmt werden.

Für die Berechnung der Koeffizienten in Abb. 4 wurden Versuche mit Riffen der Breite  $B = 1,0\text{m}$  und den Höhen  $h_r = 0,4\text{m}$ ;  $0,5\text{m}$  und  $0,6\text{m}$  ausgewählt. Die Wassertiefe

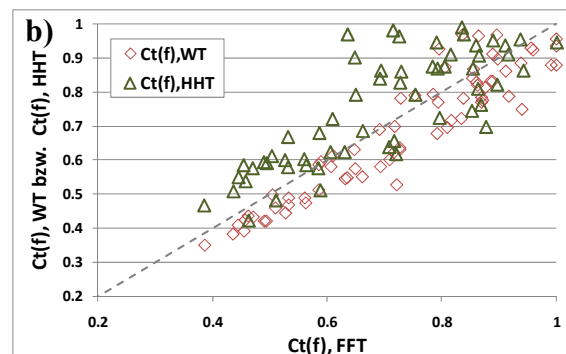
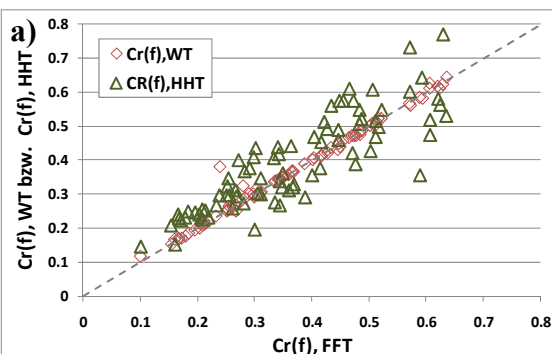


Abb. 4: Vergleich der Koeffizienten aus FFT, WT und HHT (Riff 100, regelmäßige Wellen):  
 (a) Reflexionskoeffizienten (b) Transmissionskoeffizienten

wird abweichend mit folgenden Gleichungen gerechnet:

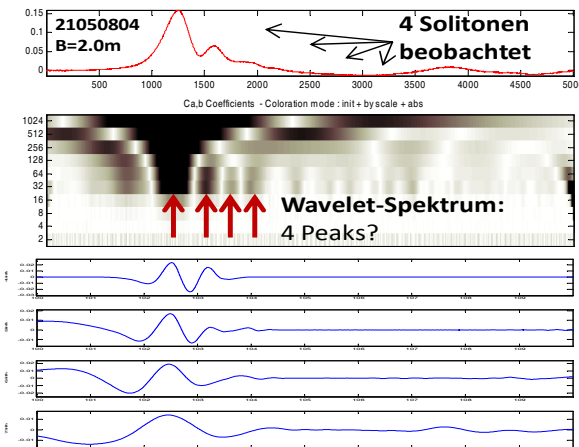
$$C_{r,HHT} = \frac{m_{0,r,HHT}}{m_{0,i,HHT}} \quad (6), \quad C_{t,HHT} = \frac{m_{0,t,HHT}}{m_{0,i,HHT}} \quad (7).$$

Die mit den Momenten  $m_{0,HHT}$  berechneten Reflexions- sowie die Transmissionskoeffizienten aus WT und HHT die weisen gegenüber den Ergebnissen der WT eine erheblich größere Streuung auf (s. Abb. 4).

### 3. FISSION VON SOLITÄREN WELLEN ÜBER GETAUCHTEN RIFFEN

Passiert ein Soliton ein getauchtes Riff, so kommt es zur Fission (Aufspaltung) des Solitons in einen Wellenzug aus Solitonen mit abnehmender Wellenhöhe und nachfolgenden oszillatorischen Wellen (s. Abb. 5b). Dieses Phänomen ist für Riffe mit unendlicher Breite bereits untersucht worden. Die Untersuchung dieser Prozesse sowie die Entwicklung einer Bemessungsformel zur Bestimmung der Anzahl der entstehenden Solitonen beim Passieren eines endlichen Riffs ist gegenwärtig Gegenstand eines Forschungsprojektes am Leichtweiß-Institut (STRUSINSKA, 2007). Als eines der Hauptprobleme bei der Auswertung der Wellenaufzeichnungen erwiesen sich die Identifizierung der entstehenden Solitone sowie deren Abgrenzung gegenüber den nachfolgenden oszillatorischen Wellen. Für diese Auswertung stehen Wasserspiegelaufzeichnungen an verschiedenen Positionen vor, über und hinter dem Riff zur Verfügung. Das Beispiel in Abb. 5a zeigt zunächst die Fission des Solitons direkt hinter dem Riff. Das führende sowie ein weiteres Soliton sind hier bereits eindeutig zu identifizieren. Zwei weitere Solitone befinden sich gerade in der Fissionsphase und sind nur im Ansatz zu erkennen. Die Anzahl der identifizierten Solitone ist hierbei stark von der Position des Wellenpegels abhängig, da sich die einzelnen Solitone nacheinander herauslösen und ggf. an der Pegelposition noch nicht oder nicht mehr erkennbar sind. Im Fernfeld hinter dem Riff (s. Abb. 5b) hingegen ist nur noch das führende Soliton eindeutig erkennbar. Die weiteren Solitone ähneln hier stark den nachfolgenden oszillatorischen Wellen, so dass eine klare Abgrenzung der beiden Wellentypen gegeneinander alleine durch visuelle Auswertung der Zeitreihen nicht möglich ist. Solitäre Wellen weisen stark nichtlineare Eigenschaften auf und sind als Einzelwelle nicht-stationär. Eine Auswertung der Zeitreihen im Frequenzbereich mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) kommt daher nicht in Betracht. Daher wird versucht, die Solitone und die oszillatorischen Wellen anhand der auch für nicht-stationäre Signale geeigneten

a) Nahfeld (4,5m hinter dem Riff)



b) Fernfeld (19,0m hinter dem Riff)

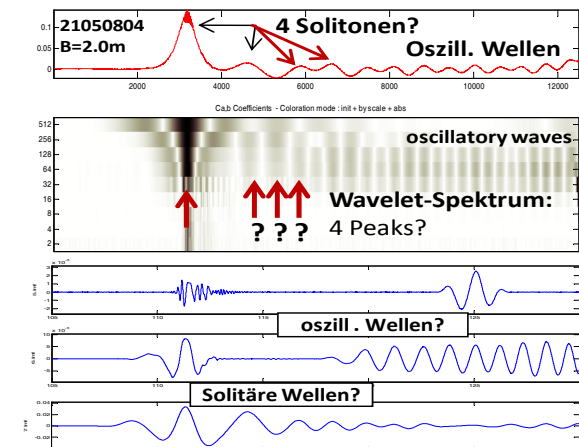


Abb. 5: Identifizierung der Solitonen und der oszillierenden Wellen mittels Wavelet-Spektrum und den Intrinsic Mode Functions (IMF) der HHT

Analyseverfahren Wavelet- und Hilbert-Huang-Transformation (WT und HHT) zu identifizieren und gegeneinander abzugrenzen. In Abb. 5 sind unter den Zeitreihen der Pegel jeweils das Wavelet-Spektrum sowie ausgewählte Intrinsic Mode Functions (IMF) der Hilbert-Huang-Transformation der Pegelaufzeichnungen im Nah- und Fernfeld hinter dem Riff gezeigt. Erste Untersuchungen ergaben, dass die Darstellung der beobachteten Solitone und der oszillatorischen Wellen in den Spektren und den IMF stark von der Höhe des einlaufenden Solitons sowie von der Position des Pegels abhängt. Das Beispiel zeigt, dass sich anhand der visuellen Auswertung im Nahfeld die vier beobachteten Solitone im WT-Spektrum erkennen lassen, nicht jedoch in den IMF der HHT. Im Fernfeld hingegen zeigen in deutlich beiden Darstellungen die späteren oszillatorischen Wellen. Die exakte Identifizierung der Solitone sowie deren Abgrenzung gegen die oszillatorischen Wellen sind jedoch nicht eindeutig. Das Ziel der weiteren Untersuchungen ist es, die charakteristischen Eigenschaften der Solitone sowie der oszillierenden Wellen in den Spektren und IMF von WT und HHT zu ermitteln, um anschließend die beiden Wellentypen in den Pegelaufzeichnungen eindeutig gegeneinander abgrenzen zu können.

#### **4. ZUSAMMENFASSUNG**

Das Beispiel der Berechnung der Energiekoeffizienten sowie der Fission von Solitonen wird verdeutlicht, dass die Art des verwendeten Analyseverfahrens sich auf die erzielten Ergebnisse auswirkt. Obwohl sich die Verfahren in ihren mathematischen Ansätzen und Prozeduren stark voneinander unterscheiden, weisen die Darstellungen der Ergebnisse Parallelen auf, wie z.B. die Energie-Frequenzspektren. Eine Übertragung der Analyseprozedur aus der FFT auf die anderen Verfahren führt jedoch nicht zwangsläufig zu gleichen Ergebnissen, wie die Streuung der Ergebnisse für die Reflexionskoeffizienten zeigt. Neben der weiteren quantitativen Vergleichsanalyse zum Wellenbrechen und zur Wirbelbildung am Riff liegt ein Schwerpunkt der weiteren Arbeiten in der Charakterisierung und Identifizierung der durch Fission am Riff entstehenden solitären Wellen. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass hier mit den Zeit-Frequenzdarstellungen der WT und HHT die Abgrenzung zwischen solitären und oszillierenden Wellen möglich erscheint.

Das Forschungsvorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

#### **5. SCHRIFTTUM**

HUANG, N.E., SHEN, Z., LONG, S.R., WU, M.C., SHIH, H.H., ZHENG, Q., YEN, N.-C., TUNG, C.C., LIU, H.H.: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. R. Soc. Lond. A (1998) 454, 903-995, 1998

MASSEL, S.R.: Wavelet analysis for processing of ocean surface records, Ocean Engineering 28 (2001), 957-987, 2001

STRUSINSKA, A.; OUMERACI, H.: Hydraulic performance of artificial reef for tsunami protection – Laboratory experiments on solitary wave nonlinear transformation over a submerged structure of a finite depth. Internal Report No.3, 2007

OUMERACI, H., BLECK, M.: Hydrodynamische Wirksamkeit von künstlichen Riffen unter besonderer Berücksichtigung des Energietransfers im Wellenspektrum, Zwischenbericht DFG OU 1/6-1, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, Technische Universität Braunschweig, 2000