

Universität Rostock Fakultät für Ingenieurwissenschaften Fachbereich Bauingenieurwesen Lehrgebiet Wasserbau Dr.- Ing. Peter Fröhle

# Untersuchungen zur Bestimmung von Grenzen der Simulation

# regelmäßiger und unregelmäßiger Wellen

## in kleinmaßstäblichen hydraulischen Modellen

Bearbeiter:	Richter, Ralf	
Matr. Nr.:	099 203 489	
Anschrift:	Bertolt-Brecht-Straße 20	
	18106 Rostock	
Email:	RichterRalf@gmx.de	
Betreuer:	Dr Ing. Peter Fröhle	
	Prof. DrIng. habil. S. Kohlhase	
Ausgabe:	19.12.2007	
Abgabe:	19.03.2007	

Besonderen Dank an Dr. rer. nat. Alexander Dräbenstedt

# Inhalt

Einführung1
1. Wellenbecken und Versuchsanordnung3
1.1. Wellenbecken3
1.2. Ziele und Vorüberlegungen5
1.3. Versuchsanordnung9
1.4. Beschreibung der Versuchsdurchführung11
2. Grundlagen14
2.1. Eigenschaften des Wassers14
2.2. Lineare Wellentheorie16
2.3. Dämpfung20
2.4. Ähnlichkeitstheorien27
2.5. Bekannte Grenzen
2.6. Der Wellenerzeuger
2.7. Ultraschallsensoren
3. Durchgeführter Versuch
3.1. Kalibrierung der vorhandenen Messtechnik
3.2. Kalibrierung der vorhandenen Steuerungstechnik46
3.3. Erfassungssystematik und Auswertungssystematik anhand einer beispielhaften
Auswertung49
4. Ergebnisse
4.1. Wellendämpfung57
4.2. Lineare Übertragungsfunktion59
4.3. Paddelspiel60
4.4. Wiederholungsgenauigkeit61
4.5. Untere Messgrenzen der Versuchsanordnung62
Schlussbetrachtung63
Literaturverzeichnis
Anlagen67

#### Einführung

Trotz wachsender Rechenleistung und verbesserter Berechnungsalgorithmen gilt weiterhin, dass die theoretischen Möglichkeiten für den Wasserbauingenieur auch heute noch begrenzt sind. Um hydrodynamische Problemstellungen zu lösen stützt sich der Ingenieur hauptsächlich auf Fachwissen und Erfahrung. Lassen sich Problemstellungen so nicht lösen, werden experimentelle Untersuchungen herangezogen. Vor allem im Küsteningenieurwesen sind hydraulische Modellversuche ein verlässliches Mittel um zum Beispiel die Wellenunruhe in einem Hafen zu bestimmen. Auch werden hydraulische Modellversuche zur Verifizierung und Untermauerung numerischer Modelle herangezogen.

Einrichtungen zum Küsteningenieurwesen sind in Deutschland rar und deren Budget wird immer weiter beschränkt, obwohl ihr Aufgabengebiet durch den Aspekt des Meeresspiegelanstieges wächst. Deshalb müssen bei der Beschaffung und Unterhaltung hydraulischer Modelle neue und kostensparende Wege beschritten werden.

Im Rahmen der Zusammenarbeit der Queens Universität Belfast und dem Institut für Wasserbau der Universität Rostock wurde mit dem Bau und der Konstruktion des "kleinen Wellenbeckens" unter Herrn Dr.-Ing. P. Fröhle einer dieser neuen Weg eingeschlagen. Ziel ist es, in einem Wellenbecken mit relativ geringe Abmaßen, hydraulische Modellversuche durchzuführen. Dieses Becken hat die Abmasse 4x4 m. Als Vergleich sei das Wellenbecken am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover mit einer Fläche von 45x24 m erwähnt. Der Ansatz, in einem kleinen Becken hydraulische Modellversuche durchzuführen, ist nichts neues. Ungenauigkeiten in der Ansteuerung und Messung führten in den letzten Jahrzehnten, dazu dass diese Art des hydraulischen Modells selten eingesetzt wurde. Denn die geringen Abmessungen des Beckens erfordern sehr kleinskalige Modelle und geringe Wasserstände. Neue Entwicklungen in der Fertigungs-, Steuer-, Mess- und Regelungstechnik sollten zu größeren Genauigkeiten führen. Es stellt sich nun die Frage: "Wie groß ist der Einsatzbereich bei einem, nach dem aktuellen Stand der Technik gebauten, kleinen Wellenbecken."

Im Rahmen seiner Diplomarbeit [Groth 2004] hat Herr Dipl-Ing. J. Groth theoretische Grundlagen betrachtet und anschließend das Wellenbecken konstruiert und gebaut. In dieser Diplomarbeit werden nun weitere logische Schritte zur Bearbeitung des Themas durchgeführt. Speziell werden die physikalisch Modellgrenzen für erzeugte regelmäßige Wellen ermittelt. Aus diesen lässt sich eine Bewertung über die Einsatzfähigkeit des Wellenbeckens ableiten.

Es wird in dieser Arbeit nach folgender Methodik vorgegangen:

- Im ersten Kapitel wird das Wellenbecken vorgestellt, die Ziele erläutert, Vorüberlegungen angestellt und die Versuchsanordnung sowie die Versuchsdurchführung erklärt.
- Kapitel zwei behandelt die notwendigen theoretischen Grundlagen f
  ür die Durchf
  ührung und Auswertung der Versuche.
- In Kapitel drei wird die Kalibrierung der vorhandenen Steuerungs- und Messtechnik erläutert und an einem ausgewähltem Beispiel wird die Erfassungs- und Auswertungssystematik erklärt.
- Kapitel vier beinhaltet eine Abschätzung der Einsatzgrenzen des hydraulischen Modells anhand der ermittelten Wellendämpfung, des Umkehrspiels des Wellenerzeugers und der Übertragunsfunktion.
- Abschließend erfolgt in Kapitel fünf eine Kurzzusammenfassung und es werden Vorschläge zu Verbesserung des Wellenbeckens und für zukünftige Forschungsaufgaben erläutert.

Aufgrund der großen Menge der gewonnen Messdaten sind diese in elektronischer Form auf CD als Datenträger beigelegt.

## 1. Wellenbecken und Versuchsanordnung

## 1.1. Wellenbecken

Das Wellenbecken wurde von Herrn Dipl.-Ing. J. Groth im Rahmen seiner Diplomarbeit [Groth 2004] geplant und konstruiert. Mit 4x4 m und einer maximalen Füllhöhe von 0,2 m gehört es zu den kleinsten hydraulischen Modellen. Die größtmögliche Füllmenge beträgt 3200 Liter.

Der Grundrahmen besteht aus Industriestandard Aluminium-Träger-Elementen. Diese sind miteinander verschraubt. Auf diesem Rahmen ruht der Beckenboden, bestehend aus 16 1x1 m großen Aluminium-Walzplatten. Umlaufend, an der Rahmenaußenseite, sind massive Tafeln aus transparentem Acrylglas montiert. Die Dichtheit wird durch einen Konstruktionsklebstoff<sup>1</sup> sichergestellt. Das Becken ist plan und waagerecht. Gewährleistet wird dies durch eine steife Konstruktion des Rahmens und justierbare Standfüße. Zwei weitere Trägerkonstruktionen ermöglichen das Anbringen der Wellenerzeuger und der Sensoren. Diese Konstruktionen sind aber unabhängig voneinander und vom Grundrahmen. Dadurch wird eine Schwingungsentkopplung des Wellenerzeugers vom Rahmen des Wellenbeckens und dem Sensorenträger gewährleistet.

Die Wellenerzeugung erfolgt nach dem "Piston-Type Wave Board"-Prinzip. Dafür sind am Träger für den Wellenerzeuger drei separate Linearfahreinheiten<sup>2</sup> montiert. An diesen befinden sich jeweils ein horizontal verdrehbares Wellenpaddel. Dies ermöglicht die Erzeugung von "schräg" anlaufenden und überlagerten Wellen. Als Antrieb fungiert pro Lineareinheit ein Schrittmotor. Jeder Schrittmotor wird über einen seperaten 3-Achs-Schrittmotor-Controller angesteuert.

Der Sensorenträger überspannt das gesamte Becken und ist beweglich auf sechs Rollen gelagert. Als Führung dienen L-Profile am Hallenboden. Zwei 3 m hohe Stützen auf dem Träger ermöglichen das zukünftige Anbringen von optischen Aufzeichnungs- oder Messgeräten.

<sup>1</sup> Klebstoff Sikaflex-252 von der Firma Sika Deutschland GmbH.

<sup>2</sup> Zahnriemenvorschub ZF2, Schrittmotor MS-430 HAT und 3-Achs-Schrittmotor-Controller sind von der Firma iselautomation GmbH & Co.KG.



Abbildung 1: Wellenbecken am Institut für Wasserbau.

## 1.2. Ziele und Vorüberlegungen

Mit dem Wellenbecken werden folgende Ziele verfolgt:

- Schaffung einer Forschungsgrundlage f
  ür den zuk
  ünftigen Einsatz von kleinen Wellenbecken
- praktische Fragestellungen auf empirischen oder physikalisch Weg zu beantworten
- Nutzung für die Ausbildung und Lehre

Um diese Ziele zu erreichen ist es erforderlich die Grenzen der Modellierung und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Natur zu kennen. Diese wiederum sind abhängig von den physikalischen Grenzen und den verwendeten Modellgesetzen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen die Grenzen des vorhandenen hydraulischen Modells experimentell bestimmt werden.

Dabei lässt sich die Abhängigkeit der physikalischen Grenzen in die Bereiche:

- Ansteuerung und Wellenerzeugung
- Beckenbeschaffenheit und verwendetes Medium
- Messtechnik

einteilen.

Die Ansteuerung und Wellenerzeugung wird hauptsächlich beeinflusst durch die technischen Eckdaten des Schrittmotors und der Linearfahreinheit. Wie zum Beispiel der Wiederholungsgenauigkeit und der maximalen Fortschrittsgeschwindigkeit. Der Einfluss der Spaltmaße zwischen dem Wellenpaddel, dem Beckenboden und den Leitblechen ist zwar geringer, aber ebenfalls nicht vernachlässigbar. Bei einer Wassertiefe von 20 mm entspricht ein Spalt von 1 mm schon 5 % der Wassertiefe.

Die Beschaffenheit des Beckenbodens und der Leitbleche beeinflusst über deren Rauhigkeit die Dämpfung der Wellen. Auch ist die Dämpfung abhängig vom verwendeten Medium. Den größten Einfluss auf die Wellenhöhe hat aber die Überlagerung mit Reflektionen oder fremderzeugten Wellen. Diese resultieren aus der Konstruktion und den Einbauten im Becken.

Die Sensor- und Messtechnik ist eine komplexes System bestehend aus den Messpegeln, der Spannungsversorgung, geschirmten Kabeln und dem Messrechner.

Zusammenfassend lassen sich die physikalischen Grenzen unterteilen in fest vorgegebene und experimentell zu ermittelnde.

Zu den fest vorgegebenen zählen:

- Schrittweite der Schrittmotoren
- Wiederholgenauigkeit und maximale Geschwindigkeit der Linearfahreinheiten
- Messbereich, Auflösung, Wiederholungsrate und Messkegel der Sensoren
- Wellenausbreitungsfläche begrenzt durch die Beckengröße.

Experimentell lassen sich ermitteln:

- Ungenauigkeit der wellenerzeugenden Mechanik
- · Wiederholgenauigkeit des Experiments
- Übertragungsfunktion von Paddelausschlag zur erzeugten Wellenamplitude
- Dämpfung der Wellen.

Da die Mechanik zur Wellenerzeugung einer technisch bedingten Ungenauigkeit unterliegt, muss diese erfasst werden. Sollte die Differenz aus eingesteuertem und gemessenem Paddelausschlag fehlerrelevant sein, kann diese später über Parameter im Steuerungsprogramm kompensiert werden.

Für die Praxis ist die Wiederholgenauigkeit eines Experiments von hoher Bedeutung. Experimente die sich nicht reproduzieren lassen sind nicht aussagekräftig. Daher ist die Wiederholgenauigkeit der Experimente unbedingt zu betrachten.

Die Übertragungsfunktion ermöglicht einen Zusammenhang zwischen Paddelausschlag und erzeugter Wellenamplitude herzustellen. Dieser Zusammenhang ist abhängig von der relativen Wassertiefe und der eingesteuerten Frequenz. Aus dieser Funktion lässt sich schlussfolgern welche maximalen und minimalen Wellenamplituden erzeugt werden können. Für die Bestimmung der Übertragungsfunktion werden zwei Sensoren benötigt. Zum einen um die Wasserspiegelauslenkung und zum anderen den Paddelausschlag zu erfassen.

Die Dämpfung ist für die praktikable Nutzung von größter Bedeutung. In ausreichender Entfernung vom Wellenerzeuger , je nach Aufgabenstellung, müssen noch messbare Amplituden vorhanden sein. Zur Ermittlung der Dämpfung sind zwei gemessene Wellenamplituden und die Wellenlänge erforderlich. Die Wellenamplituden lassen sich ebenfalls über zwei gemessene Wasserspiegelauslenkungen bestimmen. Der Abstand der Sensoren sollte dabei größer als die Wellenlänge sein. Unter Verwendung der linearen Wellentheorie oder über ein zwei Pegel-Verfahren lässt sich die noch erforderliche Wellenlänge berechnen. Beim zwei Pegel-Verfahren werden die mit Hilfe von zwei Sensoren aufgenommenen Werte über eine Phasenverschiebung ausgewertet. Dieses Verfahren ermöglicht aber keine Filterung der Reflektionen wie zum Beispiel beim drei Pegel-Verfahren [Fröhle 1990]. Einflüsse durch Reflektion müssen daher durch die Konstruktion der Einbauten und einen eingegrenzten Messzeitraum ausgeschlossen werden.

Da es möglich ist die Sensoren für beide Bestimmungen gleichzeitig zu nutzen, ergibt sich die Aufteilung in Abbildung 2.

Die Aufgaben der einzelnen Sensoren sind dabei:

- Sensor Nr. 1, Messung der Wasserpiegelauslenkung f
  ür die Übertragungsfunktion, die Wellenlänge und die D
  ämpfung
- Sensor Nr. 2, Messung der Wasserspiegelauslenkung zur Bestimmung der Wellenlänge
- Sensor Nr. 3, Messung der Wasserspiegelauslenkung zur Bestimmung der Dämpfung
- Sensor Nr. 4, Messung des Paddelausschlages zur Bestimmung der Übertragungsfunktion.

Da alle Messungen in Abhängigkeit von der Zeit erfasst werden, können die Daten über diese miteinander verknüpft werden. Zur Anwendung kommen vorhandene Ultraschallsensoren.



Abbildung 2: Messkonzept unter der Verwendung von 4 Sensoren.

## 1.3. Versuchsanordnung

Zur Durchführung der Versuche wurde nur einer der drei vorhandenen Wellenerzeuger verwendet. Die Trennung der erzeugten Wellen vom restlichen Becken ermöglichen seitlich angebrachte Leitbleche. Durch diese entsteht ein Versuchsabschnitt von 102 cm Breite und 250 cm Länge. Um das Schwingen der leichten Leitwände aus Plexiglas zu verhindern sind diese miteinander versteift. Der Spalt zwischen den Leitwänden und dem Wellenpaddel ist mit einer Gummidichtung minimiert werden.

Die Versuchsanordnung ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Sie zeigt die gewählte Anordnung des Wellenerzeugers und der vier Sensoren sowie die eingebaute Böschung.



Abbildung 3: Schematische nicht Maßstäbliche Skizze der Versuchsanordnung mit Maßen

Aus den Vorbetrachtungen im Kapitel 1.2 Ziele und Vorüberlegungen ergibt sich die Anordnung der Ultraschallsensoren. Diese sind über horizontale und vertikale Profile am Sensorenträger befestigt. Die Funktionalität und Bezeichnung entspricht den in der Abbildung 2 als S1 bis S4 bezeichneten Sensoren. Zu Versuchsbeginn müssen alle Sensoren einen Abstand von etwa 40 mm zum Ruhewasserspiegel beziehungsweise dem Wellenpaddel haben. Grund dafür ist der sehr klein gewählte Messbereich der Sensoren um deren Genauigkeit zu erhöhen. Es ist somit notwendig, den gesamten Träger mit den Sensoren dementsprechend bei jedem gefahrenen Wasserstand anzuheben oder abzusenken. Um Reflektionen im Wellenbecken möglichst gering zu halten wurde eine Böschung eingebaut. Das Böschungsverhältnis ist 3 :1. Die Böschung besteht aus einem Geotextil



Abbildung 4: Geräteträger aus Aluprofilen mit angebauten Messsensoren.

mit Steinschüttung. Wobei das Geotextil vor allem bei geringen Wasserständen zum Wellenbrechen und -dämpfen beitragen soll.



Abbildung 5: Böschung 3:1 bestehend aus Geotextil und Steinschüttung.

## 1.4. Beschreibung der Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung lässt sich in drei Stufen einteilen:

- Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung
- Starten der Messreihe
- Durchführung eines Einzelversuches

Zu Beginn muss die Versuchseinrichtung grundlegend in Betrieb genommen werden. Dazu gehören eine optische Überprüfung, mechanische Tests und die Kalibrierung der Messtechnik. Optisch lassen sich anhand von Markierungen die Position der Sensoren und Einbauten überprüfen. Ebenfalls optisch sind das Medium Wasser auf Verunreinigungen und die Einbauten auf Ablagerungen zu untersuchen. Falls erforderlich sind diese zu reinigen. Bei den mechanischen Tests werden Referenzfahrten des Wellenerzeugers durchführt. Da es sich bei den Linearfahreinheiten zur Wellenerzeugung um mechanische Bauelemente im Spritzwasserbereich handelt, ist die regelmäßige Wartung Pflicht. Die Kalibrierungsautomatik der Messkarte überprüft die Rechen-, Messund Sensorentechnik. Diese von einer Software durchgeführte Kalibrierung gibt Auskünfte über Defekte in der Elektronik. Sie gibt aber keine Auskunft, ob etwa die programmierbaren Sensoren anders konfiguriert wurden.

Auf der ersten Stufe wird nun die Versuchseinrichtung für die Messreihe konfiguriert. Hierfür sind der Ruhewasserstand und der Abstand der Sensoren von diesem, einzustellen. Der Sensorenkopf muss sich etwa 40 mm über der Wasseroberfläche beziehungsweise vor dem Paddel befinden. Softwareseitig sollte nun eine Musterdatei zur Messdatenerfassung und ein eigenes Verzeichnis für die Messreihe eingerichtet werden. Eine Messreihe besteht aus etwa 16 Einzelversuchen. Diese variieren bei gleichem Wasserstand, in Frequenz und Paddelausschlag.

Die zweite und umfangreichste Stufe sind die Einzelversuche. Diese setzen voraus, dass sich kein Fehler bei der Inbetriebnahme und der ersten Stufe eingeschlichen hat. Zu Beginn der Einzelversuche müssen folgende Punkte überprüft werden:

- Befindet sich das Wellenpaddel an der Startposition?
- Ist die Wasseroberfläche beruhigt?
- Sind korrekte Parameter (Frequenz, Paddelausschlag) im Programm zur Wellenerzeugung eingetragen?
- Ist das Programm zur Messdatenerfassung gestartet und sind die Sensoren und deren Abtastfrequenz eingestellt?
- Ist die Musterdatei für die Messdaten geöffnet?

Sind all diese Bedingungen erfüllt, wird die Messwerterfassung und kurz darauf die Wellenerzeugung gestartet. Die Erfassung der Messdaten erfolgt über einen Zeitraum von 10 bis 13 Sekunden. Die Anzahl und Zeit der Messwerte ist abhängig von der Frequenz mit der die Sensoren abgetastet werden. Es wird für jede eingesteuerte Frequenz mit einer dazu passenden Abtastfrequenz gemessen. Detaillierter wird dies im Kapitel 3.1 Kalibrierung der vorhandenen Messtechnik erläutert.

Nach dem automatischen Ende der Erfassung wird die Wellenerzeugung manuell gestoppt. Über die so gewonnenen Messwerte erfolgt nun eine optischen Vorkontrolle. Dafür werden die Messwerte in einem Spannungs-Zeitdiagramm dargestellt. Wie in Abbildung 6 können so Ausreißer oder Hinweise auf Fehlmessungen erkannt werden. Gegebenenfalls muss eine Nachmessung erfolgen.

Abschließend werden die Messdaten in einer Datei mit der Bezeichnung von Wasserstand, Frequenz (Periode), Amplitude gespeichert. In der Datei selber sind zusätzlich die Wassertemperatur und auffällige Beobachtungen vermerkt.



Abbildung 6: Beispiel für Fehlmessung der Sensoren, dargestellt in einem Spannung-Zeit-Diagramm.

#### 2. Grundlagen

#### 2.1. Eigenschaften des Wassers

Wasser wird im hydraulischen Versuchswesen überdurchschnittlich oft verwendet. Alternativ zum Wasser finden aber auch Öle und Alkohole Anwendung. Für die hauptsächliche Verwendung von Wasser sprechen zwei Gründe. Zum einen die geringeren Kosten für Beschaffung und zum anderen die Eigenschaften des Wassers. Die bekanntesten physikalischen Eigenschaften sind die Aggregatzustände, die Wärmeleitfähigkeit, die optischen Eigenschaften, die Oberflächenspannung, die Viskosität und die elektrische Leitfähigkeit.

Chemisch betrachtet ist Wasser eine Verbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff mit der Formel H<sub>2</sub>O. Die Bezeichnung Wasser bezieht sich auf einen der drei Aggregatzustände, den flüssigen. Desweiteren sind Eis als fester Aggregatzustand und Wasserdampf als gasförmiger Aggregatzustand möglich. Wann die verschiedenen Aggregatzustände eintreten hängt stark von Temperatur und Druck ab. Grund dafür ist die gewinkelte und dipolare Konstruktion der Wassermoleküle. Diese ermöglicht die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen. Über solche Wasserstoffbrücken können zwei, vier oder acht Wassermoleküle verbunden werden, was zu komplexen dreidimensionalen Strukturen führt. Um diese aufzubrechen, ist im Vergleich zu anderen Substanzen ein hoher Energieaufwand notwendig, woraus zum Beispiel der hohe Siedepunkt von Wasser resultiert<sup>3</sup>.

Für die durchzuführenden Versuche sind die Eigenschaften, Oberflächenspannung und Viskosität von Bedeutung. Die Oberflächenspannung hat bei Versuchen mit geringen Wasserständen d≤ 5 cm einen messbaren Einfluss [Martin & Pohl 2000] auf die fortschreitende Welle sowie auf verschiedene Bauwerkseffekte wie Brechung und Diffraktion. Grund dafür sind die hohen Kohäsionskräfte welche aus den Wasserstoffbrückenbindungen resultieren. Daher hat Wasser, bis auf Quecksilber, mit 73 mN/m (bei 20 ℃ [Römpp 1998]) die größte Oberfläche nspannung aller Flüssigkeiten. Herabgesetzt werden kann diese durch eine Temperaturerhöhung oder die Verwendung

<sup>3</sup> Siehe dazu auch Weiterführendes in [bc chemie].

von grenzflächenaktiven Stoffen wie Tensiden.

Die Viskosität oder auch Zähigkeit des Wassers resultiert aus der inneren Reibung. Bei dieser führt die Behinderung der Moleküle gegeneinander zum Energieverzehr. Wodurch die Wellenausbreitung und die Wellenamplitude gedämpft werden. Abhängig ist diese innere Reibung von der Temperatur, Druck und denen im Wasser gelösten Stoffen.

## 2.2. Lineare Wellentheorie

Um Seegangsereignisse mathematisch zu formulieren, bedient man sich deterministischer Wellentheorien. Mit diesen lässt sich die Form freier Wasseroberflächen und die Bewegung der Wasserteilchen beschreiben. Dazu werden die Wellenparameter Wellenhöhe H, Periode T (oder Wellenlänge L) und die Wellenrichtung  $\Theta$  (Phasenwinkel) verwendet. In der Abbildung 7 sind an einer fortschreitenden Schwerewelle die einzelnen Parameter dargestellt.



Abbildung 7: Fortschreitende Schwerewellen mit Bezeichnung. [EAK 2002]

Es wird unterschieden in lineare und nichtlineare Wellentheorien. Die größte Bedeutung hatten in der Vergangenheit die lineare Wellentheorien aufgrund ihrer mathematischen Einfachheit. Mit der Möglichkeit rechnergestützt numerische Näherungslösungen zu bestimmen gewinnen jedoch nichtlineare Theorien in der Praxis immer mehr an Bedeutung. Eine Übersicht verschiedener Wellentheorien mit ihrem jeweiligen Anwendungsbereich ist in Abbildung 8 auf Seite 18 dargestellt. In dieser Abbildung werden die Anwendungsbereiche unterteilt in:

- Tiefwasser:  $d/L \ge 0.5$
- Übergangsbereich: 0.5 > d/L > 0.05
- Flachwasser:  $d/L \le 0.05$

und dem dimensionslosen Parameter H/(g\*T<sup>2</sup>).

Diese Einteilung ist abhängig vom Verhältnis der relativen Wassertiefe d<sup>4</sup> zur Wellenlänge L und dem Verhältnis der Wellenhöhe H zur Wellenperiode T. Der Unterschied in der Berechnung von Tief-, Übergangs- und Flachwasserwellen ist begründet in der Teilchenbewegung des Wassers. Diese verändert sich beim Einlaufen einer harmonischen Welle vom Tief- ins Flachwasser. Im Tiefwasser entspricht die Bewegung einer idealen Kreisbahn, verändert sich aber über eine Ellipsenbahn im Übergangsbereich zu einer reinen Vertikalbewegung im Flachwasser.

<sup>4</sup> Es sei zu beachten das in der Literatur die Wassertiefe d auch mit h bezeichnet wird.

Grundlagen



Abbildung 8: Anwendungsbereiche verschiedener Wellentheorien. [EAK 2002]

Da die lineare Wellentheorie nach Airy und Laplace zur Auswertung und Interpretation der Messergebnisse ausreicht, wird auf andere Theorien nicht weiter eingegangen. Die Theorie kleiner Amplituden nach Airy und Laplace ist die bedeutendste lineare Wellentheorie. Voraussetzung für deren Anwendung sind die schon erwähnten Anwendungsbereiche und folgenden Bedingungen:

- sinusförmige Oberfläche was einem symmetrischem Wellenprofil entspricht
- kleine Amplituden (H << L und H << d)</li>
- ebener Untergrund
- · ideale Flüssigkeit welche reibungsfrei, inkompressibel und homogen ist
- kein Einfluss der Luftbewegung auf die Wellenbewegung

	$\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$	$\frac{\bar{U}bergangsbereich}{\frac{1}{20} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}}$	$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
1. Profil der freien Oberfläche	Allgemeine Gleichung	$\eta = \frac{H}{2} \cdot \cos\theta$	
2. Wellenge- schwindig- keit	$c = \frac{L}{T} = \sqrt{g \cdot d}$	$c = \frac{L}{T} = \frac{g}{\omega} \cdot \tanh(kd) = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(kd)}$	$c = \frac{L}{T} = \frac{g}{\omega}$
3. Wellenlänge	$L = c \cdot T = T \cdot \sqrt{g \cdot d}$	$L = \frac{g}{\omega} \cdot T \tanh(kd)$	$L = c \cdot T = \frac{g}{\omega} \cdot T$
4. Orbital- geschwindig- keit a) horizontal	$u = \frac{H}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \cos\theta$	$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \cos\theta$	$u = \frac{H}{2} \omega \cdot e^{kz} \cdot \cos\theta$
b) vertikal	$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{H}}{2}  \boldsymbol{\omega}  \cdot  \left( 1  + \frac{\mathbf{z}}{\mathbf{d}} \right) \cdot  \sin \theta$	$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{H}}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \frac{\sinh [\mathbf{k}(\mathbf{z} + \mathbf{d})]}{\sinh(\mathbf{k}\mathbf{d})} \cdot \sin \boldsymbol{\theta}$	$w = \frac{H}{2}\omega + e^{kz} + \sin^{\frac{1}{2}}$
5. Orbitalbe- schleuni- gung a) horizontal	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \sin\theta$	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \cdot \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \sin\theta$	$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\mathbf{H}}{2}  \boldsymbol{\omega}^2 \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{k}\mathbf{z}} \cdot \mathbf{sin}\boldsymbol{\theta}$
b) vertikal	$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} = -\frac{H}{2}  \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cdot \cos\theta$	$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} = -\frac{H}{2} \omega^2 \cdot \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kz)} \cdot \cos\theta$	$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} = \frac{H}{2}  \mathbf{w}^2 \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{k}\mathbf{z}} \cdot \cos\theta$

Daraus ergeben sich die in Abbildung 9 dargestellten Berechnungsformeln.

Abbildung 9: Formeln zur Linearen Wellentheorie kleiner Amplituden nach Airy und Laplace. [EAK 2002]

## 2.3. Dämpfung

Die Abnahme der Wellenhöhe über die Lauflänge bei unveränderter Wassertiefe, beschreibt man als Dämpfung. Hierbei nimmt die Auslenkung der Amplitude A<sub>max</sub> durch Energieabgabe ab. Voraussetzung dafür ist ein schwingungsfähiges System. Das typische Verhalten einer Energiereduktion ist in Formel 2.1 als Exponentialfunktion dargestellt. Voraussetzung für die Exponentialfunktion ist, dass sich die Reibung proportional zur Amplitude ändert.

Dieser Ansatz lässt sich übertragen auf Wasserwellen. Das Medium Wasser besteht ebenfalls aus schwingungsfähigen Teilchen. Breitet sich in diesem eine Welle aus verringert sich deren Energie zum Beispiel durch Luftwiderstand und Reibung. Eine Abnahme der Wellenamplitude im Verlauf der Schwingungen ist die Folge. Somit wird die Welle über die Lauflänge gedämpft.

Bei normalen hydraulischen Flächenmodellen ist die Dämpfung vernachlässigbar klein, bei kleinskaligen Modellen hat sie jedoch große Auswirkungen. Die sich daraus ergebenden bekannten Einfluss- Modellgrenzen sind im Kapitel "Bekannte Grenzen, dargelegt.

Die Wellendämpfung wird maßgeblich beeinflusst durch:

- relative Wassertiefe
- Periode bzw. Wellenlänge
- Rauhigkeit der benetzten Oberflächen (Boden und Leitwände)
- Oberflächenspannung
- Viskosität

$$A = A_{max} * e^{-\delta t}$$
 Formel 2.1

Im hydraulischen Versuchswesen wird zur Beschreibung der Dämpfung mit der Dämpfungskonstante, dem Dämpfungskoeffizienten und dem Dämpfungsfaktor gearbeitet. Die bekanntesten Herleitungen von Dämpfungsberechnungen nach Biesel [Biesel 1949], Stokes [STOKES 1966], Eagelson u.a. [Eagleson 1962], Le Mehauté [Le Mehauté 1976] und Reid/Kajiura [Reid / Kajiura 1957] gehen von einer exponentiellen Abnahme der

Wellenamplitude aus.



Abbildung 10: Schematische Darstellung der Dämpfung einer Amplitude, bezeichnet als a<sub>0</sub>, über die Lauflänge L oder die Zeit t. [Schröder 1982]

### a) Dämpfungkonstante

Die Dämpfungskonstante k beschreibt das Verhältnis zweier benachbarter Amplituden. Unter der Annahme des Modells in Abbildung 10 läßt sie sich als e-Funktion darstellen.

$$\left[\frac{A_n}{A_0} = e^{\alpha * L * (-n)} = k^{-n}\right]$$
 Formel 2.2

Biesel, Stokes, Eagelson u.a., Le Mehauté und Reid/Kajiura verwenden gemeinsam als Grundlage die aus der e-Funktion resultierende Formel 2.3. Die verschiedenen Ansätze zur Berechnung der Dämpfungskonstante unterscheiden sich ausschließlich in der Bestimmung des eingehenden Dämpfungsfaktors.

Legt man Formel 2.4 zu Grunde, läßt sich aus jeden Messwertepaar mit der gegebenen Distanz x die Dämpfungskonstante bestimmen.

$$k^{n} = \frac{A_{S1}}{A_{S2}}$$
 wobei  $n = x/L$  Formel 2.4

Ralf Richter

$$k = \sqrt[n]{\frac{A_{S1}}{A_{S2}}}$$

Formel 2.5

## b) Dämpfungskoeffizient

Der Dämpfungskoeffizient ist das Verhältnis zweier Wellenhöhen H zueinander. Er kann mit der Formel 2.6 bestimmt werden. Graphisch ist die Beziehung des Dämpfungkoeffizienten zur Dämpfungskonstante in Abbildung 11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Lauflänge der Dämpfungskoeffizient in Abhängigkeit von der Dämpfungskonstante abnimmt.



Abbildung 11: Vergleichskurven bei idealer Dämpfung aus [Schröder 1982].

#### c) Dämpfungsfaktor α

Der Dämpfungsfaktor kann theoretisch und empirisch hergeleitet werden. Die bekanntesten theoretischen Herleitungen sind, die nach Biesel und Stokes. Auf deren Grundlage beruhen die mittels empirischen Versuchen modifizierten Formeln nach Eagleson und Reid/Kajiura. Untersuchungen zeigten, dass die versuchstechnisch bestimmten Dämpfungsfaktoren größer als die rein theoretischen sind. Als Gründe werden angeführt, dass die bisherigen Theorien nicht die innere Dämpfung und nur eine begrenzte Anzahl störender Randbedingungen berücksichtigen. Vor allem bei kleinen Amplituden und Wasserständen lässt sich die Dämpfung ohne Versuche nicht mit ausreichender Genauigkeit voraussagen. Eagleson empfiehlt daher den Dämpfungsfaktor aus einer "Einhüllenden" zu bilden. Die von ihm aufgestellte Gleichung (Formel 2.7) berücksichtigt verschiedenste experimentell ermittelte Ergebnisse.

$\alpha = \frac{13.5 \pi^2}{\beta l^2 (\sinh 2kd + 2kd)}$	wobei	$\beta = \left[\frac{\sigma}{2v}\right]^{\frac{1}{2}}$	v = Viskosität

Formel 2.7

Die dargestellten Verläufe des Dämpfungsfaktors in Abbildung 12 zeigen wie unterschiedlich die Berechnungen der Autoren sind. Besonders die Kurve nach Le Mehauté [Le Mehauté 1976] stellt eine Besonderheit dar. Sie ist konkav während alle anderen überwiegend konvex ausgebildet sind.

Le Mehauté bezieht sich als einziger auf Dämpfungsuntersuchungen im Rahmen der maßstabsgetreuen Modelltechnologie. Bedingung für die Verwendung seiner Formeln ist ein rechteckiges Becken und eine freie Oberfläche. In seinem Berechnungsansatz wird statt eines Dämpfungsfaktors  $\alpha$  ein  $\Delta$  verwendet. Dieses  $\Delta$  (Formel 2.8) setzt sich zusammen aus:

- Δ<sub>b</sub> Einfluss des Bodens und der Beckenränder sowie
- $\Delta_s$  Einfluss der freien Oberfläche.

 $\Delta{=}\Delta_{\rm b}{+}\Delta_{\rm s}$ 

Formel 2.8

Ralf Richter

Es ergeben sich auf der Grundlage der abgewandelten Formel 2.3 die Formeln 2.9 und 2.10.

$$k = e^{\Delta L}$$
Formel 2.9 $k = e^{L\Delta_b} * e^{L\Delta_s} = k_b * k_s$ Formel 2.10

Wobei

$$\begin{split} \hline \Delta_{b} = & \frac{2m}{b} \left(\frac{v}{2K}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{mb + \sinh 2md}{2md + \sinh 2md} & \text{Formel 2.11} \\ \hline \Delta_{s} = & \frac{2m}{b} \left(v/2k\right)^{\frac{1}{2}} \frac{mb + \cosh^{2}md}{2md + \sinh 2ms} & m = & 2\pi/L \quad K = & 2\pi/T & \text{Formel 2.12} \\ \text{ist.} \end{split}$$

Die aufgeführten Möglichkeiten zur Bestimmung des Dämpfungsfaktors beziehen sich auf Wassertiefen in größeren Versuchseinrichtungen. Für kleine Amplituden und geringe Wassertiefen <6 cm kann, laut den Untersuchungen von [Schröder 1982], der Dämpfungsfaktor anhand der vorhandenen Literatur nicht theoretisch mit erforderlicher Genauigkeit bestimmt werden. Es ist für die theoretische Ermittlung von Werten zudem unbefriedigend das die fünf Varianten in Abbildung 12 so stark voneinander abweichen. Eine Dämpfungsfunktion muss daher anhand von Dämpfungsuntersuchungen am Becken gewonnen werden.

## d) Signifikante Dämpfung

Um Rückschlüsse über die Signifikanz einer Dämpfung zu ziehen, wird die Abklinglänge der Welle betrachtet. Diese läßt sich aus dem Dämpfungsfaktor α bestimmen. Ist die Abklinglänge I gleich der Lauflänge, dividiert sich diese weg und die Amplitude ist

auf 
$$\frac{1}{e}$$
=0,64 abgefallen.

Wenn man die e-Funktion in Formel 2.3 nach Formel 2.13 umstellt, läßt sich die Abklinglänge (Formel 2.14) errechnen.



Abbildung 12: Vergleich der Dämpfungskonstanten aus [Schröder 1982].

Eine signifikante Amplitudendämpfung ist vorhanden, wenn die Abklinglänge kleiner gleich der Auslauflänge des Versuchsaufbaus ist.

Die Auslauflänge ist der Abstand vom Wellenerzeuger bis zur Böschung.

$$k = e^{\frac{L}{1}} \text{ wobei } l = \frac{1}{\alpha}$$
$$l = \frac{L}{\ln k}$$

Formel 2.13

Formel 2.14

## 2.4. Ähnlichkeitstheorien

Bei einem hydraulischen Modell handelt es sich streng genommen um ein physikalisches Modell. In diesem versucht man Ereignisse aus der Natur möglichst maßstabsgetreu nachzubilden. Im Idealfall werden alle dort auftretenden Kräften im gleichen Maße und Maßstab berücksichtigt. Ähnlichkeitstheorien schaffen die theoretische Grundlage um Verhältnisse zwischen Natur und Modell zu beschreiben. Diese Theorien sind unterteilt in geometrische, kinematische und dynamische. Ziel ist es einen Maßstab aus dem Verhältnis von Modell zur Natur zu bilden.

Die geometrische Ähnlichkeit betrachtet die Verhältnisse von Länge, Fläche und Volumen. Das ist von großer Bedeutung, da in hydraulischen Modellen der Maßstab der Wellenlänge gleich dem Maßstab der Modellänge ist<sup>5</sup>.

Zeitabhängige Vorgänge werden mit der kinematischen Ähnlichkeit erfasst. Die dynamische Ähnlichkeit berücksichtigt die Kräfteverhältnisse aus Masse-, Reibungs-, Kapillar- und Elastizitätskräften, welche mit dimensionslosen Kennzahlen beschrieben werden. Die bekanntesten sind die Froude-, Reynolds- und die Eulerzahl. Diesen liegt das Newtonsche Grundgesetz der Mechanik zugrunde (zweites Newtonsche Axiom). Weitere Kennzahlen, die in der Hydromechanik Anwendung finden, sind in der Abbildung 13 aus [Martin & Pohl 2000] aufgeführt. Aus den bekanntesten dimensionslosen Zahlen lassen sich Modellähnlichkeiten herleiten, wie die:

- Froude-Ähnlichkeit
- Reynolds-Ähnlichkeit
- Euler-Ähnlichkeit

Bei Benutzung der Froude-Ähnlichkeit überwiegen im Modell die Trägheits- und Schwerekräfte. Die Zähigkeit hat nur geringen Einfluss. Vor allem bei Systemen mit freier Oberfläche, wie dem Wellenbecken, findet diese Anwendung. Sollten Trägheits- und Zähigkeitskräfte überwiegen und besitzt das Systemen keine freie Oberfläche wird die

<sup>5</sup> Weiterführendes findet man dazu in der Fachliteratur unter [Dalrymple 1985].

Kennzahl	Formel, Kräfteverhältnis	Bedeutung	Glg.	
<u>Eulerzahl</u> ( <i>Newton</i> zahl)	$Eu = \frac{\upsilon}{\sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Druckkraft}}$	Ausflussbeiwert $Eu=\mu$ bzw. $C_n$	(1-14)	
<u>Reynoldszahl</u>	$Re = \frac{p \cdot v \cdot l}{\eta} = \frac{v \cdot l}{v} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeit}}$ $Re_{\text{Grenz}} = 2320 \text{ für Druckrohre und}$ $Re_{\text{Grenz}} = 580 \text{ für freien WS}$	Reibungseinflüsse	(1-15)	
Froudezahl	$Fr^{2} = \frac{v^{2}}{g \cdot l} = \frac{Trägheitskraft}{Schwerkraft}$	Fr <sub>Krit</sub> =1 Schießen/Strömen	(1-16)	
<u>Weberzahl</u>	$We = \frac{v}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho} \cdot l}} = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Oberflächenspannung}}$	Wellenprobleme	(1-17)	
<u>Strouhalzahl</u>	$Sh = \frac{l}{\upsilon \cdot t} = \frac{\text{lokale Beschleunigung}}{\text{konvektive Beschleunig.}}$	Schwingungen in Strömungen	(1-18)	
<u>Machzahl</u>	$Ma = \upsilon \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Elastizitätskraft}}$	Druckstoß	(1-19)	
Thomazahl	$Th = \frac{p_0 - p_d}{\rho \cdot \frac{v^2}{2}} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Staudruckkraft}}$	Kavitationszahl	(1-20)	
<u>v. Karmanzahl</u>	$Ka = \frac{v'}{v} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{turbul.Reibungskraft}}$	Turbulenz	(1-21)	
densimetrische Froudezahl	$Fr_{d} = \frac{\upsilon}{\sqrt{g \cdot L \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}}} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Auftriebskraft}}$	Dichteströmungen	(1-22)	
<u>Richardson-</u> zahl	$Ri = \frac{1}{Fr_d^2}$	Stabilität ge- schichteter Strö- mung	(1-23)	
<u>Graßhoffzahl</u>	$Gr = \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}$	Dichteunter- schiede Dichteströmungen	(1-24)	
<u>Fourierzahl</u>	$Fo = \frac{l^2}{a_T \cdot t}$	a <sub>r</sub> -Temperatur- leitfähigkeit	(1-25)	
<u>Pecletzahl</u>	$Pe = \frac{v \cdot l}{a_r} = \frac{\text{Wärmekonvektion}}{\text{Wärmeleitung}}$	Wärmetransport	(1-26)	

Abbildung 13: Ausgewählte dimensionslose Zahlen aus [Martin & Pohl 2000] die in der Hydromechanik Anwendung finden.

Reynolds-Ähnlichkeit angewandt. Systeme mit schnellen Strömungen, in denen der Einfluss von Schwere- und Zähigkeitskraft gering ist aber der von Trägheits- und Druckkräften groß, verwenden die Euler-Ähnlichkeit.

Im Idealfall möchte man möglichst alle Kraftarten, wie in Formel 15 dargestellt, mithilfe der Navier-Stokes-Gleichung im gleichen Maßstab ins Modell übertragen. Das würde bedeuten, die Reynolds-, Froude- und Euler-Ähnlichkeit wären zusammen erfüllt. Dies ist nur in der Natur möglich. In der Abbildung 14 aus [Strybny 2002] ist zu erkennen , dass die Euler-Ähnlichkeit immer erfüllt wird. Dahingegen können Froude- und Reynolds-Ähnlichkeit beim Einsatz von Wasser als Medium nicht gleichzeitig erfüllt werden, da der Einfluss der Zähigkeit bei beiden Ähnlichkeitstheorien eine unterschiedliche Wichtung hat.



Abbildung 14: Abgrenzung der Froude-, Reynolds- und Eulerähnlichkeit. [Strybny 2002]

Das Wellenbecken soll den Einsatz von kleinskaligen Flächenmodellen ermöglichen, daher überwiegen Trägheits- und Schwerekräfte, obwohl der Wellenfortschritt auch reibungsbehaftet ist und durch Kapilarkräfte beeinflusst wird. Beim geplanten Einsatz eines Diffraktionsmodells überwiegen die aus turbulenter Strömung resultierten Reibungsverluste. Daher kommt die Froude- und nicht die Reynolds-Ähnlichkeit zum Einsatz.

Trägheitskraft <sub>M</sub>	Druckkraft <sub>M</sub>	Schwerekraft <sub>M</sub>	Zähigkeitskraft <sub>M</sub>	Formal 15
Trägheitskraft <sub>N</sub>	Druckkraft <sub>N</sub>	Schwerekraft <sub>N</sub>	Zähigkeitskraft <sub>N</sub>	Former 15

Die Froude-Formel (Formel 16) definiert den Übergang vom schießenden zum strömenden Medium mit 1. Dabei wird die Froude-Zahl aus dem Verhältnis von Trägheitskraft zu Schwerekraft bestimmt.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * h}}$$
, wobei  $Fr_{krit} = 1$  Formel 16

In der Praxis wird bei der Untersuchung von Flussmodellen wegen des Einflusses der Oberflächenspannung oder Reibungskraft mit einem verzerrten Froudemodell gearbeitet. In diesem, auch überhöhtes Froudemodell genannt, Modell werden die Längen- und Breitenverhältnisse anders übertragen als die Höhe. Es ist daher bei der Umrechnung der Maße und Kräfte der sogenannte Überhöhungsfaktor zu berücksichtigen.

Dieses Modell auf Diffraktions- und Refraktionsuntersuchungen anzuwenden, ist allerdings nicht möglich. Die Form der Orbitalbahn der Wasserteilchen ist abhängig von der Wassertiefe und wären somit in einem überhöhten Modell nicht gleich dem Naturmaßstab. Abschließend lässt sich sagen, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse durch die Modellgesetze im Rahmen der Turbulenz-, Fließwechsel-, Rauheits-, und Kapillargrenze begrenzt wird.

#### 2.5. Bekannte Grenzen

In verschiedenen Veröffentlichungen der Fachliteratur werden folgende niedrigste Wassertiefen als noch praktikabel genannt:

- d≥ 5 cm nach [Kirschmer 1952]
- d≥ 3 cm nach [Kobus 1978]
- d≥ 2 cm nach [Le Mehauté 1976]

In [Schröder 1982] wird gezeigt, dass die reine Erzeugung und Messung von Wellen auch unter einem Wasserstand von 2 cm möglich ist. Allerdings begrenzte damals die Messtechnik genaue Schlussfolgerungen. Somit ist ein Wasserstand von d≥ 20 mm als bisherige unterste Grenze anzusehen.

Die Grenzen des Kapillareinflusses bzw. der Oberflächenspannung werden laut [Martin & Pohl 2000] mit:

- Wassertiefe d≥ 20 mm, geringer Einfluss
- mindest Fließgeschwindigkeit minc≥ 230 mm/s und

nach [Dalrymple 1985] mit

• Wellenlänge L> 20 mm, Einfluss vernachlässigbar

nach [Le Mehauté 1990] mit

• Periode T> 0,5 s, kein Einfluss

und nach [Hughes 1993] mit

- Wassertiefe h< 20 mm, Einfluss zu berücksichtigen
- Periode T< 0,35 s, vorhandener Einfluss

angegeben. Sollten diese Bedingungen eingehalten werden braucht das Webersche-

Ähnlichkeitsgesetz<sup>6</sup> nicht berücksichtigt werden. Dies ist anzustreben da auch für die Froude- und Weber-Ähnlichkeit gilt, dass diese bei der Verwendung von Wasser als Medium nicht zusammen erfüllbar sind.

<sup>6</sup> Siehe auch in Abbildung 13.
# 2.6. Der Wellenerzeuger

Die Möglichkeiten zur Erzeugung von Wellen im Labor sind sehr vielseitig. Vernachlässigt man Wellenerzeuger für Tiefwasserwellen und unregelmäßige Wellen, so unterscheidet R. A. Dalrymple [Dalrymple 1985] immer noch verschiedene Methoden. Diese werden im Hinblick auf die Beschreibbarkeit der Wellenerzeugung durch die linearen Wellentheorien weiter differenziert. Die bekanntesten Wellenerzeuger sind:

- Flexible flap
- Rigid flap (einfach und zweifach)
- Piston
- Plunger und
- Serpent

Die Auswahl des Wellenerzeugers für das kleine Wellenbecken unterlag folgenden Anforderungen:

- einfache Konstruktion sowie leichte Wartung
- robuste Mechanik und gute Einstellmöglichkeiten und
- genaues Arbeiten auch bei niedrigen Wasserständen

Aufgrund dieser Anforderungen wurde für das Wellenbecken ein Piston-Type Wellenerzeuger ausgewählt. Die Vorteile des Piston-Type Wellenerzeugers sind:

- Die Erzeugungsmechanik liegt außerhalb des Wassers.
- Die Paddelbewegung ist in den vorgegebenen mechanischen Grenzen frei steuerbar.
- Die Berechenbarkeit der Wellenamplitude ist ist nach der linearer Wellentheorie möglich.
- Piston-Type Wellenerzeuger sind im Flachwasser effizienter als andere Erzeuger.

Die Wellenerzeugung findet durch ein Metallschild, welches sich durch das Wasser

schiebt, statt. Um störende Nebeneffekte zu minimieren muss eine Umströmung des Schildes (Paddel) vermieden werden. Dies geschieht konstruktiv durch geringe Spaltmaße oder angebaute Dichtungen.

Die theoretische Berechnung der Wellenamplitude in Abhängigkeit des Paddelausschlags speziell für das kleine Wellenbecken, wurde in [Groth 2004] ausführlich behandelt. Als Referenz für die lineare Übertragungsfunktion wird dabei auf Veröffentlichung von Steven A. Hughes [Hughes 1993] verwiesen. Zusammengefasst kann entweder nach Umstellung der Formel 2.17 der Paddelausschlag (Stroke) mit der Formel 2.18 oder die gewünschte Wellenamplitude mit der Formel 2.19 berechnet werden. In Abbildung 15 ist anhand der Funktionskurve zu erkennen, dass die Wellenamplitude  $A_0$ <sup>7</sup> maximal die doppelte Höhe der Paddelauslenkung (Stroke) S<sub>0</sub> erreichen kann.





Abbildung 15: Zusammenhang von Wellenamplitude  $A_0$  zu Stroke  $S_0$ und Wassertiefe d zu Wellenlänge L auf Basis der Linearen Wellentheorie. Diagramm erstellt vom Autor nach Formel 2.17.

<sup>7</sup> Der Index 0 steht für den Ort der Erzeugung, nämlich am Wellenpaddel.

# 2.7. Ultraschallsensoren

In der Hydromechanik wird Ultraschall zur Durchfluss- und Wasserstands-Messung langjährig angewandt. Es wird sich zunutze gemacht, dass der Ultraschall sich in einem Medium als Longitudinalwelle ausbreitet. Die Fortschrittsgeschwindigkeit des Ultraschalls ist dabei von der Temperatur (Dichte), Druck und Reinheit des Mediums abhängig. Im Salzwasser beeinflusst zum Beispiel der Salzgehalt die Geschwindigkeit. Als Ultraschall wird der Frequenzbereich über 20 kHz bezeichnet. Üblicherweise arbeiten Sensoren für die Wasserstandsmessung mit einer Frequenz von 40 kHz.

Bereits im Jahr 1929 beschrieb Sokolov [Tietz 1974] solch ein Verfahren. In seinen Überlegungen wurde gemessen wie das Signal vom Sender zum Empfänger abnahm. Auch in der zerstörungsfreien Materialprüfung sind Ultraschallverfahren heutzutage Standard.

Wenn die Ultraschallwellen auf Grenzschichten oder undurchdringliche Objekte treffen, werden sie reflektiert oder gebrochen. Der Grad der Reflektion, teilweise oder ganz, hängt von der Dichte des reflektierenden Mediums ab. Die Reflektion und die bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals nutzt man bei der Entfernungsmessung aus. Mit einem Sensor wird die Laufzeit des Signals bis zu einem Objekt und zurück gemessen. Über die vorher vom Medium bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich so der Abstand bestimmen. Voraussetzung hierfür ist eine teilweise Reflektion am Objekt oder der Schichtgrenze. Eine Besonderheit sind akustische Energie absorbierende Materialien. Auf diesen ist keine Messung möglich.

Bei der Messung von Wasserständen per Ultraschall werden die Sensoren üblicherweise über der Wasseroberfläche angebracht. Theoretisch ist auch ein Einbau im Wasser möglich. Allerdings ist der Konstruktions- und Wartungsaufwand sehr hoch. Auch am Wellenbecken wurden die Sensoren über dem Wasser montiert. Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- der Schutz vor Schmutz und direkter Wassereinwirkung,
- kein Einfluss auf die Wellenausbreitung da es sich um kontaktloses Messen

handelt,

 Bekanntheit der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft und gute Messbarkeit der Umgebungstemperatur f
ür die automatische Temperaturkompensation der Signallaufzeit

Nachteile bei der Verwendung von Ultraschall ergeben sich durch die Eigenschaften und das Verhalten des Ultraschallsignals. Denn:

- dieses unterliegt Beugung und Reflektion wodurch das Signal auch verloren gehen kann,
- die Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche von der Temperatur, Dichte und Reinheit abhängig ist, muss bekannt sein,
- die mögliche Überlagerung von Signalen muss vermieden werden wodurch Wartezeiten des Sensors entstehen,
- das Signal breitet sich als Messkegel aus, dessen Durchmesser abhängig von der Entfernung zum Sensor ist.

Die verwendeten Sensoren sind komplexe technische Konstruktionen und bestehen aus:

- Erreger- / Messeinrichtung,
- Microcomputer,
- Temperatursensoren
- Analog-Digital-Wandler.

Diese Kombination von Komponenten vereinfacht die Messung und Auswertung der Signale extrem. So ist es möglich eine automatische Temperaturkompensation der Signallaufzeit durch den Microcomputer vorzunehmen. Die Entfernung zur Wasseroberfläche wird als absolutes Spannungssignal von null bis zehn Volt ausgegeben. Der konfigurierbare Microcomputer ermöglicht eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten wie:

- die Mess Ober- und Untergrenzen festzulegen,
- die Abtastrate zu ändern,
- die Signalauswertung anzupassen.

Dadurch kann die Qualität, Reichweite und Geschwindigkeit der Messungen den Erfordernissen angepasste werden.

## 3. Durchgeführter Versuch

# 3.1. Kalibrierung der vorhandenen Messtechnik

## a) Die eingesetzte Messtechnik

Um bei den Versuchen Zufallsergebnisse auszuschließen und auswertbare Ergebnisse zu erzielen, sind Kenntnisse über Konstruktion und Konfiguration der Messtechnik unerlässlich. Die Messtechnik besteht aus drei Hauptkomponenten:

- dem Rechner,
- der internen Messkarte und
- den Sensoren<sup>8</sup>.

Mit dem Rechner werden die gewonnenen Daten protokolliert und ausgewertet, sowie die Messkarte und die Sensoren konfiguriert. Das Spannungssignal der Sensoren wird von der Messkarte erfasst, die im Rechner eingebaut ist. Die Ultraschallsensoren messen die Abstände zur Wasseroberfläche bzw. zum Paddel und geben diese als analoges Spannungssignal aus.

Jede Komponente hat ihrerseits unterschiedlichen Einfluss auf Fehlmessungen. Der Rechner beeinflusst die Erfassung der Messergebnisse minimal. Seine Aufgabe besteht in der Protokollierung, Verwaltung, Auswertung und Speicherung der gewonnenen Daten.

Die Messkarte misst das vom Sensor ausgegebene analoge Spannungssignal. Sie erfasst diesen Wert ohne Wertung. Fehler werden so ebenfalls direkt in Messdaten umgewandelt. Sollte die Messkarte selber fehlerbehaftet sein ist somit jeder Messwert fehlerhaft. Um dem vorzubeugen, verfügt die Karte hardwaremäßig über geschirmte Komponenten und softwareseitig über Test- und Kalibrierungsfunktionen. Zur präzisen und gleichförmigen Abfrage der Sensoren ist zudem eine Echtzeituhr installiert.

Die Verbindungskabel zwischen der Messkarte und den Sensoren sind in ihrer Länge

<sup>8</sup> Typ UC500-30GM-IUR2-V15 von der Firma Pepperl+Fuchs GmbH.

begrenzt und geschirmt. Störende elektromagnetische Einflüsse würden zu einem Verrauschen oder Oszillationen des Signals führen.

Während der ersten Versuche zur Kalibrierung der Messtechnik wurde, statt mit einem handelsüblichen Netzteil, mit einem Labornetzteil gearbeitet. Es stellte sich jedoch heraus, dass ein handelsübliches Netzteil ebenfalls ausreichend geschirmt ist.

Die Ultraschallsensoren als eigenständige Minicomputer mit Sensor, Empfänger und Microcomputer liefern ein analoges Spannungssignal. Welche Genauigkeit dieses Signal wiederspiegelt ist abhängig von

- der Blindzone,
- dem Messkegel,
- der Abtastfrequenz,
- der Empfindlichkeit und
- dem Messbereich.

Die Blindzone ist ein Bereich unterhalb des Sensors, indem aus technischen Gründen keine Erfassung möglich ist. Zu messende Objekte müssen sich daher außerhalb dieser Zone befinden.

Der Messkegel entsteht, vom Sender ausgehend, durch die trichterförmige Ausbreitung des Ultraschallsignals. Die überstrichene Fläche wird größer je weiter die Entfernung vom Sensor anwächst. Vom Hersteller wird daher ein Diagramm mit der charakteristischen Ansprechkurve mitgeliefert (Siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Charakteristische Ansprechkurve aus dem Datenblatt der verwendeten Ultraschallsensoren.

Die interne Abtastfrequenz der Sensoren liegt herstellerbedingt bei 95 Hz. Eine Ausnahme stellt der Multiplexbetrieb dar. Dieser wird verwendet, wenn sich zwei Ultraschallsensoren gegenseitig beeinflussen. Für den Multiplexbetrieb werden die Sensoren mittels Signalkabel miteinander verbunden. Infolgedessen verringert sich jedoch die Frequenz nach Formel 3.1.

$$f_{sync} \leq \frac{95}{n}$$
 wobei n=Anzahl der Sensoren

Formel 3.1

Die externe Abtastfrequenz der Messkarte sollte nicht sehr viel größer gewählt werden als die der Sensoren. Da die Sensoren mit einer festen internen Frequenz messen, werden bei zu hoher Zeitauflösung gleichbleibende Werte ausgegeben. Daraus ergibt sich die in Abbildung 17 zu erkennende Stufenbildung.



Abbildung 17: Messung eines Versuches f= 2 Hz, App= 7,0 mm, d= 6 cm mit zu hoher Abtastfrequenz der Messkarte.

Die Empfindlichkeit der Sensoren kann die Genauigkeit der Ergebnisse verbessern, aber ebenfalls die Wahrscheinlichkeit von Fehlmessungen erhöhen. Die Einstellungen für bestmögliche Ergebnisse sind schwer abzuwägen und wurden daher erst nach mehreren Versuchen gefunden.

Der Messbereich wird mit Ober- und Untergrenze (nahe- und ferne Grenze) definiert. Je stärker dieser Bereich eingegrenzt wird, desto höher ist die Auflösung. Grund dafür ist, dass die Sensoren jeden Messbereich in einer Spannung von 0 bis 10 Volt auflösen. Ein Messbereich von 200 mm wäre somit in einem Spannungsraster von 0,05 Volt pro 1 mm aufgelöst. Demgegenüber ist ein Bereich von 20 mm bereits um den Faktor 10 genauer. Da die Auflösung des Digital-Analog-Wandlers des Sensors und des Analog-Digital-Wandlers der Messkarte beschränkt ist, lassen sich so genauere Messungen erzielen.

# b) Gewählte Einstellungen

In Abbildung 18 und Abbildung 19 sind die Einstellungen für Ober- und Untergrenze (nahe- und ferne Grenze) dargestellt. Das Ende der Blindzone von 30 mm definiert die nahe Messgrenze. Die ferne Messgrenze liegt 20 mm darunter. Dadurch ergibt sich eine maximal messbare Wellenamplitude von A≤10 mm. Der Maximalwert von 10 mm wurde bei den Versuchen nie erreicht.

Die Konfigurationsdatei mit den gespeicherten Einstellungen für das Programm Ultra2001 des Herstellers befindet sich auf dem beiliegenden Datenträger.

Alle Sensoren wurden gleich eingestellt.



Abbildung 18: Skizze der gewählten Sensoreneinstellung und Anordnung. Alle Werte in mm.

Eleven a	1 2		. 비미지 r 비 Sessor
Alternational Sector	UCSOL-ROSA-FUELALARIA (OLDONOMIC           Maccomp Scholigescheindigkeit bes U°C           Tempenatur Offent           1.8           "C           Takkent           Offset Zykkeznit           Auswertung           Filter Tiescolt           Reductiete Reichweite           Biedbereich           30           Empindichkeit	It and inside in period with Experie Notice and provide the second state of the second	O mA 4.00 V 0.00
	Sterverhalten  2 ¥ Kein Echu Fehler ¥ Auswentensthele Keine ¥	Seture Individuality Zustand nuch Reset standard	Löorðam X X

Abbildung 19: Sensoreinstellungen mit dem Programm Ultra2001 des Herstellers.

# c) Standardabweichung

Die Standardabweichung (auch RMS oder Sigma-Streuung genannt) ermöglicht es abzuschätzen, inwieweit die ermittelten Messdaten abweichen. Da die Sensoren eine Quantisierungsauflösung<sup>9</sup> von  $\geq$  0,05 mm haben, kann die Ermittlung der Streuung nicht über die Messung auf eine unbewegliche Metallplatte erfolgen. Dies würde den Streuungswert unrealistisch verringern. Es wurde daher auf einem sich sinusförmig bewegenden Paddel gemessen.

<sup>9</sup> Technisch bedingt durch den Digital-Analog-Wandler.



Abbildung 20: Diagramm mit gemessener und gefitteter Kurve sowie der Differenz. Aufgenommen für eine Paddelbewegung mit 3 Hz und einer eingesteuerten Auslenkung von  $A_{pp}$ = 3,9 mm.

Die so erfassten Messwerte wurden auf eine Abweichung hin untersucht. Dazu wurde in die Messreihe ein idealer Sinus gefittet. Dargestellt ist dies in Abbildung 20. Aus den Differenzwerten der gemessenen und der angestrebten Sinusfunktion kann nun mit Formel 3.2 die Standardabweichung bestimmt werden. Untersucht wurden sieben Sinusförmige Paddelbewegungen, die in Frequenz, Auslenkung und Wassertiefe variieren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der Mittelwert beträgt  $\sigma_x \le \pm 0,102$  mm.

Dieser Wert berücksichtigt bereits die Quantisierungsauflösung. Er gilt als Standardabweichung für einen Messwert. Werden allerdings mehrere Messwerte ausgewertet, erhöht sich die Auflösung nach Formel 3.3 und die Streuung wird geringer. Für eine Fast-Fourier-Transformation, unter der Berücksichtigung von 256 Werten, würde das eine Streuung von  $\sigma_{x[256]} \le \pm 0,006$  mm bedeuten.

#### Durchgeführter Versuch

Frequenz und		Wasserstand d	
Amplitude f, A <sub>ρp</sub> <sup>10</sup>	50 mm	25 mm	15 mm
4 Hz, 2,2 mm	0,09551	0,08555	
3 Hz, 3,9 mm	0,10453	0,1029	0,0972
2 Hz, 7,0 mm	0,11266	0,11646	

Tabelle 1: Durchgeführte Versuche zur Bestimmung der Standardabweichung mit den ermittelten Werten in mm.



Formel 3.2

Formel 3.3

<sup>10</sup>  $A_{pp}$  steht für Auslenkung bzw. Amplitude von Peak to Peak (Umkehrpunkt zu Umkehrpunkt).

# 3.2. Kalibrierung der vorhandenen Steuerungstechnik

## a) Die Wellenerzeuger und die Steuerungstechnik

Die Wellenerzeugung erfolgt über einen Piston-Type Wellenerzeuger. Bei diesem wird ein Metallschild durch das Wasser bewegt. Dieses Metallschild hängt (starr) an einem über Kopf montierten Linearantrieb. Der Linearantrieb besteht aus einer Schiene mit daran gleitenden Schlitten. Die Bewegung des Wellenschlittens erfolgt durch einen über die gesamte Länge montierten Zahnriemen. An diesen ist ein Schrittmotor über ein Getriebe angekoppelt. Ein CNC-Controller mit Steuerkarte sorgt für die Spannungsversorgung und Steuerung des Motors. Von einem Rechner aus werden die Steuersignale über ein, an den Parallelport angeschlossenes, Kabel direkt an die Steuerkarte gesendet. Diese setzt das Steuersignal für den Schrittmotor um.

# b) Theoretische Genauigkeit und technische Grenzen

Die einzelnen Komponenten beeinflussen mit ihren technischen Eigenschaften wie z.B. der Fertigungstoleranz die Genauigkeit der Ansteuerung.

Laut Herstellerangaben hat die verwendete Linearfahreinheit eine Wiederholgenauigkeit von  $\leq \pm 0.2$  mm. Der Vorschub des Schrittmotors pro Umdrehung ist 35 mm. Die Wiederholgenauigkeit scheint somit nicht stark ins Gewicht zu fallen. Möchte man aber eine Bewegung von 2,2 mm erzeugen, ist diese Streuung bedeutsam.

Die Schrittweite des Motors von 0,04625 mm pro Impuls führt zu einer weiteren Ungenauigkeit. Diese Ungenauigkeit ergibt sich daraus, dass die Wegerzeugung nur im Raster möglich ist. Das genannte Raster berechnet sich aus dem Vorschub geteilt durch 800 Schritte pro Motorumdrehung. Daher kann die Amplitude von 2,2 mm nicht genau angesteuert werden. Für die Erzeugung einer Sinusamplitude hat dies aber kaum Einfluss, da die Amplitude in allen Punkten steckt. Bedeutsamer ist dagegen das Umkehrspiel. Durch den erzwungenen Richtungswechsel bei der Wellenerzeugung wirken, vor allem bei kleinen Auslenkungen mit hohen Frequenzen, große Beschleunigungskräfte. Soll nun eine Richtungsänderung durchgeführt werden, verschluckt die Mechanik einige hundertstel Millimeter. Dies führt zur Erzeugung eines Umkehrspiels.

Die Grenze des maximalen Vorschubs spielt bei der Versuchsdurchführung ebenfalls eine Rolle. Laut dem technischen Datenblatt beträgt der maximale Vorschub  $v_{max}$ = 50 m/s. Das würde bedeuten, bei einer Frequenz von 4 Hz könnte ein A<sub>pp</sub> von 1250 mm eingesteuert werden. In den praktischen Versuchen zeigte sich, dass die Grenze, bedingt durch die erzwungene Richtungsänderung, niedriger liegt. Schon bei einer Geschwindigkeit von etwa  $v_{max} \ge 70$  mm/s wird das maximale Drehmomment des Motors überschritten. Da die Beschleunigung an den Nullstellen maximal ist, führen die wirkenden Kräfte zum "durchrutschen" des Motors. Daraus resultieren bei der Wellenerzeugung die in Abbildung 21 dargestellten Fehler.



Abbildung 21: Fehlerhafte nicht Sinusförmige Bewegung des Paddels durch zu hohe Beschleunigung beim Richtungwechsel.

#### c) Das Steuerprogramm

Eine große technische Herausforderung stellten das Steuerprogramm und der Steuerrechner dar. Da die Steuerkarte (eingebaut im CNC-Controller) nicht programmierbar ist, werden die empfangenen Signale vom Rechner direkt an den Schrittmotor weitergegeben. Dabei wird zur Fehlervermeidung eine konstante Zeit und Taktrate benötigt. Denn der Schrittmotor darf nicht aus dem Takt kommen, er könnte sonst eine Position überspringen oder rutschen. Die kommandierte Position würde nicht mehr der Position des Motors entsprechen. Eine speziell dafür ausgelegte echzeitfähige Hardware stand jedoch nicht zur Verfügung. Somit musste dies mit Hilfe der Software bewerkstelligt werden.

Es besteht die Möglichkeit ein Echtzeitbetriebssystem zu verwenden. Daraus ergibt sich jedoch die Forderung nach einem eigenen Rechner, welcher nur für die Ansteuerungen zuständig ist. Ein anderer Weg wäre es, eine Software unter Microsoft Windows zu verwenden, welche die fehlende Echtzeitfähigkeit des Betriebssystems kompensiert. Dieser Weg wurde bei den Versuchen eingeschlagen um Steuerung, Messung und Auswertung auf einem Rechner zu vereinen.

Für die durchgeführten Versuche wurde ein Steuerprogramm<sup>11</sup> unter Borland Delphi entwickelt. Dieses erfasst, dass "Aus-dem-Takt-Laufen" von Microsoft Windows XP und kompensiert dies. Realisiert wird das, durch die kombinierte Verwendung des Multimediaund des Performance-Timers des Betriebssystems.

<sup>11</sup> Das Programm mit Quellcode und Erläuterungen befindet sich auf dem beigelegten Datenträger.

# 3.3. Erfassungssystematik und Auswertungssystematik anhand einer beispielhaften Auswertung

# a) Erfassungssystematik

#### Wasserstände

Untersucht wurden die Wasserstände 100, 75, 50, 38, 25, 20 und 15 mm. Ziel ist es sich an die bekannte Grenze von 20 mm heranzuarbeiten. Die Abstufung der Wasserstände soll zu möglichst gleichmäßig gestuften Messreihen führen.

#### • Frequenzen und Auslenkungen

Bei den jeweiligen Wasserständen wurden Versuche mit den Frequenzen 4 Hz, 3 Hz, 3,5 Hz und 2 Hz festgelegt und durchgeführt. In diesen Bereichen wird eine Auslenkung  $A_{pp}$  von 2,2 mm bis 7,0 mm eingesteuert. Die Abstufung in diesen Bereichen ist steuerungsbedingt 3,1 mm, 3,9 mm, 5,3 mm und 6,1 mm. Somit werden mindestens 16 Versuche pro Wasserstand gefahren.

#### • Abfragefrequenzen für die FFT-Analyse

Besonderer Bedeutung ist der Abtastfrequenz der Messkarte an die Ultraschallsensoren. Da für die gewählte Fast-Fourier-Analyse 256 Abtastwerte mit einer ganzen Zahl Schwingungen vorhanden sein müssen, sind die Frequenzen anzupassen. Das bedeutet für

- 4 und 2 Hz eine Abtastfrequenz von 64 oder 32 Hz,
- 3,5 Hz eine Abtastfrequenz von 56 Hz,
- 3 Hz eine Abtastfrequenz von 48 Hz.

# b) Auswertesystematik anhand einer beispielhaften Auswertung

Die Vorgehensweise bei der Messdatenauswertung wird im Folgenden anhand eines Beispiels erklärt. Grundlage ist die Messung mit dem Wasserstand d= 25 mm, der Frequenz f= 3Hz, und eine eingesteuerte Paddelauslenkung von  $A_{pp}$ = 3,9 mm.

#### • Umrechnung der erfassten Messwerte

Die erfassten Messwerte liegen als Spannungwerte mit einem zeitlichen Bezug vor. Die Sensoren Nr. 1 bis 3 erfassen die Wasserspiegelauslenkung und der Sensor Nr. 4 die Paddelauslenkung. Die erfassten Messwerte sind in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 22: Messwerte in Volt des Versuchs d=25 mm, f= 3Hz, App= 3,9.

Die Umrechnung von Volt in Millimeter erfolgt mit Formel 3.4. Setzt man in diese die in Abbildung 18 auf Seite 42 dargestellten Werte ein, ergibt sich Formel 3.5. Mit den so ermittelten Werten in Millimetern kann daraus die Abbildung 23 erstellt werden.





Abbildung 23: Messwerte in Millimeter des Versuchs d=25 mm, f= 3Hz, App= 3,9

In Abbildung 23 ist deutlich zu erkennen, dass trotz großer Sorgfalt der Abstand der Sensoren zur Wasseroberfläche unterschiedlich ist, dies hat aber kein Auswirkung auf die bestimmten Amplituden.

#### • Ermittlung der Amplituden mittels FFT-Analyse

Da die Frequenz beziehungsweise die Periode bekannt ist, kann die Abtastrate der Sensoren so gewählt werden, dass die Daten für eine Fast Fourier Transformation verwendbar sind. Für die auch als FFT bezeichnete Analyse werden 2<sup>n</sup> Messwerte benötigt. Gewählt wurden 256 Werte. Für eine fehlerfreie Analyse sollte der y-Wert des Startpunktes dem 256zigstem y-Wert entsprechen.

Der zu analysierende Bereich wurde manuell festgelegt. Für die Sensoren Nr. 1 und 2 ist dies beispielhaft in Abbildung 24 dargestellt. Im Fall von Sensor 3 waren gehäuft störende

Einflüsse durch Reflektion und Überlagerung zu erkennen. Hier den auswertbaren Bereich festzulegen war schwierig. Teilweise war sogar keine Auswertung möglich.



Abbildung 24: Festgelegter Bereich von t= 3,104 bis 8,417 s, bestehend aus 256 Messwerten für die anschließende FFT-Analyse.

Die automatisierte Analyse wurde mittels des in Microsoft Excel integrierten FFT-Analysetools durchgeführt. Die ausgegebenen Werte (vgl. Abbildung 26) wurden auf Plausibilität und korrekte Frequenz hin überprüft. Die Amplituden werden jeweils beim Peak der eingesteuerten Frequenz ausgegeben.

Nach Abschluss der Analysen ergaben sich die sich die in Tabelle 2 dargestellten Werte.

		0		
Sensor Amp [n	Amplitude	Auswertungszeitraum [s]		<b>2</b> <sup>n</sup>
	[mm]	T <sub>beginn</sub>	t <sub>End</sub>	
Nr. 1	1,220	3,104	8,417	256
Nr. 2	1,205	3,104	8,417	256
Nr. 3	0,846	6,208	11,521	256
Nr. 4	1,572	3,104	8,417	256

Durchgeführter Versuch

Tabelle 2: Ergebnisse der FFT-Analysen des Versuches d=25 mm,f= 3 Hz, App= 3,9 mm.



Abbildung 25: FFT-Analyse für 256 Werte unter Sensor Nr. 1.

#### • Wellenlänge

Zur Bestimmung der Wellenlänge wurden die Sensoren Nr. 1 und 2 in einem Abstand von 40 mm montiert. Mittels einer Phasenverschiebung sollte die Zeit bestimmt werden, die ein Wellenberg zwischen den Sensoren benötigt. Verschiebt man die Messwerte beider Sensoren gegeneinander, ist die Bestimmung der Zeitdifferenz möglich. Die Genauigkeit unterliegt allerdings dem Zeittakt der Sensoren. Es stelle sich heraus, dass dies zu ungenau ist. Daher wurden die Laufzeit von Sensor 1 zu 2 mittels Kreuzkorrelation bestimmt.

Dazu wurden die Messwerte von Sensor Nr. 1 und 2 als Spannungswerte einer Fast-Fourier-Analyse unterzogen. Die so ermittelten Ergebnisse als komplexe Zahl werden bei Sensor Nr. 1 unverändert genommen und bei Sensor Nr. 2 in die jeweils konjugiert komplexe Zahlen umgewandelt. Dadurch lässt sich aus dem Produkt der beiden Wertereihen das sogenannte Kreuzleistungsspektrum berechnen. Dessen Rücktransformation ist die Kreuzkorrelation. An der Stelle des globalem Maximum lässt sich die Zeitverschiebung ablesen. Mit dieser Zeitdifferenz und dem Abstand der Sensoren lässt sich durch Formel 3.6 die Wellenlänge berechnen.

Bei dieser Vorgehensweise ist es nebensächlich ob die Wasseroberfläche sich noch im Status des Wellenaufbaus oder der stabilen Welle befindet. Die Bestimmung der Zeitdifferenz per Kreuzkorrelation erfolgte mit dem Programm "Kreuzkorrelation"<sup>12</sup>.

Die Wellenlänge nach linearer Theorie beträgt L= 140 mm und die durch Kreuzkorrelation aus 512 Messwerten bestimmte beträgt L= 149.142 mm.

Die bestimmte Wellenlänge entspricht annähernd der theoretisch Wellenlänge. Sollten diese Werte stark voneinander abweichen ist dies gleichsam ein Indiz für eine falsch eingesteuerte Frequenz.

<sup>12</sup> Das Programm Kreuzkorrelation wurde von Herrn Dr. rer. nat. Alexander Dräbenstedt zur Verfügung gestellt.



Abbildung 26: Bildschirmfoto des Programmes "Kreuzkorrelation" bei der Auswertung der Messung d= 25 mm, f= 3 Hz, App= 3,9 mm.

$$L = \frac{x_{12}}{t_{Phase}} * t_{Periode} \text{ wobei } x_{12} = Abstand \text{ der Sensoren 1 \& 2}$$

Formel 3.6

#### • Dämpfung

Die Wellendämpfung wird mit Formel 2.5 auf Seite 22 aus den Amplituden von Sensor Nr. 1 und Nr. 3 bestimmt. Durch die bekannte Entfernung der Sensoren zueinander ergibt sich mit Formel 3.7

n= 5,967

und eine Dämpfungskonstante von

k= 1,062.

 $n=x_{i}L$  wobei  $x=x_{13}$ =Abstand der Sensoren 1 & 3

Formel 3.7

## Verhältnis A₀/S₀ für die Übertragungsfunktion

Zur Bestimmung der Übertragungsfunktion wird das Verhältnis von Wellenamplitude A<sub>0</sub> zur Paddelauslenkung S<sub>0</sub> benötigt. Da sich die erste Amplitude unter dem Sensor Nr. 1 aber erst hinter dem Erzeugungspunkt bestimmen lässt, muss die korrekte Wellenhöhe am Paddel über die Dämpfungskonstante extrapoliert werden. Dabei geht die bestimmte Amplitude A<sub>S1</sub> (Sensor 1) in die Formel 3.8 ein. Der Teiler n wird wiederum über Formel 3.7 bestimmt. Der Abstand ist jetzt

x<sub>01</sub>= 520 mm.

•

Demnach ist

n= 3,487 und

A<sub>0</sub>= 1,495 mm.

Daraus ergibt sich mit der gemessenen Paddelamplitude das Verhältnis

 $A_0/S_0 = 0,951.$ 

 $A_0 {=} A_{S1} {\ast} k^n$ 

Formel 3.8

# 4. Ergebnisse

Die Messergebnisse aus den Versuchen wurden in Hinblick auf Dämpfung, Übertragungsfunktion, Paddelspiel, Wiederholgenauigkeit und Messgrenze ausgewertet. Auswertbar waren 130 von ca. 200 durchgeführten Versuchen.

# 4.1. Wellendämpfung

Ziel der Untersuchung zur Wellendämpfung ist es, die Abhängigkeit der Dämpfungskonstante von Frequenz und Wasserstand zu ermitteln.



Abbildung 27: Dämpfungskonstanten k in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Wasserstand.

In Abbildung 27 sind die durchschnittlichen Dämpfungskonstanten k in Abhängigkeit von der Wassertiefe und der Frequenz dargestellt. Die Konstante wurde jeweils aus einer Versuchsreihe, bestehend aus bis zu 8 Einzelversuchen mit unterschiedlichen Paddelausschlag, gebildet.

Abbildung 27 verdeutlicht, dass die Dämpfungskonstante mit steigender Herzzahl und abnehmendem Wasserstand zunimmt. Die größte Streuung der Messwerte zeigt sich bei 2 Hz. Dies ist erstaunlich, da es sich um flache lange Wellen handelt. Es wird vermutet das

der Einfluß der Reflektion sehr bedeutend ist. Ein Indiz dafür ist, dass die Dämpfungskonstante k kleiner eins bei der Versuchsreihe d= 38 mm ist.

Bei 4 Hz traten immer signifikante Dämpfungen auf. Bei 3,5 Herz erst ab einem Wasserstand von d= 25 mm und ab d= 20 mm auch ab 3 Hz (siehe auch Kapitel 2.3. d) Signifikante Dämpfung).

Die Kurven der Wasserstände entsprechen in ihrem Trend denen von Le Mehauté aus Abbildung 12 auf Seite 25. Einige Werte beim Wasserstand von 5 cm stimmen sogar überein. Somit kann die Dämpfung nach dem Dämpfungsansatz von Le Mehauté berechnet werden. Eventuell ist eine Anpassung der Formeln mit Korrekturfaktoren notwendig. Dafür müssen aber zusätzliche Frequenzen zwischen 2 und 4 Hz untersucht werden.

# 4.2. Lineare Übertragungsfunktion

Hierbei wurde untersucht, inwieweit der theoretische Verlauf der Übertragungsfunktion für einen Piston-Type-Wellenerzeuger der aus den Messwerten ermittelten Übertragungsfunktion entspricht.



Abbildung 28: Übetragungsfunktion, theoretischer Verlauf und ermittelte Werte gegenübergestellt.

In der Abbildung wird die theoretische Übertragungsfunktion den Werten der ermittelten Übertragungsfunktion gegenübergestellt. Abbildung 28 zeigt sehr deutlich, dass die ermittelten Werte mit einer mittleren relativen Abweichung von 15 % der idealen Funktion nahezu entsprechen. Daher kann darauf verzichtet werden eine modifizierte Übertragungsfunktion für den Wellenerzeuger des Wellenbeckens zu erstellen.

## 4.3. Paddelspiel

Um mechanische Ungenauigkeiten des Wellenerzeugers zu kompensieren, wurde das Paddelspiel untersucht. Dazu wurde die Differenz von eingesteuerter und gemessener Paddelamplitude bestimmt. Es ist naheliegend, dass das Paddelspiel von der Kraftrückwirkung des Wassers auf das Wellenpaddel abhängt. Daher wurde das Paddelspiel über die Maximalbeschleunigung aufgetragen welche proportional zur Kraft ist. Um Krafteinflüsse durch die Belastung des Paddels zu erkennen wurden die Messwerte farblich nach Wasserständen gekennzeichnet.



Abbildung 29: Mechanisch bedingtes Paddelspiel in der Abhängigkeit von der Maximalbeschleunigung.

In der obigen Abbildung ist zwar zu beobachten, dass das Paddelspiel mit der Beschleunigung ansteigt, aber die Streuung der Messwerte ist zu stark um eine präzise Berechnung des Paddelspiel ableiten zu können. Ein Einfluß durch den Wasserstand konnte nicht festgestellt werden. Das lässt den Schluss zu, dass die größte Kraftwirkung auf den Motor durch die Eigenträgheit des Wellenschlittens und des Paddels wirkt.

# 4.4. Wiederholungsgenauigkeit

Durch die Wiederholung ausgewählter Versuche bei 3 und 4 Herz sollen über die Bestimmung der Standardabweichung der Amplituden unter Sensor Nr.1 und Nr.3, Rückschlüsse auf die Wiederholungsgenauigkeit gezogen werden. Die zu untersuchende Versuchsreihe musste mindestens 2 Wiederholungen beinhalten. Diese so ermittelte Standardabweichung wurde noch in Bezug zur jeweiligen mittleren Amplituden gesetzt. Dazu wurde der Streuwert durch die mittlere Amplitude der Versuchsreihe dividiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 30: Standardabweichung in %/100 zur Amplitude.

Es ist zu erkennen, dass die Messwerte mit zunehmendem Wasserstand größer streuen. Die maximale mittlere Streuung liegt bei 9%.

# 4.5. Untere Messgrenzen der Versuchsanordnung

Die untere Messgrenze der Versuchsdurchführung wird durch das Kriterium "fehlerhafte Sensorenmessung"

bestimmt.

Eventuelle Grenzen durch den Einfluß von Reflektion werden vernachlässigt. Diese sind vom Versuchsaufbau abhängig. Je nach Versuchsanordnung wird es zu anderen Reflektionseinflüssen kommen.

Fehlerhafte Sensorenmessungen äußerten sich in verlorenen Signalen. Durch zu steile Wellen erreichen die Ultraschallwellen nicht mehr den Empfänger. Daraufhin gibt der Sensor Spitzenwerte von 10 Volt aus. Diese Fehlmessungen der Sensoren entstanden in den Versuchen ausschließlich bei 4 Hz. In Tabelle 3 sind die untersten Paddelamplituden A<sub>pp</sub>, ab denen es zu Fehlmessungen kommt, angegeben.

Wassertand d[mm] bei 4 Hz	A <sub>pp</sub> [mm]
100	ab 7,0
38	ab 5,3
20	ab 3,9

Tabelle 3: Grenzen , ab welcher minimalsten Paddelamplitude  $A_{pp}$  es zu Fehlmessungen kommt.

Ab diesen Bereichen ist mit den vorhandenen Sensoren keine Messung mehr möglich.

# Schlussbetrachtung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde zuerst eine Versuchsanordnung und ein Messkonzept geplant und umgesetzt, die erforderlichen theoretischen Grundlagen erarbeitet und die gewonnen Messdaten ausgewertet.

Wichtige Ergebnisse sind:

- Die gemessene Übertragungsfunktion entspricht bis auf eine mittlere relative Streuung von 15 % der theoretischen Übertragungsfunktion.
- Das Paddelspiel des Wellenerzeugers streut so stark, dass sich daraus keine Ergebnisse ableiten lassen.
- Messungen mit den verwendeten Ultraschall-Sensoren sind bei einem Wasserstand von d= 20 mm, einer Frequenz von 4 Herz und einer Paddelauslenkung A<sub>pp</sub>= 3,9 mm nicht mehr möglich.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich eine gewollte Wellenhöhe unter der Verwendung der Übertragungsfunktion nur mit einer mittleren Streuung von 15% erzeugen lässt. Ist der erforderliche Stroke S<sub>o</sub> (Paddelauslenkung) gefunden, können die Versuche mit einer mittleren Streuung von 9 % wiederholen werden. Bedingt durch die Wellensteilheit ist mit den Ultraschallsensoren eine Messung bei d= 20 mm, f= 4 Hertz nicht mehr möglich.

Desweiteren ist, bedingt durch die signifikante Dämpfung ab 3 Hertz, die Lauflänge von 1,75 m für des Becken zu groß. Bereits auf der Hälfte der Lauflänge ist die Amplitude auf 64 % abgefallen.

Weiterhin war festzustellen, dass der Linearantrieb für die niedrigen Wasserstände zu groß dimensioniert ist. Auch die Ultraschallsensoren sind an ihren Erfassungsgrenzen gestoßen. Für Versuche bei sehr niedrigem Wasserstand (d≤ 20 mm) sollte sich das zu untersuchende Objekt innerhalb der Abklinglänge befinden.

Die in der Fachliteratur angegebene unterste Versuchsgrenze von d= 20 mm konnte betätigt werden. Es zeigte sich, dass Messungen bei 15 mm noch ausgeführt und ausgewertet werden können, aber für Schlussfolgerungen müsste die Erzeugung- und Messgenauigkeit erhöht werden.

Es wäre von Vorteil, einen neuen Wellenerzeuger zu konzepieren und Messtechnik auf optischer Basis zu verwenden.

# Literaturverzeichnis

[Groth 2004]	J. Groth: Planung, Entwurf und Bau eines Wellenbeckens
	zur Simulation Diplomarbeit, Universität Rostock
	Fachbereich Bauingenieurwesen Lehrgebiet Wasserbau,
	2004
[Fröhle 1990]]	P. Fröhle: Reflexionsanalyse von freien und gebundenen
	langen Wellen in hydr. Modellen. Unveröffentlichte
	Sonderübung, Franzius-Institut für Wasserbau und
	Küsteningenieurwesen, 1990
[bc chemie]	T. Engel & P. Reid: Physikalische Chemie. Pearson
	Studium, 2006
[Martin & Pohl 2000]	H. Martin, R. Pohl u.a.: Technische Hydromechanik Band
	4. Verlag Bauwesen Berlin, 2000
[Römpp 1998]	J. Falbe / M. Regitz.: Römpp Lexikon Chemie, Band 1-6,
	10.Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York;
	1998
[EAK 2002]	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.: Die
	Küste, Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und
	Ostsee – EAK 2002. Westholsteinische Verlagsanstalt
	Boyens & Co., 2002
[Le Mehauté 1976]	B. Le Mehauté, D.M. Hanes: Similitude, Neuauflage des
	Artikels von 1976 in: THE SEA, Volume 9 Part B. John
	Wiley & Sons, Inc. New York, 1990
[Schröder 1982]	H. Schröder: Dämpfung von Wasserwellen mit kleiner
	Amplitude. Diplomarbeit, Franzius-Institut für Wasserbau
	und Küsteningenieurwesen, 1982
[Dalrymple 1985]	Robert A. Dalrymple: Physical Modelling in Coastal
	Engineering. A.A.BALKEMA / ROTTERDAM / BOSTON,
	1985

Literaturverzeichnis		
[Strybny 2002]	Jann Strybny: Ohne Panik Strömungsmechanik. Vieweg	
	Verlag, 2002	
[Kobus 1978]	H.Kobus: DVWW-Mitteilungsheft Nr.4-Wasserbauliches	
	Versuchswesen. DVWW-Deutscher Verband für	
	Wasserwirtschaft, 1978	
[Hughes 1993]	Steven A. Hughes: Physical Models and Laboratory	
	Techniques in Coastal Engineering. In: Physical Models	
	and Laboratory, 1993	
[Tietz 1974]	H. D. Tietz: Ultraschall-Meßtechnik. VEB Verlag Technik	
	Berlin, 1974	

# Weiterführende Literatur

[Biesel 1949]	Biesel, F.: Calcul de l'Amortissement d'une Houle dans un
	Liquide. Visqueux de Profondeur Finie, 1949
[STOKES 1966]	Ippen, A.T.: Estuary and Coastline Hydrodynamics. by
	McGraw-Hill, Inc., USA, 1966
[Eagleson 1962]	Eagleson: Laminar Damping of Oscillatory Waves. Proc.
	ASCE, J. Hyd. Div. no. 3152, 1962
[Reid / Kajiura 1957]	Reid, R.O. Kajiura, K.: On the Damping of Gravity Waves
	Over a Permeable Sea Bed. Trans. AGU, 38(5): 662-666,
	1957
[Kirschmer 1952]	Kirschmer O.: Die Theorie der Meereswellen als
	Grundlage von Modellversuchen für Seebauten. MAN-
	Forschungsheft, 2. Halbjahr, 1952

# Anlagen

# Anlage 1

Verwendete Formelzeichen

# Anlage 2

Inhaltsübersicht des Datenträgers
\_\_\_\_

## Verwendete Formelzeichen

A <sub>pp</sub>	Paddelausschlag von (Peak to Peak)
$\sigma_{x}$	Standardabweichung
d bzw. h	Wassertiefe
æ	Dämpfungskoeffizient
k	Dämpfungskonstante
α	Dämpfungsfaktor
A <sub>n</sub>	Amplitude an der Stelle n
а	Beschleunigung
a <sub>max</sub>	Maximalbeschleunigung des Paddels
g	Erdbeschleunigung
Н	Wellenhöhe
S <sub>0</sub>	Stroke bzw. Paddelamplitude
A <sub>0</sub>	Wellenamplitude am Paddel
A <sub>1</sub>	Wellenamplitude unter Sensor 1
A <sub>2</sub>	Wellenamplitude unter Sensor 2
A <sub>3</sub>	Wellenamplitude unter Sensor 3
f	Frequenz
L	Wellenlänge
Т	Periode
<b>X</b> <sub>01</sub>	Abstand von Wellenpaddel zu Sensor 1
<b>X</b> <sub>12</sub>	Abstand von Sensor 1 zu 2
<b>X</b> <sub>13</sub>	Abstand von Sensor 1 zu 3
Т	Periode
I	Abklinglänge

## Inhaltsübersicht des Datenträgers

## Verzeichnisse:

root\Versuchsliste.html	(Zentraler Zugriff auf die Erfassten und ausgewerteten
	Messdaten)
\Auswertung\	(Dateien mit den ausgewerteten Versuchen)
\Literatur\	(Technische Datenblätter des Wellenerzeugers)
\Messdaten	(Gewonnene Messdaten bei den Versuchen)
\Software\	(Programme zur Sensorenkonfiguration, Kreuzkorrelation
	und der Quelltext zur Ansteuerung des Paddels)
\Versuchsliste-Dateien\	(Notwendige Dateien für die Darstellung der Versuchsliste
	im Webbrowser)