

## **Großmaßstäbliche Modellversuche mit einem schwimmenden Energiewandler**

Frank Weichbrodt, Steffi Dimke, Jana Hadler, Peter Fröhle

The EU financed project HYLOW (Hydropower Converter for Very Low Head Differences) aims at the development and optimisation of a floating small hydropower converter for the energetic utilisation of currents with slow flow velocities (down to 1.0 m/s), which minimises adverse ecological effects of small hydropower devices. The proposed technique should be able to comply with the requirements of the European Water Framework Directive.

This paper describes performed hydraulic field test with a large scale model of the developed free stream energy converter (FSEC) with main focus on the investigation of the floating behaviour of the FSEC, the power output and the estimation of impacts of the FSEC on the environment.

### **1 Einleitung**

Kleinwasserkraft wird heute überwiegend durch Nutzung von vorhandenen oder künstlich geschaffenen Differenzen der Energiehöhen zwischen Oberwasser und Unterwasser (Fallhöhe) erzeugt. Dabei werden aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt Standorte mit größeren Fallhöhen genutzt.

Die European Small Hydropower Association (ESHA, 2007) schätzt das in europäischen Flüssen vorhandene nutzbare Kleinwasserkraftpotential auf 5 GW. Für Deutschland wird das nutzbare Kleinwasserkraftpotential für Fallhöhen bis 2,5 m Deutschland auf 500 MW geschätzt (KÖNIG & JEHLE, 1997).

Neben dem Kleinwasserkraftpotential für Fallhöhen ist ein wesentlicher Anteil des vorhandenen Kleinwasserkraftpotentials als Energie der freien Strömung in Flüssen und Küstengebieten (z.B. Tidenströmungen) verfügbar. Obwohl es bis in die jüngere Vergangenheit Anlagen zur Nutzung von freien Strömungen gab, wird diese Energieform heute kaum genutzt. Dies gilt insbesondere für geringe Strömungsgeschwindigkeiten  $< 3$  m/s.

Derzeit verfügbaren Anlagentechnologien zur Nutzung von geringen Fallhöhen bzw. von geringen Strömungsgeschwindigkeiten sind meist nicht besonders ökonomisch. Oft ergeben sich durch die in der EU-Wasserrahmenrichtlinie festgelegten Anforderungen auch Bedenken hinsichtlich der Vereinbarkeit von

Kleinwasserkraft und Ökologie, die in an vielen Standorten Zusatzbauwerke wie Fischaufstiegsanlagen erforderlich machen.

Die Universität Rostock ist an einem EU-Forschungsvorhaben (7. FRP, HYLOW) beteiligt, in dem Kleinwasserkraftanlagen zur wirtschaftlichen Nutzung von geringen Fallhöhen, freien Strömungen und Druckunterschieden in Wasserversorgungssystemen entwickelt werden sollen. Ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung der Kleinwasserkraftanlagen in diesem Vorhabens ist es, negative Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren, um eine Vereinbarkeit der entwickelten Anlagen mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu gewährleisten. Insgesamt arbeiten 10 Forschungseinrichtungen bzw. Unternehmen aus ganz Europa über einen Zeitraum von vier Jahren (2008 bis 2012) intensiv zusammen. Das Vorhaben trägt den Titel „Hydropower converters with very low head differences (HYLOW)“.

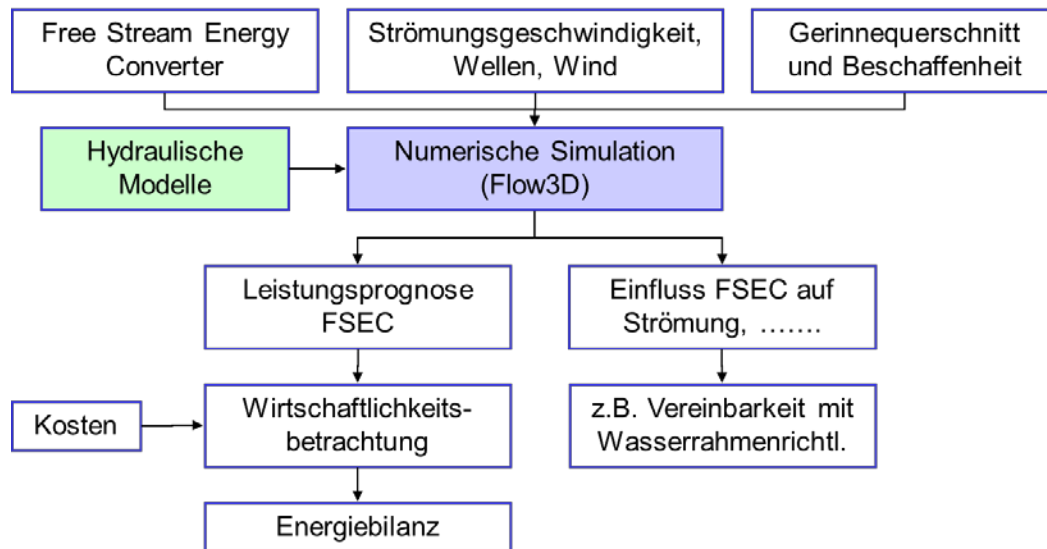
An der Universität Rostock wird im Rahmen des o.g. Vorhabens und in Zusammenarbeit mit der Universität Southampton eine schwimmende Kleinwasserkraftanlage (Free Stream Energy Converter, FSEC) zur Nutzung geringer Strömungsgeschwindigkeiten entwickelt. Im Rahmen der geplanten Untersuchungen sollen insbesondere die Möglichkeiten und Grenzen von schwimmenden Kleinwasserkraftanlagen mit Fokus auf die Leistung und die Umweltverträglichkeit/Genehmigungsfähigkeit untersucht werden.

Dazu werden an der Universität Rostock Ressourcenanalysen zu nutzbaren Strömungen in Küstengebieten, Untersuchungen zur Vereinbarkeit der zu entwickelnden Anlagen mit den Regelungen der Wasserrahmenrichtlinie sowie – neben theoretischen Betrachtungen – klein- und großmaßstäbliche Modellversuche zur Ermittlung der möglichen mechanischen Leistung durchgeführt.

Sofern für einen potentiellen Standort Informationen zu den hydrodynamischen Bedingungen sowie zu Gewässerquerschnitt und -beschaffenheit vorliegen, können nach Abschluss des Forschungsvorhabens qualifizierte Vorhersagen zur zu erwartenden Leistung der Anlage sowie zum Einfluss der Anlage auf die marine Umwelt getroffen werden. Auf dieser Grundlage können Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Betrachtungen zur Energiebilanz und zur Vereinbarkeit der Anlage mit der Umweltgesetzgebung folgen (vgl. Abb. 1).

Die Vorhersagen zur Leistung und zum Einfluss der Anlage auf die Umwelt werden mit Hilfe von numerischen Simulationen getroffen. Die numerischen Modelle können auf Grundlage der Ergebnisse der klein- und großmaßstäblichen Modellversuche im Labor und in der Natur entsprechend kalibriert werden.

Das Forschungsvorhaben HYLOW endet 2012. Im vorliegenden Beitrag werden die ersten Ergebnisse von großmaßstäblichen Modellversuchen (Zugversuche) vorgestellt. Des Weiteren wird ein Ausblick auf die geplanten Versuche in der Natur gegeben.



**Abbildung 1** Einbindung der hydraulischen Modellversuche in die Vorhersage von Leistung und möglichen Einflüssen auf die marine Umwelt

## 2 Free Stream Energy Converter und durchgeführte Modellversuche

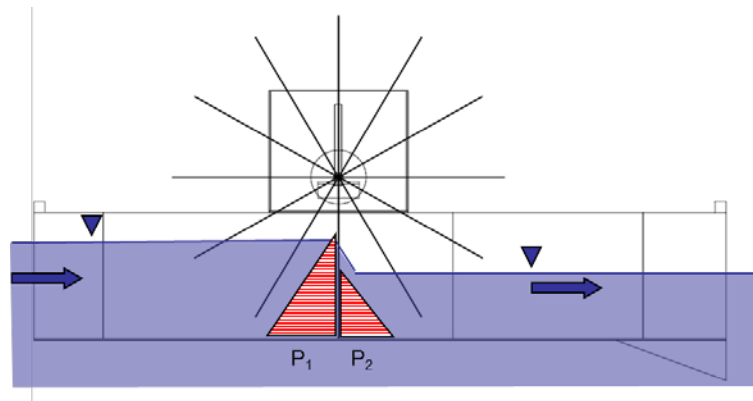
### 2.1 Free Stream Energy Converter

In den letzten Jahren wurden verschiedene Konzepte bzw. Anlagen zur Nutzung von freien Strömungen vorgestellt. Viele der vorgeschlagenen Konzepte/Anlagen beinhalten Unterwasser-Installationen, die oft mit hohen Kosten verbunden sind, weisen ein Gefährdungspotential für die Fauna auf (z.B. Unterwasser-Propeller) oder benötigen vergleichsweise hohe Strömungsgeschwindigkeiten, die nur in ausgewählten Bereichen vorkommen (z.B. konzentrierte Tideströmungen).

Wie bereits angesprochen, sollte im Rahmen des HYLOW-Forschungsvorhabens eine Kleinwasserkraftanlage entwickelt werden, die auch geringe Strömungsgeschwindigkeiten (1,0 m/s) wirtschaftlich nutzen kann und nur geringen Einfluss auf die marine Umwelt ausübt. Aufgrund dieser Anforderungen wurde eine Anlage entwickelt, die den Gewässerquerschnitt nur partiell versperrt (schwimmend), mit geringen Drehgeschwindigkeiten arbeitet

(<10 u/min) und geringe Fließgeschwindigkeiten vor und hinter der Anlage erwarten lässt, um Fische vom Passieren der Anlage fernzuhalten.

Der entwickelte Free Stream Energy Converter (FSEC) besteht aus zwei Schwimmkörpern, die mit einer Bodenplatte verbunden sind und aus einem darauf installiertem Wasserrad mit geraden Schaufelrädern, um ggf. einen Einsatz in tidebeeinflussten Gebieten mit wechselnden Strömungsrichtungen zu ermöglichen (vgl. Abb. 3). Das Wasser wird beim Einströmen in die Anlage kanalisiert und der relative Wasserspiegel erhöht sich vor dem Rad etwas, da sich das Rad vergleichsweise langsam dreht. Durch Wasserspiegelunterschiede vor und hinter dem Wasserrad kann neben der kinetischen Energie des Wassers zusätzlich der hydrostatische Differenzdruck ( $P_1 - P_2$ , vgl. Abb. 2) zum Antrieb des Rades genutzt werden. Es wurde angenommen, dass der Wasserspiegelunterschied mit Separatoren am Heck der Anlage beeinflusst werden kann.

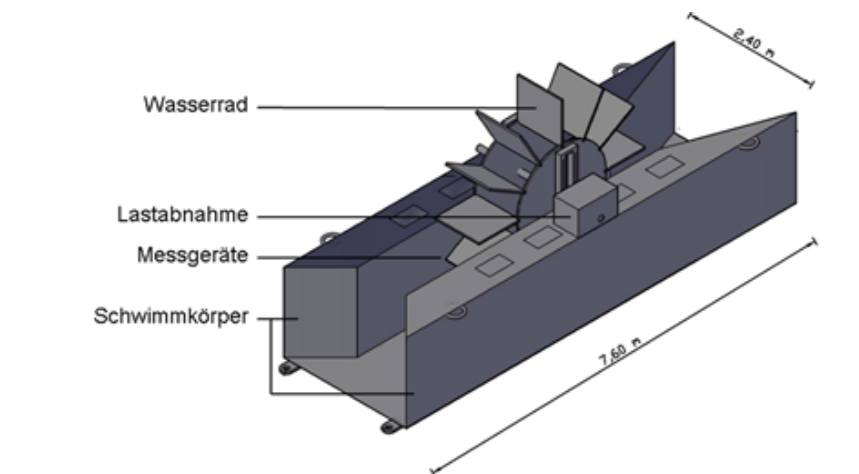


**Abbildung 2** Querschnitt Free Stream Energy Converter, schematisch

## 2.2 Großmaßstäbliche Modellversuche

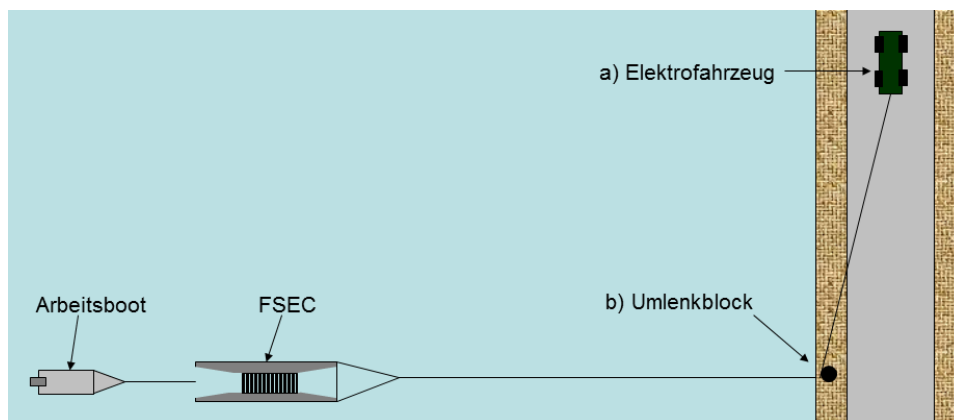
Auf der Grundlage theoretischer Überlegungen sowie der Ergebnisse kleinmaßstäblicher hydraulischer Modellversuche im Labor (Universität Southampton, Universität Rostock) und in der Natur (Zugversuche mit einem ca. 2,0 m langen Modell) wurde ein großmaßstäbliches Modell des FSEC mit einer Länge von 7,60 m, einer Breite von 2,40 m und einer Höhe von 1,40 m aus Stahl hergestellt. Die Schwimmkörper des Modells sind mit Ballasttanks ausgestattet, um die Anlage in der Längsachse trimmen zu können. Abb. 3 zeigt eine Visualisierung des Modells.

Es ist geplant, die Leistung und den Einfluss dieses Modells auf die Umwelt an zwei Standorten in der Natur zu untersuchen. Um vor der Ausbringung des Modells an den konkreten Standorten weitere Erfahrungen mit dem Schwimmverhalten des Modells zu sammeln und die mechanische Leistung des Modells bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zu messen, wurden auf dem Gelände des Marinestützpunkts Warnemünde Zugversuche mit dem Modell durchgeführt.



**Abbildung 3** Querschnitt Free Stream Energy Converter, schematisch

Das Modell wurde, wie in Abb. 4 dargestellt, mit einem Elektrofahrzeug gezogen. Die Länge der zur Verfügung stehenden Messstrecke betrug ca. 200 m. Das Modell wurde mit Zuggeschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 1,5 m/s gezogen. Die Kontrolle der Geschwindigkeit erfolgte mit einem GPS-Sensor und nachfolgender Korrektur der GPS-Daten.

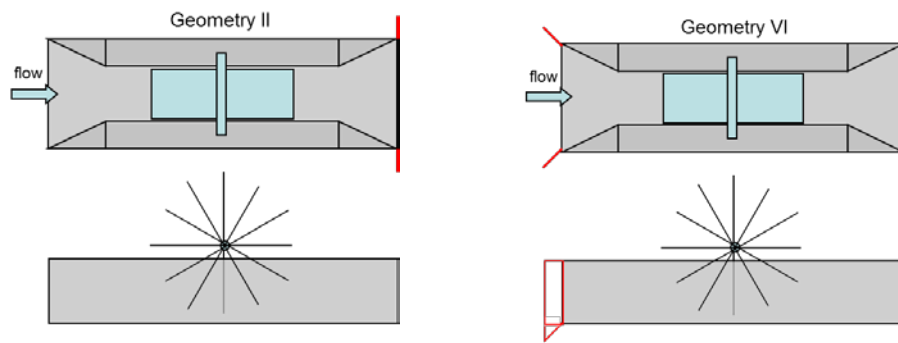


**Abbildung 4** Durchführung Zugversuche, schematisch

Im Rahmen der Versuche wurden sieben unterschiedliche Geometrievarianten getestet, die sich durch die Anbringung unterschiedlicher Separatoren an Bug und Heck voneinander unterscheiden. Geometrie I wurde ohne Separatoren getestet. Geometrie II und VI sind beispielhaft in Abb. 5 dargestellt. Um den Einfluss der Breite der Separatoren auf die Leistung zu bestimmen, wurden in Geometrie II (90° Separator umlaufend am Heck) zwei unterschiedliche Separatorbreiten (0,35 m und 0,75 m) getestet. Abb. 6 zeigt das großmaßstäbliche Modell mit der Geometrie II (0,35 m) und das Elektro-Zugfahrzeug.

Während der Zugversuche wurde die Leistung in Abhängigkeit von Zug-/Strömungsgeschwindigkeit, die Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Positionen der Anlage, die Wasserspiegellagen vor und hinter dem

Energiewandler, sowie Bewegungen der Anlage erfasst. Die mechanische Leistung des FSEC wurde aus Drehzahl des Wasserrades und Bremsmoment errechnet (Umwandlung der Energie mit einer Reibungsbremse). Ein Generator oder ein Getriebe wurde bei den Modellversuchen nicht eingesetzt. Auswirkungen der Anlage auf die Umwelt konnten bei den durchgeführten Versuchen nur eingeschränkt (Strömungsgeschwindigkeiten im Umfeld der Anlage) erfasst werden.



**Abbildung 5** Geometrie II und IV des Versuchsprogramms, Grundriss und Längsschnitt



**Abbildung 6** Versuche Marinestützpunkt Warnemünde, Geometrie II (0,35 m), Foto: M. Knüppel

### 3 Ergebnisse der Modellversuche

#### Schwimmverhalten:

Die Schwimmelage des Modells ist stark von der Zug-/Strömungsgeschwindigkeit und, wie erwartet, von der Menge des Ballastwassers abhängig. Der Einfluss der verschiedenen Separatoren sowie der Drehzahl des Wasserrades ist weniger stark. Um eine horizontale Schwimmelage zu erreichen, ist bei einer Zuggeschwindigkeit von 1,0 m/s ein aufrichtendes Moment von ca. 14 kNm und bei 1,5 m/s von ca. 28 kNm erforderlich. Für die Bemessungsgeschwindigkeit (max. zulässige Strömungsgeschw.) ergibt sich ein erforderliches aufrichtendes

Moment in Höhe von ca. 47 kNm.

Bei den Modellversuchen wurde das aufrichtende Moment mit Ballastwasser erzeugt. Für weitere Versuche in der Natur soll ein Ausleger mit einem verstell- und lenzbaren Schwimmkörper am Bug der Anlage (bzw. an Bug und Heck für Tidegebiete) installiert werden.

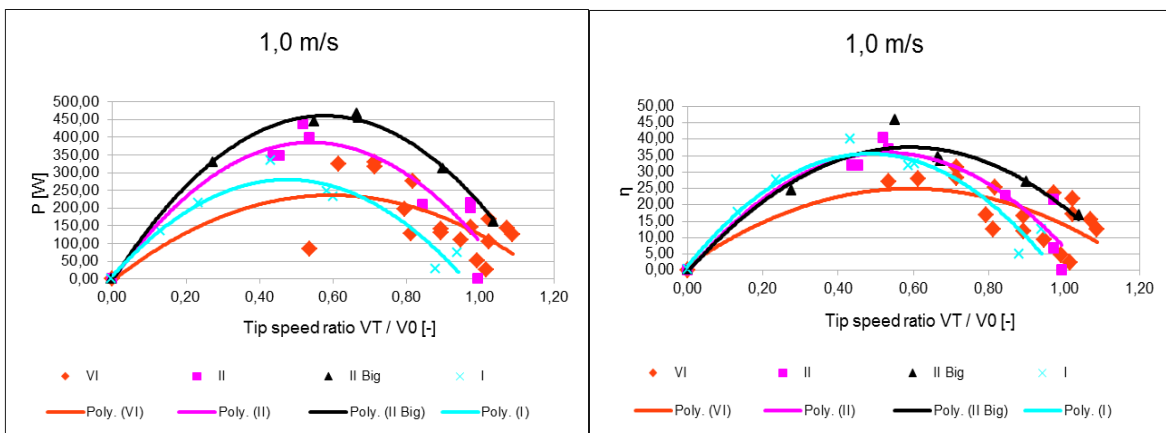
Da der Versuchsstandort gut vor Seegang geschützt war, können noch keine Aussagen über den Einfluss von Seegang auf das Schwimmverhalten bzw. auf die Leistung gemacht werden. Ein Schwojen der Anlage in Längsrichtung wurde erst bei vergleichsweise hohen Zuggeschwindigkeiten beobachtet.

Leistung:

Die während der FSEC-Modellversuche ermittelten Leistungen und Wirkungsgrade sind neben der Zuggeschwindigkeit von der Schwimmlage, der Geometrie des FSEC (Anordnung Separatoren) und von der Drehzahl des Wasserrades abhängig. Bei einer Längsneigung des FSEC nach vorn wurden die geringsten Leistungen/Wirkungsgrade gemessen, da der Durchfluss durch die Anlage in diesem Fall gering ist. Eine leicht zum Heck (3-4°) geneigte Schwimmlage erhöht die Leistung.

Die höchsten Leistungen von bis zu bis 1,6 kW wurden bei Zuggeschwindigkeiten von 1,5 m/s für die Geometrie II gemessen. Größere Separatoren erzeugten höhere Leistungen. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, werden vergleichsweise hohe Leistungen und Wirkungsgrade bei geringen Drehzahlen des Wasserrades (3 bis 5 u/min) erreicht.

Die in Abb. 7 dargestellten Leistungen wurden bei Zug-/Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s und einer horizontalen Schwimmlage ermittelt. Die in Abb. 8 dargestellten Wirkungsgrade beziehen sich auf den gesamten angeströmten Querschnitt inklusive der Separatoren. VT stellt die Geschwindigkeit der Spitze der Wasserradschaufeln dar.



**Abbildung 7** Leistung (links) und Wirkungsgrad (rechts) des FSEC-Modells bei 1,0 m/s Zuggeschwindigkeit



### Einfluss auf die Umwelt:

Wie bereits erwähnt, können nach den ersten Modellversuchen nur eingeschränkt Aussagen über den Einfluss auf die Umwelt gemacht werden, da sich die Anlage nicht in einem natürlichen Gerinne befand und gezogen wurde. Die Messergebnisse zeigen aber, dass die Strömungsgeschwindigkeit sich im Bereich des Ein- und Auslaufs der Anlage im Vergleich zur Anströmgeschwindigkeit (in diesem Fall die Zuggeschwindigkeit) reduziert. Unter der Annahme, dass Fische hohen Strömungsgeschwindigkeiten folgen (Lockströmung) ist dieses Ergebnis positiv zu bewerten.

Ein Aufstau von Wasser (Änderung des Wasserspiegel) außerhalb der Anlage wurde nicht beobachtet.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Im vorliegenden Beitrag wurden großmaßstäbliche Modellversuche mit einem Free Stream Energy Converter vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem schwimmenden Converter der beschriebenen Bauweise Wirkungsgrade bis >40% erreicht werden können. Da die theoretische Leistung bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten stark abnimmt und der Gewässerquerschnitt nur partiell verbaut wird, sind die zu erwartenden Leistungen für geringe Strömungsgeschwindigkeiten im Vergleich zu konventionellen Kleinwasserkraftanlagen gering. Für höhere Strömungsgeschwindigkeiten sind deutlich höhere Leistungen zu erwarten.

Durch die Bauweise des FSEC kann eine Vereinbarkeit mit den Zielen der Wasserrahmenrichtlinie ohne Zusatzbauwerke erreicht werden, da Flora, Fauna und Sedimente den Standort der Anlage nahezu ungehindert passieren können.

Das großmaßstäbliche Modell wird im Frühjahr 2011 in einem Naturversuch im oberen Flussabschnitt der Warnow (Mecklenburg-Vorpommern) getestet. Ziel der Untersuchungen ist die Überprüfung der bei den Zugversuchen ermittelten Messergebnisse. Besonderes Augenmerk liegt auf den Untersuchungen zum Einfluss der Anlage auf die Umwelt. Die Versuche werden von Fischbiologen der Universität Southampton begleitet. Im Herbst 2011 ist die Ausbringung des Modells in die Ems geplant.

Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Modellversuche sind für die Überprüfung der Ergebnisse der im Vorhaben durchgeführten numerischen Simulationen und die anschließende Kalibrierung sehr wertvoll, da Modelleffekte, wie sie in hydraulischen Laborversuchen auftreten (Versperrung usw.) nahezu ausgeschlossen werden können. Auf der anderen Seite unterliegen Versuche in der Natur Schwankungen, die die Wiederholgenauigkeit beeinträchtigen.

Um weitere Konfigurationen der Geometrie des FSEC schnell und kosten-



günstig testen zu können, werden numerische Simulationen mit der Simulationssoftware Flow-3D durchgeführt. Die Flow-3D Software ist in der Lage Strömungen mit freien Oberflächen- bzw. Mehrphasenströmungen zu simulieren.

Das Forschungsvorhaben wurde im 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union (FP 7) gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung und die Begleitung durch die Mitarbeiter der EU. Unser Dank gilt auch den Mitarbeitern des Marinestützpunktes Warnemünde sowie allen Personen, die das Forschungsvorhaben direkt oder ideell unterstützt haben und dem Projektkoordinator.

## Literatur

ESHA, 2007, European Small Hydropower Association web site:  
<http://www.esha.be> (accessed 30.03.2007)

KÖNIG F. & JEHLE C.: Bau von Wasserkraftanlagen, 3. Aufl., C.F. Müller Verlag Karlsruhe, 1997

Müller G. and Senior J., „Die Wasserdruckmaschine mit freier Oberfläche – ein neuer Energiewandler für sehr niedrige Fallhöhen, Zehntes Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, Ostbayerisches Technologie-Transfer Institut

Senior J., “Hydrostatic pressure converters for the exploitation of very low head hydropower”, Ph.D. Thesis, University of Southampton (2009)

## Autoren:

Dr.-Ing. Frank Weichbrodt,  
Dipl.-Ing. Steffi Dimke  
Dr.-Ing. Peter Fröhle  
Universität Rostock, AUF  
Küstenwasserbau  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18059 Rostock  
Tel.: +49 – 381 – 4983681  
Fax: +49 – 381 – 4983682  
[frank.weichbrodt@uni-rostock.de](mailto:frank.weichbrodt@uni-rostock.de)  
[steffi.dimke@uni-rostock.de](mailto:steffi.dimke@uni-rostock.de)  
[peter.fröhle@uni-rostock.de](mailto:peter.fröhle@uni-rostock.de)

Dipl.-Ing. Jana Hadler  
Universität Rostock, MSF  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD  
Albert-Einstein-Straße 2  
Rostock  
Tel.: +49 – 381 – 4989181  
Fax: +49 – 381 – 4989172  
[jana.hadler@uni-rostock.de](mailto:jana.hadler@uni-rostock.de)