

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Thorenz, Carsten**

## **Ein neuartiges Füllsystem für Sparschleusen großer Höhe**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103579>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Thorenz, Carsten (2012): Ein neuartiges Füllsystem für Sparschleusen großer Höhe. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 47. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 503-512.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# **Ein neuartiges Füllsystem für Sparschleusen großer Höhe**

Carsten Thorenz

Es werden die Grundzüge eines neuartigen Füllsystems für Schleusen großer Hubhöhe vorgestellt, welches eine deutliche Reduzierung des baulichen Aufwands verspricht. Ebenfalls werden die gewählte numerische Untersuchungsmethodologie sowie das zur Validierung verwendete Labormodell präsentiert.

Stichworte: Schleuse, Füllsystem, numerische Untersuchungen

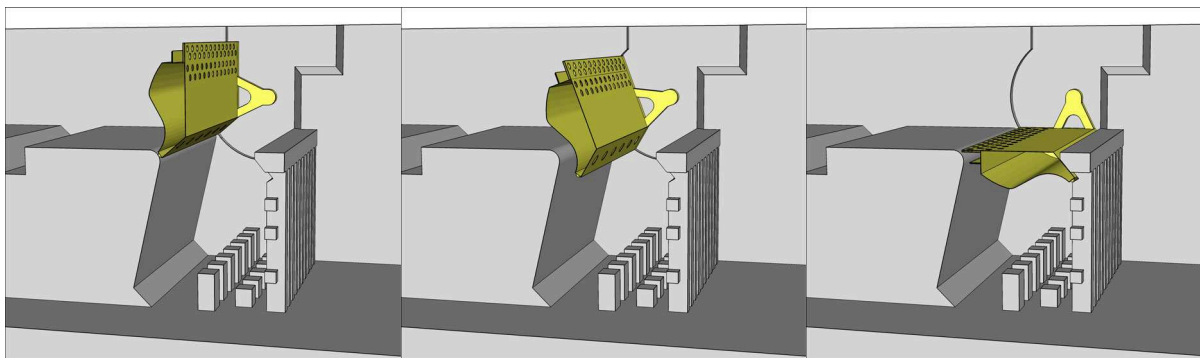
## **1 Hydraulisches System**

Für Sparschleusen mit großer Hubhöhe hat sich in Deutschland ein Füllsystem mit einer Druckkammer unter der eigentlichen Schleusenkammer als einfache Gestaltungsvariante bewährt. Hierbei dient die Druckkammer zur gleichmäßigen Verteilung des einströmenden Füllwassers von oberstrom und den Sparbecken. Es wurden mehrere Schleusen dieser Art gebaut und erfolgreich betrieben (Uelzen II, Sülfeld u.a.). Die Verbindung zwischen Druckkammer und Schleusenkammer erfolgt über eine Vielzahl von Düsen in der Zwischendecke. Die Druckkammer wird in der bisher üblichen Ausführung über seitlich angebundene Zuleitungskanäle beaufschlagt, die vor dem Schleusenoberhaupt an das Oberwasser angeschlossen werden. Hierbei werden die Einläufe aufwändig gestaltet und möglichst tief angeordnet, um das Einziehen von Luft in das Füllsystem zu verhindern. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den fertig gestellten Einlaufbereich der Schleuse Sülfeld. Durch derartige Konstruktionen vergrößert sich der Baukörper erheblich, der Einlauf ist typischerweise etwa 30-40 m lang, 20–30 m breit und 10-15 m tief.



**Abbildung 1:** Schleuse Sülzfeld, Blick vom Oberwasser auf den fertig gestellten Einlauf mit seitlicher Wasserentnahme hinter den Säulen (Neubauamt Hannover, 2007)

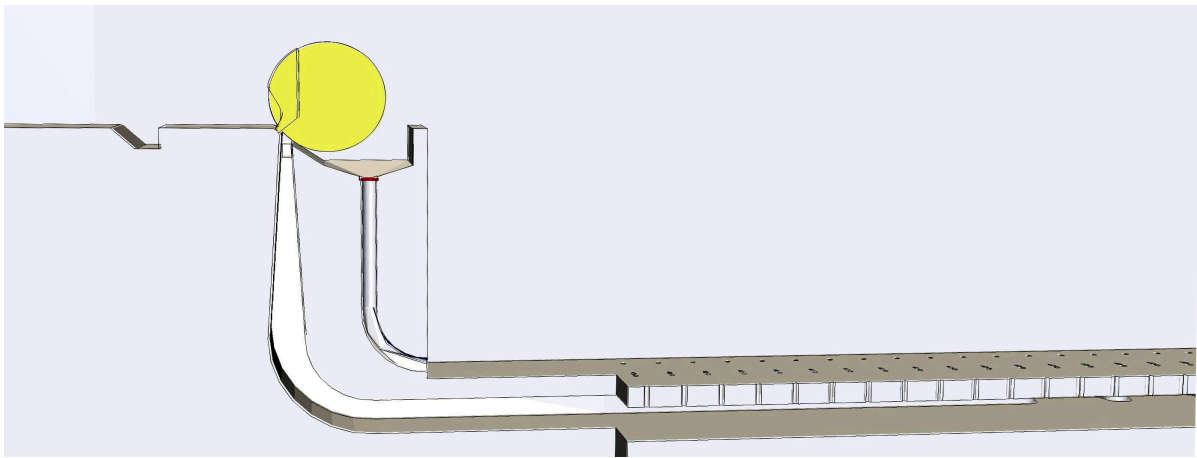
Schleusen niedrigerer Hubhöhe werden meist direkt vom Oberhaupt her gefüllt und sind in den vergangenen Dekaden vielfach mit einem Drucksegment als Obertor ausgestattet worden. Bei diesen Schleusen dient das Drucksegment sowohl als Schleusentor als auch als Füllorgan (s.a. *Thorenz und Kemnitz, 2006*). Durch das leichte Schwenken des Tors nach unten wird eine Füllöffnung freigegeben, durch die Wasser über eine Beruhigungskammer in die Schleusenkammer einströmen kann (s. Abbildung 2). Das Drucksegment ist vom Bundesverkehrsministerium im Rahmen eines Standardisierungsprozesses als Vorzugslösung für zukünftige Planungen von Schleusen mit Hubhöhen  $< 10$  m gewählt worden.



**Abbildung 2:** Drucksegmentobertor in Staustellung, Füllstellung und Durchfahrtsstellung

Im Zuge der Bearbeitung der hydraulischen Gestaltung des Füll- und Entleersystems der neuen Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn wurde die Idee

verfolgt, auf Umläufe (und die zugehörigen Schütze) sowie einen tiefliegenden Einlaufbereich zum Anschluss an das Oberwasser vollständig zu verzichten. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, bei dem das Druckkammerfüllsystem direkt über ein Drucksegmentobertor beaufschlagt wird. Bei diesem wird die Füllmuschel des Drucksegmenttores über einen Schacht an die Druckkammer angebunden. Dieser Fallschacht wurde leicht konisch aufgeweitet, um die Transformation von Geschwindigkeit in Druck verlustarm zu gestalten (s. Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Aufgeschnittenes Geometriemodell für das vorgeschlagene Konzept mit Drucksegmenttor, Fallschacht und Druckkammer

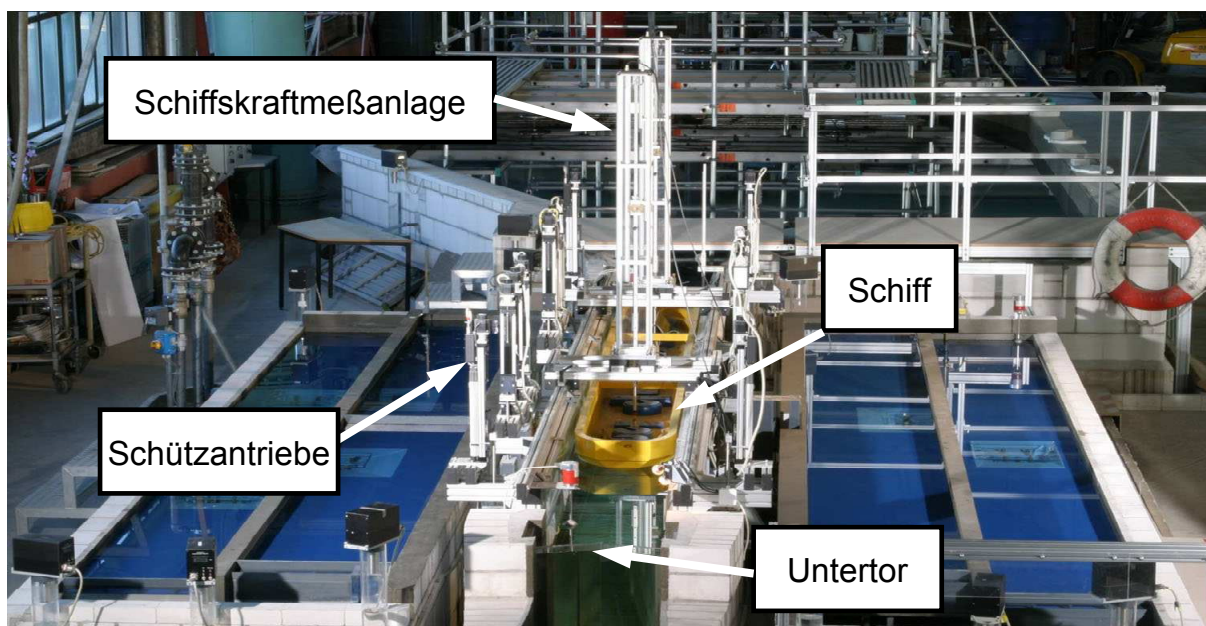
Dieses Konzept hätte erhebliche Vorteile: Kein großer und tiefer Einlauf wie bei anderen Sparschleusen mit großer Hubhöhe, eine reduzierte Anzahl von Betriebsverschlüssen, der Verzicht auf schlecht erreichbare Füllorgane, die reduzierte Größe der Baugrube und des Gesamtbauwerks. Auch die Anbindung an das Unterwasser könnte ohne Umläufe gestaltet werden. Im einfachsten Fall durch ein Hubtor, welches nicht nur die Schleusenkammer verschließt, sondern bis zur Druckkammer verlängert wird. Dann könnte durch leichtes Heben des Tores die Entleerung durch die Druckkammer in das Unterwasser durchgeführt werden. Falls die dabei auftretenden Kräfte nicht beherrschbar sind, könnten alternativ im Hubtor Entleerschütze in Höhe der Druckkammer vorgesehen werden.

## 2 Beurteilung des Schleusenfüllprozesses

Bei der Auswahl und Dimensionierung des Füllsystems stehen aus hydraulischer Sicht zwei Parameter im Vordergrund: Die erreichte Füllzeit zum einen und die

dabei auftretende Schiffsbewegung zum anderen. Hierbei gilt es, vorab eine gute Balance zwischen diesen beiden Ansprüchen zu finden. Daneben sind wirtschaftliche Aspekte nicht zu vernachlässigen. Sowohl die Erstellungskosten als auch die Aufwendungen für Betrieb und Unterhaltung unterscheiden sich bei verschiedenen Systemen erheblich.

Für Schleusen niedrigerer Priorität (geringe Verkehrsdichte und Hubhöhe) wird es ausreichend sein, auf ein einfaches, kostengünstiges System zurückzugreifen und dieses mit Faustformeln oder der Erfahrung aus anderen Projekten zu dimensionieren. Bei Schleusen mit höherer Komplexität (größere Hubhöhe, hohe Verkehrslast, ...) und monetärer Wertigkeit stellt die Auswahl und Dimensionierung des Füllsystems eine deutlich größere Herausforderung dar. Üblicherweise werden dabei im Vorfeld Modelluntersuchungen durchgeführt, um sicherzustellen, dass das gewählte Füllsystem die geforderten Füllzeiten erreichen kann, ohne übermäßige Schiffsbewegungen und Kräfte in den Haltetrossen zu erzeugen.



**Abbildung 4:** Versuchsstand zur Untersuchung der neuen Sparschleuse Minden

Für den Neubau der Schleuse Minden (derzeit im Bau) wurde in der BAW mit einem Labormodell (s. Abbildung 4) die Dimensionierung und Optimierung des Füllsystems durchgeführt. Hierbei wurde ein hybrider Modellierungsansatz verfolgt, bei dem Ergebnisse aus numerischen Modellen für die Vorauswahl von Bauteilen verwendet wurden und die Ergebnisse des Labormodells wieder in die Kalibrierung der numerischen Modelle zurückgeflossen sind. Die mit dem Labormodell gewonnenen Ergebnisse wurden auch verwendet, um die im Folgenden vorgestellten numerischen Methoden zu kalibrieren und zu validieren.

### 3 Numerische Modellierung des Füllprozesses

#### Einleitung

Numerische Modelle spielen eine wachsende Rolle im Entwurfsprozess für Schleusen. In der BAW werden eindimensionale Modelle in Kombination mit dreidimensionalen Modellen und Labormodellen eingesetzt. Hierbei stellt besonders die Modellierung der Kammerwasserspiegeloszillationen hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Verfahren, da die Oszillationsamplituden sehr klein sind und überlagert werden durch den sehr viel größeren Hubprozess. Hierzu wurde das Programmpaket OpenFOAM angepasst und für die Modellierungen verwendet.

#### Kopplung der numerischen Modelle

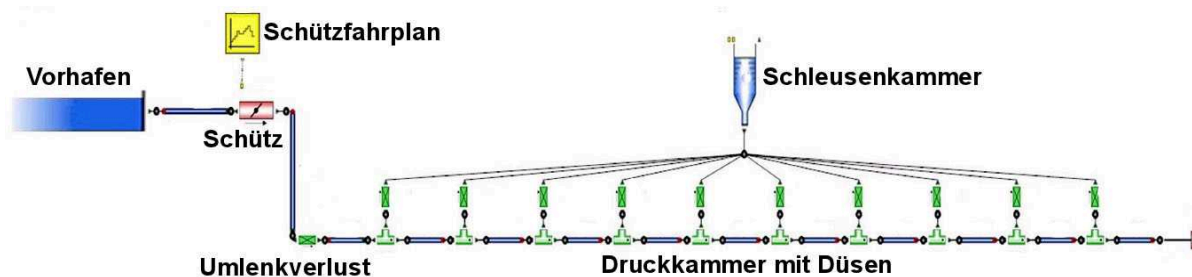
Für die Modellierung des Gesamtsystems „Schleuse mit Vorhäfen und Sparbcken“ ist die derzeit erreichbare Geschwindigkeit der dreidimensionalen Verfahren auf den Rechnern der BAW auch bei Nutzung einiger Hundert CPU-Kerne nicht ausreichend, um eine adäquate Genauigkeit in akzeptabler Zeit zu erzielen. Zudem stellt die Abbildung der Bewegung des Schiffes in der Schleusenkammer eine zusätzliche Herausforderung dar. Dies wird derzeit in der BAW versuchsweise in Einzelfällen über die dynamische Bearbeitung des Berechnungsgitters betrachtet. Dieser Ansatz ist jedoch sehr aufwändig, und wurde daher hier nicht verwendet. Stattdessen wird das Schwappen des Wassers in der Schleusenkammer (ohne Schiff) untersucht, um über das Wasserspiegelgefälle die Haltekräfte abzuschätzen. Als resultierender, vereinfachter Ansatz wurde diese Modellkette genutzt:

1. lokale stationäre dreidimensionale Modelle zur Bestimmung der Verlustbeiwerte von Einzelbauteilen (Einlauf, Umlenkungen, Fülldüsen, ...) und Parametrisierung der Ergebnisse
2. eindimensionale Netzwerkmodelle zur Berechnung der Dynamik des Gesamtsystems (mit der Parametrisierung aus den lokalen dreidimensionalen Modellen)
3. detaillierte dreidimensionale Mehrphasenmodelle für die instationäre Dynamik des Einlaufs und des Kammerwasserschwappens (mit Randbedingungen aus den eindimensionalen Modellen)

Es ist zu erwarten, dass der weitere Fortschritt in den Verfahren (bspw. Berücksichtigung des bewegten Schiffes über die „Immersed Boundary Method“) und der Rechnertechnik zukünftig eine durchgängige Simulation in einem Modell erlauben wird. Jedoch ist die Verwendung eines eindimensionalen Modells für die schnelle Beurteilung von Varianten voraussichtlich noch länger die Methode der Wahl, um übersichtlich das Verhalten des Füllsystems beurteilen zu können.

### Eindimensionales numerisches Modell

Für das eindimensionale Netzwerkmodell wurde das kommerzielle Verfahren „Flowmaster“ verwendet. Dieses basiert auf den von *Miller (1978)* publizierten Ansätzen für Druckrohrströmungen und wird vielfach für Leitungsnetzwerke eingesetzt. Es verfügt über eine umfangreiche Bibliothek mit den hydraulischen Parametern von Standardbauteilen, muss jedoch teilweise für die in einer Schleuse verwendeten Spezialbauteile (Ein- und Ausläufe, Fülldüsen etc.) neu parametrisiert werden. Für das hier betrachtete System, bei dem nur die Füllung vom Oberwasser beleuchtet wird, ist ein stark vereinfachtes Netzwerk ausreichend, um die globalen Prozesse zu beschreiben (s. Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Eindimensionales Netzwerkmodell zur Simulation der Füllung vom Oberwasser her

In diesem Modell wurde der Abzweig aus der Druckkammer in die Fülldüsen und der Übergang aus den Düsen in die Schleusenkammer durch eine Kombination aus einem T-Stück und einem konzentrierten Verlust abgebildet. Hierbei wurde die Vielzahl der tatsächlichen Düsen zu wenigen, aber summarisch flächengleichen Düsen zusammengefasst. Dies war nötig, weil sich bei der Validierung mit den Ergebnissen des Labormodells zeigte, dass die Parametrisierung der T-Stücke in Flowmaster unzulänglich ist, wenn der Durchmesser des Abzweigs sehr viel kleiner als der durchgehende Durchmesser ist. Der gewählte Ansatz wurde mit den Ergebnissen für die Drücke in der Druckkammer des Modells Minden überprüft und zeigte nach einer geringen Nachkalibrierung der konzentrierten Verluste eine gute Übereinstimmung. In der Folge wurde das

Modell für die Schleusen am Main-Donau-Kanal angepasst und die Fluidbilanzen für den Füllprozess des neuen Systems damit berechnet.

### **Dreidimensionales numerisches Strömungsmodell**

In der BAW wird neben dem kommerziellen Verfahren StarCCM+ auch das open-source Verfahren OpenFOAM für die Modellierung instationärer dreidimensionaler Strömungsprobleme eingesetzt. OpenFOAM ist eine Programmbibliothek für verschiedene numerische Verfahren auf der Basis der Finite-Volumen-Methode und wurde maßgeblich von Henry Weller und Hrovje Jasak entwickelt (*Weller et al 1998*). Hier wurde der „interFoam“-Löser verwendet, der die mehrphasigen Navier-Stokes-Gleichungen mit einem Volume-Of-Fluid-Ansatz (VOF) löst. Die dazu nötigen Anpassungen des Quellcodes von OpenFOAM werden im Detail beschrieben in dem zur Veröffentlichung akzeptierten Artikel *Thorenz und Strybny (2012)*.

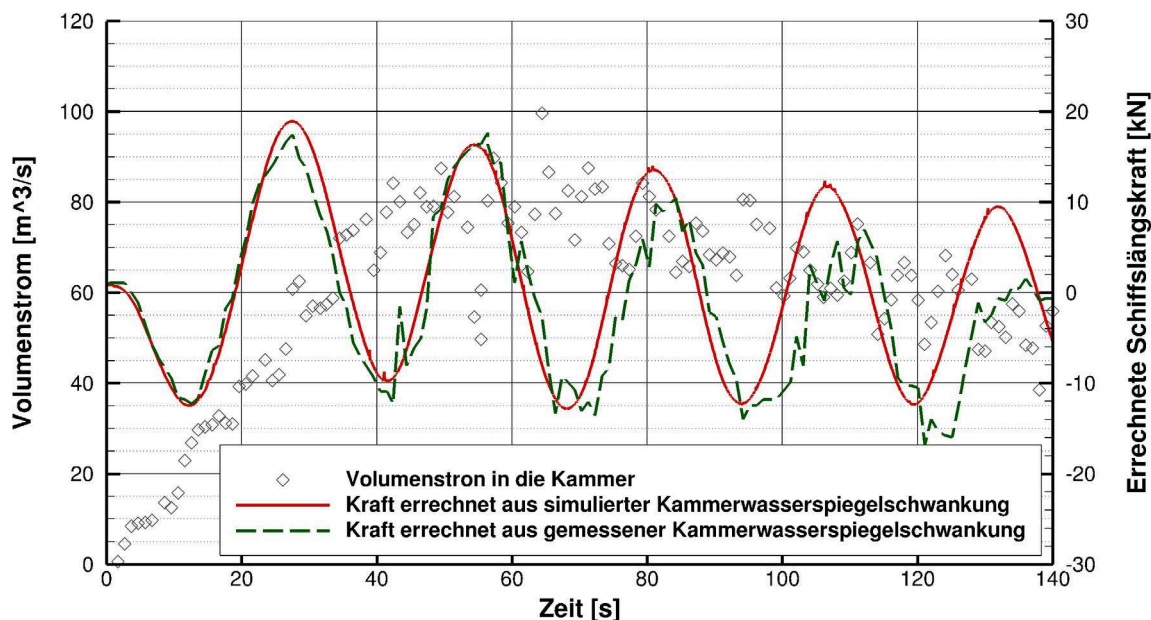
## **4 Validierung des numerischen Modells**

Das im Labor untersuchte gegenständliche Modell der Schleuse Minden im Maßstab 1:25 (Froude-Ähnlichkeit) wurde betrieben, um das hydraulische Konzept zu entwickeln und zu optimieren. Dazu wurde im Labormodell ein Schiff mit einer Kraftmesseinrichtung in der Kammer fixiert. Das Schiff konnte sich frei vertikal bewegen, die Bewegung in der Horizontalen wurde verhindert und die dazu nötigen Haltekräfte wurden aufgezeichnet und dienten als Bemessungsgröße.

Als Approximation dieser Haltekräfte kann bei Schleusen mit einem Grundlaufsystem auch die Hangabtriebskraft des Schiffes verwendet werden, d.h. Schiffsmassenkraft  $\times$  Wasserspiegelneigung. Diese Näherung liefert gute Werte, wenn die Wasserspiegelneigung mit einem Schiff in der Kammer bestimmt wird, die aber auch noch akzeptabel sind (Abweichung  $\sim 20\%$ ), wenn sich kein Schiff in der Kammer befindet. Um die Wasserspiegelneigung zu bestimmen, wäre es naheliegend, diese direkt aus der VOF-Funktion (die den Füllungsgrad von Rechenzellen mit Wasser angibt) zu bestimmen. Dies ist jedoch nur zielführend, wenn die Gitterauflösung feiner ist als die auftretenden Variationen des Wasserspiegels. Bei typischen Wasserspiegelneigungen von  $< 1 \text{ ‰}$  würde dies zu einer exzessiven Gitterauflösung führen. Daher wurde hier ein Weg gewählt, der sich am Vorgehen im Labormodell anlehnt. Unter der Annahme eines hydrostatischen Druckprofils in der Schleusenammer wurde die Wasserspiegellage aus



dem Druckfeld berechnet. Damit ließ sich eine sehr viel bessere Auflösung der Dynamik des Wasserspiegels erzielen als bei Betrachtung der VOF-Funktion.

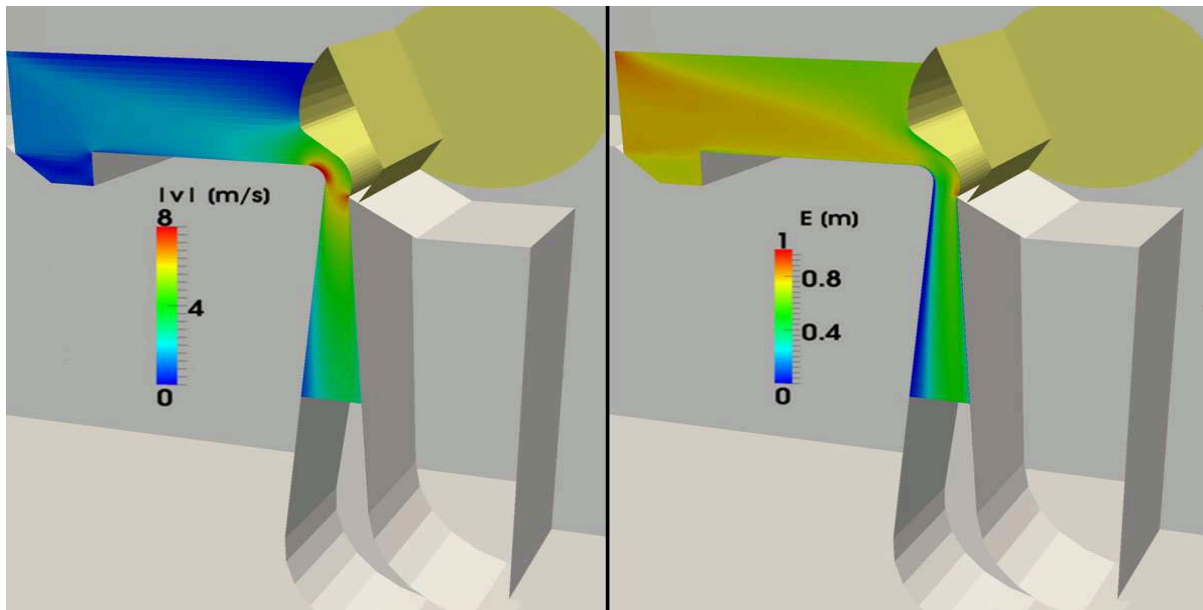


**Abbildung 6:** Aus den Wasserspiegelschwankungen errechnete Schiffskräfte für Labormodell und Simulation

Die Überprüfung dieser Methode wurde mit dem Labormodell „Minden“ vorgenommen. Die aus den Wasserspiegelschwankungen ermittelten Schiffskräfte liegen in Labormodell und numerischem Modell praktisch deckungsgleich übereinander (s. Abbildung 6). Lediglich mit fortschreitender Modellzeit zeigt sich ein leichter Phasenversatz, der hier jedoch ohne Relevanz ist. Die Abweichungen zum Labormodell liegen in der Schwankungsbreite der Laborergebnisse.

## 5 Untersuchung des vorgeschlagenen Systems

Auf der Basis der so validierten Modellkette wurde das neue hydraulische Konzept untersucht. Dabei wurde besonders darauf geachtet, die verwendeten numerischen Grundgrößen (Gitterauflösung, Zeitschrittweiten) nicht nachteilig zu verändern. Zur Ermittlung der lokalen Verluste am Übergang zwischen Drucksegment und Fallschacht wurde ein lokales Modell verwendet, mit dem für verschiedene Stellungen des Drucksegments die Verlustbeiwerte ermittelt wurden (s. Abbildung 7). Diese wurden als winkelabhängige Funktion in das eindimensionale Netzwerkmodell eingebunden.



**Abbildung 7:** Geschwindigkeit (links) und Energiehöhe (rechts) bei Füllung durch ein Drucksegment in den Fallschacht des Grundlaufsystems bei Vollöffnung

Mit dem kalibrierten Modellsystem wurde für verschiedene Szenarien das vorgeschlagene Füllsystem untersucht. Es zeigte sich, dass es eine etwas geringere maximale Leistungsfähigkeit aufweist als die klassische Einlaufkonfiguration. Diese kann jedoch ohnehin nicht vollständig ausgenutzt werden, da ansonsten die Strömungen im oberen Vorhafen zu groß wären. Die während der Schleusung auftretenden Schiffskräfte sind weiterhin gering und liegen noch deutlich unter den sonst bei Schleusen üblichen Werten.

Es bleiben derzeit jedoch noch einige Fragen offen, die mit der Kombination aus numerischem und Labormodell untersucht werden sollen. Insbesondere ist dies das Verhalten von im Füllsystem eingeschlossener Luft. Während im Normalbetrieb der Fallschacht schon zu Beginn der Restfüllung (als nach Ablauf der Füllung aus den Sparbecken) fast vollständig mit Wasser gefüllt ist, muss im gestörten Betrieb ohne Sparbecken von einer relativ großen Luftmenge im Fallschacht ausgegangen werden. Diese Luft muss schadfrei abgeführt werden, ohne durch aufsteigende Blasen das Schiff in der Kammer zu gefährden. Hierzu muss entweder nachgewiesen werden, dass dies unkritisch ist oder es müssen Abhilfemaßnahmen entwickelt werden. Ein weiteres zu untersuchendes Problem stellt die Eisbildung dar. Am Main-Donau-Kanal wird die Schifffahrt auch bei erheblicher Eisbildung noch aufrecht erhalten. Es ist zu untersuchen, ob durch die vorgeschlagene Konstruktion Eis angesaugt werden könnte, welches dann das Segment blockiert oder ob es zu einem Eisstau am Segment kommen kann.

## 6 Zusammenfassung

Für Sparschleusen großer Hubhöhe kann über die Kombination aus Drucksegment und Druckkammer eine Vereinfachung des Füllsystems erreicht werden, die eine deutliche Bau- und Betriebskostenreduktion erwarten lässt.

Um dieses Füllsystem kurzfristig auf seine Tauglichkeit zu prüfen, wurden numerische Modelle verwendet. Das hier vorgestellte Modellierungskonzept sieht eine Kopplung verschiedener Modelltypen für die numerische Abbildung des Füllprozesses großer Sparschleusen vor. Mit Hilfe des Labormodells der Schleuse Minden konnten die Füllzeit sowie die Wasserspiegelszillationen in der Kammer validiert werden. Für die Berücksichtigung des bewegten Schiffskörpers im numerischen Modell besteht jedoch noch Weiterentwicklungsbedarf.

Mit dem entwickelten Modellierungskonzept konnten grundlegende Fragen zur Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Systems geklärt werden, jedoch bleiben noch vielfältige zu untersuchende Fragen und die weitere Optimierung des Systems offen. Dies soll im Zuge eines F+E-Projekts in der BAW erfolgen.

## 7 Literatur

- Miller D. S.: Internal Flow Systems, British Hydromechanics Research Association, 1978.
- Thorenz, C. und Strybny, J.: On the numerical modelling of filling-emptying systems for locks, 10th International Conference on Hydroinformatics, 2012
- Thorenz, C. und Kemnitz, B. (2006): Füll- und Entleersysteme von Schleusen – aktuelle Entwicklungen und numerische Simulation, Internationales Wasserbau Symposium Aachen (IWASA), 6. Januar 2006, Shaker Verlag, Aachen 2006
- Weller, H.G., Tabor G., Jasak, H., Furby, C. (1998): A Tensorial Approach to CFD using Object Orientated Techniques, Computers in Physics, Vol. 12 No. 6, pp 620–631., 1998

Autor:

Dr.-Ing. Carsten Thorenz  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 97263560  
E-Mail: carsten.thorenz@baw.de