

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schneider, Josef; Richter, Wolfgang; Knoblauch, Helmut; Zenz, Gerald
Physikalische und numerische Untersuchungen von
Wasserschlössern im Rahmen der Neuerrichtung von
Pumpspeicherkraftwerken

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/20.500.11970/103452>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schneider, Josef; Richter, Wolfgang; Knoblauch, Helmut; Zenz, Gerald (2014): Physikalische und numerische Untersuchungen von Wasserschlössern im Rahmen der Neuerrichtung von Pumpspeicherkraftwerken. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 313-322.

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.



Physikalische und numerische Untersuchungen von Wasserschlössern im Rahmen der Neuerrichtung von Pumpspeicherkraftwerken

Josef Schneider
Wolfgang Richter
Helmut Knoblauch
Gerald Zenz

Für den Ausgleich elektrischer Energie im Verbundnetz, vor allem seit der verstärkten Zunahme volatiler alternativer Energieträger wie Wind oder Sonne, unterstützen Pumpspeicherkraftwerke erheblich die Netzstabilität. Die in letzter Zeit errichteten und aktuell geplanten Pumpspeicherkraftwerke sind vor allem durch ihre hohen Durchflussmengen gekennzeichnet. Eine weitere Forderung hinsichtlich des (hoch)flexiblen Betriebs sind sehr kurze Schaltzeiten. Die dadurch vorherrschenden hydraulischen Randbedingungen stellen neue Anforderungen an die Auslegung solcher Anlagen dar.

Im Rahmen dieses Beitrages sollen einige der am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz gewonnenen Erkenntnisse aus physikalischen und numerischen Untersuchungen vorgestellt werden. Im Laufe der letzten Jahre wurden unter anderem die Wasserschlösser für die Pumpspeicherkraftwerke Kops II, Limberg II, Reißbeck II, Atdorf und Obervermuntwerk II untersucht. Die physikalischen Versuche wurden numerisch ergänzt und somit konnten durch diesen hybriden Ansatz optimale Lösungen gefunden werden. Es wird im Beitrag auch auf die Skalenproblematik des Lufteintrages eingegangen, der naturgemäß durch die Verkleinerung des Prototyps auf Modellgröße auftritt.

Der vorgestellte Beitrag soll die aktuellen Erkenntnisse über die Modellierung von Wasserschlossern beleuchten.

Stichworte: Wasserschloss, Physikalische Modellierung, Numerische Modellierung, Pumpspeicherkraftwerk

1 Einleitung

Es ist eine allgemein anerkannte Tatsache, dass der Verbrauch an Energie in Europa ständig zunimmt. *Eurostat* (2012) gibt eine durchschnittliche jährliche Zunahme der erneuerbaren Primärenergie von 5,6 % zwischen den Jahren 2000 bis 2010 für die EU-27 Staaten an. Der Anteil der erneuerbaren Primärenergie am

gesamten Primärenergieangebot von 1990 bis 2006 nahm von 4,5 % auf 7,3 % zu und wird bis 2013 auf über 16 % weiter zunehmen (*statista*, 2014). Der Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland sowie die globalen Anstrengungen zur CO₂-Reduktion bedingen naturgemäß die Förderung alternativer Energiegewinnung. Es ist jedoch auch eine weitere allgemein anerkannte Tatsache, dass alternative Energiequellen wie Wind oder Sonne die Eigenschaften aufweisen, dass sie räumlich aber auch zeitlich nicht zwangsläufig mit dem Energiebedarf korrelieren. Somit kann es zu Überschüssen bei der Stromerzeugung kommen, die zwischengespeichert werden müssen. Es gibt mittlerweile eine Vielzahl an Möglichkeiten der Stromspeicherung (z.B. Batterien, „Power-to-Gas“), wobei diese hinsichtlich ihrer Größe, Ressourceneinsatz, Wirtschaftlichkeit, Betriebsdauer und Wirkungsgrad noch Entwicklungspotenziale aufweisen.

Eine bewährte Möglichkeit der Energiezwischenlagerung stellen Pumpspeicherkraftwerke dar, die ursprünglich vor allem für die Gewährleistung des gleichmäßigen Betriebes von Atomkraftwerken errichtet wurden. Diese Anlagen ermöglichen die Speicherung elektrischer Energie, indem sie bei Überschuss elektrischer Energie diese durch das Pumpen von Wasser aus dem Netz nehmen. Viele Studien zeigen, dass die Zunahme der Produktion alternativer Energie auch die Notwendigkeit der Neuerrichtung von Pumpspeicherkraftwerken nach sich ziehen wird. Des Weiteren werden die Energienetze zukünftig immer volatiler werden, was wiederum die Schnelligkeit der Umschaltvorgänge in Pumpspeicherkraftwerken vor neue Herausforderungen stellt.

Wasserschlosser stellen einen wichtigen Anlagenteil von Pumpspeicherkraftwerken sowie auch von herkömmlichen Hochdruckanlagen mit längeren Triebwasserwegen dar. Diese Bauwerke dissipieren die kinetische Energie des Druckstollens mit Ermöglichung der Massenschwingung und bieten den schnelllaufenden Druckstoßwellen Reflexionsflächen.

Im Rahmen dieses Beitrages sollen die wichtigsten Fragestellungen für die Untersuchung von Wasserschlossern auf Basis der Erkenntnisse mehrerer Modellversuche, die an der TU Graz durchgeführt wurden, zusammengefasst dargestellt werden. Vorab werden des Weiteren einige Bemerkungen über die Modellierung von Wasserschlossern angeführt.

2 Modellierung

2.1 Physikalische bzw. hydraulische Modelle

Das hydraulische Versuchswesen wird gemäß *Bollrich et al.* (1989) als Wissenschaft verstanden, die sich mit experimentellen Untersuchungen von Fließvor-

gängen an Bauwerken und Anlagen des Wasserbaus und der Wasserbehandlung unter Zuhilfenahme hydraulischer Modelle beschäftigt.

Für die Modelluntersuchungen von Wasserschlossern wird, wie bei der Darstellung von Freispiegelabflüssen üblich, standardmäßig das Froude'sche Modellgesetz herangezogen. Bei Strömungen, in denen Zähigkeitskräfte von Bedeutung sind, wird das Reynold'sche Modellgesetz angewendet, dies ist z.B. bei Rohrströmungen und der Ermittlung des Fließwiderstandes bei Drosseln der Fall.

Der Einfluss der Reynoldszahl im hydraulisch „rauen“ und Übergangsbereich nimmt mit ihrem Ansteigen ab und weist ab einer Größe von $1 \cdot 10^6$ einen immer flacheren Charakter auf. Da die Reynoldszahlen im Modell aufgrund der modellmäßigen Umrechnung im Vergleich zur Natur geringere Werte aufweisen, wird ein asymptotisches Näherungsverfahren eingesetzt, bei dem durch die Steigerung des Durchflusses im Modell auf Verlusthöhen in der Prototypausführung extrapoliert wird (*Klasinc et al., 1992*).

2.2 Numerische Modelle

1D- und 3D-numerische Untersuchungen sind heutzutage nicht mehr wegzudenken. Die Zunahme der Rechenleistung ermöglicht mittlerweile die Lösung einer Vielzahl von hydraulischen Fragestellungen, wobei man jedoch immer noch an Grenzen stößt, vor allem wenn die Abflussvorgänge durch Luft- oder Sedimentbeeinflussung komplex werden. Es ist abzusehen, dass sich viele Phänomene nur mit höherer zeitlicher und räumlicher Diskretisierung realistisch abbilden lassen. Hierbei zeigen vor allem Large Eddy Simulation einen großes Potential der Auflösung von Strömungsproblemen. Auch zeigen Untersuchungen, dass es für die 1D-numerische Simulation von Hochdruckwasserkraftanlagen noch Validierungspotential gibt. So ist die Modellierung des weitergeleiteten Druckstoßes beim Wasserschloss oder die Simulation des dynamischen Reibungsverlustes durch Druckstoßwellen noch nicht ausreichend genau modellierbar (*Storli, 2010*).

2.3 Hybride Modellierung

Geschichtlich betrachtet sind physikalische Modelle schon viel länger im Einsatz als numerische Modelle. Beide Ansätze haben ihre Vor und Nachteile. Unter dem Begriff der hybriden Modellierung versteht man eine Kombination zwischen hydraulischer und numerischer Modellierung, um für ein und dieselbe Fragestellung aus beiden Methoden die größten Vorteile ziehen zu können. Numerischen Vorberechnungen folgen meist physikalische Untersuchungen, die zusätzlich wieder numerisch unterstützt und ergänzt werden. Durch die Anwendung hybrider Modelle kann mit einer signifikanten Verbesserung der Ergebnis-

se gerechnet werden, da die numerische Berechnung im Allgemeinen in Prototypgröße erfolgt und somit prinzipiell nicht den Gesetzen der Skalierung unterworfen ist. Auch bietet die Numerik den Vorteil einer exakten Vorgabe von Randbedingungen. Allerdings ist zu Bedenken, dass eine hybride Untersuchung auch mehr Ressourcen und Zeit benötigt.

3 Modellversuche an der TU Graz

An der Technischen Universität Graz werden schon seit Bestehen des Wasserbaulabors Ende des 19. Jahrhunderts neben den klassischen Modellen mit freier Wasseroberfläche, wie flussbaulichen Fragestellungen oder Flusskraftwerken, hydraulische Untersuchungen von Druckmodellen durchgeführt. Neben Druckrohrleitungen und Grundablässen sind hier auch die Modelle der Wasserschlöser hervorzuheben. Im letzten Jahrzehnt wurden wieder verstärkt – aufgrund der vorhandenen Rahmenbedingungen – vermehrt Wasserschlöser sowohl physikalisch als auch numerisch an der TU Graz untersucht. Im Folgenden werden beispielhaft Erkenntnisse aus Untersuchungen der Wasserschlöser für die Pumpspeicherkraftwerke Kops II, Limberg II, Reißbeck II, Atdorf und Obervermunt II erwähnt.

3.1 Wasserschlöser

Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Kenndaten der Anlagen, an denen Wasserschlöser untersucht wurden.

Tabelle 1 Kenndaten untersuchter Anlagen (UW.. Unterwasser-Wasserschloss/ OW.. Oberwasser-Wasserschloss)

Anlage	Bruttofallhöhe	Leistung	Art des Wasserschlosses	Besonderheit
Kops II	800 m	3x150MW	UW, Druckluft	Sehr schnell, hydr. Kurzschluss
Limberg II	210 m	2x240MW	OW	45° Steigschacht
Reisseck II	595 m	2x215MW	OW	Stollen als Unterbecken
Atdorf	600 m	6x233MW	UW	Größe, Form
Obervermunt II	311 m	2x180MW	OW	Überfall aus Oberkammer

3.2 Art der Untersuchungen

Die folgende Auflistung zeigt einen Querschnitt möglicher Untersuchungen an Wasserschlossern, wie sie an der TU Graz durchgeführt wurden und werden.

Aufgrund der Komplexität der jeweiligen Fragestellungen, die sich aus der Einzigartigkeit der jeweiligen Anlagen ergeben, kann naturgemäß nicht jede Untersuchung in diesem Beitrag angeführt werden. Ziele von Wasserschlossuntersuchungen sind somit:

- Funktionsfähigkeit des Wasserschlosses/des Systems,
- Überprüfung des Massenschwingverhaltens für „Grenzzyklen“ (beliebige Schaltfolgen) im Turbinen- und Pumpbetrieb,
- Gestaltung und Überprüfung von Drosselblenden, Verlustbestimmung,
- Belüftung des Drosselbereiches, bzw. Kavitationsbetrachtung,
- Qualitative Beurteilung des Lufteintrages unter Peltonturbinen, Berücksichtigung des Überdruckes im System, Konstruktive Gestaltung der Kammern, um die Entgasung zu beschleunigen,
- Füllvorgänge Kammern (Volumendimensionierung/Zuschlagen),
- Abreißen der Wassersäule (Wasserfallproblematik in Steigschächten),
- Lufteintrag durch Wasserfälle,
- Bestimmung von Entgasungslängen (Unterkammern),
- Visuelle Überprüfung von Strömungsverhältnissen,
- Untersuchung von Schwall- und Sunkwellenausbreitung in Kammern,
- Beobachtung von Lufteinschlüssen,
- Bemessung von Belüftungsbauwerken (Oberkammern),
- Untersuchung von Saugwirbelbildungen,
- Untersuchung von Entleervorgängen (Neigung von Kammern bzw. Ausformung des Überfallbereiches),
- Berechnung von Kräften auf einzelne Bauwerksteile,
- Schwingungsuntersuchungen.

Da üblicherweise ein vollständiges System (klassisch: Triebwassereinlauf – Druckstollen – Wasserschloss – Druckschacht – Turbinen/Pumpen – Unterwasserweg – eventuell Unterwasser-Wasserschloss) aufgrund des Maßstabes im physikalischen Modell nicht abgebildet werden kann, werden meist die einzelnen Teile herausgelöst untersucht. So ist es z.B. üblich, das Wasserschloss möglichst großmaßstäblich zu errichten und die Zu- und Abflüsse vorab numerisch zu berechnen und diese dann mittels Steuerungs- und Regelungstechnik zu simulieren. Im Kapitel 3.4 sollen einzelne oben erwähnte Schwerpunkte kurz näher erläutert und mit Beispielen illustriert werden. Da jedes Pumpspeicherkraft-

werk einen Prototyp darstellt, ergeben sich natürlich jeweils spezielle Fragestellungen und Probleme, die individuell gelöst werden müssen.

3.3 Modellbau

Die Modelle von Wasserschlossern werden üblicherweise aus Plexiglas hergestellt, das die positiven Eigenschaften einer handwerklich genauen Herstellung der Modelle sowie der Durchsichtigkeit aufweist. Modelle mit größeren Fließgeschwindigkeiten bzw. Drücken (z.B. Drosseluntersuchungen) werden aus Edelstahl gefertigt. Ein Beispiel eines Vollmodells ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Vollmodell Atdorf, Maßstab 1:40

Der Betrieb des Modells erfolgt mittels schnell reagierender Druckluft Ventile, welche über einen kalibrierten PID-Regler gesteuert werden. Mit Hilfe magnetisch-induktiver Durchflusszähler wird der Durchfluss gemessen und mit dem Soll-Wert aus den Ergebnissen der 1D-numerischen Wasserschlossberechnung verglichen. Somit ist es möglich, instationäre Durchflüsse sehr genau abzubilden. Im Rahmen der Tests werden neben visuellen Beobachtungen (Fotos, Videos) und Wasserstands Messungen mit Ultraschall Sonden vor allem Geschwindigkeits- und Druckmessungen durchgeführt. Die Messungen der Drücke können über Differenz-Druckaufnehmer (statische Druckmessung) bzw. Direkt-druckaufnehmern (dynamische Druckmessung) erfolgen. Geschwindigkeitsmessungen der Luft erfolgen mit der Hitzedrahtmethode.

Eine Methode, um detaillierte Geschwindigkeitsfelder zu erhalten, stellen Messungen mittels *Particle Image Velocimetry* (PIV) dar. Dabei wird mit Hilfe eines pulsierenden Lasers und einer Hochgeschwindigkeitskamera ein hochauflösendes Geschwindigkeitsfeld erfasst. Zusätzlich zu dem hohen Informationsgehalt dieser Messungen sind PIV Messungen auch für die Kalibrierung und Validie-

rung von numerischen 3D-Berechnungen geeignet. Die Beurteilung der Messqualität hinsichtlich Druckmessungen erfolgt üblicherweise, indem Messungen im Modell mit den durch die numerischen 1D-Berechnungen vorgegebenen Druckverläufen verglichen und die Abweichungen bestimmt werden. Dabei ist der zeitliche Versatz durch die Trägheit der Steuer- und Regelungstechnik zu berücksichtigen.

3.4 Beispielhafte Untersuchung an Modellen

Drosselversuche - Verlustbestimmungen

Verlusthöhen in einem Wasserschloss setzen sich üblicherweise aus den direkten Formverlusten der Drossel sowie Umlenk-, Einlauf- und Auslaufverlusten zusammen. Reibungsverluste spielen üblicherweise eine untergeordnete Rolle. Modellversuche zur Bestimmung von Formverlusten in einer Drossel sollten nach dem Reynold'schen Ähnlichkeitsgesetz durchgeführt werden. Dies bedeutet jedoch, dass die Durchflüsse modelltechnisch nicht herzustellen sind und daher, die ermittelten Ergebnisse für größere Durchflüsse extrapoliert werden.

Bei physikalischen Drosseluntersuchungen wird entweder die Drossel so angepasst, dass vorgegebene Widerstandsbeiwerte sowohl in Auf- als auch Abströmrichtung erreicht werden oder es wird versucht, durch Geometrieadjustierungen möglichst große Widerstände zu erhalten.

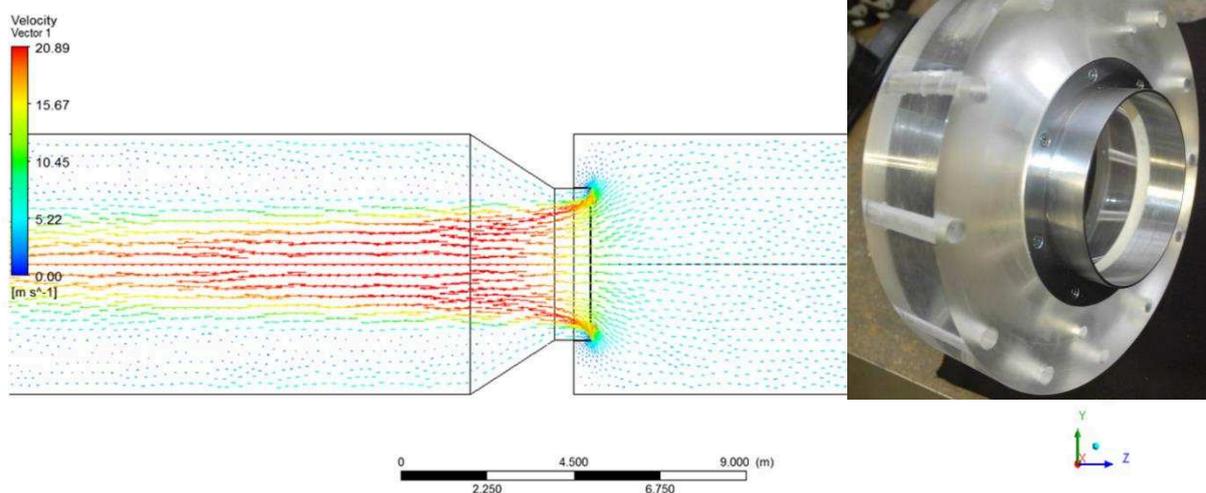


Abbildung 2: Drossel, numerische 3D- Untersuchung, Bild einer Modelldrossel

Wirbelbildung

Die Entstehung von Luftwirbeln im Modell kann maßstabsbedingt bei Froude-Modellen nur eingeschränkt abgebildet werden, da vor allem die Oberflächenspannung im Modell einer Wirbelbildung entgegenwirkt. Man kann daher davon ausgehen, dass Luftwirbel im Prototyp sicherlich auftreten werden, falls sich

diese im Modell bereits zeigen. Klassischen Ansätzen wie z.B. der Bestimmung der Überdeckungshöhe nach *Knauss* (1987) werden numerische 3D-Berechnungen ergänzend gegenübergestellt.

Im physikalischen Modell wird üblicherweise mit Hilfe von Einbauten wie z.B. Leitwänden versucht, die Strömung dementsprechend zu lenken, damit der Wirbelbildung entgegengewirkt wird.

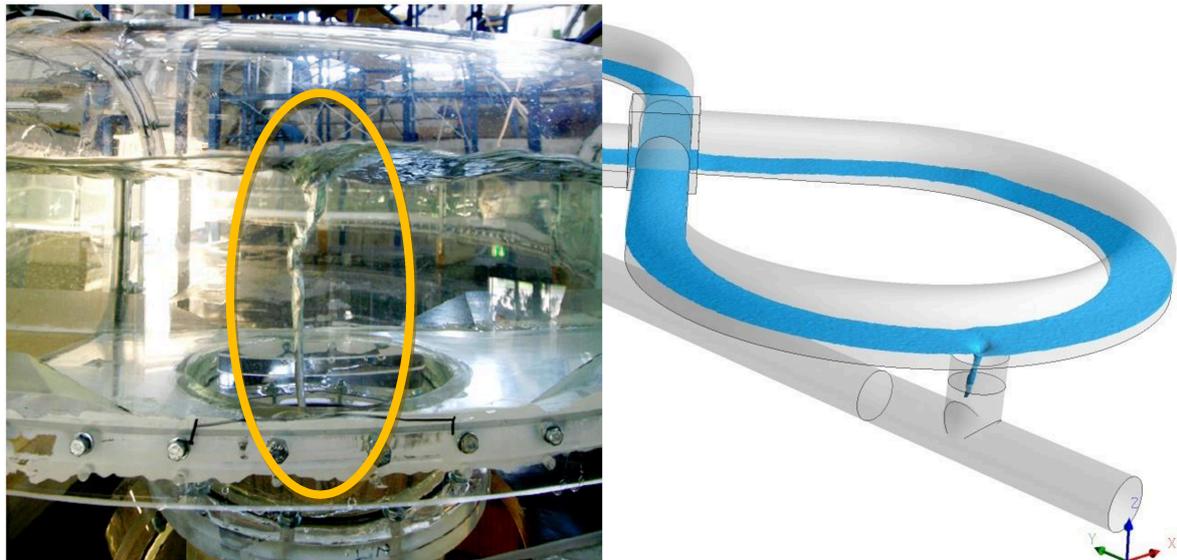


Abbildung 3: Wirbelbildung in einer Unterkammer bei einem extremen Mehrfachschaltfall, physikalisches Modell und numerische Berechnung

Luftproblematik

In Kammerwasserschlossern treten wegen Differentialeffekten (Abreißen der Wassersäule beim Übergang Oberkammer zu Steigschacht beim Abschwingen) häufig Wasserfälle auf. Für die Massenschwingung wirkt der Differentialeffekt dämpfend und ist somit positiv, allerdings bewirken auftretenden Wasserfälle zwangsläufig einen Lufteintrag in das Wasser. Vor allem bei tiefen Wasserspiegeln bzw. kurzen Anschlussverbindungen des Wasserschlosses zum Triebwasserweg besteht die Möglichkeit, dass Luft in den Triebwasserweg eingezogen wird. Dies lässt sich üblicherweise durch die Anordnung durchströmter Unterkammern unterbinden (ausreichende Ausgasungslängen). Aufgrund verschiedener Randbedingungen wurden jedoch in letzter Zeit vermehrt Wasserschlosser geplant und errichtet, die keine durchströmte Unterkammern aufweisen und somit hinsichtlich Entgasung genauer untersucht werden müssen.

Qualitativ kann mittels physikalischer Modelle die Luftproblematik abgeschätzt werden. Da die Problematik im Modell jedoch stark unterschätzt wird, müssen dementsprechend Adaptierungen vorgenommen werden. Es hat sich z.B. im Rahmen verschiedenster Untersuchungen im Labor der TU Graz gezeigt, dass

die Eindringtiefe der Luftblasen bei einem Wasserfall durch einen einfachen Faktor abgeschätzt werden kann. Das heißt, dass im Modell beobachteten Eindringtiefen mit dem Froudefaktor $Fr^{0.5}$ multipliziert der in der Natur auftretenden Eindringtiefen von Luftblasen entsprechen (Richter et al., 2013)



Abbildung 4: Ausfluss aus einem Wasserschloss ohne Lufteintrag (links), Lufteintrag in einen Druckstollen (rechts)

Die Länge der Entgasungsstrecken in Unterkammern kann üblicherweise in Modellversuchen bei höheren Skalierungsfaktoren nicht bestimmt werden, da sich die Luftblasen modellmaßstäblich nicht verkleinern lassen (zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand). Hier werden numerische Verfahren bzw. Literaturquellen herangezogen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft Entleervorgänge in Wasserschlossern.



Abbildung 5: Entleeren eines Steigschachtes in eine durchflossene Unterkammer (links), Entleervorgang aus einer Oberkammer (rechts)

4 Zusammenfassung

Die hybride Modellierung stellt einen zeitgemäßen Ansatz für die Untersuchungen von Wasserschlossern dar. Die hydraulisch komplexen und teuren Bauwerke lassen sich mit Hilfe analytischer und numerischer Ansätze sehr gut dimensionieren. Überprüft werden können diese Ergebnisse jedoch nur mit Hilfe physikalischer Modellversuche. Abgesehen von Optimierungsprozessen im Modell zeigt sich immer noch, dass im physikalischen Modell hydraulische Phänomene auftreten können, die nicht vorhergesehen wurden. Somit stellt der physikalische Modellversuch, vor allem bei komplexen Strömungsverhältnissen, eine zeitgemäße und absolut notwendige Methode dar. Versuche sind optisch anschaulicher und erleichtern die Vorstellung von instationären Abflussprozessen sowie die Lokalisierung von etwaigen Problembereichen. Auch leisten große komplexe Modelle einen wertvollen Beitrag zur Weiterbildung von Studenten und zur Öffentlichkeitsarbeit.

5 Literatur

- Bollrich, G. und Autorenkollektiv (1989): Technische Hydrodynamik, Band 2
Eurostat (2012): http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Renewable_energy_statistics/de#Weblinks abgerufen am 21.1.2014
Klasinc R., Knoblauch H, Dum T. (1992). Power losses in distribution pipes. Fluid flow modelling
Knauss, J. (1987): Swirling Flow Problems at Intakes; Rotterredam, ISBN 9061916437
Richter W., Schneider J, Zenz G. (2013): Ermittlung der Lufteindringtiefe eines Wasserfalls in einem Wasserschloss. Proceedings 15. Juwi Treffen, TU Graz
statista (2014): <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/16810/umfrage/europaeische-union-erneuerbare-energie-anteil-an-primaerenergie/> abgerufen am 21.1.2014
Storli, P.-T. (2010): Transient friction in pressurized pipes; the water hammer phenomenon. Doctoral Thesis, NTNU, Trondheim.

Autoren:

Ass.-Prof. DI Dr. Josef Schneider

DI Wolfgang Richter,
Ass.-Prof. DI Dr. Helmut Knoblauch,
Univ.-Prof. DI Dr. Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz
Stremayrgasse 10, A-8010 Graz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz
Stremayrgasse 10, A-8010 Graz

Tel.: +43 316 873 8862
Fax: +43 316 873 8357
E-Mail: schneider@tugraz.at

E-Mail: wolfgang.richter@tugraz.at
helmut.knoblauch@tugraz.at
gerald.zenz@tugraz.at