



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Jahresbericht 22. Dezember 2010**

---

# **Lufteintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge Einlaufwirbel**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Wasserkraft  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

«swisselectric research»  
Seilerstrasse 3  
CH-3001 Bern  
[research@swisselectric.ch](mailto:research@swisselectric.ch)

**Auftragnehmer:**

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
ETH Zurich  
Gloriastrasse 37/39  
8092 Zürich  
[www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch)

**Autoren:**

Georg Möller, Dr. Martin Detert, Prof. Dr. Robert Boes  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
ETH Zurich  
[moeller@vaw.baug.ethz.ch](mailto:moeller@vaw.baug.ethz.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Dr. Klaus Jorde

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154207 / 103191

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Zusammenfassung

Luft in Drucksystemen von Wasserkraftanlagen führt zu Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstössen und Durchflussreduktionen. Eine massgebende Quelle des Lufteintrags sind dabei Einlaufwirbel. Bis heute fehlt jedoch ein fundiertes Wissen zum Mechanismus und damit zur Quantifizierung des Lufteintrags. Es müssen daher auf der sicheren Seite liegend entsprechend grosse Reserven bei Planung und Betrieb eingehalten werden. Mit einer detaillierten Prognose der Lufteintragsrate und der Quantifizierung deren Schadenspotentials kann jedoch eine Wasserkraftanlage und insbesondere deren Speicherbewirtschaftung wirtschaftlich optimiert bemessen und betrieben werden.

Im Labor der VAW werden grossmassstäbliche physikalische Modellversuche in einem Tank von ca. 50 m<sup>3</sup> Volumen durchgeführt, bei dem lufteinziehende Wirbel bei Abflüssen bis 500 l/s untersucht werden. Das Modell ermöglicht die Einhaltung der heute bekannten Grenzwerte bzgl. der Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen um ein Mehrfaches.

Die Vermessung des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes um den Wirbel erfolgt mittels eines 2D-*Particle Image Velocimetry* (PIV) auf einer Gesamtfläche von bis zu 1 m<sup>2</sup>. Bis Ende 2010 konnten in ersten Versuchen horizontale Geschwindigkeitsfelder um den Wirbel in einer Auflösung von 3x3 cm<sup>2</sup> erfolgreich beschrieben werden. Die Rotation um das Zentrum des Wirbels wirkt sich grossräumig aus. Die visuell abgeschätzte Lufteintragsrate ist dabei wesentlich grösser als erwartet, eine vollständige Entlüftung bei grossen Lufteintragsraten ist noch nicht gelungen. Eine Einrichtung zur Quantifizierung des Lufteintrags wird zurzeit noch angepasst.

In den Versuchsreihen für 2011 werden u.a. die wesentlichen Einflussfaktoren auf den durch Einlaufwirbel erzeugten Lufteintrag systematisch variiert und untersucht. Ziel ist es, mit den im Modell erfassten Messdaten die Lücke im Grundlagenwissen und in der praktischen Bemessung von Einlaufbauwerken bzw. dem Betrieb von Wasserkraftanlagen zu schliessen.

## Projektziele

Bei Wasserkraftanlagen fliesst das Triebwasser zur Energieproduktion typischerweise durch Druckstollen und -leitungen. Luft im Druckleitungssystem verändert die Abflusseigenschaften von einem einphasigen Fluid (Reinwasser) zu einer Zweiphasenströmung (Wasser-Luft-Gemisch). Dies wirkt sich markant auf den Betrieb, die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit aus. Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstösse und Durchflussreduktionen können die Folge sein. Eine massgebende Quelle des Lufteintrags sind Einlaufwirbel. Ein fundiertes Verständnis zum Mechanismus und damit zur Quantifizierung des Lufteintrags ist nicht gegeben, so dass bisher auf der sicheren Seite liegend entsprechende Reserven bei Planung und Betrieb einzuhalten sind. Bei Kenntnis der Lufteintragsrate können jedoch deren negative Auswirkungen quantifiziert werden bzw. die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage und insbesondere die Speicherbewirtschaftung optimiert werden.

Die Ziele des vorliegenden Forschungsprojekts sind:

- Bestimmung der Lufteintragsrate typischer Einlaufwirbel an Triebwasserfassungen von Kraftwerken mit Hilfe eines grossmassstäblichen physikalischen Modells; dazu wird der Zusammenhang zwischen den relevanten Parametern des Wirbels, beispielsweise der Zirkulation, und der Lufteintragsrate systematisch untersucht und analysiert

- Vervollständigung bestehender analytischer Ansätze zur Beschreibung des Phänomens mit Hilfe der Projektdaten
- Präzisierung bekannter Wirbeltypen und Validierung üblicher Kennzahlen zur Beschreibung der Anströmung
- Ableitung von Instrumenten zur praxistauglichen Bestimmung der eingetragenen Luft, basierend auf den mit den experimentellen Untersuchungen gängiger Einlaufgeometrien entwickelten Bemessungsgleichungen

Optional wird darüber hinaus eine Prototyp-Fallstudie angestrebt. Die Messung der Lufteintragsrate ist dabei in der Praxis jedoch nicht realisierbar. Die vereinfachte Messung der Zirkulation von Wirbeln und deren direkter Vergleich zu den im Modell ermittelten Daten soll die Übertragbarkeit beschreiben.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Ein grossmassstäbliches physikalisches Modell ist an der VAW erstellt worden. In Abb. 1 sind der Tank und das horizontale Einlaufrohr zu sehen. Die Gesamtlänge des Modells beträgt 18.5 m. Der Tank, in dem sich die Einlaufwirbel bilden, hat ein Volumen von ca.  $50 \text{ m}^3$ . Mit zwei frequenzgesteuerten Pumpen wird ein maximaler Zufluss zum Tank von ca. 500 l/s erreicht. Das horizontale Einlaufrohr hat eine Länge von 3.8 m und wird mit Durchmessern  $d = [0.2, 0.3, 0.4] \text{ m}$  als Modellfamilie untersucht. An dieses Rohr schliesst eine Aufweitung auf ein Rohr mit einem Durchmesser von 0.5 m und einer Neigung von  $5^\circ$ . In diesem Rohr wird mit Hilfe einer Entlüftungseinrichtung die Lufteintragsrate ermittelt. Mittels *2D-Particle Image Velocimetry* (PIV) kann die Strömungsgeschwindigkeit auf einer Fläche von ca.  $1 \text{ m}^2$  gemessen werden. Dazu ist die optische Zugänglichkeit durch zwei Seiten- und eine Bodenscheibe gewährleistet. Relative Überdeckungshöhen des Einlaufs  $h/d$  können in einem Bereich von 0 bis 8 untersucht werden. Hierbei ist  $h$  = Überdeckungshöhe bezogen auf die Rohrachse und  $d$  = Rohrdurchmesser. Die Strömung im Einlauf kann mit der Einlauf Froudezahl  $= v_{\text{Rohr}}/(gd)^{0.5}$  charakterisiert werden, mit  $v_{\text{Rohr}}$  = Rohrströmungsgeschwindigkeit.  $F_d$  kann zwischen 0 und 10 variiert werden. Innerhalb der beiden Bereiche ( $h/d$ ,  $F_d$ ) lassen sich Zustände ähnlich wie im Prototyp simulieren. Abb. 2 skizziert eine Versuchsdurchführung. Parameter wie beispielsweise  $h$  = Überdeckungshöhe bezogen auf die Rohrachse,  $d$  = Rohrdurchmesser und  $v_{\text{Rohr}}$  = Rohrströmungsgeschwindigkeit. Publierte Grenzwerte bzgl. der Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen werden mit dem Modell um ein Mehrfaches eingehalten. Abb. 2 skizziert eine Versuchsdurchführung.



Abb. 1: Physikalisches Modell an der VAW mit schwarzem Tank (Volumen ca. 50 m<sup>3</sup>) und horizontalem Einlaufrohr aus Plexiglas ( $d = 0.4$  m).

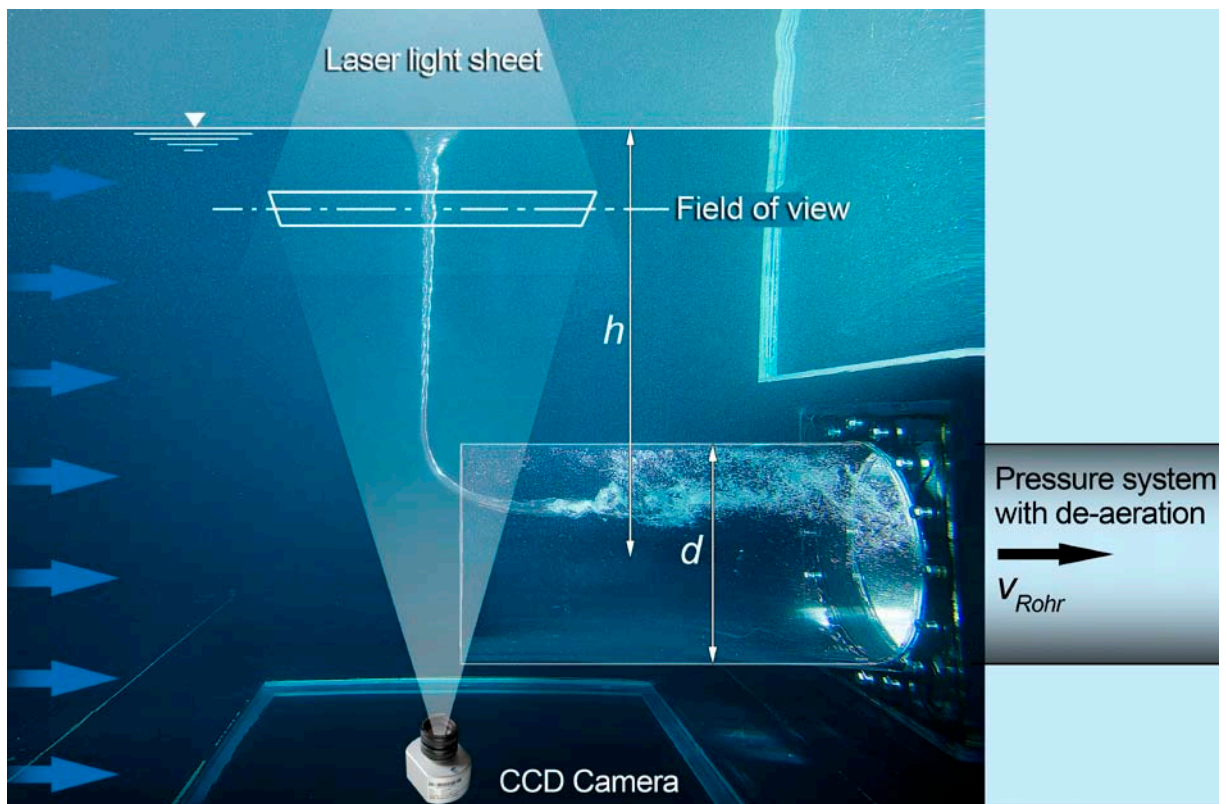


Abb. 2: Schema einer Versuchsdurchführung im physikalischen Modell mit lufteinziehendem Einlaufwirbel. Die Vermessung des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes um den Wirbel erfolgt mittels 2D-PIV auf einer Gesamtfläche von ca. 1 m<sup>2</sup>.

Die Modellversuche konnten im Oktober 2010 erfolgreich gestartet werden. Alle Elemente des Modells funktionieren, Einlaufwirbel bilden sich wie geplant. Erstaunlicherweise treten lufteinziehende Wirbel bereits bei verhältnismässig geringen Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{\text{Rohr}}$  und grossen Überdeckungshöhen  $h$  auf. Die Wirbel besitzen einen durchgehenden Luftschauch von der Wasserspiegeloberfläche bis weit in das Einlaufrohr (vgl. Abb. 2). Der Luftschauch besitzt einen unerwartet grossen Durchmesser, deutlich sind zudem Kapillarwellen erkennbar. Das Auftreten kann als relativ stationär beurteilt werden. Es zeigt sich, dass der Luftschauch den Einlaufquerschnitt bei verschiedenen Wirbeln nicht nur im oberen Bereich penetriert. Die Änderung der Geschwindigkeits- bzw. Druckverteilung im Strömungsfeld wird als ursächlich für die Position im Einlaufquerschnitt betrachtet. Im Einlaufrohr wird der Luftschauch in Luftblasen zerrissen und es bilden sich kohärente Turbulenzstrukturen der Blasen im Druckabfluss (vgl. Abb. 2 und Abb. 3). Die Lufteintragsrate, d.h. das Verhältnis aus Luft- und Wasserdurchfluss, ist unerwartet gross. Mit der derzeit installierten Entlüftungseinrichtung kann nur ein Teil der eingetragenen Luft entlüftet und somit gemessen werden. Das Modell wird in 2011 daher mit einer zusätzlichen Entlüftungseinrichtung ausgerüstet.



Abb. 3: Zweiphasenströmung (Wasser-Luft-Gemisch) infolge des Einlaufwirbels im Drucksystem.

Abb. 4 zeigt schematisch den Einsatz des 2D-PIV-Systems. Das horizontale Geschwindigkeitsfeld liegt hier ca. 10 cm unterhalb des Wasserspiegels. Der Einlaufwirbel wird senkrecht zur Rotationsachse geschnitten. Die 4Mpix CCD-Camera befindet sich unterhalb des Tanks und hat über eine Glasscheibe Sichtkontakt. Der Laserschnitt wird von der Seite mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser aufgespannt. Abb. 4 gibt eine exemplarische Darstellung des gemessenen horizontalen Geschwindigkeitsfeldes um den Wirbel. Die ersten Resultate zeigen einen grossräumigen Rotationskörper mit einer von aussen nach innen zunehmenden Tangentialgeschwindigkeit.

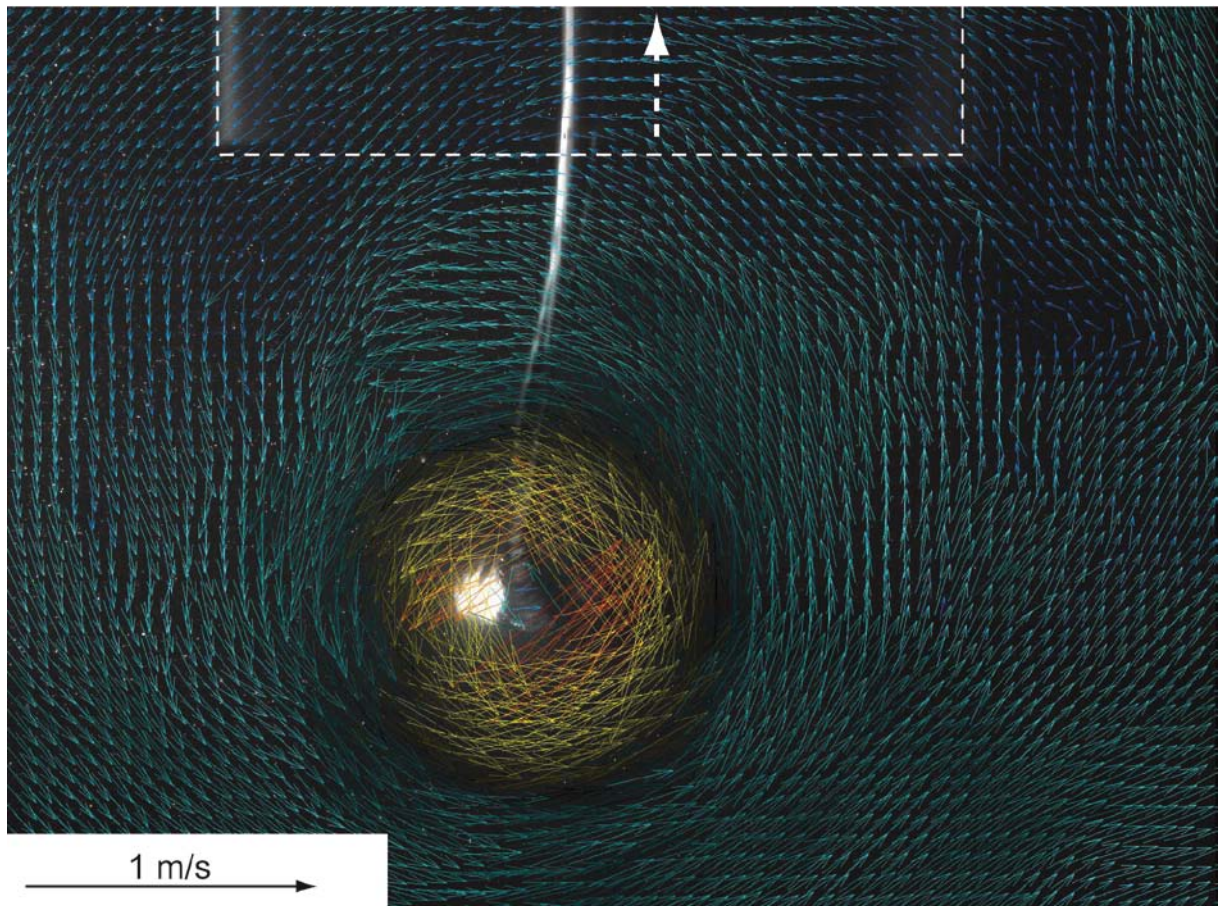


Abb. 4: Ausschnitt des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes. Der horizontale Lichtschnitt liegt zwischen dem Wasserspiegel und dem Einlaufrohr. Im Hintergrundbild sind die Lage des Wirbels mit Schlauch sowie das Einlaufrohr erkennbar.

## Bewertung 2010 und Ausblick 2011

Der Abschluss des Modellbaus hat sich um einen Monat von September auf Oktober 2010 verschoben. Die Messtechnik des Modells, das 2D-PIV, konnte wegen Lieferfristen erst 2 Monate später in Betrieb genommen werden. Dadurch verschiebt sich das Projektende voraussichtlich von 09/2012 auf 11/2012.

In den Versuchreihen für 2011 sollen nun die wesentlichen Einflussfaktoren auf den durch Einlaufwirbel erzeugten Lufteintrag systematisch variiert und untersucht werden. Eine detaillierte Untersuchung des Strömungsfeldes des Wirbels wird durchgeführt. Die Entlüftung der gesamten eingezogenen Luft aus dem Drucksystem ist ein wichtiger Baustein der Analyse. Im Fokus der Untersuchung steht die Erfassung der Lufteintragsrate in Abhängigkeit von Stollendurchmesser, Durchfluss, Überdeckung, Randabstand und Symmetrie der Anströmung. Es werden Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern untersucht, validiert und in Form von semi-empirischen Gleichungen beschrieben, wie z. B. zwischen der Zirkulation im Bereich der Anströmung, berechnet aus dem gemessenen Geschwindigkeitsfeld, und der Lufteintragsrate.