Physikalischer Modelversuch und Cfd-Simulation einer asymmetrischen Drossel in einem T-Abzweigstück

Zusammenfassung: Zur Ermittlung der Verluste einer asymmetrischen Drossel, die in einem T-förmigen Abzweigstück des Triebwasserweges einer Hochdruckanlage situiert ist, wurden hydraulische Modellversuche im Maßstab 1:21 und numerische Simulationen unter unterschiedlichen Strömungsverhältnissen durchgeführt. Aufgrund der komplexen Form des Abzweigstückes wurde die Form mit einer neuartigen Methode mittels CNC-Technik aus einem Hartschaumblock gefräst. Die CFD-Simulationen wurden durchgeführt um zu ermitteln, unter welchen Umständen die Numerische Simulation verlässliche Ergebnisse liefern kann.

Physical scale model test and CFD simulation for an asymmetrical throttle in a T-branch

Summary: Hydraulic model tests at a scale of 1:21 and numerical simulations were conducted for various flow conditions to study the loss occurring in an asymmetrical throttle situated in a T-shaped branch in the power conduit of a highhead hydro plant. The complex shape of the piece had to be cut from a rigid foam block using CNC. The intended purpose of the CFD simulations was to study the circumstances under which numerical simulations can yield reliable results.

1. Einführung

Die asymmetrische Drossel befindet sich in dem abzweigenden Ast eines T-förmigen Abzweigstückes im Druckschacht einer Hochdruck-Wasserkraftanlage. Der kreisförmige Schacht (Druck- und Steigschacht) besitzt einen Innendurchmesser von 3,60 m (Zweig ,a') und eine Neigung von 42° gegen die Horizontale. An den Druckschacht schließt ein Krümmer an, dessen kreisförmiger Querschnitt sich auf 7,20 m (Zweig ,c') aufweitet und dann in die hufeisenförmige Wasserschloss-Unterkammer übergeht. Gegen Ende des Krümmers, ca. 5 m vor dem Beginn des Übergangstückes, zweigt im rechten Win-

Abb. 1: Vertikalschnitt durch das T-Stück (Naturmaße; in cm).

Abb. 2: 3d-Illustration von Drossel und Krümmer mit T-Abzweigstück.

Abb. 3 a, b: Fräsen der Krümmer-Halbschalen (links); Drossel (rechts).

kel zur Krümmerachse der Übergangsbogen zum Steigschacht ab (Zweig ‚b‘), in dem sich die Drossel befindet.

Abbildung 2 zeigt eine 3d-Illustration der Drossel und des gebogenen Krümmers mit dem T-Stück.

1.1. Untersuchte Betriebsfälle

Sieben verschiedene Betriebsfälle wurden untersucht (vgl. Abb. 2 und Tab. 1).

2. MODELLVERSUCHE

Eine physikalisch exakte Nachbildung nach dem Reynolds'schen Modellgesetz ist bei solchen Modellversuchen in der Regel unmöglich, da sich unter Zugrundelegung des Reynoldschen Modellgesetzes das Verhältnis der Geschwindigkeiten in Natur und Modell im reziproken Längenmaßstab verhält (bei gleicher Zähigkeit). Man hilft sich in der Praxis damit, den Durchfluss bis zum versuchstechnisch Möglichen zu steigern und bei unterschiedlichen Durchflüssen die Verlustbeiwerte zu messen (vgl. z. B. Kobus, 1978). Nähert sich mit zunehmenden Reynoldszahlen der Verlustbeiwert – innerhalb gewisser messtechnischer und versuchstechnischer Grenzen – einem konstanten Wert an, so kann er auf den entsprechenden Reynoldsbereich in der Natur extrapoliert werden.

Der Längenmaßstab wurde mit 1:21 festgelegt und das Gesamtsystem – wie bei solchen Versuchen häufig angewandt – horizontal liegend eingebaut (der Einfluss der Gravitation ist hier vernachlässigbar). Die Herstellung des Krümmers erfolgte durch Fräsen: mittels CNC-Technik wurden aus 2 Hartschaumblöcken a 2 x 1 x 0,5 m zwei Halbschalen gefräst, danach händisch glatt geschliffen und dann entlang der Symmetrieebene zusammengepresst (vgl. Abb. 3a).

Die Drossel wurde aus einem Aluminiumblock ebenfalls mittels CNC-Technik gefräst, in den vorbereiteten Rohrabzweiger eingebaut und am Hartschaumblock befestigt (vgl. Abb. 3b).

Die anschließenden Rohrleitungen und der Rohrkrümmer bestanden aus Plexiglas (Rohrdurchmesser 172 mm, die hufeisenförmige Wasserschloss-Unterkammer hatte einen mittleren Durchmesser von ca. 348 mm). Die Rohrleitungen wurden ebenfalls zugfest am Krümmerblock befestigt. An den Enden der Rohrstücke waren Honeycombs zur Strömungsgleichrichtung eingebaut. Je nach untersuchtem Lastfall wurde durch

TABELLE 1

Betriebsfälle

Fall	Beschreibung	Zweig 'a'	Zweig 'b'	Zweig 'c'
1	100 % Zufluss vom Speicher 100 % zum Wasserschloss	0	--	++
2	100 % Zufluss vom Speicher 50 % zum Wasserschloss, 50 % zum Druckschacht	-	-	++
3	100 % Zufluss vom Druckschacht 100 % zum Wasserschloss	++	--	0
4	100 % Zufluss vom Druckschacht 50 % zum Wasserschloss, 50 % zum Speicher	++	-	-
5	100 % Zufluss vom Wasserschloss 100 % zum Speicher	0	++	--
6	100 % Zufluss vom Wasserschloss 100 % zum Druckschacht	--	++	0
7	100 % Zufluss vom Wasserschloss 50 % zum Speicher, 50 % zum Druckschacht	-	++	-

++ Zufluss 100 %, -- Abfluss 100 %, - Abfluss 50 %, 0 kein Durchfluss

Abb. 4: Skizze des Modellstandes (Maße in mm).

TABELLE 2

Verlustbeiwerte aus den Modellversuchen

Fall	Q_{Dr} / Q_{total}	K_{2-6} bzw. K_{5-1} (nicht durch Drossel gehend)	K_{2-4} bzw. K_{3-1} (durch Drossel)
Fall 1	1,0	$\zeta_{5-1} = 0,03$	$\zeta_{3-4} = 1,60$
Fall 2	0,5	$\zeta_{5-1} = 0,05$	$\zeta_{5-4} = 1,63$
Fall 3	1,0	$\zeta_{2-6} = 0,07$	$\zeta_{2-4} = 1,72$
Fall 4*	0,5	$\zeta_{2-6} = 0,23$	$\zeta_{2-4} = 2,20$
Fall 5	1,0		$\zeta_{3-6} = 1,00$, $\zeta_{3-1} = 0,97$
Fall 6	1,0		$\zeta_{3-6} = 0,95$, $\zeta_{3-1} = 1,04$
Fall 7	0,5		$\zeta_{3-6} = 1,04$, $\zeta_{3-1} = 1,06$

* Im Gegensatz zu Lastfall 3 wird im Lastfall 4 beim selben Durchfluss durch die Drossel der Strang a mit der doppelten Wassermenge (und Fließgeschwindigkeit) durchströmt. Somit ist die Geschwindigkeitshöhe im Strang a im LF4 wesentlich größer, als beim selben Drosseldurchfluss im LF3, während die gemessenen statischen Drücke annähernd gleich sind. Daher ist auch der aus dem totalen Druck errechnete Verlustbeiwert im LF4 deutlich größer.

Abb. 5: Foto des Versuchstandes.

Steuerung der Schieber in den Ablaufrohrsträngen die entsprechende Durchflusseinstellung vorgenommen und der Druck so eingestellt, dass einerseits der Druck in den Messstellen ausreichend groß war, um ein Lufteinziehen zu verhindern und andererseits nicht zu hoch wurde, um ein Bersten der Leitung zu verhindern.

Die Durchflussmessung erfolgte mit 2 magnetisch-induktiven Durchflussmessern (IDM), von denen je einer in der Zu-/Ablaufrohrleitung des Druck- und des Wasserschloss-Steigschachtes angeordnet war. Druckdifferenzen zwischen zwei Messquerschnitten wurden mit einem Differenzdruckaufnehmer gemessen.

Zur Druckmessung waren zwei Messquerschnitte in jedem Zweig vorgesehen: der erste in Fließrichtung möglichst nahe vor dem T-Stück und der zweite nach dem T-Stück möglichst weit davon entfernt (mehr als $10 \times D$), sodass sich die Druckverhältnisse dort wieder weitgehend vergleichmäßig hatten.

2.1. Ermittlung der Drosselverluste

Der Verlustbeiwert errechnet sich aus:

$$\zeta_{ij} = \frac{\text{totaler Druck in Querschnitt i} - \text{totaler Druck in Querschnitt j} - \text{Rohrreibung}}{v_{Dr}^2 / 2g}$$

mit v_{Dr} ... mittlere Fließgeschwindigkeit im engsten Drosselquerschnitt ($D_{Dr} = 2,47$ m in Natur / $0,117$ m im Modell). Die mittleren örtlichen Geschwindigkeitshöhen wurden zu den gemittelten (statischen)

Abb. 6: Anordnung der Druckmesspunkte (Maße in mm).

Abb. 7: Netzdetail.

Abb. 8: Verlustbeiwerte K 5-4, Fall 1 und 2.

Abb. 10: Verlustbeiwerte K 3-1, Fall 7.

Abb. 9: Verlustbeiwerte K 2-4, Fall 3 und 4.

Abb. 11: Verlustbeiwerte K 3-6, Fall 7.

Drücken addiert, um die totalen Drücke (= statischer Druck + dynamischer Druck) zu erhalten (Miller, 1978).

Je nach Lastfall betragen die Durchflüsse zwischen 20 l/s und 90 l/s im Modellversuch. In allen Lastfällen war der Verlustbeiwert entweder – innerhalb der erzielbaren Messgenauigkeit – konstant, oder er näherte sich mit zunehmendem Durchfluss jeweils einem konstanten Wert an. Die Verlustbeiwerte wurden dann auf die Natur-Reynoldszahlen extrapoliert (vgl. z. B. Klasinc et al., 1992) und sind in *Tabelle 2* zusammengefasst und werden später mit den Ergebnissen der CFD-Simulation verglichen.

3. CFD-Simulation

3.1. Allgemeines

Die CFD-Simulationen wurden mit Fluent 6.3.26 durchgeführt und die wandnahen Zonen in der Regel mit der „standard wall function“ modelliert – die Größe der wandnahen Zellen lag im Be-

reich von 2 mm. Die Netz-Unabhängigkeit wurde anhand mehrerer Netze überprüft.

3.2. Ergebnisse der CFD-Simulation

Die CFD-Simulationen wurden für alle beschriebenen Lastfälle mit variierenden Durchflüssen durchgeführt. In den Fällen 1 bis 4 stimmten die Verlustbeiwerte mit den Experimenten sehr gut überein (siehe *Abb. 8* und *Abb. 9*).

In den Fällen 5 bis 7 wichen die Ergebnisse der CFD-Simulation von den Experimenten ab: die Verluste waren in der Simulation um ca. 20 % höher. In diesen Lastfällen trifft die aus der Drossel austretende Strömung direkt und in sehr hoher Geschwindigkeit auf die gegenüberliegende Wand des Krümmers – aufgrund der hohen Druck- bzw. Geschwindigkeitsgradienten erschien es sinnvoll, die Grenzschicht aufzulösen – was aber zu äußerst kleinen Zellen führt und aufgrund der hohen Rechenzeiten und des Speicherbedarfs kaum durchführbar ist. Ein paar Si-

mulationen wurden mit aufwändigeren Turbulenzmodellen und mit sehr kleinen Zellen durchgeführt (y^+ -Werte zwischen 2 und 10), jedoch konnte trotz des hohen Aufwandes der im Experiment beobachtete Verlustbeiwert nicht exakt nachgerechnet werden. Es scheint, dass die CFD-Simulation hier an ihre Grenzen stößt. ■

Korrespondenz:

DI Dr. Boris Huber
TU-Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich Wasserbau
Karlsplatz 13/222
1040 Wien
E-Mail: boris.huber@kw.tuwien.ac.at

LITERATUR

- Kobus H (1978) „Wasserbauliches Versuchswesen“, Dt. Verband für Wasserwirtschaft, Mitteilungsheft 4
Miller DS (1978) „Internal Flow Systems“, BHRA Fluid Engineering, Vol.5
Klasinc R, Knoblauch H, Dum T (1992) „Power Losses in Distribution Pipes“, 4th International Conference Hydrosoft 92, Valencia,
Fluent 6.3 manual