

# ABSPERR- UND REGELORGANE IN WASSERKRAFTANLAGEN

von Benigni Helmut, Höller Stefan, Jaberg Helmut und Mosshammer Markus

Seit mehr als 100 Jahren wird Strom aus Wasserkraft erzeugt. Die Hauptaufgabe ist heute, neben der Grund- und Spitzenlastherzeugung, immer stärker die Netzstabilität durch solche Kraftwerke aufrecht zu erhalten. Es muss ständig ein Gleichgewicht zwischen Produktion und Verbrauch vorhanden sein. Durch den immer größer werdenden Anteil an erneuerbarer Energie wird der Bedarf an Speicherkapazitäten und rasch verfügbaren Regelkapazitäten stetig höher.

**P**umpspeicherkraftwerke sind bis dato die einzig verfügbare Technologie um Strom großtechnisch zu speichern. Mittlerweile gibt es auch einen hohen Austausch von Strommengen in Europa, der etliche Netze an den Rand der Belastbarkeit gebracht hat, und dies fordert neue, eventuell übergeordnete Netze, die sich nur mittel- oder langfristig mit einem enormen Kostenaufwand umsetzen lassen. Davon betroffen sind vor allem die Alpenländer in Richtung Nord-Süd. In den letzten Monaten hat sich der Kostendruck weiter erhöht, und durch einseitige Förderschienen in andere Energieträger ist der weitere Ausbau in Richtung Wasser-

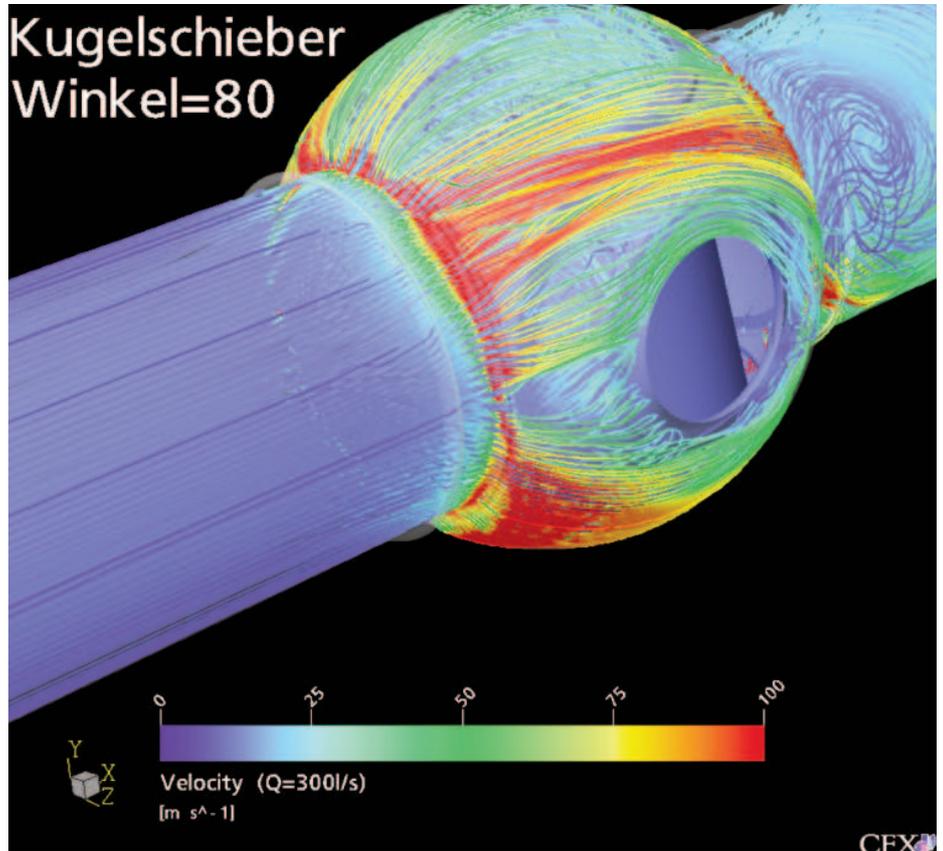


Abbildung 1: Kugelschieber, Stromlinien (aus CFD-Simulation) bei Stellung 80° geschlossen Grafik: TU-Graz

kraft nachhaltig gefährdet. Dies hat vor allem damit zu tun, dass für den erzeugten Strom zwar ähnliche Beträge gezahlt werden, die rasche Verfügbarkeit und großtechnische

Speichermöglichkeit jedoch nicht abgeboten wird. Somit sind auch neue Konzepte gefordert, alte Anlagen müssen modernisiert, in ihrer Leistungsfähigkeit erhöht und um neue Betriebsmodi erweitert werden.

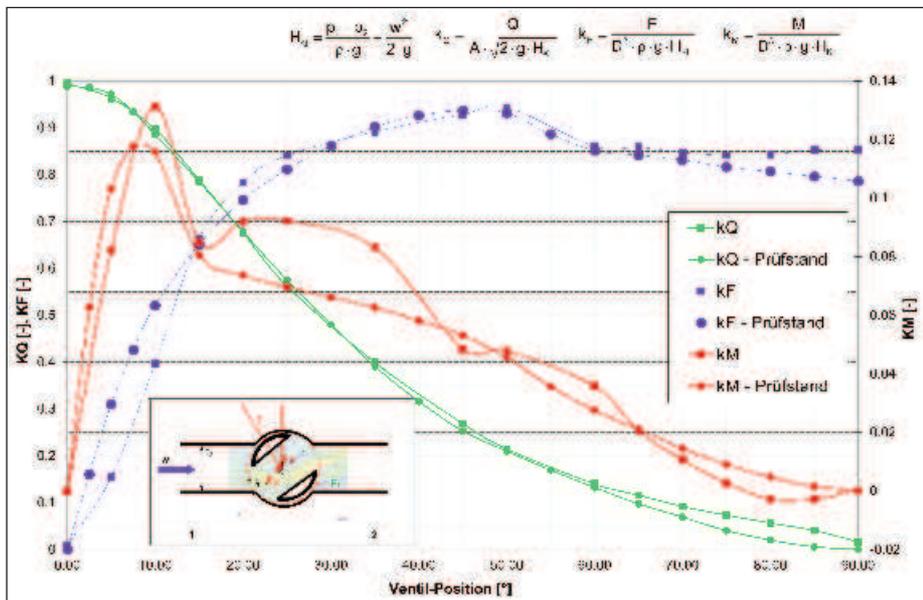


Abbildung 2: Charakteristische Beiwerte und deren Definition (nach Grein) eines Kugelschiebers über dem Verstellwinkel, Vergleich numerische Simulation und Prüfstand Grafik: TU-Graz

## ABSPERR- UND REGELORGANE ALS INTEGRALER ANLAGENBESTANDTEIL

Wasserkraftanlagen, egal welcher Bauart und Größe, haben zumindest immer eines gemeinsam – sie funktionieren nur dann einwandfrei, wenn die geeigneten Absperr- und Regelorgane eingesetzt werden. Neben der Gewährleistung eines reibungslosen Betriebes sorgen speziell die Absperrorgane auch für die nötige Sicherheit bei einem eventuellen Notfall wie beispielsweise Rohrbruch oder Lastabwurf. Am häufigsten handelt es sich dabei um Kugelschieber, Kegelstrahlschieber oder Ringschieber bzw. Klappen.

Absperrventile sind nicht dazu gedacht den Durchfluss in der Anlage zu regulieren, und sind aus diesem Grund im Regelbetrieb auch vollständig geöffnet. Die Regelung der Wassermengen erfolgt, je nach Anlage, über die Lauf- und Leiträder einer Francis- oder

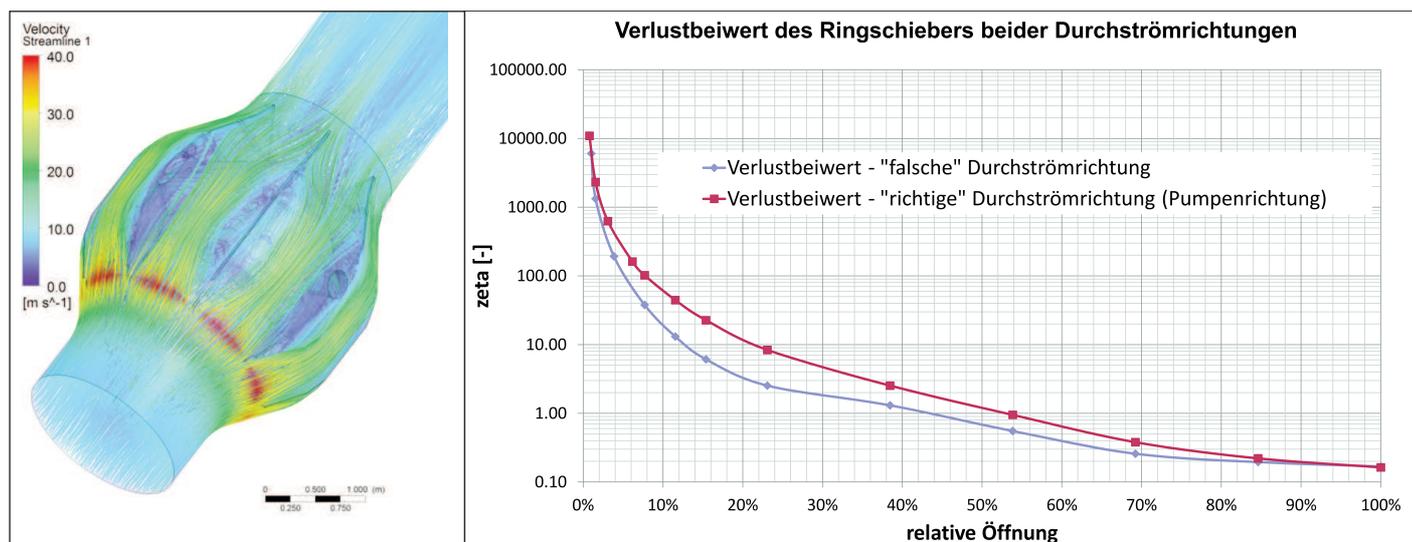


Abbildung 3: Links – Strömungssituation in einem Ringschieber, rechts – Verlustbeiwert in beiden Durchströmrichtungen

Grafiken: TU-Graz

Kaplanturbine bzw. der Düsenadelposition bei Pelton-turbinen. Aus diesem Grund sollten die auftretenden Verluste in voll geöffneter Position so gering als möglich sein, dagegen beim Absperren einen unendlich großen Widerstand erzeugen. Diese gegensätzlichen hydrodynamischen Eigenschaften in einer baulichen Komponente zu vereinen ist die Herausforderung für den Ingenieur. Weiteres müssen diese Anforderungen an Absperrventile auch bei unterschiedlichen Durchflüssen – oft bis zu einem 2 bis 3-fachen des Auslegungsdurchflusses – erfüllt werden.

#### ERMITTLUNG DER KENNWERTE MITTELS CFD-SIMULATION UND PHYSIKALISCHER MODELLIERUNG

Um ein zuverlässiges Absperrverhalten zu garantieren müssen die Kennwerte (Definitionen nach Abbildung 2) für Durchfluss (kQ), Moment (kM) und Kraft (kF) eines Ventils bei verschiedenen Klappenstellungen und gegebenenfalls auch bei variierenden Kavitationszuständen bekannt sein. Diese Werte sind auch entscheidend dafür, wie sich das hydraulische System im instationären Betrieb – vor allem im Hinblick auf eventuelle Druckstöße im System und in Notschlusssituationen – verhält. Diese Beiwerte werden in der Regel mit Hilfe von Modelltests – in letzter Zeit jedoch auch immer öfter mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (CFD) – ermittelt. Am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen wird bereits seit vielen Jahren sehr erfolgreich die CFD-Simulation verwendet, und die Vergleiche mit den Messungen im Labor bestätigen die Genauigkeit dieser Berechnungen.

Im Folgenden werden auszugsweise die in Wasserkraftanlagen gebräuchlichsten Verschlussorgane näher vorgestellt.

#### KUGELSCHIEBER

Kugelschieber (Abbildung 1) ersetzen heute die früher häufig eingesetzten Keilschieber beim Abschluss einer Triebwasserleitung. Ihr großer Vorteil ist die beinahe vollkommen verlustfreie Strömung in Offenstellung (siehe kQ-Linien in Abbildung 2), da die Längsachse des Drehkörpers in Offenstellung mit der Rohrachse zusammenfällt. Aufgrund der Bauweise können diese Absperrorgane auch für Fällhöhen über 1000 mWS verwendet werden und sind unter Umständen auch notschlusstauglich. Für Regelaufgaben sind Kugelschieber unter anderem aufgrund der Kavitationsgefahr nur bedingt einsetzbar. Zusätzlich bedingt die konstruktive Gestaltung auch deutlich höhere Gestehungskosten im Vergleich zu einer Absperrklappe

#### RINGSCHIEBER

Die geringen Regeleigenschaften von Kugelschiebern oder Drosselklappen führten zur Weiterentwicklung der Düsenadelverstellung einer Pelton-Turbine in einem Rohr als Regelorgan. Am Beispiel eines Ringschiebers (Abbildung 3) wurde diese Anforderung strömungstechnisch günstig umgesetzt.

Obwohl der Widerstandsbeiwert deutlich über dem eines Kugelschiebers liegt und die Herstellungskosten höher sind als die einer Drosselklappe, wird der Ringschieber heutzutage immer noch wegen seines ausgezeichneten Regelverhaltens – beispielsweise als luftseitiger Endverschluss in Grundablässen – verwendet.

**Beetz Hydraulik GmbH**  
Tel.: 08332 9214-0  
info@beetz.de  
www.beetz.de



**Individuelle hydraulische Lösungen:  
Zylinder, Aggregate  
und Steuerungen für**  
(Sonderausführung nach ATEX/Edelstahl, etc.)



Maschinen- und Anlagenbau  
Kraft- und Arbeitsmaschinen  
Fahrzeugbau  
Architektur  
Energie  
Marine Systems

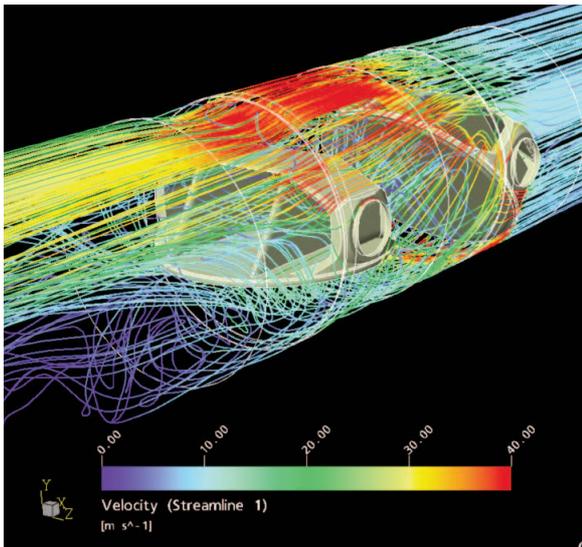


Abbildung 4: Tandemanordnung von Doppelklappen, Stromlinienplot, Strömung im Bild von rechts nach links  
Grafik: TU-Graz

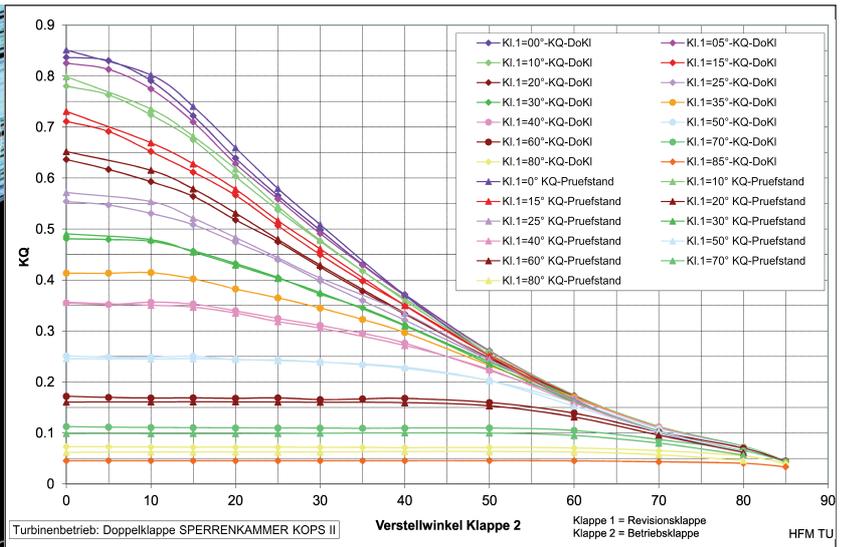


Abbildung 5: Normierte Durchflussbeiwerte nach Grein der Tandemanordnung in Turbinenrichtung, Vergleich CFD und Prüfstand  
Grafik: TU-Graz

**ABSERRKLAPPEN**

Der Vorteil dieser Bauart ist, dass in Offenstellung die schmale Stirnseite aufgrund der strömungstechnisch günstigen Gestaltung dem fließenden Wasser lediglich als kleiner Widerstand entgegenwirkt. In der hier gezeigten Ausführung (Abbildung 4) hat die Anordnung allerdings auch Notschluss- und Revisionseigenschaften zu erfüllen, und wird nicht nur als Betriebsklappe ausgeführt sondern in Tandemanordnung mit zwei hintereinander geschalteten Klappen. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich zwischen Messung und numerischer Simulation einer Tandemanordnung, wobei der Verdrehwinkel auf der horizontalen Achse von der in Strömungsrichtung zweiten, variablen Klappe aufgetragen ist. Drosselklappen können als scheibenförmige Teller bezeichnet werden, die drehbar meist in Rohrquerschnitten gelagert sind, wobei die Drehachse nicht nur normal zur Rohrachse

steht, sondern auch noch exzentrisch dazu versetzt ist. Die Hauptaufgabe neben einer bedingten Drosselfunktion (kavitationsbedingte Vibrationen und Materialschäden bei langfristigem Drosseln) sowie dem Öffnen und Schließen ist der Abschluss, auch unter erhöhtem Durchfluss bei einem eventuell auftretenden Rohrbruch.

**BEISPIEL EINER ABSERRKLAPPE MIT EXTREMER EXZENTRIZITÄT**

Eine eher seltene Klappen-Bauart stellt die niederdruckseitige Turbinenabsperriklappe im Pumpspeicher-Kraftwerk Häusling der Kraftwerksgruppe Zemm/Ziller im Tiroler Zillertal dar. Die Planungen zum Kraftwerk Häusling begannen bereits um 1970; 1980 erfolgten die Messungen der Modellmaschinen und 1986 ging der erste Maschinensatz in Betrieb. Zugunsten einer vorteilhafteren Führung der Niederdruckverteihrohrleitung im Krafthaus

wurden die Saugrohre oberliegend gebaut. Zwischen Turbine und Pumpe wurde ein Drehmomentenwandler eingesetzt um rasche Umschaltzeiten zwischen Pump- und Turbinenmodus zu erhalten, was besonders heutzutage von hohem Nutzen ist. Niederdruckseitig an den Turbinen, also am Ende der Saugrohre, wurden einseitig gelagerte Klappen eingebaut, die den gesamten Saugrohrquerschnitt freigeben. Diese bereits vorher im Kraftwerk Roßhag erprobte Konstruktion hat einen Durchmesser von DN 2600/3400 mm und wurde auf PN 16 ausgelegt. Das Krafthaus dieser Anlage (Abbildung 6) befindet sich am Ende eines rund 8,7 km langen Oberwassersystems vom Jahresspeicher Zillergündel. Als Unterwasser dient der über einen rund 8 km langen Stollen verbundene Speicher Stillupp. Um die Regelfähigkeit des Kraftwerks im Pumpbetrieb zu steigern, wurde die Betriebsweise des hydraulischen Kurzschlusses im Kraftwerk Häusling neu untersucht. Ursprünglich war dieser Betrieb, bei dem ein Teil der gepumpten Wassermenge direkt von der Turbine abgearbeitet wird, nicht vorgesehen. In dieser Betriebsweise ist unter ungünstigen Voraussetzungen mit der Gefahr zu rechnen, dass die Turbinen in umgekehrter Richtung – also von der Saugseite zur Druckseite – durchströmt werden. In diesem Ausnahmebetriebsfall muss sichergestellt sein, dass die Unterwasserklappen aufgrund der dann vorherrschenden hydraulischen Kräfte bzw. Momente nicht geschlossen werden. Ein unkontrolliertes Schließen hätte instationäre Strömungsverhältnisse mit den bekannten Auswirkungen (Druckstoß) zur Folge. Daher wurden am Institut Messungen an einem Modell der Originalklappe durchge-

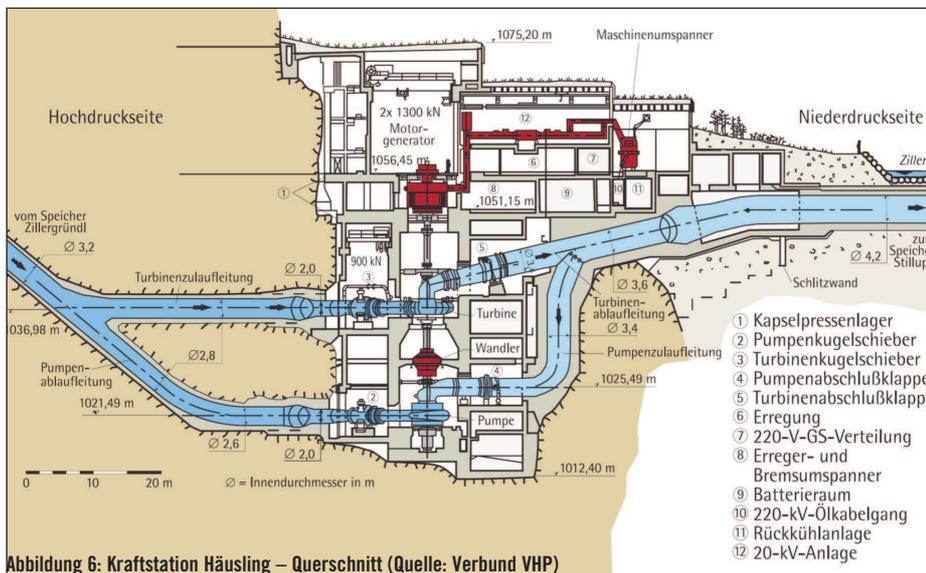


Abbildung 6: Kraftstation Häusling – Querschnitt (Quelle: Verbund VHP)



Abbildung 7: Modellklappe

Foto: TU-Graz

führt. Mit den dabei gewonnen Erkenntnissen können die Klappenantriebe für die oben erwähnten Ausnahmefälle überprüft werden.

### MODELL

Ausgehend von den Fertigungszeichnungen der Originalklappe wurde ein 3D-CAD-Modell mit Originalmaßen erstellt. Um die Strömungsvorgänge im Modellversuch vor allem im Hinblick auf die Kavitationsuntersuchungen visualisieren zu können, wurden die Anschlussrohre der Klappe aus Plexiglas gefertigt. Aus den gegebenen Durchmessern, 2600 mm im Original und 200 mm des verwendeten Plexiglasrohres, ergab sich ein Skalierungsfaktor von 13 bzw. ein Modellmaßstab von 1:13. Das CAD-Modell wurde im Anschluss mit diesem Skalierungsfaktor beaufschlagt wodurch schlussendlich die Modellklappe nach Abbildung 7 entstand.

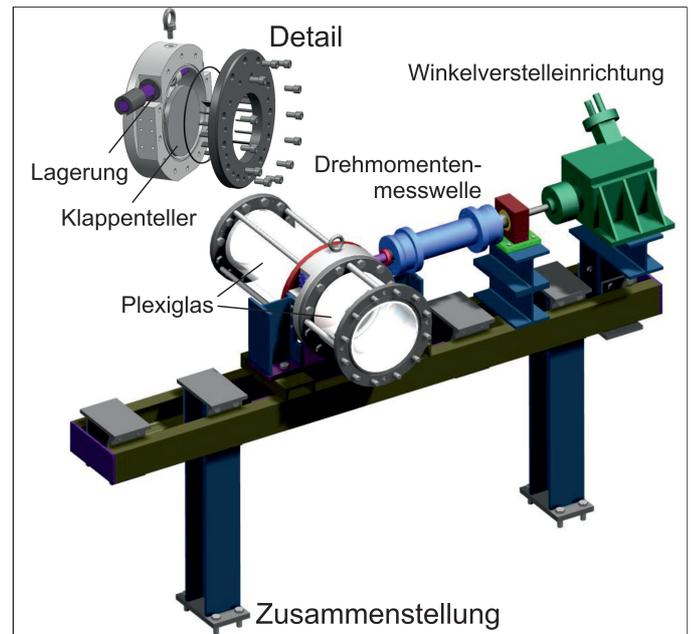


Abbildung 8: CAD-Modell der Klappenkonstruktion

Grafik: TU-Graz

Die Verstellung der Klappe erfolgte mittels Teilapparat einer Fräsmaschine. Dadurch gelang es auf einfachste Art und Weise eine genau definierte Klappenstellung während der Versuchsreihen einzustellen. Das Drehmoment auf den Klappenteller wurde über eine Drehmomentmesswelle in die Rahmenkonstruktion eingeleitet. Abbildung 8 zeigt das CAD-Modell der gesamten Modellklappe mit dem Rahmen und sonstigen Aufbauten, sowie eine Explosionsdarstellung der Klappenkonstruktion im Modell.

# Anzeige

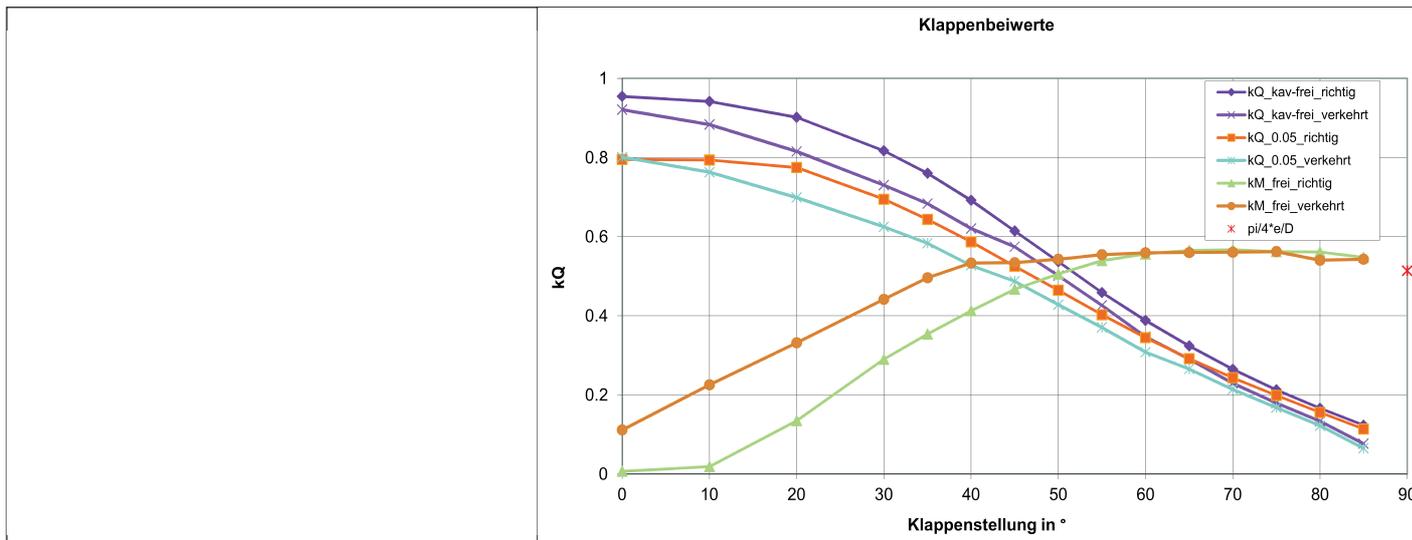


Abb. 9: Prüfstand des Instituts für Hydraul. Strömungsmaschinen

Abbildung 10: Vergleich der Klappenbeiwerte für beide Durchströmrichtungen

Grafiken: TU-Graz

**PRÜFSTAND**

Dem experimentellen Versuch wird am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen parallel zum Trend zu numerischen Ver-

fahren große Bedeutung beigemessen. Das Herzstück des Instituts-Labors bildet der 4-Quadranten-Hauptprüfstand (Abbildung 9), der wahlweise im offenen oder geschlossenen

Kreislauf betrieben werden kann. Durch sein universelles Design lässt sich eine Vielzahl von experimentellen Fragestellungen erforschen. Sämtliche Maschinen und Armaturen, welche in hydraulischen Anlagen und Systemen relevant sind, lassen sich entweder in Form eines skalierten Modells oder auch direkt am Prototyp untersuchen.

Es können Abnahmeversuche für hydraulische Maschinen nach der aktuell gültigen Norm für Modellversuche IEC60193 durchgeführt werden. Der Prüfstand lässt durch seine variable Betriebsweise die Erforschung des vollständigen 4-Quadranten-Verhaltens von z.B. Pumpturbinen zu. Dadurch können aktuelle Fragestellungen, die die Betriebscharakteristiken von hydraulischen Strömungsmaschinen betreffen untersucht werden.

Der Hauptprüfstand erstreckt sich im Gebäude über 4 Stockwerke. Im Keller des Gebäudes ist die Hauptprüfstandspumpe installiert, welche über eine elektrische Anschlussleistung von bis zu 500 kW verfügt und mittels eines Frequenzumrichters Drehzahl variabel betrieben werden kann. Mit Hilfe von paarweise angeordneten Schiebern kann die Durchflussrichtung des Prüfstands mit geringem Aufwand invertiert werden.

In der geschlossenen Prüfstandsordnung kann der Betriebsdruck am Prüfling zwischen 0,1 bar<sub>absolut</sub> und 10 bar<sub>absolut</sub> geregelt werden. Dies ist für die durchgeführten Kavitationsuntersuchungen eine notwendige Voraussetzung.

**ERGEBNISSE**

Die Ergebnisse der durchgeführten Klappenmessungen (Abbildung 10) zeigen ein sehr zufriedenstellendes und plausibles Ergebnis. Die Extrapolation des Momentenbeiwerts auf die Geschlossenstellung nach Grein liefert einen Wert, der in den gemessenen Verlauf



Bild 11a: Kavitationsimpressionen

Anzeige Geppert

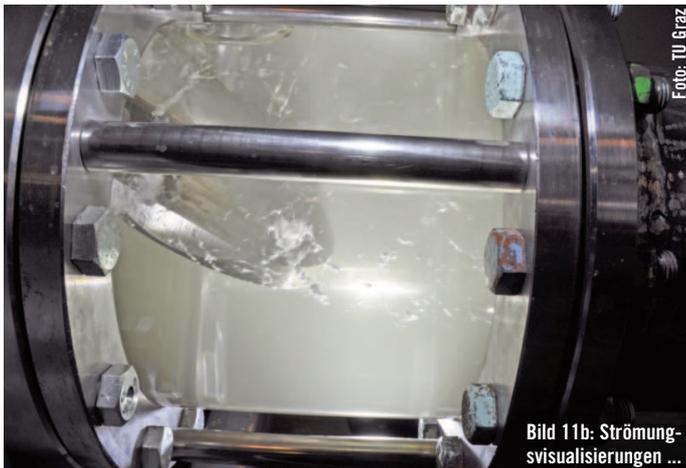


Bild 11b: Strömungsvisualisierungen ...

Foto: TU Graz



Bild 11c: ... am Versuchsstand der TU Graz

Foto: TU Graz

von  $kM$  über der Klappenstellung  $\alpha$  passt. Die Messergebnisse unter starkem Kavitationseinfluss zeigen für diese Klappe ein Verhalten, wie es auch von Klappen mit geringer Exzentrizität bekannt ist. Strömungsvisualisierungen über das Kavitationsverhalten sind in den Abbildung 11a-c veranschaulicht.

Mit Auszügen aus vergangenen Publikationen des Instituts für Hydraulische Strömungsmaschinen der Technischen Universität Graz in Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern: Voith Hydro GmbH, GDF SUEZ Energie Deutschland AG, Vorarlberger Illwerke AG, VERBUND Hydro Power AG

## Autoren:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Benigni

Dipl.-Ing. Stefan Höller

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg

Dipl.-Ing. Markus Moshammer

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Technische Universität Graz  
Kopernikugasse 24/IV  
8010 Graz

[www.hfm.tugraz.at](http://www.hfm.tugraz.at)

# Anzeige