

© IHS

Betriebsübergänge von hydraulischen Strömungsmaschinen – ein neuer Versuchsstand

Durch die Zunahme von fluktuierenden Erzeugern bei der Stromproduktion tritt die Stabilisierung des elektrischen Netzes zunehmend in das Interesse der Forschung. Die Fragestellung, inwieweit die Wasserkrafttechnologie in der Lage ist, Regelenergie in großem Maße in kürzester Zeit bereitzustellen, erfordert die Untersuchung des dynamischen Verhaltens von hydraulischen Maschinen. Für die Erforschung dieser transienten Betriebsänderungen wird ein neuer leistungsstarker und hoch flexibler Versuchsstand im Laboratorium des Institutes für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen an der Universität Stuttgart aufgebaut.

Stefan Riedelbauch, Johannes Junginger und Oliver Kirschner

1 Hintergrund

Die Durchführung von Modelltests mit hydraulischen Strömungsmaschinen unter homologen Bedingungen zu einem geplanten oder bestehenden Prototyp ist für größere Kraftwerksprojekte üblicher Standard. Neben der detaillierten Bestimmung der hydraulischen

Kenfeldcharakteristik mit dem Zusammenhang Volumenstrom, Fallhöhe, Wirkungsgrad, Leitschaufelöffnung, gegebenenfalls Laufradöffnung, Kavitation, Druckschwankungen usw., sind auch die für die mechanische Konstruktion wichtigen hydraulischen Kräfte, wie z. B. der Axialschub oder auch Momente der Welle, Leitschaufeln usw., bestimmbar. Einerseits dienen diese

Kompakt

- Versuchstand für Betriebstransienten.
- Replikation von transienten Betriebsübergängen der Prototypanlage.
- Untersuchung des dynamischen Verhaltens von hydraulischen Strömungsmaschinen.

Tests jeweils zur Risikominimierung für den Hersteller und auch für den späteren Betreiber der Kraftwerksanlage, da die Leistungseigenschaften über Ähnlichkeitsbetrachtungen relativ gut auf die Großausführung übertragbar sind. Andererseits kann das Verhalten der Strömungsmaschinen in Modelltests auch in weiten Off-design-Betriebsbereichen untersucht werden, die mit numerischen Simulationsmethoden nur mit vergleichsweise ungenauen Ergebnissen vorhergesagt werden können. Genaue Vorhersagen von Off-design-Betriebspunkten mit Simulationsmethoden erfordern sehr große Rechenetze. Diese großen Rechenetze und auch die Modellierung von Kavitation erfordern sehr lange Rechenzeiten, welche auch auf Großrechnern Monate dauern können [1], [2].

Ausgangspunkt für einen Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS) der Universität Stuttgart ist die Fragestellung, inwieweit die Wasserkrafttechnologie in der Lage ist, Regelernergie in großen Leistungen bereitzustellen und damit einen Beitrag zur Stabilisierung des elektrischen Netzes bei Zunahme von fluktuierenden Erzeugern (Wind, Photovoltaik) zu liefern. Die Bereitstellung von großen Regelernergiebereichen führt für eine Strömungsmaschine zwangsläufig dazu, dass bei gegebener Fallhöhe der Volumenstrom stark variiert wird. Dadurch kann die Leistung im Grenzfall zwischen Überlast und Null Leistung variieren. In der Strömungsmaschine können sich stark abgelöste 3-D-Strömungsphänomene, gegebenenfalls mit Kavitation, ergeben, die zu starken Druckschwankungen in der Maschine führen. Diese Druckschwankungen führen in den Komponenten der mechanischen Struktur zu instationären Spannungen, die der mittleren Spannung überlagert sind und so die Betriebsfestigkeit der Maschine beeinflussen und häufig mit einer Verkürzung der Lebensdauer einhergehen.

Vor diesem Hintergrund wird im Laboratorium am IHS ein neuer Versuchstand aufgebaut, mit dem Ziel, transiente Betriebsänderungen von Strömungsmaschinen genauer zu untersuchen und die Wechselwirkung mit dem angrenzenden Rohrleitungssystem besser zu verstehen. Erste Forschungsarbeiten zu diesem Themenfeld sind am IHS bereits durchgeführt worden. Mit numerischer Strömungssimulation wurde für eine Pumpenturbine ein Betriebsübergang untersucht. Ausgehend von einem Pumpbetriebspunkt wurde durch Veränderung der Drehzahl des Maschinensatzes in einen Turbinenbetriebspunkt umgesteuert [3]. Darüber hinaus wurde die 3-D-CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) mit einer 1-D-Simulationsmethode (Druckstoßanalyse-Werkzeug) gekoppelt, um die Wechselwirkung mit dem benachbarten Rohrleitungssystem zu berücksichtigen.

Hiermit erfolgte der Vergleich zwischen dem Rohrleitungssystem des realen Großkraftwerkes und dem Rohrleitungssystem eines geschlossenen Versuchskreislaufes für Modelltests [4], [5]. In einer weiteren Forschungsarbeit wurde schließlich untersucht, wie ein geschlossener Versuchskreislauf gesteuert werden muss, um an der Strömungsmaschine im Modellversuch transiente Betriebspunkte zu erzielen, die unter Ähnlichkeitsgesichtspunkten den Eigenschaften im realen Kraftwerk entsprechen [6].

2 Zweck des Versuchsstands für Betriebstransienten

Der Versuchstand ist für verschiedene instationäre Untersuchungen konzeptioniert. Es sollen instationäre Strömungen in allen Arten von Off-design-Betriebspunkten einschließlich Kavitationsphänomenen untersucht werden können. Hierzu gehören auch Maßnahmen zur Minderung der auftretenden hohen Druckschwankungen. In einem weiteren Forschungsfeld soll das Strömungsverhalten von transienten Betriebsübergängen der Maschinen mit Auswirkungen auf die mechanische Struktur untersucht werden. Das Ziel ist es, ebenso ein besseres Verständnis der grundlegenden Strömungsvorgänge zu erhalten und die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Referenzmessungen für die Validierung von Simulationsprogrammen, um deren Unsicherheiten weiter zu reduzieren. Weitere Forschungsaktivitäten sind natürlich denkbar.

3 Aufbau des Versuchsstands für Betriebstransienten

Der neue Versuchsstand wird zusätzlich zu den bereits bestehenden Versuchseinrichtungen im Laboratorium am IHS als geschlossener Kreislauf aufgebaut. Der Versuchskreislauf ist druckseitig in der Druckstufe PN 25 und saugseitig in der Druckstufe PN 10 ausgelegt. Dabei ist der überwiegende Teil der Rohrleitungen mit einem Nenndurchmesser DN 500 ausgeführt. Der Aufbau des Kreislaufs und die räumliche Lage der Komponenten ist in **Bild 1** dargestellt. Der Versuchstand besteht aus zwei Pumpeneinheiten, die entweder einzeln, parallel oder seriell geschaltet werden können, um einen möglichst breiten Betriebsbereich abdecken zu können. Mit diesem Aufbau kann der mögliche Betriebsbereich am Prüfling eine Fall- bzw. Förderhöhe bis

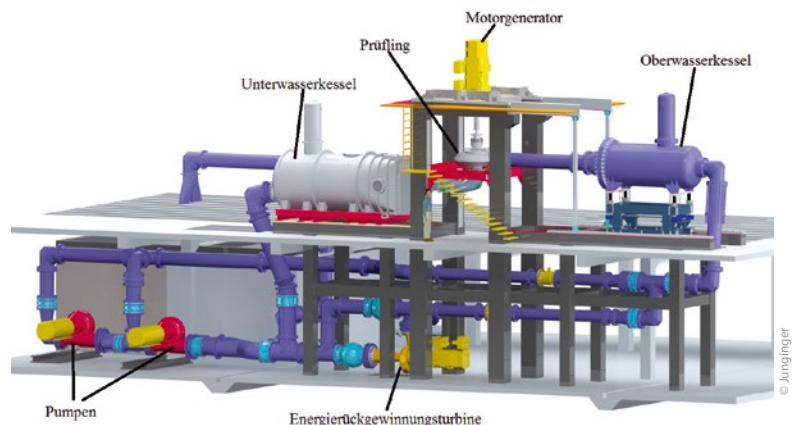


Bild 1: Neuer Versuchsstand am IHS als geschlossener Kreislauf

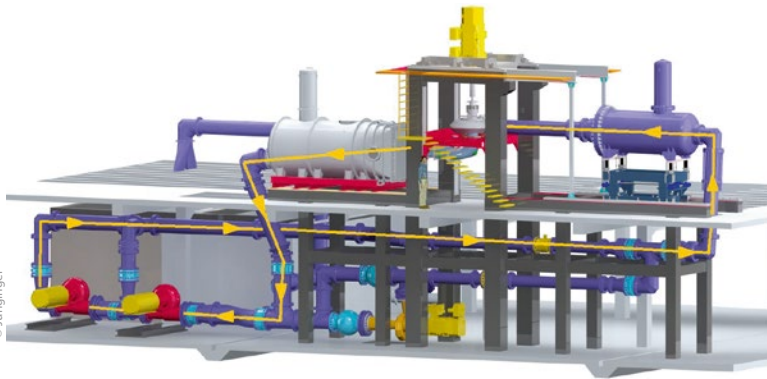


Bild 2: Versuchsstand im Turbinenbetrieb

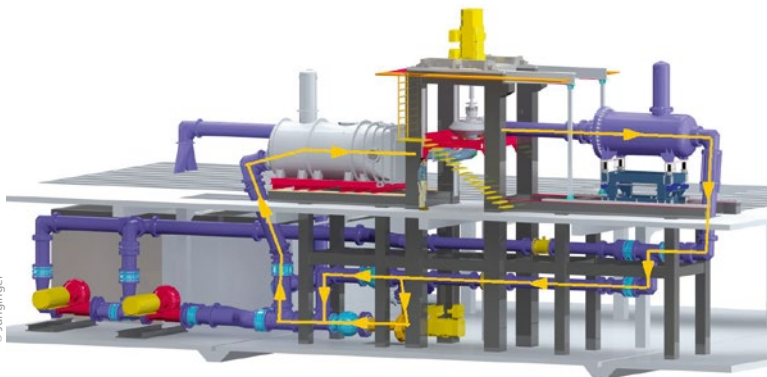


Bild 3: Versuchsstand im Pumpbetrieb

zu ca. 140 m Wassersäule und einen maximalen Volumenstrom von mehr als 1 m³/s erzielen.

Die Pumpen sind saugseitig mit dem in Längsrichtung verstellbaren Unterwasserkessel über Rohrleitungen verbunden. Der Unterwasserkessel ist mit einem luftbeaufschlagten Dom ausgeführt, um den statischen Druck für Kavitationsuntersuchungen gezielt einstellen zu können. Dabei ist eine Vakuumpumpe an den Dom angeschlossen, um das Druckniveau unter Umgebungsdruck absenken zu können. Zusätzlich besteht ein Druckluftanschluss, um das Druckniveau anheben zu können. An den Unterwasserbehälter sind ein Kühlkreislauf für die Kühlung des Betriebswassers und ein Filtersystem zum Abscheiden von unerwünschten Partikeln angeschlossen.

Auf der Druckseite sind die Pumpen über einen Rohrleitungsstrang mit dem Oberwasserkessel verbunden. In diesem Rohrleitungsstrang ist ein magnetisch induktiver Durchflussmesser (IDM) für die Volumenstrommessung eingebaut. Der in der Höhe und in Querrichtung verstellbare Oberwasserkessel ist ebenfalls mit einem Dom ausgeführt. Der Oberwasserkessel hat auf der einen Stirnseite den Anschluss für die Rohrleitung von den Pumpen. Auf der anderen Stirnseite ist die Rohrleitung bzw. der Zulauf zum druckseitigen Anschluss des Prüflings angebracht.

Der hydraulische Anschluss der Prüflinge erfolgt zwischen Ober- und Unterwasserkessel. Die Prüflinge können dabei an vier Betonsäulen befestigt und an einen drehzahlgeregelten Motorgenerator angeschlossen werden. Es sind beide Drehrichtungen wählbar, so dass ein Vierquadrantenbetrieb der Prüflinge möglich ist. Die im Turbinenbetrieb anfallende elektrische Energie wird in den Gleichspannungszwischenkreis eingespeist

und von den gleichzeitig arbeitenden Antriebsmotoren der Pumpen aufgenommen.

Als Prüfling können grundsätzlich Rohr- und Kaplan-Turbinen sowie Francis- und Pump-Turbinen aber auch Kreiselpumpen im Versuchsstandgestell befestigt werden. Mit den geplanten Betriebsparametern können Strömungsmaschinen mit einem Laufraddurchmesser von bis zu 400 mm eingesetzt werden. Dies erlaubt den Einsatz von Drucksensoren und Dehnungsmessstreifen an praktisch allen Komponenten der Modellmaschinen. Darüber hinaus können bei dieser physikalischen Größe Strömungsgeschwindigkeiten im Prüfling mit guter räumlicher Auflösung auch mit optischen Messmethoden durchgeführt werden und so beispielsweise Validierungsdaten für die numerische Strömungsfeldsimulation erzeugt werden [7].

Um eine flexible Betriebsweise zu gewährleisten, sind diverse Armaturen (in Bild 1 hellblau dargestellt) installiert, die ein Umschalten zwischen verschiedenen Betriebsweisen ermöglichen. Auffällig ist zusätzlich eine Bypassleitung mit einem weiteren IDM, die parallel zum Prüfling und damit ebenfalls parallel zu den Pumpeneinheiten eingefügt ist. Dieser Leitungsstrang kann beispielsweise dazu genutzt werden, um einen Prüfling im Pumpbetrieb untersuchen zu können. Aus Gründen der Energieeffizienz des Versuchsstandes ist in dieser Leitung

eine Energierückgewinnungsturbine eingebaut, welche ebenfalls in den Gleichspannungszwischenkreis einspeisen kann. Parallel zu dieser ist ein weiterer kurzer Strang mit Ringkolbenschieber aufgebaut. Durch diesen Rohrleitungsstrang mit Energierückgewinnungsturbine und Ringkolbenschieber werden die Betriebsmöglichkeiten des Versuchsstandes sehr flexibel erweitert.

4 Betriebsweise des Versuchsstands für Betriebstransienten

Zur Erläuterung der Funktionsweise des Versuchstandes werden zuerst zwei Betriebsweisen des Prüflings beschrieben. Die Anordnung des Versuchskreislaufs ermöglicht einen Testbetrieb von Turbinen und Pumpen unter stationären sowie instationären Betriebsbedingungen. Bei dem Turbinenbetrieb des Prüflings pumpen die Betriebspumpen das Wasser durch die Durchflussmessstrecke zum Oberwasserkessel (**Bild 2**). Vom Oberwasserkessel fließt das Wasser durch den Prüfling über den Unterwasserkessel zurück zu den Betriebspumpen.

Bei Pumpbetrieb des Prüflings wird das Wasser mit dem Prüfling vom Unterwasserkessel zum Oberwasserkessel gepumpt (**Bild 3**). Vom Oberwasserkessel fließt das Wasser durch die Entspannungsturbine und/oder den Bypass mit Ringkolbenschieber zum Unterwasserkessel zurück. Bei dieser Fahrweise sind die Betriebspumpen vom Kreislauf getrennt und nicht in Betrieb.

Wie bereits erwähnt ist neben der Untersuchung der instationären Strömungseigenschaften von Betriebspunkten auch die

Untersuchung von transienten Betriebsübergängen geplant (**Bild 4**). Da sowohl die Betriebspumpen als auch die Energierückgewinnungsturbine und die Ringkolbenschieber während des Betriebes gezielt geregelt bzw. gesteuert werden können, ist mit dieser Anordnung eine Replikation von transienten Betriebsübergängen der Prototypanlage am Prüfling möglich. Dies beinhaltet Start- und Stoppvorgänge, aber beispielsweise auch Betriebsübergänge von Pump- in Turbinenbetrieb und insbesondere auch umgekehrt. Alle Strömungsmaschinen können drehzahlvariabel betrieben werden und so sind alle vier Betriebsquadranten am Prüfling einstellbar.

Für die Replikation von transienten Betriebsübergängen der Prototypanlage am Prüfling sind sowohl die Pumpen als auch die Energierückgewinnungsturbine in Betrieb. Mit der Variation der Drehzahlen der Pumpen und der Energierückgewinnungsturbine sowie der Öffnung der Energierückgewinnungsturbine und der Ringkolbenschieber können gezielt zeitlich veränderte Bedingungen am Prüfling erzeugt werden. Die an der Strömungsmaschine herrschenden Bedingungen zu jedem Zeitpunkt werden durch Simulation der Prototypanlage erzeugt und anschließend auf die Modellmaschine übertragen. Damit werden in einer Optimierung mit Simulationen des Versuchskreislaufs die Betriebsweise der Pumpen und der Energierückgewinnungsturbine sowie die Öffnung der Ringkolbenschieber und der Energierückgewinnungsturbine bestimmt. Diese können dann in den Versuchen automatisch abgefahren werden, um so die strömungstechnisch übertragenen Bedingungen der Prototypströmungsmaschine an der Modellmaschine untersuchen zu können.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird für die Untersuchung transienter Betriebsänderungen von Strömungsmaschinen ein neuer Versuchstand im Laboratorium am IHS vorgestellt. Dabei wird gezeigt, dass der als geschlossener Kreislauf aufgebaute Versuchstand konzipiert ist, um transiente Betriebsübergänge realisieren zu können. Zusätzlich wird erläutert, wie die Replikation von transienten Betriebsübergängen einer Prototypanlage am Prüfling durchgeführt werden kann.

Stefan Riedelbauch, Johannes Junginger and Oliver Kirschner

Transient operation point changes of hydraulic machinery - a new test rig

Owing to the increase of fluctuating electricity generation, the stabilization of the electrical grid more and more appears in the focus of research. The question in how far hydro power technology is in a position to allocate large amounts of balancing power very quickly requires research related to the dynamic behaviour of hydraulic machinery. For research work related to those transient operation point changes, a new powerful and very flexible test rig will be built in the laboratory of the Institute of Fluid Mechanics and Hydraulic Machinery at the University of Stuttgart.

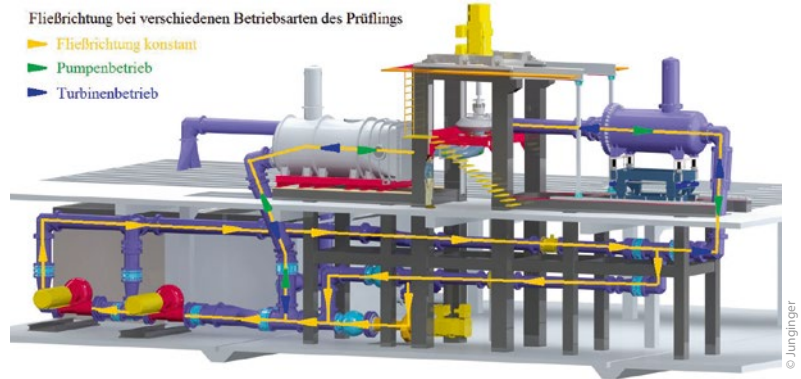


Bild 4: Versuchstand bei Betriebsübergängen

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG und dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung dieses Forschungsprojektes.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Stefan Riedelbauch
Johannes Junginger, M. Sc.
Dr.-Ing. Oliver Kirschner
 Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS)
 Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 10
 70569 Stuttgart
 stefan.riedelbauch@ihs.uni-stuttgart.de
 johannes.junginger@ihs.uni-stuttgart.de
 oliver.kirschner@ihs.uni-stuttgart.de

Literatur

- [1] Krappel, T.; Riedelbauch, S.; Jester-Zuerker, R.; Jung, A. et al.: Turbulence Resolving Flow Simulations of a Francis Turbine in Part Load using Highly Parallel CFD Simulations. In: 28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Grenoble, France, 2016.
- [2] Wack, J.; Riedelbauch, S.: Numerical simulation of a cavitating draft tube vortex rope in a Francis turbine at part load conditions for different σ -levels. In: Journal of Physics: Conference Series 813 (2017), S. 012019.
- [3] Stens, C.; Riedelbauch, S.: Influence of guide vane opening on the flow phenomena in a pump turbine during a fast transition from pump mode to generating mode. In: Journal of Physics: Conference Series 813 (2017), S. 012024.
- [4] Stens, C.: Investigation of a fast transition from pump mode to generating mode in a reversible pump turbine. Dissertation, Universität Stuttgart, 2018.
- [5] Riedelbauch, S.; Stens, C.: Pump to Turbine Transient for a Pump-Turbine in a Model Test Circuit and a Real Size Power Plant. In: Proceedings of the 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kyoto, Japan, 2018.
- [6] Junginger, J.; Kirschner, O.; Riedelbauch, S.: Transfer of transient conditions from prototype to closed-loop model test rig. In: Proceedings of the 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kyoto, Japan, 2018.
- [7] Frey, A.; Kirschner, O.; Riedelbauch, S.; Jester-Zuerker, R.; Jung, A.: Experimental and Numerical Analysis of Turbulent Velocity Fluctuations in a Francis Turbine Draft Tube in Part Load Operation. In: Proceedings of the 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kyoto, Japan, 2018.