



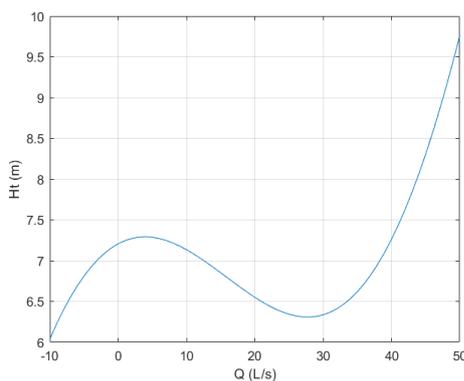
**Diplomand  
Dozent  
Projektpartner  
Experte  
Themengebiet**

**Maurice Zingg  
Dr. Peter Gruber  
Institut IME, CC FMHM  
Dr. Joel Schlienger  
Produktentwicklung & Mechatronik**

## Analyse und Simulation von Schwingungen bei Pumpturbinen

### Ausgangslage

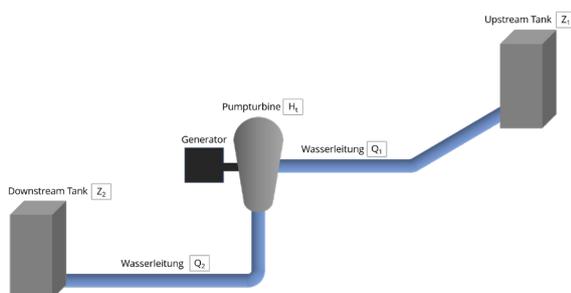
In einem zukünftigen Stromnetz, welches weg vom Atomstrom hin zu erneuerbaren Energien mit fluktuierender Stromproduktion geht, spielen Pumpspeicherkraftwerke eine immer wichtigere Rolle. Diese können bei Bedarf Energie speichern oder liefern. Aktuelle Pumpturbinen weisen in wichtigen Betriebspunkten jedoch instabiles Verhalten auf, welches zu Schwingungen im System führt und so eine Netz-synchronisation erschwert. Diese Instabilitäten führen zu einer Kennlinie mit der Form eines sogenannten S-Schlags (Abb. 1). Um Instabilitäten zu verhindern ist das Verständnis von Pumpturbinen, gerade bezüglich den auftretenden Schwingungen, zentral.



**Abb. 1:**  $H_t$ - $Q$ -Kennlinie einer Pumpturbine mit instabilem Bereich bei negativer Steigung, dem sog. S-Schlag

### Vorgehen

Mit einem physikalischen Modell von Pumpturbine, Ausgleichtanks und Wasserleitungen (Abb. 2) wird die Strömung im System und das Schwingverhalten analysiert.



**Abb. 2:** Schematisches Modell des Systems mit Ausgleichtanks, Pumpturbine und Wasserleitungen, sowie den Größen Durchfluss ( $Q$ ), Förderhöhe ( $H_t$ ) und Wassersäule ( $Z$ )

Als Grundlage dienen die Gleichungen (1-4), welche die physikalischen Größen Durchfluss ( $Q$ ), Förderhöhe ( $H_t$ ), Wassersäule ( $H_r$ ) mit Höhe ( $Z$ ) und Reibungsverlust ( $H_f$ ) darstellen (Abb. 3). Die Schwingungs-Simulation wird mit Matlab/Simulink durchgeführt.

$$L A_p \rho \frac{dQ/A_p}{dt} = (H_r - H_f - H_t) g A_p \rho \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$\frac{dZ_s}{dt} = (Q_0 - Q)/A_s \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

$$H_f = \frac{Q^2}{2gA^2} \left( \lambda \frac{L}{D} + \zeta \right) \quad [\text{m}] \quad (3)$$

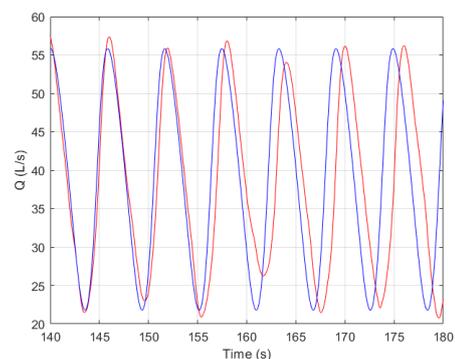
$$H_t = f(Q) \quad (4)$$

**Abb. 3:** Die zur physikalischen Beschreibung des Systems verwendeten Gleichungen

### Ergebnis

Die Ergebnisse der Schwingungs-Simulation konnten mit gemessenen Schwingungen am Pumpturbine-Prüfstand validiert werden und ergeben eine gute Übereinstimmung bezüglich Amplitude und Frequenz der Schwingungen.

Das Modell ist aufgeteilt in einen nichtlinearen Teil, gegeben durch die Kennlinie der Pumpturbine und in einen linearisierten Teil des restlichen Systems. Dieses linearisierte Teilsystem wird mittels Übertragungsfunktion auf ihre Polstellen und Nyquist-Ortskurve analysiert und weist für das Modell ein stabiles Verhalten auf. Es konnte also gezeigt werden, dass die auftretende Dauerschwingung im System von der nichtlinearen Kennlinie der Pumpturbine herkommen. Weiter wurde untersucht, wie sich verschiedene Parameter, wie z.B. Rohrdurchmesser oder Widerstandsbeiwert, auf das Schwingverhalten auswirken.



**Abb. 4:** Durchfluss  $Q$  im eingeschwungenen Zustand vom Labor-Prüfstand (rot) und der Simulation (blau)