

# Betriebsführung von Pumpspeicherkraftwerken und Vorteile für das elektrische Netz

o. Univ.-Prof. DI Dr. techn. Helmut Jaberg  
DI Stefan Höller

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

Technische Universität Graz

Graz, 15. Februar 2018

**EnInnov2018**

**15. Symposium Energieinnovation | 14.02.–16.02.2018**

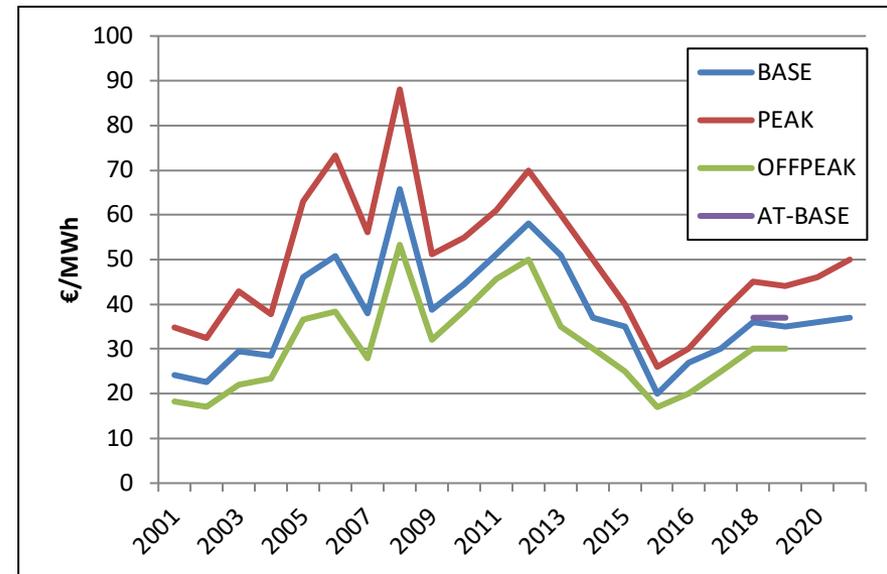
# Einleitung

## Ursprünglicher Fokus von Pumpspeicheranlagen: Wälzpumpspeicherung

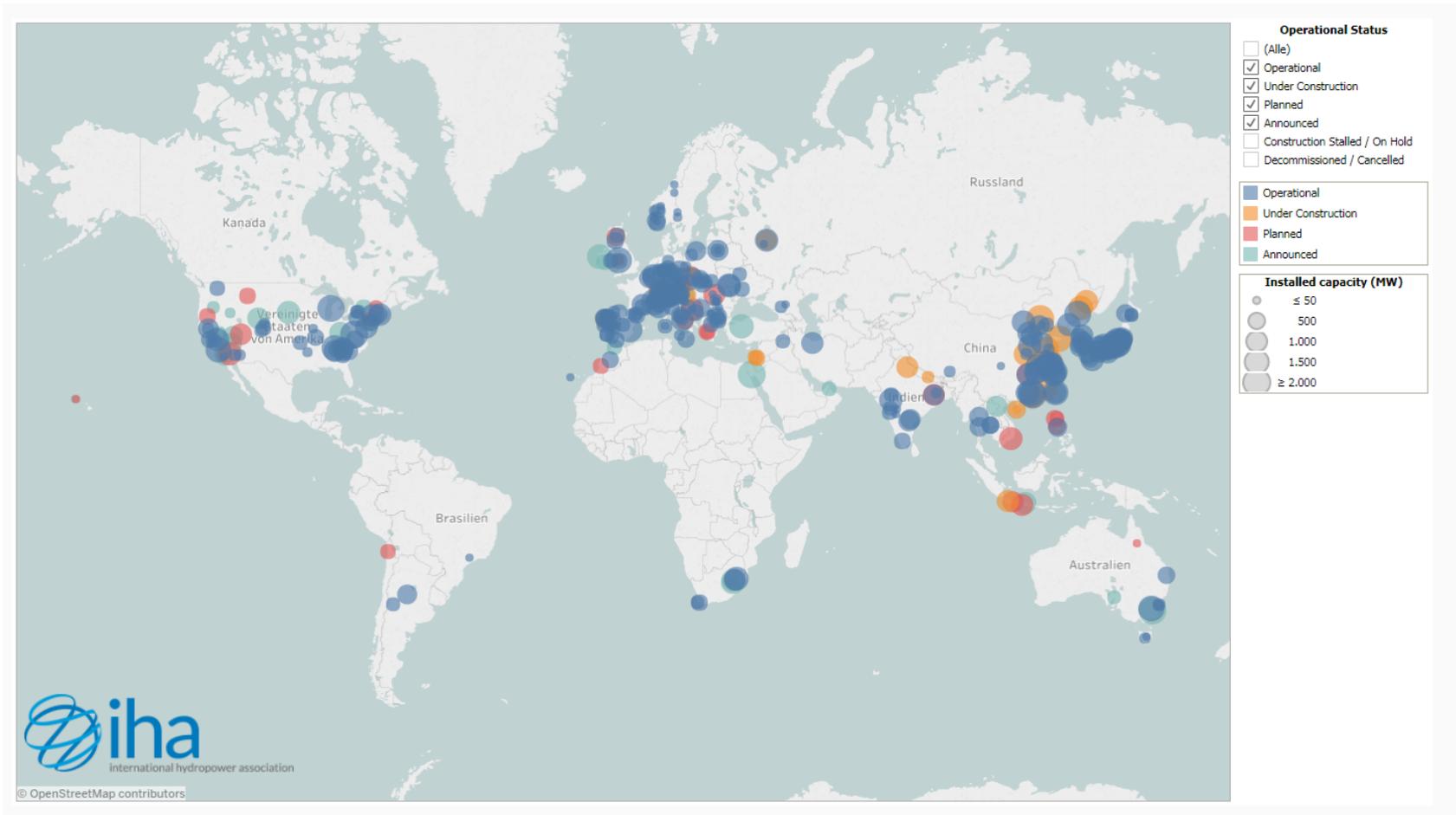
- Technisch ausgereifte Maschinen mit Fokus auf Zuverlässigkeit und Effizienz
- Flexibilität der Anlagen weniger bedeutend

## Heute: Stark veränderter Energiemarkt

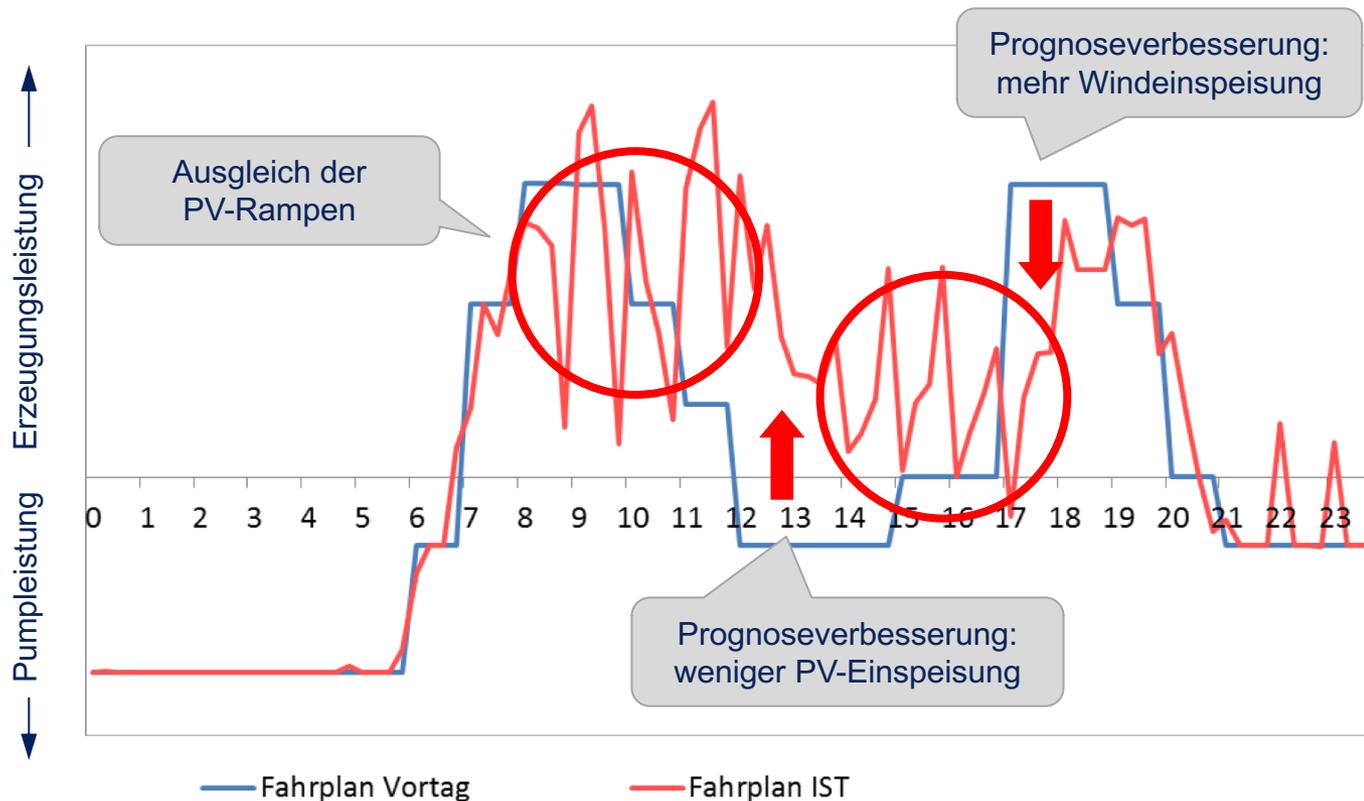
- fallende Energiepreise, dzt. leichte Erholung
- geringer Spread zwischen Peak und OffPeak Preisen
- hohe Volatilität in Übertragungsnetzen durch Einspeisecharakteristik von erneuerbaren Energien auch bei hoher Prognosegenauigkeit
- Chancen für Pumpspeicher durch erhöhte Flexibilität der Anlagen
- Systemdienstleistungen wie Bereitstellung von Regenergie (Frequenzregelung) sowie Spannungs-, Frequenz und Blindleistungsregelung
- gesteigerte Anforderungen an Pumpspeicherkraftwerke



# Pumpspeicheranlagen Weltweit



# Auswirkungen auf den Betrieb von Pumpspeicheranlagen



Der **Einsatz** von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken in Mitteleuropa ist wesentlich **durch Wind und Sonne bestimmt**.

Quelle: Mennel, Praktikerkonferenz Wasserkraft 2015, Graz

# Maschinenanordnung

## Ternärer Maschinensatz

Ein- oder mehrstufige Speicherpumpe mit

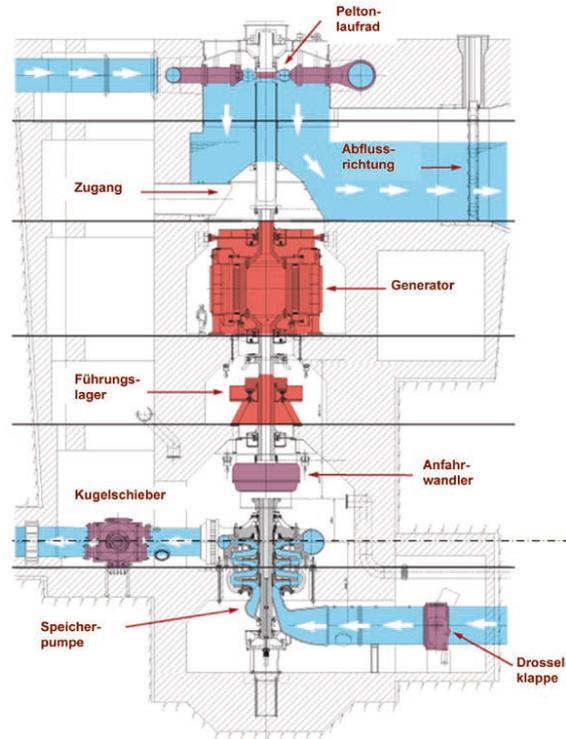
- Francisturbine oder
- Pelton-turbine

und Anfahrwandler oder Kupplung

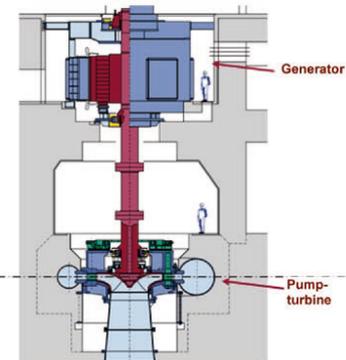
## Binärer Satz mit reversibler Pumpturbine

- Francis PUTU ein- oder mehrstufig mit variabler oder fixer Drehzahl
- Deriaz-Typ Pumpturbine mit Laufschaufelverstellung

Kops II  
P ≈ 170 MW



Limberg II  
P ≈ 240 MW



Quelle: Heninger, OVE Zeitschrift 12/2009

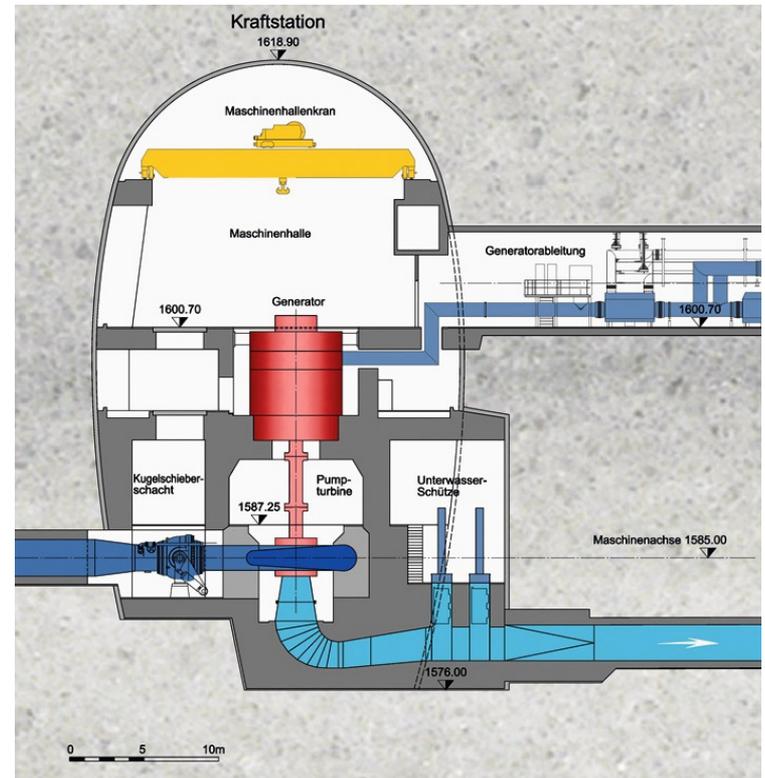
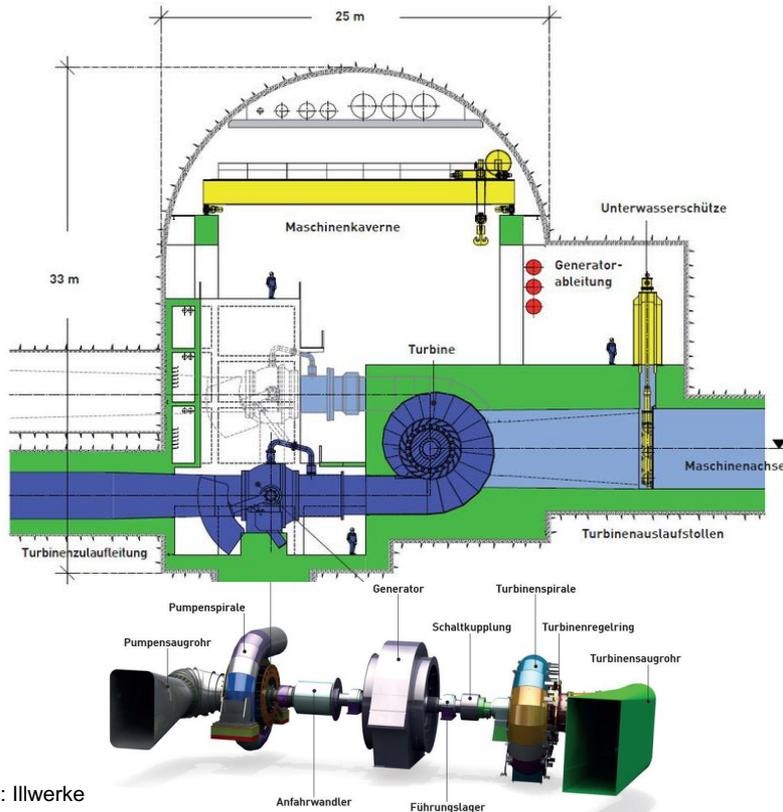
# Maschinenanordnung

Ternärer Maschinensatz

Binärer Satz mit reversibler Pumpturbine

Obervermuntwerk 2 – OVWII  
P ≈ 180 MW

Reißeck 2  
P ≈ 215 MW



Quelle: Illwerke

Quelle: Verbund

# Maschinenanordnung

## Verwendung von Serienpumpen

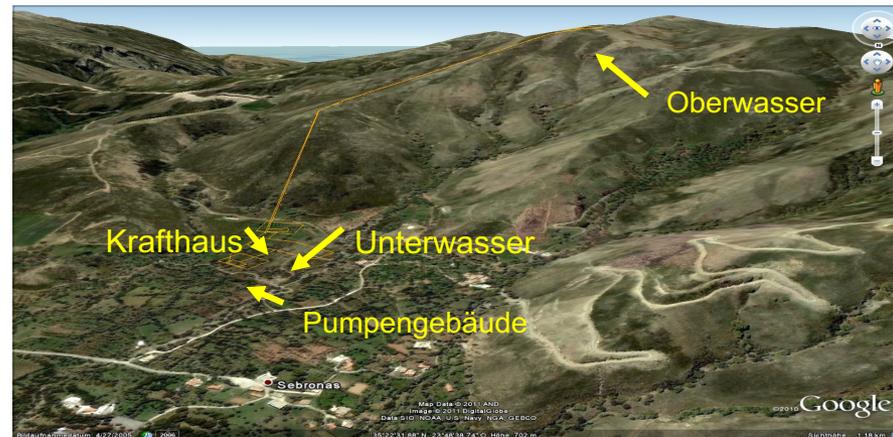
- Pumpe als Turbine PAT (ev. variable Drehzahl)
- drehzahlgezielte Standardpumpen
- Parallelschaltung von „kleinen“ schnell-drehenden Maschinen

### Serienpumpe als Turbine eingesetzt

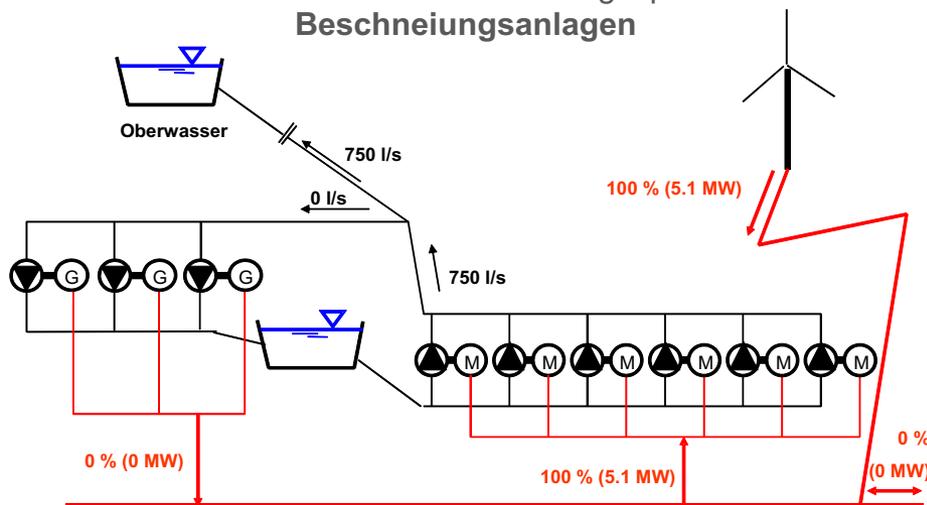


KW – Hirzbach (Kaprun) Quelle: Verbund

“Hybridkraftwerk” für Inselbetrieb mit Serienpumpen und Peltonturbinen



bei PAT könnten Turbinen u. U. eingespart werden:  
**Beschneigungsanlagen**

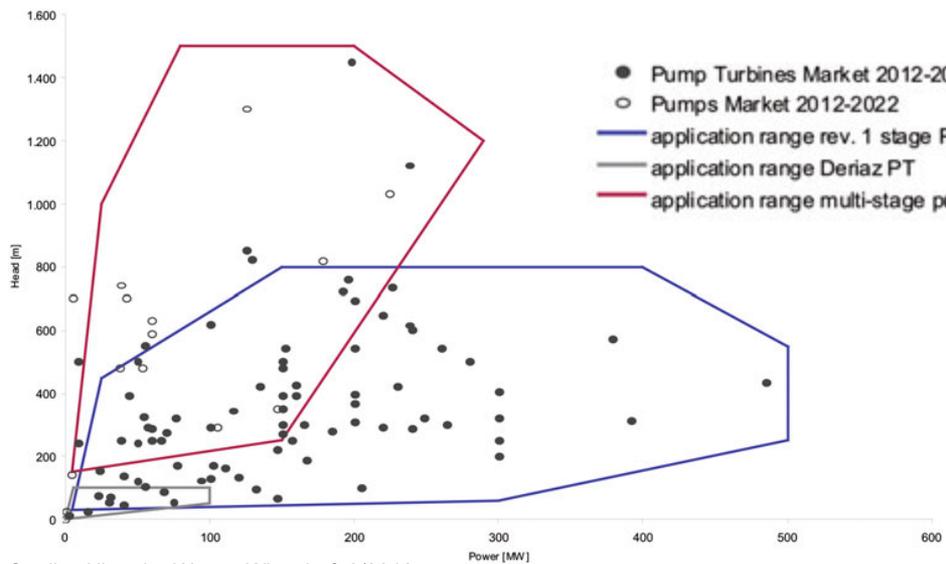


# Maschinenanordnung

Anordnung	Ternärer Maschinensatz	Binärer Maschinensatz
Bauaufwand	geringere Einbautiefe größere Kaverne	große Eintiefung notwendig geringerer Platzbedarf
Investitionskosten Elektromechanische Ausrüstung	3 Einheiten je Maschinensatz	2 Einheiten je Maschinensatz
Effizienz	Pumpe und Turbine auf max. Wirkungsgrad ausgelegt	Kompromiss bei der hydraulischen Auslegung notwendig
Flexibilität	kurze Umschaltzeiten zwischen den Betriebsarten Stufenlose Leistungsregelung durch HKS möglich	längere Umschaltzeiten aufgrund Drehrichtungsumkehr HKS nur zwischen den Maschinensätzen möglich
Betriebs- und Wartungskosten	höher	geringer

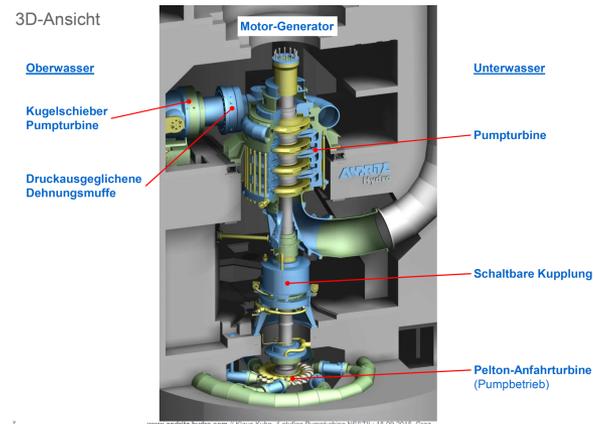
HKS ... Hydraulischer Kurzschluss

# Maschinenanordnung



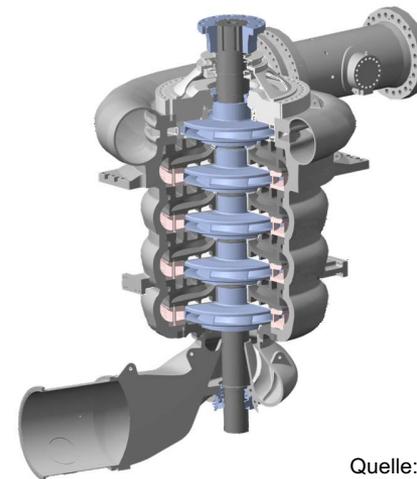
Quelle: Albrecht, WasserWirtschaft 8/2012

## 4 stufige Pumpturbine, Projekt Nestil (KW Linth-Limmern): H = 1050 m, P = 140 MW



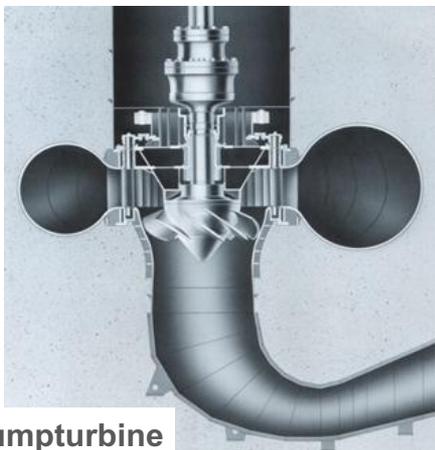
Quelle: Kuhn, Andritz AG, Praktikerkonferenz Wasserkraft 2015, Graz

## 5 stufige Speicherpumpe, KW Veytaux H = 865 m, P = 118 MW

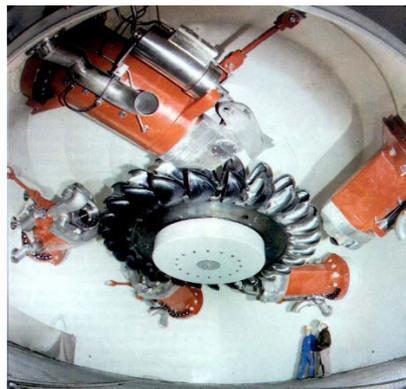


Quelle: Voith

## Pelton turbine, KW Bieudron: H = 1869 m, P = 423 MW



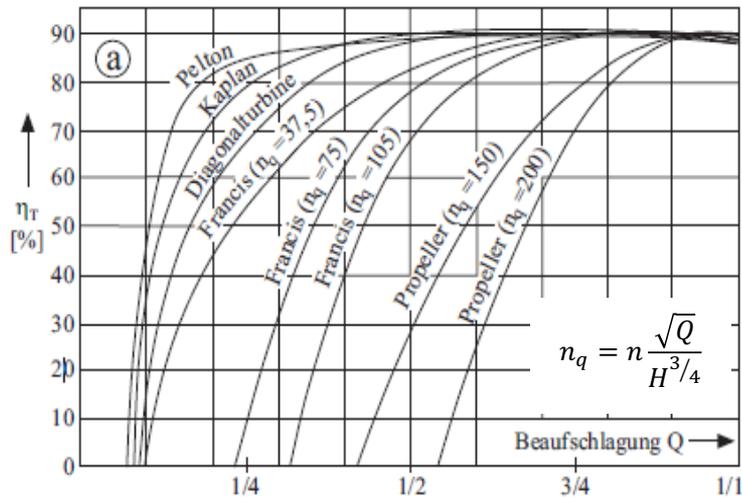
Deriaz Pumpturbine



Quelle: Andritz AG

# Regelfähigkeit hydraulischer Maschinen

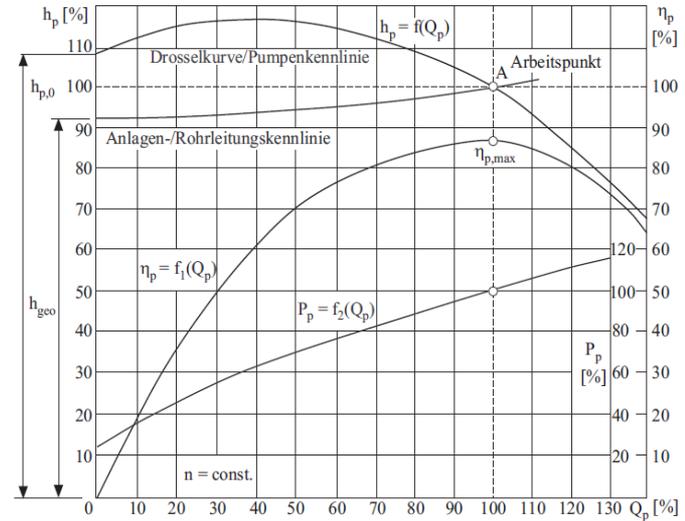
## Turbinen:



Quelle: Raabe, Hydr. Maschinen und Anlagen

- Regulierbar über verstellbaren Leitapparat
- Diagonalturbinen mit zusätzlich verstellbarem Laufrad
- Francisturbinen: Teillast bis ca. 30 %  $Q_{max}$  bzw.  $P_{max}$  möglich; Betriebsgrenze wegen Schwingungen (OVW II: Betrieb von 0% bis 100% möglich)
- Peltonturbine praktisch im gesamten Leistungsbereich von 0% bis 100%  $P_{max}$  regelbar

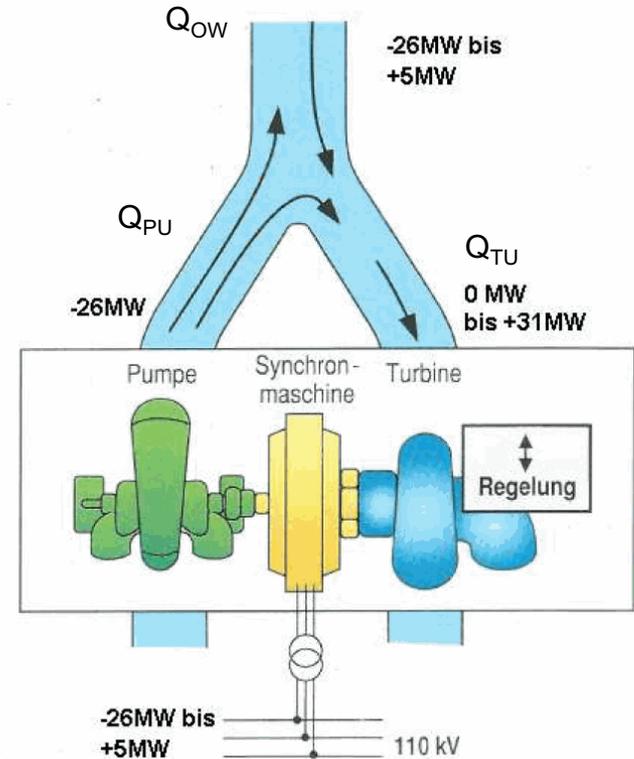
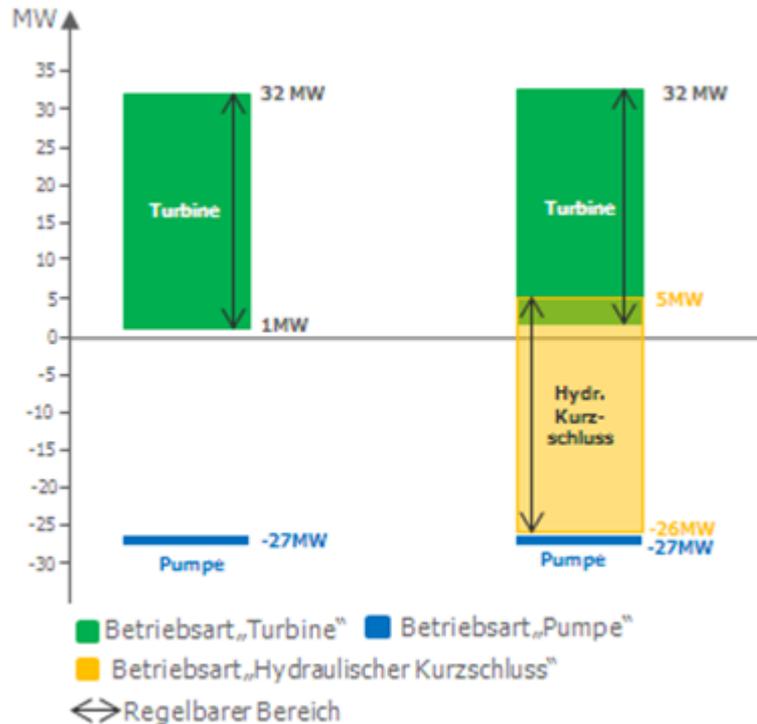
## Pumpen:



Quelle: Giesecke, Wasserkraftanlagen

- nicht regelbar
- Betriebspunkt (Arbeitspunkt) aus Schnittpunkt von Anlagenkennlinie und Pumpenkennlinie festgelegt
- variable Leistungsaufnahme aufgrund veränderlicher Förderhöhe durch Pegelschwankungen in den Speicherbecken

# Hydraulischer Kurzschluss

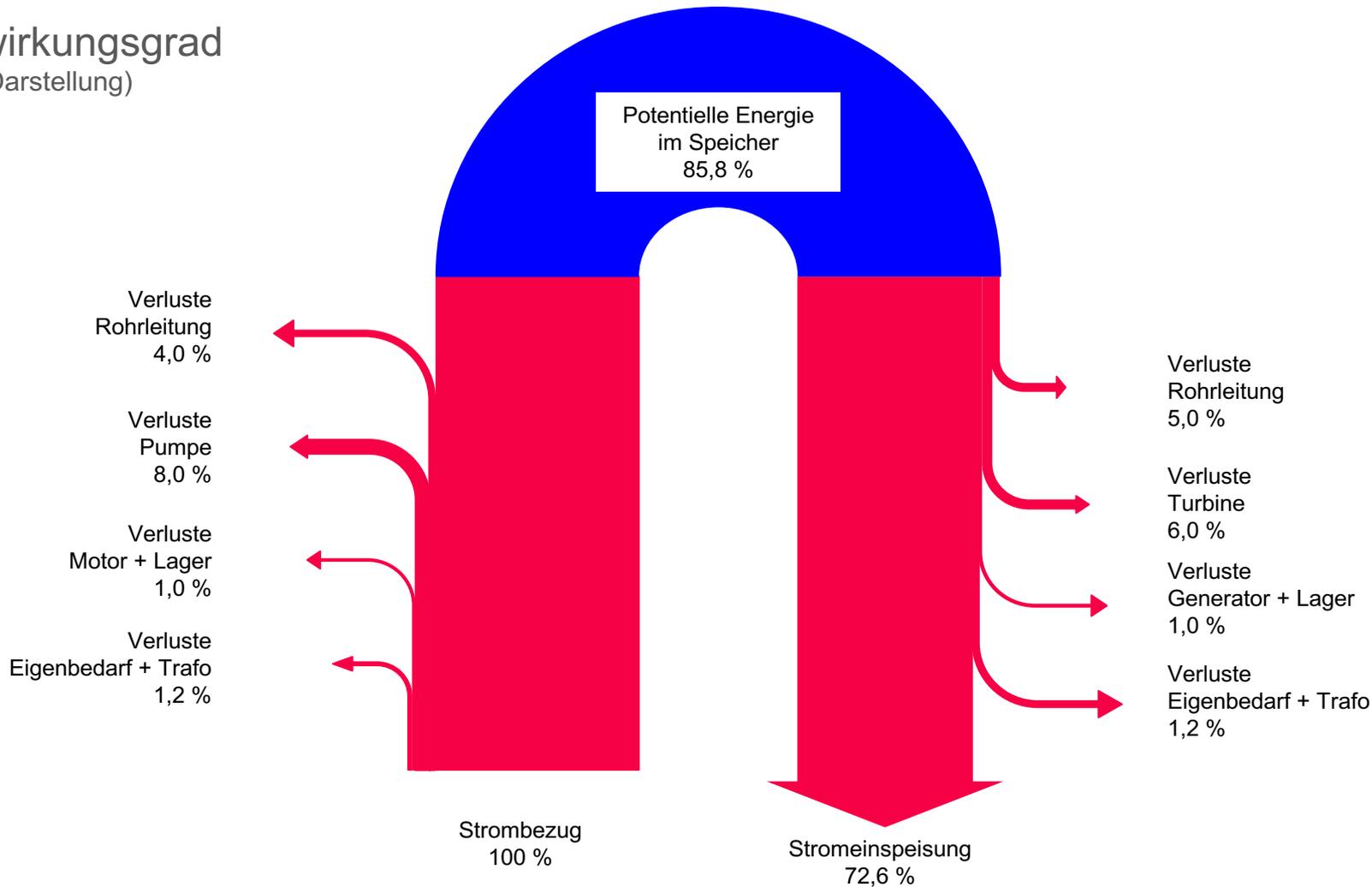


Prinzip des hydraulischen Kurzschlussbetriebs  
Quelle: Voith

- Überlagerung des Netzbezugs der Pumpe mit direktem, mechanischem Antrieb durch die Turbine desselben Pumpspeichersatzes
- Pumpe läuft unter Vollast (nicht regelbar) und fördert dazugehörige Wassermenge  $Q_{PU}$
- Turbine liefert Differenzleistung zwischen Pumpleistung und Motorleistung und braucht Wassermenge  $Q_{TU}$
- Differenzmenge  $Q_{OW} = Q_{PU} - Q_{TU}$  wird in den Oberwasserspeicher befördert

# Verluste in Pumpspeicheranlagen:

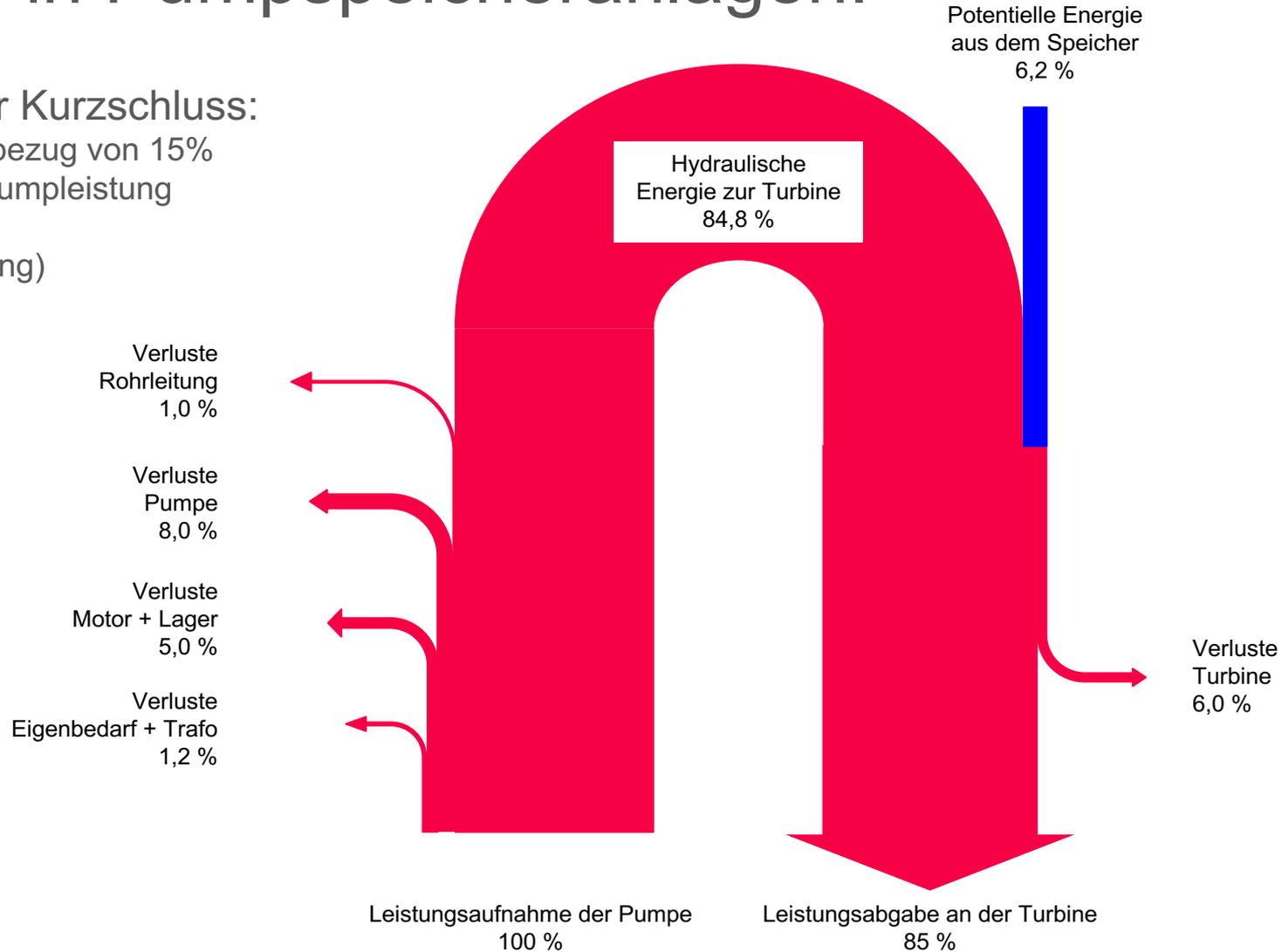
Wälzwirkungsgrad  
(eigene Darstellung)



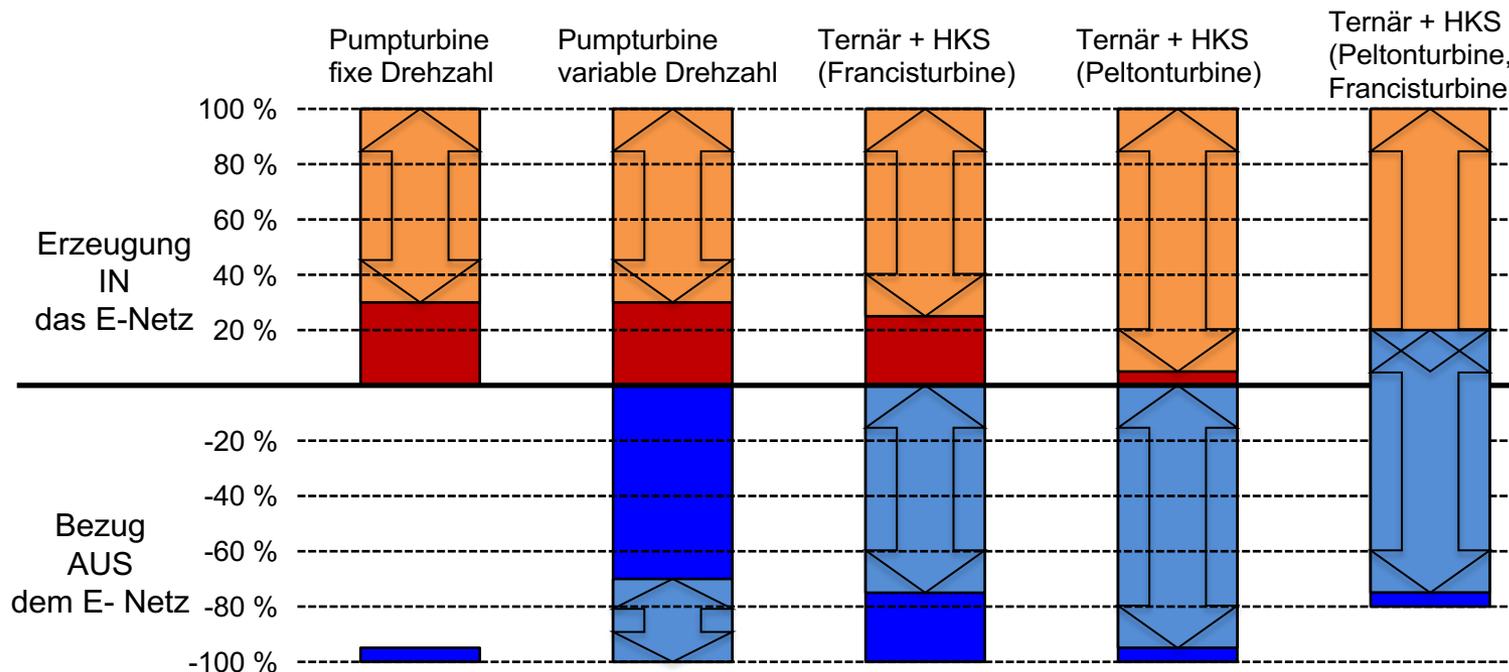
# Verluste in Pumpspeicheranlagen:

Hydraulischer Kurzschluss:  
bei einem Strombezug von 15%  
der maximalen Pumpleistung

(eigene Darstellung)



# Flexibilität verschiedener Maschinenkonzepte



Installierte elektr. Pumpenleistung 80% der installierten elektr. Turbinenleistung

Erhöhte Flexibilität durch den Einsatz mehrerer Maschinensätze (Kaskadierung) in einer Anlage

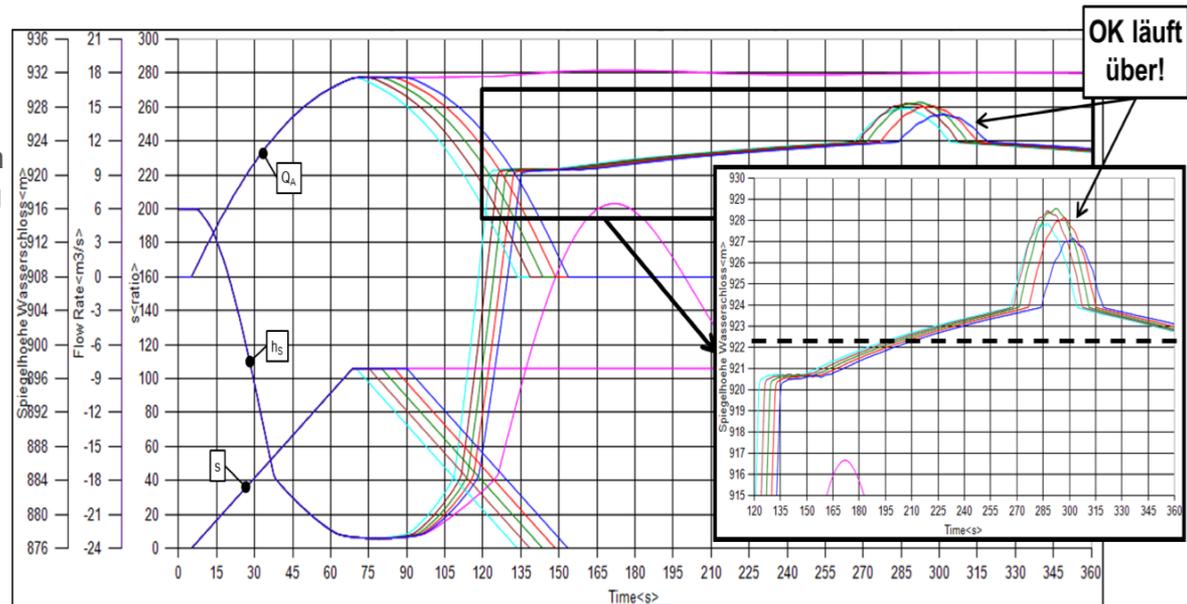
# Auswirkungen auf Maschine und Anlage

Flexibler Anlagenbetrieb aufgrund Anforderungen des elektrischen Netzes erfordert komplexe Triebwassersysteme zur Minimierung des Druckstoßes

- Teilweise mehrere Wasserschlösser
- Differential-Wasserschlösser
- Gedrosselte Wasserschlösser

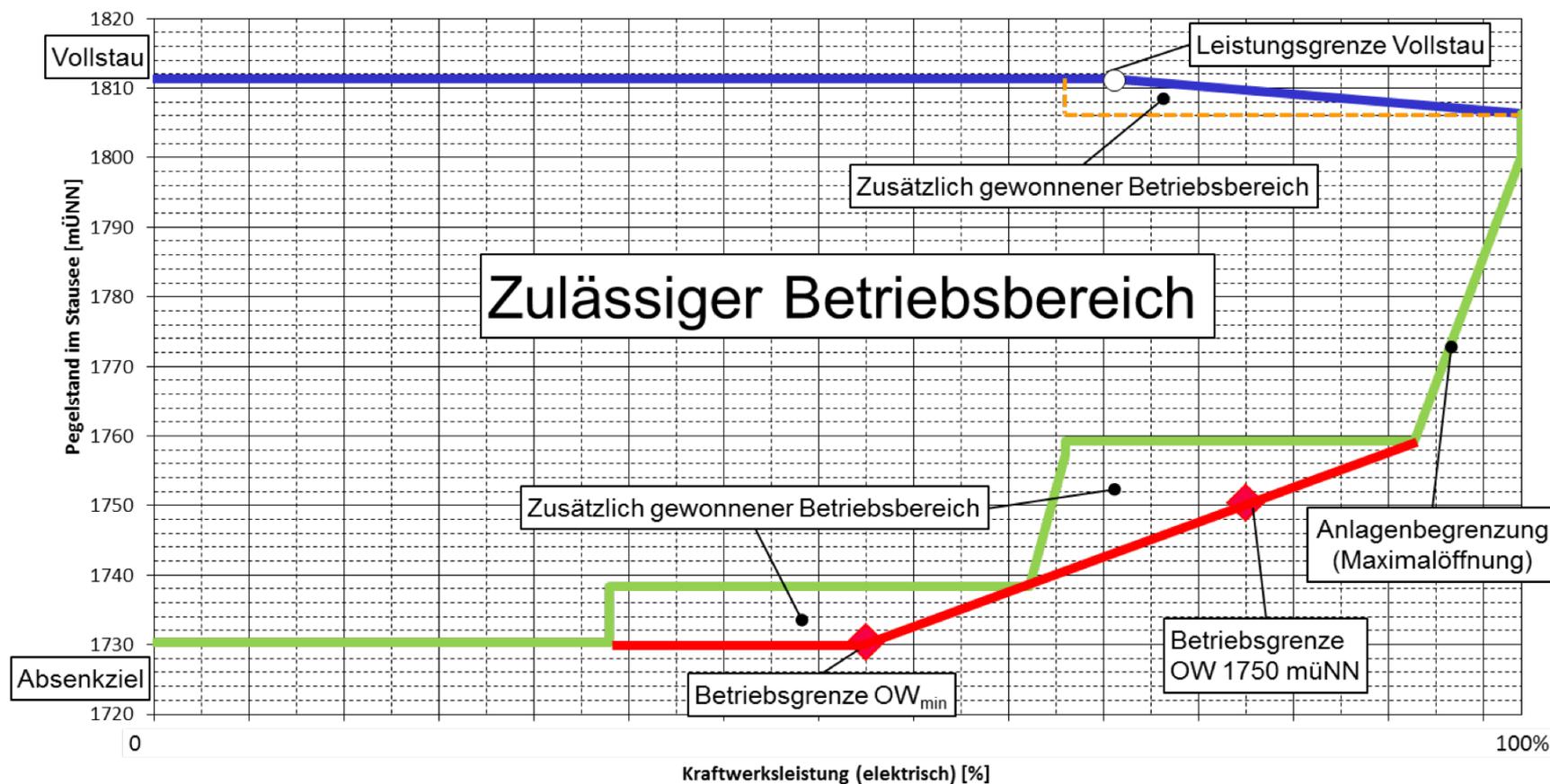
Intensive instationäre Untersuchungen (Druckstoßberechnung) von Betriebs- und Störfällen notwendig

- Umschalten von Betriebszuständen (in Resonanz zur Eigenschwingung des Systems)
- Lastabwurf
- Fehlsteuerungen in der Anlage



Quelle: Eigene Darstellung

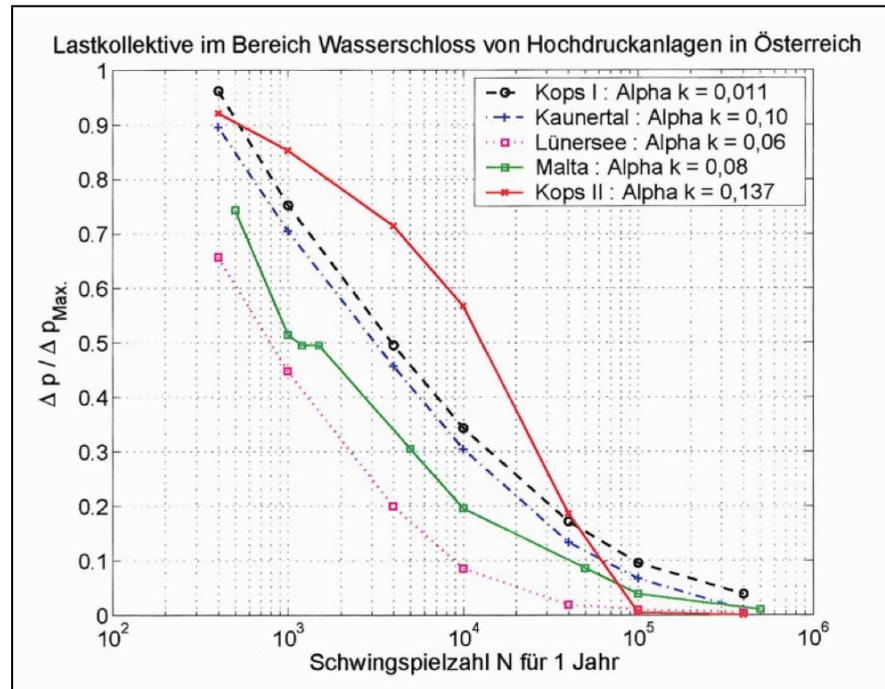
# Zulässiger Betriebsbereich nach Leistungssteigerung für flexiblen, dynamischen Betrieb



# Auswirkungen auf Maschine und Anlage

## Ergebnisse der Druckstoßberechnung

- Definition von Schließgesetzen
- Grenzen der dynamischen Fahrweise
- Anlagenbelastungen
- Lastkollektive



Quelle: Meusburger, Praktikerkonferenz Wasserkraft 2009, Graz

# Zusammenfassung

- Flexible Pumpspeicherlösungen sichern Ertrag auch in schwierigem Markt-Umfeld
- Reversible Pumpturbine in Anschaffung und Betrieb günstiger als ternärer Maschinensatz, jedoch weniger flexibel
- Pumpturbine mit variabler Drehzahl:
  - bessere Regelbarkeit im Pumpbetrieb
  - höhere Effizienz im Turbinenbetrieb
  - höhere Gestehungskosten
  - zusätzliche Verluste durch den Umrichter
- Hydraulischer Kurzschluss bietet Möglichkeit zur stufenlosen Regelung im gesamten Leistungsspektrum eines Maschinensatzes / Kraftwerks (Regelfähigkeit der Turbine als Voraussetzung)
- Flexibler und dynamischer Anlagenbetrieb führt zu höheren Anlagenbelastung