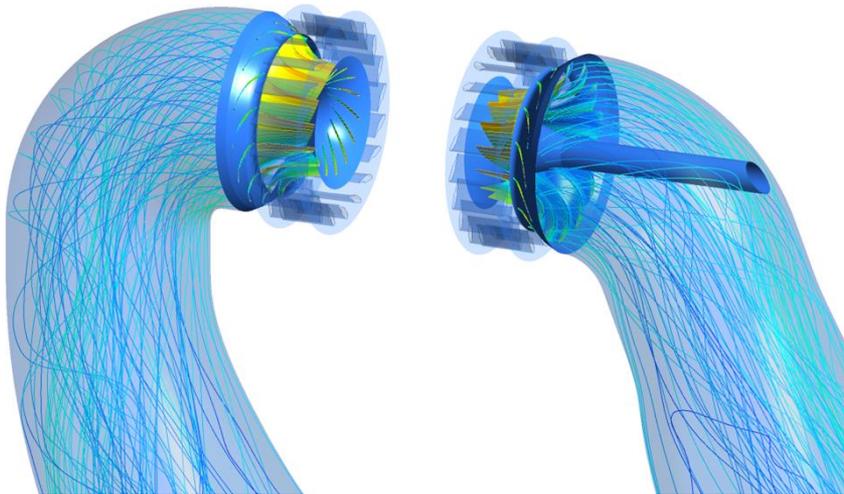


Refurbishment von Bestandsanlagen

Jürgen Schiffer, Helmut Benigni, Helmut Jaberg

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

Technische Universität Graz



Graz, 11. Februar 2016

EnInnov2016
 14. Symposium Energieinnovation | 10.02.–12.02.2016

Einleitung

- Ziel von Refurbishment-Maßnahmen: Erhöhung der Anlageneffizienz durch Optimierung und Austausch von entscheidenden Komponenten
- Potentialabschätzung auf Basis von CFD (=Computational Fluid Dynamics) möglich
- Numerische Simulation des IST-Zustandes dient als Basis für geometrische Optimierung von Leitschaufeln, Laufschaufeln, ...
- CFD hat sich zu einem verlässlichen Berechnungswerkzeug entwickelt
→ Potential zur Steigerung der Jahresarbeit lässt sich klar belegen und quantifizieren
- Kleinwasserkraft: Optimierung und Realisierung der überholten Maschine oftmals lediglich auf Basis von CFD-Ergebnissen
- Großwasserkraft: Zur Absicherung und Übernahme von Garantien sind zusätzlich Modellversuche notwendig

Ausgewählte Beispiele von Refurbishment-Projekten an Bestandsanlagen

- Fallstudie 1: Kaplan S-Turbinen, Kraftwerk Branesti/Pucioasa (Rumänien)

Maschinen-sätze	Nenndaten je Turbine					Besonderheit
	D_{Laufgrad}	Q_{max}	H_{nenn}	n_{nenn}	P_{nenn}	
3 x S-Turbine	700 mm	2.60 m ³ /s	15.20 m	750 U/min	310 kW	12 in etwa baugleiche Anlagen in einem Kraftwerkspark, Baujahr ~ 1960

- Fallstudie 2: Francis-Zwillingsturbinen, Kraftwerk Meitingen (Deutschland)

Maschinen-sätze	Nenndaten je Turbine					Besonderheit
	D_{Laufgrad}	Q_{max}	H_{nenn}	n_{nenn}	P_{nenn}	
3 x Zwilling-Francis	2400 mm	42 m ³ /s	13 m	187 U/min	4.4 MW	Historisches Kraftwerk, aufwendiges Saugrohr, Baujahr ~ 1920

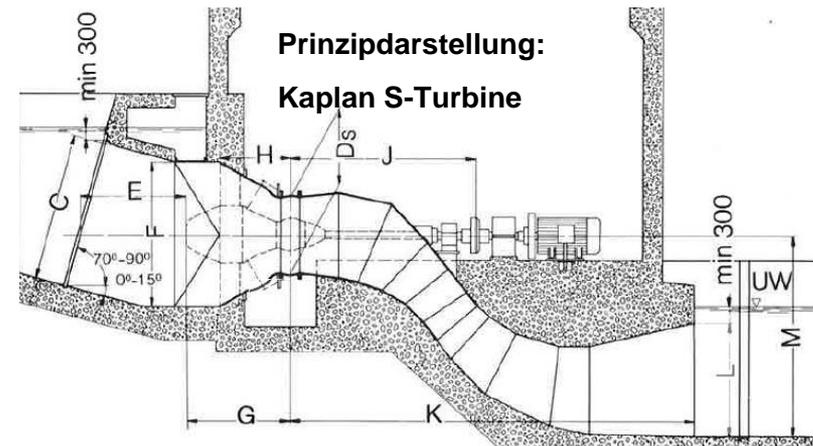
- Fallstudie 3: Francis-Turbinen, Kraftwerk Kadincik II (Türkei)

Maschinen-sätze	Nenndaten je Turbine					Besonderheit
	D_{Laufgrad}	Q_{max}	H_{nenn}	n_{nenn}	P_{nenn}	
1	2300 mm	48 m ³ /s	132 m	300 U/min	56 MW	Kavitationsprobleme, Standrohr im Saugrohr, Baujahr ~ 1970

Fallstudie 1: Kaplan S-Turbine

Ausgangssituation:

- Übernahme eines Kraftwerksparks in Rumänien durch österreichischen Energieversorger \Rightarrow insgesamt 31 baugleiche S-Turbinen im Einsatz
- Betriebserfahrung: Tatsächlich erreichtes Jahresarbeitsvermögen lag deutlich unter den Erwartungen \rightarrow Optimierungen notwendig!
- Ziel: Entwicklung einer verbesserten, einfach geregelten Turbinenhydraulik

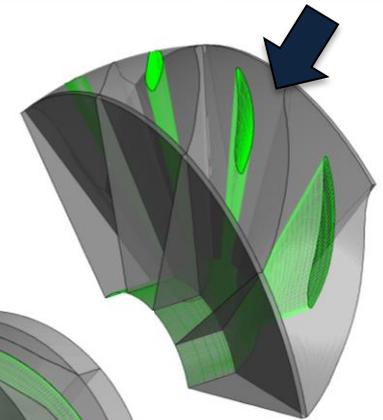
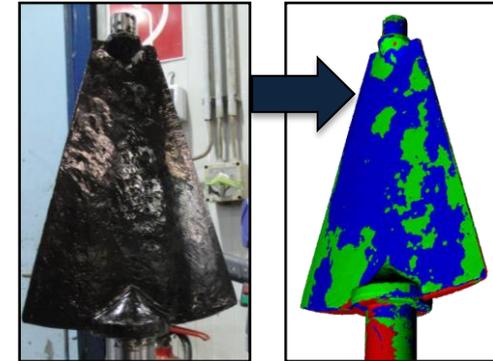


Fallstudie 1: Kaplan S-Turbine

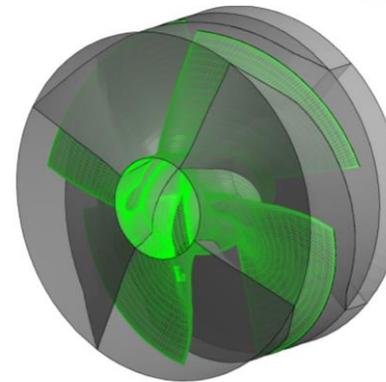
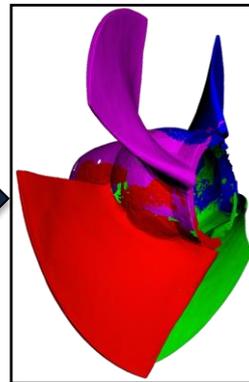
Vorgehensweise:

- 3D-Oberflächenscan der Lauf- und Leitschaufeln
- CAD-Modellierung von Zulauf und Saugrohr
- Numerische Strömungssimulation des Ausgangszustandes
- Ableitung von Optimierungsmaßnahmen
- Entwicklung von neuen Lauf- und Leitschaufeln

Eine von 12 Leitschaufeln

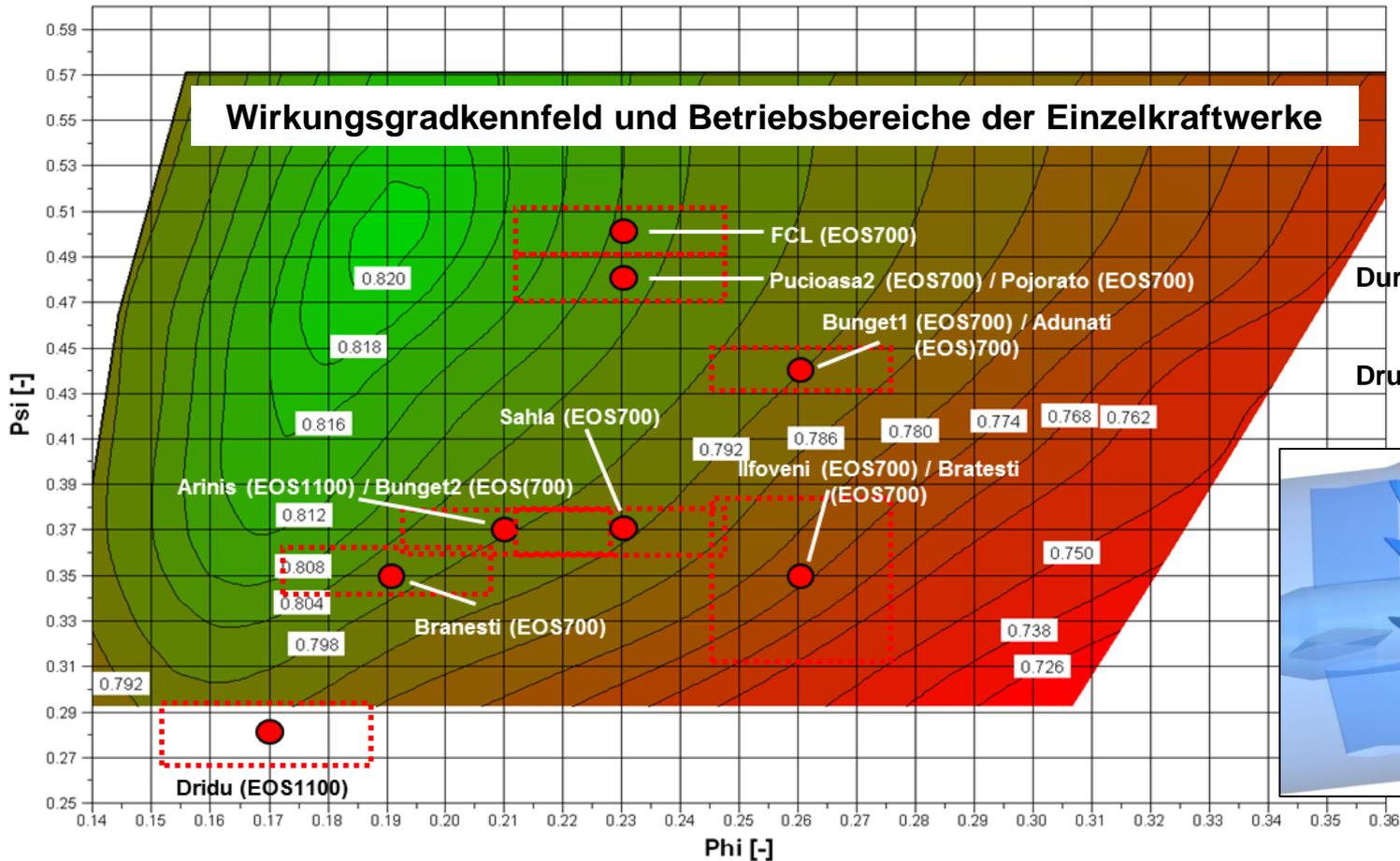


Lauf-
rad mit
vier
fixen
Lauf-
schaufeln



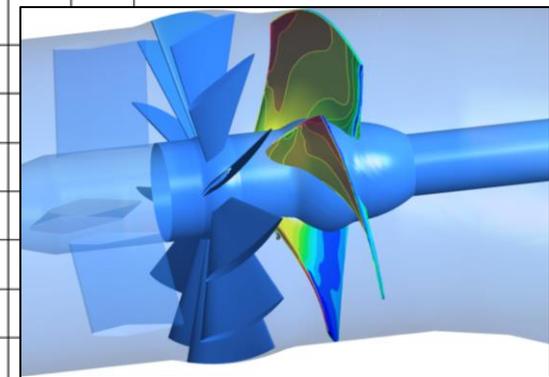
Fallstudie 1: Kaplan S-Turbine

CFD-Analyse der Ausgangssituation zeigt: ⇒ Moderater Spitzenwirkungsgrad
 ⇒ Kraftwerksbetrieb fernab vom Optimum



Durchflussziffer: $\varphi = \frac{Q}{A \cdot u}$

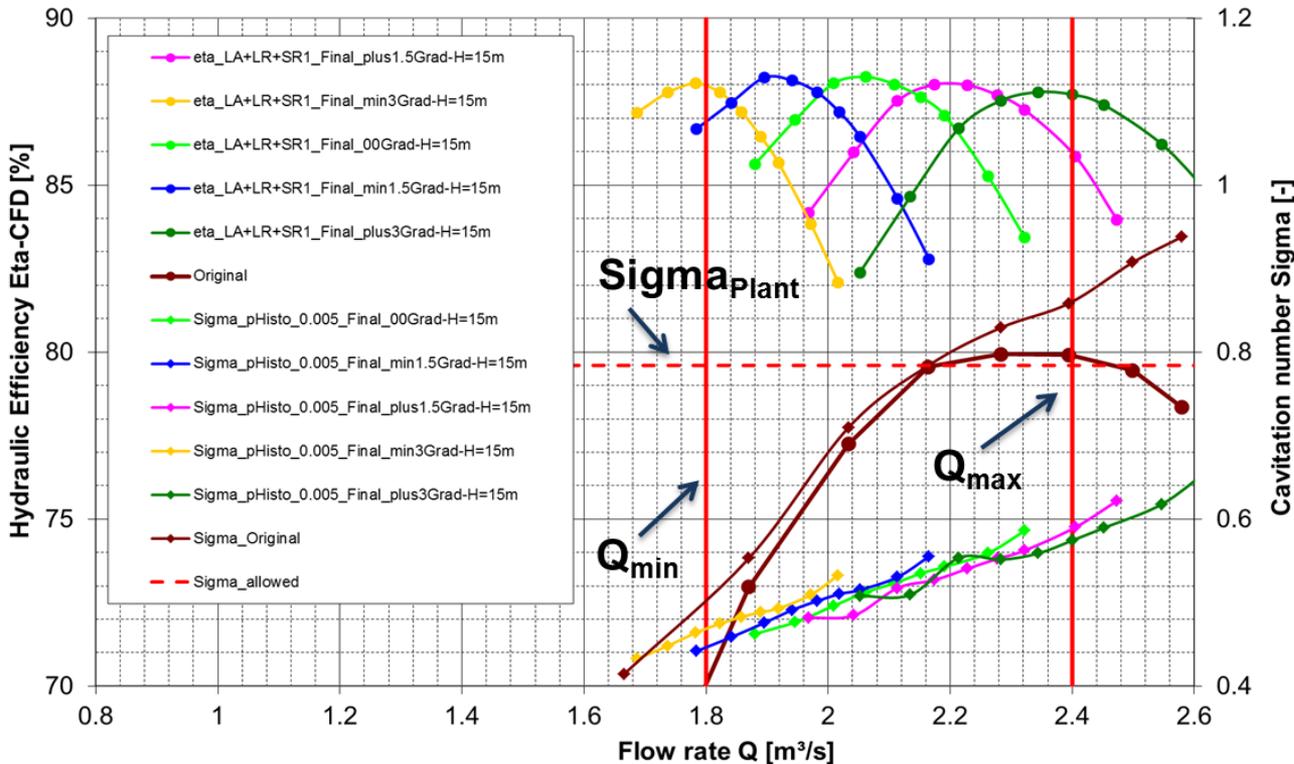
Druckziffer: $\psi = \frac{2 \cdot g \cdot H}{u^2}$



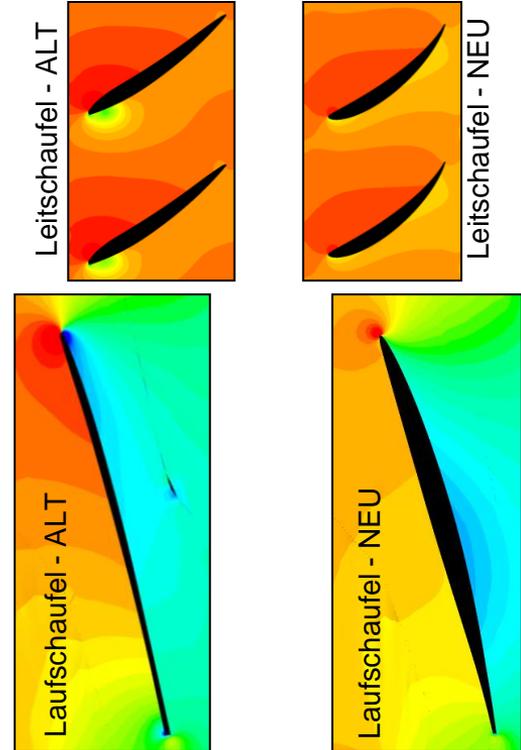
Fallstudie 1: Kaplan S-Turbine

Neuauslegung von Leit- und Laufschaufel bringt im Falle KW-Branesti:

- Deutliche Reduktion der Verluste in Leitapparat und Laufrad
- Erhöhung des Spitzenwirkungsgrades mit fixen Laufschaufeln von 80 auf 88 %
- Kavitationssicherheit im gesamten Betriebsbereich



Druckverteilungen im Bestpunkt



Fallstudie 2: Francis-Zwillingsturbine

Ausgangssituation:

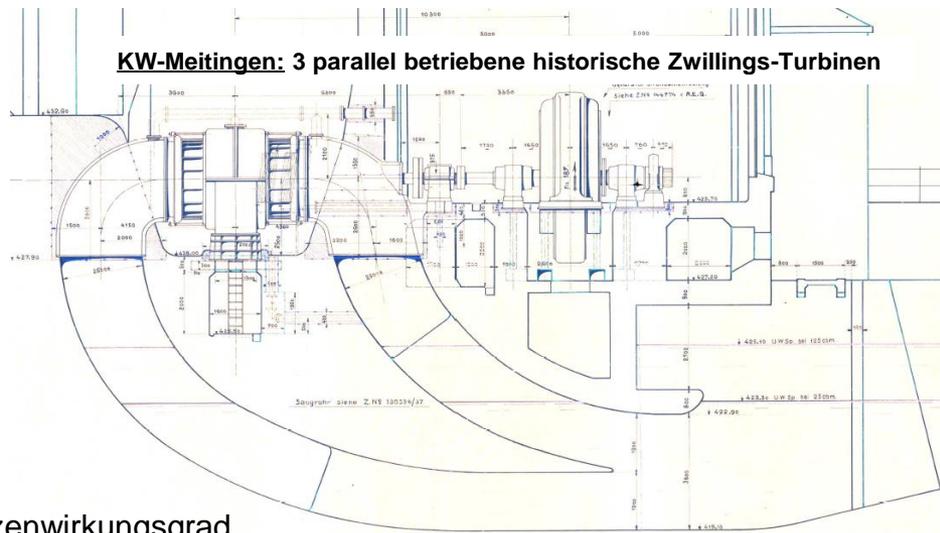
- Neue Gesetzgebung in D: Verbesserte Einspeisetarife, wenn durch Refurbishment Jahresarbeitsvermögen um mind. 10 % erhöht werden kann
- Veränderte Rahmenbedingungen ermöglichen den Austausch der Laufräder einer historischen Wasserkraftanlage (Baujahr 1922), sowie eine Veränderung der Betriebsführung

Ziele:

- Beurteilung der IST-Situation
- Entwicklung von neuen Laufrädern unter Beibehaltung der Zuströmung (Leitapparat) und der Abströmung (Saugrohr)

Herausforderungen:

- Ungünstige Saugrohrkonfiguration begrenzt Spitzenwirkungsgrad
- Großes numerisches Modell, da beide Turbinen des Zwillings-Satzes gemeinsam untersucht werden müssen



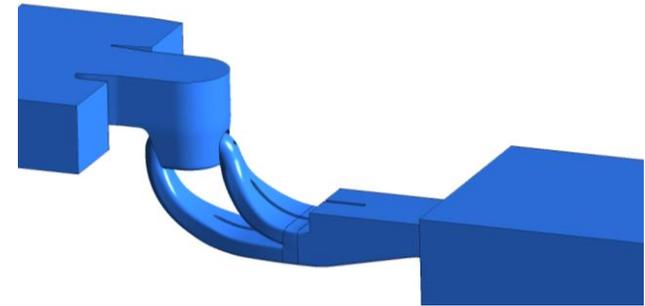
Fallstudie 2: Francis-Zwillingsturbine

Analyse des IST-Zustandes:

- CFD-Simulation bestätigte die schlechte Performance der historischen Zwillingsturbine

⇒ $\eta_{\text{Opt}} = 82.3\%$ bzw. $\eta_{\text{Qmax}} = 78.3\%$

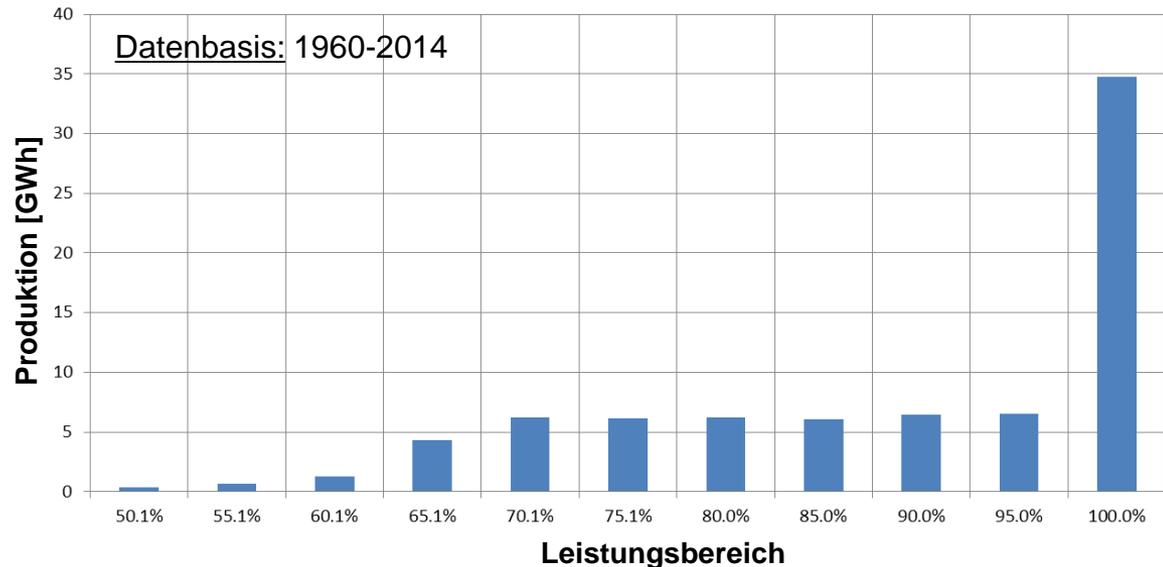
- Turbinenwirkungsgrade der Einzelmaschinen unterschieden sich aufgrund der unterschiedlichen Saugrohrgestaltung



- Auswertung der langjährigen Produktionsdaten zeigt

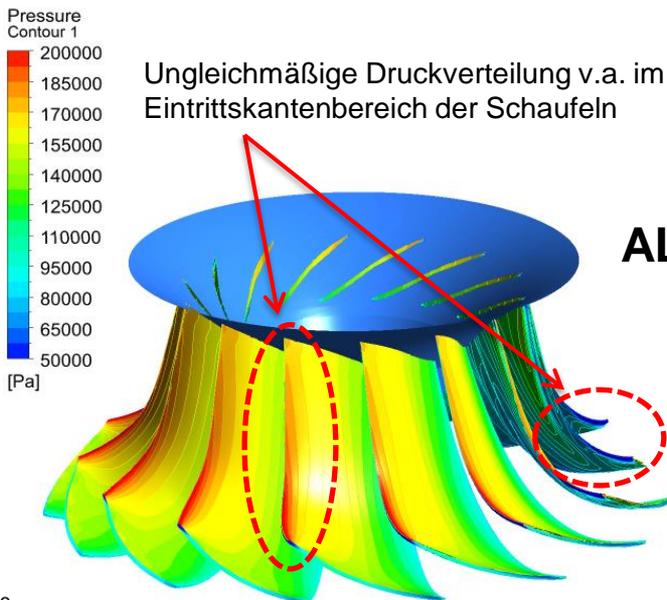
⇒ Größter Anteil der Erzeugung erfolgt im Volllastbetrieb

⇒ Optimierung für höchste Wassermengen notwendig !!!

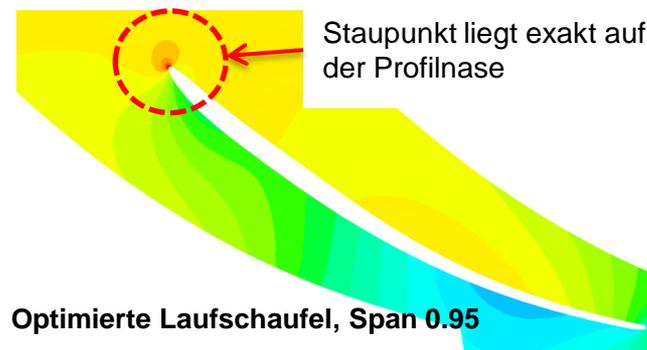
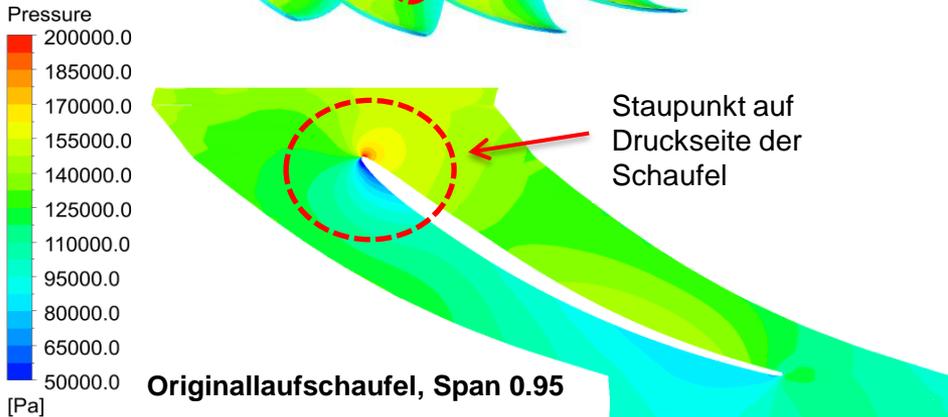
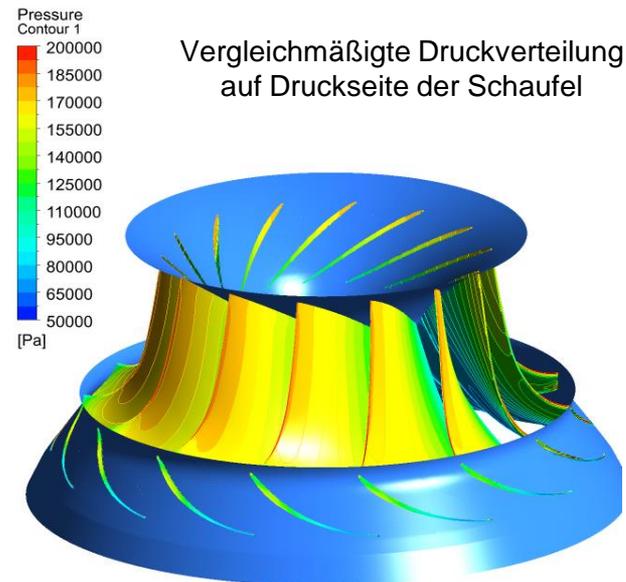


Fallstudie 2: Francis-Zwillingsturbine

Qualitative Ergebnisse der Optimierung für den Bestpunkt:

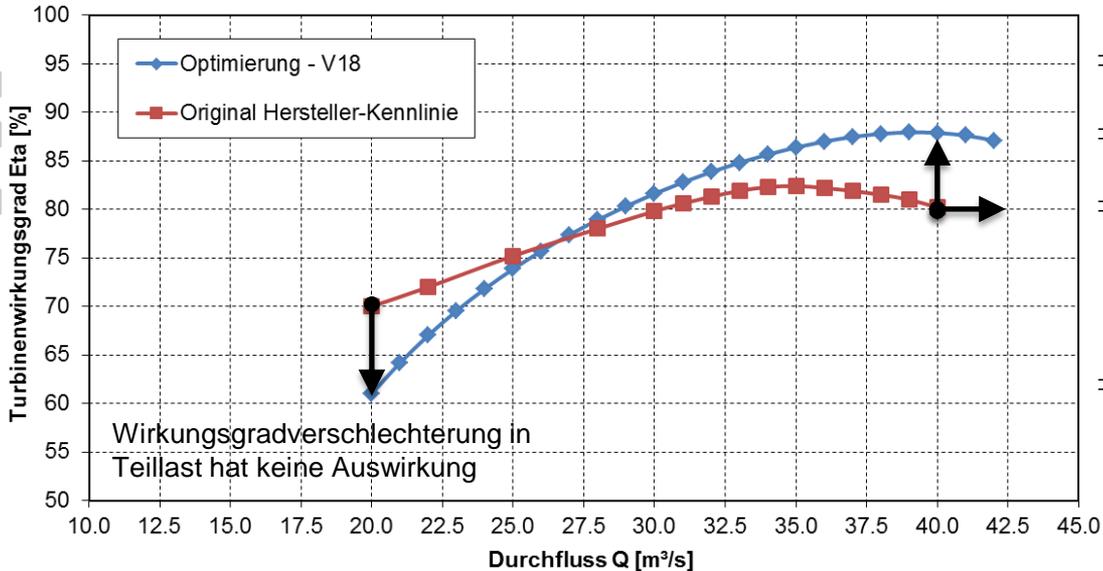


ALT → NEU



Fallstudie 2: Francis-Zwillingsturbine

Optimierungsergebnisse in Zahlen:



- ⇒ Erhöhung des Spitzenwirkungsgrades um 10 %
- ⇒ Erhöhung des Schluckvermögens um 2 m³/s
- ⇒ Optimierung der Betriebsführung
(v.a. eine getrennte Regelung beider Leitapparate eines Maschinensatzes ist entscheidend)
- ⇒ **In Summe: Deutlich erhöhte Jahresarbeit !**

Optimiertes Francis-Laufrad in Gießerei



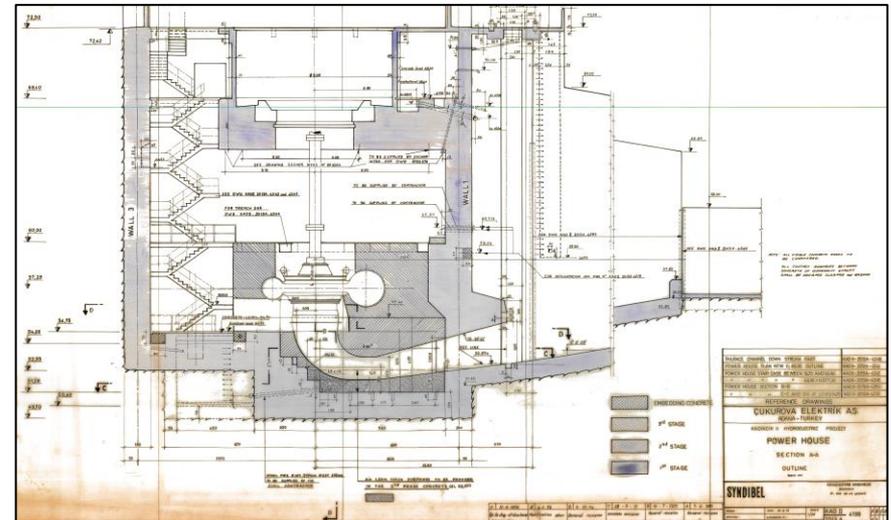
Energetische Betrachtung	Betriebs-Tage: 2001-2014	Betr.-Tage / Jahr	GWh NEUE HYDRAULIK
Turbine1	12103	220.1	22.27
Turbine 2	19782	359.7	34.98
Turbine 3-beide (von 20089)	13403	243.7	22.87
Turbine 3- nur 1	6686	121.6	3.50
	51974	944.98	83.62
		Eigenverbrauch	0.25
			83.37
Schluckvermögen Turbine		42.00m³/s	
T3 Umschaltung auf beide LR bei		21.00m³/s	
Minstdurchfluss T3		10.50m³/s	

+14.8 % Jahresarbeit
Bez. auf Ausgangszustand mit 72.63 GWh

Fallstudie 3: Francis-Turbine

Ausgangssituation:

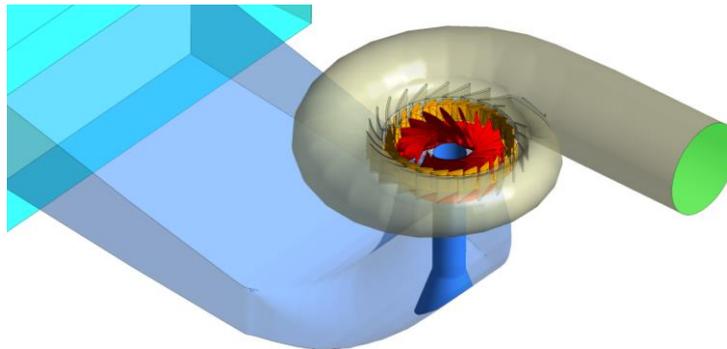
- Betriebserfahrung mit türkischem Kraftwerk KW-Kadincik II zeigt:
 - ⇒ Moderater Wirkungsgrad aufgrund Kraftwerkbetriebs fernab des Optimums
 - ⇒ Massive Kavitationsprobleme wurden seit Inbetriebnahme niemals in Griff bekommen
- Ziel:
 - ⇒ Analyse des IST-Zustandes und Ableitung von Optimierungspotential
 - ⇒ Neuauslegung von Lauf- und Leitschaufeln



Fallstudie 3: Francis-Turbine

Vorgehensweise:

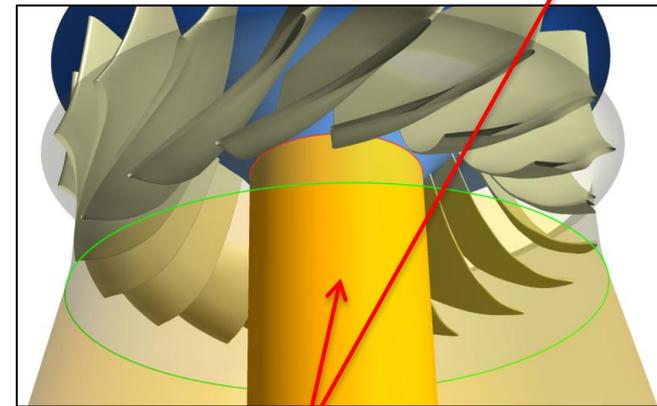
- Modellierung und Vernetzung aller Kraftwerkskomponenten
- CFD-Simulation des Ist-Zustandes
- Analyse von Jahresganglinien und Produktionsdaten aus den letzten Jahrzehnten (!!!)
 - ⇒ Gibt Aufschluss darüber, für welche Betriebspunkte Hydraulik optimiert wird
- Analyse des Einfluss des Standrohres
- Designoptimierung von Leit- und Laufschaufel



Lauftrad im eingebauten Zustand



CAD-Modell von Lauftrad und Saugrohr

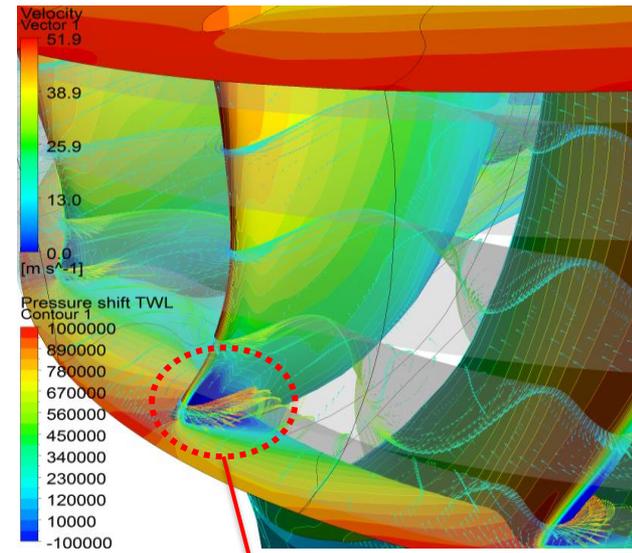


Besonderheit: Standrohr zur Reduktion von Schwingungen

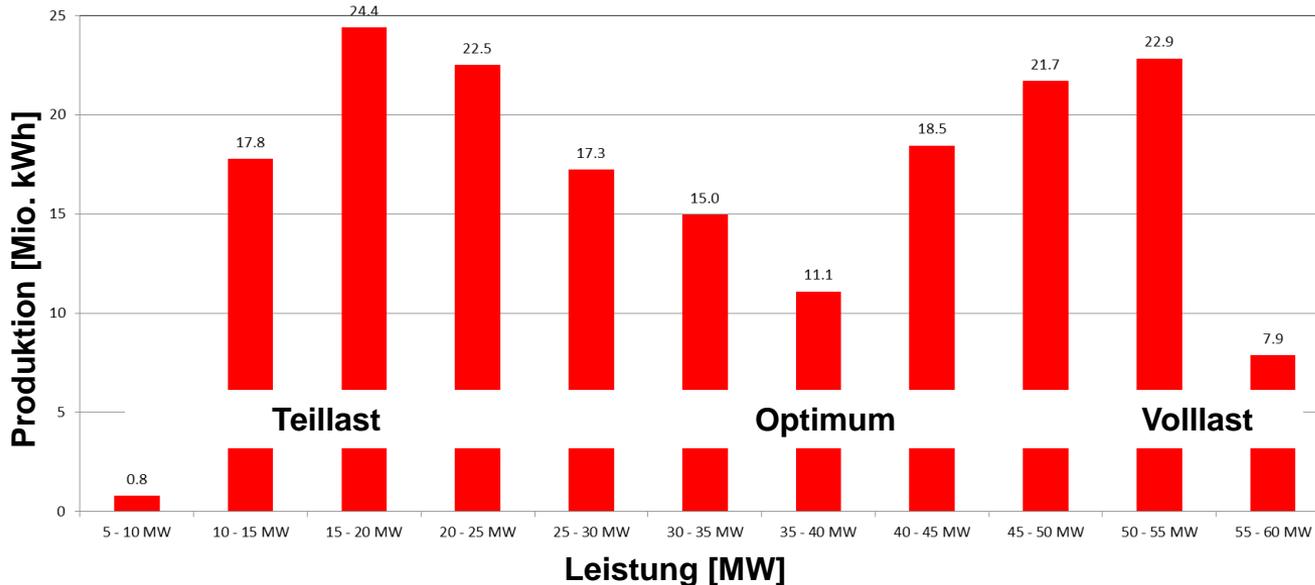
Fallstudie 3: Francis-Turbine

Analyse der Ausgangssituation:

- Kavitationsprobleme v.a. an Eintrittskante
- Spitzenwirkungsgrad von 92 % vergleichsweise gering
- Wirkungsgradoptimierung über gesamten Fahrbereich notwendig



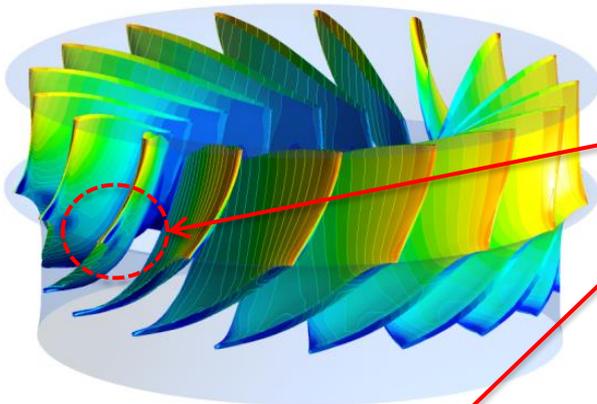
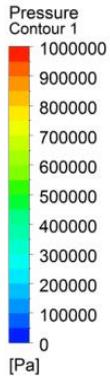
10 years average 2004-2013, production of Kadincik 2



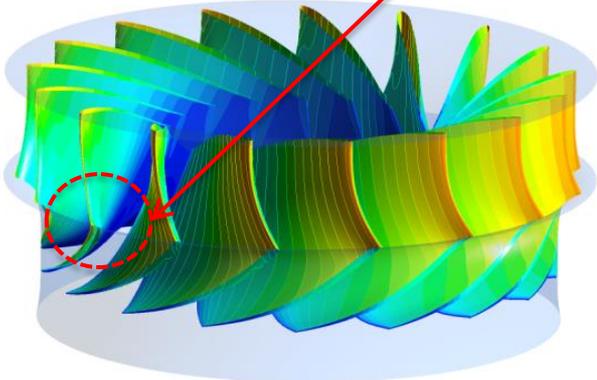
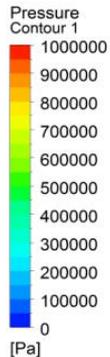
Fallstudie 3: Francis-Turbine

Qualitative Ergebnisse der Laufradoptimierung im Bestpunkt:

Druckkonturen, Originallaufrad

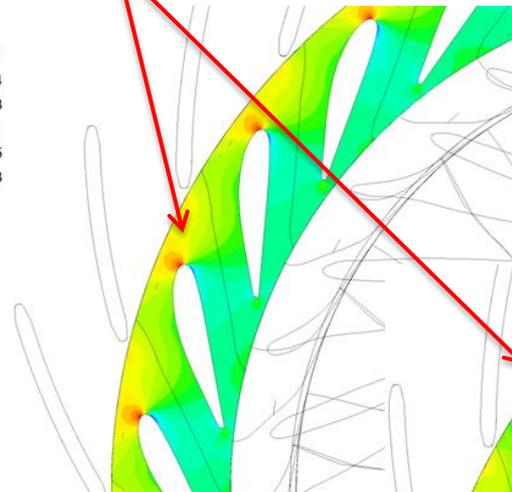
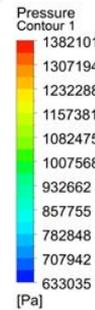


Druckkonturen, Optimiertes Laufrad

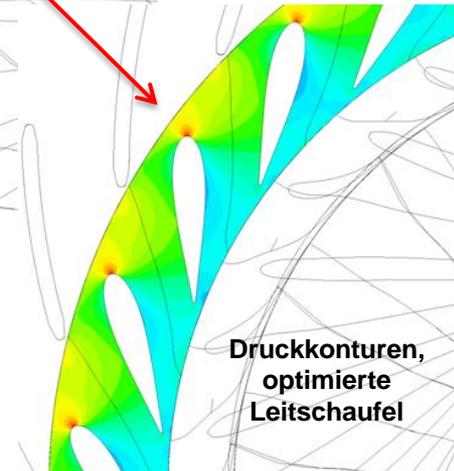


Neue Designs bringen:

- Gleichmäßigere Druckverteilung
- Verbesserte Anströmung der Eintrittskante



Druckkonturen, Originalleitschaufel

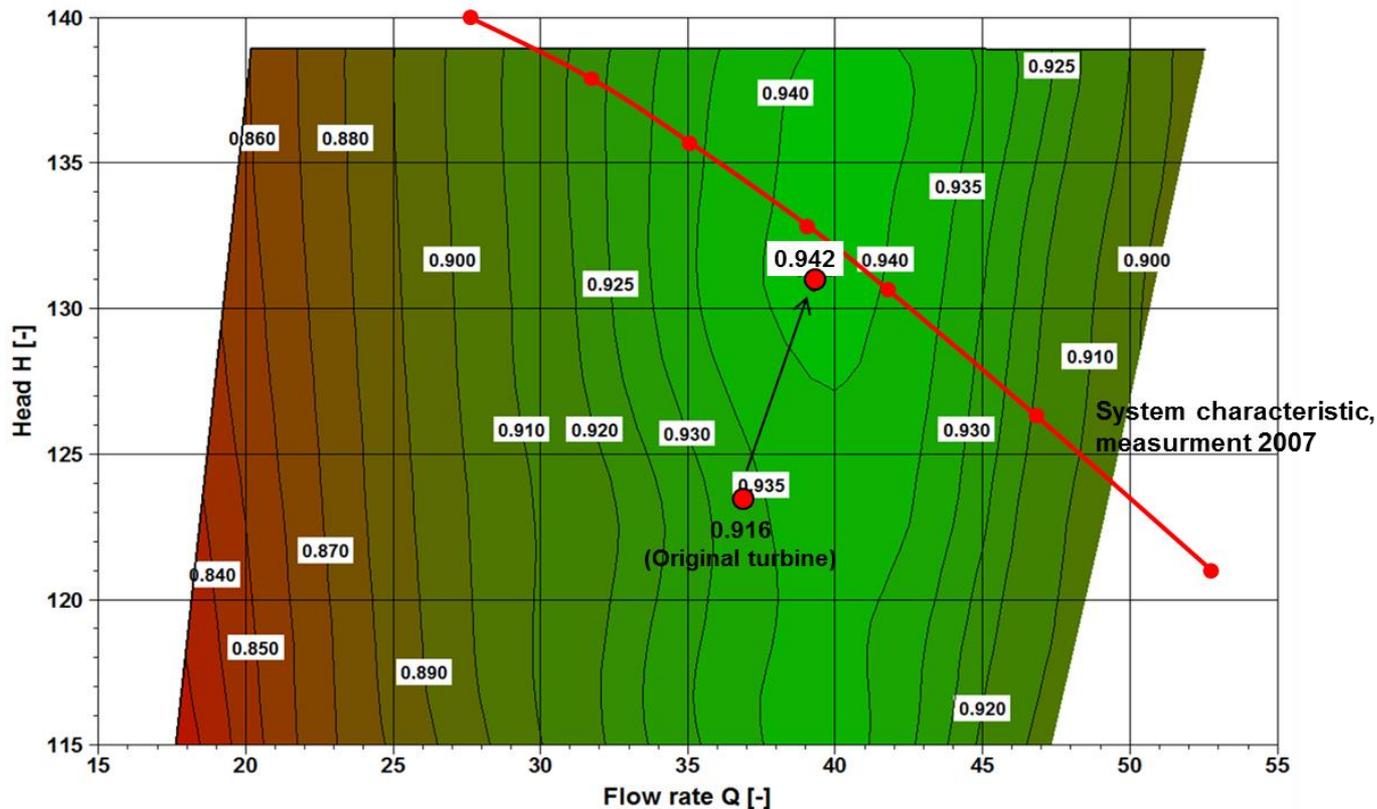


Druckkonturen, optimierte Leitschaufel

Fallstudie 3: Francis-Turbine

Optimierung der Hydraulik bringt:

- Anpassung der Wirkungsgradmuschel an tatsächlichen Fahrbereich
- Steigerung des Spitzenwirkungsgrades um 2.6 Prozentpunkte
- Kavitationssicherheit über gesamten Betriebsbereich



Zusammenfassung

- Refurbishment-Maßnahmen hydraulischer Maschinen können Effizienz von Wasserkraftwerken erheblich steigern
- Auch Kavitations- und Schwingungsverhalten kann deutlich verbessert werden
- Optimierung von Lauf- und Leitschaufeln auf Basis CFD-Untersuchung der IST-Situation mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich
- Zusätzliche Analyse von Produktionsdaten ermöglicht gezielte Optimierung
- Leitschaufel- und Laufradtausch oft verhältnismäßig einfach zu bewerkstelligen
- Amortisationszeit der Investitionen liegt oft nur bei wenigen Jahren
- Kraftwerksbetrieb lässt sich über weitere Jahrzehnte sicherstellen