

# Modernisierung der Francis-Turbinen HPP-Hirfanlı / Türkei

Von der CFD-Analyse und dem hydraulischen und mechanischen Design-Review bis zum **Modellversuch**



Technische Universität Graz  
Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Kopernikusgasse 24/IV  
8010 Graz  
Österreich  
<http://www.hfm.tugraz.at>



Jaberg und Partner GmbH  
Kerscheckstrasse 41  
8073 Vasoldsberg  
Österreich  
<http://www.JabergundPartner.com>



Turkish Electromechanic Industries Inc.  
Çamlıca Mahallesi 145.  
Sokak No:16 Yenimahalle  
Ankara  
Türkei  
<https://www.temsan.com.tr>



EÜAŞ Elektrik Üretim A.Ş.  
District Dumlupınar Avenue 7.Km No: 166  
Ankara,  
Türkei  
<https://www.euas.gov.tr>

Helmut **Benigni**<sup>1</sup>, Jürgen **Schiffer-Rosenberger**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TU Graz, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

<sup>2</sup>Jaberg und Partner GmbH

# Warum wird eine hydraulische Maschine gemessen

---

## Abnahmeversuche am Modell

**Nachweis der Garantien für eine Modellmaschine** für eine geometrisch ähnliche Großausführung anstatt des Garantienachweises durch eine Anlagemessung

### IEC-Regeln für Modellabnahmeversuche:

Herausgegeben von der International Electrotechnical Commission (IEC)

### IEC Publication 60193 (2019)

Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests

### IEC Publication 60497 (1976)

International code for model acceptance tests of storage pumps

#### Inhalt dieser Regeln:

Bezeichnungen und Definitionen, technische Garantien, Versuchsbedingungen, Modellähnlichkeit, Versuchsdurchführung, Auswertung und Berechnung, Versuchsbericht, Messmethoden für Q, H, M, n, Kavitationsversuche

# Warum wird eine hydraulische Maschine gemessen

## Abnahmeversuche am Modell

Einige wichtige Forderungen und Festlegungen aus den IEC-Regeln:

### Auf Präzisionsprüfständen durchzuführen

Hohe Messgenauigkeit und gute Kalibrierfähigkeit

Typ. Genauigkeit  $\pm 0.3\%$   
im Wirkungsgrad

### Mindestgenauigkeiten der Messgeräte erforderlich

Kalibration der Messgeräte vor Ort,  
tw. im eingebauten Zustand

### Geometrische Ähnlichkeit von Modell und Großausführung

der wasserführenden Teile vom Eintritt bis zum Austritt der Maschine

Vollhomologer Versuch

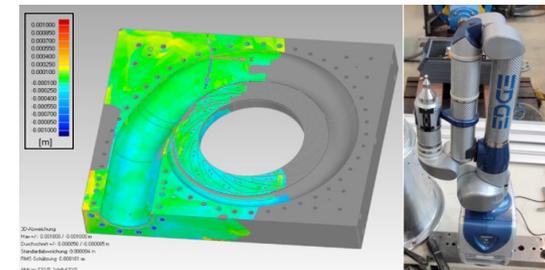
### Kontrolle der Modellähnlichkeit

durch Geometrieprüfung Modell und Großausführung

### Zulässige Formabweichungen und Rauigkeiten

### Mindestwerte für Modellgröße und Versuchsfall-/förderhöhe

Garantieren gleichen Strömungstyp in Modell und Großausführung (turbulente Strömung; Mindestwert für die Reynoldszahl im Modell)



### Kunde mit Berater soll beim Abnahmeversuch anwesend sein

# Warum wird eine hydraulische Maschine gemessen

Für große Wasserturbinen, Speicherpumpen und Absperrorgane bei großen Leistungen, hohen Garantien und großen Abmessungen, mit (Laufrad-) durchmessern:

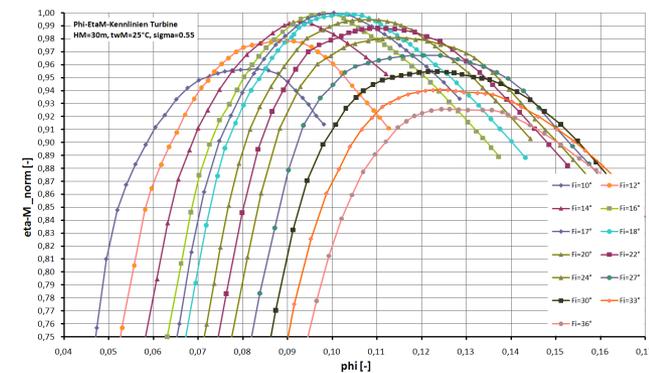
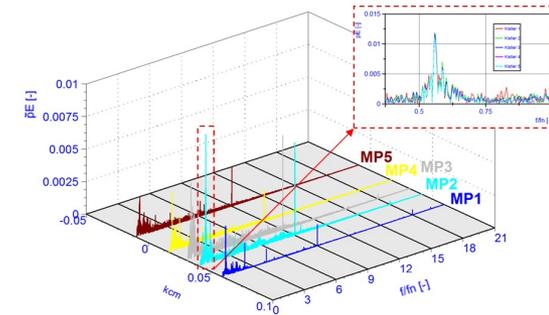
$$D \cong 1000 \div 8000 \text{ mm}$$

Untersuchung am stark verkleinerten Modell exakt nachgebildet vom Einlauf bis zum Auslauf

$$D_M \cong 200 \div 500 \text{ mm}$$

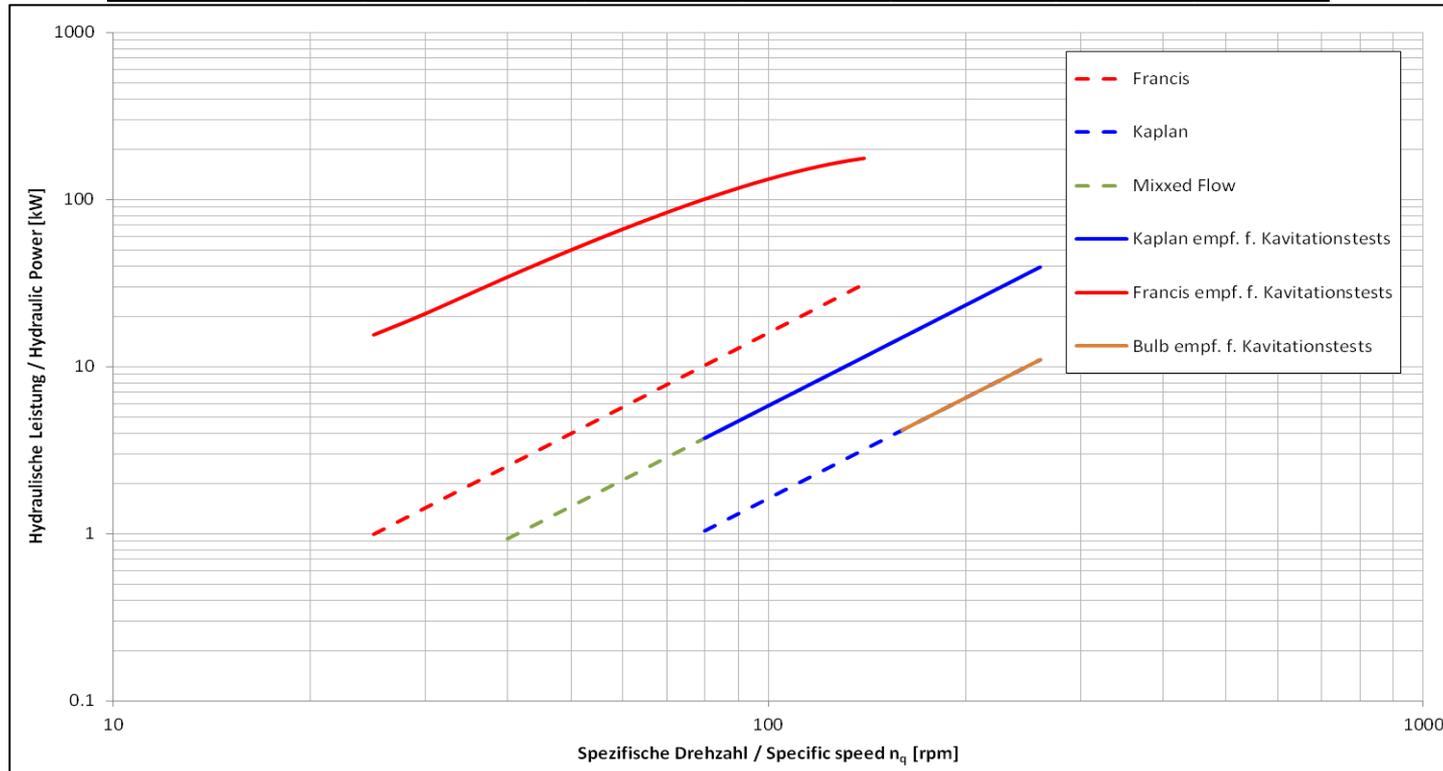
## Was wird untersucht ...

- Kennfeldaufnahme:  $Q$ ,  $H$ ,  $P$ ,  $\eta$
- Betriebs- und Kavitationsverhalten, 4Q-Verhalten
- Extreme Betriebszustände (Durchbrennen, Nullförderbetrieb, starke Teillast/Überlast usw.)
- Bauteiluntersuchungen im Betrieb (z.B.: Leitapparat, Saugrohr)
- Untersuchungen zu dynamische Druckpulsationen
- Festigkeits- und Schwingungsuntersuchungen

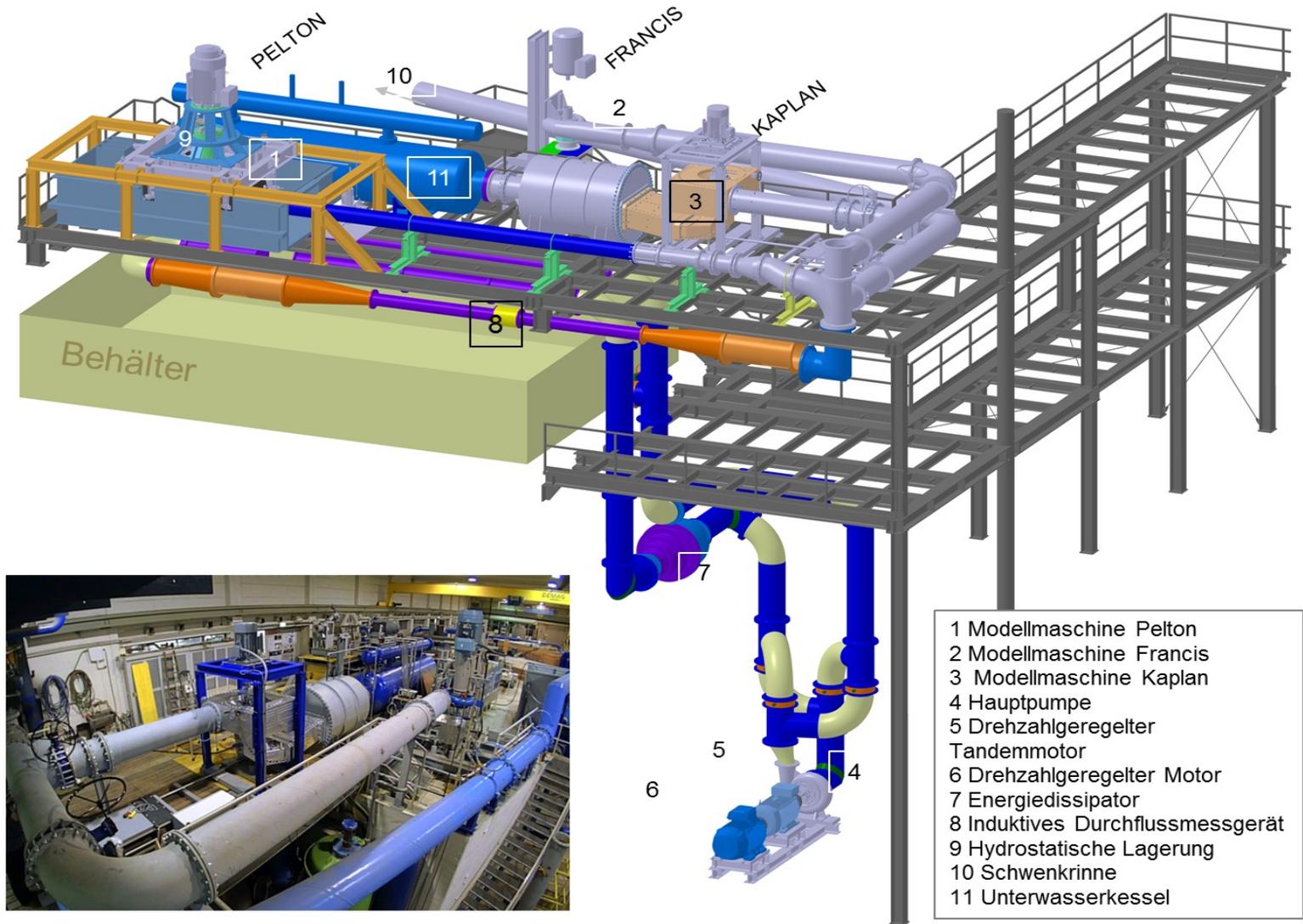


# Mindestanforderungen

	Radial		Diagonal	Axial		Impulse
	Francis niedrige spezifische Drehzahl Pump Turbine	Francis hohe spezifische Drehzahl	Mixed-flow Deriaz	Kaplan Propeller	Bulb	Pelton
Reynolds Zahl	4 Mio.	4 Mio.	4 Mio.	4 Mio.	4 Mio.	2 Mio.
Spezifische hydraulische Energie E (g*H)	$E \geq 100 \text{ J/kg}$	$E \geq 100 \text{ J/kg}$	$E \geq 50 \text{ J/kg}$	$E \geq 30 \text{ J/kg}$	$E \geq 30 \text{ J/kg}$ D > 0.4 m: $E \geq 20 \text{ J/kg}$	$E \geq 500 \text{ J/kg}$
Für Kavitations-versuche empfohlen	$E \geq 300 \text{ J/kg}$	$E \geq 200 \text{ J/kg}$	$E \geq 50 \text{ J/kg}$	$E \geq 50 \text{ J/kg}$	$E \geq 30 \text{ J/kg}$	
Referenzdurchmesser / Becherbreite	$D \geq 0.25 \text{ m}$	$D \geq 0.25 \text{ m}$	$D \geq 0.3 \text{ m}$	$D \geq 0.3 \text{ m}$	$D \geq 0.3 \text{ m}$	$B \geq 0.08 \text{ m}$
	$0.20 \text{ m} \leq D \leq 0.25 \text{ m}$ wenn $D_{\text{outer}} \geq 0.5 \text{ m}$					



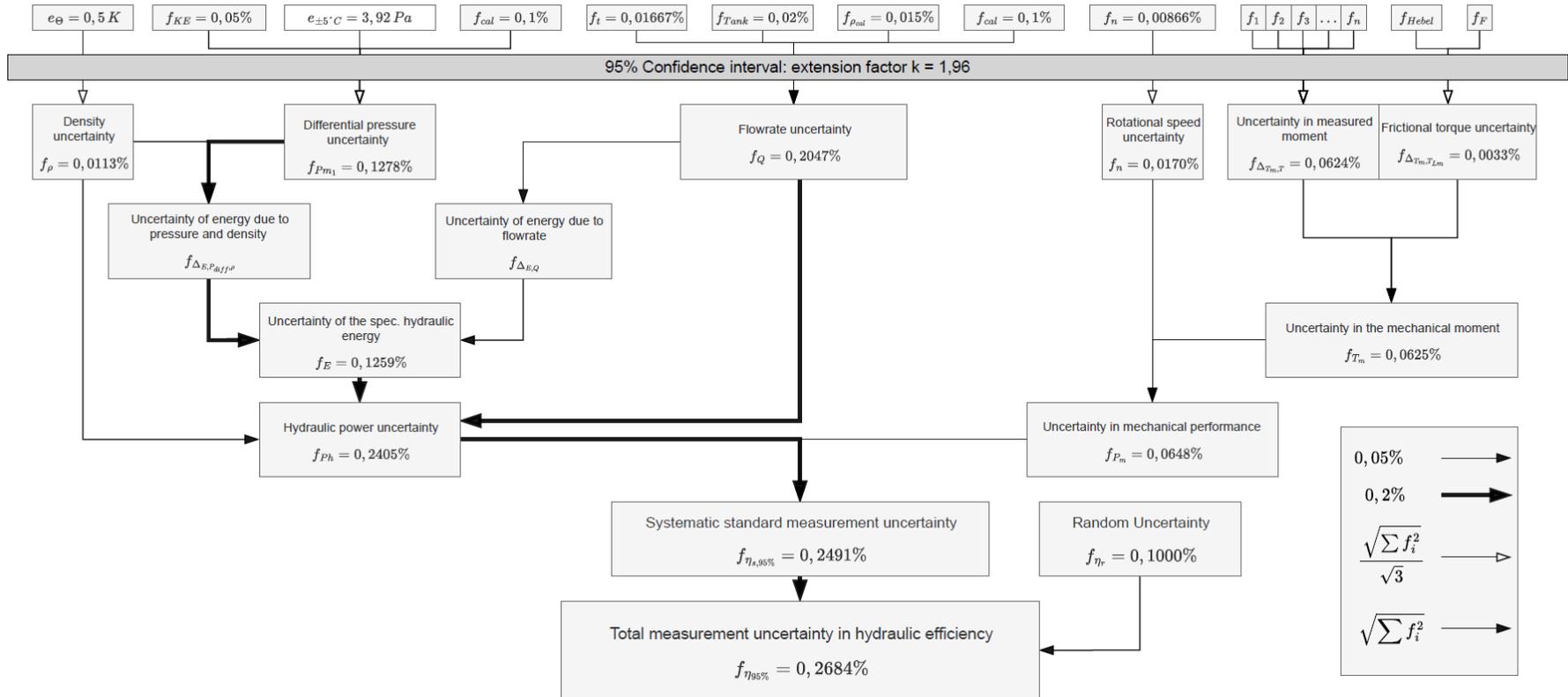
# 4-Quadranten-Prüfstand gemäß IEC 60193



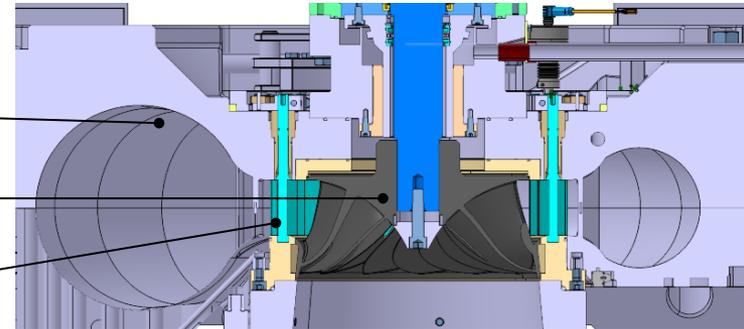
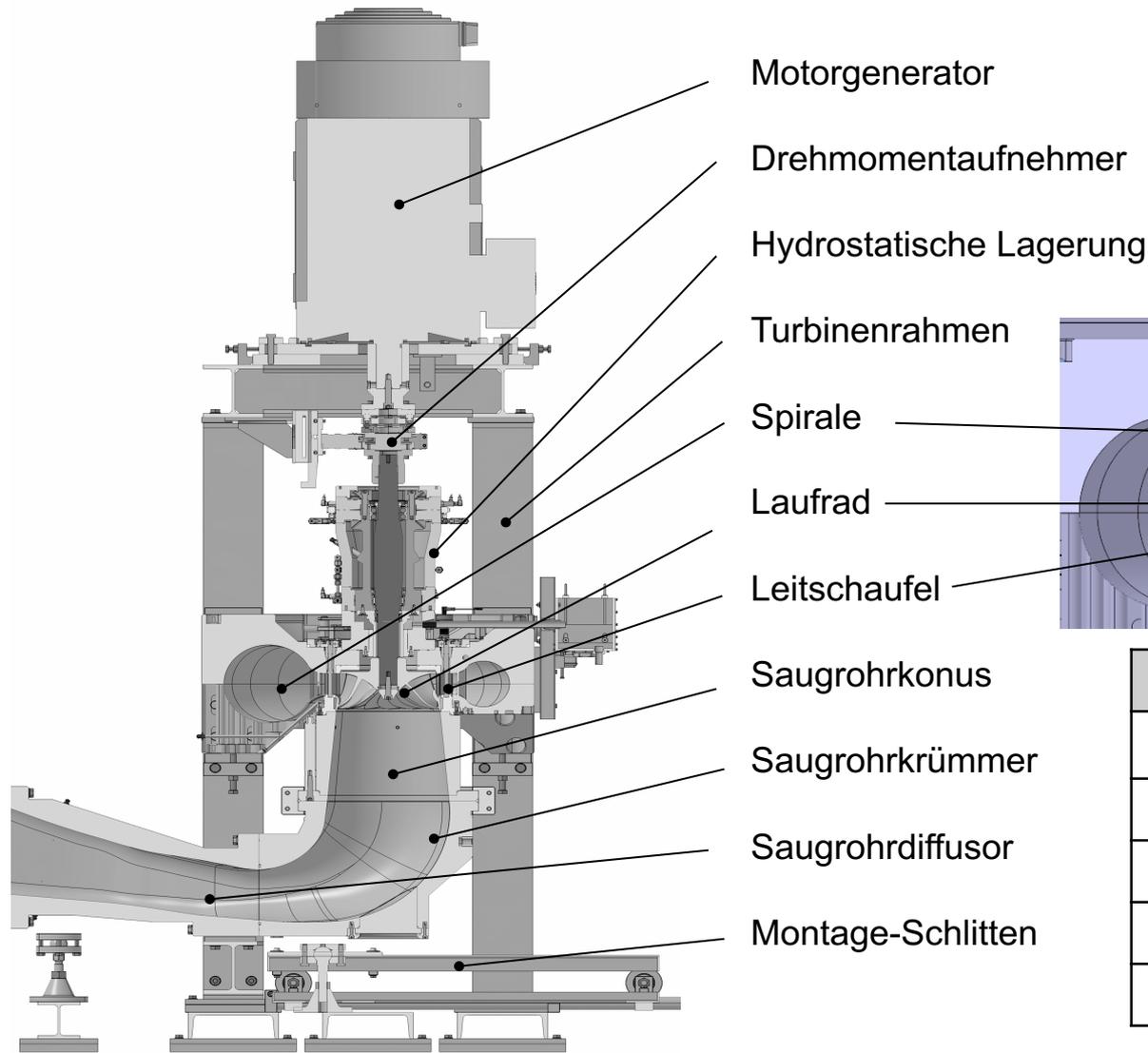
- 1 Modellmaschine Pelton
- 2 Modellmaschine Francis
- 3 Modellmaschine Kaplan
- 4 Hauptpumpe
- 5 Drehzahlregelter Tandemmotor
- 6 Drehzahlregelter Motor
- 7 Energiedissipator
- 8 Induktives Durchflussmessgerät
- 9 Hydrostatische Lagerung
- 10 Schwenkrinne
- 11 Unterwasserkessel

# Messgenauigkeit

- Treibender Ast ist die Mengenmessung
- Für fast alle Versuche: der meisten Aufwand um ein entsprechendes Niveau zu erreichen



# Versuchsaufbau Modellversuch Hirfanli



Eckdaten: Francis Turbine

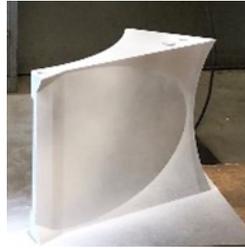
Spez. Drehzahl	$n_{q,BEP} = 64,4$
Drehzahl	$n = 1150 \text{ min}^{-1}$
Laufraddurchmesser	$D = 338,92 \text{ mm}$
Anzahl der Laufschaufeln	$z_{LA} = 13$
Anzahl der Leitschaufeln	$z_{LE} = 24$

# Geometrieverifikation vor Ort: HES Hirfanlı

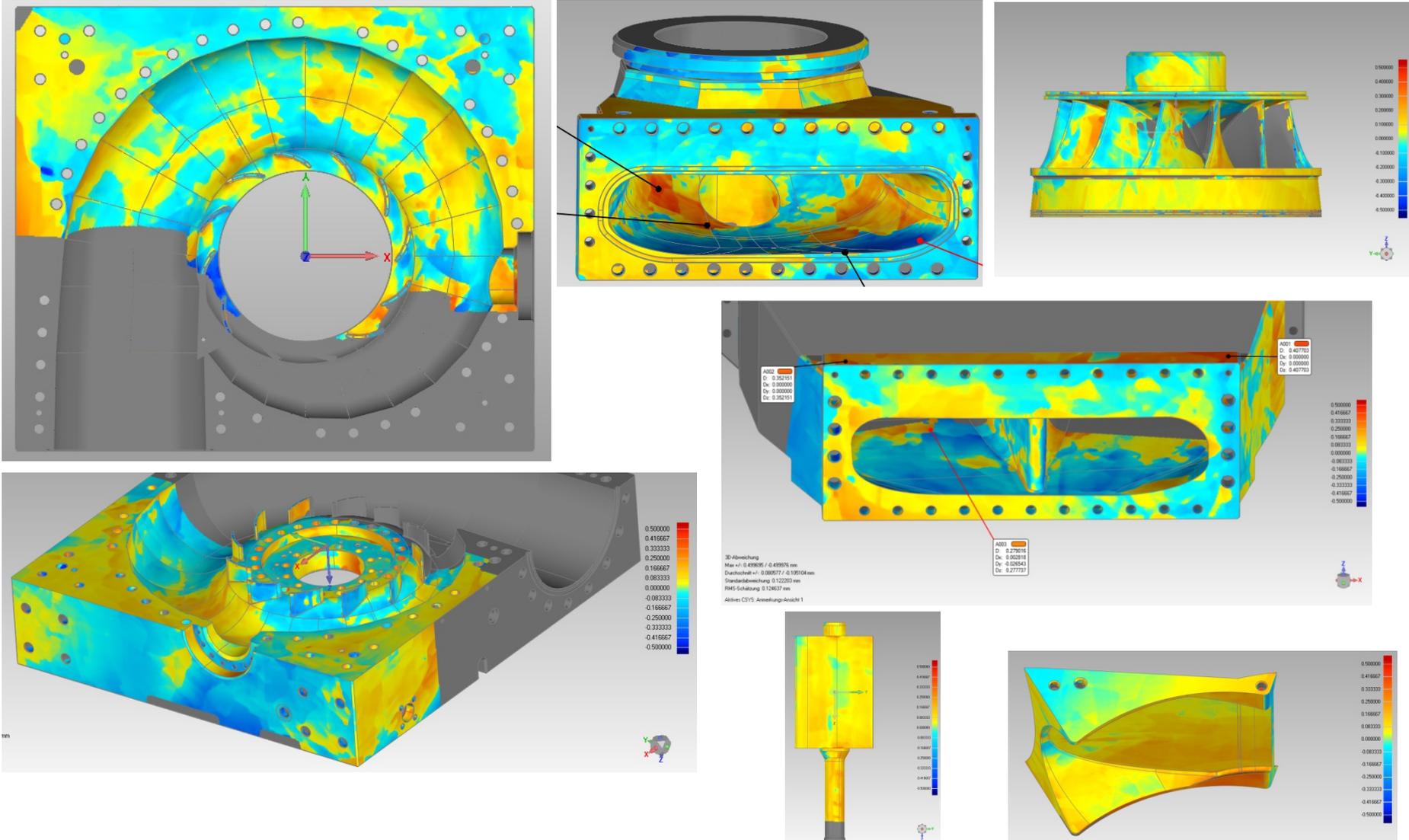


**Pläne vs. Wirklichkeit**

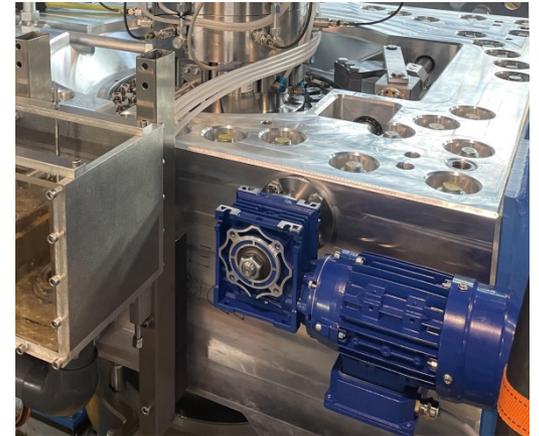
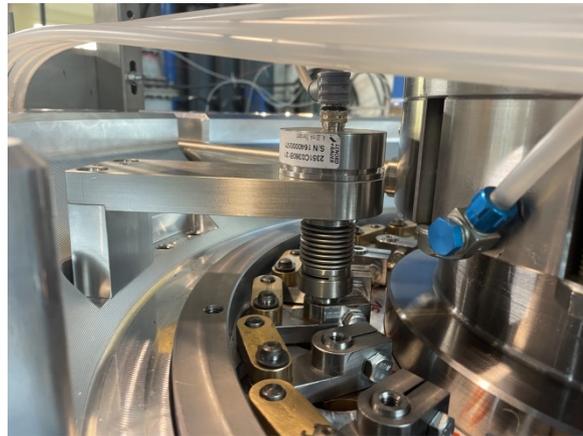
# Komponenten



# Bauteilkontrolle

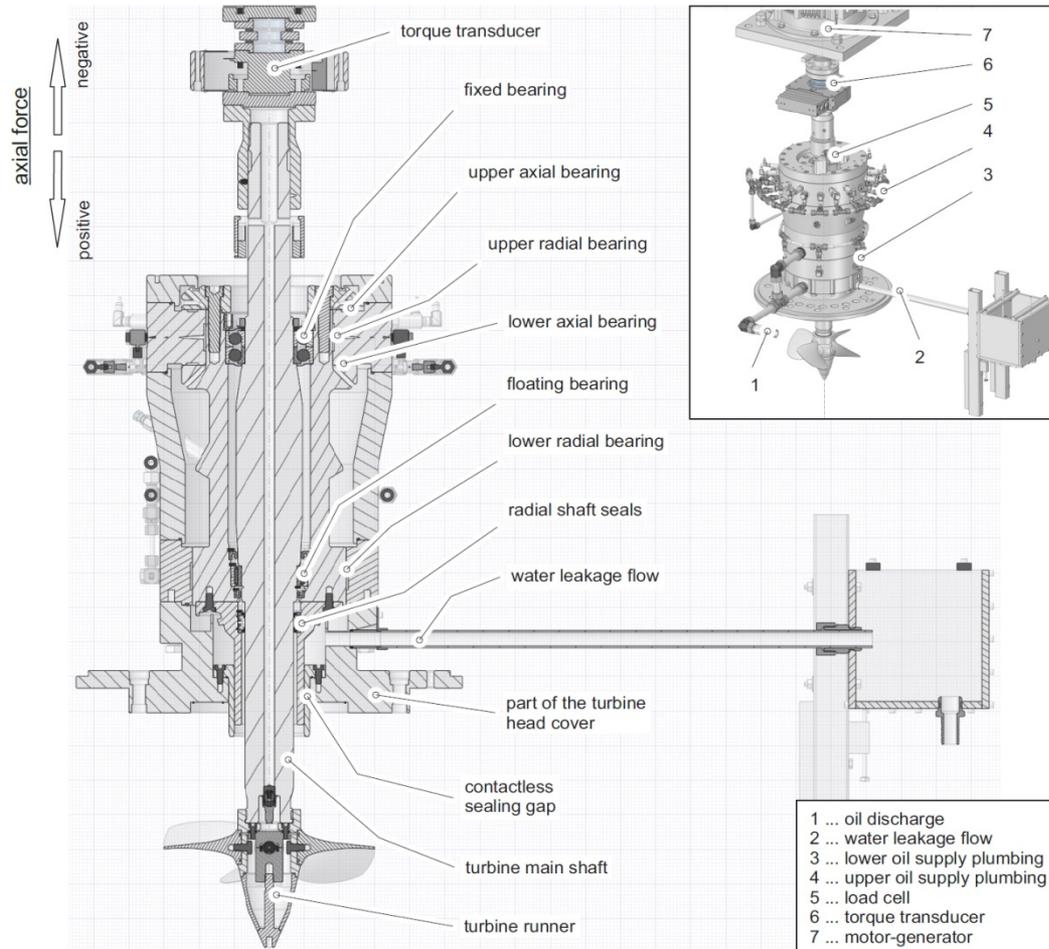


# Versuchsaufbau



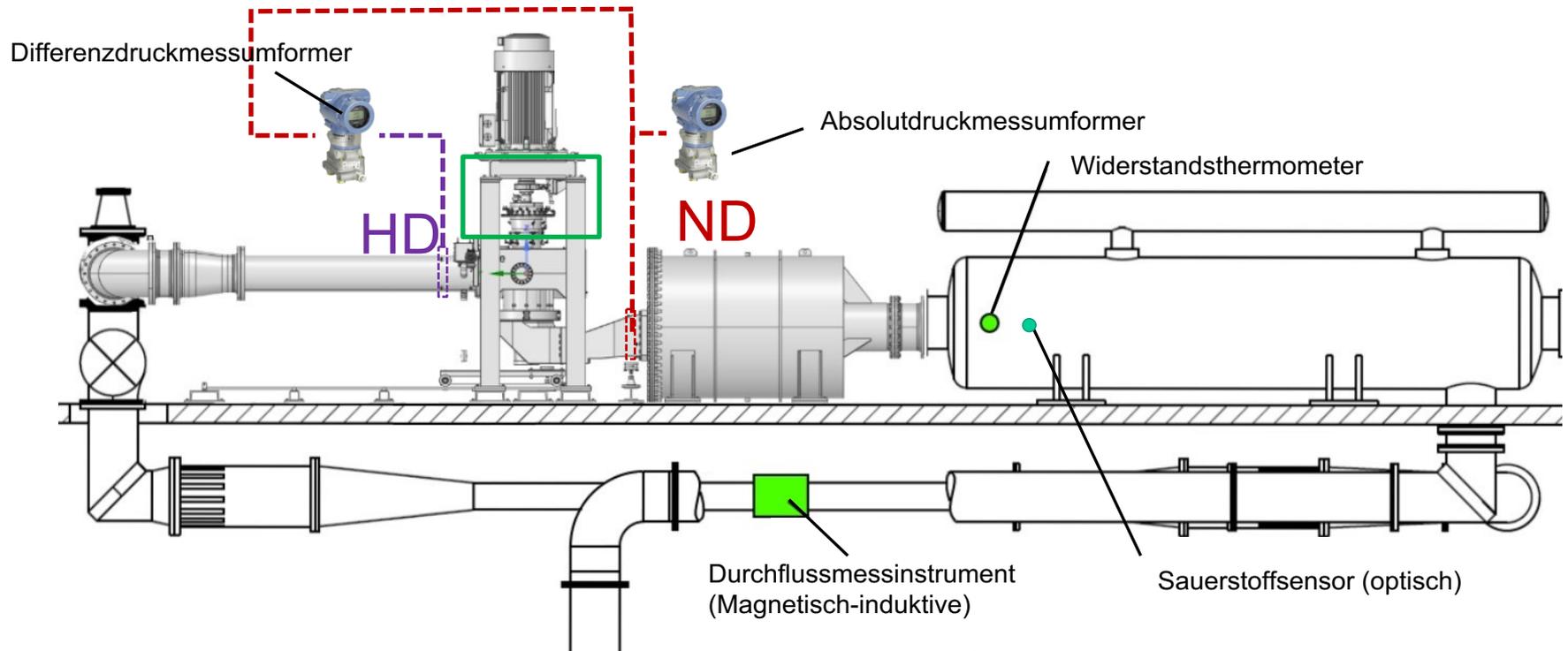
# Hydrostatische Lagerung

## Prinzipielle Darstellung



# Versuchsaufbau

## Aufbau und Messgeräte (1/3)



### Differenzdruckmessumformer:

Type:  
 Model: 3051CD4S  
 Serial Nr.: 20WEP0257479  
 Range:  $\pm 0.21 - \pm 20.7 \text{ Bar}$   
 Signal Output: 4 – 20 mA



Manufacturer: Rosemount

### Absolutdruckmessumformer:

Type:  
 Model: 3051CA2  
 Serial Nr.: 7886439  
 Range: 0.1 – 10 Bar  
 Signal Output: 4 – 20 mA



Manufacturer: Rosemount

### Druckmessumformer Winter-Kennedy

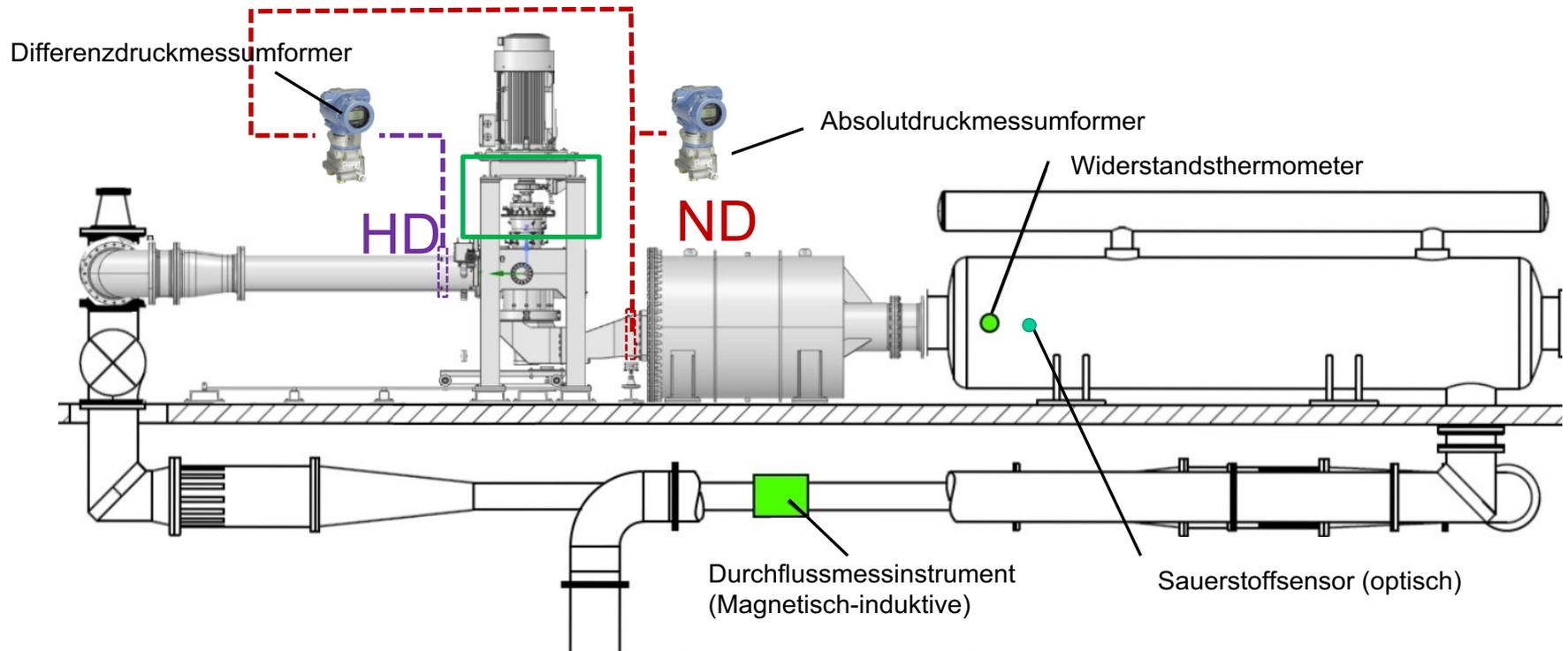
Type:  
 Model: 3051PD3  
 Serial Nr.: 655884  
 Range:  $\pm 250 - \pm 2480 \text{ mbar}$   
 Signal Output: 4 – 20 mA



Manufacturer: Rosemount

# Versuchsaufbau

## Aufbau und Messgeräte (2/3)



### Drehmoment- und Drehzahlaufnehmer:

Type:

Model:	T12HP/kNm
Serial Nr.:	214530138
Range:	0 – 2000 Nm
Signal Output:	60 ± 30 kHz
Measuring deviation:	±0.05%

Manufacturer: HBM



### Kraftaufnehmer:

Type:

Model:	S2/100 N
Serial Nr.:	K2628044/2003
Range:	0 – 100 N
Signal Output:	2 [mV/V]
Measuring deviation:	±0.05%
Leaver length:	100 mm

Manufacturer: HBM



### Durchflussmessung

Type:

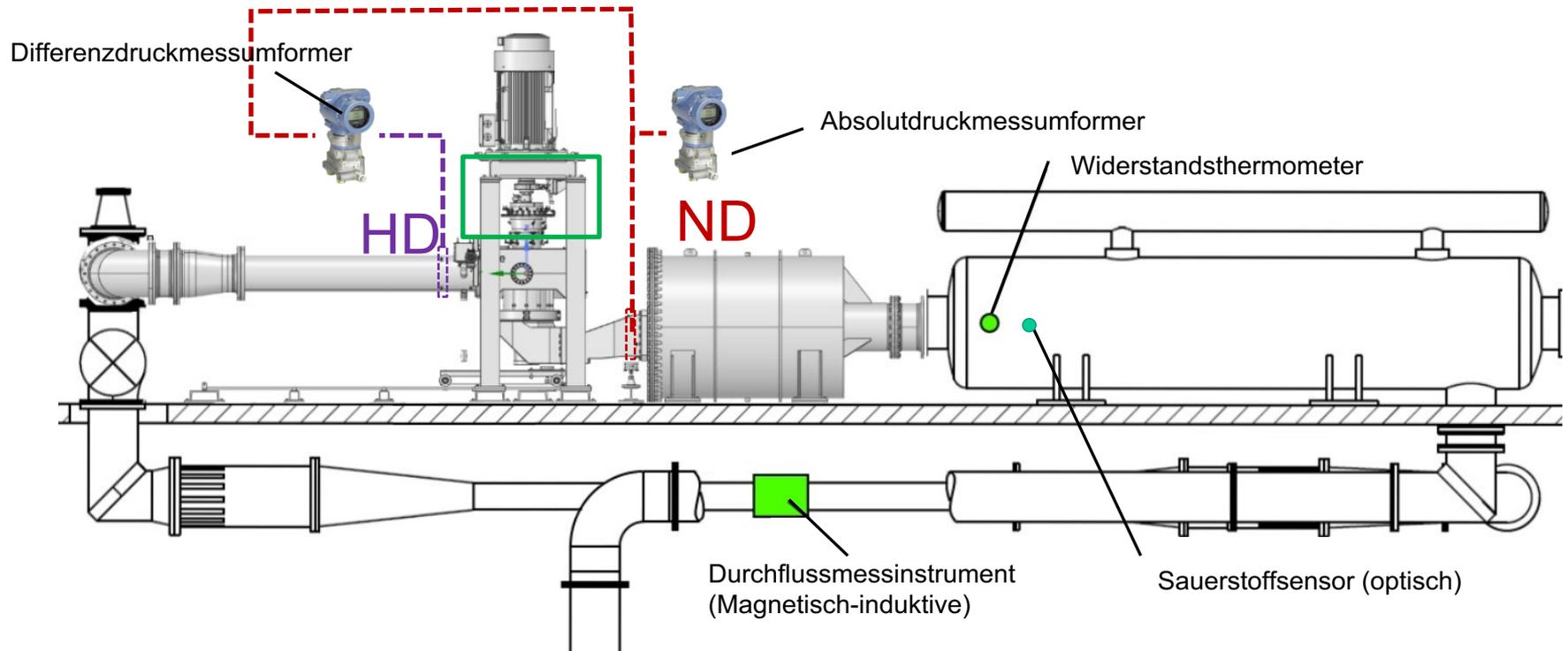
Model:	SM4000
Serial Nr.:	SE41F/010461
Range:	0 – 600 l/s
Signal Output:	4 – 20 mA

Manufacturer: ABB



# Versuchsaufbau

## Aufbau und Messgeräte (3/3)



### Sauerstoffgehalt:

Type:	
Model:	VistiFerm mA120 H3
Serial no.:	10070760
Range:	4 – 25 ppm
Accuracy	1 ± 0.05% – vol
Accuracy	4 – 20mA

Manufacturer: Hamilton



### Leitschaufelwinkel

Type:	
Model:	GEL2351
Serial no.:	164000571
Accuracy:	±0,08°
Signal output	4 – 20mA

Manufacturer: Lenord+Bauer



### Widerstandsthermometer

Type:	
Model:	902030
Serial Nr.:	00115644230/22080001
Accuracy Class:	AA
Deviation:	0.1 °C ± 0.0017 · t
Range:	-50 – +200 °C
Signal Output:	0 – 100 Ω

Manufacturer: JUMO



# Messungen der Turbinenperformance

## Maschinenkennfeld

Messreihe 1: 

→ Nachweis des globalen Optimums und der Garantiepunkte

→  $\alpha = \text{const.}$

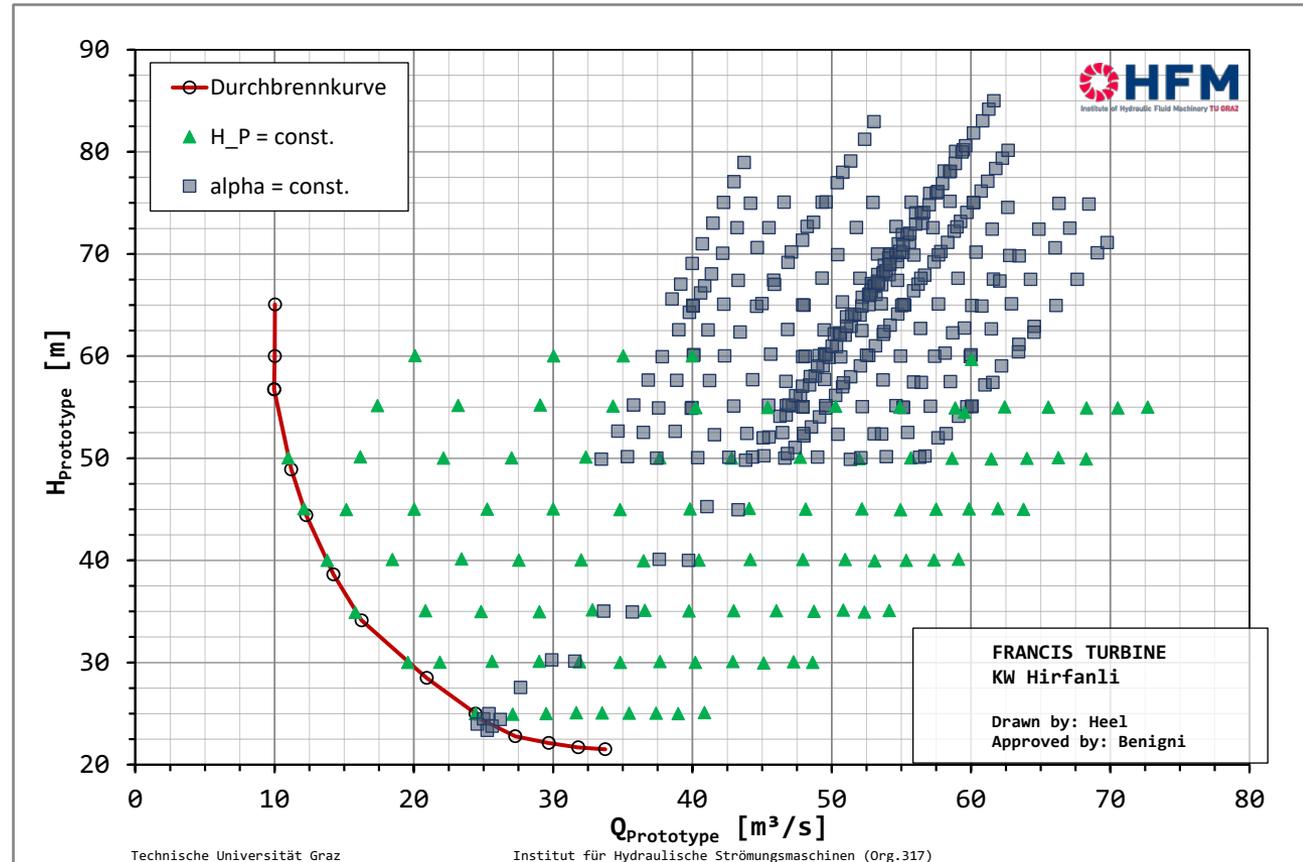
Messreihe 2: 

→ Messung des Kennfeldes bis zur Durchbrennkurve

→  $H_P = \text{const.}$

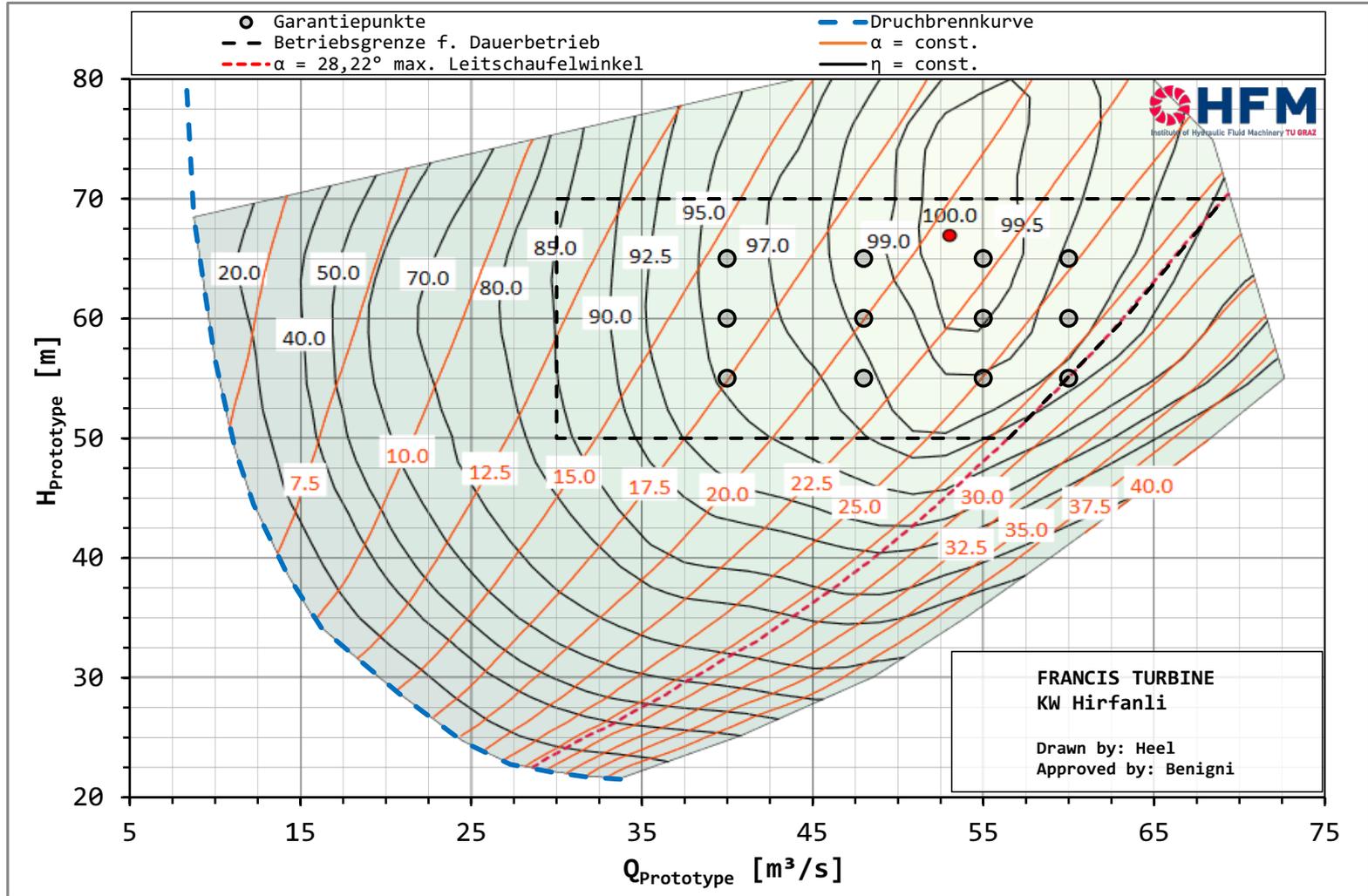
Messreihe 3: 

→ Durchbrennkurve



# Ergebnisse: Hydraulischer Wirkungsgrad

## Maschinenkennfeld



# Kavitation

## Kavitationsuntersuchungen

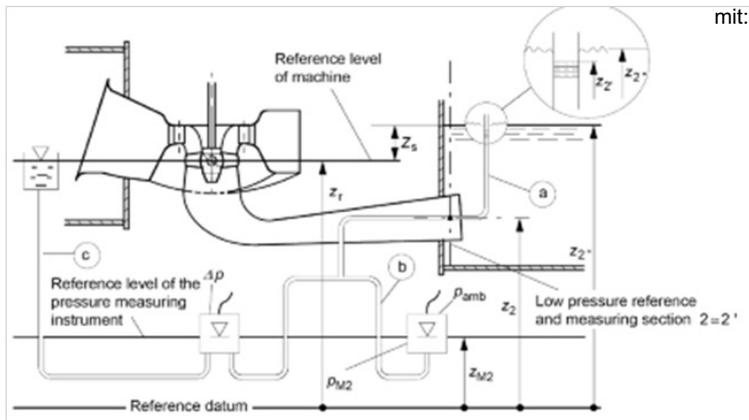
Kavitationsbeobachtungen mit Hilfe von:

- Stroboskop
- Kamera

→ Frequenzgenerator synchronisiert die Bildfrequenz der Kamera und den Lichtimpuls des Stroboskops

Kennzahlen:

$$\sigma = \frac{NPSH}{H} \quad NPSH = \frac{p_{abs,2} - p_{va}}{\rho_2 \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - (z_r - z_2)$$



mit:

$\sigma$  ... Thoma-Zahl [-]

$H$  ... Fallhöhe [m]

$NPSH$  ... Net Positive Suction Head [m]

$p_{abs}$  ... Absolutdruck [Pa]

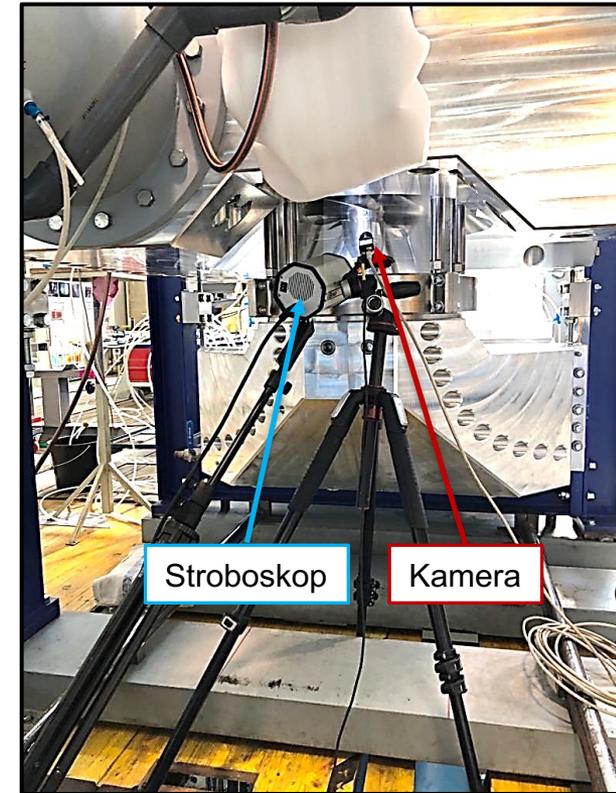
$p_{va}$  ... Dampfdruck [Pa]

$\rho$  ... Dichte [kg/m<sup>3</sup>]

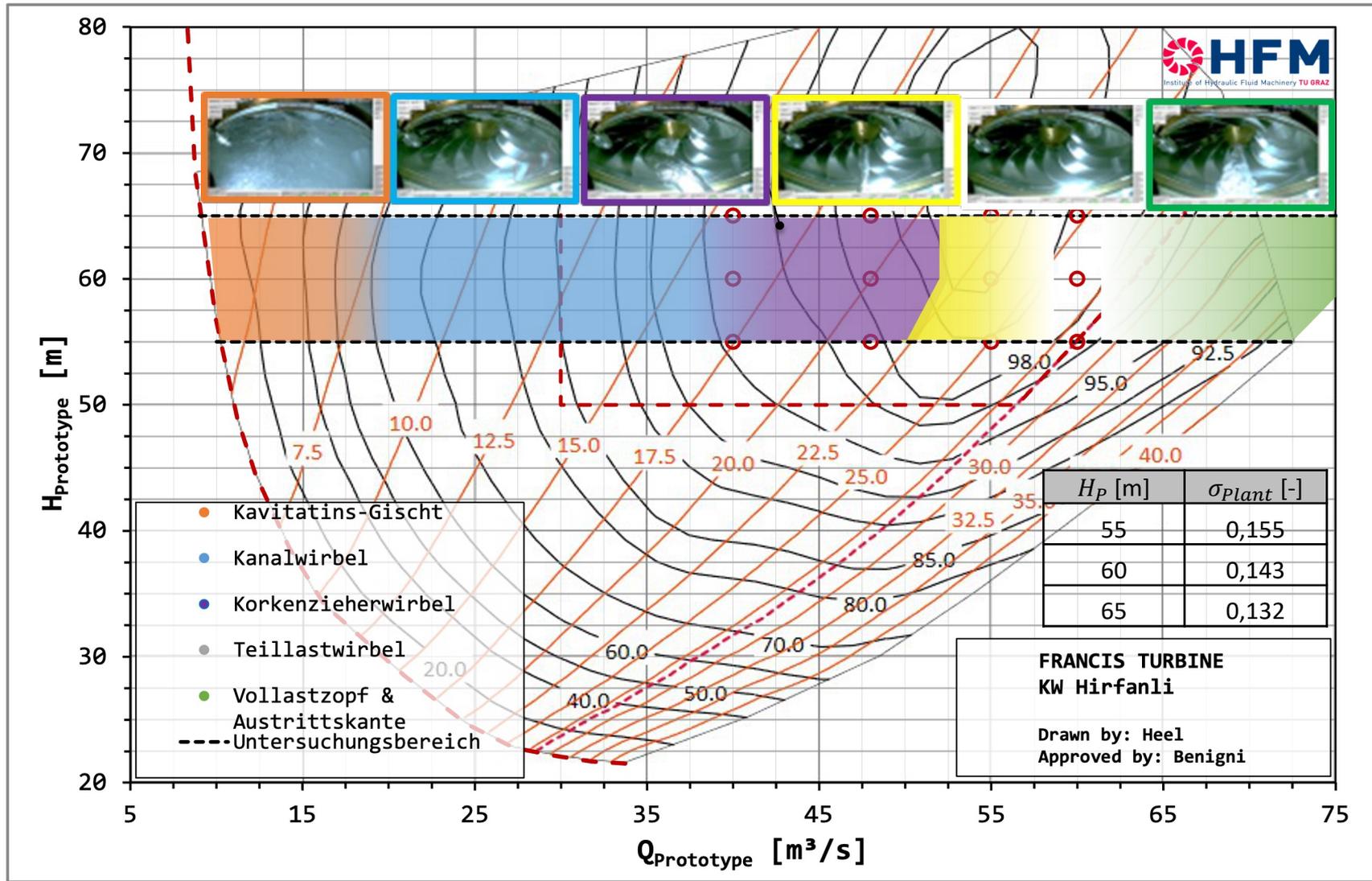
$v$  ... Geschwindigkeit [m/s]

$g$  ... Gravitation [m/s<sup>2</sup>]

$z$  ... geodätisch Höhe [m]



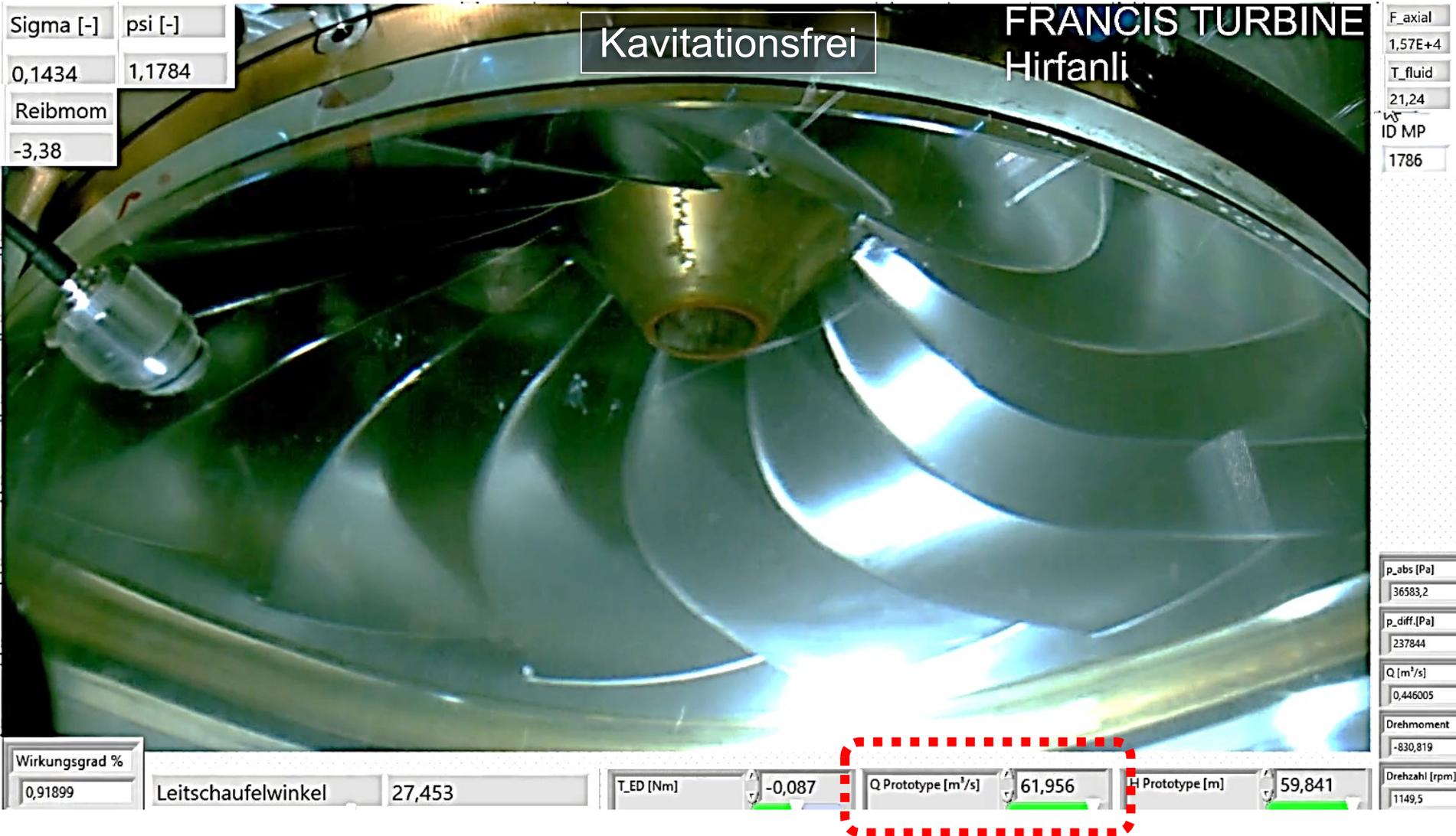
# Ergebnisse: Kavitation



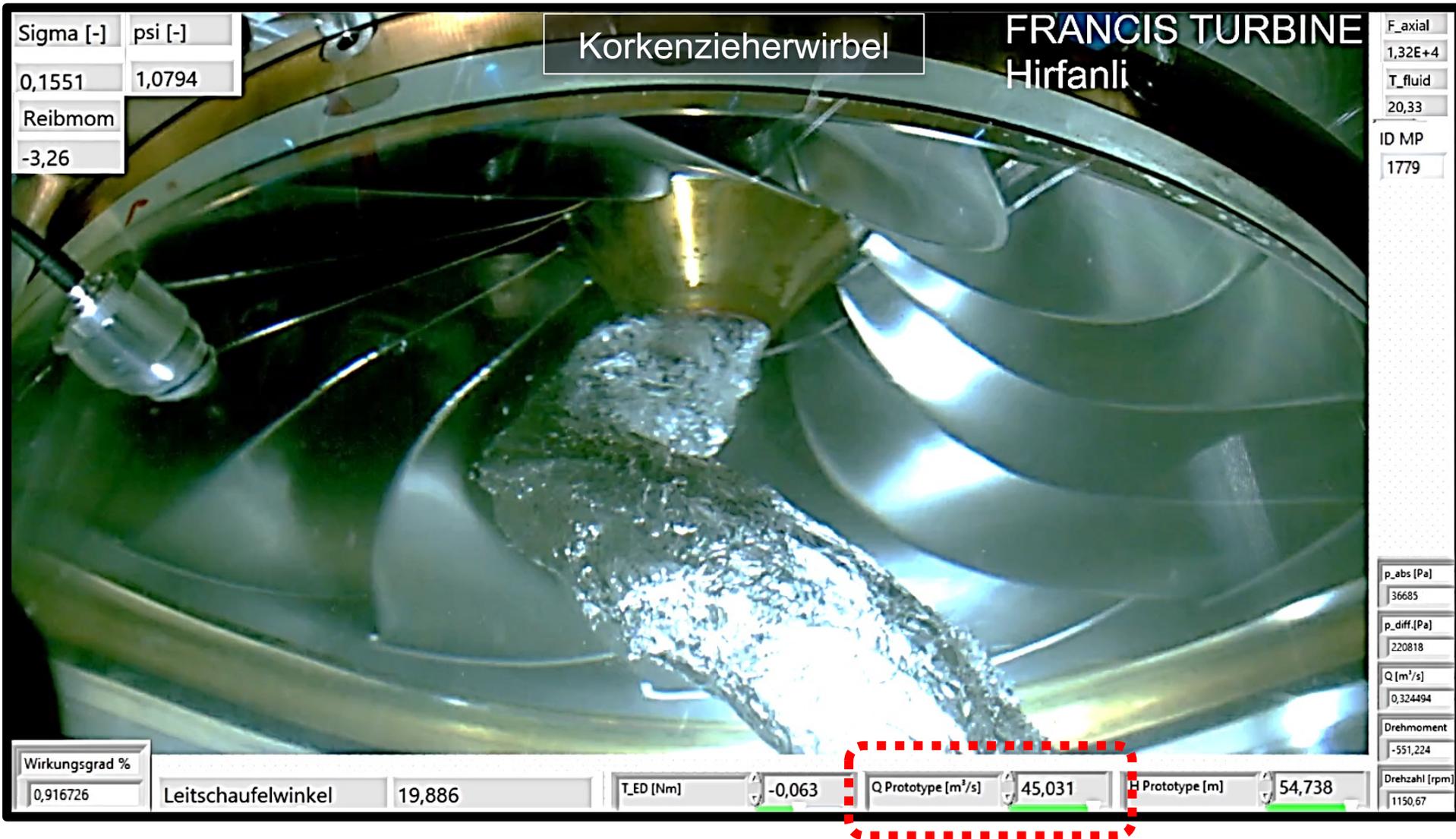
# Ergebnisse: Kavitation



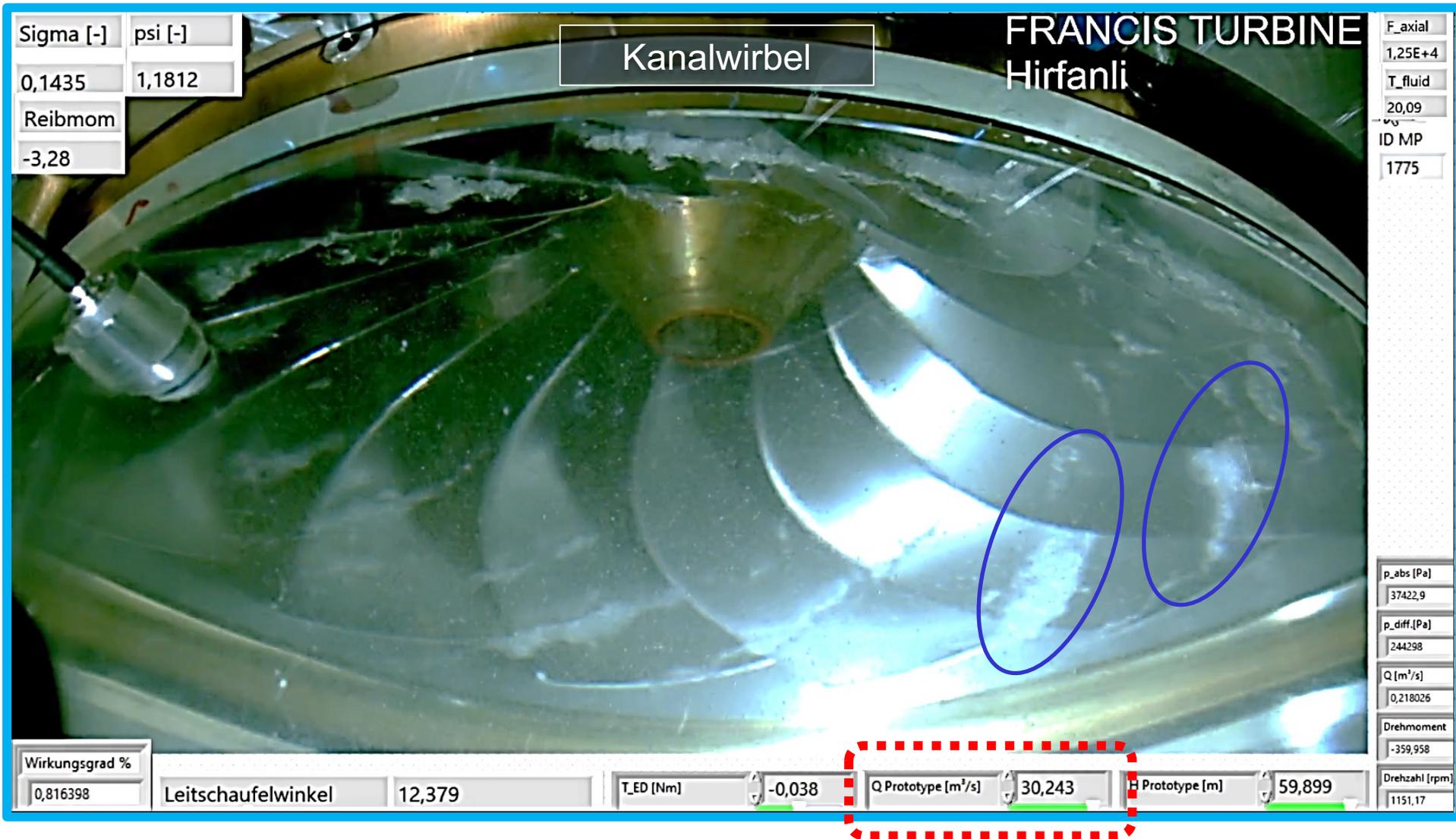
# Ergebnisse: Kavitation



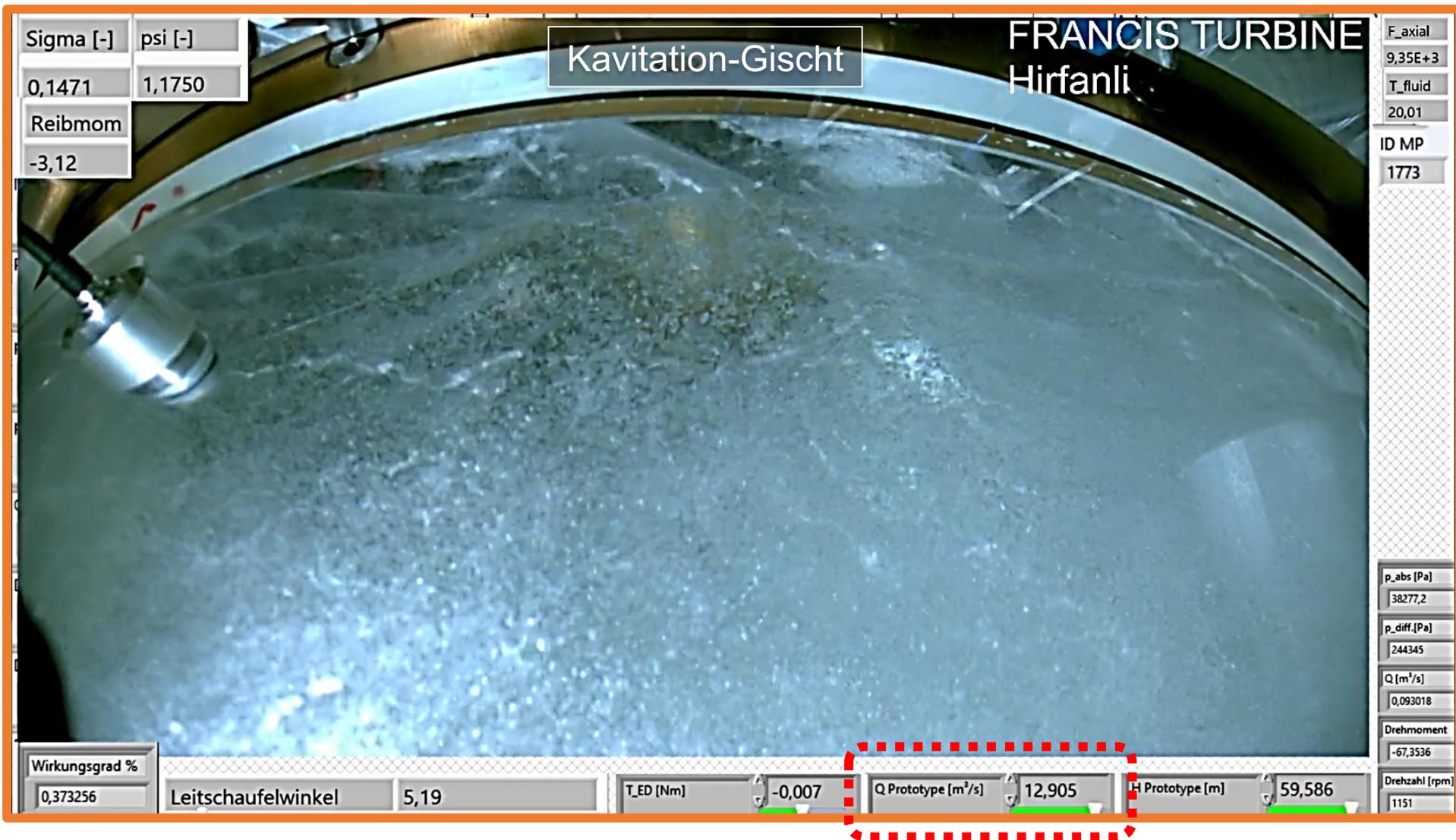
# Ergebnisse: Kavitation



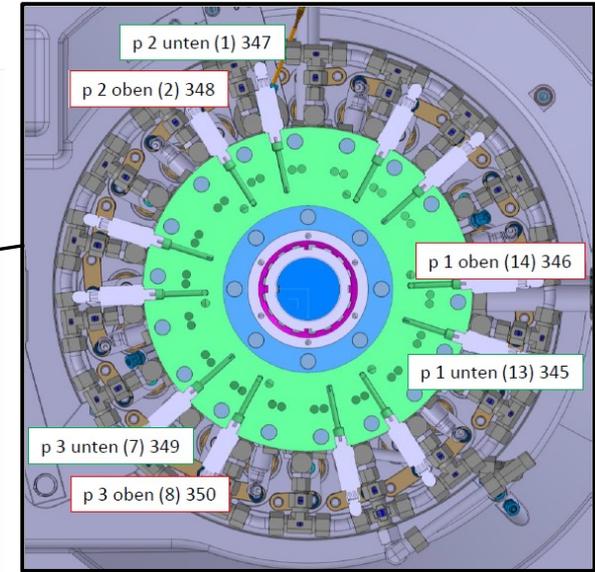
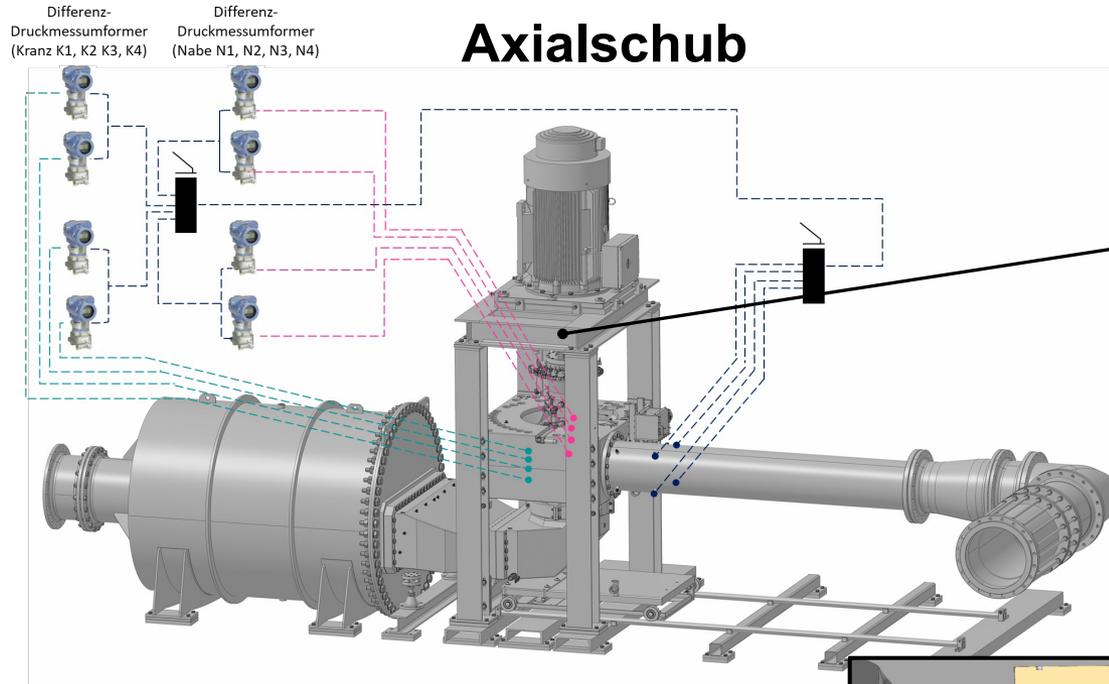
# Ergebnisse: Kavitation



# Ergebnisse: Kavitation

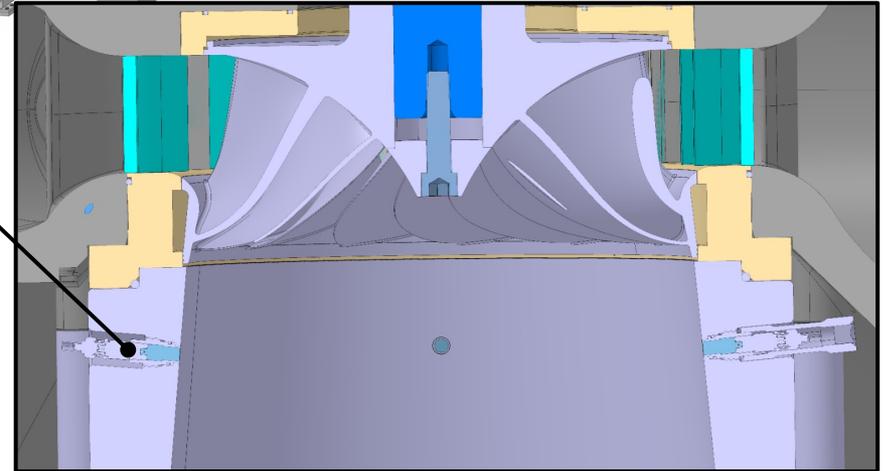


# Weitere Messungen

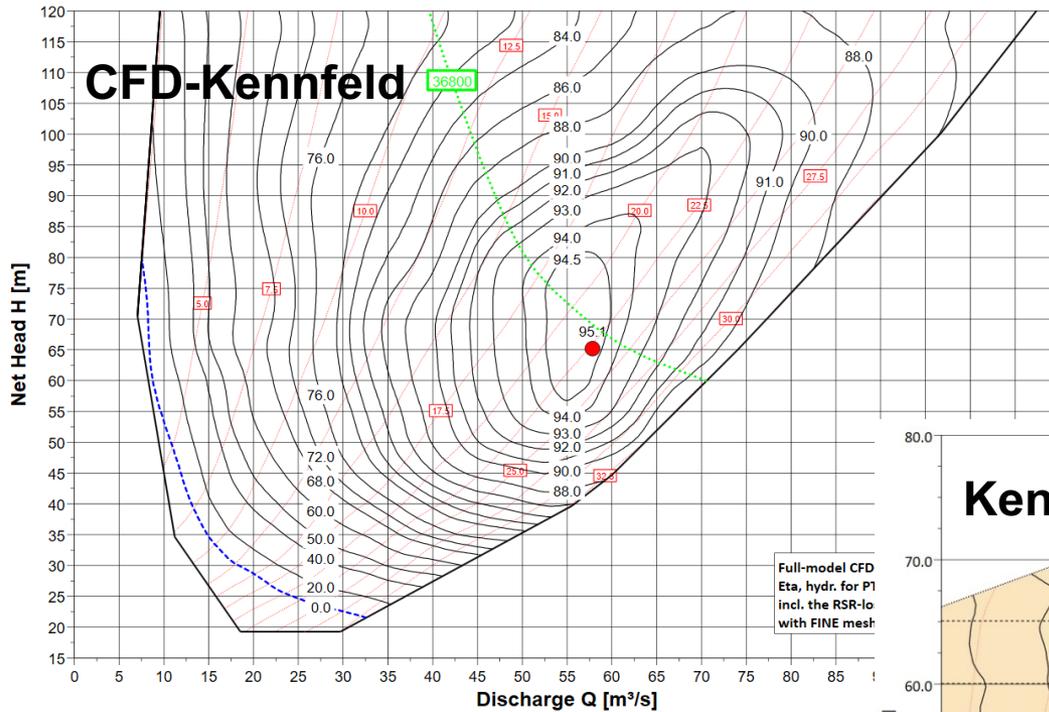


Hydrostatik

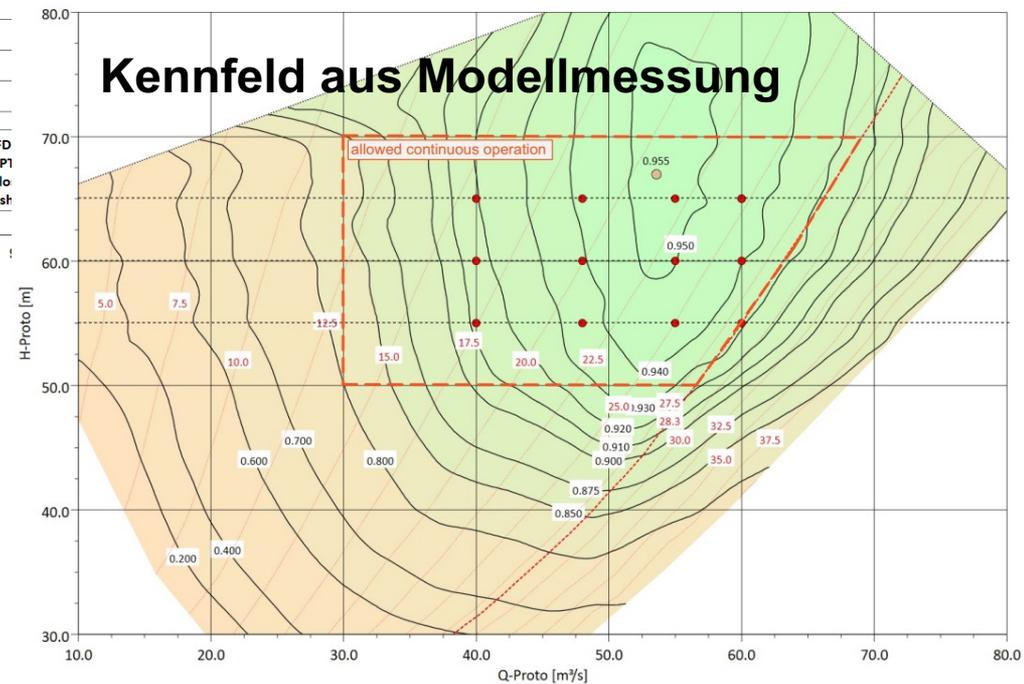
## Druckpulsationen im Saugrohr



# Zusammenfassung



- **Lage des Bestpunkts:**  
Ausgezeichnete Übereinstimmung  
zwischen CFD und Messung
- $\eta_{\text{opt}}$  aus Messung liegt über Prognose  
aus CFD-Simulation



- Betrieb bei tiefer Teillast:  
Wirkungsgrad des untersuchten Modells  
deutlich höher als in CFD-Simulation
- Kavitationsgrenzen wie mittels  
CFD vorhergesagt