



# Anlagenmessung bei Kleinwasserkraftwerken

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Technischen Universität Graz



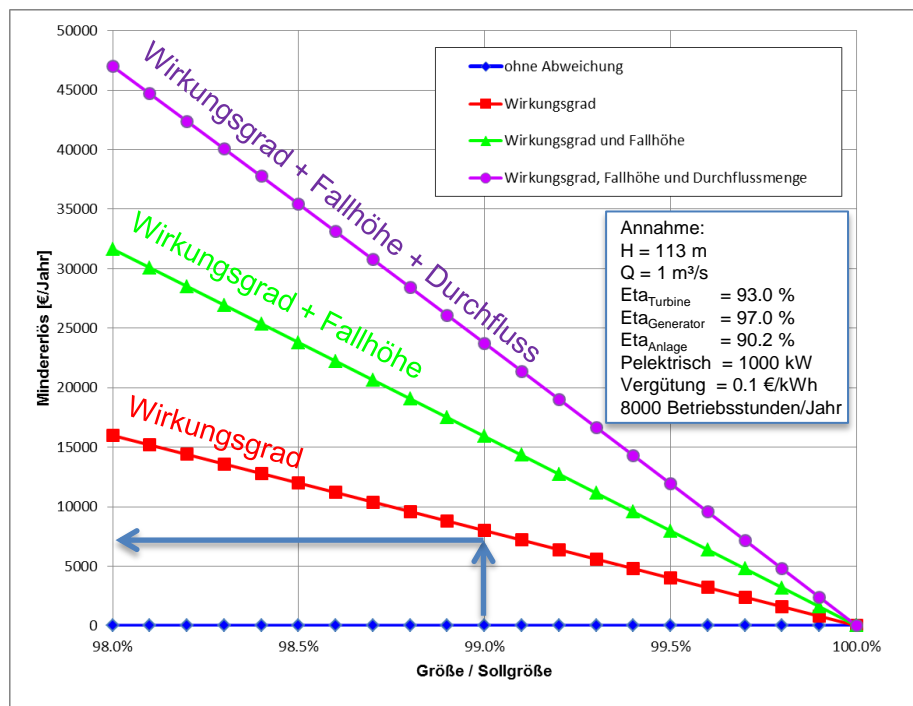
**Helmut BENIGNI**  
Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn  
Stv. Institutsleiter



**Helmut JABERG**  
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
Institutsvorstand

24. November 2016

# Überprüfung des garantierten Werte



Aktuelle Normen:

**IEC 60041:** FIELD ACCEPTANCE TESTS TO DETERMINE THE HYDRAULIC PERFORMANCE OF HYDRAULIC TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES

**IEC 62006:** HYDRAULIC MACHINES – ACCEPTANCE TESTS OF SMALL HYDROELECTRIC INSTALLATIONS

- Nachweises des Stand der Technik.
- Wurden die projektierten Daten eingehalten?
- Erreicht die Anlage die garantierten Werte?
- Sind Verbesserungspotentiale vorhanden?
- Treten Komplikationen (Kavitation, Vibration, Lärm, ...) im Betrieb auf?

Beispiele von Verträgen ...

Auf Wunsch des Auftraggebers wird der garantierte Wirkungsgrad durch

• **Gewichteter Wirkungsgrad**

■ **Beispiel**

$$h_{\text{Gewichtet}} = 10\% * \eta_{Q=25\%} + 20\% * \eta_{Q=50\%} + 40\% * \eta_{Q=75\%} + 30\% * \eta_{Q=100\%}$$

Messwerten  $\eta_e$  (Gewicht: 10%, 40%, 40% und 10% jeweils).

• **Maximale Leistung**

■ **Beispiel**

Maximale Leistung von  $P_{\text{elektrisch}} = 1000 \text{ kW}$  bei **Bezugsfallhöhe von**

$H = 113 \text{ m}$  muss mindestens erreicht werden

• **Schwingungen / Lärm**

■ **Beispiel** *Vertragsstrafe = f(Wirkungsgrades)*

Empfohlener Mindestwert (ISO10816-5): **1,6 mm/s** unterschritten

Schallpegelmessung nach DIN ISO 3746

Die **Verzugsstrafe** für die verspätete Fertigstellung beträgt:

€ 400,00,- (dreihundert) pro Kalendertag

Wirkungsgradpönale 500,00.-€ pro 0,1 % unter der Messtoleranz von 1,5 %. Die Wirkungsgradmessung erfolgt an den Generator клемmen mittels Durchflussmessung (Klasse 05). **Druck** (Präzisionsmanometer) und Stromzähler und wird vom Auftragnehmer im Beisein der **Baubleitung** durchgeführt.

*Norm*

Während des Probetriebes ist eine Messung des **Gesamtwirkungsgrades** (Turbine und Generator) durchzuführen. Die Messung erfolgt gemäß der **Norm CEI EN 60041** und folgende durch ein unabhängiges Institut, welches vom AG bestimmt wird. Die Kosten für die Messung sind in die Einheitspreise zu übernehmen. Sollte das nicht geschehen, sind die gemessenen Gesamtwirkungsgrade des Turbinen als der im Angebot garantierte Gesamtwirkungsgrad mit einer **Pönale** angewandt, wobei eine maximale Messtoleranz von 1,5% zulässig ist. Die Überprüfung der Wirkungsgrade des elektrohydraulischen Maschinensatzes erfolgt durch Messen der abgegebenen elektrischen Leistungsdaten an den Generator клемmen sowie Messung des vor dem Hauptabsperorgan der Turbine anstehenden hydraulischen Druckes mittels Druckmessvorrichtung und Messung des Wasserdurchflusses.

Vor der Anwendung der Vertragsstrafe ist es dem Auftragnehmer gestattet, auf eigene Kosten und zu eigenen Lasten kurzfristig und ohne Beeinträchtigung der Garanteileistungen durchzuführen, einschließlich, sofern erforderlich, der Zerlegung, dem Ausbau und die erneute Montage der Turbine und des Generators. Nach Abschluss der Nachbesserungen werden die Prüfungen wiederholt.

Sollte die Abweichung mehr als 10 % des garantierter Nennwirkungsgrades  $\eta_0$  ausmachen, ist der Auftraggeber berechtigt, die Turbine, den Generator oder beide Maschinen nicht anzunehmen. Übt der Auftraggeber dieses Recht aus, hat der Auftragnehmer auf eigene Kosten den Ausbau und den Abtransport der nicht angenommenen Komponenten zu besorgen. Er hat die bis dahin erhaltene Vergütung für die nicht anerkannten Leistungen zurückzuerstatten.

*Rückweisung*

# Wirkungsgrad = Nutzen/Aufwand

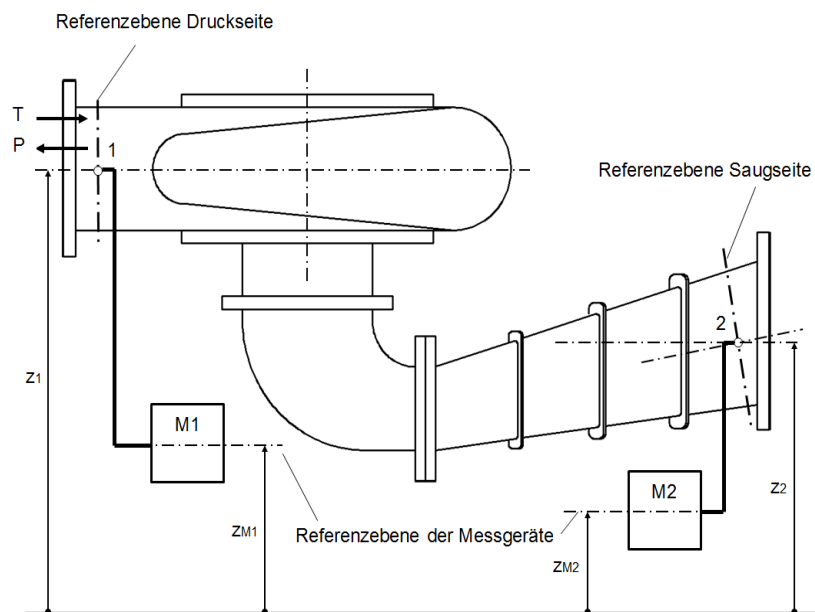
- Konventionelle Messung:** Hydraulischer Wirkungsgrad =  $\frac{\text{Abgeführte Leistung}}{\text{Zugeführte Leistung}}$

$$\eta_{h,Turbine} = \frac{P_{mech}}{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H} = \frac{P_{mech}}{\dot{m} \cdot E_h}$$

Problem: ungenaue Durchflussmessung

$$H = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} + (z_1 - z_2)$$

$$P_{mech} = \frac{P_{el}}{\eta_{Generator}}$$



- Thermodynamische Messung:** Hydraulischer Wirkungsgrad =  $\frac{\text{Verlustbehaftete Strömung}}{\text{Verlustfreie Strömung}}$

$$\eta_{h,Turbine} = \frac{P_{mech}}{\dot{m} \cdot E_h} = \frac{\cancel{\dot{m}} \cdot E_m}{\cancel{\dot{m}} \cdot E_h}$$

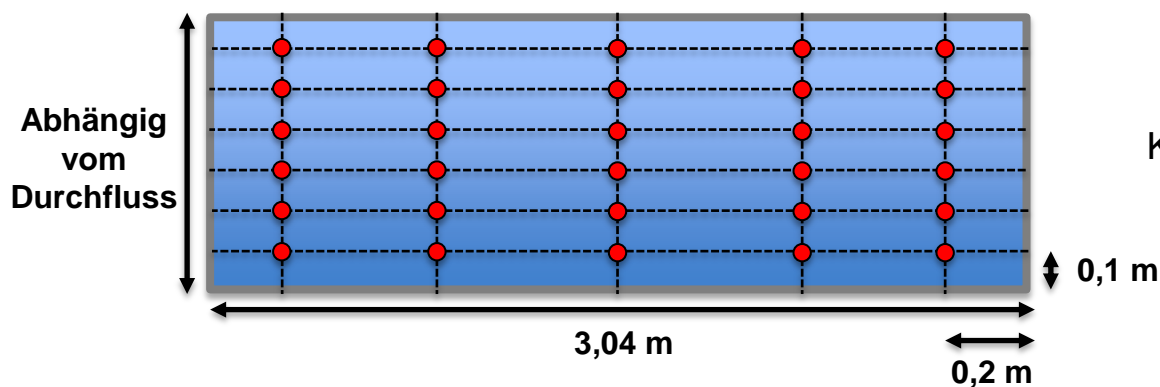
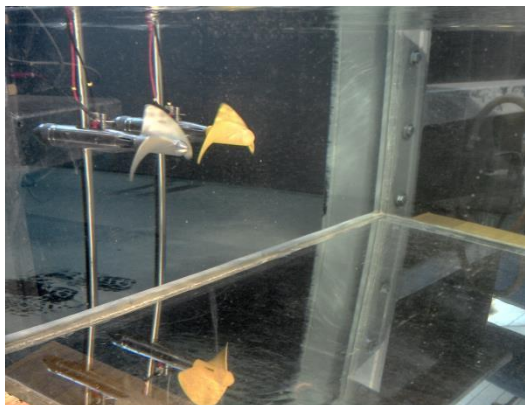
keine Durchflussmessung erforderlich!

$$E_m = \bar{a} (p_{abs1} - p_{abs2}) + \bar{c}_p (T_1 - T_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

$$E_h = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

# Integration des Geschwindigkeitsfeldes

- Messung der mittleren Geschwindigkeit in einem ebenen Querschnitt
- Abtasten des Querschnitts nach einem Raster (sequenziell/simultan)



Kraftwerk Pucioasa (Rumänien)  
3 Maschinen mit je 300 kW

# Verwendete Messgeräte

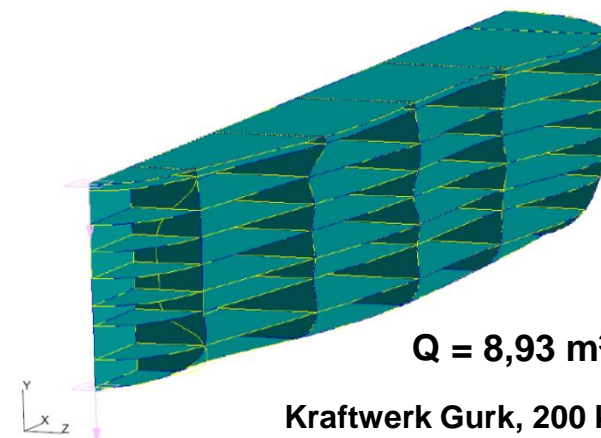
- Kalibrierte Flügelräder mit genormten Durchmessern
- Integration des Geschwindigkeitsfeldes mit numerischen Methoden



KW Meitingen / Lechkanal: P= 3\*4 MW



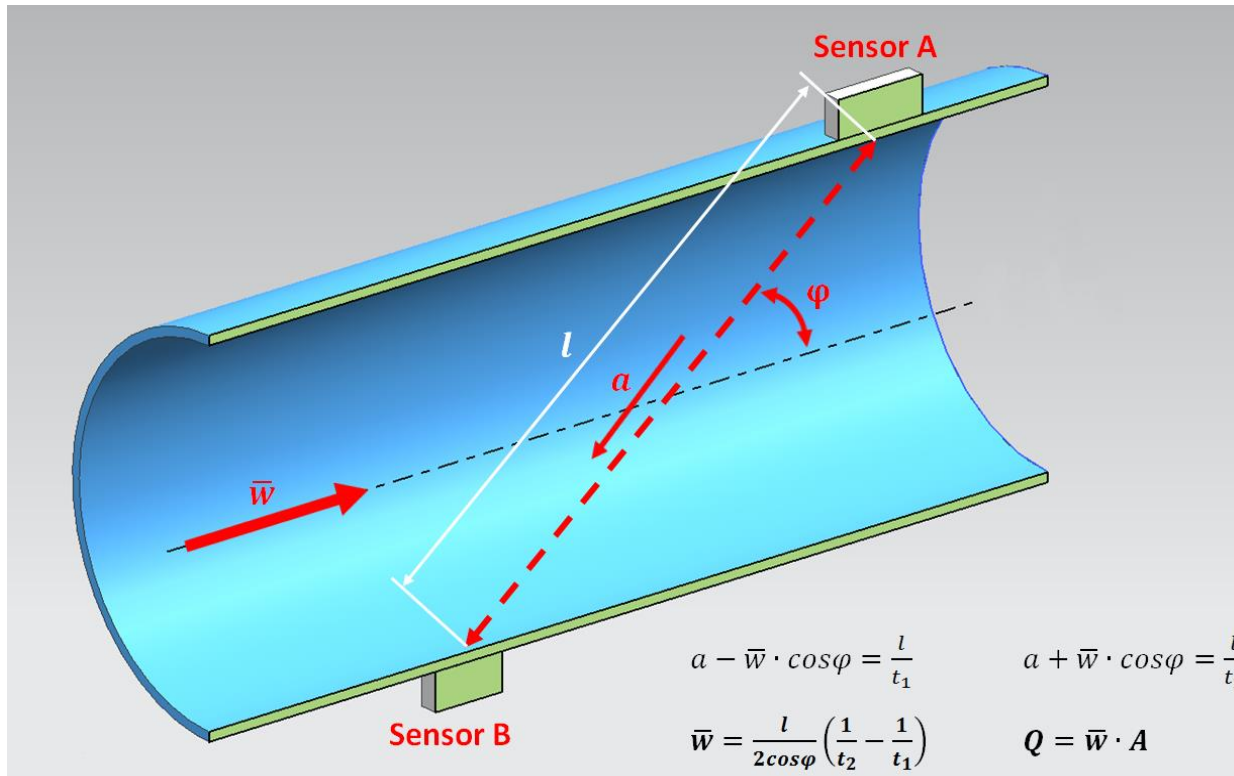
OTT C31



OTT Z400

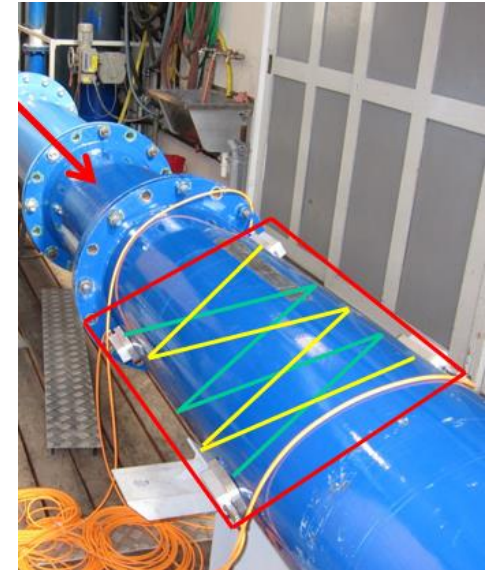
# Laufzeitdifferenz ergibt Durchfluss

- Mehrpfadige Anordnung für höhere Genauigkeit
- Numerische Optimierung durch Analyse des Geschwindigkeitsprofils



# Clamp-On-Sensoren für mehr Flexibilität

- Verschiedene Anordnungen für unterschiedliche Rohrdurchmesser
- Sehr flexibel mit Clamp-On-Sensoren: keine Störung des Betriebs!



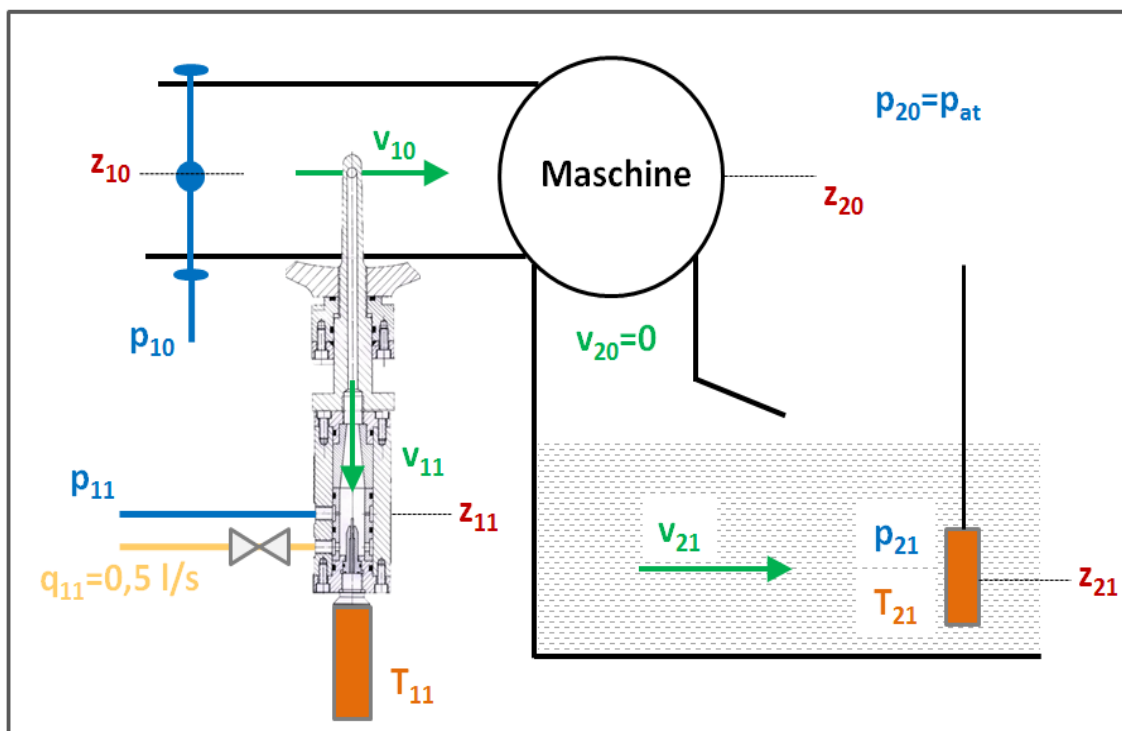
**HFM:** Rittmeyer Risonic, max. 8 Pfade  
2 MHz / 500kHz Sensoren

Rohrdurchmesser von 0,3 bis 4 m messbar!



# Verluste äußern sich in Temperaturerhöhung

- Temperaturerhöhung ist Maß für den Wirkungsgrad
- Keine Durchflussmessung notwendig

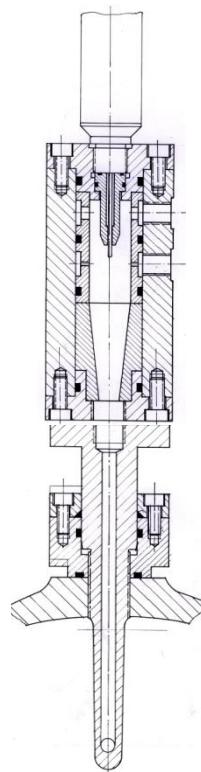


Kraftwerk Trieben  
6-düsige Pelton mit 12 MW



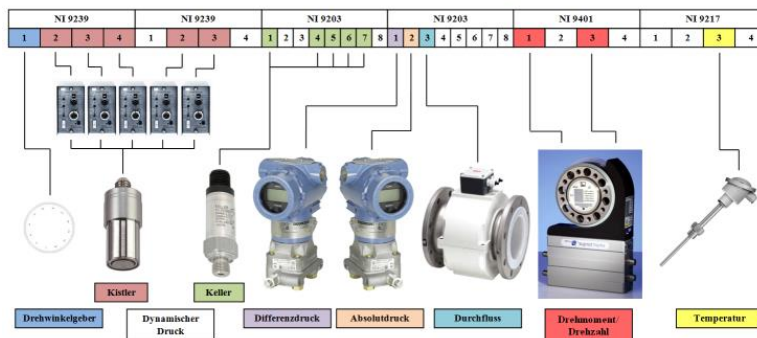
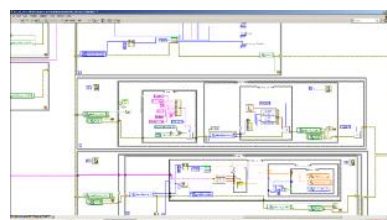
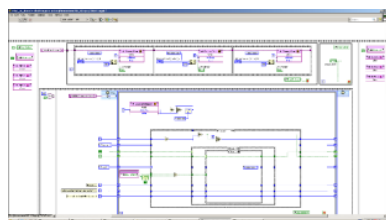
# Hochpräzise Temperaturmessung

- HFM setzt Temperatursensoren für ozeanographischen Einsatz ein – direkte Messmethode
- Absolut parallele Datenverarbeitung für höchste Genauigkeit



# Digitale Messwertverarbeitung

- Hochpräzise durch Kalibration der gesamten Messkette (IEC-konform)
- Datenerfassung mit sofortige Visualisierung der Messwerte



**HFM:** 256 physikalische Kanäle

50,000 Hz Abtastrate pro Kanal

Netzwerkfähig

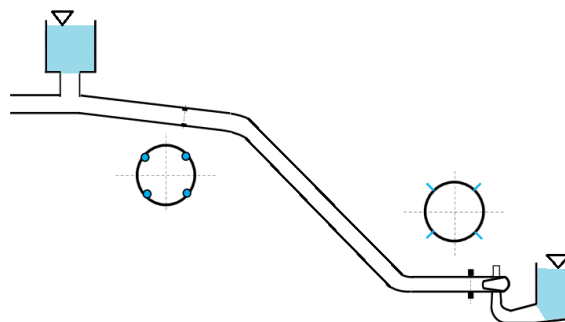
Fernüberwachung in Echtzeit

# Weitere Methoden zur Wirkungsgradmessung

- Indexmessungen (relativer Wirkungsgrad)
- Gibson-Methode (Druck-Zeit-Methode)
- Magnetisch induktives Durchflussmessgerät
- Durchflussmessung mit Tracerpartikeln
- Volumetrisch, Überfall, ....



Quelle: ABB



Indexmessung: Kraftwerk Reisach  
Francis mit 34 MW

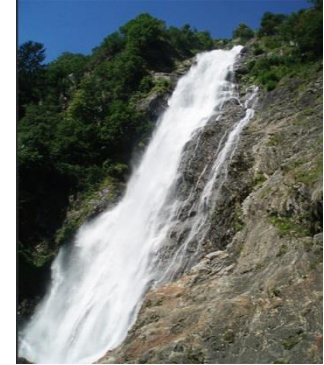
# Vergleich von Messunsicherheiten

- Gewöhnliche Randbedingungen: Betrieb in Vollast
- Konfidenzintervall 95%

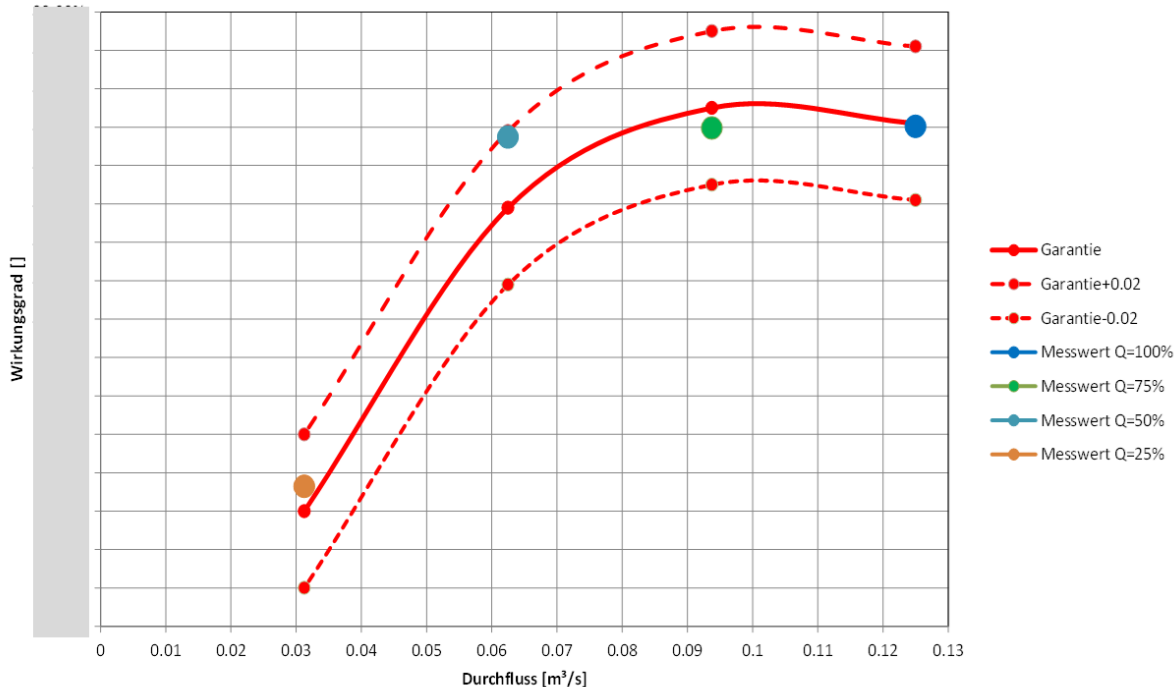
Quelle: IEC 60041, IEC 62006

Messmethode	Erwarteter systematischer Fehler	Kommentar
Wirkungsgradmessung mit Messflügeln	$f_{\eta} \approx 1,3-2,5\%$	In geschlossenen Querschnitten genauer als in offenen Kanälen
Wirkungsgradmessung mit akustischer Durchflussmessung	$f_{\eta} \approx 1,0-2,5\%$	Mit 8 innen liegenden Pfaden und CFD-Optimierung genauer als mit Clamp-On-Sensoren
Thermodynamische Wirkungsgradmessung	$f_{\eta} \approx 0,6-1,3\%$	Genauer für Fallhöhen > 200 m
Gibson Methode	$f_{\eta} \approx 1,5-2,3 \%$	Genauer für gleichmäßigen Querschnitt
Tracer-Methode	$f_{\eta} \approx 1,0-2,5 \%$	-
Volumetrische Methode	$f_{\eta} \approx 1,5 \%$	-
Induktive Durchflussmessung	$f_{\eta} \approx 1,5 \%$	für kleine Rohrdurchmesser (< DN500)

Peltonturbinen	Maschine 1: 2- düsig	Maschine 2: 1- düsig
Projektnummer	1113.1/11	1113.1/11
Bruttofallhöhe $H_{brutto}$	455 m	455 m
Nettofallhöhe $H_n$	443 m (spezifizierte Bezugsfallhöhe)	443 m (spezifizierte Bezugsfallhöhe)
Durchfluss $Q_n$	575 l/s	125 l/s
Drehzahl $n$	1000 1/min	1500 1/min
Leistung $P_{turbine}$	ca. 2243 kW	ca. 485 kW
Strahlkreis $D_1$	850 mm	565 mm
Becheranzahl	22	22
Becherbreite	195 mm	130 mm



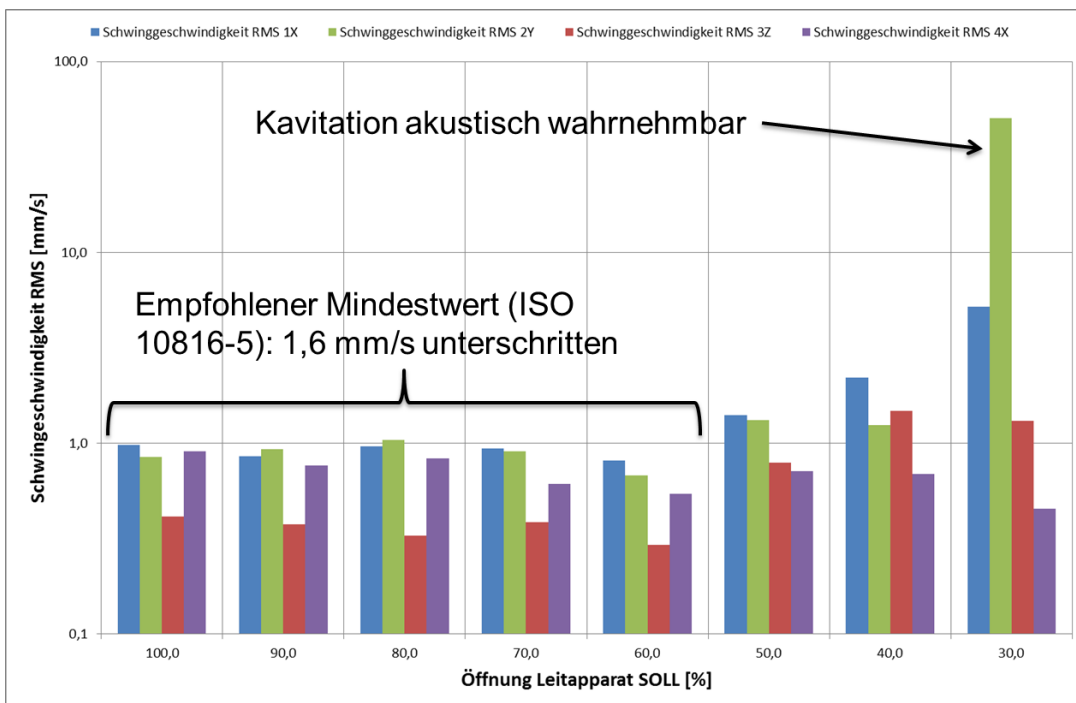
Maschine 2, Anlagenwirkungsgrad, Garantiepunkte





- 2 horizontale Francis-Turbinen  
 $Q_N=3000 \text{ l/s}$ ,  $P_{ges}=1.100 \text{ kW}$ , Jahresproduktion=6,7 Mio. kWh
- Druckrohrleitung aus GFK (DN 2400, PN 6, L=1560 m)

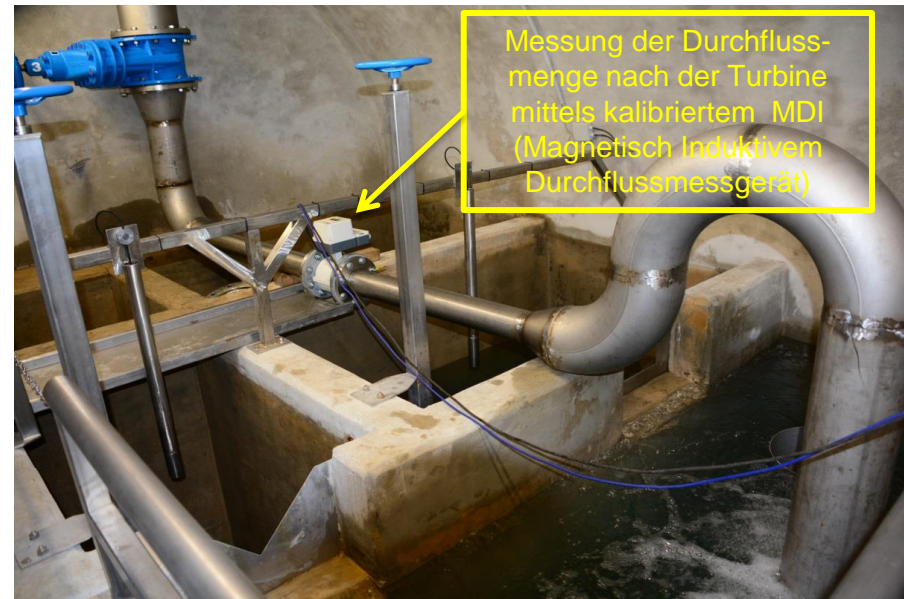
Messung: Anlagenwirkungsgrad ✓  
 Maximalleistungen ✓  
 Schwingungen ✓



• Trinkwasserkraftwerk:

Messmittel müssen Trinkwassergeeignet sein

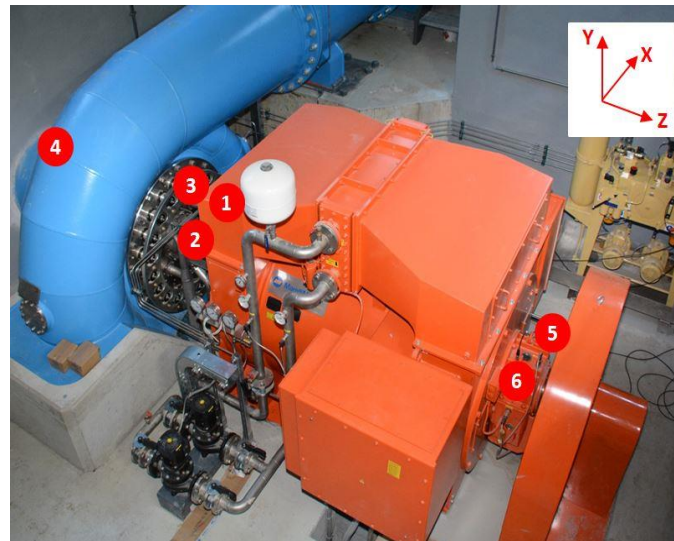
Maschine	Pelton-Turbine
Bruttofallhöhe $H_{\text{Brutto}}$	k.A. m
Nettofallhöhe $H_n$	172,6 m
Durchfluss $Q_n$	35,1 l/s
Drehzahl n	1011 U/min
Leistung $P_{\text{Turbine}}$	52,1 kW
Generator	Synchrogenerator (Electro Adda)
Nennleistung	75 kW
Nennstrom	131 A
Nennspannung	400 V





- Refurbishment KW Pontives / Kastelruth:
  - Wirkungsgradmessung
  - Schwingungs- und Akustikmessung

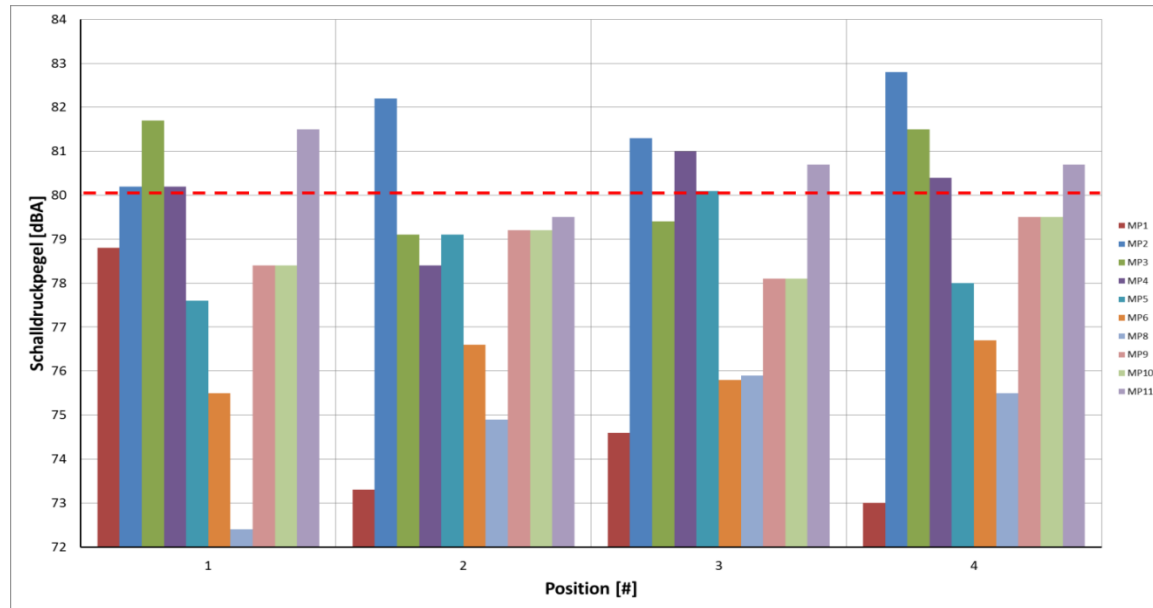
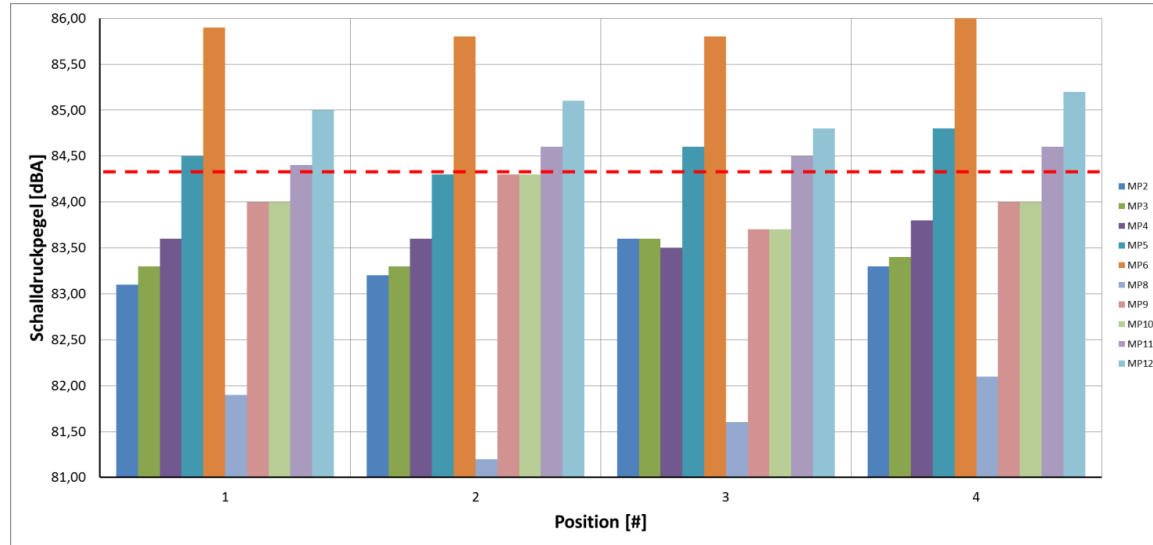
Maschine	Francis-Turbine
Bruttofallhöhe $H_{\text{Brutto}}$	40,8 m
Nettofallhöhe $H_n$	39,5 m
Durchfluss $Q_n$	2000 l/s s.o.
Drehzahl $n$	600 U/min
Baujahr	2016
Generator	MarelliMotori
Nennleistung	1000 kVA
Nennstrom	837 A
Nennspannung	690 V



**alperia**

→ZEK-10/2016

- Refurbishment: Messung vor und nach dem Umbau
- Signifikante Verbesserung des Wirkungsgrades
- „Schwingungsfreier“ Betrieb bis in tiefe Teillast (<20% v.  $Q_{Design}$ )
- Laufstärke halbiert Reduktion um mehr als 3 dB



- Oft gemachte Fehler
  - Zu ungenaue Messmittel
  - Brutto / Netto Fallhöhe, Fallhöhenberechnung
  - Verschmutzte Anlage
  - Eigenverbrauch nicht berücksichtigt
  
- Anlagenmessungen zum Qualitätsnachweis des gelieferten Equipment
- Um Streitpunkte zu Vermeiden: bereits im Vertrag Messung berücksichtigen und geeignete Messstellen vorsehen
- Messgenauigkeit ist auch mit Kosten verbunden, technische Einschränkungen bei verbauten Anlagen
- Schwingungsmessung, Schallmessung
- Durchführung durch unabhängige Fachleute



**RENEXPO<sup>®</sup>**  
AUSTRIA

**Institut für Hydraulische  
Strömungsmaschinen**

der Technischen Universität Graz

Kopernikusgasse 24/4  
A-8010 Graz Austria/Europe  
Tel.: +43 (0) 316 873 - 7571  
Fax: +43 (0) 316 873 - 7577  
Web: [www.hfm.TUGraz.at](http://www.hfm.TUGraz.at)  
E-Mail: sekretariat.hfm@tugraz.at