

# Wirkungsgrad- und Anlagenmessung

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Technischen Universität Graz



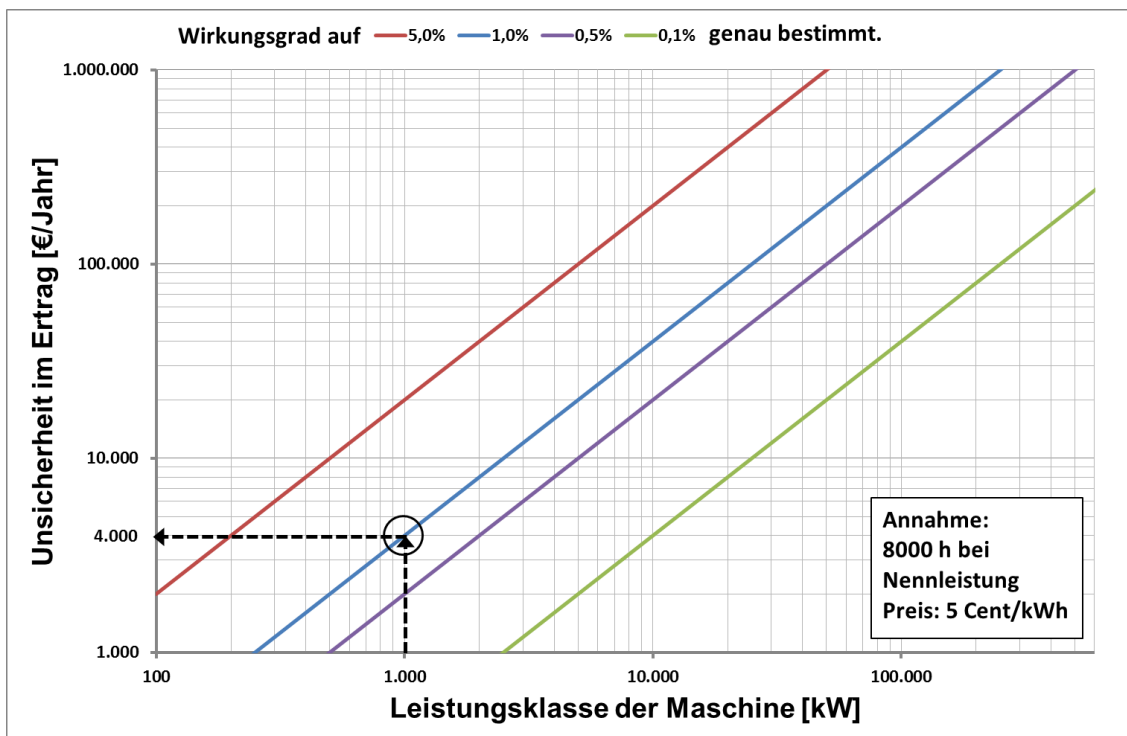
Helmut JABERG  
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
Institutsvorstand



Mark GUGGENBERGER  
Dipl.-Ing.  
Universitätsassistent

27. November 2014

# Ungenauere Wirkungsgradmessungen entscheiden über Wirtschaftlichkeit



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

- Wurden die projizierten Daten eingehalten?
- Erreicht die Anlage die garantierten Werte?
- Sind Verbesserungspotentiale vorhanden?
- Treten Komplikationen (Kavitation, Vibration, Lärm, ...) im Betrieb auf?

# Wirkungsgrad = Nutzen/Aufwand

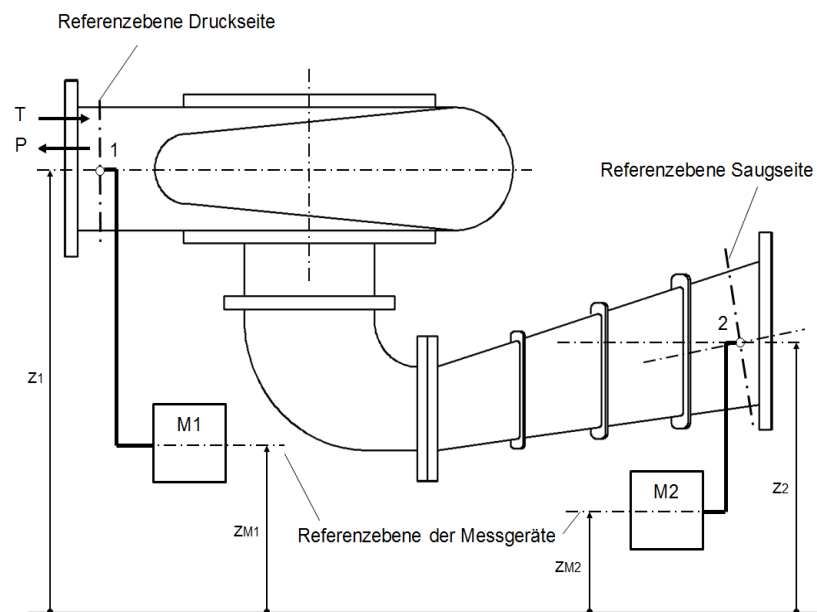
- Konventionelle Messung:** Hydraulischer Wirkungsgrad =  $\frac{\text{Abgeführte Leistung}}{\text{Zugeführte Leistung}}$

$$\eta_{\text{hydraulisch}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H} = \frac{P_{\text{mech}}}{\dot{m} \cdot E_h}$$

**Problem: ungenaue Durchflussmessung**

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

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



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

$$\eta_{\text{hydraulisch}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\dot{m} \cdot E_h} = \frac{\dot{m} \cdot E_m}{\dot{m} \cdot E_h}$$

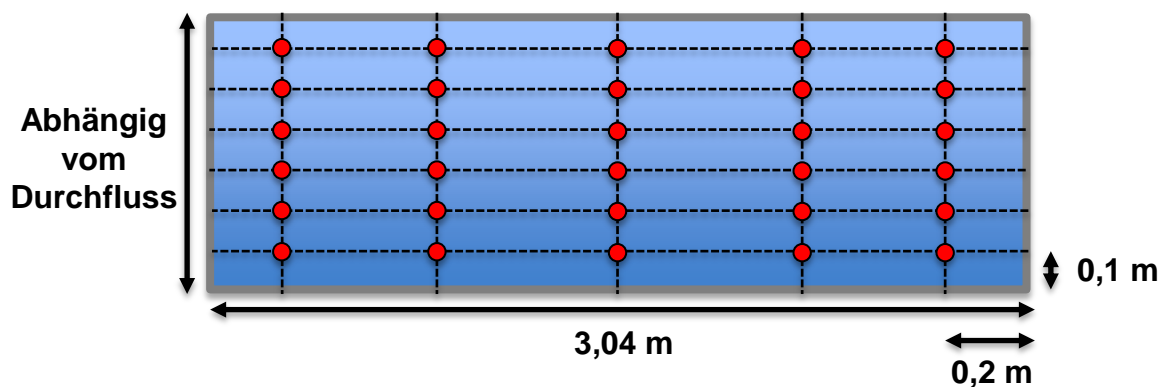
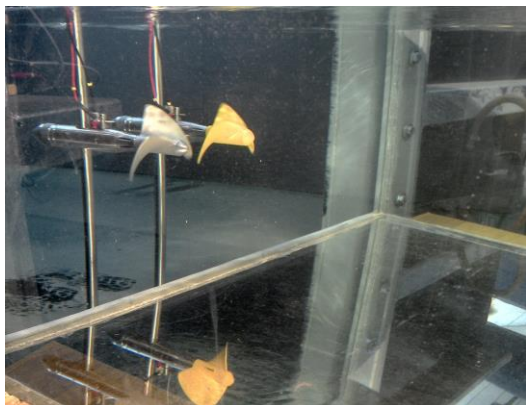
$$E_m = \bar{a}(p_{\text{abs1}} - p_{\text{abs2}}) + \bar{c}_p(T_1 - T_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

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

**keine Durchflussmessung erforderlich!**

# Durchflussmessung in großen Querschnitten

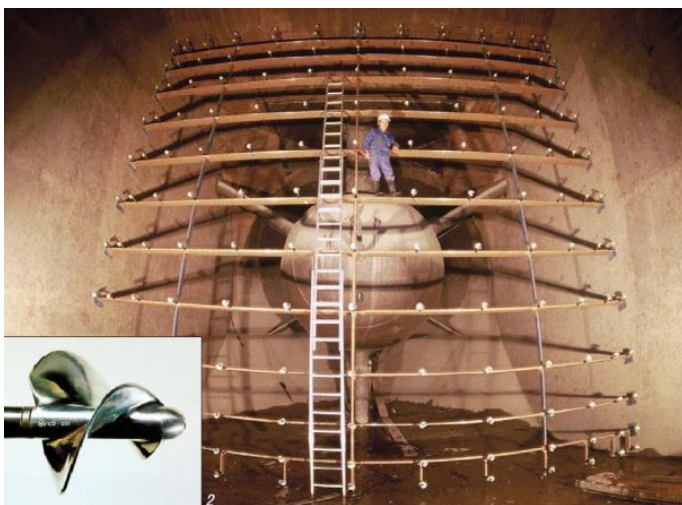
- Messung des Geschwindigkeitsfeldes in einem ebenen Querschnitt
- Abtasten des Querschnitts nach einem Raster (sequenziell/simultan)



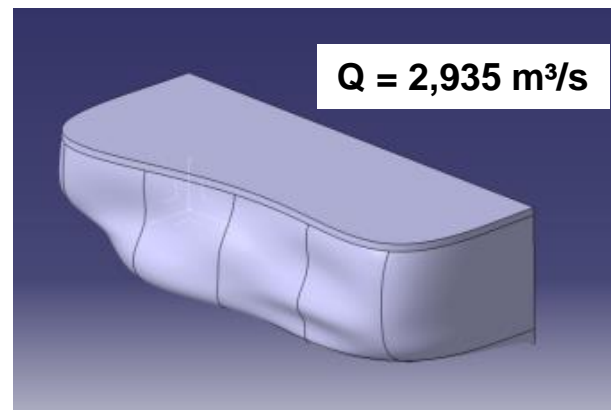
Kraftwerk Pucioasa (Rumänien)  
3 Kaplan turbinen mit je 300 kW

# Integration des Geschwindigkeitsfeldes ergibt Durchfluss

- Kalibrierte Flügelräder mit genormten Durchmessern
- Integration des Geschwindigkeitsfeldes mit numerischen Methoden
- Berücksichtigung der Randzonen



Quelle: Turboinstitut



OTT C31

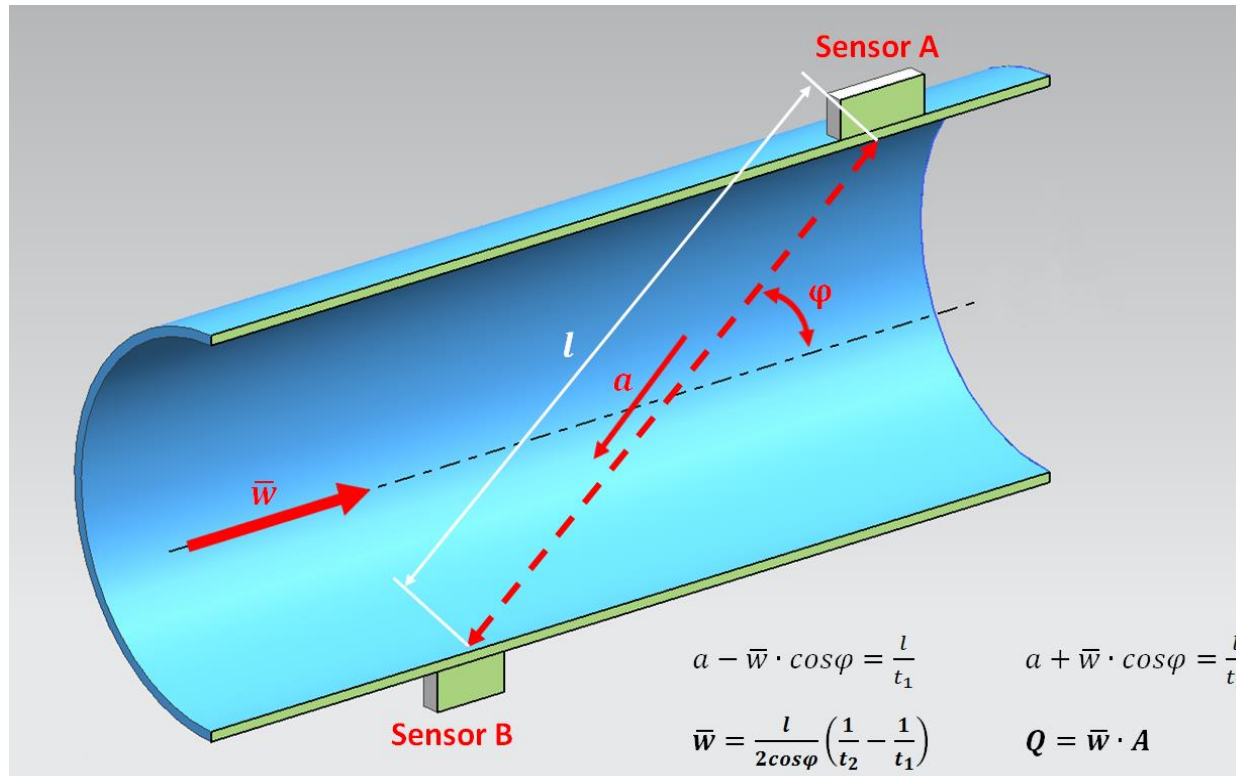


OTT Z400



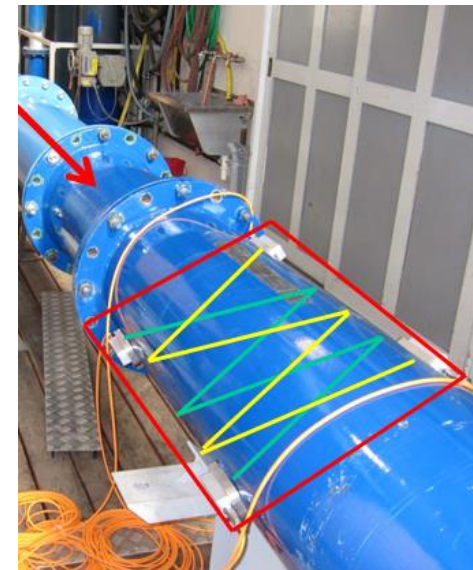
# Laufzeitdifferenz ergibt Durchfluss

- 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!

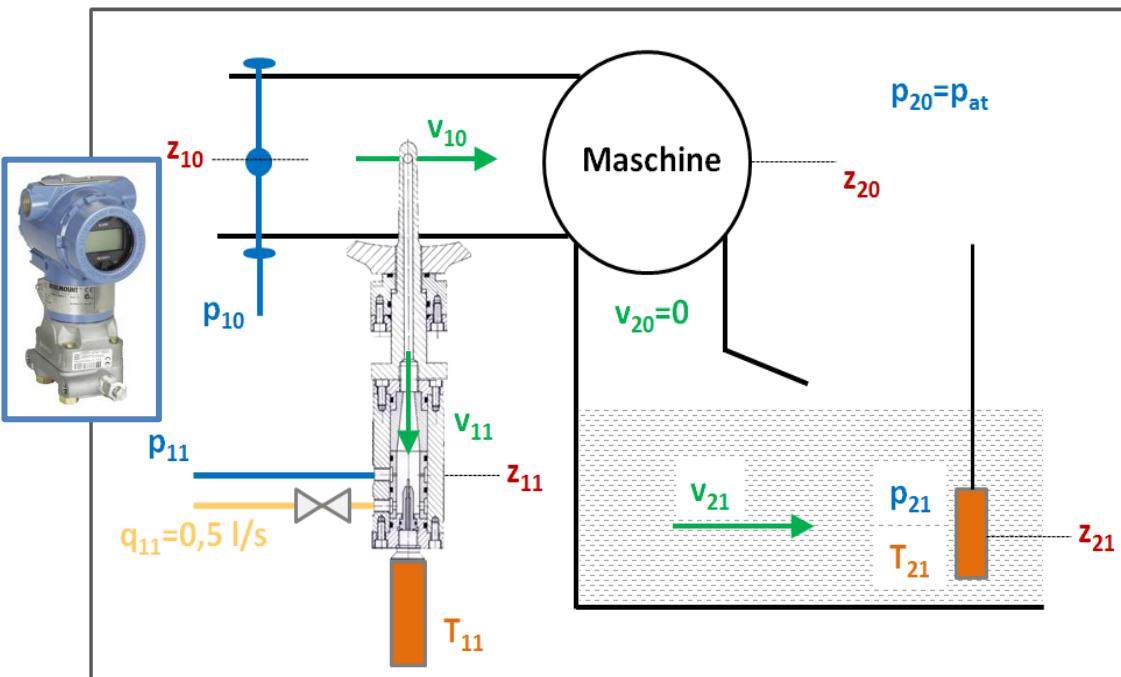
# Verluste äußern sich in Temperaturerhöhung

- Temperaturerhöhung ist Maß für den Wirkungsgrad
- Keine Durchflussmessung notwendig

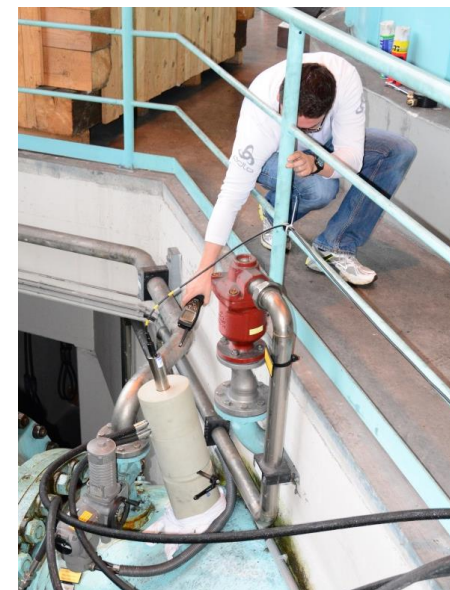
$$\eta_{\text{hydraulisch}} = \frac{E_m}{E_h}$$

$$E_m = \bar{a}(p_{11} - p_{21}) + \bar{c}_p(T_{11} - T_{21}) + \frac{v_{11}^2 - v_{21}^2}{2} + g(z_{11} - z_{21}) + \delta E_m$$

$$E_h = \frac{p_{10} - p_{20}}{\bar{\rho}} + \frac{v_{10}^2 - v_{20}^2}{2} + g(z_{10} - z_{20})$$



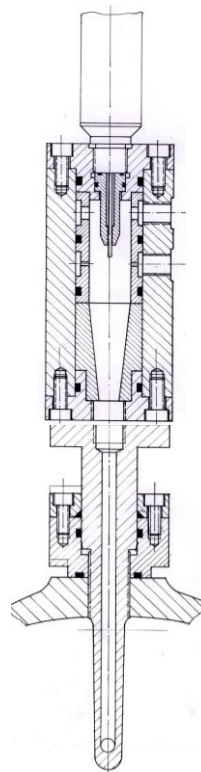
Kraftwerk Trieben  
6-düsige Pelton  
mit 12 MW





# Hochpräzise Temperaturmessung

- HFM setzt Temperatursensoren für ozeanographischen Einsatz ein – direkte Messmethode
- Absolut parallele Datenverarbeitung für höchste Genauigkeit (0,001 K)



# Einflüsse der Umgebung

- Berücksichtigung von Korrekturfaktoren nach IEC 60041 notwendig:
  - Wärmeeinfluss der Messkammer
  - Wärmeübergang Rohrleitung/Turbinengehäuse
  - Temperaturänderung im Zulauf (Messgrenze: 5 mK/Minute)
  - Direkter Wärmeaustausch mit Umgebungsluft
- Bis Fallhöhen > 100 m einsetzbar



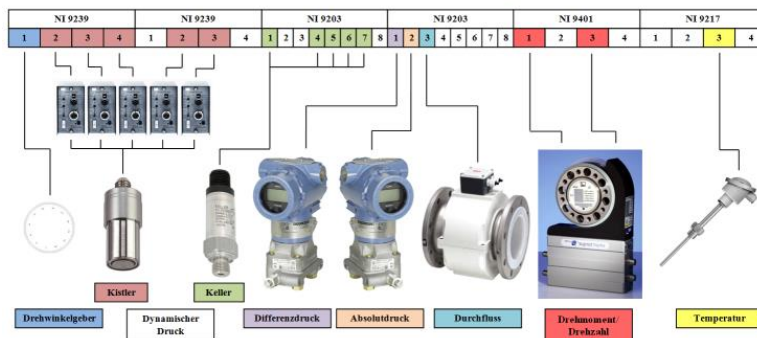
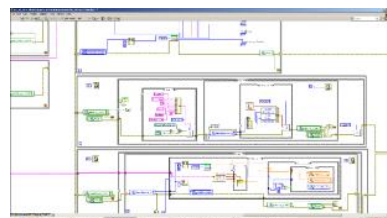
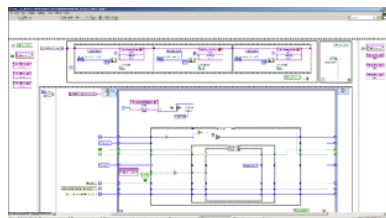
Kraftwerk Bodendorf  
Francis mit 30 MW



Kraftwerk Kaunertal  
2-düsige Pelton in Tandemanordnung mit 40 MW

# Digitale Messwertverarbeitung

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



**HFM:** 256 physikalische Kanäle

50,000 Hz Abtastrate pro Kanal

Netzwerkfähig

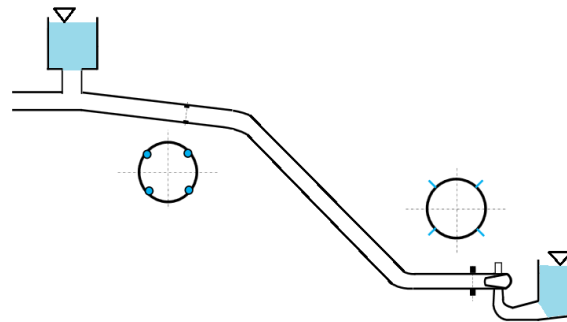
Fernüberwachung in Echtzeit

# Weitere Methoden zur Wirkungsgradmessung

- Indexmethode (relativer Wirkungsgrad)
- Gibson-Methode (Druck-Zeit-Methode)
- Magnetisch induktive Durchflussmessung
- Volumetrische Durchflussmessung
- .....



Quelle: ABB



Indexmessung: Kraftwerk Reischach  
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
Volumetrische Methode	$f_{\eta} \approx 1,5 \%$	-
Magnetisch induktive Durchflussmessung	$f_{\eta} \approx 1,5 \%$	für kleine Rohrdurchmesser (< DN500), benötigt ideale Bedingungen

 REXEXPO®  
AUSTRIA

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

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](mailto:sekretariat.hfm@tugraz.at)

