

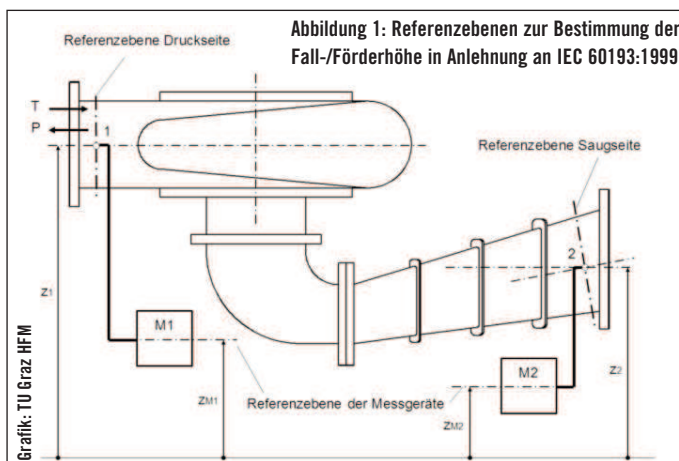
# MESSTECHNIK IN DER WASSERKRAFT

von DI Mark Guggenberger, Dipl.-Ing. (FH) Florian Senn und O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Helmut Jaberg

*Auch wenn der Trend in Richtung numerische Simulation geht, sind experimentelle Untersuchungen von hydraulischen Strömungsmaschinen oft unabdingbar und notwendig. Sei es zur Verifizierung von numerischen Resultaten, für Entwicklungs- und Grundlagenversuche oder für Abnahmeversuche an Modellen oder Realmaschinen. Grundlage und Voraussetzung für den Erfolg dieser Versuche ist die dabei angewandte Messtechnik.*

## BESTIMMUNG DES WIRKUNGSGRADES

Die Messtechnik im Bereich der hydraulischen Strömungsmaschinen bedient sich eines breiten Spektrums von verschiedensten Messgeräten zur Erfassung der relevanten physikalischen Größen. So sind beispielsweise zur Bestimmung des hydraulischen Wirkungsgrades einer Strömungsmaschine die Messgrößen Druck  $p$ , Durchfluss  $Q$ , Drehmoment  $T$  und Drehzahl  $n$  sowie die Temperatur  $\Theta$  unerlässlich. Die Messung erfolgt je nach Größe der Maschine bzw. Machbarkeit im Labor oder an der Realmaschine im Feld. Mit dem folgenden formellen Zusammenhang wird die Fall- bzw. Förderhöhe errechnet. Die Geschwindigkeiten in den Referenzebenen (Abbildung 1) werden über den gemessenen Durchfluss und die durchflossene Fläche ermittelt.



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

$$\text{mit } v_1 = \frac{Q}{A_1} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad \text{bzw.} \quad v_2 = \frac{Q}{A_2} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad [W] \quad \text{hydraulische Leistung}$$

$$P_m = T \cdot \omega \quad [W] \quad \text{mechanische Leistung mit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \left[ \frac{1}{s} \right]$$

Der Wirkungsgrad ergibt sich letztendlich aus dem Quotienten der mechanischen, an der Welle abgegebenen – oder aufgenommenen Leistung und der hydraulischen, von der Anlage dargebotenen – oder ihr zugeführten Leistung, je nachdem ob die Maschine als Pumpe oder Turbine betrieben wird. Er ist ein wirtschaftlicher Indikator für die Effizienz einer Maschine.

$$\eta_{h\_Pumpe} = \frac{NUTZEN}{AUFWAND} = \frac{P_h}{P_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Pumpe}$$

bzw.

$$\eta_{h\_Turbine} = \frac{NUTZEN}{AUFWAND} = \frac{P_m}{P_h} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Turbine}$$

Titelfoto: 4-Quadranten-Hauptprüfstand zur Untersuchung von skalierten Modellen oder Prototypen am HFM-Institut der TU Graz



## WIE HOCH IST DER JÄHRLICHE ERTRAG?

Zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage ist es erforderlich, deren Effizienz möglichst genau zu bestimmen. Aus einer exemplarisch angenommenen Messunsicherheit in der Bestim-

Clamp-On (mehrfadig)



## HydroVision

Durchflussmessgeräte



Diskutieren Sie Ihre Anwendung mit uns.  
Wir haben viele Lösungen parat!



[www.hydrovision.de](http://www.hydrovision.de)

mung des Wirkungsgrades resultiert eine finanzielle Unschärfe im jährlichen Ertrag. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung, welche auf einer angenommenen Jahresarbeitszahl von 8000 Stunden und einem durchschnittlichen Ertrag von fünf Cent pro verkaufter Kilowattstunde basiert. Auf der Abszisse ist die Nennleistung der Maschine aufgetragen. Je nach Genauigkeit des ermittelten Wirkungsgrades lässt sich die Unsicherheit des Ertrags auf der Ordinate ablesen. Dieses messtechnisch triviale, praktisch jedoch bedeutende Beispiel soll die Auswirkung von Messfehlern aufzeigen, hat allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

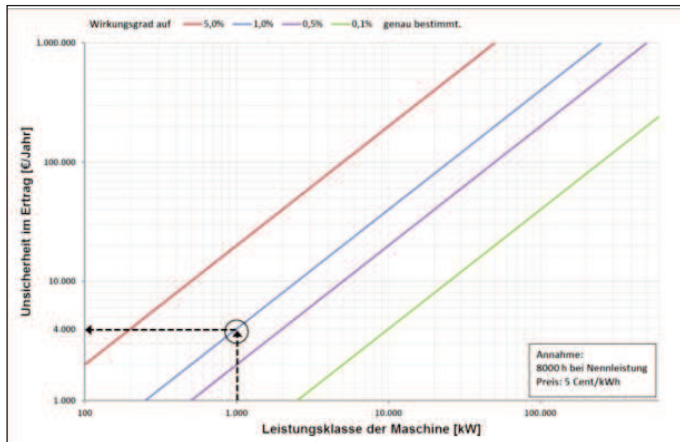


Abbildung 2: Unsicherheit des Ertrags über der Nennleistung der Maschine je nach Genauigkeit des ermittelten Wirkungsgrades  
Grafik: TU Graz HFM

**MESSFEHLER IM PROMILLEBEREICH**

Bei Abnahmeversuchen an Modellmaschinen, die bis heute die Basis jeder großen Ausschreibung und Vergabe der hydraulischen Ausstattung von Wasserkraftanlagen darstellen, ist eine sehr hohe Messgenauigkeit erforderlich. Diese Messungen werden als Ersatz für den Abnahmeversuch an der Großausführung verwendet (Abbildung 3). Selbstverständlich sind dabei alle Messfehler möglichst gering zu halten, um auch kleinste Änderungen des Wirkungsgrades im Promillebereich zuverlässig ermitteln zu können. Präzisionsprüfstände, wie der am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen der TU Graz, sind nötig, um neben dem Erreichen der Garantiewerte auch den Wirkungsgrad im Teillastbetrieb sowie das Kavitationsverhalten zu untersuchen.

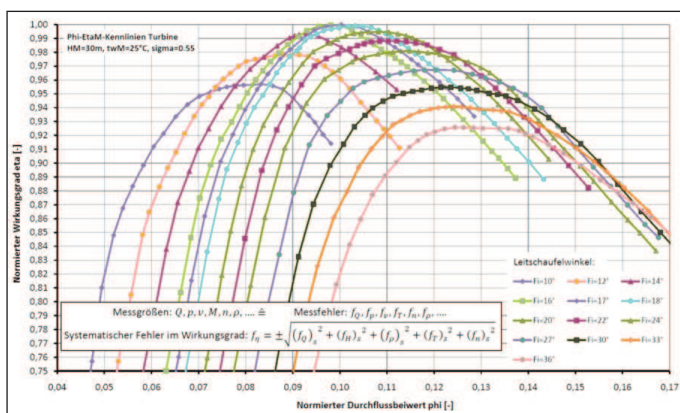


Abbildung 3: Aufgezeichnetes Turbinenkennfeld  
Grafik: TU Graz HFM

**MODERNES ELEKTRONISCHES MESSSYSTEM**

Für die exakte Durchführung eines Versuchs wird im institutseigenen Labor aktuell mit einem elektronischen, IEC-konformen Messsystem auf dem letzten Stand der Technik gearbeitet und trägt wesentlich zur

Qualität der Erkenntnisse bei Grundlagen- sowie Auftragsforschung bei. Dieses kann vollautomatisch Messsignale unterschiedlicher physikalischer Größen einlesen, verarbeiten, darstellen und in frei wählbarer Datenstruktur ausgeben. Die hardwareseitige Erfassung der quasi-stationären oder dynamischen Messdaten (Abbildung 4) erfolgt dabei mit einer modular zusammensetzbaren Messeinrichtung aus dem Hause „National Instruments“.

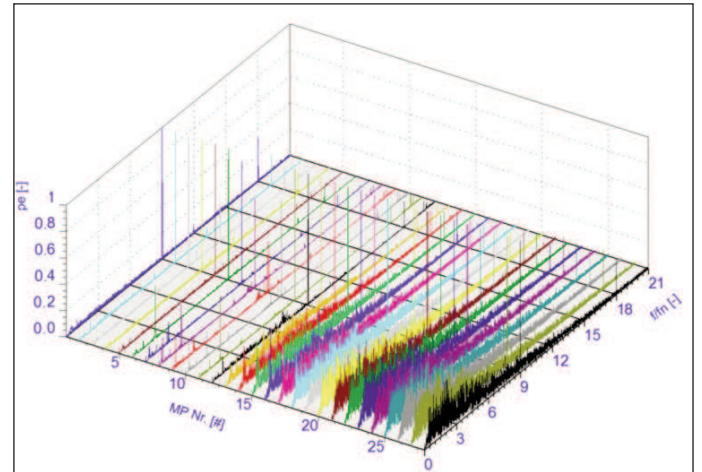


Abbildung 4: Beispiel für dynamische Messung einer Francisturbine: Druckpulsationsmessungen an verschiedenen Betriebspunkten mit normierter Drehfrequenz als normkonformes Wasserfalldiagramm dargestellt  
Grafik: TU Graz HFM

Bis zu 200.000 Werte pro Sekunde und Kanal können abgetastet werden, was eine Voraussetzung für eine fehlerfreie Digitalisierung, insbesondere von hochdynamischen Messsignalen, darstellt. Die computergestützte Messung als Basis der modernen Messtechnik ist aus dem Labor nicht mehr wegzudenken und hat neben der Datenerfassung die Signalkonditionierung, die Visualisierung sowie die Aufzeichnung und Ausgabe von teils beträchtlichen Datenmengen zur Aufgabe. Komplexe Messaufgaben können durch flexibel kombinierbare Module mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anschlussmöglichkeiten zeitnah gelöst werden.

**LEISTUNGSFÄHIGE SOFTWARE**

Ein in Eigenentwicklung geschriebenes Messprogramm ermöglicht eine komfortable Erfassung und Kontrolle der Messdaten in Echtzeit. Mit einer zweckmäßig gestalteten grafischen Benutzeroberfläche und einer visuellen Rückmeldung wird der Experimentator in seiner Tätigkeit unterstützt (Abbildung 5).

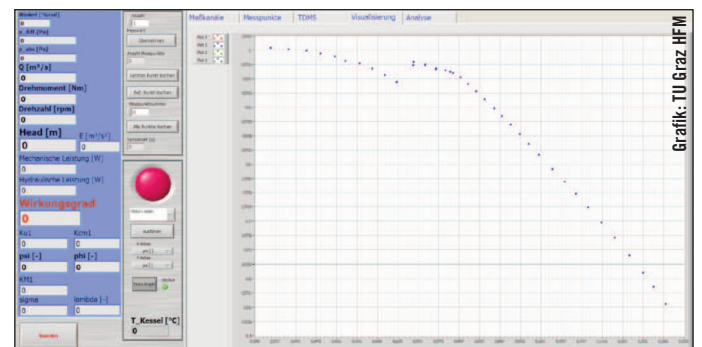


Abbildung 5: Grafische Benutzeroberfläche der institutseigenen Messsoftware  
Grafik: TU Graz HFM

Eine softwareseitige Schnittstelle erlaubt die Verwendung von Sensoren mit unterschiedlichen physikalischen Ausgangsgrößen. Zusätzlich kann jedem Messkanal eine eigene Kalibrationskurve hin-

terlegt werden, um die höchstmögliche Genauigkeit sicherzustellen. Die Versuchsdurchführung ist mit einer direkten Versuchsauswertung gekoppelt, so dass kosten- und zeitintensive Nachmessungen entfallen. Im Sekunden-Takt werden die gemessenen Rohdaten der eingesetzten Sensorik unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Größen in die Leistungsdaten umgewandelt und angezeigt. Die Visualisierung dieser Augenblickswerte gestattet eine hohe Messgenauigkeit, da schwankende Messwerte erkannt und stationäre Zustände abgewartet werden können. Randbedingungen, welche das Experiment ungewollt beeinflussen, können damit ausgeschlossen werden. Zusätzlich kann die Qualität der Messung, wie beispielsweise die Reproduzierbarkeit von Kennlinien, direkt am Bildschirm kontrolliert werden. Ausgewählte Betriebspunkte lassen sich explizit einstellen, wiederholt messen und im Zweifelsfall auch durch die aufgezeichneten physikalischen Größen genauer analysieren.

### GEEIGNETE MESSMETHODE AUSWÄHLEN

Das anwendbare Messverfahren muss aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen, wie den Eigenschaften der Messstrecke oder des Messgerätes selbst, für den jeweiligen Bedarfsfall ausgewählt werden. Für konkrete Anwendungen haben sich spezielle Messverfahren etabliert, so dass eine Vielzahl von Möglichkeiten existiert, die relevanten physikalischen Größen zu ermitteln. Als exemplarisches Beispiel sollen hierfür unterschiedliche Möglichkeiten zur Durchflussmessung angeführt werden. Keine andere Messgröße in der Wasserkraft ist durch so viele Verfahren bestimmbar. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwischen primären und sekundären Methoden. Die direkten Messmethoden werden aufgrund ihrer hohen Genauigkeit zur Eichung und Kalibrierung von Durchflussmessgeräten im Labor eingesetzt. Der zeitlich gemittelte Durchfluss wird dabei über die in einem definierten Zeitraum zugeflossene Masse, welche sich als Differenz aus den Wägungen vor und nach dem Zufluss ergibt, bestimmt. Mit Hilfe einer zusätzlich gemessenen Temperatur lassen sich die Dichte und damit der Volumenstrom ermitteln. Sekundärmethoden zur Messung des Durchflusses beruhen beispielsweise auf dem Wirkdruck, der Geschwindigkeit, der elektromagnetischen Induktion, dem Coriolis-Effekt oder der Wirbelfrequenz. In Prüfständen ohne freie Oberflächen kommen üblicherweise Venturi-Rohre sowie induktive Durchflussmessgeräte zum Einsatz.

### AKUSTISCHE DURCHFLUSSMESSUNG

Eine sehr flexible Messmethode zur Bestimmung des Durchflusses, ohne Rückwirkung auf das strömende Medium, ist die akustische Durchflussmessung mittels Laufzeitdifferenzmethode. In einem ruhenden Fluid breiten sich die Druckänderungen eines Schallsignals nach allen Richtungen mit der Schallgeschwindigkeit  $a$  aus. In bewegten Flüssigkeiten jedoch, ändert sich die Relativgeschwindigkeit des Schalls mit der Fluidgeschwindigkeit. Zeigt die Strömungsrichtung des Mediums in Ausbreitungsrichtung der Schallwellen, dann überlagern sich deren Geschwindigkeiten zu  $a + w$ . Entgegen der Strömungsrichtung ergibt sich die resultierende Geschwindigkeit  $a - w$ . Das bedeutet, ein akustisches Signal braucht gegen die Strömung länger als mit der Strömung, um eine definierte Messstrecke zu durchlaufen. Die dabei resultierende Laufzeitdifferenz ist ein Maß für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $w_m$ , aus welcher dann durch die bekannte Fläche  $A$  der Durchfluss  $Q$  bestimmt werden kann. Da aber bereits kleine Temperaturschwankungen die Schallgeschwindigkeit  $a$  so beträchtlich verändern ( $\Delta a = 3,7\text{m/s}$  für Wasser bei  $\Delta \Theta = 1^\circ\text{C}$ ), dass die Änderung  $\Delta a$  in der Größenordnung des Messwertes  $w_m$  und darüber liegen kann, subtrahiert man die beiden Gleichungen und erhält so einen von der Schallgeschwindigkeit unabhängigen Zusammenhang

(Abbildung 6). Dies erreicht man durch gleichzeitige Messung der Laufzeiten  $t_1$  und  $t_2$ . Die beschriebene Methode ist die genaueste für große Rohrdurchmesser; experimentell wurden mit innenliegenden Sensoren bereits Genauigkeiten von unter 5 Promille nachgewiesen. Momentan wird die Möglichkeit des Einsatzes von neu entwickelten Clamp-On-Sensoren für Anlagenmessungen am Institut untersucht. Diese werden magnetisch an der Außenwand eines Stahlrohrs oder mittels Klebstoff an einem GFK-Rohr angebracht und haben den Vorteil, dass keine Modifikationen an der Rohrleitung vorgenommen werden müssen. Der Anlagenbetrieb wird durch die Messung nicht gestört, und trotzdem werden Genauigkeiten wie mit innenliegenden Sensoren erreicht.

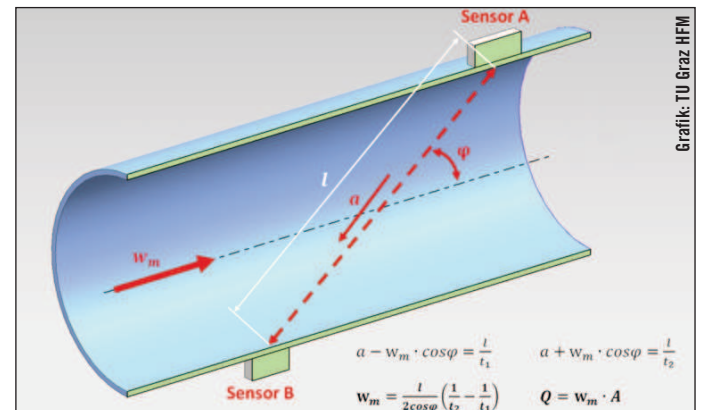


Abb.6: Schematische Darstellung des Messprinzips einer akustischen Durchflussmessung

### THERMODYNAMISCHE WIRKUNGSGRADMESSUNG AN MASCHINEN

Abnahmeversuche bei hydraulischen Strömungsmaschinen dienen dem Nachweis der zwischen Auftraggeber und Hersteller vereinbarten technischen, hydraulischen und mechanischen Garantien. Eine Möglichkeit, die Einhaltung der vereinbarten Effizienz eines Wasserkraftwerks zu bestimmen, ist die thermodynamische Wirkungsgradmessung, welche ebenfalls vom Institut für hydraulische Strömungsmaschinen durchgeführt wird. Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine Durchflussmessung erforderlich ist, um die Effizienz zu ermitteln. Diese ist in einer Anlage aufwendig zu realisieren und zumeist nicht sehr exakt. Das Verfahren beruht auf der Temperaturerhöhung, die durch Strömungsverluste in hydraulischen Strömungsmaschinen auftritt und ein Maß für die hydraulischen Verluste bzw. für den Wirkungsgrad ist. Mittels Entnahmesonden werden kleine Wassermengen abgezweigt, um in Messkammern den Druck und die Temperatur des durchfließenden Wassers zu messen. Durch die geringe Temperaturerhöhung des Wassers ( $1^\circ\text{C}$  Temperaturerhöhung entspricht einer Verlusthöhe von 427m) wird diese Messmethode eher bei Fall- bzw. Förderhöhen eingesetzt, die mehr als 100m betragen. Die Temperatur muss dabei auf  $0,001^\circ\text{C}$  genau bestimmt werden, was eine hohe Anforderung für die verwendete Temperatur-Sensorik bedeutet. Die Genauigkeit der Wirkungsgradmessung geht einher mit der perfekt in das Messsystem implementierten Temperaturmessung. Der Gesamtwirkungsgrad kann hierbei typischerweise unter zwei Prozent genau bestimmt werden.

### UNTERSUCHUNGEN ABSEITS DES OPTIMUMS

Bei hydraulischen Strömungsmaschinen sind aber nicht nur hohe Spitzenwirkungsgrade von Bedeutung. Die Rolle der Wasserkraft erweitert sich durch die Integration der volatilen Energiequellen von der erneuerbaren Energiegewinnung zur Sicherstellung der System-sicherheit, wirtschaftlichen Speicherung der Energie und raschen Verfügbarkeit sowie Regelbarkeit in einem weiten Leistungsbereich.

Fernab des Optimums treten jedoch unerwünschte Effekte wie Kavitation oder Sekundärströmungen auf, welche das Betriebsverhalten einer Strömungsmaschine stark beeinflussen. Kostspielige Nachbesserungen am Kraftwerk oder reduzierte Einsatzbereiche der Maschinen sind die Folge. Diese Effekte sind mit konventioneller (stationärer) Messtechnik nicht mehr greifbar. Um auch diese Phänomene zu untersuchen, werden an Prüfständen Methoden zur Visualisierung der Strömung eingesetzt. Kavitationsaufnahmen, die mit Hilfe des stroboskopischen Effekts und geeigneten Kameras gemacht werden, sind nach wie vor ein sinnvolles Verfahren zur qualitativen Kavitationsbeurteilung. Hochleistungsblitzlampen, deren Blitzfrequenz an die Drehzahl des rotierenden Objektes angeglichen wird, ermöglichen eine scheinbar stehende Aufnahme vom sich drehenden Körper. Auf diese Weise werden kavitationsgefährdete Bereiche an Modellmaschinen analysiert und dokumentiert (Abbildung 7).

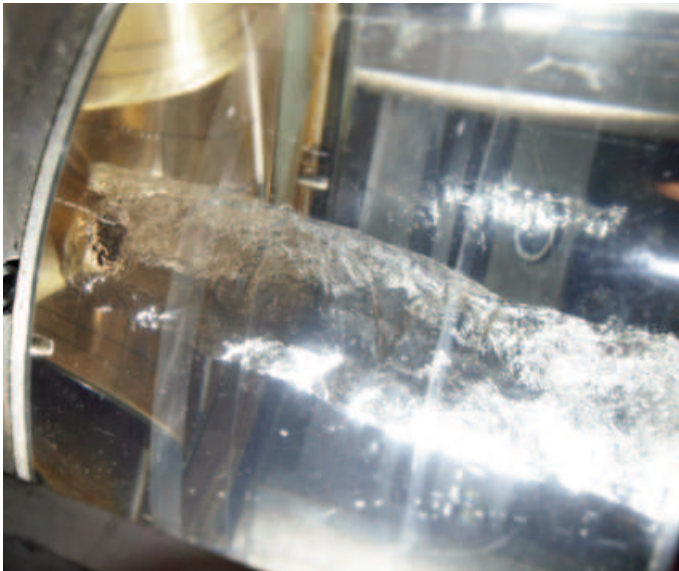


Abbildung 7: Strömungsvisualisierung eines Kavitations-Überlastzopfs einer Francis-Turbine  
Foto: TU Graz HFM

### MODERNE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Um nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Strömungsvisualisierungen durchzuführen, eignet sich beispielsweise die am Institut in vielen eigenen und industriellen Forschungsprojekten erfolgreich eingesetzte Particle Image Velocimetry, kurz PIV genannt (Abb. 8).



Abbildung 8: Laserkontrollbereich der institutsinternen durchgeführten PIV-Messung

Mit diesem laseroptischen Messverfahren können Geschwindigkeitsverteilungen in kompletten Strömungsfeldern gemessen werden. Und zwar mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Mit einem Hochleistungslaser und entsprechender Optik wird ein gepulster Lichtschnitt für wenige Nanosekunden in die zu untersuchende Strömung eingebracht. Der zeitliche Abstand zwischen den Laserblitzen wird vor der Messung festgelegt. Orthogonal zur beleuchteten Ebene ist eine Hochgeschwindigkeitskamera ausgerichtet, welche mikroskopisch kleine Partikel, die dem Wasser beigemischt werden, fotografiert. Der von einem Partikel zurückgelegte Weg zwischen zwei einzelnen Aufnahmen ist dadurch bekannt. Mit dem für den Laserpuls vorgegebenen Zeitintervall lässt sich dann die jeweilige Geschwindigkeit berechnen. Voraussetzung für eine exakte Messung ist ein gutes Folgevermögen der beigemischten Partikel. Diese bestehen beispielsweise aus Polyamid oder silberbeschichteten Glaskugeln im Größenbereich von einigen Mikrometern.

Ein weiteres Einsatzgebiet der optischen Strömungsmesstechnik in der Wasserkraft ist die Verifikation von numerischen Strömungsberechnungen. Immer leistungsfähigere Kamera-, Speicher-, und Computersysteme haben in Kombination mit Verfahren wie der bereits genannten Particle Image Velocimetry, der Laser Doppler Anemometry oder dem Particle Tracking dazu beigetragen, dass Turbulenzmodelle empirisch angepasst werden.

#### Literaturhinweise:

- [1] Profos, P., Pfeifer T., Handbuch der industriellen Meßtechnik, R. Oldenburg Verlag, 1994.
- [2] Hoffmann, J., Handbuch der Messtechnik, Hanser-Verlag, 2006.
- [3] Nitsche, W., Brunn, A., Strömungsmesstechnik, Springer-Verlag, 2006.
- [4] Raffel, M., Willert, Ch. E., Wereley, S. T., Kompenhans, J., Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Springer-Verlag, 2007.
- [5] ISO 9906:2012, Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grades 1, 2 and 3.
- [6] IEC 60193:1999, Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests.
- [7] IEC 60041:1991, Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumpturbines.

### Autoren:

**Dipl.-Ing. Mark Guggenberger**

**Dipl.-Ing. (FH) Florian Senn**

beides wissenschaftliche Mitarbeiter

**O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg**

Institutsvorstand

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

der Technischen Universität Graz

Kopernikusgasse 24/IV

A-8010 Graz

mark.guggenberger@tugraz.at

florian.senn@tugraz.at

<http://www.hfm.tugraz.at>