Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 87 (1995)

Heft: 1-2

Artikel: Entwicklung und Einsatz eines 3D-Theodoliten-Messsystems in Wasserkraftanlagen

Autor: Voser, Alexandre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940389

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Entwicklung und Einsatz eines 3D-Theodoliten-Messsystems in Wasserkraftanlagen

Alexandre Voser

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes «Akustische Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen» wurde am Laboratorium für Strömungsmaschinen an der ETH Zürich ein computerisiertes dreidimensionales Theodoliten-Messsystem entwickelt, das bei allen Bedingungen eine zehntelmillimetergenaue Vermessung von Punkten im Raum erlaubt. Diese Genauigkeit wird durch konsequente Anwendung numerischer Ausgleichsverfahren zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme erreicht. Eine Überprüfung der Resultate durch Statistiktests und die Berechnung von Standardabweichungen bei allen Messungen trägt zur Reduzierung von Messfehlern bei. Zielsetzung ist die Anwendung des Systems zur Vermessung von Rohren mit grossen Abmessungen und zur Positionierung akustischer Aufnehmer an den Rohrwänden bei Installationen von akustischen Durchflussmesseinrichtungen.

Umfeld

Zur Bestimmung der Primärenergie, welche Wasserkraftanlagen im Betrieb zugeführt wird, ist eine genaue Messung des Durchflusses erforderlich. Solche Messungen in Anlagen sind meist mit grossem Aufwand verbunden und erfordern zuverlässige Messeinrichtungen mit hohen Messgenauigkeiten sowie die Anwendung von raschen Installationsmethoden, um grössere Betriebsunterbrüche zu vermeiden. Wegen ihrer Vorteile findet der Einsatz von akustischen Messeinrichtungen weltweit immer breitere Anwendung, wie in einem Artikel von *Staubli* und *Graf* in «wasser, energie, luft» 84 (1992) S. 140–144 beschrieben wird [1].

Mit der Zielsetzung, dem Anwender von akustischen Messeinrichtungen konkrete Angaben zur Messgenauigkeit bei der Durchführung individueller Installationen zu liefern, wurde von den technischen Hochschulen in Zürich und Lausanne ein vom nationalen Energieforschungsfonds (NEFF) finanziertes gemeinsames Projekt in Angriff genommen. Während an der ETH in Lausanne der Schwerpunkt der Untersuchungen bei Labormessungen liegt, stehen an der ETH Zürich Anlagenmessungen mit einer mobilen akustischen Durchflussmesseinrichtung im Vordergrund. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich nun auf die Vermessungsaufgaben, die bei der Installation der Einrichtungen zur akustischen Durchflussmessung anfallen. Die dabei eingeschlagene Vorgehensweise stellt eine Anwendung modernster Methoden und Instrumente dar, die – über das konkrete Anwendungsgebiet hinaus – auch für ein breites Spektrum anderer Vermessungsaufgaben eingesetzt werden können.

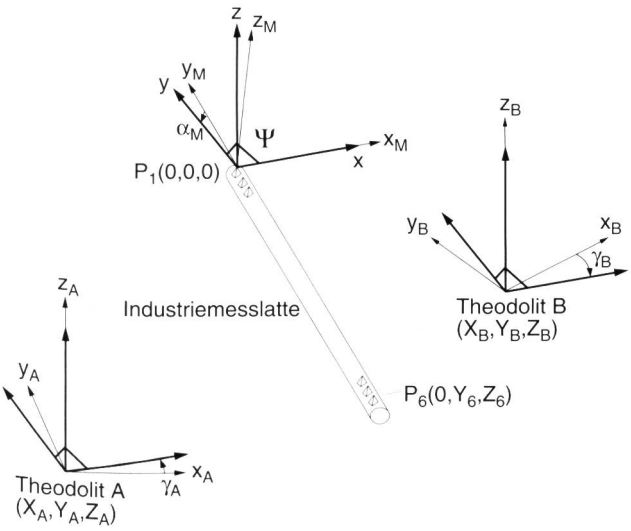

Bild 1. Kalibrierung des Messsystems mit der Industriemesslatte.

Einleitung

Die Vermessungsaufgaben bei der Installation lassen sich im wesentlichen auf eine Reihe von Distanzmessungen und Winkelmessungen zwischen Punkten im Raum zurückführen. Dabei sollte das Vermessungssystem eine Distanz zwischen zwei Punkten auch unter schwierigen Messbedingungen mit einer Standardabweichung kleiner als 0,2 ‰, z. B. 2 mm auf 10 m, liefern, um die von uns angestrebte Gesamtgenauigkeit der ADM von ±3 ‰ einzuhalten. Bei konventionellen Installationsmethoden, wo häufig mit Messband und sonstigen mechanischen Messwerkzeugen gemessen wird, ist es besonders in Anlagen mit grossen Rohrquerschnitten schwierig, diese Anforderungen zu erfüllen. Als Alternative bieten sich optische 3D-Theodoliten-Messsysteme an, welche zunehmend auch in der Industriemesstechnik verbreitet sind [2]. Sie ermöglichen die berührungslose Bestimmung der Raumkoordinaten *X, Y, Z* von beliebigen Punkten und eine daran anschliessende numerische Weiterverarbeitung der gemessenen Koordinaten, beispielsweise die Berechnung von Distanzen zwischen gemessenen Punkten. Die Präzision und die Flexibilität dieser Systeme hat uns dazu bewogen, selbst ein solches unter Anwendung im Handel erhältlicher Elemente speziell für unser Einsatzgebiet zu entwickeln.

Instrumentierung

Herzstück des Systems sind zwei elektronische Theodoliten vom Typ Geodimeter 520 SN. Diese sind sehr geeignet für den Aufbau eines Vermessungssystems, weil sie vollständig über die eingebaute serielle Schnittstelle fernsteuerbar sind, einen Servoantrieb besitzen und zudem mit einer Standardabweichung der Winkelmessung von 2" (0,075 mm auf 10 m) ausreichend genau sind. Zusätzlich ist einer der Theodoliten mit einem aufsteckbaren Miniaturlaser ausgerüstet, welcher mit der optischen Achse des Zielfernrohrs fluchtet.

Für die Kalibrierung des Systems wird eine Industriemesslatte eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein steifes Rohr, an dem sechs mit den Theodoliten von allen Seiten gut anzielbare Stahlkegel angebracht sind. Die Koordinaten der Kegelspitzen wurden am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) an der ETH mit einer Standardabweichung unter 0,01 mm auf einer Koordinatenmessmaschine vermasst.

Die Steuerung der Theodoliten und Auswertung der gemessenen Resultate erfolgt mit einem leistungsfähigen Macintosh. Die entsprechende Software wurde mit LabView, einer speziell für die Messdatenerfassung und -verarbeitung ausgelegten graphischen Programmiersprache, entwickelt. Dank der eingebauten Schnittstelle zu Hochsprachen wie Pascal oder C eignet sich diese einfache, vielseitige Programmiersprache auch für anspruchsvolle numerische Berechnungen.

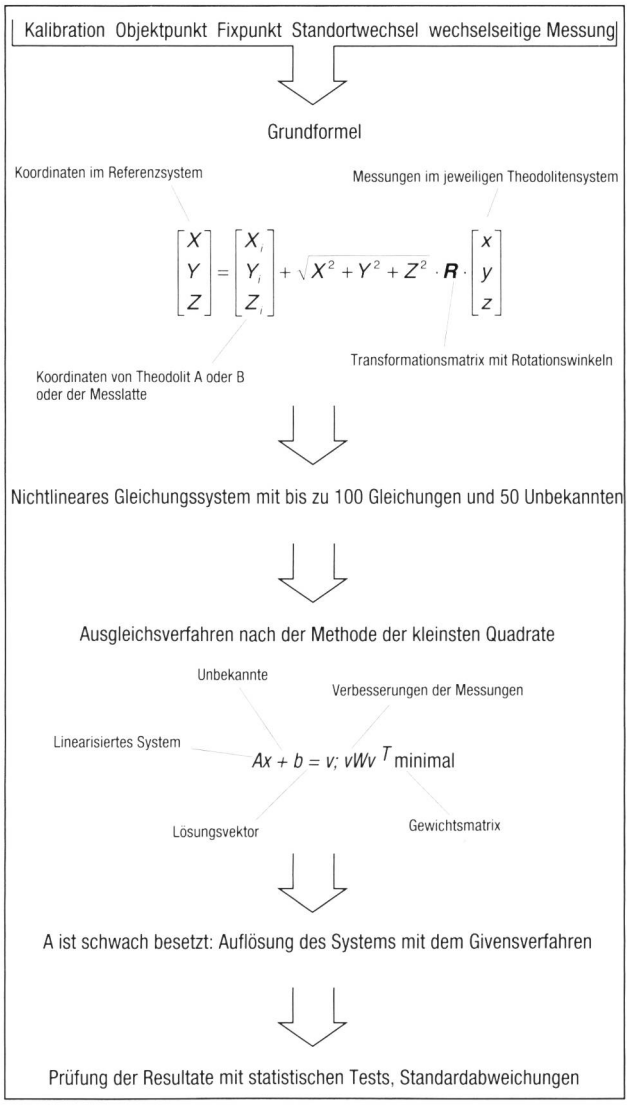

Bild 2. Ablauf des Rechenverfahrens.

Grundlagen

Wenn mit einem Vorwärtseinschnitt ein Punkt im Raum gleichzeitig von zwei Theodoliten mit bekannten Standorten angezielt wird, können die Raumkoordinaten *X, Y, Z* aus drei gemessenen Winkeln berechnet werden. In der Geometrie entspricht dies dem Schneiden einer Ebene mit einem Vektor, welches als Resultat gerade die Koordinaten des Schnittpunktes ergibt. Die im vierten Winkel enthaltene Zusatzinformation fliesst zur Erhöhung der Messgenauigkeit in eine Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate ein [3].

Nach dem Aufstellen der Theodoliten sind deren Standorte A (X_A, Y_A, Z_A) und B (X_B, Y_B, Z_B) vorerst unbekannt. Durch das Vermessen einer grossen Anzahl beliebiger Punkte könnten sie zwar mit einer anschliessenden Ausgleichsrechnung berechnet werden; genauer und rascher führt jedoch die Kalibrierung mit der oben beschriebenen Industriemesslatte zum Ziel. Dazu müssen mindestens drei der sechs Zielkegelspitzen mit beiden Theodoliten vermessen werden. Mit der Einführung der Messlatte wird auch gemäss Bild 1 ein Referenzkoordinatensystem ψ mit Ursprung in P1 und horizontaler *x-y*-Ebene festgelegt.

Durch die beliebige Aufstellung von Messlatte und Theodoliten spannen diese je ein lokales Koordinatensystem auf. Messungen in diesen Koordinatensystemen werden mit Hilfe der Rotationswinkel α_M für die Messlatte und γ_A respektive γ_B für die Theodoliten nach ψ transformiert.

Zusatzfunktionen

Wechselseitige Messungen:
Die oben beschriebene Kalibrierung führt zu einer Konzentration der Genauigkeit im Bereich der Messlatte. Um die Genauigkeit in der Nähe der Theodoliten zu erhöhen, können bei Sichtkontakt gegenseitige Messungen auf in der *z*-Achse der Theodoliten angebrachte Zielkegel vorgenommen und daraus zusätzliche Gleichungen gewonnen werden.

Messungen auf Fixpunkte:
Ebenfalls zur Erhöhung der Messgenauigkeit dienen Messungen auf ortsfeste, eventuell durch Zielmarken gekennzeichnete Punkte, die gleichmässig über den ganzen Messbereich verteilt sein sollten.

Standortwechsel der Theodoliten:
Wenn ein Punkt nicht direkt angezielt werden kann oder wenn ein Theodolit verschoben wurde, so kann mit Hilfe von Messungen auf die anfänglich vermessenen Fixpunkte der neue Standort des Theodoliten im Referenzsystem berechnet werden. Die Genauigkeit nachfolgender Messungen nimmt zwar leicht ab, dafür kann eine angefangene Messreihe ohne Unterbruch beendet werden.

Numerik

Bei der Vermessung eines neuen Punktes werden auch die Messungen aus der Kalibrierung und aus den Zusatzfunktionen gemäss Bild 2 mit ins Gleichungssystem einbezogen und dieses jeweils gesamthaft neu aufgelöst. Durch die grössere Anzahl an Freiheitsgraden, d.h. einer grösseren Überbestimmung des Systems, sind die Resultate wesentlich genauer als bei einer Lösung mit getrennten Modulen. Der Nachteil dieses Lösungsverfahrens, nämlich grössere Matrizen und damit längere Rechenzeiten, fallen dank der in den letzten Jahren stark angewachsenen Rechenleistung bei den PCs kaum ins Gewicht. So werden trotz Matrizen mit bis zu 5000 Elementen Rechenzeiten von 3 Sekunden pro Punkt selten überschritten. Ein weiterer Vorteil der geschlossenen Lösung ist der geringere Programmieraufwand: Werden beispielsweise nach der Kalibrierung die Standortkoordinaten der Theodoliten berechnet und gespeichert, so treten diese bei der Vermessung eines Punktes nicht mehr als Unbekannte, sondern als Messungen samt Standardabweichungen auf. Dies erfordert einen komplizierteren Lösungsansatz des Gleichungssystems, da die einzelnen Gleichungen nun nicht mehr nur eine Messung (sog. «observation equations»), sondern mehrere enthalten [4].

Bei allen Auswertungen kommt der «Goodness-of-Fit»-χ^2-Test zur Anwendung. Dabei wird getestet, ob das vor der Vermessung (a priori) aufgestellte und in die Gewichtungsmatrix *W* einfliessende Modell für die Standardabweichungen der Messungen nach erfolgter Vermessung (a posteriori) bestätigt werden kann. Da alle Messungen in diesen Test eingehen, können vor allem systematische Fehler ausfindig gemacht werden.

Zusätzlich wird bei der Vermessung von einzelnen Punkten ein τ-Test eingesetzt [4]. Im Gegensatz zum χ^2-Test kann mit diesem Test ein Ausreisser ermittelt werden, da er nur auf eine einzelne Messung angewandt wird. Oftmals wird aber ein einzelner Messfehler von anderen Messungen im Gleichungssystem aufgefangen und abgeschwächt, was seine Aufspürung erschwert.

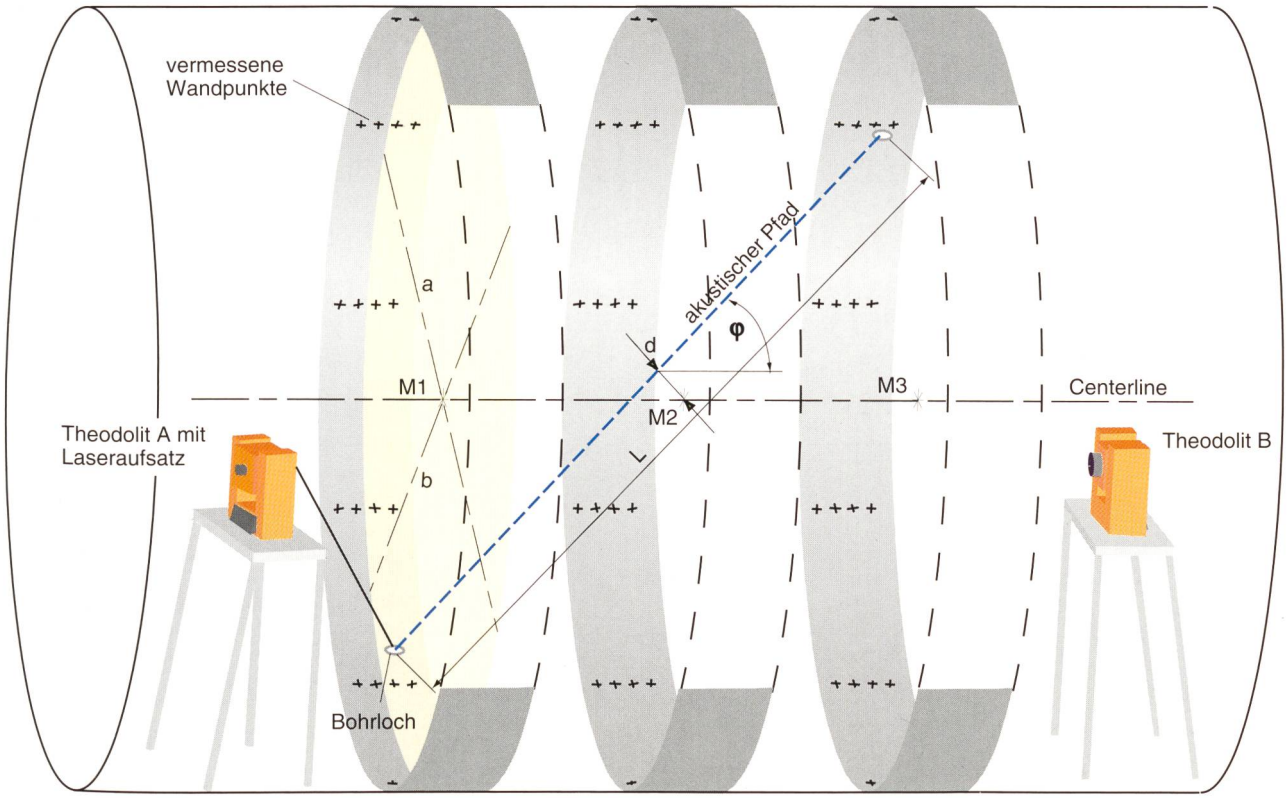

Bild 3. Vermessungsverfahren in runden Rohren.

Anwendungsbeispiel: Vermessungsverfahren zur Installation der akustischen Durchflussmesseinrichtung in runden Rohren

Die Vermessungsarbeiten lassen sich in drei Teilaufgaben aufgliedern:

Bestimmung der mittleren Querschnittsfläche der Messsektion

Für die Genauigkeit der akustischen Durchflussmessung ist die erzielte Messgenauigkeit bei der Bestimmung der mittleren Querschnittsfläche von grosser Bedeutung. Für runde Rohre führt z. B eine Messunsicherheit von ±1‰ bei der Bestimmung des Durchmessers *D* bereits zu einer Messunsicherheit von ±2‰ bei der akustischen Durchflussmessung.

Bei runden Rohren werden – wie in Bild 3 illustriert – an mindestens drei Abschnitten in der Messsektion 60 bis 80 Wandpunkte mit Hilfe des Laseraufsatzes eingemessen. Durch Zwischenrechnungen können die Koordinaten noch zu messender Punkte im voraus abgeschätzt und mit der Servosteuerung der Theodoliten angefahren werden. Dies führt zu einer Messdauer von durchschnittlich 15 Sekunden pro Punkt. Mit der Methode der kleinsten Quadrate werden nun elliptische Kegelstümpfe mittels folgender Gleichung durch die Punktescharen gelegt:

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} - (1 - c \cdot x)^2 = 0 \qquad (1)$$

Hier sind *a* und *b* die Halbachsen der Referenzellipse durch den Mittelpunkt der Punkteschar; *c* beschreibt den Öffnungswinkel des Kegelstumpfes. Falls *c* verschwindet, stellt obige Gleichung gerade einen elliptischen Zylinder dar. Durch Mittelwertbildung wird schliesslich aus den Referenzellipsen die mittlere Querschnittsfläche berechnet.

Positionierung der Aufnehmer

Durch die Koordinaten der Mittelpunkte der Referenzellipsen wird mit der Methode der kleinsten Quadrate die Mittelachse (Centerline) der Messektion bestimmt. Mit den vorgegebenen Abständen *d* zur Mittelachse und dem Pfadwinkel φ sind die gedachten Verbindungsgeraden zwischen den Aufnehmerpaaren, die akustischen Pfade, festgelegt. Durch Schneiden der Geradengleichungen mit (1) erhält man die Koordinaten der theoretischen Aufnehmerpositionen.

Nachvermessung

Wie Abbildung 4 zeigt, wird ein reales Profil durch eine Ellipse nur angenähert. Daher weichen die effektiven Werte von φ, *d* und den Pfadlängen *L* nach der Installation der Aufnehmer von den errechneten leicht ab.

Da die Messunsicherheiten dieser Grössen direkt in die akustische Durchflussmessung eingehen – eine Messunsicherheit von ±0,1° für den Pfadwinkel führt z. B auf eine Messunsicherheit von ±1,7‰ der akustischen Durchflussmessung –, werden sie durch Nachmessung der Aufnehmerkoordinaten nach der Installation neu berechnet. Mit den Fehlerfortpflanzungsgesetzen können zudem alle Standardabweichungen bestimmt und damit auch Angaben über die Genauigkeit der akustischen Durchflussmessung gemacht werden.

Schlussfolgerungen

Mit dem vorgestellten 3D-Theodoliten-Messsystem steht uns ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung, mit welchem zwei Personen sämtliche bei der Installation einer akustischen Durchflussmesseinrichtung anfallenden Vermessungsarbeiten in einem Arbeitstag durchführen können. Bei kleineren Rohrabmessungen ($D < 4$ m) benötigen erfahrene Installationsingenieure mit herkömmlichen Vermessungswerkzeugen zwar kaum mehr Zeit, jedoch errei-

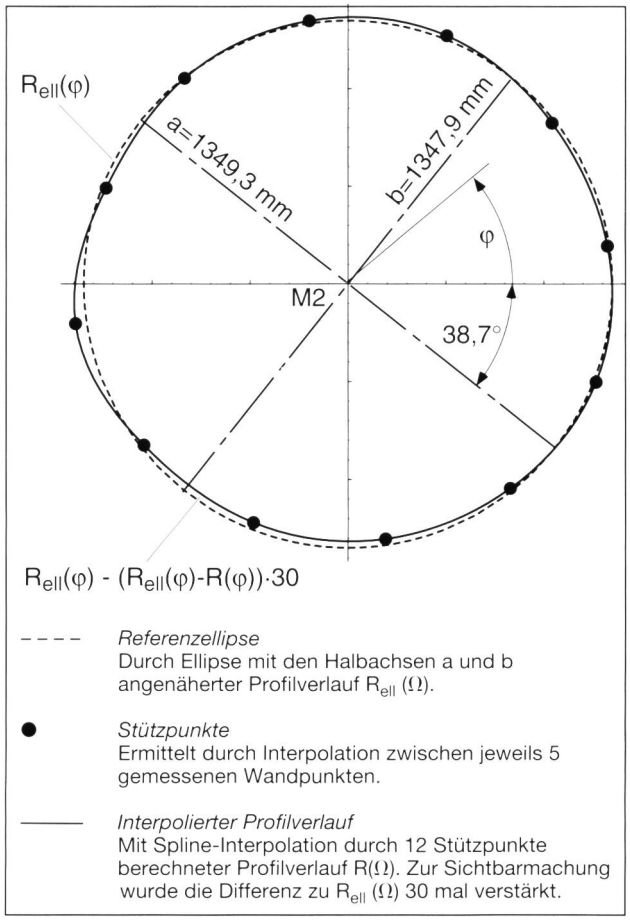

Bild 4. Profilverlauf im Zulauf einer der Turbinen in der Anlage von Martina-Pradella.

chen sie insbesondere wegen fehlender Nachmessmöglichkeiten nicht die von uns angestrebten Messgenauigkeiten.

Das Messsystem wird nun bei den von uns durchgeführten Installationen von akustischen Aufnehmern eingesetzt. Im Herbst 1993 bestand das Messsystem eine erste Bewährungsprobe bei der Nachvermessung einer herkömmlich installierten, achtpfadigen Durchflussmesseinrichtung. In der Anlage von Martina-Pradella konnten alle wichtigen geometrischen Grössen erfolgreich gemessen und mit den Sollwerten der mit der Montage beauftragten Firma verglichen werden.

Mit zusätzlichen Softwaremodulen lässt sich das System problemlos an spezielle Messbedingungen anpassen. Auch der Einsatz im klassischen Anwendungsgebiet eines solchen Messsystems, nämlich der Vermessung von grossen Werkstücken, ist ohne weiteres möglich.

Literatur

[1] *T. Staubli, K. Graf:* Akustische Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen. «wasser, energie, luft» *84* (1992) S. 140–144.

[2] *J. P. Sondermann, P. Nimz:* Qualität und Zuverlässigkeit, Heft 1 1988. Carl Hanser Verlag München.

[3] *H. R. Schwarz:* Numerische Mathematik. B. G. Teubner Stuttgart.

[4] *M. A. R. Cooper:* Control Surveys in Civil Engineering. Collins Professional and Technical Books.

Wir danken den Engadiner Kraftwerken (EKW) und der Belegschaft des Kraftwerks Martina-Pradella für ihre Unterstützung bei den Messungen im September 1993.

Adresse des Verfassers: *A. Voser,* Institut für Energietechnik, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.

Forschungsprojekt

Akustische Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen

Projektgruppe «Akustische Durchflussmessung»

ETHZ, IET, Dr. *T. Staubli* (Leitung), *A. Voser* EPFL, IMHEF, Prof. *P. Henry* †, *J. Prénat, Ch. Bruttin*
Projektfinanzierung: NEFF (Nationaler Energie-Forschungs-Fonds)

Das NEFF-Hochschulprojekt «Akustische Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen» (beschrieben in «wasser, energie, luft», *84,* Heft 7/8, 1992) befindet sich im dritten Projektjahr. Die durchgeführten Arbeiten zielen auf die Vorhersage der Messgenauigkeit im Planungsstadium von Durchflussmessungen sowie auf die Analyse der Messunsicherheit nach durchgeführten Messungen hin. Aufgrund der bereits gesammelten Erfahrungen aus Anlagenmessungen, theoretischen Studien und Labormessungen konnte nachgewiesen werden, dass auch unter schwierigen Messbedingungen eine Genauigkeit von besser als ±1%, unter günstigen Bedingungen von ±0,5% und im Laborversuch sogar von ±0,2% erreicht werden kann. Die akustische Methode ist somit hervorragend zur Bestimmung der den Wasserkraftanlagen zugeführten Primärenergie geeignet.

Im Projekt bereitgestellte und verfügbare Werkzeuge sind:
- akustische Messeinrichtungen zur Messung in Hochdruck- und Niederdruckanlagen sowie für Vergleichsmessungen im Labor,
- computergesteuerte Vermessung des strömungsführenden Querschnitts und der Sonderpositionen in Rohrleitungen mit zwei Theodoliten,
- numerische Programme zur Abschätzung der zu erwartenden Messgenauigkeit in Abhängigkeit von Geometrie, Strömungsverhältnissen und Anzahl der akustischen Pfade.

Bereits durchgeführte Studien betreffen:
- Vergleichsmessungen im Labor: experimentelle Bestätigung der Messgenauigkeit bei ungünstigen Strömungsverhältnissen; Beeinflussung der Messung durch Luftblasen,
- numerische Strömungsberechnung zur Vorhersage von Geschwindigkeitsverteilungen in Anlagen,
- numerische Parameterstudien zur Bestimmung von Einflussfaktoren der Geschwindigkeitsverteilungen auf die akustische Durchflussmessung,
- Messungen in Anlagen.

Weitere Projektschritte sind:
- zusätzliche Messungen in Anlagen und im Labor,
- Aufbereitung des Know-how und der Werkzeuge, damit sie einem breiteren Anwenderkreis zugänglich werden,
- Ausarbeitung von Empfehlungen und Richtlinien zur Anwendung von akustischen Durchflussmessungen,
- wissenschaftliche Fundierung der Erkenntnisse.