Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 84 (1992)
Heft: 7-8

Artikel: Akustische Durchflussmessung in Wasserkraftanalgen
Autor: Staubli, Thomas / Graf, Kurt
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940568

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: 23.08.2025

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

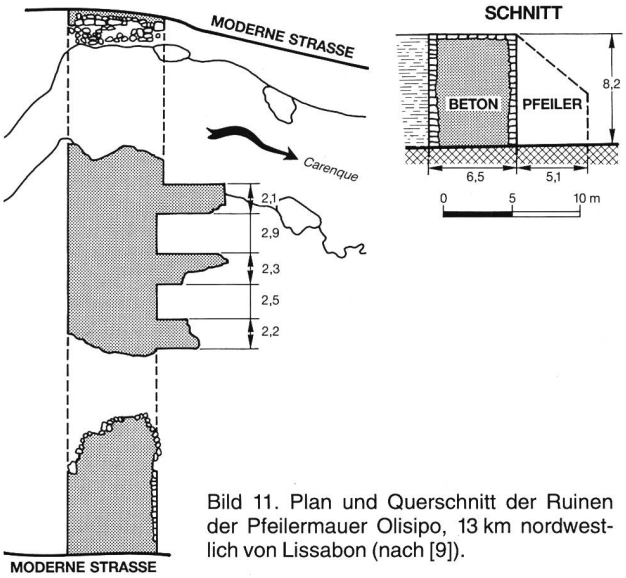


Bild 11. Plan und Querschnitt der Ruinen der Pfeilermauer Olisipo, 13 km nordwestlich von Lissabon (nach [9]).

Massnahme eindeutig gerechtfertigt war (Bild 4). Ausgrabungen 1980 haben nämlich gezeigt, dass sie bis zu 7 m grösste Höhe erreichte, bei einer Stauwandbreite von nur 0,9 m [8]. Dabei betrug der Achsabstand der etwa 2,2 m starken Pfeiler im Mittel 6,6 m und im höchsten Mauerteil, wo ein Pfeiler verschwunden ist, richtigerweise nur noch 5,1 m oder 73% der Mauerhöhe (Bild 10). Trotzdem war die Gleitsicherheit nicht gewährleistet, weshalb die Sperre, wie gesagt, zu einem unbestimmten Zeitpunkt brach. Das gleiche Schicksal hatte schon eine ältere Mauer unbestimmten Typs erlitten, deren Überreste bei den Ausgrabungen von 1980 wasserseitig entdeckt wurden. Der nur 15000 m³ fassende Stausee von Iturranduz diente der Wasserversorgung der verschwundenen Stadt Andelos.

3.5 Pfeilermauer Olisipo

Im Gegensatz zur vorgenannten Sperre war bei derjenigen von Olisipo (Gruppe 13) für die Wasserversorgung des antiken Lissabon schon die 8,2 m hohe und 6,5 m dikke Stauwand an sich mehr als genügend standfest, so dass die luftseitigen Pfeiler nurmehr als «Dekoration» dienten (Bild 11) [9]. Sie waren etwa 2,2 m stark und wiesen einen mittleren Achsabstand von 4,9 m auf. Wie die Stauwand bestanden die Pfeiler aus Beton mit einer Verkleidung aus grob behauenen Quadersteinen. Der Stauinhalt betrug etwa 125000 m³, was für eine Sperre dieser Höhe eher wenig war (Bild 3).

3.6 Damm Consuegra

Die Sperre Consuegra in Zentralspanien (Gruppe 10) ist mit 700 m Kronenlänge bei weitem das längste derartige Bauwerk der Römer auf der Iberischen Halbinsel (Bild 5). Trotz der eher bescheidenen grössten Höhe von 5,8 m vermochte sie deshalb für die Versorgung der Stadt Consuegra gut 1 Mio m³ Wasser zu stauen (Bild 3). Ursprünglich hielt man sie für eine Pfeilermauer, obschon nur auf 12% ihrer Länge Stützpfeiler mit einem grossen mittleren Achsabstand von 6,2 m vorhanden waren und der Rest der 1,4 m breiten Stauwand über weite Strecken nicht standfest war. Ferner verfügte die Sperre am linken Kronenende über eine separate Hochwasserentlastung, was bei römischen Gewichts- und Pfeilermauern selten der Fall war [10]. Es muss sich also um einen Damm gehandelt haben, und tatsächlich fand man dann Spuren des luftseitigen Erdstützkörpers, welcher durch Auswaschungen und Ackerbau weitgehend zerstört worden ist. Sinn und Zweck der genannten Stützpfeiler bleiben ein Rätsel. Solche gibt es in Wirklichkeit noch viele, auch wenn man sich, wie im vorliegenden Beitrag, bemüht, antike Technik möglichst rational zu durchleuchten. Doch wie die römischen Ingenieure wirklich empfanden, überlegten und vorgingen, können wir höchstens erahnen.

Literatur

[1] *N. A. F. Smith:* The Roman Dams of Subiaco. «Technology and Culture» 1970, p. 58–68.
[2] *L. Caballero Zoreda, F. J. Sánchez-Palencia Ramos:* Presas romanas y datos sobre poblamiento romano y medieval en la provincia de Toledo. «Noticiario arqueológico hispánico» no. 14, 1982.
[3] *J. A. Fernández Ordóñez* et al.: Catálogo de noventa presas y azudes españoles anteriores a 1900. Com. Estud. Hist. Obras Publicas y Urbanismo (CEHOPU), Madrid 1984.
[4] *A. de Carvalho Quintela, J. L. Cardoso, J. M. Mascarenhas:* Aproveitamentos hidraulicos romanos a sur do Tejo. Dir.-ger. dos recursos e aproveitamentos hidraulicos, Lisboa 1986 (english summary: «Int. Water Power & Dam Construction» May 1987, p. 38–40 and 70).
[5] *K. Grewe:* Merida. Die Wasserversorgung antiker Städte. P. von Zabern, Mainz a. R. 1988, S. 204–206.
[6] *M. Diaz-Marta Pinilla, D. Fernández-Ordóñez Hernandez:* Historische Talsperren und Wehre in Spanien. Historische Talsperren, Band 2., K. Wittwer, Stuttgart 1991, S. 131–159 und 171–176.
[7] *N. J. Schnitter:* Die Entwicklungsgeschichte der Bogenstaumauer. Historische Talsperren, Band 1., K. Wittwer, Stuttgart 1987, S. 75–95.
[8] *M. A. Mezquiriz:* Comentario al estudio conjunto sobre la presa romana de Consuegra. «Revista de obras públicas» 1984, p. 194–199.
[9] *D. Fernando de Almeida:* Sobre a barragem romana de Olisipo e seu aqueducto. «O arqueologo português» 1969, p. 179–189.
[10] *J. A. García-Diego:* Nuevo estudio sobre la presa romana de Consuegra. «Revista de obras públicas» 1980, p. 500–505.

Adresse des Autors: *Niklaus Schnitter,* dipl. Bauing. ETHZ, Fleinerweg 4, CH-8044 Zürich.
Vortrag, gehalten am 8. internationalen Symposium zur Geschichte des Wasserbaus in Merida/E, 12. bis 20. Oktober 1991.

Akustische Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen

Thomas Staubli und Kurt Graf

Die akustische Durchflussmessung ist eine eingriffsfreie Messung. Sie basiert auf dem Prinzip, dass in einem strömungsführenden Querschnitt die Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit durch die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Es wird hier eine kurze Einführung zum Stand der Technik akustischer Durchflussmessung gegeben, spezielle Eigenschaften der akustischen Methode werden hervorgehoben und die Ergebnisse von Vergleichsmessungen werden vorgestellt.

Akustische Methoden zur Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen weisen gegenüber anderen Methoden Vorteile auf. Einige der noch offenen Fragen sollen durch ein gemeinsames Projekt der technischen Hochschulen geklärt werden, das zum Ziel hat, den Einsatz der akustischen Durchflussmessung in der Schweiz zu fördern.

Einleitung

Durchflussmessungen in Wasserkraftanlagen haben eine lange Tradition. Besonderer Bedarf nach Messungen grosser Genauigkeit entstand in den fünfziger und sechzi-

ger Jahren in der Phase des grossen Ausbaus der Wasserkräfte der Schweiz. In dieser Zeit wurden von Ingenieuren in der Schweiz auch auf dem Gebiet der Durchflussmessung Pionierleistungen erbracht. Als Beispiel sei erwähnt, dass in den internationalen Regeln für Abnahmemessungen bezüglich der Durchflussmessung mit Messflügeln in weiten Teilen die Richtlinien der früher erschienenen schweizerischen Regeln übernommen wurden. Ein überragender Einfluss geht hier auf Prof. *Gerber* (1904–1982) zurück, der als damaliger Leiter des Instituts für hydraulische Maschinen an der ETH mit sprühender Energie die schweizerischen Erfahrungen in internationale Gremien einfliessen liess.

Neuere Methoden, wie die im vorliegenden Artikel behandelte akustische Methode zur Durchflussmessung mit Ultraschall, wurden vor allem in Nordamerika mit Erfolg eingesetzt. Dies obwohl auch auf dem Gebiet der Ultraschallmessungen in der Schweiz von *Carlos Knapp* bereits 1958 in seiner Dissertation an der ETH bedeutende Vorarbeiten geleistet wurden.

Langjährige Erfahrungen mit Ultraschallmessungen als Sekundärmethode zur Durchflussmessung oder zur Überwachung von Anlagen bezüglich Leckage hat die Firma Rittmeyer in Zug. Messungen mit einer Sekundärmethode müssen zur genauen Durchflussmessung allerdings mit einer Primärmethode geeicht werden, so z. B. mit Messflügeln.

Der Inhalt des vorliegenden Artikels konzentriert sich auf die genaue, absolute Durchflussmessung mit mehrkanaligen akustischen Messsystemen, die als Primärmethode eingesetzt werden können. Wie genau ist die Durchflussmessung mit Ultraschall? Fachleute mit grosser Messerfahrung schätzen die Messunsicherheit auf ±0,3% für günstige Einbaubedingungen. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass meist diese günstigen Randbedingungen für optimale Strömungsverhältnisse in der Praxis nicht erfüllt werden und somit die Messunsicherheit ansteigt. Zielsetzung sollte es jedoch sein, auch in nicht optimalen Fällen Messungen mit einer Genauigkeit von besser als ±1% durchführen zu können.

Die Messung des Durchflusses stellt bis heute die eigentliche Schwachstelle bei der Wirkungsgradmessung in unseren Wasserkraftanlagen dar. Die Messgenauigkeit bei der Messung von elektrischen Leistungen oder Drükken übertrifft diejenige der Durchflussmessung um ein Mehrfaches. Bei Anlagen mit grossem Gefälle behilft man sich mit der thermodynamischen Wirkungsgradmessung, welche ohne Durchflussmessung auskommt. Der Durchfluss kann aus dem Wirkungsgrad und der umgesetzten hydraulischen Energie nachträglich berechnet werden.

Um im Einzelfall die Messgenauigkeit abschätzen zu können – Messungen in den bestehenden Anlagen der Schweiz werden immer als individuelle Fälle zu betrachten sein –, fehlt auch international noch Erfahrung mit der akustischen Durchflussmessung. Insbesondere gibt es kaum wissenschaftliche Studien, welche mögliche Fehlerquellen bei der Ultraschallmessung systematisch analysieren. Für die individuelle Anlage fehlen somit Richtlinien, nach denen der Praktiker die Einflüsse diverser Fehlerquellen abschätzen kann.

In diesem Kontext ist die Zielsetzung eines gemeinsamen Projektes der beiden technischen Hochschulen in Zürich und Lausanne zu sehen. Aufbauend auf den internationalen Erfahrungen, wird ein Projekt in Angriff genommen, welches Know-how auf dem Gebiet der Ultraschallmessung sammelt und deren Einsatz in schweizerischen Anlagen fördert. Zur Finanzierung des Projekts wurde dem Nationalen Energieforschungsfonds (NEFF) ein Gesuch eingereicht.

Die jeweilige Ausgangslage, welche die Motivation zur Durchflussmessung bildet, ist meist ebenso individuell wie die Wasserkraftanlagen selbst. Im Vordergrund stehen momentan Durchflussmessungen, welche im Rahmen der Erneuerung von Wasserkraftanlagen und der Konzessionen durchgeführt werden. Von Interesse ist hier die Überprüfung des garantierten Wirkungsgrades der Strömungsmaschinen sowie im Jahresmittel die Kenntnis der Effizienz in der Umsetzung von anfallender Primärenergie in elektrische Energie.

In anderen Fällen geht es um Wasserrechte und Verträge, welche Wassermengen an mehrere Parteien aufteilen, was deren genaue Bestimmung erfordert. So werden zum Beispiel in einem Konzessionsgebiet von grossräumigen und grenzüberschreitenden Wassereinzugsgebieten mit Turbinen und Pumpspeicheranlagen die Energieanteile nach Bruttoenergien verrechnet. Zur Bestimmung dieser Bruttoenergien benötigt man genaue Durchfluss- und Gefällsdaten.

In vielen Fällen wird eine erstmalige Messung mit einer Primärmethode gewünscht, um festinstallierte Durchflussmesseinrichtungen (Venturi, Winter-Kennedy, Ultraschalleinrichtungen mit nur einem akustischen Pfad usw.) zu eichen. Eine wesentliche Rolle spielt in diesem Zusammenhang das «Monitoring», das durch kontinuierliche Wirkungsgradüberwachung Revisionen der Strömungsmaschinen nach Bedarf ermöglicht.

Was versteht man unter akustischer Durchflussmessung?

In technischen Anwendungen werden Ultraschallwandler, die sowohl als Sender als auch als Empfänger arbeiten, an Rohrleitungen angebracht, wie dies schematisch in Bild 1 dargestellt ist. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer von einem Ultraschallsender ausgesandten Welle wird von der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers, in welchem sich die Schallwelle fortpflanzt, beeinflusst. Ist a die Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit im ruhenden Medium und v die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers, so ist die Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit in Richtung der Strömung (a_1) und entgegen der Strömung (a_2) unter Berücksichtigung des Winkels θ des akustischen Pfades zur Strömungsrichtung wie folgt zu bestimmen,

in Strömungsrichtung: $a_1 = a + \bar{v}_L \cos\Theta$

entgegen der Strömung: $a_2 = a - \bar{v}_L \cos\Theta$

Die Laufzeiten T eines Signals über die Strecke L werden:

$$T_1 = \frac{L}{(a + \bar{v}_L \cos\Theta)} \qquad T_2 = \frac{L}{(a - \bar{v}_L \cos\Theta)}$$

wobei $\bar{v}_L$ die über die Strecke L gemittelte axiale Strömungsgeschwindigkeit darstellt. Die Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}_L$ wird über eine Messung der beiden Laufzeiten T_1 und T_2 bestimmt.

$$\bar{v}_L = \frac{L}{2}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

Besondere Eigenart des Verfahrens ist also, dass die Messung längs dem akustischen Pfad einer Integration über die Distanz L entspricht (Bild 2).

$$\bar{v}_L = \frac{1}{L\cos\Theta}\int_{s=-L/2}^{s=+L/2} v(s)\cos\Theta\, ds = \frac{1}{2R}\int_{x=-R}^{x=+R} v(x)dx$$

Zur Berechnung des Durchflusses Q ist die Geschwindigkeit über den ganzen durchströmten Querschnitt zu mitteln (Bild 3). Die hierzu nötige zweite Integration über die Höhe wird beim Kreisquerschnitt üblicherweise nach dem numerischen Verfahren von Gauss vorgenommen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Vorgehens findet man zum Beispiel bei *Brand* (1962).

$$Q = \int_{y=-R}^{y=+R} \left[\int_{x=-R}^{x=+R} v(x,y)\, dx \right] dy = \bar{v}A$$

Da eine Messung auf einem einzigen akustischen Pfad bei in der Praxis anzutreffenden Fällen keinen repräsentativen Geschwindigkeitsmittelwert für den gesamten Leitungsquerschnitt liefert, ist, zur Minimierung des Einflusses von ungleichförmigen Geschwindigkeitsverteilungen und Drall, die Messung gleichzeitig auf mehreren akustischen Pfaden vorzunehmen. Die sich in Vorbereitung befindlichen internationalen Regeln des IEC (International Electrotechnical Commission) schreiben gar acht verschiedene akustische Pfade vor, um den Messfehler zu minimieren. Schematisch ist diese Messanordnung in Bild 3 zu sehen. Die acht akustischen Pfade sind auf zwei sich schneidenden Ebenen (A, B) angebracht und liefern Geschwindigkeitsmittelwerte ($\bar{v}_1$ bis $\bar{v}_4$) auf vier parallelen Schnittebenen.

Diese Anordnung (Bild 3) hat sich in der Praxis bewährt und durchgesetzt, da einerseits durch die gekreuzten akustischen Pfade Querströmungseffekte eliminiert werden können und andererseits die Vielzahl der Messebenen den Integrationsfehler bei der Durchflussbestimmung minimiert.

Eine ausgezeichnete Diskussion des Einflusses der Variation der Geschwindigkeitsverteilungen im Messquerschnitt auf die Messunsicherheit wurde von *Etter* in Stuttgart 1982 durchgeführt. Aufbauend auf dieser Arbeit, sollten Richtlinien für Messungen in Wasserkraftanlagen, inklusive Fehlerabschätzungen, ausgearbeitet werden.

Alle akustischen Verfahren, welche zur genauen Durchflussmessung in grossen Rohrleitungen und Kanälen in Frage kommen, basieren auf dem Prinzip der Laufzeitmessung, auch wenn die individuellen Ausführungen der Produkte sehr unterschiedlich sein können. Die Ultraschallsensoren müssen in direktem Kontakt mit dem Wasser sein, ansonsten eine merkliche Vergrösserung der Messunsicherheit eingehandelt wird, wie dies bei den sogenannten «Clamp-on»-Sensoren der Fall ist, welche aussen ohne Bohrung an Rohrleitungen angebracht werden.

Einsatzgebiet und Einsatzgrenzen

Einer der grossen Vorteile der akustischen Durchflussmessung ist die grosse Dynamik des Messbereichs. Kleinste Geschwindigkeiten von einigen cm/s bis Geschwindigkeiten von 10 m/s können problemlos gemessen werden. Im Gegensatz zu anderen Methoden sind, je nach gewähltem Messsystem, auch bezüglich der Leitungsabmessungen praktisch keine Grenzen gesetzt.

Solange das Wasser akustisch transparent bleibt, spielt die Wasserqualität bezüglich der Messgenauigkeit keine Rolle. Dichte des Fluids, Temperaturschwankungen und Verschmutzung sind ohne Einfluss. Grössere Anteile von Luftblasen können die Messung allerdings stören. Als weiterer Vorteil der Messung mit akustischen Methoden ist hervorzuheben, dass auch zeitlich veränderliche Durchflüsse gemessen werden und deren Schwankungen analysiert werden können.

Zur Installation der Messeinrichtung ist im Normalfall die Leitung zu entleeren. Die Sensoren sind je nach Typ entweder innen an der Rohrleitung anzubringen oder durch Bohrungen von aussen in Kontakt mit dem Fluid zu bringen. Bei innenmontierten Sensoren sind die Sensorkabel über Stopfbüchsen nach aussen zu führen. Der Aufwand zur Installation des Messsystems sowie zur Vermessung des Messquerschnitts und der Sensorpositionen kann je nach individuellen Randbedingungen zwei Tage bis eine Woche betragen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Erfahrung des Messteams. Durch den Einsatz computerisierter Vermessungsgeräte kann die Einrichtungszeit verkürzt werden.

Im Einsatz bei Hochdruckanlagen wird die akustische Durchflussmessung wegen der zu erwartenden höheren Messgenauigkeit eine Alternative zur thermodynamischen Methode der Wirkungsgradbestimmung bilden. Hochdruckanlagen sind für wenig aufwendige Vergleichsmessungen zwischen der thermodynamischen und der akustischen Methode geeignet.

In denjenigen Fällen (vor allem bei Mitteldruckanlagen), in denen bis anhin Messflügel zur Durchflussmessung eingesetzt wurden, werden wohl in Zukunft vermehrt Ultraschallmessungen durchgeführt werden, da diese es erlauben, den Messaufwand zu reduzieren.

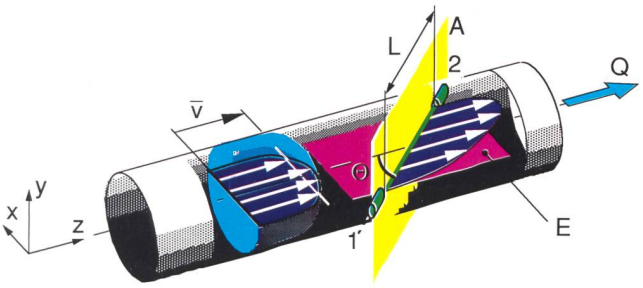
Niederdruckanlagen ohne genügend lange Leitungsabschnitte mit parallelen Wänden, d.h. mit kurzem Einlauf und ohne saugseitigem Stollen, waren bis heute nur in seltenen Fällen der Messung überhaupt zugänglich. Auch akustische Messungen müssen in den entsprechenden Anlagen ihre Tauglichkeit erst noch beweisen. Den Autoren sind keine entsprechenden Messungen in Niederdruckanlagen bekannt. Im Rahmen des geplanten NEFF-Projektes der Hochschulen sollen solche Messungen durchgeführt werden.

Vergleichsmessungen

Vergleiche von Durchflussmessungen, bei welchen mit verschiedenen Methoden gleichzeitig oder kurzfristig hintereinander gemessen wurde, wurden bisher international erst an einem guten Dutzend Wasserkraftanlagen durchgeführt. Eine grossangelegte Vergleichsstudie wurde in Nordamerika vom EPRI (Electric Power Research Institute) in die Wege geleitet. Weitere Vergleiche mit Messflügelmessungen wurden von der ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) in Italien durchgeführt. Aus den skandinavischen Ländern liegen vor allem Vergleiche mit der thermodynamischen Methode vor. Insgesamt wurden vergleichende Messungen in Wasserkraftanlagen mit folgenden Methoden vorgenommen:

- akustische Messungen mit diversen Messsystemen
- Messung von Geschwindigkeitsverteilungen mit Messflügeln
- thermodynamische Methode
- Druck-Zeitmethode (*Gibson*)
- Farbverdünnungsmethode
- Salz-Geschwindigkeitsmethode (*Allen*)
- volumetrische Messung

Einige global zusammengefasste Ergebnisse aus diesen Vergleichsstudien sind in Bild 4 zusammengestellt. Aus diesen hier zusammengestellten Ergebnissen gehen Beobachtungen und individuelle Randbedingungen aus den Einzelmessungen natürlich nicht hervor, dafür erhält man aber einen leicht verständlichen qualitativen Überblick



Die Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit wird durch die Strömung beeinflusst:

- Grössere Geschwindigkeit für Schall in Strömungsrichtung (1→ 2)
- Kleinere Geschwindigkeit für Schall entgegen der Strömung (2→ 1)

Bild 1. Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit auf einem akustischen Pfad in einer durchströmten Rohrleitung.

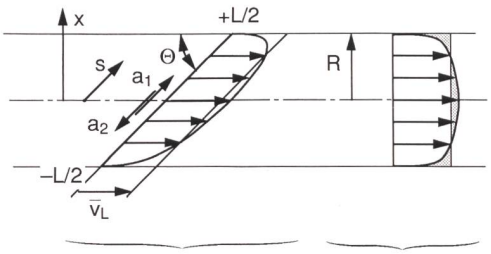
über die Vergleichsmessungen. Eine der wichtigsten verlorenen Informationen betrifft die Beobachtung, dass bei den akustischen Messungen im Vergleich mit den anderen Methoden die kleinste Streuung der Einzelmessungen festgestellt wurde.

Bild 4 zeigt die Differenz q_d der gemessenen Durchflusswerte für die verschiedenen Anlagen und die eingesetzten Messmethoden. Da in einzelnen Anlagen Vergleichsmessungen mit mehreren Methoden durchgeführt wurden, sind diese mehrfach aufgeführt.

Der relative Unterschied des gemessenen Durchflusses mit den verschiedenen Methoden bewegt sich in einem Band von ±3%. Vergleicht man nur das Band der akustischen Methode und Messflügelmessungen, so reduziert sich das Band auf ±0,5%. Die Druck-Zeitmethode (Originalmessung mit Quecksilbersäulen) und die Salz-Geschwindigkeitsmethode weisen die grössten Unterschiede zur akustischen Messung auf. Diese Methoden wiesen auch die grösste Streuung der Messpunkte während der Messungen auf und sind somit nur bedingt vertrauenerweckend.

Aus den hier aufgeführten Vergleichsmessungen können die im folgenden Abschnitt zusammengefassten Schlussfolgerungen gezogen werden. Darüber hinaus ergibt sich auch eine ganze Palette offener Fragen und Forderungen an zukünftige Vergleichsmessungen:

- Die vorhandenen Berichte sind ungenügend dokumentiert und lassen keine nachträgliche Analyse von möglichen Fehlerquellen bei den Messungen zu. Zukünftige Messungen sollten gemäss einheitlichen Richtlinien durchgeführt werden. Entsprechende Empfehlungen und ein Fragebogen werden von einer Arbeitsgruppe des IEC (International Electrotechnical Commission) vorbereitet.
- Der Einfluss von Krümmern und Verzweigungen auf die Geschwindigkeitsverteilung und deren Auswirkung auf die Messunsicherheit sind noch zu wenig systematisch untersucht.
- Messerfahrungen mit genauen Durchflussmessungen wurden vor allem in Kreisquerschnitten gesammelt. Für Rechteckquerschnitte besteht eine gewisse Unsicherheit bezüglich des Einflusses der Eckregionen. Messungen bei nichtparallelen Wänden wurden bisher, nach unserem Wissen, noch keine durchgeführt.
- Der Einfluss der Sensorgeometrie und des Sensoreinbaus auf die lokale Geschwindigkeitsverteilung und somit auf die Durchflussmessung wird als gering angenommen, was aber durch eine wissenschaftliche Studie bestätigt werden sollte.



$$\bar{v}_L = \frac{1}{L\cos\theta}\int_{s=-L/2}^{s=+L/2} v(s)\cos\theta\, ds = \frac{1}{2R}\int_{x=-R}^{x=+R} v(x)\, dx$$

Beispiel

Nach Nikuradse gilt für das turbulente Geschwindigkeitsprofil:

$$v(x) = v_{max}\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Mittelwert über die Strecke:

$$\bar{v}_L = \frac{1}{L\cos\theta}\int_{s=-L/2}^{s=+L/2} v(s)\cos\theta\, ds = \frac{1}{2R}\int_{x=-R}^{x=+R} v(x)\, dx = \frac{n}{n+1}\, v_{max}$$

für $n = 7$: $\bar{v}_L = 0.875\, v_{max}$

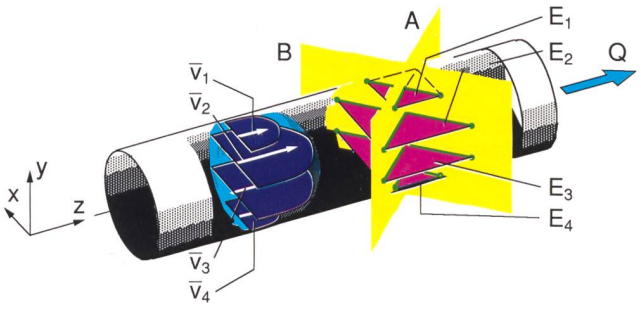
Mittelwertbildung über den ganzen durchströmten Kreisquerschnitt:

$$\bar{v} = \frac{1}{A}\int_0^A v(x, y)\, dA = v_{max}\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad \text{für } n = 7\text{: } \bar{v} = 0.817\, v_{max}$$

Das Verhältnis $\frac{\bar{v}_L}{\bar{v}} = k$ wird bei einkanaliger Messung in Kreisquerschnitten als Korrekturfaktor zur Durchflussmessung eingesetzt.

$$Q = k\,\bar{v}_L\, A = \frac{2n}{2n+1}\,\bar{v}_L\, A \qquad \text{für } n = 7\text{: } k = 0.933$$

Bild 2. Mittelwertbildung der Geschwindigkeit bei einem turbulenten Strömungsprofil nach *Nikuradse.*



$$Q = \int_y \left[\int_x v(x, y)\, dx\right] dy \qquad v(x, y) \text{ beschreibt das Geschwindigkeitsprofil}$$

$\int_x$ Integration durch akustische Messung –> $\bar{v}_i$

$\int_y$ Integration nach Gauss

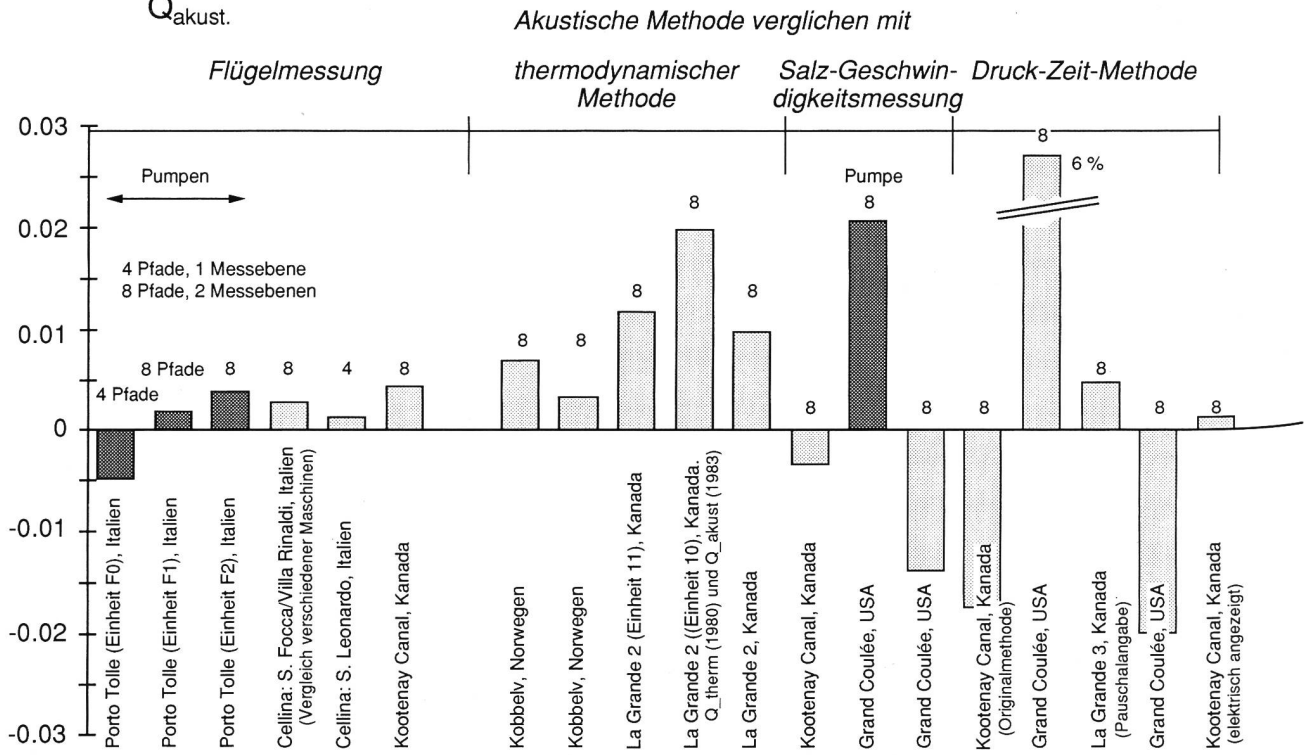
Für 4 Ebenen gilt $\int_y \bar{v}_i\, dy = \sum_{i=1}^{4} w_i \cdot \bar{v}_i$ $\qquad w_i$ Gewichtungsfaktor

$w_1 = w_4 = 0.173925$ und $w_2 = w_3 = 0.32807$ für die Ordinaten
$y_1 = -y_4 = 0.4306 \cdot D$ und $y_2 = -y_3 = 0.1687 \cdot D$ der Ebenen E_1 bis E_4

Bild 3. Durchflussmessung nach IEC (Code-Entwurf). Auf zwei sich schneidenden Ebenen (A, B) liefern die acht akustischen Messpfade die Geschwindigkeitsmittelwerte ($\bar{v}_1$ bis $\bar{v}_4$) auf vier parallelen Schnittebenen (E_1 bis E_4).

$$q_D = \frac{\overline{Q}_{Vergl.} - \overline{Q}_{akust.}}{\overline{Q}_{akust.}}$$

Bild 4. Durchflussmessungen in grossen Wasserkraftanlagen: Vergleich verschiedener Methoden mit der akustischen Methode.



Schlussfolgerungen

Die akustische Methode zur genauen Durchflussmessung in grossen Rohrleitungen weist heute gegenüber anderen Methoden in den meisten Fällen Vorteile auf. Vorteile der akustischen Methode gegenüber anderen Methoden zur Durchflussbestimmung sind:

- hohe Genauigkeit: Bei mehrkanaliger Ausführung des akustischen Messsystems sind Messgenauigkeiten von besser als ±1 % erreichbar.
- rasche Erfassung: Messung von Mittelwerten und von zeitlich veränderlichen Durchflüssen sind möglich.
- Primärmethode: Bei mehrkanaligen Messsystemen entfällt die Eichung der Messeinrichtung, da bei solchen Messungen Informationen über die Geschwindigkeitsverteilungen enthalten sind und die absolute Genauigkeit der Durchflussbestimmung rasch mit der Zunahme der Kanäle zunimmt.
- Linearität des Ausgangssignals mit dem Durchfluss über grosse Durchflussbereiche
- gute Wiederholbarkeit: Im Vergleich mit anderen Methoden hat sich die akustische Methode durch eine sehr geringe Streuung der Messresultate ausgezeichnet.
- vernachlässigbare Störung der Strömungsverhältnisse durch die Aufnehmer
- keine beweglichen Teile
- Grössen- und Kostenvorteile der akustischen Methode kommen vor allem bei grossen Rohrleitungen zum Tragen.
- Bei Sensoren, die von aussen durch Bohrungen an der Druckleitung angebracht sind, sind Wiederholungsmessungen zu einem späteren Zeitpunkt mit geringem Aufwand und ohne das Entleeren der Leitungen auch bei nicht festinstallierten Ultraschalleinrichtungen ohne weiteres möglich.

Aufgrund ihrer Vorteile wird die akustische Methode in mehrkanaliger Ausführung zur genauen Durchflussmessung auch in der Schweiz in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen. Um bei bereits bestehenden Anlagen die Kosten eines Betriebsausfalls senken zu können, sollte eine Installation des akustischen Messsystems während Revisionsarbeiten vorgenommen werden.

Eine erste festinstallierte Einrichtung mit acht akustischen Pfaden wurde im Frühjahr 1991 im Kraftwerk Lavey, Waadt, in Betrieb genommen. Ein weiteres Messsystem mit acht akustischen Pfaden wurde für das Kraftwerk Pradella-Martina, Engadin, bestellt. Mit dem geplanten NEFF-Projekt der Hochschulen wird eine weitere mobile Einrichtung zur Verfügung stehen, mit welcher eine Messkampagne in verschiedenen Kraftwerksanlagen der Schweiz durchgeführt werden wird.

Literatur

Brand, F.: Das Ultraschall-Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten. Voith Sonderdruck 2048, 1969.

Etter, S.: Bestimmung von Korrekturfaktoren für ein Ultraschalldurchfluss-Messverfahren in Rohrleitungen mit Störungen. Diss. TU Stuttgart, 1982.

Knapp, C.: Geschwindigkeits- und Mengenmessung strömender Flüssigkeiten mittels Ultraschall. ETH-Z Diss. 2795, 1958.

Taylor, J. W.: Acoustic Flowmeter Experience at B.C. Hydro, «Hydro Review», Vol. 7, No. 1, 1988, p. 46–51.

Acoustic Method of Discharge Measurement. IEC-Draft of International Code for Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines, 1987, p. 303– 317.

Adresse der Verfasser: Dr. *Thomas Staubli* und *Kurt Graf,* Institut für Energietechnik, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.