

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 87 (1995)  
**Heft:** 3-4

**Artikel:** Kalibration der akustischen Wassermengen-Messeinrichtung im Kraftwerk Pradella-Martina  
**Autor:** Mancal, Milof / Regli, Hans / Voser, Alexandre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940396>

### **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:** 22.02.2026

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

# Kalibration der akustischen Wassermengen-Messeinrichtung im Kraftwerk Pradella-Martina

Milof Mancal, Hans Regli, Alexandre Voser

## 1. Einleitung

Für das neue Kraftwerk Pradella-Martina der Engadiner Kraftwerke AG war eine zuverlässige Durchflussmessenrichtung gefordert. Zusätzlich sollte diese Messeinrichtung auch zur Ermittlung des Turbinenwirkungsgrades dienen. Eine thermodynamische Wirkungsgradmessung konnte wegen der zu niedrigen Nutzfallhöhe ( $H < 100$  m) nicht angewendet werden.

Eine Flügelmessung im Druckstollen hätte einen Betriebsunterbruch von ca. drei Wochen für den Ein- und Ausbau bedingt und damit beträchtlich höhere Kosten verursacht. Ausserdem wäre dieses System für die Betriebsmessungen und periodischen Nachkontrollen nicht mehr zur Verfügung gestanden.

Im Einverständnis mit dem Kunden und dem Turbinenlieferanten wurde eine akustische Durchflussmessenrichtung (Ultraschall) mit einer durch den Lieferanten (Accusonic/Witronic, 1009 Pully) garantierten Messgenauigkeit von  $\pm 1\%$  gewählt. Ein System also, das für die Bestimmung der Betriebswassermenge, des Turbinenwirkungsgrades sowie dessen periodischer Nachkontrolle geeignet ist.

Das grosse Ausgleichsbecken in Pradella mit einem Nutzinhalt von 260 000 m<sup>3</sup> ermöglichte eine genaue Überprüfung dieser Messeinrichtung (siehe Bild 1 und Diagramm 1).

## 2. Projektbeschreibung

Die Kraftwerkstufe Pradella-Martina ist das letzte Teilglied der Engadiner Kraftwerkskette und nutzt das Unterwasser der Zentrale Pradella von ca. 68 m<sup>3</sup>/s sowie ca. 20 m<sup>3</sup>/s der Innfassung in Pradella.

Über das Ausgleichsbecken und den 14,3 km langen Druckstollen wird dieses Nutzwasser zwei vertikalachsigen Maschinengruppen mit Francisturbinen von je 36 MW Nennleistung und einer Nennwassermenge von 44 m<sup>3</sup>/s in der Kavernenzentrale zugeführt.

In der Maschinenkaverne befinden sich die zwei Generatoren von je 42 MVA, die Blocktransformatoren und im Bereich des Montageplatzes die 110-kV-GIS-SF<sub>6</sub>-Schalt-

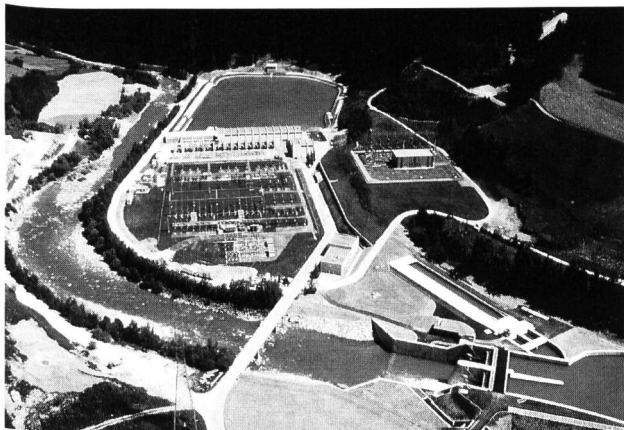


Bild 1. Ausgleichsbecken Martina.

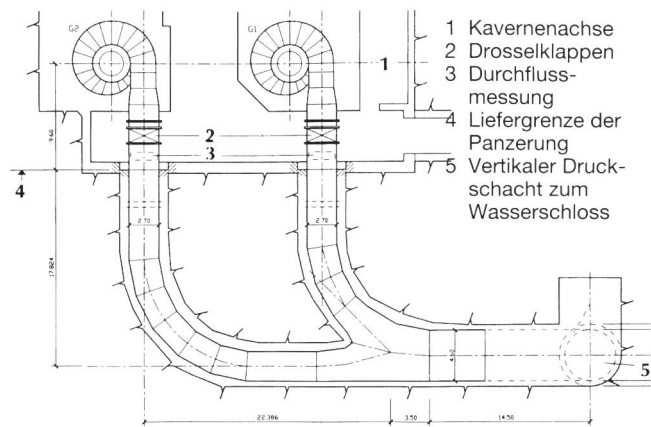


Bild 2. Verteilleitung und Turbinenspiralen Kraftwerk Pradella-Martina.

anlage. Über die 110-kV-Kabel und die 110-kV-Freileitung werden die jährlichen Energiemengen von ca. 290 Mio kWh in die Unterstation Pradella transportiert und dort ins 220/400-kV-Netz eingespeist.

## 3. Installation der akustischen Durchflussmessenrichtung

Da eine Einzelmessung jeder Gruppe gefordert war, kam aufgrund der geometrischen Verhältnisse (siehe Bild 2) als Einbaort nur die kurze, freiliegende Strecke zwischen dem Verteilleitungskrümmer und der Abschlussdrosselklappe vor der Turbine in Frage. Die üblicherweise geforderte gerade Beruhigungsstrecke (10-facher Durchmesser der Druckleitung) von der Messebene bis zum oberwasserseitigen Krümmer konnte nicht eingehalten werden. Unterwasserseitig bildeten die «Doppeldecker»-Drosselklappe sowie der Entnahmestutzen für das Kühlwasser (ca. 50 l/s) bei der Gruppe 1 weitere Strömungsstörquellen. Um trotz diesen strömungstechnisch ungünstigen Verhältnissen eine zuverlässige Messung zu gewährleisten, empfahl der Lieferant Accusonic eine Einrichtung mit 8 Messpfaden in 2 Ebenen. Für die bessere Erfassung der unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile infolge des stromaufwärts liegenden horizontalen Krümmers wurden die Messpfade in den vertikalen Ebenen angeordnet.

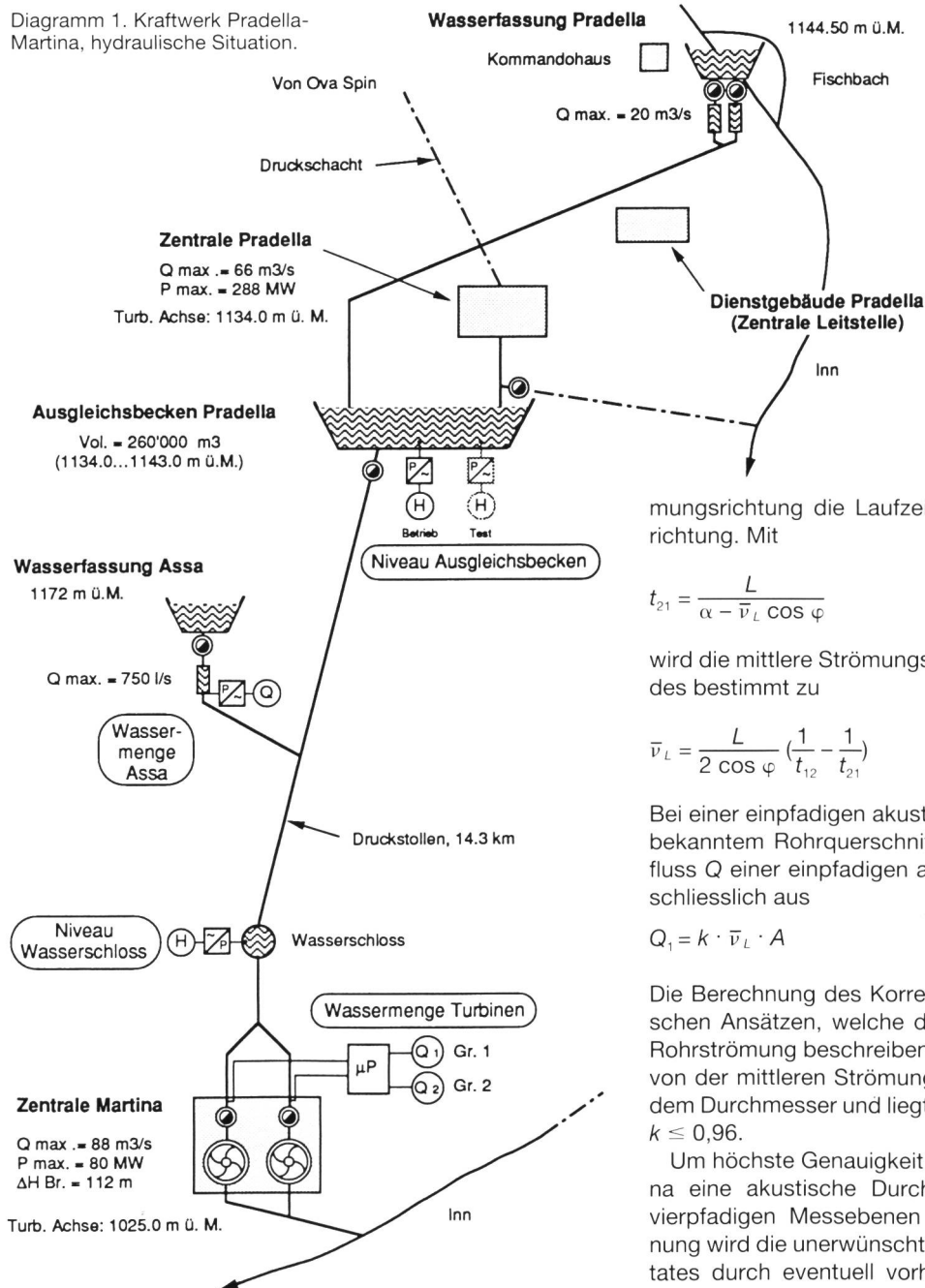
Die zu den 8 Pfaden gehörenden 16 Messsonden wurden auf dem Verteilleitungsrohr angeordnet und verschraubt (siehe Bild 3). Innen ragen die Sonden ca. 2 cm ins Messprofil. Die dadurch verursachte Störung des Strömungsprofils kann vernachlässigt werden. Die Einbaukonstruktion erlaubt den Sondenausbau auch unter Druck.

Die Auswertung erfolgt in einem Wandkasten mit programmierbarem Mikroprozessor, Displayfeld, Funktionstastatur, einem Analogausgang 4 bis 20 mA und einem Impulsgeber (1 Impuls pro 1000 m<sup>3</sup>) für die Fernwirkanlage.

## 4. Messprinzip

Die in Martina eingesetzte akustische Durchflussmessenrichtung basiert auf dem sogenannten Laufzeitverfahren. Dabei wird die Zeit gemessen, die ein bei Sonde 1 unter dem Pfadwinkel  $\varphi$  abgehendes akustisches Signal benötigt, um nach Sonde 2 zu gelangen. In ruhendem Fluid pflanzt sich ein solches Signal mit der Schallgeschwindigkeit  $a$  fort, bei strömendem Fluid hingegen ist der Schallgeschwindigkeit die Projektion der örtlichen Geschwindigkeit  $v(s) \cos \varphi$  längs der Strecke  $L$  überlagert.

Diagramm 1. Kraftwerk Pradella-Martina, hydraulische Situation.



Dies führt – je nach Strömungsrichtung – zu einem früheren oder späteren Eintreffen des Signals bei der Empfänger-sonde. Mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

$$\bar{v}_L = \frac{1}{L} \int_0^L v(s) ds$$

beträgt die Laufzeit  $t_{12}$  von 1 nach 2, dann

$$t_{12} = \frac{L}{\alpha + \bar{v}_L \cos \varphi}$$

Die Schallgeschwindigkeit im Wasser ist abhängig von der Temperatur und der Kompressibilität. Bei 0 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit  $a = 1403$  m/s. Temperaturabhängig verändert sie sich in diesem Bereich um etwa +3,5 m/s / K°.

Um die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit zu eliminieren, misst man zusätzlich zur Laufzeit  $t_{12}$  in Strö-

mungsrichtung die Laufzeit  $t_{21}$  entgegen der Strömungsrichtung. Mit

$$t_{21} = \frac{L}{\alpha - \bar{v}_L \cos \varphi}$$

wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit längs des Pfades bestimmt zu

$$\bar{v}_L = \frac{L}{2 \cos \varphi} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)$$

Bei einer einpfadigen akustischen Durchflussmessung und bekanntem Rohrquerschnitt  $A$  berechnet sich der Durchfluss  $Q$  einer einpfadigen akustischen Durchflussmessung schliesslich aus

$$Q_1 = k \cdot \bar{v}_L \cdot A$$

Die Berechnung des Korrekturfaktors  $k$  beruht auf empirischen Ansätzen, welche die voll ausgebildete, turbulente Rohrströmung beschreiben. Er ist unter anderem abhängig von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr und dem Durchmesser und liegt üblicherweise zwischen  $0,92 \leq k \leq 0,96$ .

Um höchste Genauigkeit zu gewährleisten, wird in Martina eine akustische Durchflussmeseinrichtung mit zwei vierpfadigen Messebenen eingesetzt. Mit dieser Anordnung wird die unerwünschte Beeinflussung des Messresultates durch eventuell vorhandene Querströmung verhindert.

Die Berechnung des Durchflusses durch die einzelnen Ebenen erfolgt durch numerische Integration nach Gauss

$$Q_A = R \sum_{i=1}^4 \omega_i \bar{v}_i L_i \sin \varphi \text{ und } Q_B = R \sum_{i=5}^8 \omega_i \bar{v}_i L_i \sin \varphi$$

mit

$R$  Rohrradius

$\omega_i$  Gewichtungsfaktor des  $i$ -ten Pfades

$\bar{v}_i$  mittlere Strömungsgeschwindigkeit längs des  $i$ -ten Pfades

$L_i$  Länge des  $i$ -ten Pfades

$\varphi$  Pfadwinkel

Man kann zeigen, dass der Querströmungsanteil durch Mittelwertbildung herausfällt; der Durchfluss  $Q_{2 \times 4}$  beträgt somit

$$Q_{2 \times 4} = \frac{Q_A + Q_B}{2}$$

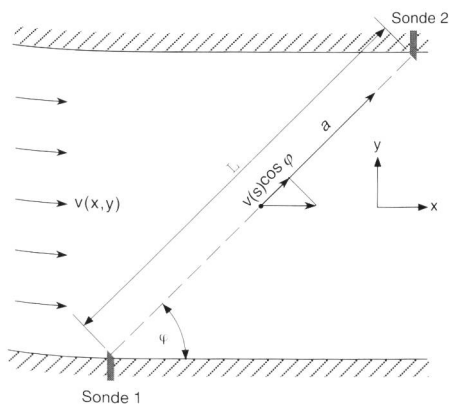


Diagramm 2. Prinzip der akustischen Durchflussmessung.

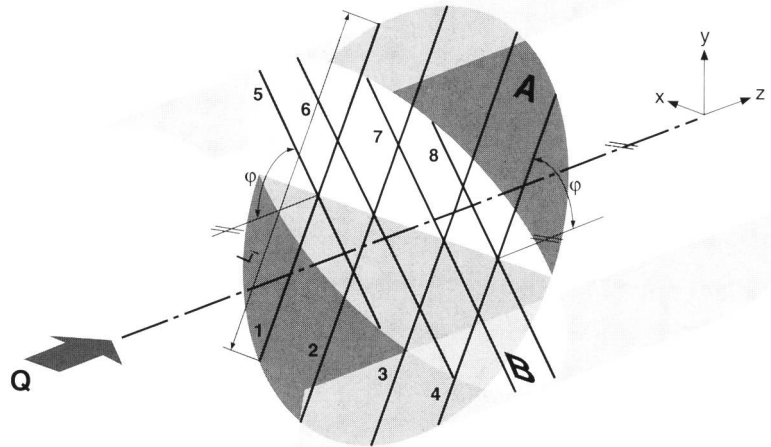


Diagramm 3. Akustische Durchflussmessung mit 8 Pfaden in 2 Ebenen.

## 5. Eichung der akustischen Messeinrichtung Martina

Zur Eichung der akustischen Messeinrichtung bot sich in diesem Projekt das Volumen des Ausgleichsbeckens in Pradella an. Zu diesem Zweck wurde das Beckenvolumen zwischen den Messknoten vor Ort geometrisch ausgemessen und in cm-Schritten der Höhenkoten tabelliert.

Für den Versuch stand ein Volumen von ca. 200 000 m<sup>3</sup> zur Verfügung.

Die Höhenkoten wurden mit der festeingebauten Druckmessdose (Hartmann & Braun Contrans P ASL 80 0 bis 2,5 bar) ermittelt und mit einer zweiten Messdose am gegenüberliegenden Punkt des Beckens kontrolliert. Der Anschluss eines PCs über eine RS-232-Schnittstelle an die Elektronik der Messsonde ermöglichte eine Ablesegenauigkeit im mm-Bereich.

Das Erreichen des Start- bzw. des Stop-Niveaus des Messvolumens im Ausgleichsbecken wurde mit einer Funktionstaste auf dem Zeitfolgemelder mit einer Auflösung von 1/100 Sekunde markiert.

Zusätzlich wurden noch die merklich kleineren Volumina in den kommunizierenden Anlageteilen, wie Zuleitungskanal, Druckstollen Fassung Assa und Wasserschloss Martina, addiert.

Sämtliche Zuleitungen zum Wassersystem wurden während der Versuche abgestellt oder umgeleitet.

Tabelle 1. Eichung der akustischen Messung Martina, Messresultate.

Versuch Nr.	Gr. 1	Gr. 2	Niveau Ausgleichsbecken		Zeit h:m:s	Volumen berechnet (Ausgleichsbecken + kommunizierende Anlageteile) m3	Volumen gemessen (akustische Messung) m3	Abweichung	
			Start	Stop				m3	%
1.2	50 %	0 %	1142.50	1135.50	2:32:02	197'501	199'556	2'055	1.040
1.4	100 %	0 %	1142.30	1135.30	1:21:37	195'388	197'215	1'827	0.935
1.6	0 %	100 %	1142.50	1135.50	1:21:32	197'107	197'656	549	0.279
1.8	0 %	50 %	1142.50	1135.50	2:29:05	197'253	197'917	664	0.336
1.9	50 %	50 %	1142.50	1135.50	1:16:53	197'348	198'410	1'062	0.538
1.11	100 %	100 %	1142.20	1135.00	0:38:43	198'483	199'160	677	0.341

Bei konstanter Turbinenöffnung wurde bei Halb- und Vollast im Einzel- und Parallelbetrieb der 2 Gruppen gemessen. Dies ermöglichte eine Kontrolle über den ganzen Messbereich der Durchflussmengen.

Die Resultate der akustischen Durchflussmessung sind in der Tabelle 1 und im Diagramm 4 festgehalten.

Die Abweichung der akustischen Messung in Martina zum gemessenen Volumen liegt zwischen +0,28 % und +1,04 %. Die grösseren Abweichungen bei der Gruppe 1 lassen sich durch die ungünstigeren Strömungsverhältnisse im Messprofil erklären (Anschlusskrümmen zu Verteilung, Entnahme Kühlwasser). Die recht genaue Ermittlung der grossen Versuchswassermenge, die lange Messdauer und die genaue Ablesemöglichkeit gestatten die Aussage, dass das berechnete Volumen des Beckens als «wahrscheinliche» Grösse betrachtet werden kann. Damit kann die akustische Messung auf diesen Wert hin kalibriert werden. Wie im folgenden Abschnitt Fehlerabschätzung ermittelt, kann dann bei dieser akustischen Messung mit einem Gesamtmessfehler von  $\leq \pm 0,6 \%$  gerechnet werden.

## 6. Fehlerrechnung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse aus der detaillierten Fehlerrechnung, welche von der ETH erstellt wurde, präsentiert. Die Fehlerrechnung, welche nach den Richtlinien der internationalen Norm IEC Nr. 41/1991 durchgeführt wurde, gliedert sich in drei Teile:

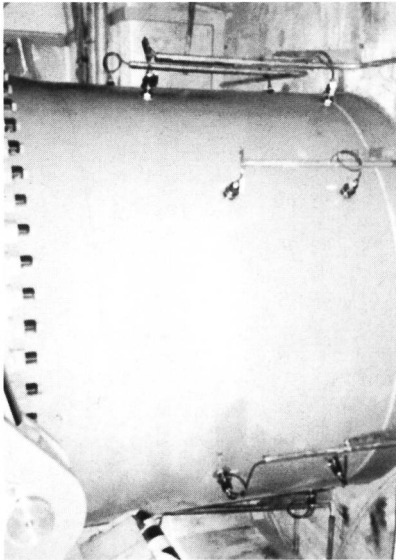


Bild 3.  
Messrohr mit Sonden.

- Fehlerrechnung für die Volumenmessung in Pradella
- Fehlerrechnung für die akustische Durchflussmessung in der Zentrale Martina
- Kalibration der akustischen Durchflussmessung und Berechnung des Gesamtmessfehlers.

#### Fehlerrechnung für die Volumenmessung in Pradella

Die Messung des Volumens  $V_{Vol}$  setzt sich zusammen aus der Messung des Beckenvolumens  $V_B$ , des Wasserschlösservolumens  $V_W$  und sonstiger kleiner Volumina  $V_S$  wie des Kühlwasserreservoirs und des Sickerwasserreservoirs. Beim Einzelbetrieb von Gruppe 2 in Martina muss zusätzlich das Kühlwasservolumen  $V_K$  mitberücksichtigt werden, welches im Einlauf von Gruppe 1 abgezweigt wird.

$$V_{Vol} = V_B + V_W + V_S (+V_K)$$

Gemäss der Methode der summierten Fehlerquadrate berechnet sich der Messfehler  $f_{Vol}$  der Volumenmessung aus

$$f_{Vol} = \sqrt{f_B^2 + f_W^2 + f_S^2 (+f_K^2)} \quad (1)$$

Die auf das Gesamtvolumen bezogenen Fehler  $f_W = 0,01\%$  der Wasserschlösservolumenmessung und  $f_K = 0,03\%$  der Kühlwassermessung sind klein im Vergleich zum Messfehler der Beckenvolumenmessung  $f_B$ . Deshalb soll hier nur dieser weiter analysiert werden. Der Messfehler  $f_S$  der kleinen Volumina kann vernachlässigt werden.

Die massgebenden Messfehler der Beckenvolumenmessung sind auf den Kennlinienfehler und den Hysteresefehler der Drucksonden von umgerechnet  $\pm 2,5\text{ cm}$  zurückzuführen, aber auch der vom Geometer abgeschätzte relative Vermessungsfehler des Beckenvolumens von  $0,3\%$  trägt wesentlich zum Messfehler bei. Eine eigene Abschätzung ergab einen Vermessungsfehler von lediglich  $0,12\%$ , um jedoch auf der «sicheren Seite» zu sein, wurde der grössere Wert verwendet.

Sehr viel kleiner sind hingegen der Ablesefehler der Drucksonden und Messfehler durch Schwankungen des Wasserspiegels.

Aus den obigen Einzelfehlern resultiert gemäss (1) der Gesamtmessfehler der Volumenmessung  $f_{Vol} = 0,5\%$ .

#### Fehlerrechnung für die akustische Durchflussmessung in der Zentrale Martina

Die Genauigkeit der akustischen Durchflussmessung wird durch folgende Einzelfehler beeinflusst:

- Integrationsfehler  $f_{Int}$  durch Anwendung des Gauss'schen Integrationsverfahrens
- Zusätzlicher Integrationsfehler durch das stark gestörte Geschwindigkeitsprofil  $f_{Krm}$
- Vermessungsfehler  $f_{Verm}$
- Timingfehler  $f_t$

Analog zum Messfehler der Volumenmessung berechnet sich der Messfehler der akustischen Durchflussmessung  $f_{ADM}$  aus

$$f_{ADM} = \sqrt{f_{Verm}^2 + f_{Int}^2 + f_{Krm}^2 + f_t^2} \quad (2)$$

#### Analyse der einzelnen Messfehler

Auch mit den acht eingesetzten akustischen Pfaden ist die Information über das Strömungsprofil noch unvollständig. Die Berechnung des Durchflusses mittels numerischer Integration ist daher mit einem Integrationsfehler behaftet. Aufgrund der schwierigen Anströmungsbedingungen in Martina wird dieser Fehler aufgeteilt in einen regulären Anteil  $f_{Int} \pm 0,2\%$ , welcher bei turbulenten Geschwindigkeitsprofilen und bei der Verwendung des Integrationsverfahrens nach Gauss (IEC Nr. 41) auftritt, und einen zusätzlichen Fehler durch die wegen der zweifach gekrümmten Anströmung stark gestörten Geschwindigkeitsverteilung, der mit  $f_{Krm} = 1\%$  beziffert werden muss.

Eine von der ETH im Herbst 1993 durchgeführte Kontrollvermessung mit einem 3D-Theodoliten-Vermessungssystem bestätigte die sorgfältig durchgeführte Montage der akustischen Aufnehmer, so dass der Vermessungsfehler lediglich  $f_{Verm} = \pm 0,15\%$  beträgt. Aufgrund der langen Messdauer und der ausgezeichneten Abstimmung zwischen akustischer und volumetrischer Durchflussmessung kann der Timingfehler vernachlässigt werden.

Mit (2) beträgt der Messfehler der akustischen Durchflussmessung schliesslich  $f_{ADM} = 1,03\%$ .

#### Kalibration der akustischen Durchflussmessung und Berechnung des Gesamtmessfehlers

Vor der Kalibration musste zunächst aus den Resultaten der akustischen und der volumetrischen Durchflussmessung der Erwartungswert des Durchflusses, also der wahrscheinlichste Wert, bestimmt werden. Statt – wie oft gebräuchlich – aus den beiden Messungen einen gewichteten Mittelwert zu berechnen, wurden hier aufgrund statistischer Überlegungen die Resultate der Volumenmessung als Erwartungswerte verwendet. Durch lineare Interpolation konnten entsprechend Diagramm 3 Kalibrationsgeraden für Gruppe 1 im Einzelbetrieb, Gruppe 2 im Einzelbetrieb und beide Gruppen zusammen berechnet werden.

Die kalibrierte akustische Durchflussmessung weist neben dem Messfehler der volumetrischen Durchflussmessung einen Interpolationsfehler  $f_{IpE} = \pm 0,05\%$  bei Einzelbetrieb von Gruppe 1 oder 2 respektive  $f_{IpD} = \pm 0,2\%$  bei Betrieb von beiden Gruppen zusammen auf; zusätzlich kommt bei den Abnahmemessungen wegen der nur 15-minütigen Messdauer ein zufälliger Messfehler  $f_{zuf}$  von  $\pm 0,25\%$  hinzu. Der Gesamtmessfehler der kalibrierten akustischen Durchflussmessung für den Einzelbetrieb wird somit

$$f_E = \sqrt{f_{Vol}^2 + f_{zuf}^2 + f_{IpE}^2} = \pm 0,56\%$$

Für den Betrieb von beiden Gruppen zusammen beträgt er

$$f_D = \sqrt{f_{Vol}^2 + f_{zuf}^2 + f_{IpD}^2} = \pm 0,59\%$$



## 7. Nacheichung der bestehenden akustischen Messung in Pradella

Die in der Zuleitung des Kraftwerks Pradella installierte akustische Messung (Krohne Typ UL 800 DL mit 2 Messpfaden in einer Ebene) ermöglichte beim Wiederfüllen des Beckens eine Kontrolle des geometrisch ermittelten Volumens des Ausgleichsbeckens. Gleichzeitig konnte damit auch eine Nacheichung dieser akustischen Messung durchgeführt werden. Diese Messeinrichtung in einer geraden, relativ ungestörten Zuleitung war anlässlich der thermodynamischen Wirkungsgradmessungen im März 1993 mit einer Gruppe in Pradella geeicht worden.

Bei der Messung in Pradella zeigt die sehr kleine Abweichung beim 1-Gruppen-Betrieb die Korrektheit der 1993 erfolgten Eichung mit der thermodynamischen Wirkungsgradmessung (siehe Diagramm 5). Da diese Messung nur über zwei Messpfade in einer Ebene erfolgt, können unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen über das Messprofil weniger genau ermittelt werden. Dies könnte die Erklärung für die  $\pm$ -Streuung bei unterschiedlichen Wassermengen sein. Die Genauigkeit von  $\pm 0,6\%$  kann aber als sehr gut bezeichnet werden.

## 8. Zulässigkeit der akustischen Messung für die Wirkungsgradbestimmung der Turbinen

Gemäss den internationalen Normen IEC Nr. 41/1991 sind für die Ermittlung der Turbinenwirkungsgrade sogenannte «absolute» Messmethoden für die Wassermengenmessung vorgeschrieben. Als solche gelten: Flügelmessung, Pitot-Rohre, «Gibson»-Methode (Druck-Zeit-Messung) und andere.

Die Ultraschallmessung wird nur als Option erwähnt (IEC Nr. 41 – Appendix J). Sie ist aber zulässig, falls ein Einverständnis zwischen Kunde/Ingenieur und Turbinenlieferant vorliegt.

Während dieses Messsystem in den USA und in Kanada bereits öfters für Wirkungsgradmessungen Anwendung findet, ist unseres Wissens im Kraftwerk Pradella-Martina die Ultraschallmessung zum ersten Mal in der Schweiz für diesen Zweck verwendet worden.

In den schweizerischen Regeln für hydraulische Maschinen, SEV 3055 aus dem Jahre 1974, findet die Ultraschallmessung noch keine Erwähnung. Empfohlen werden in dieser Norm:

	Wahrscheinliche Ungenauigkeit
– Flügelmessung	$\pm 1,0\%$ (Rohrleitung Durchmesser $\geq 1,5$ m)
– Überfallmessung	$\pm 1,5\%$
– Behältermessung	$\pm 0,3\%$

Die Eichmessung zeigte, dass die Ultraschallmessung eine geeignete Methode für die Wirkungsgradermittlung von Turbinen darstellt.

## 9. Zusammenfassung

Für die Messung der Turbinenwassermenge zu Betriebszwecken und für die Wirkungsgradermittlung wurde in der Zentrale Martina der EKW eine akustische Messeinrichtung installiert. Wegen der ungünstigen Strömungsverhältnisse am Einbauort wurde eine Messeinrichtung mit 8 Messpfaden in 2 Ebenen gewählt.

Die Kalibration erfolgte mit dem ausgemessenen Volumen des Ausgleichsbeckens in Pradella. Das grosse Beckenvolumen, die lange Messdauer und die genauen Ablesemöglichkeiten erlaubten eine recht genaue Bestimmung

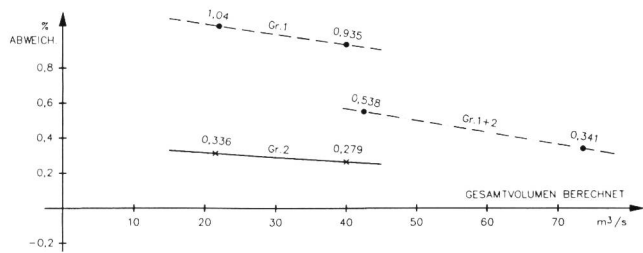


Diagramm 4. Eichung Durchflussmessung Martina.

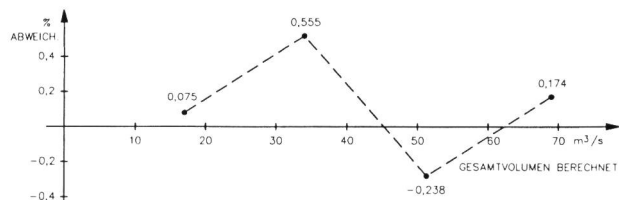


Diagramm 5. Eichung Durchflussmessung Pradella.

der «wahrscheinlichen» Wassermenge. Die Abweichungen zu dieser «wahrscheinlichen» Wassermenge lagen innerhalb der garantierten  $\pm 1\%$ .

Die genaue Versuchsmessung ermöglicht eine Kalibrierung der akustischen Messeinrichtung mit den «wahrscheinlichen» Werten. Wie die Fehlerabschätzung zeigt, verbleibt nach der Kalibrierung für die gesamte Messanordnung ein Gesamtfehler von ca.  $\pm 0,6\%$ . Dies ist genauer als die sonst meist verwendete Flügelmessung.

Dieser Versuch erbrachte den Beweis, dass sich eine mehrpfadige, zweiebenige akustische Messeinrichtung, auch bei ungünstigen Strömungsverhältnissen, für eine genaue Durchflussmessung eignet. Sie empfiehlt sich demzufolge sowohl für Turbinen-Wirkungsgradmessungen als auch für Betriebsmessungen und für die Bestimmung von Wasserzinsen usw. Die fest eingebaute Messeinrichtung erlaubt auch eine periodische Nachkontrolle des Turbinenwirkungsgrades auf einfache Art und Weise.

### Beteiligte Firmen

Versuchsleitung:	Elektrowatt Ingenieure + Berater AG, Zürich
Akustische Messeinrichtung:	Accusonic USA, vertreten durch Witronic GmbH, Pully
Betriebsführung und Messkampagne Ausgleichsbecken:	EKW Engadiner Kraftwerke AG, Zernez
Elektr. Leistungs- und Energiemessungen:	SEV Schweiz. Elektrotechn. Verein, Fehraltorf
Verifizierung akustische Messung:	ETH Zürich, Institut für Energietechnik
Geom. Ausmessung Ausgleichsbecken:	Straub AG, Ingenieurbüro, Chur

Wir danken allen Beteiligten für ihren vorbildlichen Einsatz, insbesondere dem Personal der Engadiner Kraftwerke AG für ihr Entgegenkommen bei der Vorbereitung und Durchführung der betriebseinschränkenden Versuche.

### Verfasser:

Milof Mancal, dipl. Masch.-Ing. (Sachbearbeitung), Elektrowatt Ingenieure + Berater AG, Bellerivestr. 36, CH-8034 Zürich.  
Hans Regli, dipl. El.-Ing. HTL (Versuchsleiter), Elektrowatt Ingenieure + Berater AG, Bellerivestr. 36, CH-8034 Zürich.  
Alexandre Voser, dipl. Ing. ETHZ, Institut für Energietechnik ETH Zürich (Eichung, Messüberwachung, Fehlerrechnung), CH-8092 Zürich.