

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 81 (1989)  
**Heft:** 11-12

**Artikel:** Hochgenaue Wasserstandsmessung mit Quarzresonatoren  
**Autor:** Vaterlaus, Hans-Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940528>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 24.04.2025

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

# Hochgenaue Wasserstandsmessung mit Quarzresonatoren

Hans-Peter Vaterlaus

## 1. Einführung

Bis vor wenigen Jahren wurden für die Druck- und Füllstandsmessung der höheren Genauigkeitsklasse (0,05 % vom Endwert und besser) fast ausschliesslich mechanische Systeme eingesetzt. Hauptmerkmale dieser feinmechanischen Messgeräte sind die Druck/Kraft-Wandlung, basierend auf der genauen Kenntnis des wirksamen Querschnitts, und der Massenvergleich mit genau bestimmbar Massen. Obwohl äusserst zuverlässig, sind Druckwaagen aufwendig in der Herstellung und bieten wenig bis gar keinen Bedienkomfort.

Die Quarztechnologie in Verbindung mit einer mikroprozessorgesteuerten Auswerteeinheit ist eine echte Alternative und eröffnet neue Perspektiven im Hinblick auf präzise Druck- und Füllstandsmessung im Labor wie auch unter schwierigen Umweltbedingungen. Im folgenden Beitrag werden Prinzipien der Druckmessung mittels Quarzresonatoren sowie eine mögliche Signalverarbeitung beschrieben. Am Beispiel einer Applikation des Geräts in der Wasser- und Energiewirtschaft werden die Vorteile der rechnergestützten Signalverarbeitung besonders deutlich erkennbar.

## 2. Druckaufnehmer

### 2.1 Quarz als digitales Sensorelement

Schwingquarze, die mit Elektroden bedampft sind, bestehen aus kristallinem Quarz  $\text{SiO}_2$ . Bei gleichzeitigem Einfluss eines elektrischen Feldes (Oszillator) sowie mechanischer Deformation (Kraft, Druck) wird die innere Energie des piezoelektrischen Quarzes verändert, was eine Änderung der Resonanzfrequenz des Schwingers zur Folge hat.

Die Frequenz eines Quarzschwingers wird durch die Elastizitätskoeffizienten, die Dichte, die Form und Geometrie des schwingenden Elements sowie durch den Schwingungsmodus bestimmt [1]. Zur Anwendung gelangt  $\alpha$ -Quarz mit einer Curie-Temperatur von  $573^\circ\text{C}$ . Charakterisiert ist  $\alpha$ -Quarz durch seine trigonale Kristallstruktur, was eine starke Anisotropie der physikalischen Eigenschaften nach sich zieht [2]. Je nach Kristallschnittwinkel können spezifische Quarzeigenschaften favorisiert werden.

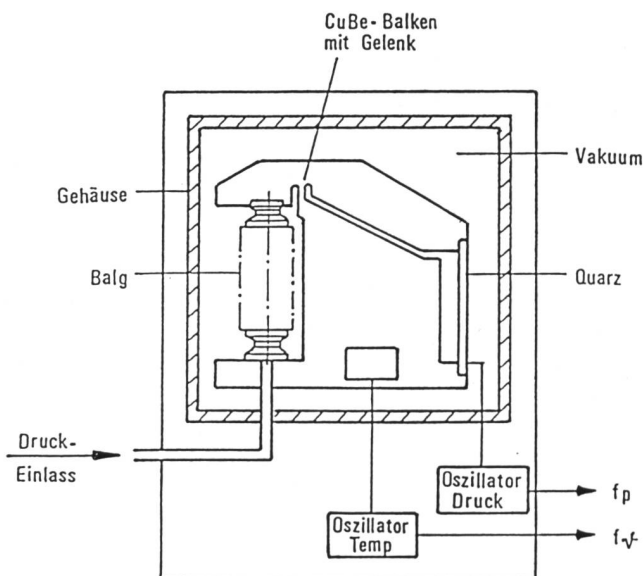


Bild 1. Aufbauprinzip des Quarzdruckaufnehmers.

Forschung und Entwicklung im Gebiet von Kraft- beziehungsweise Druckaufnehmern auf Quarzbasis konzentrierten sich in den letzten Jahren auf «Single-Beam-Resonatoren» wie auch auf Doppelstimmgabeln. Dies deshalb, weil der photolithographische Prozess in der Uhrenindustrie zur Herstellung von Stimmgabelquarzen eine bestens bekannte und beherrschbare Technologie geworden ist. Die Abhängigkeit der Frequenz  $f$  in Funktion axial einwirkender Kraft  $F$  für eine Schwinggabel wie auch für eine Doppelstimmgabel lässt sich in folgender Form angeben [3]:

$$f = a_0 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[ 1 + a_1 \left( \frac{L^2}{Ebd^3} \right) \cdot F + a_2 \left( \frac{L^2}{Ebd^3} \right)^2 \cdot F^2 + \dots \right] \quad (1)$$

$a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  sind Konstanten,  $L$  die Länge der Schwinggabel,  $d$  deren Dicke und  $b$  die Breite.  $\rho$  ist die Quarzdichte und  $E$  das Elastizitätsmodul, welches geometrie- und temperaturabhängig ist.

Für die Druck- respektive Füllstandsmessung muss eine Druck/Kraft-Umwandlung vorgenommen werden. Die konstruktive Lösung im vorliegenden Druckaufnehmer ist schematisch im Bild 1 dargestellt. Der zu messende Druck wird von einem praktisch hystereseffreien Metallbalg in eine Kraft umgesetzt. Diese Kraft wird via Hebelarm dem schwingenden Resonator zugeführt. Durch Kombination unterschiedlich dimensionierter Bälge wie auch der Geometrie des Quarzschwingers ist es möglich, die verschiedensten Druckmessbereiche von 0 bis 1 bar respektive 0 bis 35 bar abzudecken.

### 2.2 Signalverarbeitung

Jeder Druckaufnehmer erzeugt zwei Frequenz-Ausgangssignale, eines für den Druck und eines für die Temperatur. Bei der vorliegenden «Single beam»-Quarzgeometrie wird bei Druck  $p = 0$  eine Frequenz von etwa 50 kHz erzeugt [4]. Bei maximaler Druckbeaufschlagung ist eine Frequenzänderung  $\Delta f$  von typisch 4 kHz zu erwarten.

Das Temperatur-Frequenzsignal bei  $0^\circ\text{C}$  liegt in der Größenordnung von 3 kHz. Bei Temperaturänderung ergibt sich eine Frequenzänderung  $df/d\vartheta$  von typisch 13 Hz/K. Da es sich bei diesem Messgerät um ein Präzisionsinstrument der Genauigkeitsklasse 0,01 % handelt, müssen sowohl bei der Druck-Frequenzbeziehung wie auch bei der Temperatur-Frequenzbeziehung nichtlineare Terme höherer Ordnung berücksichtigt werden. Dies geschieht in sehr guter Näherung durch eine Polynom-Approximation von folgender Form:

$$P(T_p, T_\vartheta) = \sum_{i,j=0}^{i+j \leq 5} a_{ij} T_p^i T_\vartheta^j \quad (2)$$

Dabei ist  $P(T_p, T_\vartheta)$  der herrschende Druck bei einer bestimmten Temperatur  $\vartheta$ ,  $a_{ij}$  die Kalibrierkoeffizienten und  $T_p$

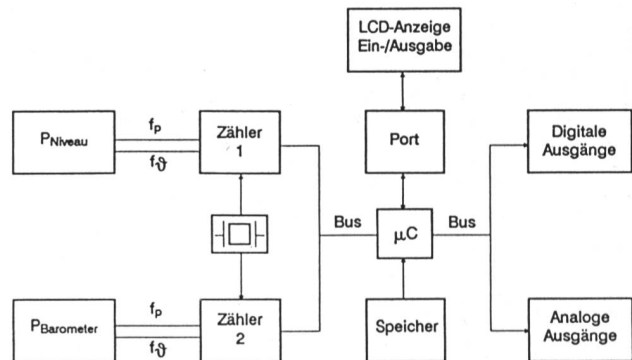


Bild 2. Blockschema der Füllstandsmesseinrichtung, bestehend aus Druckaufnehmer  $P_{\text{Niveau}}$  und  $P_{\text{Barometer}}$  sowie der zugehörigen intelligenten Auswerteeinheit.

und  $T_{\vartheta}$  die Periodendauer des Druck- und respektive Temperatursignals.

Die zu jedem Sensor gehörenden Kalibrierkoeffizienten sind in einem nichtflüchtigen Speicher abgelegt. Für die Druckberechnung wird ein Singlechip-Mikrocomputer 68HC11 verwendet, mit welchem bei einer Messrate von zwei Messungen pro Sekunde eine Auflösung von 10 ppm zu erreichen ist.

### 3. Intelligente Füllstandsmessung

In der Energiewirtschaft werden im gesamten Alpenraum seit Jahrzehnten präzise Messinstrumente zur genauen Erfassung des Wasserstandes von Stauseen und Wasserreservoirs eingesetzt. Verwendet wurden bis anhin vor allem elektromechanische Messgeräte der Genauigkeitsklasse 0,025%. Die wasserspezifischen Parameter wie Dichte und Kompressibilität wurden mit aufwendigen feinmechanischen Mitteln auf ein Kurvenlineal eingepägt.

Das nachfolgend beschriebene Füllstandsmessgerät bietet sowohl von der Messwerterfassung wie auch von der Messwertverarbeitung her eine innovative, komfortable und benutzerfreundliche Lösung des Problems der hochpräzisen Wasserstandsmessung.

In Bild 2 ist das Funktionsprinzip dargestellt. Die Messeinrichtung besteht aus einem Absolutdruckaufnehmer P-Niveau zur Messung des Drucks, ausgeübt durch die Wassersäule plus darüberliegenden Atmosphärendruck, sowie einem Druckaufnehmer zur Messung des herrschenden Barometerstandes. Die Zählung der jeweiligen Perioden  $T_p$  und  $T_{\vartheta}$  geschieht in Zähler 1 und 2. Diese werden in den Mikroprozessor eingelesen. Zusammen mit den sensorspezifischen Kalibrierkoeffizienten  $a_{ij}$  kann der Druck  $P$ , wie in Gleichung (2) dargestellt, berechnet werden. Im Mode H (Wasserstandsmessung) wird die Druckdifferenz  $\Delta P = P_{\text{Niveau}} - P_{\text{Barometer}}$  gebildet. Mit den über die Fronttastatur eingegebenen Parametern  $\rho$  (Wasserdichte),  $g$  (lokale Erdbeschleunigung) und  $\beta$  (Kompressibilität) wird der effektive Wasserstand ermittelt. Folgende digitale Ausgänge sind wahlweise abrufbar: BCD mit oder ohne Vorzeichen, Binär-code mit Vorzeichen und Graycode mit Vorzeichen. Analog steht ein 0/4- bis 20-mA-Signal zur Verfügung.

Dialoggeführte Bedienung ermöglicht die Parametrierung praktisch ohne eine schriftliche Betriebsanleitung. Eine zyklische Selbstüberwachung der Messung mit Störmeldung garantiert hohe Betriebssicherheit.

Vom praktischen Einsatz her gesehen, muss zwischen hydrostatischer und pneumatischer Wasserstandsmessung unterschieden werden. Die beiden Prinzipien sind in Kap. 3.1 und 3.2 kurz dargestellt. Die für den korrekten Einsatz benötigten Parameter sind in Kap. 3.3 beschrieben.

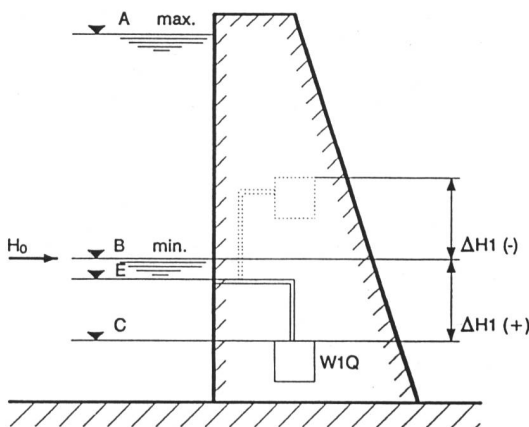


Bild 3. Prinzip der hydrostatischen Wasserstandsmessung.

### 3.1 Hydrostatische Wasserstandsmessung

Die hydrostatische Wasserstandsmessung kommt überall dort zur Anwendung, wo die baulichen Gegebenheiten es erlauben, den Niveau-Druckaufnehmer direkt mit Wasser zu beaufschlagen.

Prinzipiell wird der Druckaufnehmer in einer Staumauer gemäss Bild 3 angeordnet. A und B bedeuten hierbei maximalen respektive minimalen Wasserstand. E ist die Kote der eigentlichen Druckentnahme, und C steht für die Aufstellkote des Druckaufnehmers.

Nimmt man die Kote C zum Bezugspunkt, wirkt auf den Niveausensor der Druck  $P_{\text{Niveau}}$  mit

$$P_{\text{Niveau}} = p_w(H_w) + P_B - \rho_L \cdot g \cdot H_w \quad (3)$$

Es bedeuten hierbei:  $H_w$  der zu messende Wasserstand und  $p_w$  der durch die Wassersäule hervorgerufene Druck.

$P_B - \rho_L \cdot g \cdot H_w$  stellt den auf der Wasseroberfläche herrschenden Luftdruck dar.

$\rho_L$  bedeutet die Dichte der Atmosphärenluft und  $g$  die lokale Erdbeschleunigung.

Mit dem Barometer-Druckaufnehmer  $P_{\text{Barometer}}$  wird der Luftdruck bei Kote C gemessen. Die am Instrument gemessene Druckdifferenz  $\Delta P$  setzt sich zusammen aus

$$\Delta P = P_{\text{Niveau}} - P_{\text{Barometer}} = p_w(H_w) - \rho_L \cdot g \cdot H_w \quad (4)$$

$$\text{Mit } p_w(H_w) = \int_0^{H_w} \rho(h) \cdot g \cdot dh,$$

$$\text{wobei } \rho(h) = \rho(0) \cdot e^{-\beta \cdot g \cdot \rho(0) \cdot h}$$

die Dichte der Wassersäule in Funktion deren Höhe bedeutet, das heisst, die Kompressibilität  $\beta$  des Wassers berücksichtigt, kann Gleichung (4), nach  $H_w$  aufgelöst, in folgender Form dargestellt werden:

$$H_w = \frac{\Delta P}{g(\rho_w - \rho_L)} - \frac{\beta \Delta P^2}{2g(\rho_w - \rho_L)} \quad (5)$$

### 3.2 Pneumatische Wasserstandsmessung

Das pneumatische Messprinzip kommt dann zur Anwendung, wenn der Druckaufnehmer nicht direkt mit dem Messmedium beaufschlagt werden kann. Die pneumatische Messung erfasst den Druck der Flüssigkeitssäule über einer in der Flüssigkeit liegenden Rohrmündung. Dazu wird in der Luftleitung ständig ein schwacher Luftstrom aufrechterhalten, welcher an der Mündung ausperlt (Bild 4).

Der Druck in der Luftleitung steht im Gleichgewicht mit dem Druck der Flüssigkeitssäule und kann somit im Messgerät als Wasserstand H ausgegeben werden, unter Berücksichtigung der Dichte  $\rho_w$  und der Kompressibilität  $\beta$  der Flüssigkeit, der Dichte  $\rho_L$  der Atmosphärenluft sowie der lokalen

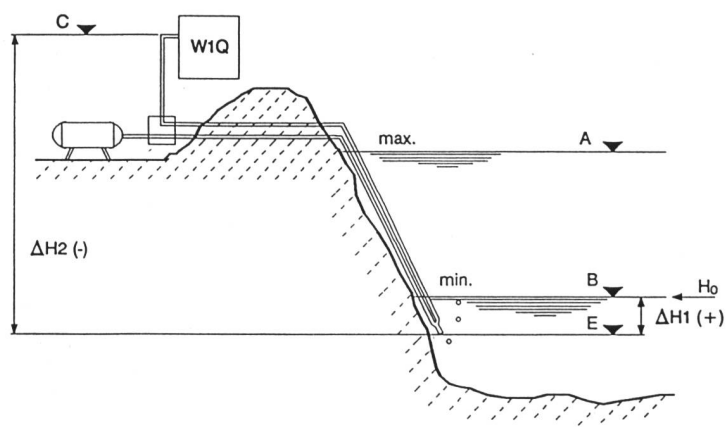


Bild 4. Prinzip der pneumatischen Wasserstandsmessung.



Bild 5. Füllstandsmessung eines Stausees mit dem Präzisionsdruckmessgerät W1Q.

Erdbeschleunigung  $g$ . Der Formalismus, der zur korrekten Wasserstandsmessung führt, ist gegeben durch:

$$H = \left[ \frac{\Delta p}{g \cdot \rho_w \left[ 1 - \rho_0 g \frac{T_0}{T} \left( \frac{P_B / \rho_w \cdot g + \Delta H_2}{P_0} \right) \right]} - \frac{\beta \cdot \Delta p^2}{2g (\rho_w - \rho_L)} \right] \quad (6)$$

$\Delta p$  bedeutet die Druckdifferenz  $P_{\text{Niveau}} - P_{\text{Barometer}}$  und  $\rho_w$  die Dichte des Wassers. Die Dichte der Atmosphärenluft wird ausgedrückt durch  $\rho_L = \rho_0 \cdot T_0/T \cdot P_B/P_0$ , wobei  $\rho_0$  die Dichte und  $P_0$  der Druck der Normatmosphäre bedeuten.  $T_0/T$  ist das Temperaturverhältnis des Erstarungspunktes des Wassers zur Temperatur der Atmosphärenluft,  $P_B$  ist der gemessene Atmosphärendruck.

Im Gegensatz zur hydrostatischen Anwendung muss dem Eigengewicht der Luftsäule durch Berücksichtigung der Höhe  $\Delta H_2$  (Bild 4) Rechnung getragen werden.

### 3.3 Konkrete Anwendung

Trotz den vielfältigen Möglichkeiten der dialoggeführten Eingabe vor Ort, müssen bei der Projektierung einer Anlage gewisse Randbedingungen vor der Auslieferung bekannt sein, um einen optimalen Einsatz des Präzisionsdruckmessgeräts garantieren zu können. Betrachtet man die Bilder 3 und 4, ist es zwingend nötig, folgende Angaben vom Kunden zu erhalten:

Messbereich:	A - B (m)
Messbereichanfang:	$H_0$ (m ü.M.)
Vordruck hydrostatisch:	$\Delta H_1 = B - C$
Vordruck pneumatisch:	$\Delta H_1 = B - E$
Höhendifferenz (nur pneumatisch):	$\Delta H_2 = C - E$
Dichte oder Temperatur des Wassers	
lokales $g$ oder geographische Breite und Kote des Einsatzortes.	

Ist die Dichte des Wassers nicht bekannt, genügt die Angabe einer mittleren Wassertemperatur. Im Werk kann dann mittels Tabellen die zu einer Temperatur gehörende Dichte bestimmt werden. Eine Neu-Parametrierung der Dichte ist jedoch, ohne Unterbruch der Messung, auch jederzeit vor Ort möglich.

Der Normwert der Erdbeschleunigung ist  $9,80665 \text{ m/s}^2$ . Ist das lokale  $g$  am Einsatzort des Messgeräts nicht bekannt, wird die Erdbeschleunigung im Werk aufgrund der Angaben der geographischen Breite sowie der Höhe über Meer berechnet.

#### Literatur

[1] Cady, W. G.: Piezoelectricity, Mc Graw-Holl Book Company Inc., New York, London (1946).

[2] Tichy, J., Gautschi, G.: Piezoelektrische Messtechnik Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1980).

[3] Albert, W. C.: Force sensing using quartz crystal flexure resonators, Proceedings 38th annual frequency control symposium, The Electronic Industries Association, Washington D.C. (1984), S. 233-239.

[4] Chovel, J., Migeon, A., Torregrosa, M.: Differenzdruckgeber, Offenlegungsschrift DE 3226441 A1 (1983).

Adresse des Verfassers: Dr. Hans-Peter Vaterlaus, Rittmeyer AG, Abteilung Entwicklung Messtechnik, Grienbachstrasse CH-6302 Zug.

## Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

### 78. ordentliche Hauptversammlung

Im Vortragssaal des Parkhotels Flims-Waldhaus finden sich am Donnerstag, 21. September, die zahlreichen Teilnehmer zur Hauptversammlung ein. Diese wird durch den Festvortrag von Dr. Ulrich Büchi, Benglen, eröffnet. Er spricht zum Thema

### Mehire im Kanton Graubünden

*Die prähistorischen Funde von Steinsetzungen im Vorderrheintal lassen sich zeitlich der jüngeren Steinzeit, der Bronzezeit und der Eisenzeit zuordnen.*

In der malerischen Landschaft zwischen Trin und Trun dominieren vor allem Funde aus der Bronzezeit (1800 bis 800 v. Chr.). In dieser Epoche unterschied sich die Talschaft morphologisch kaum von ihrem heutigen Aussehen. Klimatisch jedoch bestand ein wesentlicher Unterschied, indem das Jahresmittel der Temperatur deutlich angehoben war; entsprechend lag die obere Waldgrenze gut 200 m höher und die Winter waren milder und kürzer als heute. Kein Wunder, dass die weiten Talfluren am Vorderrhein und die sonnigen Hangterrassen eine für die damalige Zeit beachtliche Besiedlung aufwiesen. Im Vorderrheintal sind bis heute nachstehende Siedlungsstellen bekannt geworden oder werden aufgrund von Funden vermutet: Crap S. Barcazi/Trin, Belmont/Flims, Schiedberg/Sagogn, Kirchlisen/Sevgein, Muota/Falera, Frundsberg/Ruschein, Fryberg/Siat, Jörgenberg/Vuorz, Crep Ault/Trun, Chiltgeras/Trun, Darvella/Trun, und im Nebental Lumnezia/Vals wurden die Siedlungen Pleif/Vella, Sogn Luregn/Surcasti, Crest Aulta/Surin-Lumbrein und Vals bekannt. Im weiteren sprechen die bronzezeitlichen Begräbnisstätten an der Strasse von Laax nach Salums, auf dem Frundsberg/Ruschein und Cresta Petschna/Surin-Lumbrein sowie viele Streufunde eine deutliche Sprache. Im Vorderrheintal treten zudem an verschiedenen Orten kupferführende Schichten und Gänge auf, die das Rohmaterial für die Herstellung der Bronze lieferten (Bronze = etwa 95% Kupfer, etwa 5% Zinn).

### Handelsbeziehungen über ganz Europa

In der Bronzezeit bestanden bereits ausgedehnte Handelsbeziehungen über ganz Europa und zu den asiatischen und nordafrikanischen Mittelmeerküsten. Das für die Herstellung von Bronze notwendige Zinn wurde aus Südeuropa, der Bretagne und der Iberischen Halbinsel bezogen. Von der Ostsee gelangte der Bernstein und vom Mittelmeer Muschel- und Schneckenschalenschmuck in unsere Alpentäler. Auch Goldschmiedearbeiten mykenischer Provenienz wurden im Alpengebiet gefunden.