

Ein Überblick zu hydrostatischen Messsystemen

An overview of the hydrostatic measurement method

Michael Möser

Für die Bestimmung hochgenauer relativer Höhenänderungen an und in Bauwerken werden seit langem hydrostatische stationäre Messsysteme eingesetzt. Diesen Systemen liegt das physikalische Prinzip der Schlauchwaage und als Messverfahren das hydrostatische Nivellement zugrunde. Im Rahmen der Kooperation mit dem DESY Hamburg hat *Willfried Schwarz* einen maßgeblichen Beitrag zum Einsatz eines Ultraschallsensors in einem hydrostatischen Messsystem geleistet. In diesem Beitrag wird ein Überblick der Messprinzipien gegeben und es werden Beispiele für automatisierte Verfahren beim Monitoring aufgezeigt.

Schlüsselwörter: Hydrostatisches Nivellement, Schlauchwaage, Druckmesssystem

For the determination of highly accurate relative height changes in structures and hydrostatic stationary measuring systems are used for a long time. These systems are based on the physical principle of the hose water level and as the measurement method, the hydrostatic leveling. Within the framework of cooperation with DESY Hamburg *Willfried Schwarz* has made a significant contribution to the use of an ultrasonic sensor in a hydrostatic measurement system. In this paper an overview of the principles of measurement is given and there are examples of automated procedures are drawn for monitoring.

Keywords: Hydrostatic levelling, tube level, pressure measuring system

1 EINLEITUNG

Zur Durchführung von präzisen, permanenten Setzungsmessungen an Ingenieurbauwerken und dabei insbesondere an schwer zugänglichen Punkten, z. B. im Steinschüttdamm eines Hochwasserrückhaltebeckens, an Bauteilen in Gebäuden oder an Widerlagern von Brücken, haben sich hydrostatische Messsysteme bewährt. Im Unterschied zum geometrischen Nivellement werden bei hydrostatischen Messverfahren (auch hydrostatisches Nivellement) ausschließlich relative Höhenunterschiede bestimmt – der Bezug zu einem Höhensystem ist meist nicht erforderlich.

Diese Verfahren zur Ermittlung relativer Höhenunterschiede mit einer Präzision bis zu Hundertstel Millimeter kommen überall dort zum Einsatz, wo andere geodätische Messsysteme aufgrund von Luftturbulenzen, Refraktionen, Schwingungen und hoher Temperaturunterschiede einer Beeinflussung unterliegen, die mittels Korrekturen nicht kompensiert werden kann. Dazu gehören u.a. Messungen

- zum Nachweis von Bergschäden und Gebirgsbewegungen,
- zur geotechnischen Überwachung von Tunnelbauten,
- zum Feststellen von statischen Fundamentsetzungen und von Setzungen, die durch dynamische Beanspruchung hervorgerufen worden sind,
- zur Bestimmung von Veränderungen in einer Staumauer an Talsperren,
- zur Beanspruchung von Brücken durch Verkehrsbelastung,
- zur Überwachung der gegenseitigen Höhenlage von Maschinenteilen, z. B. die Grundplatte eines Turbinentisches und
- zur Neigungskontrolle (Schiefstellung) hoher Bauwerke.

Bei diesen Anwendungen besteht die vermessungstechnische Herausforderung, geeignete Sensoren mit einem entsprechend großen Messbereich, einer ausgezeichneten

ten Langzeitstabilität und einer einfachen Handhabung bei der Installation einzusetzen /Schwarz 2002a/.

2 MESSPRINZIP

An jedem Punkt einer freien, ungestörten Flüssigkeitsoberfläche ist die Schwerkirkung - das Schwerepotential - gleich groß. Das gilt auch dann, wenn zwei Gefäße über Röhren miteinander verbunden sind (Abb. 1). Dieser als "Prinzip der kommunizierenden Röhren" bekannte Effekt bildet damit die Grundlage aller hydrostatischen Messsysteme. Mit einem solchen Röhrensystem lässt sich also eine Referenzhöhe auch ohne Sichtverbindung an andere Orte übertragen. Als Füllflüssigkeit hat sich (destilliertes) Wasser ggf. mit chemischen Zusätzen gegen eine Algenbildung, bewährt. Im Strahlungsbereich von Kernkraftwerken wird Silikonöl verwendet /Schwarz 1995/. Für den Langzeiteinsatz gibt es Erfahrungen mit Wasser und einer Sperrschicht aus Paraffinöl sowie mit entgastem Leitungswasser /Hermann, Fuhrland 2006/.

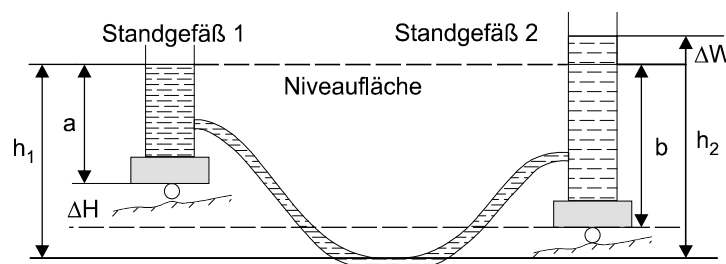


Abb. 1 | Prinzip der kommunizierenden Röhren /Löffler 2002/

Für die Erfassung der Flüssigkeitsspiegel gibt es folgende Möglichkeiten /Schwarz 2002b/:

- manuelle Ablesung an Skalen der Standgefäße (Abb. 1),
- mechanische Abtastung mit einer Messspitze /Thierbach 1979/,
- schwimmergesteuerte Wegaufnehmer /Busch, Fitzen 1977/,
- interferometrische Abtastung,
- berührungslose Abtastung mit kapazitiven Sensoren beim High Precision Levelling System /Löffler 1992/,
- Abstandsmessung mit Ultraschall /Schwarz 2002a/,
- Ermittlung des Füllstandes über Wägung,
- Einmessung über Drucksensoren /Meier, Ingensand 1996/.

Als Ausgangspunkt für die physikalische Betrachtung gilt die gekürzte Bernoulli-Gleichung, die die stationäre, nichtturbulente Strömung in Flüssigkeiten und Gasen beschreibt. Im statischen Gleichgewicht wird zwischen den zwei verbundenen Gefäßen die Fließgeschwindigkeit Null und es gilt:

$$p_1 + \rho_1 \cdot g_1 \cdot h_1 = p_2 + \rho_2 \cdot g_2 \cdot h_2 \quad (1)$$

mit ρ Dichte [$\text{kg} \cdot \text{dm}^3$]
 p Druck [mbar]
 g Schwerebeschleunigung [ms^{-2}]
 h Wasserspiegelhöhe [mm]

Werden nun die beiden Gefäße in vertikaler Richtung gegeneinander verschoben, so kann man den Verschiebungsbetrag aus der relativen Verschiebung der Flüssigkeitsspiegel (h_1, h_2) bestimmen. Die Änderung der Füllstandshöhe ist eine Relativmessung zwischen zwei oder mehreren Punkten, je nach Aufbau des Systems.

Die Unsicherheiten des Verfahrens, nach /Scheel 1958/ systematische Fehler, können aus Gleichung 1 für beide Gefäße abgeleitet werden. Dazu gehören Unterschiede in der Schwerebeschleunigung, der Temperatur, der Dichte und dem Luftdruck, die zu einem Niveauunterschied führen. Bei Messpunktabständen von ca. 30 m ist davon auszugehen, dass die Schwerebeschleunigung gleich ist. Luftdruckunterschiede können durch einen Verbindungsschlauch ausgeglichen werden. Temperaturdifferenzen führen zu Dichteunterschieden und damit zu einer Verfälschung von Δh . Ändert sich z. B. bei 20°C die Temperatur um 1 K, so wird sich der Wasserspiegel einer 1 m Wassersäule um 0,18 mm ändern. Daher ist in jedem Fall eine Korrektur wegen Temperaturunterschied zu berechnen /Hennecke, Werner 1982/. Bei einer horizontalen Schlauchverlegung wird die Korrektur minimiert (nahe Null). Bei einem geschlossenen System, wie es im folgenden Kapitel beschrieben wird, wird die Präzision der Bestimmung der Höhenunterschiede maßgeblich von der Temperaturmessung bestimmt.

3 MESSSYSTEME

Die Unterscheidung der Messsysteme orientiert sich daran, wie die Pegeldifferenz zwischen den beiden Gefäßen messtechnisch nach den Methoden in Kap. 2 erfasst wird. Bei den Schlauchwaagen werden die sich ausgleichenden Flüssigkeitshöhen statisch gemessen, während bei den Druckmesssystemen die resultierende Druckkraft einer Flüssigkeitssäule auf eine Membran erfasst wird. Der Pegel wird dabei selbst bewegt, d. h. er ist dynamisch. Folgt man der Entwicklung und berücksichtigt, dass es sich bei Druckmessungen um eine besondere Art der Füllstandsmessung handelt, so kann man die Druckmesssysteme unter der Obermenge der hydrostatischen Messsysteme sehen. Genauer betrachtet bilden sie jedoch eine eigene Gruppe, die als hydrodynamische Messsysteme bezeichnet wird, da die Flüssigkeitsoberfläche bewegt wird /Möser 2012 /.

Die bekanntesten hydrostatischen Sensoren sind die klassischen Schlauchwaagen, deren Bau und Prinzip mit der Präzisionsschlauchwaage nach Meißer von der Freiburger Präzisionsmechanik Holding GmbH realisiert wird.



Abb. 2 | Schlauchwaage mit Indikator

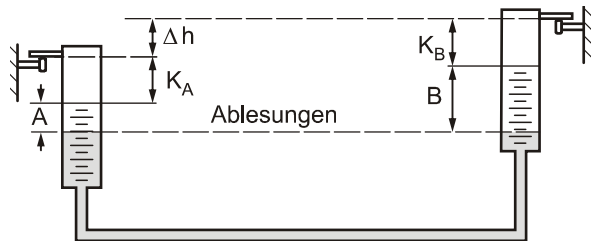


Abb. 3 | Prinzip des hydrostatischen Nivellements mit einem Paar Schlauchwaagen

Nach *Abb. 3* ergibt sich der Höhenunterschied

$$\Delta h = B + K_B - (A + K_A), \quad (2)$$

wobei K_A und K_B die Nullpunktkonstanten darstellen, die bei der zweiten Messung nach Umhängen der Schlauchwaagen eliminiert werden. Luftblasen im Flüssigkeitssystem sind auszutreiben. Der Gang der Messspindeln ist regelmäßig zu prüfen. Meniskusfehler (Kapillarität) bleiben ohne Wirkung. Die Tastspitze wird manuell aufgesetzt, die Oberfläche visuell oder mittels Indikator (LED-Anzeige) erfasst (*Abb. 2*). Die Teilung der Mikrometertrommel beträgt 0,01 mm bei einer Wiederholgenauigkeit von $3\mu\text{m}$, so dass dieser Wert für einen geübten Beobachter auch als Messunsicherheit gelten kann.

Für das hydrostatische Nivellement mit Schlauchwaage bestehen also Einschränkungen im Punktabstand (max. 50 m), in der notwendigen Temperaturkorrektur und der mechanischen subjektiven Abtastung der Wasseroberfläche. Um größere Längen zu realisieren und Temperatureffekte zu minimieren, wurden von /Albert, Schwarz 2004/ Untersuchungen zur freien Wasseroberfläche durchgeführt. Hierbei wird ein näherungsweise horizontal verlegtes Rohr ungefähr bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, so dass keine vertikalen Wassersäulen entstehen und der Druckausgleich innerhalb des Rohres erfolgen kann. Bei dieser Höhenbestimmung bildet die freie Wasseroberfläche als Niveaufläche die Referenz.

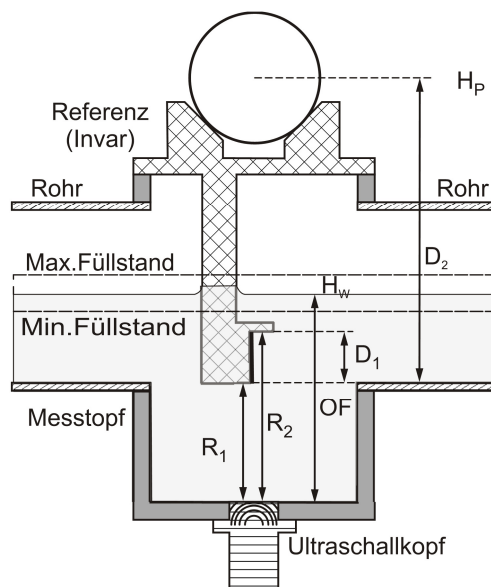


Abb. 4 | Aufbau des Messtopfes

Die Wasseroberfläche wird berührungslos mit einem Ultraschallsensor nach dem Laufzeitverfahren eingemessen. In *Abb. 4* bedeuten OF der gemessene Abstand zur Wasseroberfläche, $D_{1,2}$ die kalibrierten Abstände und $R_{1,2}$ die gemessenen Abstände zu den Referenzpunkten, woraus sich die Höhe H_p des Punktes über der Bezugshöhe

he H_W ableiten lässt. Dieses hydrostatische Messsystem wurde für die höhenmäßige Ausrichtung eines Linearbeschleunigers konzipiert, wobei über eine Länge von 600 m eine Nachbarschaftsgenauigkeit von kleiner 0,2 mm gefordert wurde /Schwarz 2002/.

Bei Überlaufsystemen sind die Messzylinder nicht gleichartig. Das Messsystem wird von nur einem Zylinder aus befüllt. Der zweite Messzylinder hat eine Überlaufeinrichtung. Der Vorteil der Überlaufsysteme liegt darin, dass Höhendifferenzen zwischen Punkten gemessen werden können, auch wenn sich einer (bei Vielstellensystemen auch mehrere) an unzugänglichen Orten (im Steinschüttdamm) befindet. Das Messsystem wird im Abstand von mehreren Minuten solange mit Wasser aufgefüllt, bis sich der Wasserstand genau in Höhe der Überlaufkante des Gefäßes im Innern des Damms eingestellt hat

Bei einer beweglichen Überlaufschlauchwaage wird von einer Messkammer an der luftseitigen Außenböschung mit einem Seilzug ein Messkopf, das Überlaufgefäß, zu beliebig vielen Messpunkten im Rohr gezogen. Vom Prinzip her ähnlich ist das Setzungsmessgerät von Glözl Gesellschaft Baumesstechnik mbH, bei dem der Höhenunterschied zwischen dem Referenzpunkt und einer gezogenen Sonde über einen Differenzdruckaufnehmer gemessen wird

Bei Wägesystemen wird der Flüssigkeitsfüllstand in den Messgefäßen über Wägung ermittelt. Beide Messbehälter sind auf je eine, als Biegebalken ausgeführte Kraftmessdose angebracht. Dazu wird das Gewicht des gesamten Messgefäßes bestimmt. Wägesysteme unterliegen nicht den Fehlereinflüssen von Menisken und Kapillarwirkung /Möser 2008/.

4 AUTOMATISIERTE VERFAHREN

Bei den bisherigen Betrachtungen können beim hydrostatischen Nivellement nur Höhenunterschiede zwischen jeweils zwei Punkten ermittelt werden. Für die gleichzeitige Erfassung einer Vielzahl von Höhendifferenzen sind für das Monitoring Vielstellensysteme mit kontinuierlicher Datenerfassung erforderlich. Dafür eignen sich Druckmesssysteme und automatisierte Schlauchwaagesysteme.

Druckmesssysteme unterscheiden sich gegenüber Schlauchwaagen dadurch, dass die kommunizierende Röhre in der Mitte unterbrochen ist (*Abb. 5*). An der Unterbrechungsstelle befindet sich eine Membrane. Es wird mit zwei verschiedenen Flüssigkeitssäulen gemessen. Bei einer relativen Höhenänderung der beiden Messgefäße bleibt der Flüssigkeitspegel in jedem der zwei oder mehr Gefäße konstant. Eine Strömung in der Flüssigkeitssäule findet somit nicht statt. Messgröße ist der Differenzdruck zwischen den beiden Gefäßen, der in die Höhenänderung umgerechnet wird. Hierfür sind lediglich die beiden Messzylinder mittels Dosenlibelle auf ihrer jeweiligen Messplattform auszurichten. Eine Messlinie besteht aus mehreren Messdosen (*Abb. 6*) sowie der Null- und Referenzdose.

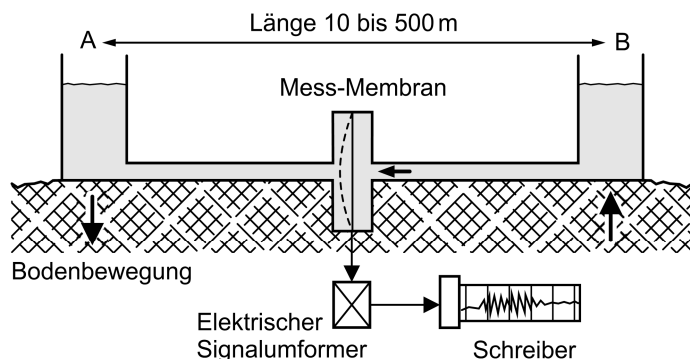


Abb. 5 | Prinzip Druckmesssystem /Meier et al. 1996/



Abb. 6 | Druckmessdose

Das Large Area Settlement (LAS) System basiert auf einer Druckunterschiedsmessung. Erfolgt am Messpunkt eine Hebung oder Senkung, so wirkt ein Druckunterschied zwischen zwei Wassersäulen auf eine Messmembrane, die sich durchbiegt. Die Auslenkung als kapazitives Signal ist proportional zum Höhenunterschied (bis 20cm). Eine Zentraleinheit erfasst nacheinander die Druckdifferenzen verschiedener Messdosen, so dass eine großräumige Überwachung möglich ist /Meier 2010/. Unter der Bezeichnung hydrostatische Druckschlauchwaage kommen bei der Überwachung des Untergrunds von Gebäuden beim Tunnelbau (u.a. Leipzig, Zürich) bis zu 300 Schlauchwaagengeber auf einer Länge von 1 km zum Einsatz. Der Druck an den einzelnen Messstellen wird als Differenzwert zur Referenzmessstelle ermittelt. Der Messbereich beträgt 200 bis 500 mm bei einer Systemgenauigkeit von ca. 0,3 mm

Die automatische Präzisionsschlauchwaage ASW 101N (FPM Holding GmbH) ist ein Mehrstellenmesssystem mit automatischer Ansteuerung in verschiedenen Messzyklen. Die Tastspitze wird mit einem Motor über ein inkrementelles Wegemesssystem (Auflösung 0,005 mm) gesteuert (Abb. 7). Die Temperatur in der Flüssigkeit wird mittels Messwiderstand gemessen. Die horizontal verlegten Schläuche aller verbundenen Stationen können bis ca. 270 m Länge und zwischen den einzelnen Messpunkten bis 65 m betragen /www.fpm.de/. Langzeitmessungen mit 4 Stationen (Abb. 8) über 20 Tage mit 11000 Messwerten ergaben Wiederholgenauigkeiten von 0,005 bis 0,015 mm /Erdmann 2013/.



Abb. 7 | Messaufbau ASW 101N

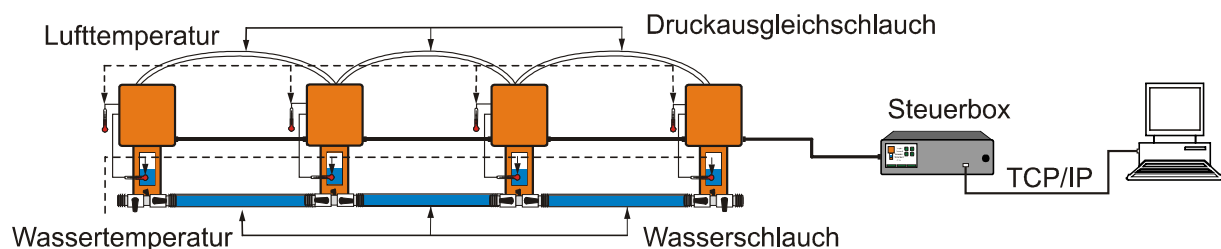


Abb. 8 | Schlauchwaagesystem mit 4 Stationen

LITERATUR

- Albert, J.; Schwarz, W. (2004): Messtechnische Entwicklungen für die Zukunftsprojekte „Linearbeschleuniger“. In: Ingensand, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2004. Beiträge zum 14. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung Zürich, 2004. Repräsentative ETH Höggerberg, S. 39-50.
- Busch, W.; Fitzen, H.P. (1977): Entwicklung und Prüfung einer kontinuierlich messenden Präzisionsschlauchwaage. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Heft 23, S.211-222.
- Erdmann, J. (2013): Untersuchungen zur automatischen Schlauchwaage. Diplomarbeit TU Dresden, unveröffentlicht.
- Hermann, S.; Fuhrland, M. (2006): Zum Langzeiteinsatz von Schlauchwaagesystemen. In: AVN, 113 (4), S. 142-145.
- Hennecke, F.; Werner, H. (1982): Ingenieurgeodäsie, Anwendungen im Bauwesen und Maschinenbau, VEB Verlag für Bauwesen Berlin.
- Löffler, F. (1992): Kontinuierliche Höhenmessungen für die Detektoren des HERA-beschleunigers beim deutschen Elektronen-Synchrotron DESY. In: AVN, 99 (10), S. 406-416.
- Löffler, F. et al. (2002): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band: Maschinen- und Anlagenbau. 2. Auflage. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Meier, E.; Ingensand, H. (1996): Ein neuartiges hydrostatisches Messsystem für permanente Deformationsmessungen. In: Beiträge zum XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung Graz, S. A8-A8/10.

- Meier, E. et al. (2010): Hydrostatische Messsysteme an der Grenze des Machbaren. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 10. Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2010. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 383-407.
- Möser, M., et al. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band: Grundlagen. 4. Auflage. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- Möser, M., et al. (2008): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band: Ingenieurbau. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Scheel, G. (1956): Systematische Fehler des hydrostatischen Nivellements und Verfahren zu ihrer Ausschaltung, DGK Reihe B, Heft 27.
- Schwarz, W. (1995): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Schriftenreihe des DVW, Heft 13. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.
- Schwarz, W. (2002a): Hydrostatisches Messsystem mit Ultraschall. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida, Heft 1, S.163-170.
- Schwarz, W. (2002b): Geodätische Messverfahren für das Bauwesen. In: Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. Schriftenreihe des DVW, Heft 43. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 23-42.
- Schwarz, W. (2009): Trends in der geodätischen Messtechnik und in ihren Anwendungsfeldern. In: AVN, 116 (3), S. 115-127.
- Thierbach, H. (1979): Hydrostatische Messsysteme, Entwicklungen und Anwendungen. Wichmann Verlag, Karlsruhe.