



# Hydrostatische Füllstandmessung mit intelligenten Systemen

Dipl.-Ing. (FH) André Papack

Die Prozessgröße Druck gehört neben der Temperatur zu den wichtigsten Messgrößen. Neben dem eigentlichen Druck kann damit auch auf andere interessante Größen wie beispielsweise die Kraft, die Dichte, das Volumen oder auf den Füllstand geschlossen werden. Im folgenden wird speziell auf die hydrostatische Füllstandmessung eingegangen, die zu den am häufigsten eingesetzten Verfahren zur Erfassung von Flüssigkeitsständen in offenen und geschlossenen Systemen gehört. Ausgehend von den Grundlagen wird ein Einblick in die hydrostatische Füllstandmessung mit modernsten Methoden der Mikroprozessor- und Fernübertragungstechnik gegeben.

## Allgemeines

Als hydrostatischen Druck einer Flüssigkeit in der Tiefe „h“ unter ihrer Oberfläche versteht man den Druck, der durch die Gewichtskraft der darüber liegenden Flüssigkeitssäule hervorgerufen wird. Der hydrostatische Druck ist direkt proportional zur Höhe „h“, sodass über die entsprechende Dichte der Flüssigkeit unmittelbar auf den Pegelstand geschlossen werden kann. Für die Wassersäule gilt in erster Näherung: 100 cm  $\approx$  100 mbar.

Bei offenen Systemen bzw. bei der klassischen Füllstandsmessung wird stets gegen den Umgebungsdruck gemessen. Bei konventionellen Pegelsonden geschieht dies durch eine im Sondenkabel integrierte Kapillare, die den Bezug zum Umgebungsdruck herstellt. Damit ist die Messung von Luftdruckschwankungen unabhängig. Bei intelligenten Systemen besteht alternativ auch die Möglichkeit, eine Absolutdruckmessung durchzuführen und die Luftdruckkorrektur über ein zusätzliches Barometer zu verrechnen. Damit kann auf die Verwendung des Kapillarkabels verzichtet werden. Speziell auf diese Technologie wird im folgenden noch genauer eingegangen.

Bei geschlossenen Systemen muss eine klassische Differenzdruckmessung durchgeführt werden. Beispiel hierfür ist ein mit Druck ( $p_0$ ) beaufschlagter Flüssigkeitsbehälter (Abb. 1).

Bei der Differenzdruckmessung mit einem Sensor wirken beide Drücke gleichzeitig auf das Messelement. Das Ausgangssignal (S) stellt bereits die Differenz der beiden Drücke ( $p$  und  $p_0$ ) dar.

Bei der Messung mit zwei Sensoren misst einer den Druck über der Flüssigkeit  $p_0$ , ein zweiter den

Gesamtdruck  $p$ . Die Differenz wird dann elektronisch aus den beiden Sensorsignalen (S) gebildet. Aus dem Differenzdruck und der Dichte des Mediums kann dann direkt der Füllstand errechnet werden. Je nach Anwendung bieten beide Möglichkeiten Vor- und Nachteile.

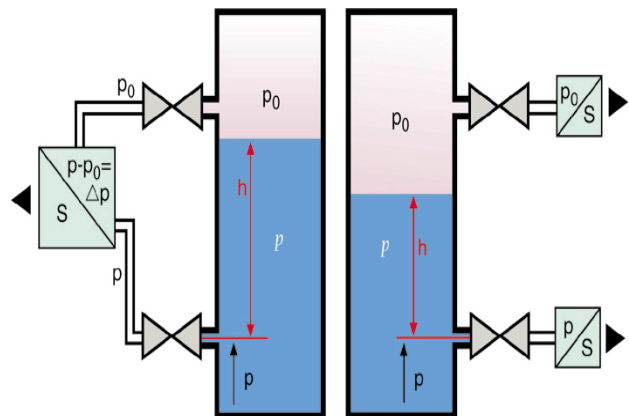


Abb. 1: Arten der Differenzdruckmessung

Somit erschließt sich der hydrostatischen Füllstandmessung neben den klassischen Anwendungen im Wasser- und Abwasserbereich auch ein breites Anwendungsspektrum in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie, in der Getränke- und Brauereindustrie und in anderen Feldern der Prozess-technik.

## Messen mit Mikroprozessoren

Die Anforderungen an die Genauigkeit von Messsystemen und somit auch an das Übertragungsverhalten von Sensoren werden stetig höher. Sen-

sorsignale sind jedoch stets mit Nichtlinearitäten und Temperaturabhängigkeiten behaftet. Um die geforderten hochpräzisen Messungen durchführen zu können, müssen diese Abweichungen eliminiert werden. Bei Verwendung von Mikroprozessoren kann dies mit Hilfe eines sog. „Mathematischen Modells“ realisiert werden.

Grundlage für diese Modellierung ist die mathematische Interpolation, d.h. der funktionale Zusammenhang des Sensorsignals wird durch ein Polynom höheren Grades sehr exakt angenähert. Dabei wird das Signal des Sensors im relevanten Druck- und Temperaturbereich bei n-Temperaturstufen und k-Druckstufen gemessen. Je mehr Messpunkte man aufnimmt, desto höher ist der Grad des Polynoms und desto größer wird in der Regel die Genauigkeit im ausgemessenen Bereich, da sich die Fehler stärker ausgleichen. So wird z. B. eine Kurve durch vier Punkte mit einem Polynom 3-ten Grades beschrieben.

Im Allgemeinen gilt bei jeweils vier Stützwerten:

$$p(S,T) = A(T) \cdot S^3 + B(T) \cdot S^2 + C(T) \cdot S^1 + D(T) \cdot S^0$$

Dabei ist:

- p:** interpolierter Druckwert  
**S:** Drucksensorsignal  
**T:** Temperatur  
**A(T)...D(T):** temperaturabhängige Koeffizienten, wobei gilt:

$$A(T) = A_3 \cdot T^3 + A_2 \cdot T^2 + A_1 \cdot T^1 + A_0 \cdot T^0$$

$$B(T) = B_3 \cdot T^3 + B_2 \cdot T^2 + B_1 \cdot T^1 + B_0 \cdot T^0$$

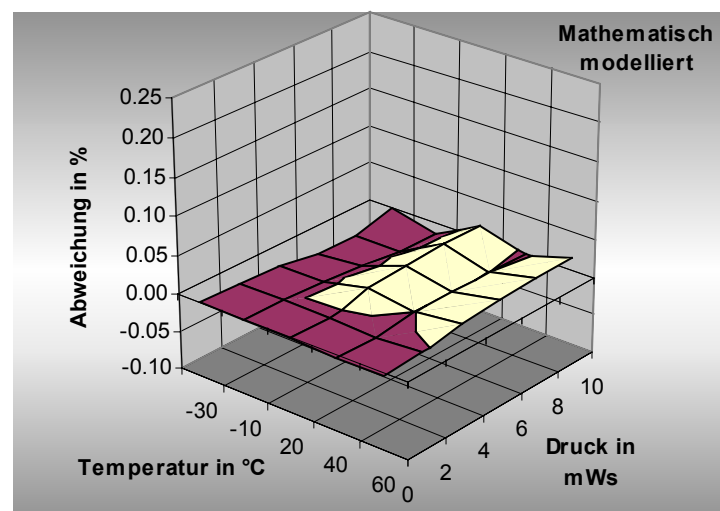
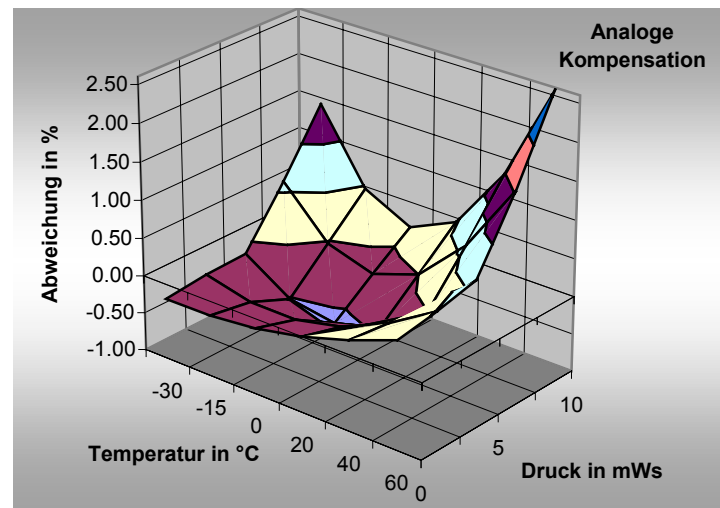
$$C(T) = C_3 \cdot T^3 + C_2 \cdot T^2 + C_1 \cdot T^1 + C_0 \cdot T^0$$

$$D(T) = D_3 \cdot T^3 + D_2 \cdot T^2 + D_1 \cdot T^1 + D_0 \cdot T^0$$

Damit kann der detektierte Druckwert im ausgemessenen Druck- und Temperaturbereich praktisch fehlerfrei berechnet werden.

In der Produktion wird nun der Drucksensor über den gewünschten Temperatur- und Druckbereich ausgemessen. Mit diesen Messdaten wird das „Mathematische Modell“ gebildet und das Resultat dieser Modellierung (Koeffizienten) in einem nicht flüchtigen Speicher (EEPROM) des Prozessors gespeichert.

Im Betrieb misst der hochpräzise A/D-Wandler des Mikroprozessors das Drucksensorsignal sowie die Temperatur am Sensor (vorzugsweise in Form eines druckunabhängigen Widerstandes auf dem Siliziumsensor) und berechnet daraus die temperaturabhängigen Koeffizienten A(T)...D(T). Daraufhin wird durch Einsetzen in die Gleichung p(S,T) der exakte Druckwert errechnet.



**Abb. 2: Vergleich zwischen analoger Kompensation und mathematischem Modell**

Diese Umwandlung und Berechnung erfolgt bis zu 400 mal pro Sekunde. Die theoretische Auflösung liegt zwischen 0,005 und 0,0025%.

Abbildung 2 verdeutlicht den Vorteil der mathematischen Kompensation. Dabei ist die Abweichung eines Sensors über Druck und Temperatur bei konventioneller Kompensation und bei Verwendung eines mathematischen Modells dargestellt. Das Modell liefert ein über Faktor 100 besseres Resultat und liegt mit 0.02% quasi an der Grenze der Kalibrierengenauigkeit.

## Neuer Niveau-Datenlogger

Auf Grundlage der digitalen Kompensationstechnik hat KELLER einen neuen Datenlogger entwickelt. Das Gerät basiert auf der bereits oben beschriebenen Differenzdruckmessung mit zwei Absolutdrucksensoren (AA-Technologie). Die Miniatur-Pegelsonde (Ø 21mm) zur Messung des Gesamtdruckes p ist über das zugehörige Kabel direkt mit dem Elektronikgehäuse verbunden. Im Gehäuse befindet sich neben der Elektronik mit neuester µP-

Technologie (16 Bit A/D Wandler) der wasserdicht eingebaute Absolutdrucksensor mit Stahlmembrane zur Luftdruck-Erfassung ( $p_0$ ) sowie die leicht auswechselbare Batterie (Abb. 3).

### Hardware

Die Prozessorschaltung erfasst neben den beiden Drucksignalen auch die Signale der beiden zusätzlich integrierten Temperatursensoren. Damit kann ein komplettes mathematisches Modell für beide Drücke ( $p$  und  $p_0$ ) erstellt werden. Der nachfolgend berechnete Differenzdruck kann somit auf eine Gesamtgenauigkeit von 1...2mbar bei Bereichen bis 10mWS ermittelt werden. Mittelfristig wird das Gerät mit bereits integriertem Modem erhältlich sein.

### Software

Einfache und übersichtliche Software (Abb. 4) mit vielen Funktionen, wie z.B.:

- Onlineanzeige der Messkanäle
- Statusanzeige und Batteriezustandsanzeige
- Einstellung der Messfrequenz
- Messresultate in mWS oder in jeder beliebigen Einheit (vom Anwender programmierbar)
- Programmierung des Messbeginns (Datum und Zeit)
- Event-Aktivierung des Loggers wie z.B.:
  - Absolute oder prozentuale Veränderung des Wasserstandes
  - Über- oder Unterschreiten einer Schwelle
  - Mittelwertbildung über wählbare Anzahl Messungen
- bis zu 28'000 Messwerte speicherbar

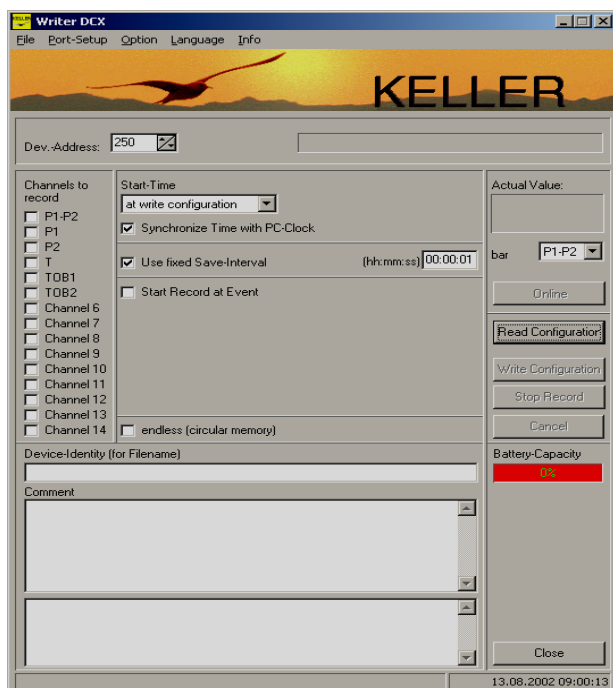


Abb. 4: Konfigurations-Software



Abb. 3: Niveau-Datenlogger in AA-Technologie

Die Vorteile solcher Systeme liegen klar auf der Hand.

Der Logger ist batteriebetrieben und lässt sich damit autonom einsetzen. Durch „Low-Power-Elektronik“ beträgt die Batterielebensdauer ca. 10 Jahre. Mit Hilfe der Prozessortechnologie ist der Aufbau eines Bussystems sowie die Fernabfrage mit Hilfe eines Modems möglich. Somit stehen auch jederzeit Messwerte über schwer zugängliche Messstellen zu Verfügung. Bei entsprechender Auslegung kann dies auch über das Internet und damit weltweit geschehen. Das aufwendige Auslesen der Daten vor Ort kann dadurch entfallen.

Durch die Verwendung zweier Absolutensoren kann auf ein Kabel mit integrierter Druck- Ausgleichskapillare verzichtet werden. Feuchtigkeit durch Kondensation gehört bei diesem geschlossenen System der Vergangenheit an. Zudem ist durch diese Technologie ein gleichzeitiges Erfassen des barometrischen Druckes sowie der Wasser- und Umgebungstemperatur möglich. Die einfach strukturierte Konfigurations- und Auslese-PC-Software gewährleistet eine den Bedürf-

nissen anpassbare Aufzeichnung. Somit werden nur die Daten gespeichert, die wirklich von Interesse sind. (z.B. nur Wasserstandsänderungen speichern). Damit wird indirekt die Speicherkapazität wesentlich erhöht. Neben den bis zu 28'000 möglichen Messwerten können auch die Installationsdaten der Messstelle in der Sonde abgelegt werden. Eine hohe Datensicherheit ist durch die Verwendung hochwertiger nichtflüchtiger Speicherbausteine gewährleistet.

Nicht zuletzt garantiert ein mathematisches Modell beider Sensoren höchste Messgenauigkeit und eine große Auflösung.

---

### **Den Tankinhalt via Internet überwachen**

---

Eine sehr interessante Anwendung mit intelligenten Pegelsonden stellt die hochgenaue und über Internet abrufbare Ölstandskontrolle eines Mineralöllieferanten dar, an deren Entwicklung die Firma KELLER maßgeblich beteiligt war.

Dabei misst die mathematisch modellierte Pegelsonde regelmäßig den Füllstand im Öltank. Die ermittelten Messdaten werden dann an die außen am Tank befindliche Sendestation weitergeleitet. Die Versorgung der Sendestation erfolgt dabei über Photo-Lithium Batterien. Diese liefern die benötigte Energie über fünf Jahre hinweg. Ein aufwendiger Festanschluss für Telefon oder Strom ist daher nicht nötig.

Die Sendestation wiederum leitet nun die Messdaten per SMS an einen zentralen Rechner weiter, der diese Daten entsprechend aufbereitet und ins „World-Wide-Web“ stellt. Somit können die gewünschten Informationen bequem und von jedem Punkt der Erde aus abgerufen werden. Die Daten sind dabei in einem passwortgeschützten Bereich abgelegt. Durch die entsprechende Datenaufbereitung können auch Pegeländerungen und Verbräuche über Wochen und Monate hinweg online verfolgt werden. Wenn es Zeit wird, den Tank wieder aufzufüllen, wird automatisch eine Meldung per E-Mail, SMS, Telefon oder per Post versandt. Ein Internet-Anschluss ist daher für diese Alarmmeldung nicht unbedingt notwendig. Detaillierte Informationen über dieses System sind auch im Web unter [www.migrol.ch](http://www.migrol.ch) abrufbar.

---

### **Ausblick**

---

Die Verwendung von Mikroprozessoren eröffnet der Druckmesstechnik laufend neue Anwendungsmöglichkeiten. Neben dem Vorzug mit Hilfe mathematischer Modelle hohe Genauigkeiten erzielen zu können, stellt vor allem auch die Möglichkeit die Daten entsprechend weiterverarbeiten zu können einen erheblichen Vorteil dar. Dies betrifft im besonderen die Anwendung neuer Technologien in der Datenübertragung wie die Verwendung von GSM - Modulen sowie die nachfolgende Visualisierung im Internet. Durch

derartige Anbindungen sind die Daten wesentlich schneller und auch weltweit verfügbar. Mit Hilfe leistungsfähiger Server sind der Aufbereitung der übertragenen Daten keine Grenzen gesetzt. Damit können dem Anwender praktisch alle aus den Daten zu eruierten Informationen zu Verfügung gestellt werden.

Diese Techniken sind speziell in der Füllstandsmessung von ganz besonderem Interesse. Somit hat der Anwender die Möglichkeit, Pegelstände kontinuierlich zu überwachen und im Falle einer Abweichung einzugreifen ohne unbedingt vor Ort zu sein. Durch die Auswertung gespeicherter Daten können ev. auftretende Störungen bereits im Vorfeld erkannt und entsprechend reagiert werden.

Wo kontinuierliche Füllstandsüberwachungen notwendig sind, werden intelligente Datenlogger mit integrierter Datenfernübertragung zum festen Bestandteil in der Prozessindustrie werden. Die fortschreitende Entwicklung in der Elektronik und in der Informationstechnologie wird das Wesentliche dazu beitragen.

Winterthur, 29.10.2002