

# Baumer Leitfaden für die Hydrostatische Füllstandsmessung

## Geltungsbereich

Dieses Dokument beschreibt die Funktionsweise der hydrostatischen Füllstandsmessung, also die Verwendung von Drucksensoren um den kontinuierlichen Füllstand in einem Behälter zu bestimmen. Es soll das Verständnis für diese Messmethode vertiefen und dem Anwender die Prüfung auf Eignung in seiner Applikation geben. Weiter kann er damit die richtige Auswahl der passenden Sensoren und Messbereiche treffen. Des Weiteren wird auf die erreichbare Genauigkeit unter bestimmten Voraussetzungen eingegangen und Hinweise zur Auswertung der Messsignale gegeben. Ein Anhang mit der theoretischen Herleitung der verwendeten Variablen und Formeln erlaubt bei Bedarf sich noch detaillierter mit der Materie auseinanderzusetzen.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>2</b>
1.1	Einsatzgebiet der Messung .....	2
1.2	Physikalische Wirkungsweise.....	2
1.3	Eigenschaften des Messprinzips .....	2
1.4	Definition von Druckbezeichnungen .....	3
<b>2</b>	<b>Physikalischer Zusammenhang</b> .....	<b>4</b>
2.1	Hydrostatisches Paradoxon.....	4
2.2	Beziehung zwischen Füllstand und hydrostatischem Druck .....	4
<b>3</b>	<b>Applikationen</b> .....	<b>5</b>
3.1	Offener Behälter .....	5
3.2	Geschlossener Behälter .....	6
3.3	Behälter mit Unterdruck.....	7
<b>4</b>	<b>Signalauswertung</b> .....	<b>8</b>
4.1	Berücksichtigung der spezifischen Dichte .....	8
4.2	Signalfluss .....	9
<b>5</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>10</b>
5.1	Eignung des Messverfahrens .....	10
5.2	Voraussetzungen und Randbedingungen .....	10
5.2.1	Behälter- und Prozesseigenschaften.....	10
5.2.2	Medieneigenschaften .....	10
5.2.3	Sensoreigenschaften .....	11
5.3	Vorteile .....	11
5.4	Nachteile .....	11
<b>6</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>12</b>
6.1	Formelherleitung (metrisch).....	12
6.2	Formelherleitung (imperial).....	13
6.3	Abbildungsverzeichnis .....	14
6.4	Dokumentations-Historie .....	14

## 1 Kurzfassung

### 1.1 Einsatzgebiet der Messung

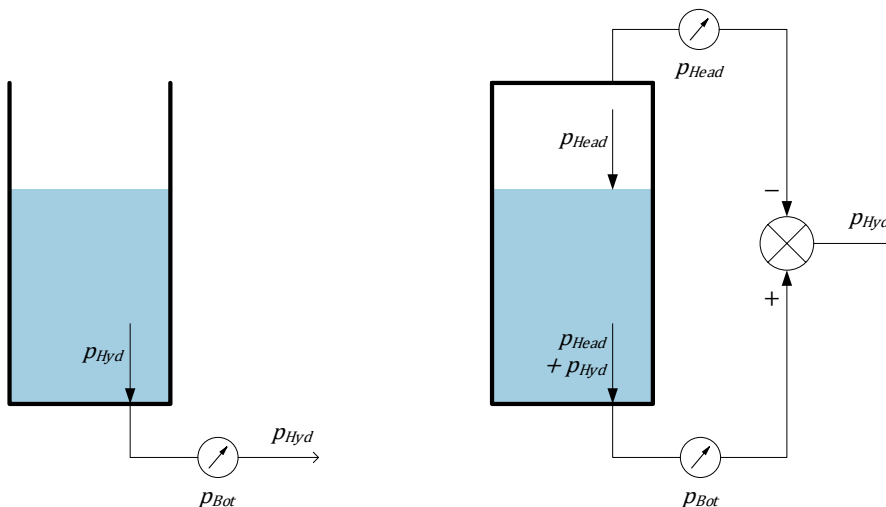
Mit Drucksensoren kann man den kontinuierlichen Füllstand eines flüssigen Mediums in einem Behälter messen. Dieses Messprinzip ist das am häufigsten eingesetzte Füllstandsmessverfahren. In der Prozessautomatisierung sind knapp die Hälfte aller kontinuierlichen Füllstandsapplikationen mit Drucksensoren realisiert.

### 1.2 Physikalische Wirkungsweise

Eine Wassersäule mit einer Höhe von 10 m übt auf ihrer Grundfläche einen Druck von ca. 1 bar aus. Dies bedeutet eine Druckänderung von ca. 1 mbar pro 1 cm Füllstandsänderung. Für andere Medien als Wasser gilt aufgrund ihrer verschiedenen Dichte ein entsprechend anderer Zusammenhang. In der Praxis liegen die Werte zwischen 0,8 mbar / cm für Öle und 1,3 mbar / cm für Glycerin.

### 1.3 Eigenschaften des Messprinzips

- Der Drucksensor zur Messung des hydrostatischen Druckes  $p_{Hyd}$  muss im Bereich des Behälterbodens eingebaut sein, da unterhalb der Drucksensorposition keine Füllstandsmessung mehr möglich ist.
- Bei geschlossenem Behälter ist ein zusätzlicher Drucksensor im Kopf des Behälters erforderlich, um den sog. «Kopfdruck»  $p_{Head}$  zu kompensieren.

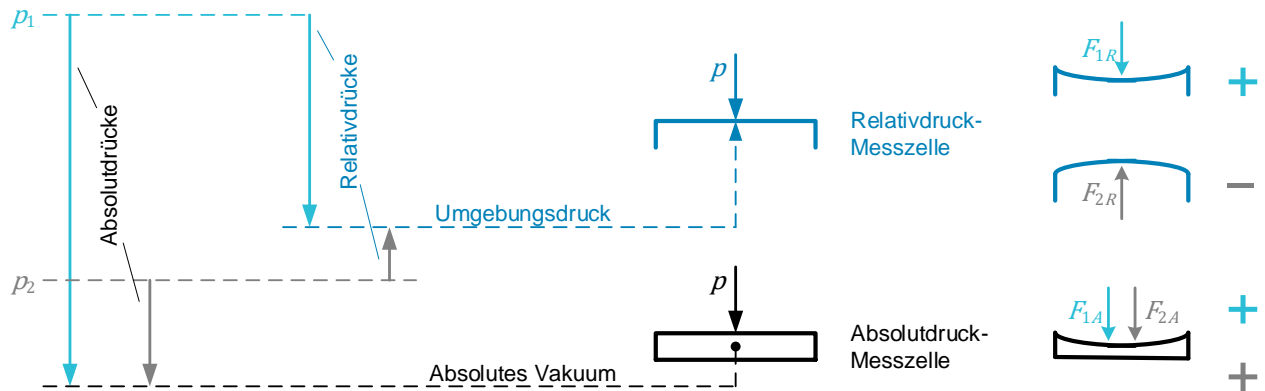


**Abb. 1: Prinzip der hydrostatischen Füllstandsmessung bei offenem und geschlossenem Behälter**

- Das Messprinzip ist nicht beeinflusst von:
  - Schaum auf der Oberfläche
  - Unruhiger Oberfläche
  - Schneller Füllstandsänderung
  - Einbauten
- Zur Berechnung des Füllstandes aus dem gemessenen Druck muss man die spezifische Dichte des Mediums kennen. Bei grossen Temperaturschwankungen des Mediums und hoher geforderter Messgenauigkeit muss auch die Temperatur gemessen werden, um die Temperaturabhängigkeit der Dichte zu kompensieren.

## 1.4 Definition von Druckbezeichnungen

In der Praxis haben sich bestimmte Begriffe geprägt, wie ein Druck unter bestimmten Voraussetzungen genannt wird. Abb. 2 zeigt ein Beispiel von zwei Drücken  $p_1$  und  $p_2$  und die Wirkung auf jeweils eine «Relativdruck-Messzelle» und eine «Absolutdruck-Messzelle».



**Abb. 2: Druckverhältnisse bei Relativdruck- und Absolutdruckmessung**

Wenn man von «Relativdruck» bzw. «Absolutdruck» spricht, bezieht man sich auf die zugrunde gelegte Referenz, nämlich ob der Druck gegen den «Umgebungsdruck», i. A. den Luftdruck, gemeint ist oder gegen «Absolutes Vakuum». Der selbe Druck, also z. B.  $p_1$  in Abb. 2, erhält dann verschiedene Zahlenwerte.

- «Relativdruck»  
Die Rückseite der Membrane bei der «Relativdruck-Messzelle» ist mit dem Umgebungsdruck in Kontakt. Dieser Druck wirkt dem aussen angelegten Druck  $p$  entgegen. Im gezeigten Beispiel ist  $p_1$  grösser als der Umgebungsdruck, die Membrane wird nach innen gedrückt ( $F_{1R}$ ), was ein positives Messergebnis ergibt. Im umgekehrten Fall ist der Druck  $p_2$  kleiner als der Umgebungsdruck; die Membrane wird nach aussen gedrückt ( $F_{2R}$ ), was in einem negativen Messergebnis resultiert. Man spricht dann von «Unterdruck» oder fälschlicherweise auch von «Vakuum».
- «Absolutdruck»  
Im Inneren der geschlossenen «Absolutdruck-Messzelle» herrscht «Absolutes Vakuum», d. h. die Rückseite der Membrane ist materiellos und deshalb vollständig drucklos. Die Membrane wird bei jedem beliebigen Druck  $p$  nach innen gedrückt ( $F_{1A}$ ,  $F_{2A}$ ). Wird als Druck  $p$  Vakuum angelegt, ist die Membrane entspannt und das Messergebnis ist 0 bar abs. Beim «Absolutdruck» kann es deshalb keine negativen Werte geben.

### Beispiel:

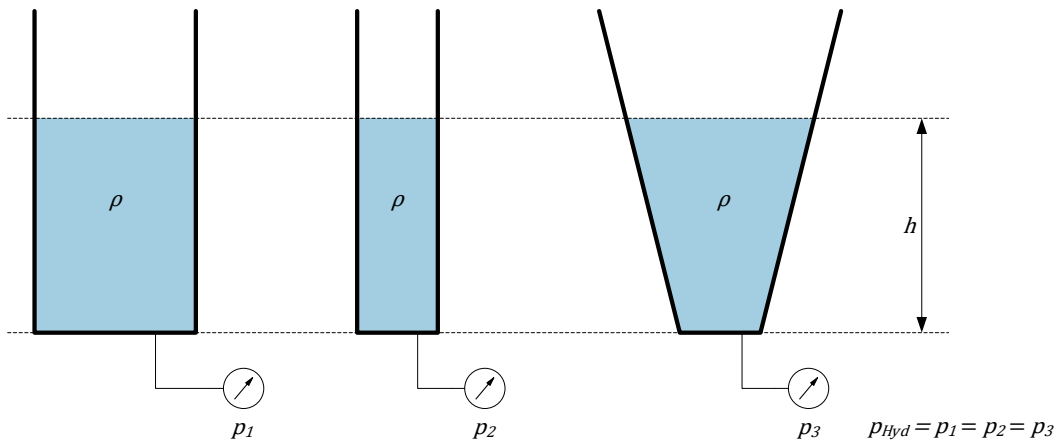
Druckart (Einheit)	Relativdruck (bar)	Absolutdruck (bar)	Relativdruck (psi)	Absolutdruck (psi)
Umgebungsdruck	0,00 bar	1,0 bar abs	0 psig	14 psia
$p_1$	1,4 bar	2,4 bar abs	19 psig	33 psia
$p_2$	-0,3 bar	0,7 bar abs	-4 psig	10 psia

Es gibt auch die Druckbezeichnung «Differenzdruck». Damit ist die Differenz zwischen zwei Drücken gemeint. Sog. «Differenz-Druck-Messzellen» haben zwei Anschlüsse zur Zuführung der beiden Drücke, die mit jeweils einer Seite der Membrane verbunden sind. Diese aufwändigen Messzellen werden heutzutage häufig durch zwei einzelne Drucksensoren ersetzt, indem rechnerisch aus den einzelnen Druckmesswerten die Druckdifferenz bestimmt wird. Dies ist auch das Prinzip bei der Kompensation des «Kopfdruckes».

## 2 Physikalischer Zusammenhang

### 2.1 Hydrostatisches Paradoxon

Eine Flüssigkeit übt mit zunehmendem Füllstand  $h$  einen zunehmenden hydrostatischen Druck  $p_{Hyd}$  auf einen unten im Behälter montierten Drucksensor aus. Bei homogener Dichte  $\rho$  der Flüssigkeit ist der Zusammenhang linear und zwar unabhängig von der Behältergeometrie (Hydrostatisches Paradoxon).



**Abb. 3: Unabhängigkeit des hydrostatischen Druckes von der Behältergeometrie**

In der Praxis ist häufig nicht der Füllstand sondern das Volumen in einem Behälter von Interesse. Wie man in Abb. 3 leicht erkennen kann, ist der Zusammenhang zwischen Volumen und Füllstand von der Behältergeometrie abhängig. Bei nicht zylindrischem Tank ist der Zusammenhang nichtlinear. Das Volumen kann aus dem Füllstand theoretisch über eine Formel berechnet oder über Auslitern und dem Hinterlegen einer Linearisierungstabelle bestimmt werden.

### 2.2 Beziehung zwischen Füllstand und hydrostatischem Druck

Die Formelherleitung zwischen Füllstand  $h$ , hydrostatischem Druck  $p_{Hyd}$  und Dichte  $\rho$  befindet sich im Anhang. Es gilt der Zusammenhang:

$$h = 10,2 \cdot \frac{p_{Hyd} [\text{bar}]}{\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]} \text{ m}$$

Je grösser die Dichte  $\rho$  der Flüssigkeit, desto grösser ist der gemessene Druck  $p_{Hyd}$  bei gleichem Füllstand  $h$ . Deshalb muss der Druck durch die Dichte der Flüssigkeit dividiert werden um den Füllstand in Metern zu erhalten. Für einen gemessenen Druck von 1 bar ergibt sich bei Wasser mit Annahme der Dichte von 1 kg pro Liter ( $\text{dm}^3$ ):

$$h = 10,2 \cdot \frac{1 \text{ bar}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}} = 10,2 \text{ m}$$

Ein Füllstand von etwa 10 m erzeugt demnach bei Wasser einen Druck von 1 bar (Faustformel: 1 mbar pro cm). Dieser Druck ist relativ gering, da Drucksensoren mit 1 bar schon zu den empfindlicheren Messbereichen zählen. Kleinere Messhöhen erfordern noch kleinere Messbereiche. Bei Behälterhöhen kleiner 1 m sind genaue Messungen praktisch nur durch Anpassung an die lokalen Begebenheiten möglich. Dafür sind hochempfindliche Drucksensoren mit einem Messbereich  $\leq 0,1$  bar notwendig.

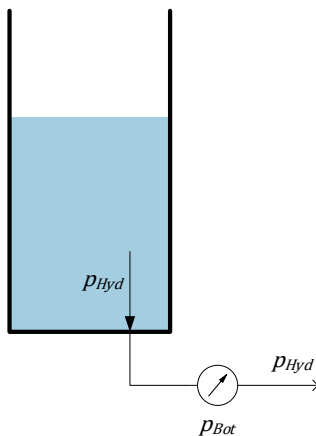
### 3 Applikationen

#### 3.1 Offener Behälter

Ein offener Behälter hat eine, wenn auch nur kleine, Öffnung zur Umgebung (Belüftung). Damit herrscht im Kopf des Behälters der Umgebungsdruck (Luftdruck).

Da der Umgebungsdruck ebenfalls auf die Flüssigkeitsoberfläche drückt interessiert nur der durch die Flüssigkeit erzeugte Druck. Deshalb kommen bei offenen Behältern ausschliesslich Drucksensoren mit Relativdruck-Messzellen, also solche mit Umgebungsdruckausgleich, zum Einsatz. Die Auswerteeinheit kann direkt den gemessenen Druckwert  $p_{Bot}$  des unten im Behälter montierten Sensors für die Berechnung des Füllstands verwenden:

$$p_{Hyd} = p_{Bot}$$



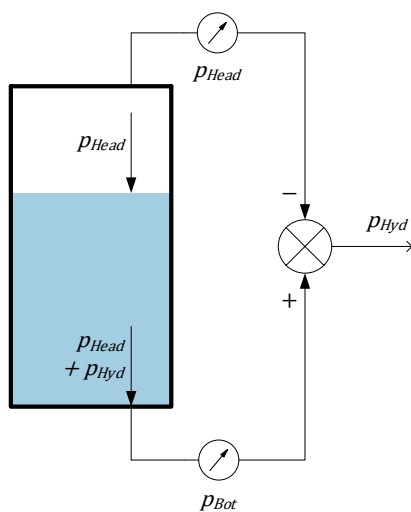
**Abb. 4: Direkte hydrostatische Druckmessung im offenen Behälter**

### 3.2 Geschlossener Behälter

Die bisherige Betrachtung geht davon aus, dass der Behälter drucklos ist, also nach oben hin wenigstens eine kleine Öffnung (Belüftung) zur Umgebung vorhanden ist. Falls der Behälter geschlossen ist entsteht ein vom Umgebungsdruck verschiedener Gasdruck im Behältervolumen über der Flüssigkeit, hervorgerufen durch ihre Gasphase, Temperaturänderungen, Gärung, Zugabe von Schutzgas oder Befüllen und Entleeren, z. B. durch Leerdrücken mit Gas. Dieser sog. «Kopfdruck»  $p_{Head}$  muss gemessen und rechnerisch berücksichtigt werden. Der rein hydrostatische Druck  $p_{Hyd}$  ergibt sich dann zu:

$$p_{Hyd} = p_{Bot} - p_{Head}$$

Die Auswerteeinheit muss dafür also die Differenz beider Messwerte bilden.

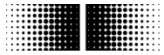


**Abb. 5: Indirekte hydrostatische Druckmessung im geschlossenen Behälter**

Die Drucksensoren sind mit ihren Messbereichen so zu wählen, dass zum einen die Überlastgrenze nicht erreicht wird und zum anderen die Empfindlichkeit noch ausreicht. Ist der Kopfdruck  $p_{Head}$  klein gegenüber dem hydrostatischen Druck  $p_{Hyd}$ , ist das Verfahren unkritisch. Oft herrschen jedoch Kopfdrücke die höher als der hydrostatische Druck sind. Die grösser zu wählenden Messbereiche verschlechtern dabei die Genauigkeit für den relativ kleinen Anteil des hydrostatischen Druckes. D. h. es wirken die Full-Scale-Fehler der grossen Messbereiche auf die relativ kleine Aussteuerung der Füllstandsmessung. Sensoren mit hoher Messgenauigkeit (z. B. max. Messabweichung 0,1 %) und exzellenter Temperaturstabilität (z. B. 0,03 % / 10 K) können hier Abhilfe schaffen.

Beispiel:

Füllstand Wasser max. 3 m, Kopfdruck max. 3,5 bar. Es sind Sensoren mit 4 bar Messbereich zu wählen. Die max. Messabweichung einschliesslich Temperaturdrift wird mit 0,5 % FS angenommen. Da zwei Sensoren verrechnet werden, sind die Messabweichungen beider Sensoren zu addieren. Es ergibt sich dann für die max. Messabweichung der ermittelten Druckdifferenz ein absoluter Fehler von 4 bar x 1 % = 40 mbar. Dies entspricht bezogen auf den hydrostatischen Druck von knapp 300 mbar einem relativen Fehler von 40 mbar / 300 mbar = 12,5 % für die Füllstandsmessung. Dies wird für die meisten Anwendungen nicht akzeptabel sein. Als Faustformel für einen max. Fehler von 3 % gilt die Annahme, dass der Kopfdruck nicht grösser sein sollte als der doppelte Wert des hydrostatischen Druckes. In unserem Beispiel wären dies: Füllstand Wasser max. 3 m, Kopfdruck max. 0,6 bar. Es sind Sensoren mit 1 bar Messbereich zu wählen. Absoluter Fehler: 1 bar x 1 % = 10 mbar. Relativer Fehler: 10 mbar / 300 mbar = 3,3 %.



### 3.3 Behälter mit Unterdruck

Wichtig zu bedenken ist auch die eventuelle Bildung eines Unterdruckes im Behälter. Dies kann beispielsweise durch Temperaturänderungen oder Pumpvorgänge entstehen. Drucksensoren die einen Messbereich beginnend von Null haben, können entweder gar keine (bei 0 – 10 V Spannungsausgangssignal) oder nur sehr geringe negative Druckwerte ausgeben, i. d. R. -1% (bei 3,8 mA Stromausgangssignal). Zu berücksichtigen sind auch sehr kleine Unterdrücke, da bereits 1 mbar eine Änderung der hydrostatischen Füllstandsbestimmung von 1 cm hervorruft. So würde man bei einem Unterdruck von -20 mbar bei einem max. Füllstand von 2 m bereits einen Fehler von 10 % verursachen, wenn der Unterdruck nicht richtig gemessen wird, weil das Signal des Drucksensors an den unteren Signalanschlag fährt. Also ist es wichtig zu überprüfen, ob negative Drücke zur Umgebung auftreten können. In diesem Fall sind Drucksensoren mit einem Messbereich zu wählen, der den negativen Bereich entsprechend mit abdeckt (z. B. -0,1 bis +0,5 bar). Für die Berechnung muss die Auswerteeinheit negative Zahlenwerte berücksichtigen können.

Beispiel:

Messbereich beider Drucksensoren mit 4-20-mA Stromausgang: -1 bis +1 bar

Normierung für die interne Berechnung (Skalierung): 4 mA = -1000,0; 20 mA = +1000,0

Füllstand Wasser: 1 m; Kopfdruck: -200 mbar

Kopfdrucksensor misst -200 mbar und signalisiert 10,400 mA:

eingesener skalierter Messwert = -200,0

Bodendrucksensor misst 98,1 mbar – 200 mbar = -101,9 mbar und signalisiert 11,185 mA:

eingesener skalierter Messwert = -101,9

Differenzdruckberechnung:  $-101,9 - (-200,0) = +98,1$ : entspricht hydrostatischem Druck der Flüssigkeit

In den meisten Fällen sind auch hier Sensoren mit Relativdruck-Messzelle geeignet, weil der Messbereich um den Umgebungsdruck von ca. 1 bar kleiner gewählt werden kann.

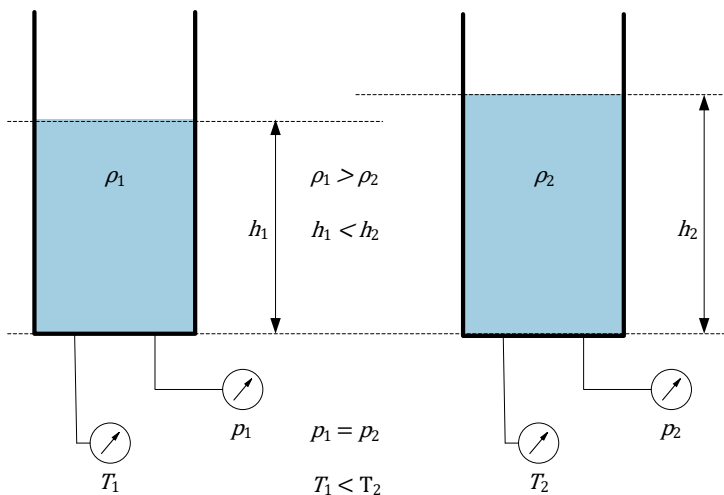
Für Vakuumanwendungen, bei denen der Kopfdruck ständig kleiner als der Umgebungsdruck ist, können vorteilhaft auch Sensoren mit Absolutdruck-Messzelle zur Anwendung kommen. In diesen Applikationen ist die Messung des Absolutdruckes, also gegen Vakuum, ohnehin von Interesse.

Weitere Anwendungen für Absolutdruck-Messungen sind die Dampfdruckmessung bei gleichzeitiger Füllstandsmessung oder Bereiche bei denen es durch hohe Luftfeuchtigkeit und häufigen Wechseln von Prozesstemperaturen zu Problemen mit Kondensat im Druckausgleichssystem einer Relativdruck-Messzelle kommen kann.

## 4 Signalauswertung

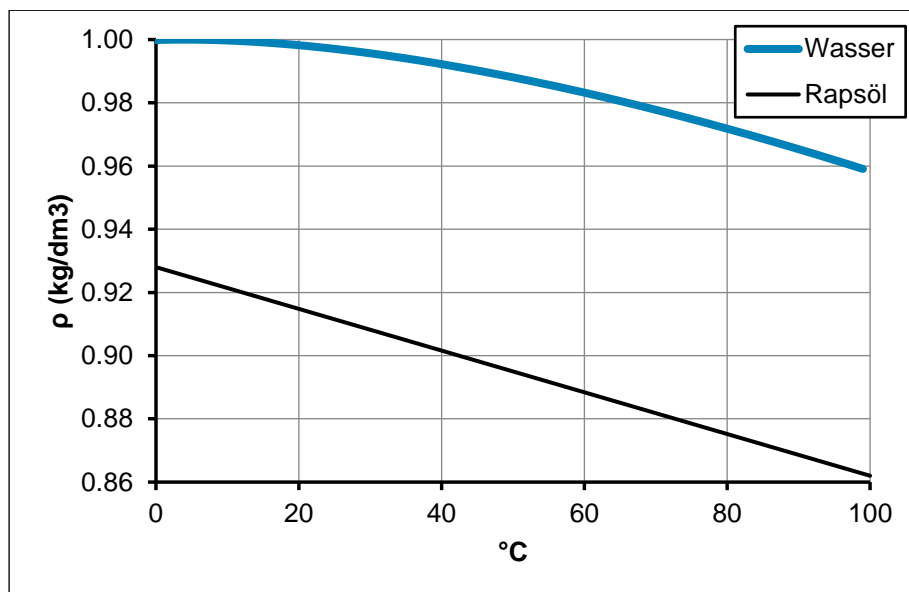
### 4.1 Berücksichtigung der spezifischen Dichte

Für eine genaue hydrostatische Füllstandsmessung ist die spezifische Dichte des verwendeten Mediums in die Füllstandsberechnung einzubeziehen. Die spezifische Dichte eines Mediums ist zudem temperaturabhängig. Abb. 6 zeigt die Zusammenhänge bei einer Temperaturänderung eines Mediums von  $T_1$  nach  $T_2$ . Im rechten Tank ist die Temperatur  $T_2$  desselben Mediums höher. Wegen der Temperaturexpansion des Mediums nimmt es mehr Volumen ein und damit steigt der Füllstand von  $h_1$  auf  $h_2$ . Der hydrostatische Druck  $p_1 = p_2$  bleibt jedoch unverändert, da sich die Dichte des Mediums gleichzeitig von  $\rho_1$  auf  $\rho_2$  verringert.



**Abb. 6: Füllstandsänderung durch Temperaturänderung desselben Mediums**

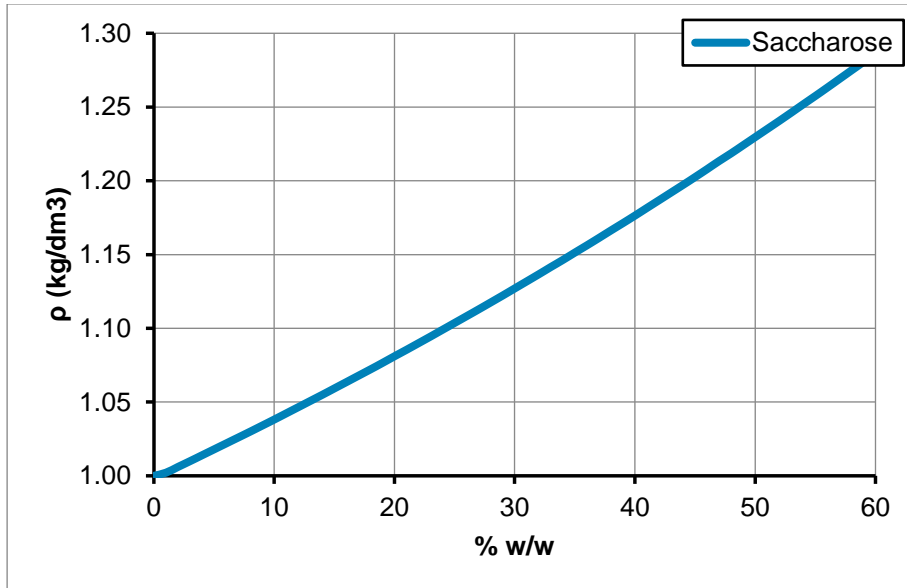
Abb. 7 zeigt die spezifischen Werte der Dichte von Wasser und Rapsöl über der Temperatur. Im Vergleich zu Wasser mit einer Dichte von  $1 \text{ kg / dm}^3$  hat Rapsöl nur ca.  $0,915 \text{ kg / dm}^3$ . Der gemessene hydrostatische Druck ist dann bei gleichem Füllstand um 8,5 % geringer. Die Temperaturabhängigkeit von Wasser ist nichtlinear; zwischen  $0 \text{ °C}$  und  $100 \text{ °C}$  ändert sich die Dichte um etwa -4 %. Die Dichte von Ölen verringert sich praktisch linear mit der Temperatur; als Anhaltswert sind dies ca.  $-0,7 \text{ \% / 10 K}$ .



**Abb. 7: Spezifische Dichte von Wasser und Rapsöl in Abhängigkeit der Temperatur**



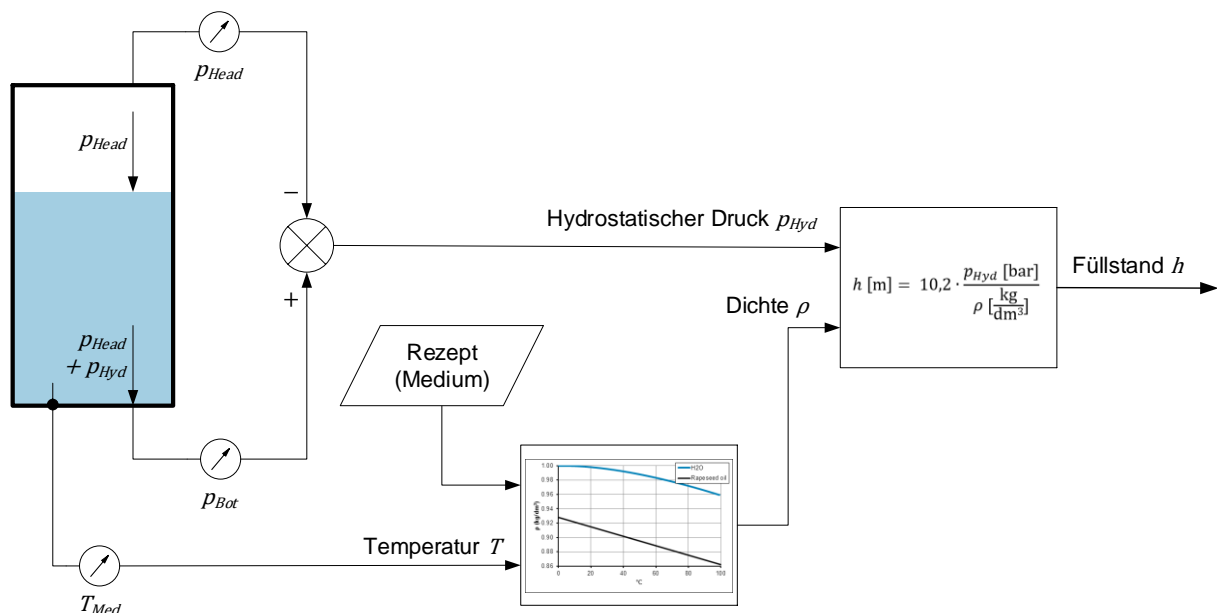
Wenn die systematische Messabweichung durch die Temperaturabhängigkeit der Dichte nicht toleriert werden kann, ist die Mediumtemperatur zusätzlich zu messen und die entsprechenden Berechnungsvorschrift für die Dichte zu hinterlegen. Werden verschiedene Medien in einer Anlage gefahren, muss für jedes Medium (bzw. Rezeptur) die zugehörige Dichte in die Füllstandberechnung einfließen. Dies ist z. B. der Fall, wenn versch. Konzentrationen von Zucker enthalten sind, wie häufig bei Erfrischungsgetränken. Abb. 8 zeigt den Zusammenhang zwischen Gewichtskonzentration und Dichte von Saccharose in Wasser.



**Abb. 8: Spezifische Dichte von Saccharose in Abhängigkeit der Gewichtskonzentration**

## 4.2 Signalfluss

Das Schaltbild in Abb. 9 zeigt alle möglichen Parameter zur Berechnung des Füllstandes. Je nach Applikation können bestimmte Parameter entfallen, z. B. die Temperaturmessung zur Temperaturkompensation der Dichte bei nur kleinen Temperaturschwankungen des Mediums, der Kopfdrucksensor bei offenem Tank oder die Information zum Rezept zur Dichteermittlung bei nicht wechselndem Medium.



**Abb. 9: Signalfluss zur Füllstandsberechnung unter Berücksichtigung aller Parameter**

## 5 Fazit

### 5.1 Eignung des Messverfahrens

Die hydrostatische Füllstandsmessung kann eine elegante Lösung zur Messung des kontinuierlichen Füllstandes sein, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind und entsprechende Randbedingungen berücksichtigt werden.

### 5.2 Voraussetzungen und Randbedingungen

Zur Überprüfung der Erfüllung von Voraussetzungen und Randbedingungen für eine zuverlässige hydrostatische Füllstandsmessung soll diese Checkliste dienen.

#### 5.2.1 Behälter- und Prozesseigenschaften

- Es ist immer der Einbau eines Drucksensors im Bodenbereich des Behälters notwendig. Dabei gilt es zu beachten, dass bei Druckbehältern eine (erneute) Prüfung nach Einschweissen eines Prozessanschlusses erforderlich ist.
- Bei einem geschlossenen Behälter muss der Kopfdruck mit einem zusätzlichen Drucksensor gemessen und in die Füllstandsberechnung einbezogen werden.
  - Der Kopfdruck sollte nicht mehr als zweimal so gross sein als der hydrostatische Druck. Ansonsten kann die max. Messabweichung des berechneten Füllstandes inakzeptabel werden, da sich die Messabweichungen der Drucksensoren immer auf deren (dann sehr grosse) Druckmessbereiche bezieht.
  - Die max. Messabweichungen beider Drucksensoren addieren sich im Worst-Case. Die max. Messabweichung des berechneten Füllstandes kann deshalb deutlich höher sein. Aus diesem Grund sollten möglichst hochpräzise Drucksensoren zum Einsatz kommen. Die max. Messabweichung des berechneten Füllstandes sollte unter Berücksichtigung aller spezifizierten Drucksensordatenparameter, also auch Temperatur- und Langzeitdrift, im Vorfeld bestimmt werden.
  - Bei einem Standard-Pumpen-Vordruck von 2 bar muss auch bei der Verwendung von hochpräzisen Drucksensoren mit einer Messabweichung im Bereich von 10 – 20 cm gerechnet werden. Bei flachen Behälterböden kann dies noch ein erhebliches Restvolumen bedeuten.
  - Falls der Kopfdruck einen Unterdruck bezüglich des Umgebungsdruckes annehmen kann, müssen die Messbereiche der Sensoren für einen entsprechend negativen Druckbereich ausgelegt sein. Zusätzlich ist die Eignung aller Komponenten auf entsprechende Vakuumfestigkeit zu prüfen.
  - Der Kopfdrucksensor kann vorteilhaft in einem Tankdom eingebaut werden.
  - Paddel von Rührwerken können Druckwellen erzeugen und damit die Messung beeinflussen.

#### 5.2.2 Medieneigenschaften

- Die Dichte des Mediums muss rechnerisch berücksichtigt werden. Bei wechselnden Medien muss das Medium bekannt sein zur Bereitstellung des zugehörigen Dichtewertes.
- Die Dichte ist temperaturabhängig. Für genaue Füllstandsmessungen ist zusätzlich die Mediumtemperatur zu messen und der Wert der Dichte entsprechend zu korrigieren.
- Bei sich absetzenden Inhaltsstoffen, wie z. B. Hefe und Pulpe, kann eine Überdeckung des Drucksensors vorkommen. Es können erhebliche Messfehler auftreten durch:
  - Abdeckung der Membrane des Sensorelements
  - Inhomogenität im Medium (veränderliche Dichte)
  - Verbleibende Sedimentschicht auf Membrane nach Behälterentleerung

### 5.2.3 Sensoreigenschaften

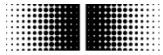
- Die hydrostatische Füllstandsmessung ist nicht geeignet um eine exakte Leermeldung, z. B. für einen Trockenlaufschutz für Pumpen, zu realisieren, da die Messwerte für sehr kleine Füllstände bereits im Bereich der zu erwartenden max. Messabweichungen liegen können. Deshalb ist für diese Funktion ein eigener Füllstandsschalter zur Grenzstand erfassung bzw. Leerrohrerkennung einzusetzen.
- Drucksensoren haben einen sog. «kompensierten Temperaturbereich» spezifiziert. Dieser ist für den Prozesstemperaturbereich von Bedeutung in dem genaue Messwerte interessieren. Der gesamte zulässige Prozesstemperaturbereich ist normalerweise grösser und dient dem Überleben bei Prozessschritten mit hoher Temperatur, z. B. SIP-Reinigungszyklen.
- In Applikationen mit heftigen heiss-/kalt-Wechseln können Kondensatprobleme im Drucksensor auftreten. In solchen Fällen ist der Einsatz von sog. «kondensatfesten» Drucksensoren anzuraten. Diese aufwändiger konstruierten Drucksensoren haben ein geschlossenes Membransystem zur Kompensation des Umgebungsdruckes und die Elektronik ist z. B. durch Verguss zusätzlich gegen Kondensat geschützt. Sensoren mit Absolutdruck-Messzellen sind aufgrund der fehlenden Anbindung an den Umgebungsdruck robuster gegen Kondensat, sofern die Elektronik ausreichend geschützt ist. Wegen der notwendigerweise grösseren Messbereiche (+ 1 bar) ist aber eine grössere Messabweichung in Kauf zu nehmen.

### 5.3 Vorteile

- Nicht invasives Sensorelement (frontbündig)
- Grosse Akzeptanz verschiedener flüssiger und pastöser (homogener) Medien
- Keine Einschränkung bezüglich Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante
- Kurze Reaktionszeit möglich (einige ms)
- Keine Störung durch Schaum (wird integral mit gemessen)
- Unsensibel gegen unruhige Flüssigkeitsoberflächen (Rührwerke, etc.)
- Kein Einfluss von Behältergeometrie und Einbauten auf die Messperformance
- Verschiedene Technologien und Ausführungsformen verfügbar

### 5.4 Nachteile

- Abhängig von der Dichte des Mediums
- Ungeeignet für Feststoffe
- Für kleine Behälter (Höhe < 1 m) nur mit Anpassung an die Gegebenheiten zu empfehlen
- Geschlossene Behälter machen zweiten Sensor und Prozessanschluss notwendig
- Bedingt geeignet für grosse Kopfdrücke (grösser 2 x hydrostatischer Druck)
- Einbau im Bodenbereich des Behälters notwendig
- Medium in direktem Kontakt mit dem Sensor: chemische Beständigkeit der Materialien ist zu prüfen, ebenso die Abnutzung durch abrasive Medien.



## 6 Anhang

### 6.1 Formelherleitung (metrisch)

$$\text{Hydrostatischer Druck } [p_{Hyd}] = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 10^{-5} \text{ bar}$$

$$\text{Kraft } [F] = 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Dichte } [\rho] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

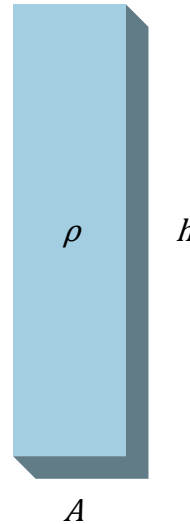
$$\text{Fläche } [A] = 1 \text{ m}^2$$

$$\text{Höhe } [h] = 1 \text{ m}$$

$$\text{Masse } [m] = 1 \text{ kg} \quad m = \rho \cdot A \cdot h$$

$$\text{Erdbeschleunigung } [g] = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Flüssigkeitssäule



Der Druck  $p_{Hyd}$  (in diesem Zusammenhang auch als «Schweredruck» bezeichnet) ergibt sich aus Kraft  $F$  pro Fläche  $A$ . Die Masse  $m$  der Flüssigkeitssäule, abhängig vom Volumen  $A \cdot h$  und der Dichte  $\rho$  erzeugt die Gewichtskraft  $F$  über die Erdbeschleunigung  $g$ .

$$p_{Hyd} = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g$$

Hydrostatisches Paradoxon:

Die Fläche  $A$  ist im Ergebnis für die Beziehung des hydrostatischen Drucks  $p_{Hyd}$  zur Dichte  $\rho$  und Höhe  $h$  der Flüssigkeitssäule nicht mehr enthalten. Dies verdeutlicht die Unabhängigkeit des Drucks von der Behältergeometrie. Vereinfacht lässt sich sagen, dass mit zunehmender Fläche der Flüssigkeitssäule ihre Masse zwar zunimmt und damit eine grössere Gewichtskraft ausübt, diese sich aber auf eine grössere Fläche verteilt, was wiederum einen kleineren Druck bewirkt.

$$h = \frac{p_{Hyd}}{\rho \cdot g} = \frac{p_{Hyd} [\text{bar}] \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right] \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 10,2 \cdot \frac{p_{Hyd} [\text{bar}]}{\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]} \text{ m}$$

Der konstante Faktor 10,2 errechnet sich also aus dem Kehrwert der Erdbeschleunigung und der grössenmässigen Anpassung der Einheiten.

## 6.2 Formelherleitung (imperial)

$$\text{Hydrostatischer Druck } [p_{Hyd}] = 1 \frac{\text{lb}_F}{\text{in}^2} = 1 \text{ psi}$$

$$\text{Kraft } [F] = 1 \text{ lb}_F$$

$$\text{Spezifisches Gewicht } [\gamma] = 1 \frac{\text{lb}_F}{\text{ft}^3} = \frac{1}{7,48} \cdot \frac{\text{lb}_F}{\text{gal US}}$$

$$\text{Länge, Höhe } [l, h] = 1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$$

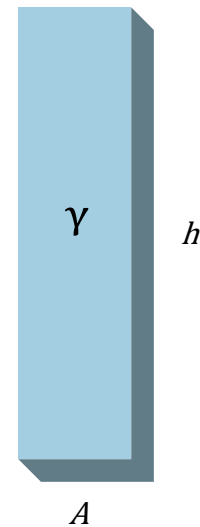
$$\text{Fläche } [A] = [l^2] = 1 \text{ in}^2 = \frac{1}{12^2} \text{ ft}^2 = \frac{1}{144} \text{ ft}^2$$

$$p_{Hyd} = \frac{F}{A} = \frac{\gamma \cdot A \cdot h}{A} = \gamma \cdot h$$

$$h = \frac{p_{Hyd}}{\gamma} = \frac{p_{Hyd} [\text{psi}] \cdot \frac{1}{144} \text{ ft}^2}{\gamma \left[ \frac{\text{lb}_F}{\text{ft}^3} \right] \cdot \frac{\text{lb}_F}{\text{ft}^3}} = 144 \cdot \frac{p_{Hyd} [\text{psi}]}{\gamma \left[ \frac{\text{lb}_F}{\text{ft}^3} \right]} \text{ ft}$$

$$h = 144 \cdot \frac{p_{Hyd} [\text{psi}]}{\gamma \left[ \frac{1}{7,48} \cdot \frac{\text{lb}_F}{\text{gal US}} \right]} \text{ ft} = 19,25 \cdot \frac{p_{Hyd} [\text{psi}]}{\gamma \left[ \frac{\text{lb}_F}{\text{gal US}} \right]} \text{ ft}$$

Flüssigkeitssäule



Bitte beachten Sie, dass Formeln, die mit imperialen Einheiten angegeben werden, das spezifische Gewicht  $\gamma$  anstelle der spezifischen (Massen-)Dichte  $\rho$  verwenden.

Beziehung zwischen den Einheiten "psi" und "bar":

$$1 \text{ bar} = 14,503773773 \text{ psi} \quad 1 \text{ psi} = 0,068947573 \text{ bar}$$

Genauer Wert für die Standard-Erdbeschleunigung:

$$g = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

### 6.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prinzip der hydrostatischen Füllstandsmessung bei offenem und geschlossenem Behälter .....	2
Abb. 2: Druckverhältnisse bei Relativdruck- und Absolutdruckmessung .....	3
Abb. 3: Unabhängigkeit des hydrostatischen Druckes von der Behältergeometrie .....	4
Abb. 4: Direkte hydrostatische Druckmessung im offenen Behälter .....	5
Abb. 5: Indirekte hydrostatische Druckmessung im geschlossenen Behälter .....	6
Abb. 6: Füllstandsänderung durch Temperaturänderung desselben Mediums .....	8
Abb. 7: Spezifische Dichte von Wasser und Rapsöl in Abhängigkeit der Temperatur .....	8
Abb. 8: Spezifische Dichte von Saccharose in Abhängigkeit der Gewichtskonzentration .....	9
Abb. 9: Signalfluss zur Füllstandsberechnung unter Berücksichtigung aller Parameter .....	9

### 6.4 Dokumentations-Historie

Version	Datum	Überprüft	Änderung / Ergänzung / Beschreibung
V1.10	25.05.2020	fep	Initialdokument erstellt aus dem «White-Paper» V1.00 als Begleitdokument zum gleichnamigen Webinar