

## Zum Langzeiteinsatz von Schlauchwaagesystemen

**Zusammenfassung:** Das Hauptproblem beim Langzeiteinsatz von Schlauchwaage-Systemen ist die Bildung von Gasblasen im Schlauch. Zur Untersuchung dieses Problems werden die chemisch-physikalischen Zusammenhänge und Möglichkeiten zur Entgasung von Wasser erörtert. Um den Gasgehalt im Wasser langfristig niedrig zu halten, wird die Kombination mit Paraffinöl als Sperrschicht vorgeschlagen.

**Abstract:** The main problem in long time measurements of hydrostatic levelling systems is the formation of blebs inside the hose. To investigate this problem at first the chemical and physical context and the possibilities of water degassing become discussed. To keep the gas content inside the water long-term down the combination with paraffin oil as a barrier layer is submitted.

### Problematik

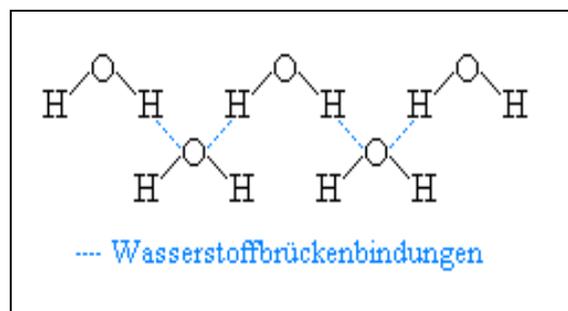
Eine der genauesten Methoden für die Überwachung von Bauwerken und zur Deformationsanalyse ist die Messung mit einem Schlauchwaagensystem. Um die hohe Genauigkeit, von bis zu  $10^{-2}$  Millimeter, erreichen zu können, müssen alle genauigkeitsbeeinflussenden Fehlerquellen berücksichtigt werden. Bisher sind die Fehler, verursacht durch Temperaturschwankungen, Luftdruckschwankungen, Kapillareffekte, Schwereunterschiede und Flüssigkeitsschwankungen, mittels Korrekturformeln berechenbar und können somit am Messwert durch Verbesserungen angebracht werden [1]. Das Hauptproblem beim Langzeiteinsatz von Schlauchwaagen-Systemen ist jedoch die Bildung von Gasblasen im Schlauch. Wenn beim Sammeln kleinerer Luftblasen eine große Blase entsteht, die den gesamten Querschnitt ausfüllt und nicht entweichen kann, ist das System der kommunizierenden Röhren unterbrochen. Im Rahmen einer Diplomarbeit [2] an der TU Dresden wurde untersucht, mit welchen Füllflüssigkeiten und –methoden eine Minimierung der Gasdesorption zu erreichen ist. Um für dieses Problem eine Lösung zu finden, müssen zunächst die physikalischen und chemischen Eigenschaften der verwendeten Füllflüssigkeit näher betrachtet werden.

### Chemisch-physikalische Zusammenhänge

Da Wasser problemlos in reichlichen Mengen beschaffbar und zudem sehr preisgünstig ist, ist es als Füllflüssigkeit konkurrenzlos. Die chemische Struktur des Wassers bilden einzelne Moleküle, wobei zwischen den Sauerstoffatomen und Wasserstoffatomen benachbarter Moleküle

Wasserstoffbrückenbindungen entstehen. Diese

Bindungen entstehen immer zwischen den positivierten Wasserstoffatomen eines Moleküls und Atomen elektronegativer Elemente. Außer mit dem Sauerstoffatom kommt es zum Beispiel mit Fluor



**Abb. 1: Wasserstoffbrückenbindungen**

und Stickstoff zu solchen Wasserstoffbrückenbindungen. Aufgrund dieser Eigenschaft von Wasser spricht man von einer polaren Flüssigkeit.

Die Löslichkeit verschiedener Substanzen in Wasser hängt von ihrer Polarität ab. Bestehen die Moleküle einer anderen Substanz aus polarisierten Atomen, so kommt es ebenfalls zu Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen und den Molekülen des anderen Stoffes. Bei der Löslichkeit von Flüssigkeiten in Wasser hängt die Löslichkeitsstärke vom Vorkommen der chemischen Gruppen  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SH}^-$ ,  $\text{NH}_2^-$  ab, da diese sehr stabile Wasserstoffbrückenbindungen eingehen können. Die Menge an Gasen die sich im Wasser lösen können, ist proportional abhängig vom Partialdruck des Gases über der Flüssigkeit und umgekehrt proportional abhängig von der Temperatur des Wassers und dem Gehalt an anderen gelösten Stoffen, wie zum Beispiel Salzen. Luft als Gasgemisch besteht zu 78,09% aus Stickstoff, zu 20,95% aus Sauerstoff und zu 0,03% aus Kohlendioxid. Den restlichen Anteil von 0,93% bilden die Edelgase. Aus diesen prozentualen Anteilen lassen sich die entsprechenden Partialdrücke der einzelnen Gase ableiten. Der Partialdruck von Stickstoff beträgt 0,7809 Bar, von Sauerstoff ist 0,2095 Bar und von Kohlendioxid beträgt er 0,0003 Bar. Um die Menge des sich in Wasser lösenden Gases zu bestimmen, wendet man das Gesetz von Henry an. Es besagt, dass zwischen der Konzentration  $c$  eines sich im Wasser lösenden Gases  $i$  und dem Partialdruck  $p_i$  des Gases oberhalb der Wasseroberfläche ein Gleichgewicht besteht. Wasser nimmt so lange Gase auf, bis sich ein dynamisches Gleichgewicht mit der Umgebungsluft oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche einstellt. Die Formel des Gesetzes von Henry in ihrer gebräuchlichsten Schreibweise lautet:

$$p_i = k_H \cdot c_i$$

Der Proportionalitätsfaktor  $k_H$  wird als Henry-Koeffizient bezeichnet und in bar/mol angegeben. Der Henry-Koeffizient berechnet sich aus der Henry-Konstanten  $k_H'$  über:

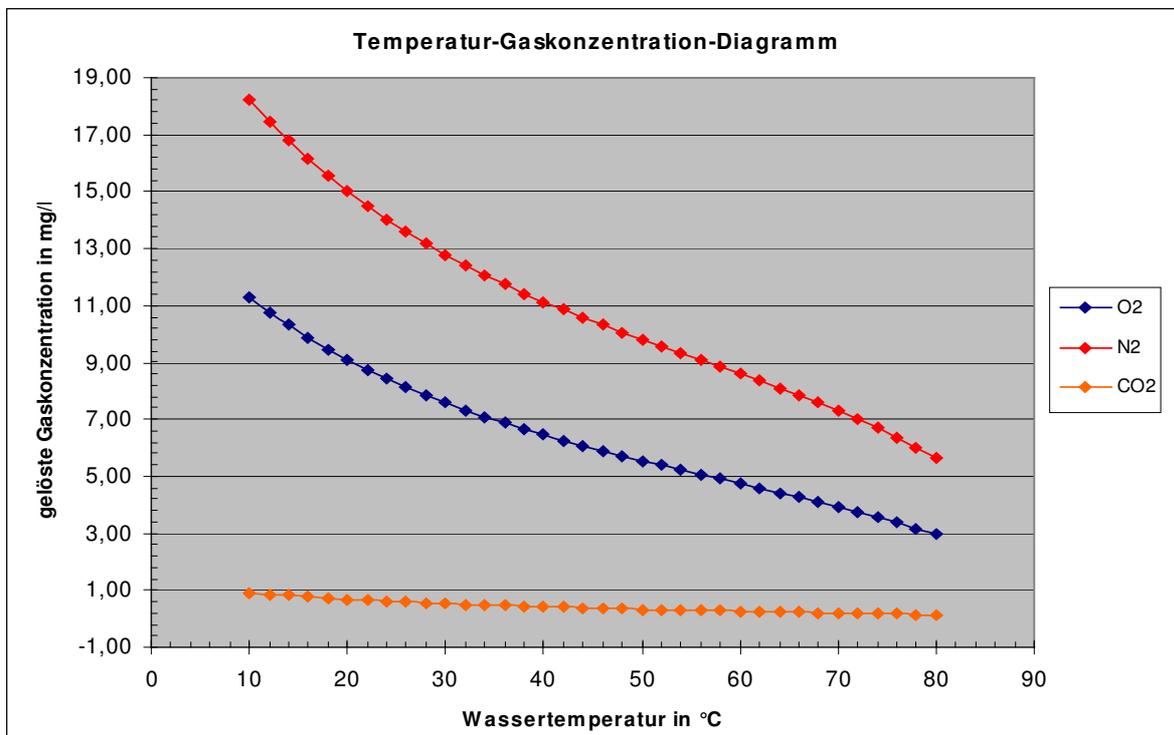
$$k_H = R \cdot T \cdot k_H'$$

wobei  $R$  die molare Gaskonstante ist und  $T$  die Temperatur des Gases [3]. Daraus folgt, wenn die Temperatur einer Flüssigkeit konstant ist, ist die Löslichkeit eines Gases proportional zu seinem Partialdruck. Das Henry'sche Gesetz gilt für die Löslichkeit von Gasen in schwerflüchtigen Flüssigkeiten bei kleineren Drücken bis 5 bar. Näherungsweise gilt es für Gase, welche sich nicht nur mit Wasser vermischen, sondern auch mit ihm reagieren. Ein Beispiel wäre Kohlendioxid, was mit Wasser zu Kohlensäure reagiert.

Aufgrund des Henry'schen Gesetzes, wurden die Löslichkeit der drei Gase Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid bei Normaldruck und innerhalb des Temperaturintervalls von 10 °C bis 80 °C im Abstand von zwei Kelvin vom Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Dresden bestimmt. Basierend auf diesen Angaben ist im Temperatur-Gaskonzentrations-Diagramm (Abb. 2) zu sehen, dass die Höhe der Konzentration des gelösten Gases stark temperaturabhängig ist. Kälteres Wasser nimmt mehr Gasmoleküle auf als wärmeres. Die Löslichkeit der Gase Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) ist stärker von der Flüssigkeitstemperatur abhängig, als die von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Wenn sich kaltes, gasreiches Wasser erwärmt, lösen sich die Bindungen zwischen den Wassermolekülen und den Gasatomen. Diese können sich dann in Form von Gasbläschen zusammenschließen und wenn möglich dem Wasser entweichen. Da sich das Wasser vom Rand aus erwärmt, bilden sich zuerst dort die Gasbläschen und können an der Gefäßinnenwand durch

Kohäsions- und Adhäsionskräfte hängen bleiben. Die Menge an Gas, welche bei einem Temperaturanstieg ausgas, lässt sich wiederum durch das Henry'sche Gesetz berechnen und ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen dem Wasser und der Umgebung. Ob es dabei zur



**Abb. 2: Gaskonzentration als Funktion der Temperatur**

Gasbläschenbildung kommt, hängt von der Größe des Temperaturunterschiedes ab. Je größer dieser ist, desto wahrscheinlicher ist eine Gasbläschenbildung. Umgekehrt nimmt warmes, gasarmes Wasser Gas auf, wenn es durch die Umgebung abgekühlt wird. Diese Absorption läuft aber langsamer, als das Ausgasen ab. Aus diesem Grund kann es bei häufigen, in kürzerer Zeit auftretenden, Temperaturschwankungen, zu zahlreichen Gasbläschen kommen, welche sich zu größeren Gasblasen in den Wassergefäßen zusammenschließen können, wenn die Bläschen nicht an die Flüssigkeitsoberfläche gelangen und entweichen.

### Entgasung von Wasser

Den ersten Schritt zur Lösung des beschriebenen Problems bietet die Entgasung von Wasser. Es gibt hierbei verschiedene Verfahren. Auf der Grundlage des Henry'schen Gesetzes basiert das Verfahren mittels einer Vakuumpumpe. Da die Menge des gelösten Gases abhängig ist vom Partialdruck desselben über der Flüssigkeit, kann man mit der Vakuumpumpe in einer geschlossenen Apparatur den Partialdruck verringern. Da immer ein Gleichgewicht zwischen den Mengenkonzentrationen eines Gases über der Flüssigkeit und dem Anteil des gelösten Gases angestrebt wird, findet eine Entgasung der Flüssigkeit statt.

Ein weiteres Verfahren ist die Stofftrennung mit Membrankontaktoren. Dabei wird die zu entgasende Flüssigkeit durch eine poröse Membran von einem zweiten Gefäßteil räumlich getrennt. In diesem Teil des Membrankontaktors befindet sich eine weiter gasarme Flüssigkeit. Auf Grund des Gaskonzentrationsgefälles der beiden Gefäßteile wird durch Diffusion das gelöste Gas aus der zu

entgasenden Flüssigkeit entfernt bis ein Konzentrationsgleichgewicht zwischen den beiden Gefäßteilen erreicht ist. Auch dieses Verfahren eignet sich zur Entgasung von Wasser.

Mit der Verwendung eines Ultraschallbades kann ebenfalls Wasser entgast werden. Der Frequenzbereich des Ultraschalls liegt oberhalb 18kHz und wird durch einen Ultraschallgenerator erzeugt. Mehrere Schwinger wandeln die erzeugte Energie in mechanische Energie um. In der Wanne des Ultraschallbades befindet sich die zu entgasende Flüssigkeit, welche durch die erzeugten Schwingungen periodisch verdichtet und entspannt wird. Überall in der Flüssigkeit entstehen durch diesen Vorgang sogenannte Kavitationsblasen. Sie gelangen an die Flüssigkeitsoberfläche und führen das Gas in die Atmosphäre ab. In der Wanne des Ultraschallbades bleibt die gasarme Flüssigkeit zurück. Zur Unterstützung und zur Steigerung der Effektivität dieser Entgasungsverfahren sollte das Wasser erwärmt werden. Dies hat den Effekt, dass die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen dem Gas und dem Wasserstoff schwächer werden und somit die Trennung der Gasionen erleichtert wird.

Mit dem Ultraschallbad SONOREX RK 100 H der Firma Bandelin wurden mehrere Entgasungen von destilliertem Wasser und von Leitungswasser bei einer Temperatur von 80°C durchgeführt. Nach luftdichtem Abkühlen wurden Sauerstoffgehalts- und pH-Wert-Messungen in den entgasten Wässern vorgenommen, wobei sich immer ein halber Liter der Flüssigkeiten in Glasgefäßen mit gleichem Durchmesser von 10 cm befanden. Bei den Messungen wurden das Sauerstoffmessinstrument HI 9143 der Firma HANNA Instruments und das pH-Wert-Messinstrument HI 8314 ebenfalls von der Firma HANNA Instruments verwendet. Der Gehalt von Stickstoff im Wasser konnte in Ermangelung eines geeigneten Messinstrumentes nicht untersucht werden. Es kann nach Konsultation von Experten im Bereich anorganischer Chemie aber davon ausgegangen werden, dass sich Sauerstoff und Stickstoff bezüglich ihrer Löslichkeit annähernd proportional verhalten. Durch die Abweichung im Molekulargewicht dürfte sich bei Stickstoff lediglich eine geringfügig schnellere Absorption bzw. Desorption ergeben. Im Ergebnis stellte sich heraus, dass es keinen Unterschied der Effektivität der Entgasung zwischen Leitungswasser und destilliertem Wasser gibt. Weiterhin ist die Entgasungsdauer und die Entgasungstemperatur für eine erfolgreiche Entgasung wichtig. In den Versuchen zeigte sich, dass eine Entgasung bei 80°C und bei einer Dauer von 100 Minuten akzeptable Ergebnisse liefert.

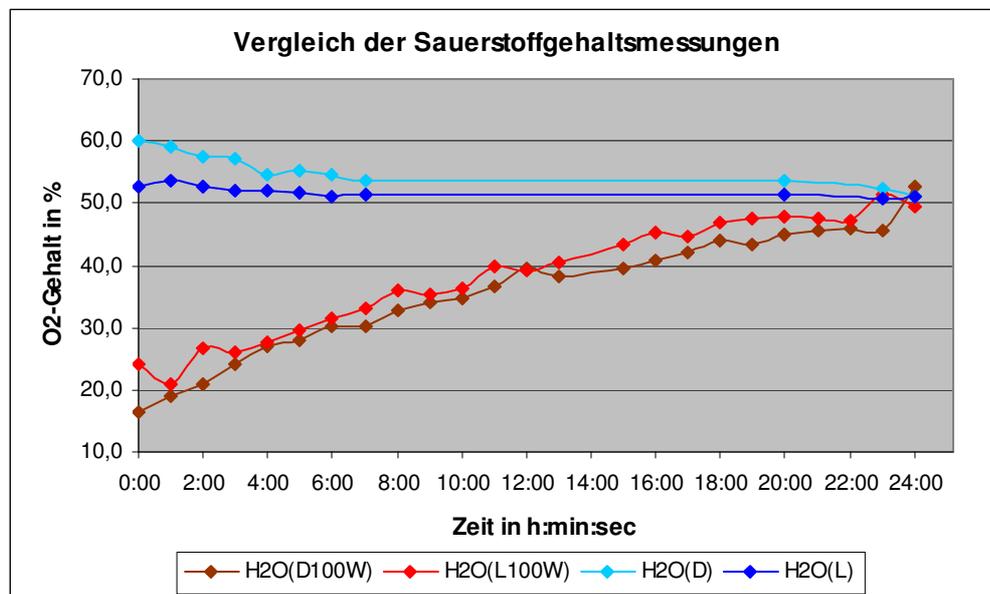


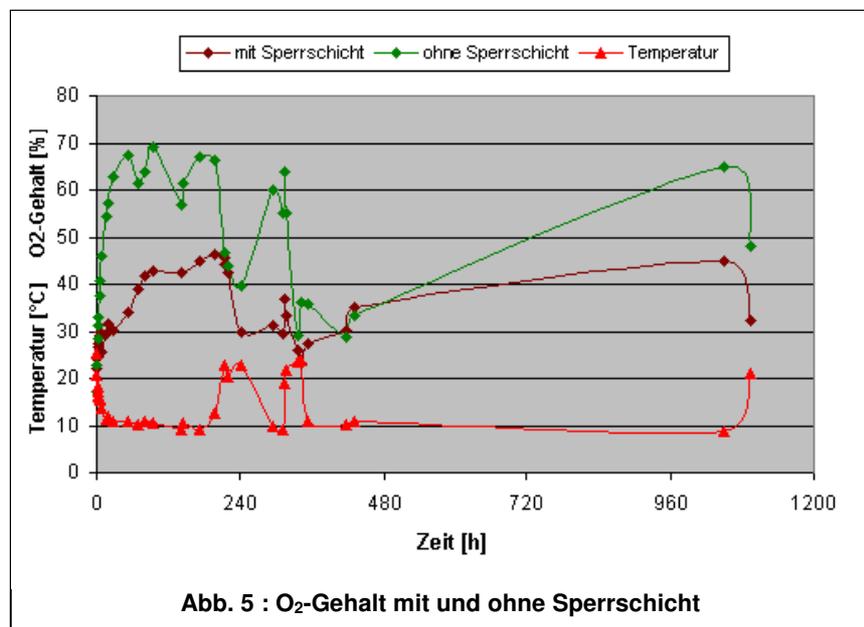
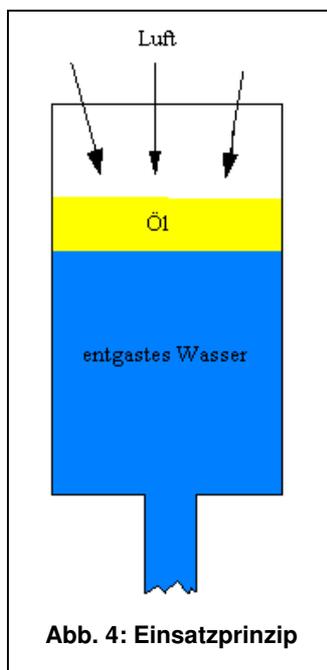
Abb. 3: Sauerstoffmessung

Hierbei sinkt der Sauerstoffgehalt von ca. 55 % auf ca. 20 % und auch der pH-Wert, als indirekte Kohlendioxidmessung, steigt um 0,8 pH bis 1,5 pH bei der Entgasung an. Bei fortführenden Messungen, stellte sich heraus, dass das entgaste Wasser relativ schnell wieder die dem Henry'schen Gesetz entsprechende gelöste Gasmenge absorbiert. In Abb.3 sind die Daten der Sauerstoffmessungen über 24 Stunden von entgastem Leitungswasser und destilliertem Wasser im Vergleich zu entsprechenden nicht entgastem Wässern zu sehen.

Die Bezeichnungen der einzelnen Datenreihen soll am Beispiel H<sub>2</sub>O(D100W) erklärt werden. Hier bezeichnet „D“ die Wasserart (D = destilliertes Wasser; L = Leitungswasser), „100“ die Entgasungsdauer in Minuten und „W“ steht für die Art der Entgasung (W = warme Entgasung). Wie Abb.3 zeigt, steigt der Sauerstoffgehalt sowohl von Leitungswasser als auch von destilliertem Wasser innerhalb von 24 Stunden wieder auf den Wert von nicht entgastem Wasser an. Aus diesem Grund musste eine Methode entwickelt werden, welche die Gasabsorption hemmt.

### Kombination mit einer Sperrschicht

Eine Sperrschicht, in Form einer anderen Flüssigkeit auf dem Wasser, soll die Gasabsorption hemmen. Es wurden Paraffinöl und Silikonöl jeweils als 1 cm dicke Schicht im Messzylinder getestet. Beide Flüssigkeiten sind unpolar, verbinden sich also nicht mit Wasser und schwimmen zudem durch ihre geringere Dichte auf dem Wasser. Es stellte sich bei den Messungen heraus, dass Paraffinöl besser als Sperrschicht geeignet ist. Zum einen hält Paraffinöl den Sauerstoffgehalt niedriger als Silikonöl und zum anderen dämpft es die Schwankungen des gelösten Kohlendioxides bei langzeitlichen Temperaturschwankungen besser. Zudem werden die Auswirkungen von kurzzeitigen Temperaturänderungen auf den Gasgehalt minimiert.



Aus diesen Erkenntnissen heraus wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, bei dem die gleiche Menge entgastes Leitungswasser einmal mit einer 1 cm dicken Paraffinölschicht und zum anderen ohne diese Sperrschicht vergleichend untersucht wurde. Dabei wurde ein Temperaturwechsel simuliert, indem beide Gefäße im Wechsel im Kühlschrank und bei Zimmertemperatur gelagert

wurden. In Abb. 5 sind die Messdaten der Sauerstoffgehaltsbestimmung und der parallel durchgeführten Temperaturmessung für diesen Versuch dargestellt:

Dieser Versuch lieferte folgende Ergebnisse:

1. Wasser ohne eine Sperrschicht Paraffinöl nimmt schneller und mehr Sauerstoff auf, als das Wasser mit der Sperrschicht. Auch Kohlendioxid wird schneller aufgenommen.
2. Bei Temperaturwechseln zwischen rund 9°C und 26°C sind die Gasgehaltsschwankungen bei der Wasser-Paraffinöl-Kombination deutlich schwächer als bei Wasser ohne Sperrschicht.
3. Die Verdunstung von Wasser wird durch die Paraffinölschicht verhindert.

Paraffin selbst ist deutlich weniger flüchtig als Wasser, weshalb man es auch bei meteorologischen Niederschlagsmessstationen oder Trinkwasserzisternen nach demselben Prinzip als Sperrschicht anwendet. Eine Verdunstungszahl, welche normalerweise angibt, wie schnell im Verhältnis zu Diethylether eine Flüssigkeit bei Raumtemperatur verdunstet, konnte trotz intensiver Recherche für Paraffinöl nicht gefunden werden. Als Vergleichswert konnte nur ermittelt werden, dass nach 22 Stunden bei 107°C 1,0 % von Paraffinum perliquidum und 0,4 % des dickflüssigeren Paraffinum liquidum verdunstet sind. Wasser dürfte in deutlich kürzerer Zeit bereits zu 100% verdampft sein. Ein vom Institut für Anorganische Chemie der TU Dresden angestellter Vergleich der Dampfdruckkurven zeigte, dass der Dampfdruck von Paraffinöl immer etwa zwei Größenordnungen (1/100) unter dem des Wassers liegt. Die Verdunstung von Paraffinöl bei Raumtemperatur sollte demnach gegen null gehen.

### **Resumee**

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird für den Langzeiteinsatz eines Schlauchwaagensystems vorgeschlagen, das Wasser vor dem Befüllen warm zu entgasen. Die Befüllung des Systems sollte ebenfalls mit warmen (60°C – 80°C) entgastem Wasser blasenfrei erfolgen. Anschließend muss sofort jede Wasserfläche, welche Kontakt zur Umgebungsluft hat, mit einer Schicht Paraffinöl überdeckt werden. Durch diese Vorgehensweise wird zunächst der Gasgehalt im Wasser niedrig gehalten und steigt nach der Abkühlung, verzögert durch das Paraffinöl, nur langsam auf einen relativ niedrigen Wert an. Auftretende Temperaturschwankungen auf das Meßsystem werden nur in geringem Umfang eine Änderung des Gasgehaltes im Wassers bewirken, da die Sperrschicht Paraffinöl die Absorption und Desorption verringert. Aufgrund dieser Dämpfung der Gasgehaltsschwankungen und des niedrigen Gasgehaltes im Wasser, wird die Bildung von Gasbläschen unterbunden. Zudem kann, abhängig von der Umgebungstemperatur am Messort, das Schlauchsystem durch eine Kühlung weitestgehend auf einer konstanten Temperatur gehalten werden, um somit die Gasbläschenbildung zusätzlich zu verhindern.

Wenn die Wasser-Paraffinöl-Kombination bei Schlauchwaagesystemen eingesetzt wird, können auf Grund der sehr schlechten elektrischen Leitfähigkeit des Paraffinöles nicht alle bisher verwendeten Sensoren zur Messwerterfassung genutzt werden. Die Sensoren, bei denen zur Datenerfassung durch die Füllflüssigkeit ein Strom fließen muss, können nur bedingt in Verbindung mit der vorgeschlagenen Füllflüssigkeitskombination eingesetzt werden. Dazu zählt auch die automatische Abtastung mit Messspitze bei der Freiburger Präzisionsschlauchwaage. Das Antasten der Trennfläche zwischen

Paraffinöl und Wasser ist sehr wahrscheinlich mit Genauigkeitsverlusten verbunden. Für Systeme mit Drucksensoren ist die Sperrschicht ein erheblicher Vorteil. Inwiefern die Sperrschicht Paraffinöl die Messgenauigkeit der einzelnen Sensoren beeinflusst, soll in einem Langzeittest auf einer Eichstrecke untersucht werden.

Literatur:

[1] Scheel, G.: *Systematische Fehler des hydrostatischen Nivellements und Verfahren zu ihrer Ausschaltung*, DGK Reihe B, Heft 27, 1956

[2] Hermann, S.: *Untersuchungen zum Langzeiteinsatz von Schlauchwaagesystemen*, Diplomarbeit an der TU Dresden, 2005

[3] Schwarzenbach, R. P.; Gschwend, P. M.; Imboden, D. M. *Environmental Organic Chemistry*; John Wiley, New York, 1993

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Sandro Hermann

Dipl.-Ing. Matthias Fuhrland

TU Dresden

Geodätisches Institut

01062 Dresden

email: [matthias.fuhrland@tu-dresden.de](mailto:matthias.fuhrland@tu-dresden.de)