

Tutorial

Ein hydrostatisches Meßsystem mit in-situ-Kalibrierung

16. März 2004

Markus Schlösser
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg



ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Technische Universität Graz
Institut für Ingenieurgeodäsie
und Messsysteme

1 Einleitung

Das Prinzip der Schlauchwaage (HLS, hydrostatic leveling system) ist seit mehreren tausend Jahren bekannt und wird auch heute noch nahezu unverändert genutzt. Für die Anwendungen in der Beschleunigervermessung sollten die existierenden Konzepte so verbessert werden, dass unterschiedliche Temperaturen entlang der Messstrecke möglichst keinen Einfluss mehr auf das Messergebnis haben, wobei die Genauigkeitsforderung bei $\sigma_{\Delta h} = 0,1\text{mm}$ für den Höhenunterschied zwischen zwei Messstellen besteht und Temperaturunterschiede von bis zu 30K (20-50°C) auftreten können. Weiterhin sollte die Lösung möglichst kompakt sein und hinsichtlich der Verkabelung anspruchlos. Insbesondere sollten keine HF-Kabel entlang der Messstrecke benötigt werden¹.

2 Messkonzept

2.1 Physikalische Realisierung der Äquipotentialfläche

Bei herkömmlichen HLS bestehen die Hauptfehlerquellen darin, dass Druck- und Temperaturunterschiede an den einzelnen Messstellen dazu führen, dass die Wasseroberflächen² in den Steigzylindern nicht mehr auf einer Äquipotentialfläche liegen. Den durch die Druckunterschiede entstehenden Fehler eliminiert man üblicherweise dadurch, dass ein zweiter Schlauch eingesetzt wird, der den Luftteil des Systems führt. Auf diese Weise erhält man ein geschlossenes System, in dem an jeder Messstelle der gleiche Gasdruck herrscht. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Schläuche für den Luftteil des Systems mit Gefälle zu den Messzylindern hin verlegt werden, weil sonst das entstehende Kondensat mit der Zeit den Gasaustausch blockieren kann und das Messsystem damit unbrauchbar wird.

Unterschiedliche Temperaturen in den Steigrohren verursachen Dichteunterschiede in der Flüssigkeit (Abb. 1) und damit unterschiedliche Pegelhöhen. Da im geplanten Beschleunigertunnel des DESY Temperaturunterschiede von bis zu 30K erreicht werden können, ist dieser Fehler kritisch.

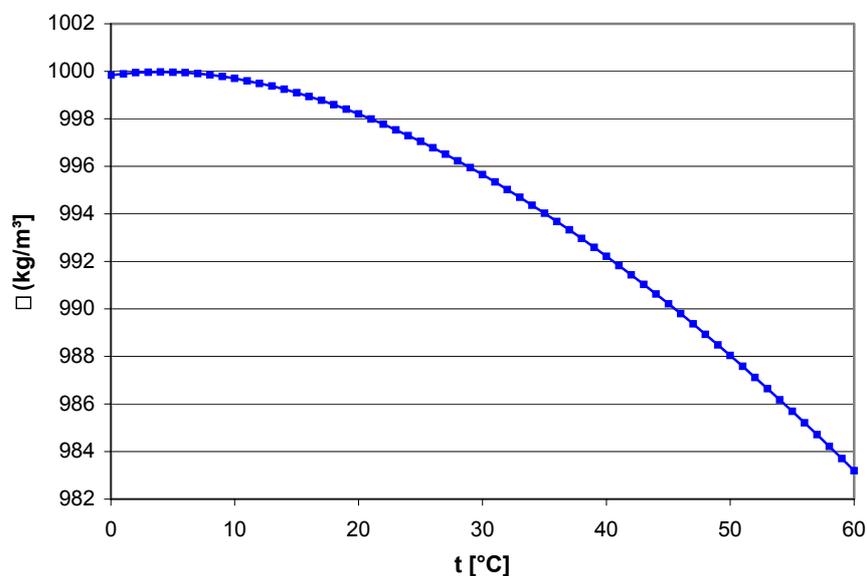


Abb. 1: Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur

¹ Teile dieser Untersuchungen wurden während meiner Beschäftigung an der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt.

² Aus praktischen Gründen kommt bei größeren HLS meist nur Wasser als Medium in Betracht. Im Folgenden wird deshalb auch nur von Wasser die Rede sein, obwohl im Prinzip jede nicht zu viskose Flüssigkeit verwendet werden kann.

Wenn man ein Zwei-Schlauch-System konstruiert, das auf kleine senkrechte Wassersäulen optimiert ist, einen Messbereich von 20mm und eine zusätzliche Sicherheit von 5mm hat, kann man bei optimalem Aufbau die senkrechten Wassersäulen auf 25mm reduzieren. Dabei ergibt sich ein Höhenfehler von 0,25mm über einen Temperaturbereich von 30K (Abb. 2).

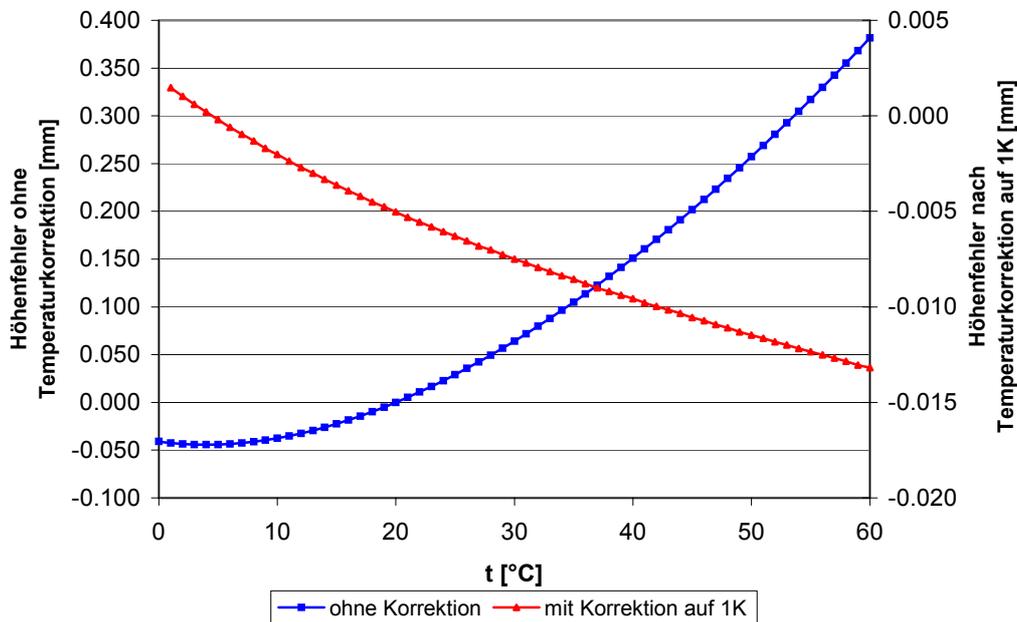


Abb. 2: Höhenfehler ein 25mm Wassersäule in Abhängigkeit von der Temperatur

Um die genannten Fehlerquellen zu eliminieren, wird ein hydrostatisches System verwendet, in dem sich in einem horizontal verlegten Rohr über die gesamte Länge des Systems eine freie Flüssigkeitsoberfläche ausbilden kann. Dieser Flüssigkeitshorizont stellt im statischen Fall eine Äquipotentialfläche dar und zwar ohne durch unterschiedliche Temperaturen und damit unterschiedliche Dichten der Flüssigkeit beeinflusst zu werden.

2.2 Abtastung der Oberfläche

2.2.1 Ultraschall-Sensor

Zur Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche wird ein Ultraschallsensor verwendet, weil mit dieser Technik die Realisierung einer in-situ-Kalibrierung (siehe 2.2.2) möglich ist. Weiterhin kann das System problemlos in eine Auswerteeinheit (ca. 6000€) und die Schallköpfe (ca. 200-800€, je nach Stückzahl und Ausführung) getrennt werden. Prinzipiell ist es damit auch möglich, eine kostengünstige Variante zu realisieren bei der ein Höhenabgriff nur zu diskreten Zeitpunkten erfolgt; das Messgerät muss dann zu diesen Zeitpunkten von Punkt zu Punkt gebracht werden, wobei die Messung selbst nur wenige Sekunden dauert.

Das derzeit beim DESY verwendete Ultraschall-Messgerät ist ein USM25 der Firma Krautkrämer (Abb. 3), das ursprünglich für den Einsatz in der Materialprüfung konzipiert wurde. Das Gerät arbeitet mit Schallfrequenzen von 0,5 bis 20MHz, wobei bei der DESY-Schlauchwaage eine Frequenz von 10MHz eingesetzt wird. Schall mit dieser Frequenz kann sich in Luft nicht ausbreiten, so dass die Messung auf der Wasserseite des Systems erfolgen muss.

In dem verwendeten Messbereich bis 10cm und bei einer Frequenz von 10MHz liefert das USM25 eine Auflösung von 10 μ m. Die Untersuchung des Gerätes ergab eine Messgenauigkeit, die mindestens der Auflösung entspricht (siehe Abschnitt 3.1).



Abb. 3: USM25 der Firma Krautkrämer

2.2.2 Messtopf mit in-situ-Kalibrierung

Da die Schallgeschwindigkeit in Wasser temperaturabhängig ist (Abb. 4), und der Streckenfehler bei einer Messstrecke von 25mm und einer Temperaturkorrektur auf 1K bereits knapp 0,1mm beträgt (Abb. 5), muss dieser Effekt kompensiert werden. Die sensorische Temperaturerfassung in der geforderten Genauigkeit wäre sehr aufwendig, bei der DESY-Schlauchwaage wurde deshalb ein spezieller Messtopf mit eingebauter Referenzstrecke zur in-situ-Kalibrierung des Messsystems entwickelt (Abb. 6).

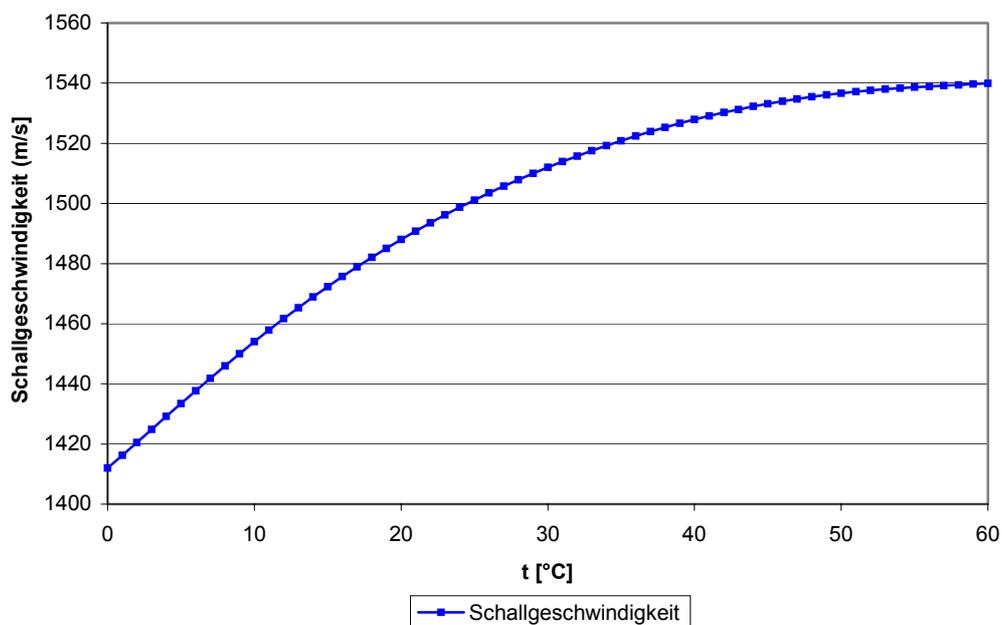


Abb. 4: Schallgeschwindigkeit in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur

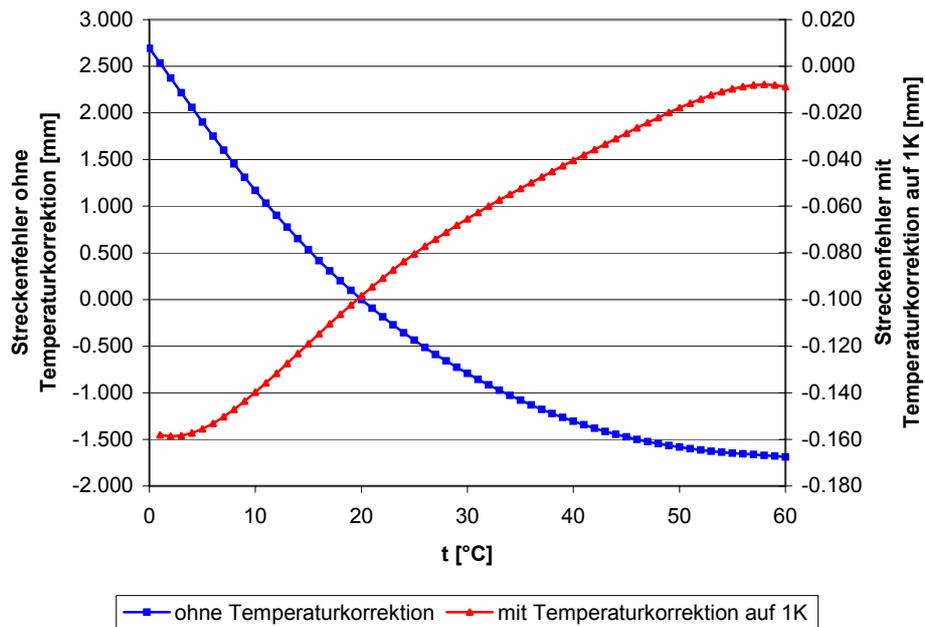


Abb. 5: Fehler in der Ultraschall-Streckenmessung durch Temperatur (Streckenlänge 25mm)

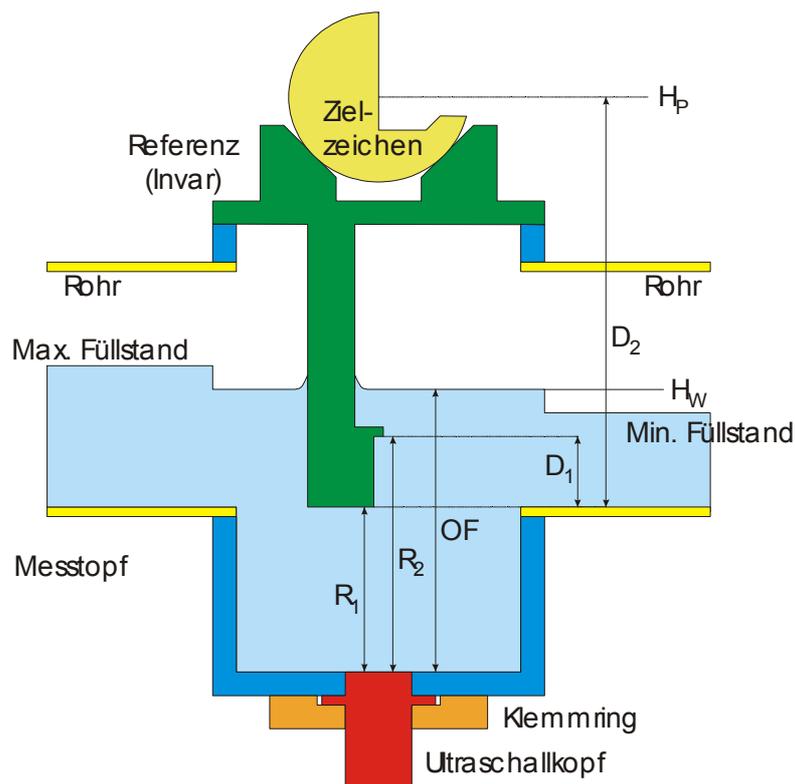


Abb. 6: Messtopf mit in-situ-Kalibriereinrichtung (nicht maßstäblich)

Während jeder einzelnen Messung werden die Strecken R_1 , R_2 und OF quasi gleichzeitig gemessen. Die Distanzen D_1 und D_2 werden vorab im Labor mit Hilfe einer Koordinatenmessmaschine kalibriert. Da das Referenzstück selbst aus Invar gefertigt ist, ist die Abhängigkeit der kalibrierten Distanzen D_1 und D_2 von der Temperatur minimal. Bei einer Länge von $D_2 = 80\text{mm}$ und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 10\text{K}$ ergibt sich bei einem

$\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} / K$ eine Längenänderung von $\Delta D \approx 1 \mu m$, was bei einer Messauflösung von $10 \mu m$ noch vernachlässigt werden kann. Nach der Gleichung

$$H_p = H_w + D_2 - D_1 \frac{OF - R_1}{R_2 - R_1} \quad (2.1)$$

kann nun aus den fehlerbehafteten Messwerten R_1 , R_2 und OF die ungestörte Höhe des Punktes H_p errechnet werden, wenn die Höhe des Flüssigkeitsspiegels H_w bekannt ist oder festgesetzt wird.

Ein Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass sämtliche Maßstabsfehler, also Fehler in der angenommenen Schallgeschwindigkeit, aber auch eventuelle elektrische Driften des Messgerätes, eliminiert werden. Lediglich die mechanische Stabilität der Referenzstrecke über die Zeit muss gewährleistet sein. Zum Nachweis dieser Stabilität können aus einem existierenden Schlauchwaagensystem von Zeit zu Zeit einige zufällig ausgewählte Referenzstrecken entnommen werden, deren Kalibrierung dann geprüft wird.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Position des Sensorkopfes für die errechnete Höhe keine Bedeutung mehr hat. Man kann also im Falle eines Defektes den Sensorkopf einfach austauschen, ohne anschließend eine gesonderte Neukalibrierung oder Neujustierung der Messstelle vornehmen zu müssen.

3 Experimentelle Untersuchung

3.1 Kalibrierung des Ultraschallgerätes

Zur Qualifizierung des USM25 wurde das Gerät gegen einen Inkrementaltaster mit einer Genauigkeit von $\sigma_l < 1 \mu m$ kalibriert. Die Kalibriereinrichtung (Abb. 7) besteht aus einem mit Wasser gefüllten Topf, in dessen Boden der Schallkopf eingebaut ist. Mittels eines Linearschlittens kann jetzt ein Tauchzylinder verfahren werden, in dem sich eine Luftblase und somit eine verfahrbare Grenzschicht Wasser-Luft bildet. Der Verschiebeweg wird mittels des Inkrementaltasters MT60K von Heidenhain gemessen.

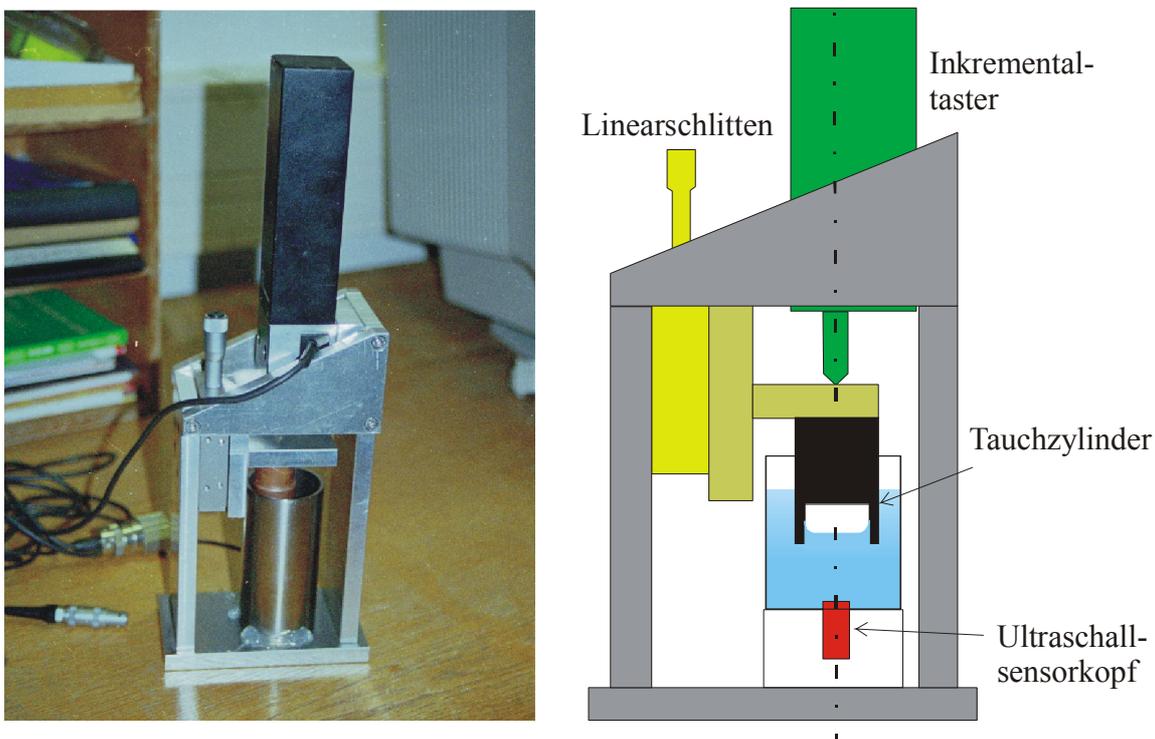


Abb. 7: Kalibriereinrichtung für USM25

Die Kalibrierung ergab keine Differenzen zwischen USM25 und Inkrementaltaster. Das bedeutet, dass die Messunsicherheit des Ultraschallgerätes kleiner ist, als die Auflösung, d.h. $\sigma_{USM25} \leq 10\mu m$.

Laut Herstellerangabe liegt die Genauigkeit des Gerätes bei ca. $3\mu m$, mit einem Firmwareupdate kann die Auflösung auf $1\mu m$ gesteigert werden, so dass dann die volle Genauigkeit des Gerätes genutzt werden könnte. Diese Angaben sind aber bisher am DESY nicht verifiziert worden.

3.2 Klimaschrank

Zum Nachweis des Funktionsprinzips der in-situ-Kalibrierung wurde ein Messtopf in einem Klimaschrank Temperaturschwankungen ausgesetzt, während mit dem USM25 Messdaten erfasst wurden. Zu Informationszwecken wurde dabei sowohl die Schranktemperatur (Lufttemperatur), als auch die Wassertemperatur (Messtopf, innen) mit gemessen. Diese Temperaturmessungen haben jedoch nur informativen Charakter, sie wurden nicht zu Auswertung der Messungen herangezogen. Weil sich das Wasservolumen und damit auch der Füllstand mit der Temperatur ändert, wurde eine spezielle Referenzstrecke eingesetzt, bei der die Wasseroberfläche durch eine Invarfläche simuliert wurde.

In einem ersten Versuch (Abb. 8) wurde die Temperatur im Klimaschrank in Stufen von 10K von $2^{\circ}C$ auf $50^{\circ}C$ hoch- und anschließend wieder heruntergefahren. Die Messwerte R_1 , R_2 und OF zeigen deutlich die Veränderung der Schallgeschwindigkeit, hervorgerufen durch die Dichteänderung des Mediums. Da sich die Änderung der Schallgeschwindigkeit wie ein Massstabsfaktor auswirkt, hat die Strecke OF absolut gesehen die größte Schwankung, weil es sich dabei um die längste Strecke handelt. Es ist zu sehen, dass die errechnete Höhe des Punktes H_P im Rahmen des Messrauschens von $30\mu m$ konstant bleibt. Ein gleitendes Mittel über 10 Messungen (Messungsabstand hier 1min), verringert das Rauschen auf ca. $15\mu m$.

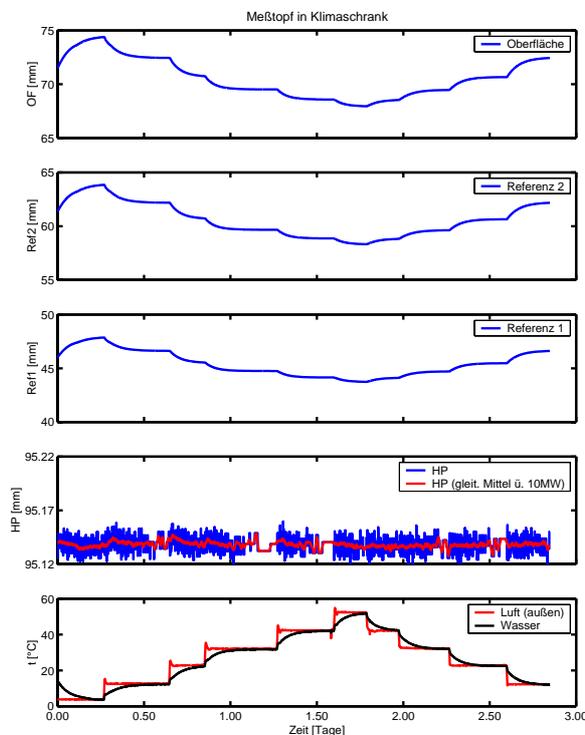


Abb. 8: Messtopf mit in-situ-Kalibrierung im Klimaschrank (1)

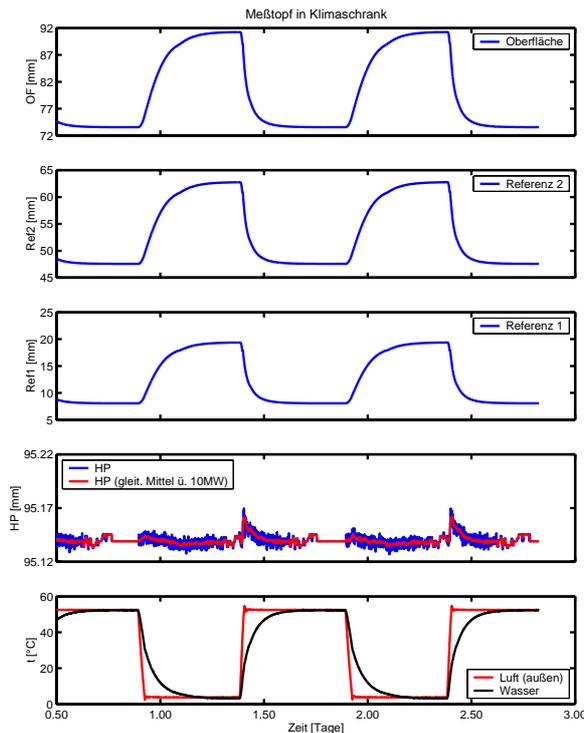


Abb. 9: Messtopf mit in-situ-Kalibrierung im Klimaschrank (2)

In einem zweiten Versuch (Abb. 9) wurde die Innenraumtemperatur des Klimaschranks mehrfach innerhalb von ca. 30min von 2 auf 50°C und zurück gewechselt.

Die korrigierte Höhe des Punktes H_P zeigt keine wesentliche Beeinflussung durch die Temperaturschwankungen. Es bleibt ein Restrauschen von ca. 20 μm , das mit Hilfe eines gleitenden Mittels über 10 Beobachtungen auf etwa 10 μm gesenkt werden kann. Die einzelnen Fehler von 30 μm treten nur lokal im Bereich des grössten Temperaturgradienten auf und haben von daher keine Relevanz für die praktische Anwendung.

Da das USM25 leider keinen Zugriff auf die originalen Messdaten (d.h. Laufzeiten) gestattet, sondern nur die mit einer vorprogrammierten Schallgeschwindigkeit berechnete Strecke ausgibt, wurde die Schallgeschwindigkeit bei diesem Versuch auf 4000m/s (Wasser sonst ca. 1480m/s) und der Prüfkopfvorlauf auf 55 μs (sonst 0 μs) gesetzt. Damit erreicht man eine „Spreizung“ des Messsignals auf den Auswertebereich von 10cm und somit eine Verbesserung der Auflösung des Signals. Da ja, wie bereits unter 3.1 gesagt, die Genauigkeit des Messgerätes besser ist als die Auflösung, wird durch diese Maßnahme eine Steigerung der Genauigkeit um ca. den Faktor 2 erreicht.

3.3 Feldversuche

Um Erfahrungen mit langgestreckten, linearen HLS mit freier Oberfläche zu bekommen, wurden im Katzestollen³ bei Katzhütte im Thüringer Wald zwei Versuchsanordnungen mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern aufgebaut. Eine erste Installation bestand aus einem Kupferrohr mit 20mm Innendurchmesser und einer Länge von 1000m. Auf dieser Strecke waren 11 Messtöpfe gleichmässig verteilt. Eine zweite Installation bestand aus einem Edelstahlrohr mit 50mm Innendurchmesser und einer exponentiellen Anordnung von 8 Messtöpf-

³ Der Katzestollen ist ein Wasserüberleitungsstollen für die im Bau befindlichen Talsperre Leibis, der noch nicht für seinen eigentlichen Zweck genutzt wird. Er wurde von der Thüringer Talsperrenverwaltung freundlicherweise für Versuchsaufbauten zur Verfügung gestellt.

fen (Abb. 10). Es sollten Untersuchungen zur Ausbreitung und Dämpfung von Oberflächenwellen angestellt werden. Ferner sollte der Einfluss der Erdgezeiten ermittelt werden.



Abb. 10: 50mm-Rohrleitung im Katzestollen

3.3.1 Einlaufverhalten

Zur Befüllung des 20mm-Rohrs wurde die erforderliche Menge des Wassers an einer Seite in das Rohr gepumpt, während die andere Seite geöffnet blieb. Nach der Befüllung wurde das Rohr an beiden Enden verschlossen, es waren zu diesem Zeitpunkt die ersten 500m Rohrleitung komplett mit Wasser gefüllt, während die restlichen 500m komplett mit Luft gefüllt waren. Es dauerte etwa 3 Wochen, bis sich in dem so befüllten System ein ausgeglichener Wasserspiegel eingestellt hatte (Abb. 11). Das zeigt, dass die Dämpfung des Systems extrem ist (Kriechfall, $\delta \gg \omega_0$).

Bei dem 50mm-Rohr wurde die Befüllung ebenfalls auf die schon beschriebene Weise durchgeführt. Das Einlaufen dauerte hier nur ca. 30min, wobei im Rahmen der Messgenauigkeit ebenfalls kein Einschwingen beobachtet werden konnte. Es handelt sich also auch hier noch um einen Kriechfall oder möglicherweise um den aperiodischen Grenzfall, d.h. $\delta \geq \omega_0$.

Das langsamere Einlaufen beim 20mm-Rohr ist auf die Adhäsionskräfte zwischen Wasser und Gefäßwand zurückzuführen, die aufgrund der schmaleren Wasseroberfläche bzw. des kleineren Querschnitts hier stärker wirksam werden, als im 50mm-Rohr.

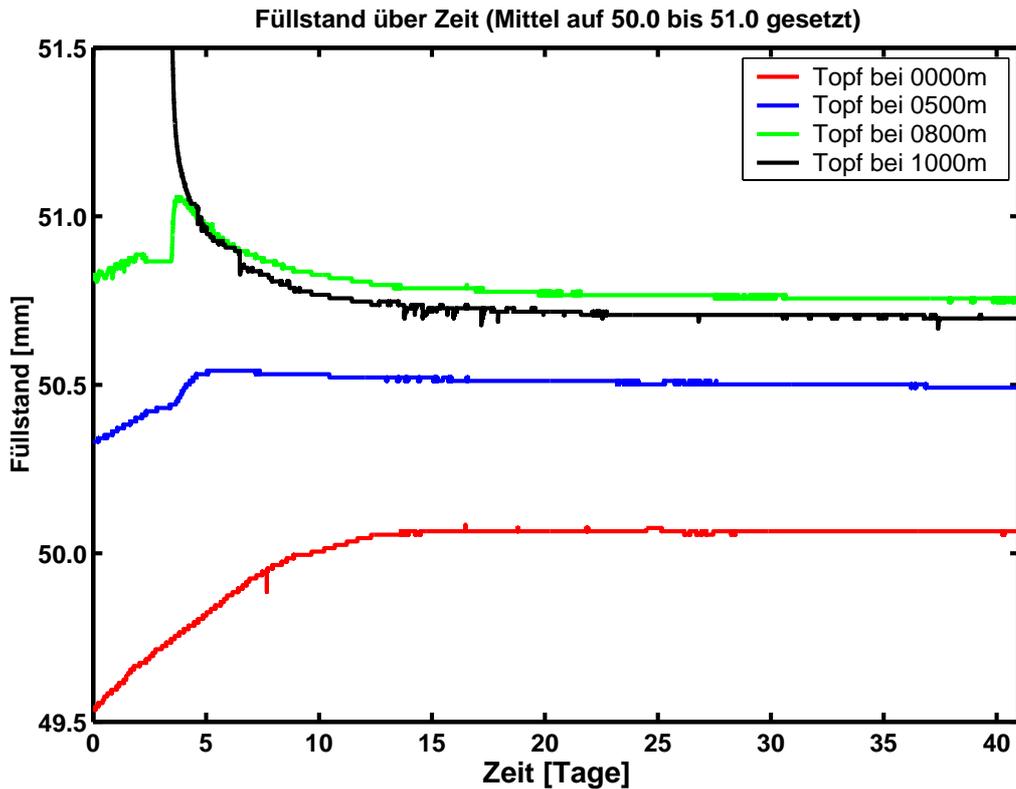


Abb. 11: Einlaufverhalten im 20mm-Rohr

3.3.2 Ausbreitung von Oberflächenwellen

Zur Erzeugung von Oberflächenwellen in den beiden Systemen wurde ein Wellengenerator (Abb. 12) benutzt. Mit dessen Hilfe konnte man programmgesteuert Wellen beliebiger Amplitude und Frequenz in die jeweilige Rohrleitung einbringen, ohne die Druckverhältnisse im Rohr wesentlich zu ändern. Abb. 13 zeigt beispielhaft einen Wellenversuch im 20mm-Rohr, Abb. 14 einen Wellenversuch im 50mm Rohr.

In dem 20mm-Rohr war wegen der zu großen Dämpfung keine gesicherte numerische Aussage über das Schwingungsverhalten der Oberflächenwellen zu treffen. Für das 50mm-Rohr war neben der Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eine Darstellung der Wellenenergie (Amplitude) in der Form

$$A = ke^{bx} \quad (3.1)$$

möglich (A : Amplitude, x : Weg). Es zeigt sich, dass der Faktor b (Tabelle 1) nur von der Schwingungsdauer T abhängig ist.

T [s]	b
300	-0.016
600	-0.014
1200	-0.010

Tabelle 1: Faktor b für $A = ke^{bx}$ im 50mm-Rohr



Abb. 12: Wellengenerator

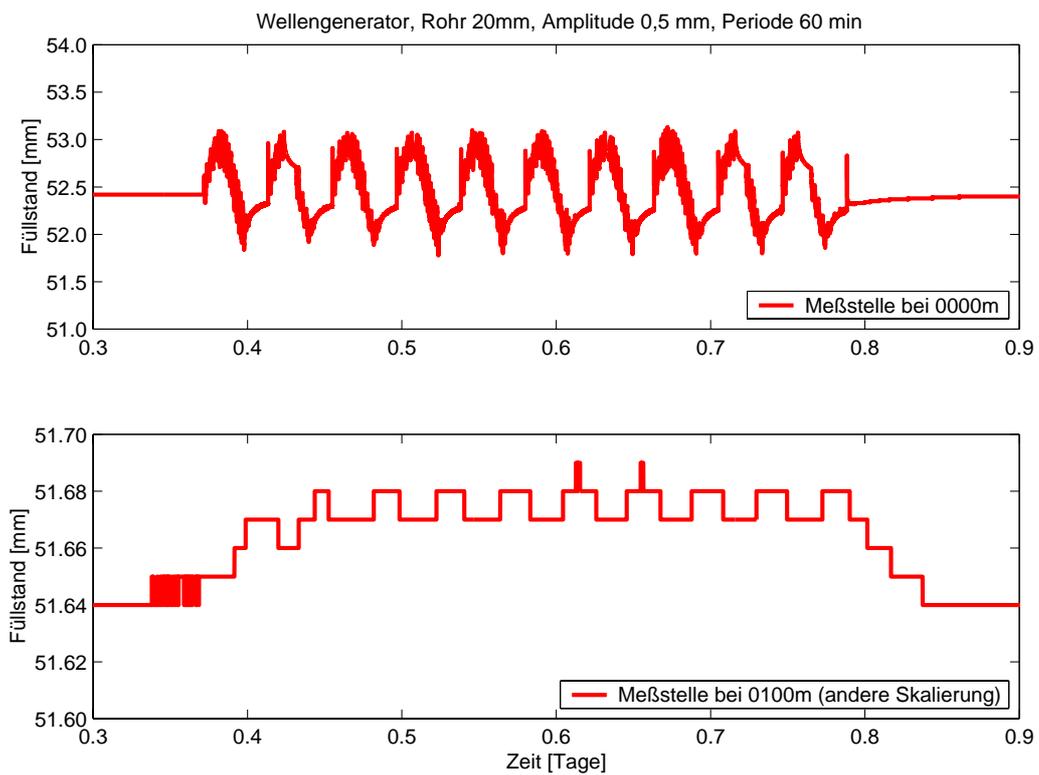


Abb. 13: Oberflächenwellenausbreitung, 20mm-Rohr, Amplitude 0,5mm, Periode 60min

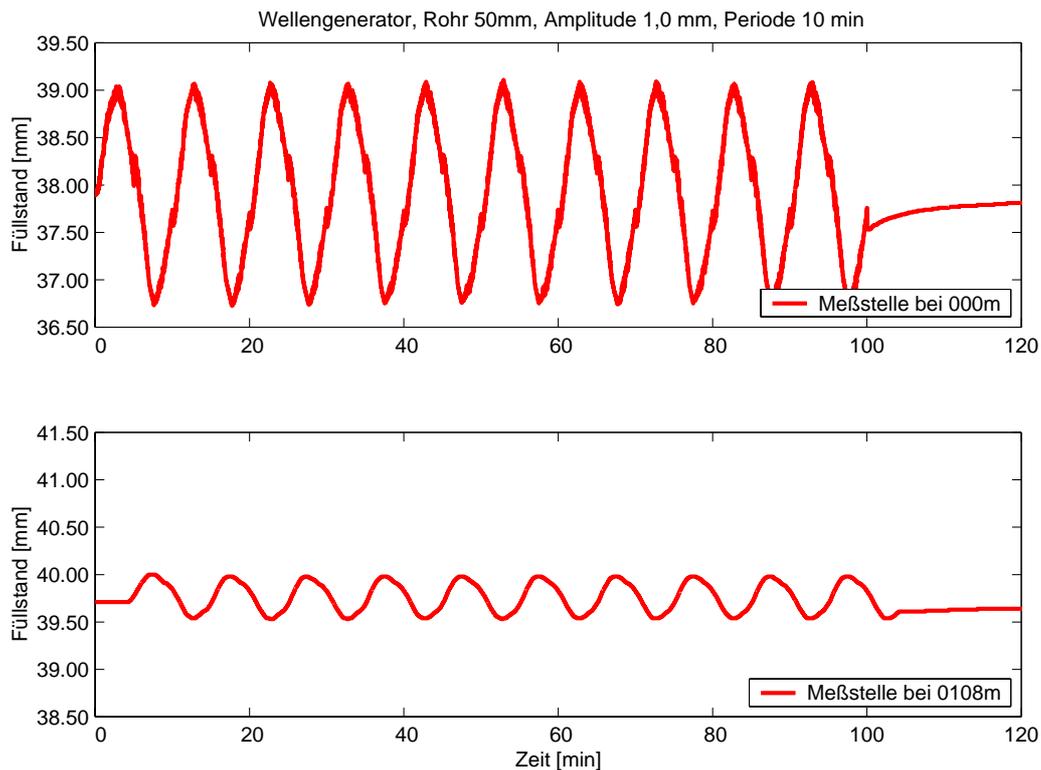


Abb. 14: Oberflächenwellenausbreitung, 50mm-Rohr, Amplitude 1,0mm, Periode 10min

Die Wellenversuche zeigten, dass selbst langperiodische Wellen mit erheblicher Amplitude ($1/10$ des Rohrdurchmessers) innerhalb kurzer Zeit auf Null gedämpft werden. Schwingungen der Wasseroberfläche durch äußere Anregung sind daher bei einem System mit freier Oberfläche nicht praxisrelevant.

3.3.3 Erdgezeiten

Im 20mm-Rohr konnte aufgrund der starken Dämpfung kein Einfluss der Erdgezeiten beobachtet werden. Im 50mm-Rohr zeigte sich hingegen ein zunächst nicht erklärbares Messrauschen im Bereich eines Auflösungsschrittes (Abb. 15), das sich erst nach einer Fouriertransformation als Gezeiteneinfluss identifizieren ließ (Abb. 16). Zur Verdeutlichung wurden synthetische Erdgezeiten mit dem Programm ETERNA von Prof. Wenzel berechnet und mit dargestellt. Da sich das durch die Erdgezeiten entstehende Signal nur im Bereich von 1 bis 2 Auflösungsschritten bewegt, ist eine quantitative Bewertung der Fourieranalyse nicht möglich.

In einem HLS, das in einem zukünftigen Linearbeschleuniger eingebaut wird, muss eine Gezeitenkorrektur an die Messwerte angebracht werden, was softwaregestützt einfach zu realisieren ist.

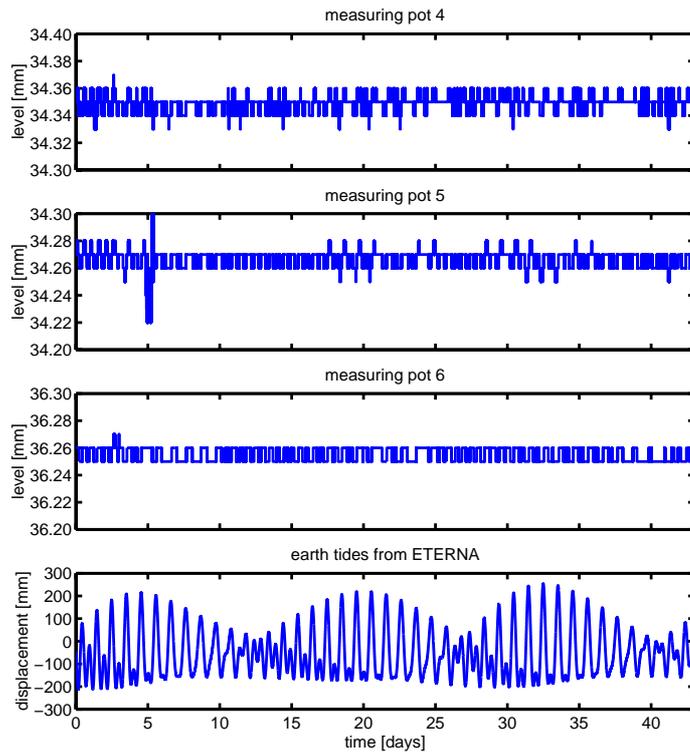


Abb. 15: Erdgezeiten im 50mm-Rohr

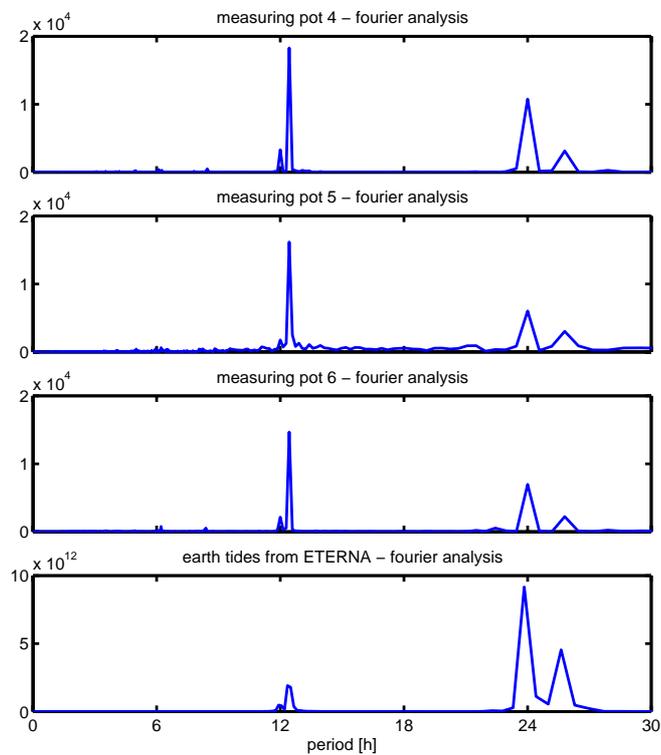


Abb. 16: Erdgezeiten - Fouriertransformation

4 Anwendung bei DESY

Zwei Installationen im HERA-Beschleuniger sollten Erfahrungen im Praxisalltag vermitteln. Dazu wurden zwei Messstrecken von jeweils ca. 100m Länge aufgebaut und mit 5, bzw. 3 Töpfen versehen (Abb. 17). Die Messergebnisse werden vor Ort von permanent messenden USM25 erfasst und über CAN-Bus an einen außerhalb des Tunnels installierten Datenerfassungsrechner weitergeleitet. Dieser ist mit dem Internet verbunden, so dass ein permanentes Datenmonitoring möglich ist.



Abb. 17: HLS in HERA

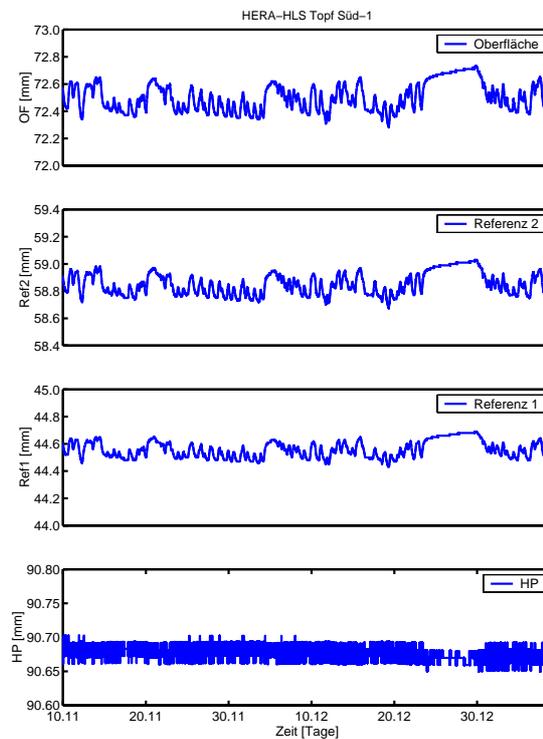


Abb. 18: Messdaten des HERA-HLS-Messtopfes Süd-1

Bis auf eine Störung, die durch einen Stromausfall verursacht war, läuft das System seit August 2003 im Permanentbetrieb, ohne dass sich Auffälligkeiten zeigen. Abb. 17 zeigt exemplarisch die Ergebnisse eines Messtopfes (HERA Süd-1) aus dem Zeitraum 11/2003 bis 01/2004. Deutlich ist an den glatteren Kurven R1, R2 und OF zwischen Weihnachten und Neujahr die Zeit des Shutdowns von HERA zu erkennen – in dieser Zeit sind die Temperaturschwankungen im Tunnel wesentlich geringer.

Tunneldeformationen wurden bisher erwartungsgemäß nicht nachgewiesen.

5 Genauigkeit

Die Wasseroberfläche ist per Definition eine Äquipotentialfläche, vorausgesetzt, es wirken keine äußeren Kräfte auf sie ein. Sie kann somit in der folgenden Betrachtung als fehlerfrei angenommen werden (Abschnitt 2.1).

Die Genauigkeit einer Höhenübertragung zwischen zwei Schlauchwaagenpunkten ergibt sich somit aus

$$\sigma_{\Delta H}^2 = 2\sigma_M^2 \quad (5.1)$$

wobei σ_M^2 die Varianz einer Höhenmessung in einem Topf ist.

Die Bestimmung der Höhe des Referenzpunktes H_p erfolgt nach Formel (2.1). Die Distanzen D_1 und D_2 werden im Labor mit Hilfe einer Koordinatenmessmaschine kalibriert und haben die Standardabweichung σ_D . Die Entfernungen R_1 , R_2 und OF werden vom Ultraschallgerät gemessen. Weil diese Distanzen relativ klein sind, kann angenommen werden, dass sie alle durch die gleiche Standardabweichung σ_{US} beschrieben werden. Die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes ergibt

$$\sigma_M^2 = \left(1 + \frac{(OF - R_1)^2}{(R_2 - R_1)^2}\right) \sigma_D^2 + \left(2D_1^2 \left(\frac{(R_2 - R_1)^2 + (OF - R_1)^2 - (OF - R_1)(R_2 - R_1)}{(R_2 - R_1)^4}\right)\right) \sigma_{US}^2 \quad (5.2)$$

Wenn man nun D_1 durch die geometrisch identische Strecke $(R_2 - R_1)$ ersetzt, erhält man

$$\sigma_M^2 = \left(1 + \left(\frac{OF - R_1}{R_2 - R_1}\right)^2\right) \sigma_D^2 + \left(1 + \left(\frac{OF - R_1}{R_2 - R_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{OF - R_1}{R_2 - R_1}\right)^2\right) \sigma_{US}^2 \quad (5.3)$$

Um eine kleine Varianz σ_M^2 zu erhalten, muss die Entfernung $(OF - R_1)$ möglichst klein sein, die Distanz $(R_2 - R_1)$ sollte möglichst groß sein. Alle anderen geometrischen Größen, z.B. die Distanz D_2 oder R_1 sind nicht von Bedeutung. Um die Referenzflächen komplett im Wasser zu behalten muss

$$(OF - R_1) - (R_2 - R_1) \geq 0 \quad (5.4)$$

sein. Im Hinblick auf den Fehlerhaushalt sollte also die Referenzfläche R1 möglichst nah am Sensorkopf, die Referenzfläche R2 dagegen möglichst nah an der Oberfläche sein. Es muss natürlich zusätzlich der gewünschte Messbereich des Systems und die Geometrie des Schallkegels berücksichtigt werden. Unter den genannten Randbedingungen wurden für die DESY-Schlauchwaage folgende Parameter gewählt:

$$\begin{aligned} R_1 &= 45 \text{ mm} \\ R_2 &= 60 \text{ mm} \\ OF &= 70 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm (Messbereich)} \end{aligned}$$

Für den ungünstigsten Fall ($OF = 75 \text{ mm}$) erhält man dann

$$\sigma_M^2 = 5\sigma_D^2 + 6\sigma_{US}^2 \quad (5.5)$$

Das zeigt, dass die Varianzen σ_D^2 und σ_{US}^2 etwa mit dem gleichen Gewicht in die Gesamtvarianz σ_M^2 eingehen. Es ist daher sinnvoll, beide in der gleichen Genauigkeitsklasse zu bestimmen. Für eine Distanzmessung auf einer Koordinatenmessmaschine, bzw. mit dem USM25 kann man folgende Standardabweichungen ansetzen:

$$\sigma_D = 0,001 \text{ mm}$$

$$\sigma_{US} = 0,005 \text{ mm}$$

Daraus erhält man die Varianz

$$\sigma_M^2 = 0,000155 \text{ mm}^2 \quad (5.6)$$

Die Gesamtvarianz für einen Höhenunterschied ist damit

$$\sigma_{\Delta H}^2 = 0,000310 \text{ mm}^2 \quad (5.7)$$

bzw.

$$\sigma_{\Delta H} \approx 0,018 \text{ mm} \quad (5.8)$$

Mit der eingesetzten Technik wird also eine Genauigkeit von $\sigma_{\Delta H} < 20 \mu\text{m}$ für einen gemessenen Höhenunterschied erreicht.

6 Zusammenfassung

Die Entwicklung eines Schlauchwaagensystems, was den Anforderungen zukünftiger Linearbeschleuniger gerecht wird, konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Es wurden Untersuchungen zum Verhalten von HLS mit freier Oberfläche angestellt. Es zeigte sich die Überlegenheit eines solchen Systems im Hinblick auf Störungsfreiheit des Betriebs und Unabhängigkeit von Temperatureinflüssen. Es wurde ein Messtopf mit Ultraschallsensor und in-situ-Kalibrierung entwickelt, der Temperatureinflüsse an der Messapparatur und elektrische Driften des Messsystems nahezu vollständig kompensiert. Zur Zeit ist mit diesem System eine Höhenübertragung zwischen zwei Punkten mit einer Genauigkeit von $\sigma_{\Delta H} < 20 \mu\text{m}$ möglich. Eine Steigerung der Genauigkeit auf $\sigma < 5 \mu\text{m}$ kann für die Zukunft durch Verwendung einer anderen Ultraschalltechnik erwartet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Krautkramer, *USM Series, Data sheet*. Firmenschrift Krautkramer
- [2] Thierbach, H., *Hydrostatische Meßsysteme. Entwicklungen und Anwendungen*, Sammlung Wichmann Neue Folge Band 12, Karlsruhe, Germany, 1979
- [3] Busch, W., *Eigenschaften stationärer hydrostatischer Präzisions-Höhenmeßsysteme für kontinuierliche Langzeitbeobachtungen untersucht an einem neuentwickelten Schlauchwaagesystem*, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 31, Aachen, Germany, 1981
- [4] Kell, G.S., *Volume properties of ordinary water*, Journal of Chemical & Engineering Data Nr. 12, Page 67-68
- [5] Kohlrausch, F., *Praktische Physik. Band 3: Tabellen und Diagramme*, Teubner, Stuttgart, Germany, 1986
- [6] Wagenbrecht, H. und Blanke, W., *Die Dichte des Wassers im Internationalen Einheitensystem und in der Internationalen Praktischen Temperaturskala von 1968*, In: PTB-Mitteilungen 6/71, Page 412-415, Braunschweig-Berlin, Germany, 1971
- [7] DESY Hrsg., *TESLA, The Superconducting Electron-Positron Linear Collider with an Integrated X-Ray Laser Laboratory, Technical Design Report*, Hamburg, Germany, 2001
- [8] Wenzel, H.-G., *Earth tide data processing package ETERNA, Version 3.40*, Karlsruhe, Germany, 1997
- [9] Albert, J., Schlösser, M., Schwarz, W., *Measuring Systems for the high-precision Alignment of planned Linear Colliders*, Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Berlin, Germany, 2002
- [10] Professur Vermessungskunde der Bauhaus-Universität Weimar and Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (Hrsg.), TESLA-Projekt, *Entwicklung von Messverfahren für die hochpräzise Vermessung zukünftiger Linearbeschleuniger*, Veröffentlichung zur Hannover Messe Industrie, Poster and Flyer, Hannover, Germany, 2001
- [11] Schlösser, M., Herty, A., *High precision survey and alignment of large linear colliders – vertical alignment*, Proceedings of the Seventh International Workshop on Accelerator Alignment, Spring8, Japan, November 2002.