



Kubisch

Hydrostatische Laser-Präzisionsschlauchwaage zur hochgenauen Ermittlung von Neigungen und Setzungen

Frank Kubisch, Dipl.-Ing. (FH), frank.kubisch@mabb.tu-freiberg.de
 Prof. Dr.-Ing. Jörg Benndorf, joerg.benndorf@mabb.tu-freiberg.de
 Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Fuchsmühlenweg 9 B, 09599 Freiberg



Schuwerack

Clemens Schuwerack, M. Sc., clemens.schuwerack@tu-dresden.de
 Senior Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser, michael.mooser@tu-dresden.de
 Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Geodätisches Institut, Professur für Ingenieurgeodäsie, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

Hubert Böhme, Dipl.-Ing., hubert.boehme@fpm.de
 Geschäftsführer, FPM Holding GmbH (Freiberger Präzisionsmechanik), Hainichener Straße 2 a, 09599 Freiberg

1. Einleitung

Aufgrund der hohen Messgenauigkeit besitzen hydrostatische Messinstrumente bis heute eine bedeutende Rolle in der Ingenieurvermessung zur Überwachung von Setzungen an unterschiedlichsten Bau- und Industrieobjekten. Zu den klassischen messtechnischen Aufgaben gehört zum Beispiel die Bestimmung von Hebungen und Senkungen von Dämmen, Talsperren, Brücken, Fundamenten, historischen Bauwerken, Gebäuden, Türmen sowie linearen Bewegungen wie Fugen, Risse u.v.m. [1, 2].

Klassische hydrostatische Messsysteme arbeiten rein mechanisch, elektrisch, magnetisch und / oder automatisiert, um einen relativen Höhenunterschied von mindestens zwei Höhenpunkten auf einer gleichen horizontalen Ebene zu bestimmen. Zur Bestimmung von Neigungen werden bisher Inklinometer, Neigungs-

winkel-, Beschleunigungssensoren, Gyroskope sowie Neigungswinkelmesser für Steigung und Gefälle in Bauwerken, im Bergbau, in Staudämmen und in weiteren Bereichen eingesetzt [1, 2]. Alle mechanisch-bewegten Komponenten in den klassischen Setzung- oder Neigungsinstrumenten unterliegen einem starken Verschleiß und müssen nach einer gewissen Zeit umfangreich instandgesetzt bzw. gewartet werden. Ein optisch-elektronischer Messaufbau besitzt enorme Vorteile durch seine konstruktionsbedingte Langlebigkeit gegenüber allen weltweit bekannten Messsystemen.

Die Innovation des geförderten ZIM-Kooperationsprojektes „HYDRO-LaWa“ liegt in der Kombination der zwei Messaufgaben Setzung und Neigung in einem Messinstrument. Dabei kann die eingebrachte Messsensorik als Bestandteil in ein größeres Geo-



Böhme



Möser

Ein hydrostatisches, hochpräzises Schlauchwaagen-Messinstrument zur kombinierten Bestimmung von Setzungen und Neigungen wurde im Rahmen eines BMWK ZIM-Kooperationsprojektes zur Echtzeitmessung entwickelt. Zunächst wird ein Einblick in das Grundlagenprinzip des hydrostatischen Nivellements gegeben. Darauf aufbauend wird das entwickelte Messprinzip sowie die Systemkonzeption der Hard- und Software vorgestellt. Anhand der Grundlagenversuche wird das technische Know-how, die wissenschaftliche Arbeit der Projektpartner zur Optimierung des Messsystems sowie die Komplexität des Messprinzips dargestellt. Die Funktionalität des Gesamtsystems „HYDRO-LaWa“ sowie die ersten Ergebnisse im Praxiseinsatz werden in drei unterschiedlichen Anwendungsgebieten evaluiert. Das hydrostatische Messinstrument wurde in der dritten Entwicklungsstufe FG-LSW-V2 mit hoher Messgenauigkeit und geringer Standardabweichung von 0,1 mm bis 0,2 mm weiterentwickelt. Somit steht in sehr naher Zukunft ein robustes, langzeitstabiles sowie ein in Echtzeit messendes Gesamtsystem für den Markteintritt zur Verfügung.

Hydrostatic laser precision hose levelling instrument for the highly accurate determination of inclinations and settlements

A hydrostatic, high-precision hose levelling measurement system for the combined determination of settlements and inclinations was developed for real-time measurement in the framework of a BMWK ZIM cooperation project. First of all, gives an insight into the basis principle of hydrostatic levelling. Based on this, the paper presents the developed measuring principle as well as the system conception of the hardware and software. The technical know-how, the scientific work of the project partners for the optimisation of the measurement system and the complexity of the measuring principle is represented with the aid of basic experiments. The functionality of the complete system „HYDRO-LaWa“ and the first practical results were evaluated in three different application fields. The hydrostatic measurement system was evolved in the third stage of development FG-LSW-V2 with high measuring accuracy and low standard deviation of 0.1 mm to 0.2 mm. Therefore, a robust, long term stable and real-time complete measuring system is available for the market entry in very near future.



Benndorf

Sensornetzwerk integriert werden. Die neuentwickelte Laser-Präzisionsschlauchwaage misst Neigung-, Setzung- und Temperaturunterschiede in einem kompakten und modularen System mit hoher Messgenauigkeit sehr präzise, kontinuierlich sowie aufgrund der konstruktiv bedingten Robustheit über lange Zeiträume in Echtzeit [1].

Der Beitrag gliedert sich in drei Abschnitte. Einleitend werden die Hardware und das Messprinzip der neuartigen Messkombination vorgestellt. Im zweiten Abschnitt werden die Grundlagenversuche zur industriereifen Entwicklung des Systems aufgezeigt und abschließend drei Anwendungsgebiete zur Evaluierung des Messinstrumentes in bewegten Bauwerken präsentiert.

2. Hardware und Messprinzip

2.1 Hydrostatisches Nivellement

Herkömmliche Schlauchwaagensysteme sowie das entwickelte Messsystem „HYDRO-LaWa“ beruhen auf dem physikalischen Prinzip der kommunizierenden Röhre. Das heißt, besteht ein System aus mehreren Röhren bzw. Schlauchwaagen, die verbunden und mit einer Flüssigkeit befüllt sind, dann wirkt auf beide Flüssigkeitsoberflächen die gleiche Schwerkraft. Das Prinzip basiert auf den Annahmen der Bernoulli-Gleichung, die eine stationäre, nichtturbulente Strömung in Flüssigkeiten beschreibt [3]:

$$\frac{1}{2} * \rho * v^2 + p + \rho * g * h = const. \quad (1)$$

mit:

- ρ ... Dichte der Flüssigkeit
- v ... Geschwindigkeit der Flüssigkeit
- p ... Druck
- g ... lokale Schwerebeschleunigung
- h ... Vertikalkomponente

Aufgrund dieser Eigenschaft kann durch verschiedene Abtastverfahren der Flüssigkeitsoberfläche ein relativer Höhenmesswert generiert werden. Durch die vertikale Verschiebung einzelner Schlauchwaagen innerhalb eines Systems wird ein Verschiebungsbetrag zwischen den Schlauchwaagen bestimmt. Die Bestimmung der relativen Höhenänderungen zwischen den Schlauchwaagen erfolgt durch das Festlegen eines Referenzpunktes als statische Flüssigkeitsoberfläche. Hierzu wird eine im Messsystem befindliche Schlauchwaage gewählt und auf Grundlage dieser Flüssigkeitsoberfläche die relative Höhenänderung zwischen den Schlauchwaagen ermittelt [3].

Anhand der nachfolgenden Abb. 1 wird das Messprinzip sowie die relative Höhenbestimmung skizziert sowie mathematisch dargestellt.

Die Ermittlung der relativen Höhe ergibt sich durch:

$$\Delta h = B_{n+1} + K_B - (A_n + K_A) = \Delta H_1 + K \quad (2)$$

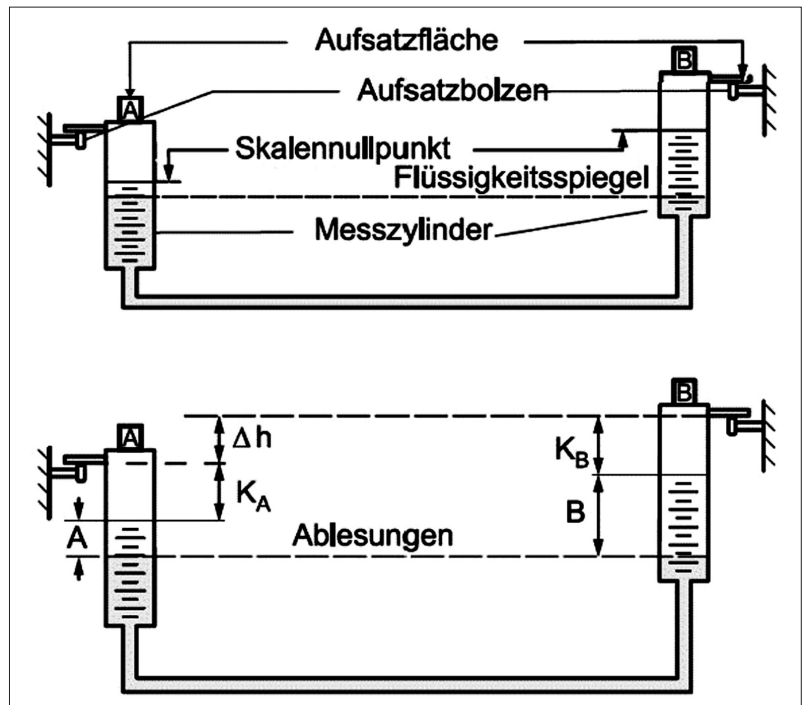


Abb. 1: Messprinzip hydrostatisches Nivellement nach Möser [3]

und nach Umhängen der Schlauchwaagen:

$$\Delta h = A_{n+1} + K_A - (B_n + K_B) = \Delta H_2 - K \quad (3)$$

mit:

- A_n ... Ablesung an A auf Bolzen n
- B_{n+1} ... Ablesung an B auf Bolzen n+1
- ΔH_1 ... Höhenunterschied mit Nullpunktabweichung
- K_n ... Nullpunktfehler
- $K = K_B - K_A$... Schlauchwaagenkonstante

Folglich ergibt sich für die Bestimmung der relativen Höhe als arithmetisches Mittel beider Messungen mit Umhängen:

$$\Delta h = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{2} = \frac{1}{2}(B_{n+1} - A_n + A_{n+1} - B_n) \quad (4)$$

Demzufolge lässt sich die Schlauchwaagenkonstante K ableiten:

$$K = \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{2} \quad (5)$$

Durch das Umhängen der Schlauchwaagen wird die Nullpunktabweichung theoretisch eliminiert [3].

Da das hydrostatische Messprinzip der Gesetzmäßigkeit nach Bernoulli unterliegt, wirken Messunsicherheiten in Abhängigkeit der physikalischen Größen aus der daraus entstehenden Gleichgewichtsbedingung:

$$p_1 + \rho_1 * g_1 * h_1 = p_2 + \rho_2 * g_2 * h_2 \quad (6)$$

Diese Messunsicherheiten können durch Korrekturen minimiert oder durch den Systemaufbau eliminiert werden. Zur Übersicht werden die Messunsicherheiten in Tab. 1 aufgeführt [3].

Schlagworte
Keywords

Hydrostatisches Nivellement
hydrostatic levelling

Schlauchwaage
hose levelling system

Bauwerksüberwachung
structural monitoring

Setzung und Neigung
settlement and inclination

Echtzeitmessung
real-time measurement

Deformationsmonitoring
deformation monitoring

Tab. 1: Messunsicherheiten hydrostatisches Nivellement nach Möser [3]

Messunsicherheit	Auswirkung	Minimierung / Korrektur
Druckunterschied	$\Delta p = 0,13 \text{ hPa}$ $\rightarrow \Delta h = 1,36 \text{ mm}$	als geschlossenes System (Luftschlauch)
Temperaturunterschied	Dichteverhältnis verändert sich $\Delta \rho = 0,1 \text{ K}$ $\rightarrow \Delta h = 0,01 \text{ bis } 0,02 \text{ mm}$	Temperaturkorrektur (Korrekturformel)
Nullpunktabweichung	Änderung der Konstanten K etwa 0,1 mm	Nullpunktabweichung durch Umhängen bestimmen
Schwingungen durch Vibrationen	Ungleichgewicht der Wassersäulen erzeugt Einlaufzeit	höhere Messauflösung (Detektion durch Sensorik)

Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten und der Korrektur sowie Eliminierung dieser, erreichen herkömmliche hydrostatische Nivellements mit Tastspitzenverfahren eine Messgenauigkeit von ca. 0,05 mm [3].

2.2 Laser-Präzisionsschlauchwaage (LSW)

Das entwickelte, automatisierte und optisch-elektronische Messinstrument ist mit Sensorik-Komponenten so ausgestattet, dass kleinste Neigungs-, Höhendifferenz- und Temperaturunterschiede in hoher Messgenauigkeit mit geringer Standardabweichung von 0,1 mm bis 0,2 mm erfasst werden können. Innerhalb von zwei Jahren wurde in drei Entwicklungsstufen ausgehend vom LSW-V1-Versuchsaufbau die Prototypen-Reihe FG-LSW-V1 bis V2 konstruiert, gefertigt, montiert, justiert, umfangreich in unterschiedlichen Anwendungsgebieten funktionell untersucht sowie in Zeitreihenanalysen evaluiert (s. Abb. 2) [4].

Die robuste, modulare, langzeitstabile sowie in Echtzeit ab 1 s kontinuierlich messende Laser-Präzisionsschlauchwaage (LSW) wird in einem Temperaturbereich von - 20°C ... + 50°C zum hochgenauen Bauwerks- und Rutschungsmonitoring eingesetzt. Ein Temperatursensor mit einer Messgenauigkeit von 0,1 K misst direkt in der Flüssigkeit der geeigneten LSW-Glasrohreinheit. Achsparallel zur Flüssigkeitssäule ist ein Beschleunigungssensor auf einer Platine so installiert, dass dieser in drei Achsen (X-, Y- und Z-Richtung) die Neigung des Systems bestimmen kann. Ein koaxial ausgerichteter 1 mW Punktlaser mit einem etwa 2 mm Strahldurchmesser und einer Wellenlänge von 650 nm ist konzentrisch unterhalb der Glasrohreinheit in einem gefassten Lasermodul justiert und montiert. Der Laserstrahl wird durch ein Schutzglas in die geneigte

Flüssigkeitssäule durchgeführt, sodass dieser bei einem horizontalen Anstellwinkel kleiner 44° an der Flüssigkeitsgrenzschicht totalreflektiert, durch das Glasrohr gelenkt und anschließend durch eine Zylinderstablins in eine Laserlinie geformt wird. Durch einen ermittelten Stablinsenabstand von 42,5 mm ist die elliptische Laserstrahllinie ca. 12 mm breit. Die Laserlinie wird in dieser Position auf die 97 mm langen CMOS-Scanzeilen (400 dpi) gelenkt. Diese Scanzeilen sind longitudinal zur Glasrohrachse nebeneinander angeordnet und mit einem ca. 5 mm großen Versatz auf einer Hauptplatine mit einem Mikroprozessor montiert und elektronisch verbunden. Die erzeugte Laserstrahllinie wird auf den CMOS-Scanzeilen als umgerechneter Höhenmesswert in Form eines Messsignals ausgegeben. Die integrierten Mikroprozessoren in den LSW übertragen die Messdaten der Temperaturen, Neigungen und Höhenmesswerte in variablen Messzyklen von minimal 1 s bis maximal 6 h über ein Datenerfassungsmodul bzw. Steuergerät in die Schnittstellen-Software „HYDRO-LaWa 3.0“ zur anschließenden Auswertung auf dem PC oder Notebook. Die Einbindung der erzeugten Messdaten in geeignete Sensor-Netzwerke bilden die Grundlage für dreidimensionale visuelle Überwachungsanalyse-Systeme mit Neigungs- und Setzungsmonitoring im großen Einsatzspektrum dieser Deformationsprozesse [4].

2.3 Hard- und Softwarekonzept „HYDRO-LaWa“

Mit der konstruktiven Entwicklung der innovativen LSW geht die Konzeption eines modularen und kompakten Messsystems einher. Innerhalb dieser Systemkonzeption ist die Zielsetzung, dass Hard- und Software effizient miteinander verknüpft sind. Das Hauptaugenmerk

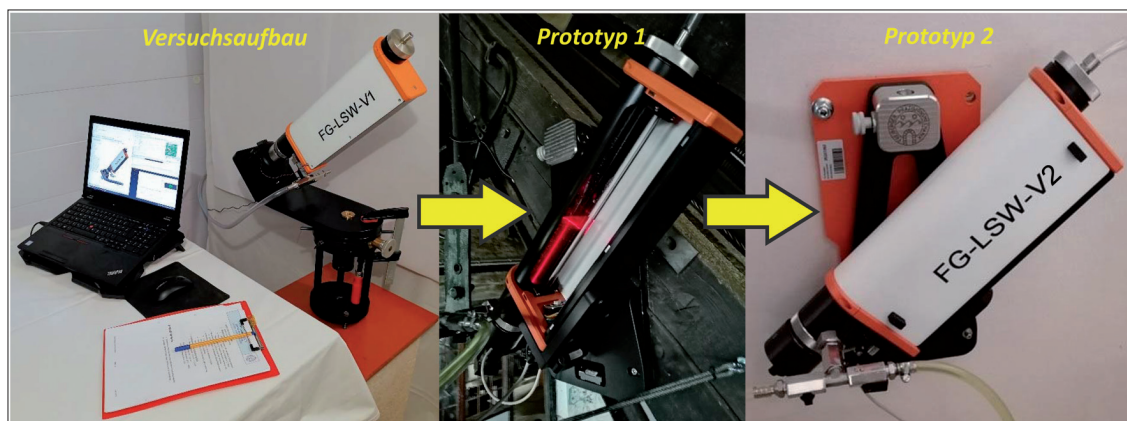


Abb. 2: Entwicklungsstufen zur industriereifen Laser-Präzisionsschlauchwaage „FG-LSW-V2“ nach Kubisch, Lorenz [4]

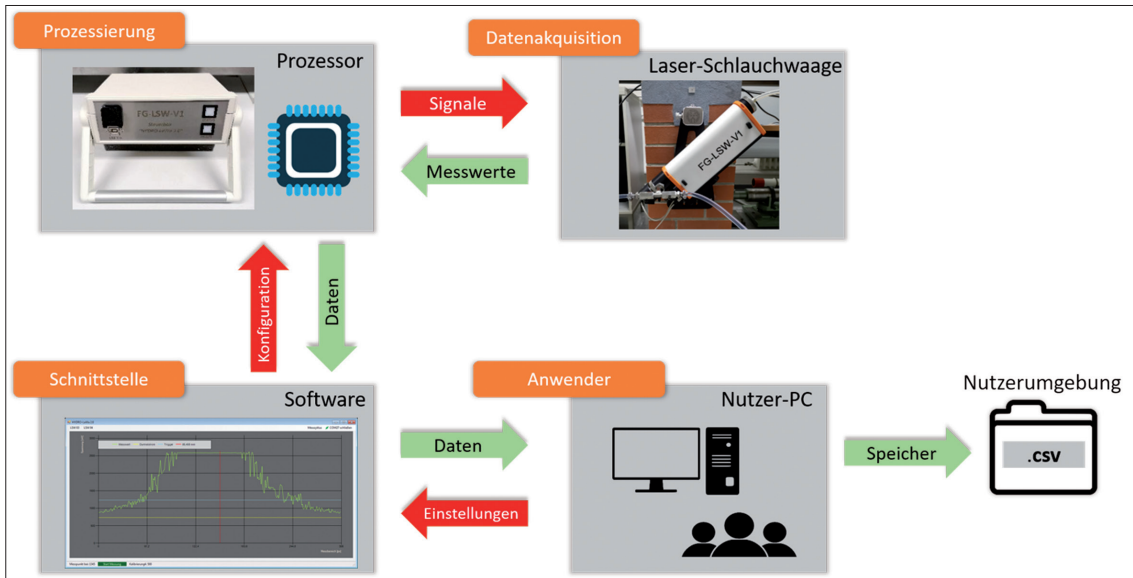


Abb. 3: Gesamt-Messsystem mit Hard- und Softwarekonzept „HYDRO-LaWa“ nach Lorenz [4]

bestand darin, alle Komponenten unter den zeitlichen Voraussetzungen für die hochauflösenden Messzyklen nutzerfreundlich zu gestalten. Dabei entstand die Idee, dass die komplette Auswertung der Messdaten innerhalb des Hard- und Softwarekonzepts realisiert wird. In Abb. 3 wird das Systemkonzept „HYDRO-LaWa“ visuell dargestellt [4].

Das „HYDRO-LaWa“-Messsystem liefert über die verbundene Steuerbox kontinuierliche Messwerte im

gewählten Messzyklus. In der Steuerbox sorgt eine prozessorgesteuerte Platine für die Auswertung des vom Laser erzeugten Messsignals und modelliert das Rohsignal so, dass die Messgenauigkeitsanforderungen erreicht werden. Die prozessierten Sensordaten der LSW werden abschließend in einem herkömmlichen csv-Dateiformat gespeichert und stehen dem Anwender für die nutzerspezifische Implementierung in ein bestehendes oder neues Auswertesystem zur Verfügung. Mit Hilfe der permanenten Kopplung von Nutzer-PC an das Steuergerät, können die Messdaten neben einer statischen Abfrage auch dynamisch in Echtzeit in eine Softwarelösung integriert werden. Die Messdatenaufbereitung erfolgt in der Steuerbox. Aufgrund einer Vielzahl von optischen Einflüssen, wie z. B. die Brechungseigenschaften (s. Kap. 3.4) der verwendeten Flüssigkeit oder die optische Reinheit der Glaskomponenten, ist das Rohsignal des Lasers Störuschen ausgesetzt und setzt eine Signalauswertung voraus. Zum Erreichen der geforderten Genauigkeit von 0,1 mm bis 0,2 mm konnte mit der Software „HYDRO-LaWa 3.0“ ein geeigneter Workflow erarbeitet und umgesetzt werden (s. Abb. 4) [4, 6].

Die Aufgabe des Workflows beinhaltet die Bereinigung des Rohsignals von Störuschen (-signalen), die Detektion des Signalmaximums und die Ermittlung dieses Maximums im Subpixelbereich. Die Umsetzung wurde anhand von zwei verschiedenen Ansätzen verfolgt. Der erste Ansatz beruht auf der Methode der Fast-Fourier-Transformation (FFT). Hier wird das Rohsignal aus dem Parameterraum in den Frequenzraum des Signals transformiert (s. Abb. 5).

Es erfolgt anschließend die Eliminierung der Störfrequenzen, d. h. das Signalaussehen wird gelöscht. Der bereinigte Frequenzbereich des Signals wird nachfolgend wieder in den Parameterraum rücktransformiert, man spricht hier von der inversen FFT. Das Ergebnis ist eine störfreie Abbildung des Rohsignals.

Der zweite Ansatz beruht auf der Methode der Bereinigung des Rohsignals durch die Anwendung eines gleitenden Mittelwerts als Glättungsmethode auf das Rohsignal. Bei einer Signallänge von 256 Pixel

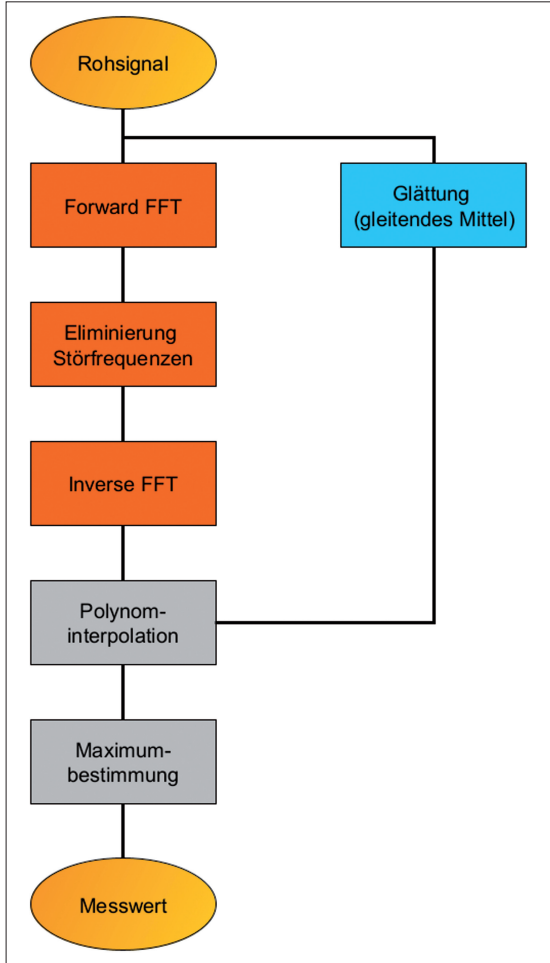


Abb. 4: Workflow zur Rohsignalauswertung nach Lorenz, Schuwerack [4, 6]

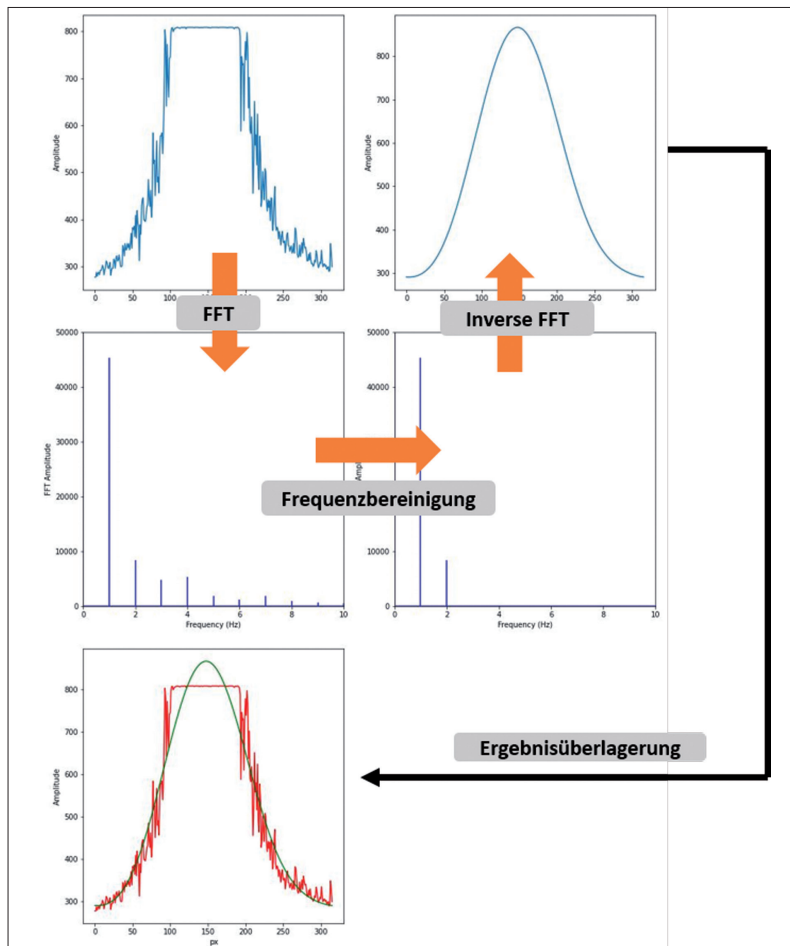


Abb. 5: Funktionsprinzip FFT-Methode zur Bereinigung des Messsignals nach Schuwerack [6]

erzeugt die beidseitige Glättung mit 25 Pixeln je Seite ein zufriedenstellendes Ergebnis, dass dem Ergebnis der FFT-Methode ähnelt. Die einfache Realisierung und die Rechenleistung sind hierbei vorteilhaft, obwohl die FFT-Methode ebenfalls ein sehr rechenschnelles Verfahren ist.

Die hohen Genauigkeitsanforderungen an das Messsystem setzen eine Messwertbestimmung im Subpixelbereich voraus. Die CMOS-Sensorzeile hat eine Auflösung von $63,5 \mu\text{m}$ pro Pixel. Zum Erreichen der Messgenauigkeit von $0,1 \text{ mm}$ bedarf es einer Subpixelauflösung von mindestens einem Zehntel bis zu einem Hundertstel Pixel, da weitere Streuungseinflüsse durch den Beschleunigungs- und Temperatursensor auf das Messergebnis Einfluss nehmen. Mit Hilfe einer Polynominterpolation nach dem Neville-Algorithmus wird die Messwertauflösung in den geforderten Bereich angehoben [6].

Der Algorithmus bildet über die Signalpunkte eine Polynomfunktion des gewählten Grades und approximiert durch Einsetzen des geforderten hochauflösenden Definitionsbereichs eine Signalkurve. Der Messwert kann durch die Bestimmung des Maximums bestimmt werden.

Ein abschließendes Ergebnis kann erst nach dem Stand dieser Veröffentlichung formuliert werden, da weitere Grundlagenversuche und Anwendungsgebiete mit der Software-Weiterentwicklung „HYDRO-LaWa 3.0“ fol-

gen. Erste Ergebnisse mit der FFT-Methode veranschaulichen, dass eine Messgenauigkeit $< 0,1 \text{ mm}$ erreicht werden konnte (vgl. Abb. 26). Weitere Untersuchungen, die den Vergleich beider Auswertemethoden bilden, werden zeitnah durchgeführt und evaluiert.

3. Grundlagenversuche

3.1 Neigungswinkel und Messflüssigkeit

Mit der Entwicklung des ersten LSW-V1-Versuchsaufbaus, durch die FPM Holding GmbH und der Electronic Renaissance Dresden, war es für die Konstruktion des Prototyp FG-LSW-V1 erforderlich, den exakten Neigungswinkel des Glasrohres in der LSW für die Totalreflektion des Laserstrahlenganges an der Grenzschichtfläche der geneigten Flüssigkeitssäule zu ermitteln (s. Kap. 2.2) [4]. Die Bestimmung des Neigungswinkels bildet die Grundlage für eine stabile Laserlinienabbildung auf den CMOS-Scanzeilen. Zur Bestimmung geeigneter Neigungswinkel entwickelte die TU Bergakademie Freiberg einen Versuchsstand unter Verwendung eines schwenkbaren Stativkopfes, eines Laserinterferometers sowie einer Totalstation mit Prismen (s. Abb. 6) [5].

Der LSW-V1-Versuchsaufbau befindet sich auf einer Grundplatte mit einem schwenkbaren Stativkopf, sodass eine Neigungsänderung eingestellt werden kann. Mit Hilfe von zwei Prismen, die parallel zur Sensorzeilenebene an der LSW angebracht wurden, konnte über die Polarkoordinatenbestimmung mit der Totalstation der Neigungswinkel ermittelt werden. Das Laserinterferometer wurde zusätzlich als Referenzsystem zur Beurteilung der Neigungsänderungen installiert. Aus der gemessenen Streckenänderung und der bekannten Strecke zwischen Drehpunkt und Reflektor kann die Neigung über trigonometrische Beziehungen bestimmt werden [5].

Der Einfluss des Neigungswinkels auf das Lasersignal wird durch eine simulierte Neigungsänderung des Stativkopfes ermittelt. Abb. 7 veranschaulicht die Laserlinienmessung auf der CMOS-Scanzeile für verschiedene Neigungswinkel. Jede Farbe bildet das Lasersignal für einen bestimmten Neigungswinkel von 40° bis 45° ab. Es ist eindeutig zu erkennen, dass sich das Signal für 40° , 44° und 45° stark verändert. Die Qualität des totalreflektierten Laserstrahlpeaks nimmt für Neigungswinkel $< 40,5^\circ$ und $> 44^\circ$ ab. Diese These konnte ebenfalls bei größer oder kleiner werdenden Winkel bestätigt werden. Die Untersuchung ergab, dass sich der ideale Laserstrahlpeak im Bereich zwischen 41° und 44° befindet. Für die Entwicklung des Prototyp FG-LSW-V1 wurde deshalb ein Anstellwinkel von 43° gewählt und konstruktiv umgesetzt [4, 5].

Da die Totalreflektion auf das Snelliussche Brechungsgesetz zurückzuführen ist, spielt für die Bestimmung des Brechungsindex die verwendete Flüssigkeit eine entscheidende Rolle bei der Ermittlung des idealen Anstellwinkels. In der TU Bergakademie Freiberg wurde die Flüssigkeit Glysofor L in den nachfolgenden

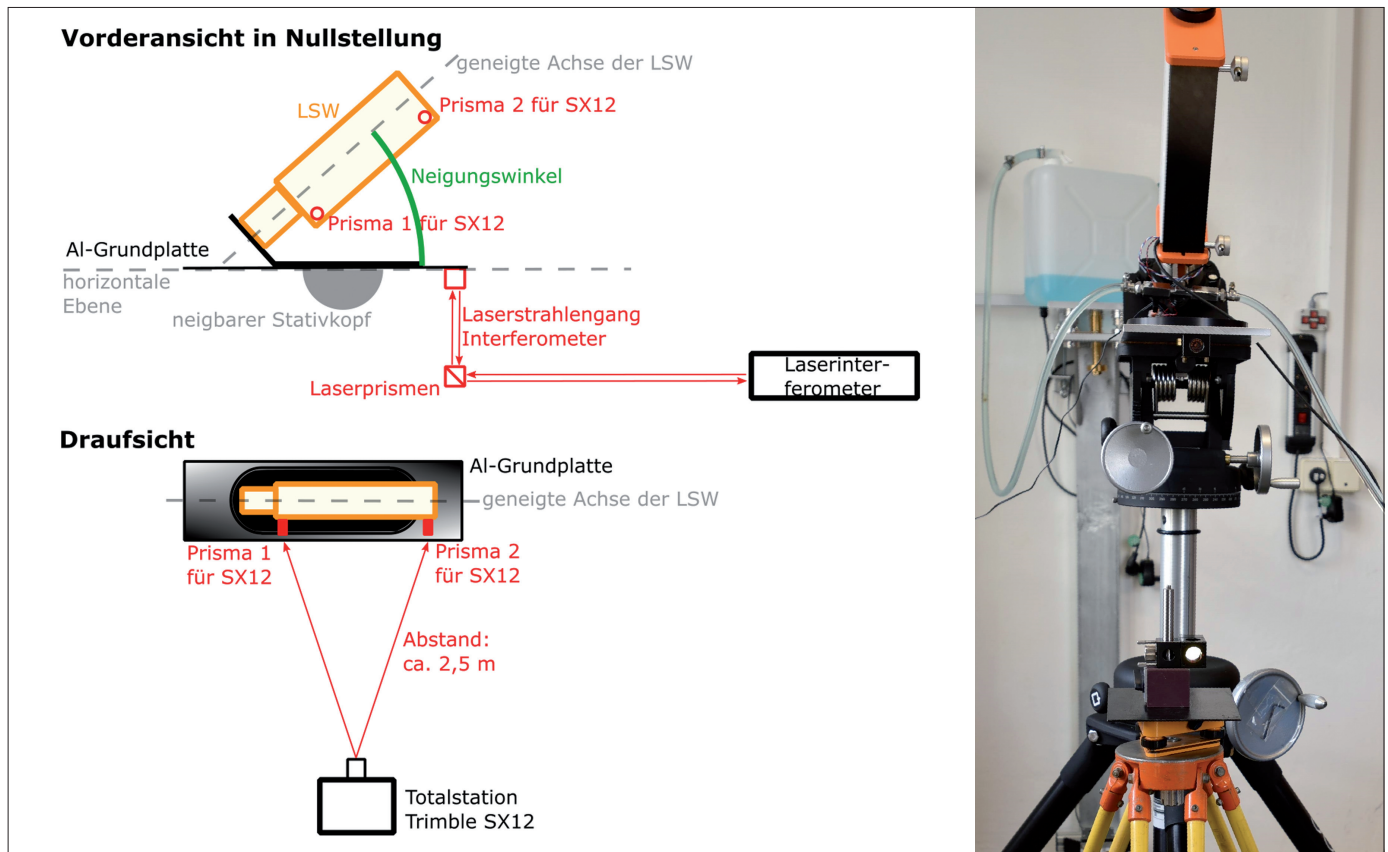


Abb. 6: Messaufbau Neigungswinkel-Bestimmung nach Radach, Martienßen, Merkel [5]

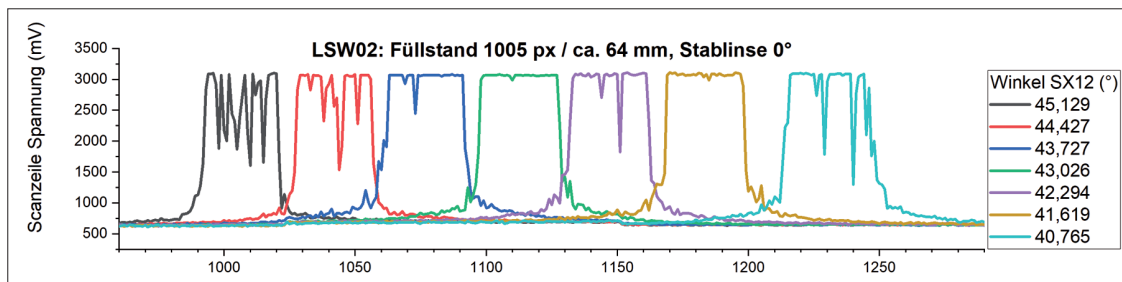


Abb. 7: Neigungswinkel-Laserstrahlanalyse mit LSW-V1-Versuchsaufbau und Glysofor L Flüssigkeit nach Radach [5]

Grundlagenversuchen mit dem Prototyp FG-LSW-V1 verwendet (s. Abb. 6). Während der Entwicklungsphase stellte sich heraus, dass sich die Glysofor-Flüssigkeit (blau) aufgrund von Inhomogenitäten und turbulenten Strömungen nicht für die weitere Verwendung eignet. Weitere Untersuchungen mit einer handelsüblichen SONAX-Flüssigkeit (blau) wurden durchgeführt, jedoch aufgrund fehlender Reproduzierbarkeit der Flüssigkeitszusammensetzung mit Herstellerinformationen (z. B. Dichte) wieder verworfen. Im aktuellen Entwicklungsstand konnte eine geeignete Flüssigkeit Glykosol N (gelb) verwendet werden, die optisch gute Eigenschaften besitzt. Außerdem ist es mit dieser möglich, herstellerbezogene Daten in die Ermittlung des Brechungsindex und Temperaturkorrektur einfließen zu lassen. Mit der Verwendung der Flüssigkeit Glykosol N musste jedoch erneut der Anstellwinkel auf 41° mit einer variablen Justierung von $\pm 2^\circ$ zur Weiterentwicklung des Prototypen FG-LSW-V2 angepasst werden [4, 5, 6]. Weitere Untersuchungen der Flüssigkeit Glykosol N ergaben teilweise gelartige Ablagerungen in der geneigten Flüssigkeitssäule, die somit den Laserstrahlengang und das Messergebnis

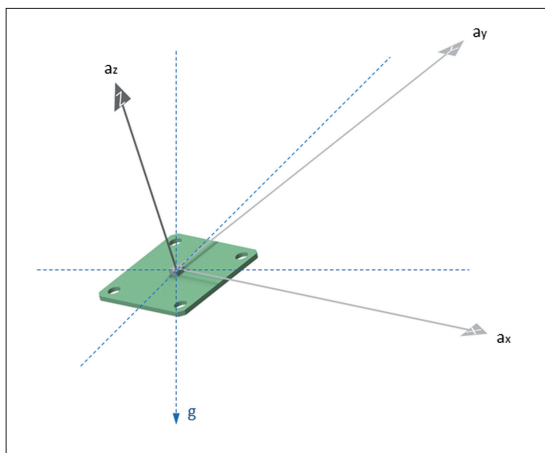
beeinträchtigen können. Für ein langzeitstabiles, reproduzierbares Messergebnis müssen nach dem ZIM-KOOP-Projekt Untersuchungen mit weiteren Flüssigkeiten durchgeführt werden.

3.2 Neigungsbestimmung

Ein wesentlicher Systembestandteil des „HYDRO-LaWa“-Messsystems ist neben der relativen Höhenbestimmung die zusätzliche Ermittlung von Neigungsänderungen innerhalb eines Messnetzes. Die Realisierung der Messaufgabe erfolgt durch die Implementierung eines Beschleunigungssensors. Es handelt sich hierbei um einen hochpräzisen 3-Achs-Beschleunigungssensor, der die Beschleunigungen in der X-, Y- und Z-Richtung misst (s. Abb. 8) [4].

Der Sensor befindet sich in einem koordinatenfesten Rahmen und wird von der Schwerkraft beschleunigt, die hier als Erdbeschleunigung „g“ wirkt. Wenn sich der Sensor neigt, wird ein Teil der Schwerkraft in Richtung Sensorachse gerichtet, während der andere Teil senkrecht zur Sensorachse steht. Daraus resultiert die Beschleunigung in Richtung der Sensorachse, die sich

Abb. 8:
Beschleunigungs-
sensor zur
LSW-Neigungs-
bestimmung nach
Lorenz [4]



als Vektorsumme der Beschleunigungen in X-, Y- und Z-Richtung ergibt. Jede dieser Komponenten wird durch den Beschleunigungssensor gemessen.

Die trigonometrische Beziehung des Sensors, der Beschleunigungskomponenten und der Schwerkraft führt zu folgender Bestimmung der Neigungsmesswerte in X- und Y-Richtung [3, 4, 6]:

$$X_{Neigung} [^\circ] = \arctan \left(\frac{a_x}{\sqrt{(a_y^2 + a_z^2)}} \right) * \frac{180^\circ}{\pi} \quad (7)$$

$$Y_{Neigung} [^\circ] = \arctan \left(\frac{a_y}{\sqrt{(a_x^2 + a_z^2)}} \right) * \frac{180^\circ}{\pi} \quad (8)$$

mit:

$a_{x,y,z}$... Beschleunigungswerte des Sensors
in X,Y,Z Richtungen

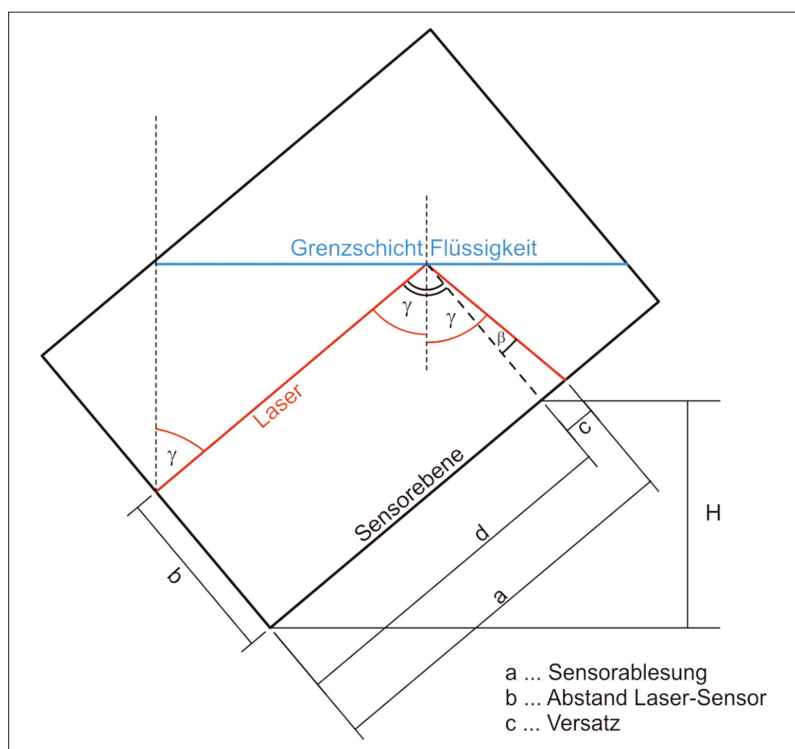


Abb. 9: Setzungsbestimmung mit vertikaler Skalenablesung H nach Lelle-Neumann [6]

Die Untersuchung des Beschleunigungssensors ergab eine Messgenauigkeit der Neigung von 0,02° und liefert somit eine ausreichende Genauigkeit für die Laser-Präzisionsschlauchwaage [4, 5, 6].

3.3 Setzungsbestimmung

Die in der Praxis verwendeten, hydrostatischen Schlauchwaagen-Messsysteme beruhen, wie in Kapitel 2.1 (Grundprinzip) erläutert, auf vertikalen Skalenablesungen. Das heißt, das Gefäßrohr ist vertikal und achsenverlängert unterhalb des Mauerbolzenzentrums aufgehängt. Die horizontale Aufhängung wird mittels einer Libelleneinrichtung während der Installation sichergestellt. Um eine Setzung zwischen zwei Höhenbolzen zu bestimmen, wird die Differenz beider Skalenablesungen gebildet und zusätzlich durch Umhängen die Nullpunktabweichung des Systems ermittelt. Das Ergebnis ist ein um den Nullpunktfehler korrigierter relativer Höhenunterschied. Durch die außergewöhnliche, aber dringend erforderliche Neigung des Glasrohres der LSW treten zusätzliche Faktoren für die Setzungsbestimmung auf. Der Laserstrahl verläuft konzentrisch-axial durch das Glasrohr und wird auf die achsparallelen Sensorzeilen über Totalreflektion an der Grenzschichtebene der Flüssigkeit abgebildet. Hebt oder senkt sich die Flüssigkeitssäule, ändert sich ebenfalls der Ablesewert korrelierend mit dieser Änderung [6].

Abb. 9 veranschaulicht den Laserstrahlengang und dessen Ablenkung an der Flüssigkeitsoberfläche unter einem beliebigen Vertikalwinkel γ . Aufgrund des Grenzwinkels von $> 45^\circ$ für die Totalreflektion wird der Ablenkwinkel niemals 90° erreichen, sondern um den Winkel $\beta = 2\gamma - 90^\circ$ abweichen. Aus dieser Überlegung heraus ergibt sich für die Sensorablesung ein Versatz c von der tatsächlichen Sensorablesung d. Für diesen Versatz kann keine Eliminierung durch die Differenzbildung der Skalenablesung an mind. zwei LSW erfolgen, da die Neigungsausrichtung stetig variiert. Aus der Ermittlung der tatsächlichen Sensorablesung d kann unter Berücksichtigung der angestellten Neigung ein vertikaler Ablesewert H berechnet werden. Dazu gelten folgende Berechnungsvorschriften.

Für den Winkel γ gilt bei einem Neigungswinkel ausgehend von der Horizontalebene:

$$\gamma = 90^\circ - X_{Neigung} [^\circ] \quad (9)$$

Die tatsächliche Sensorablesung d ergibt sich aus:

$$d = a - c \quad (10)$$

mit:

$$c = b * \tan(2\gamma - 90^\circ) = b * \tan(\beta) \quad (11)$$

Die vertikale Skalenablesung H setzt sich anschließend zusammen mit:

$$H = d * \cos(\gamma) \quad (12)$$

$$H = [a - b * \tan(2\gamma - 90^\circ)] * \cos(\gamma)$$

Daraus ergibt sich für die Setzungsbestimmung das übliche Rechenverfahren wie aus den klassischen Schlauchwaagensystemen bekannt ist. Jedoch konnte im Rahmen der bisherigen Grundlagenversuche mit dem Prototyp FG-LSW-V1 keine Untersuchung hinsichtlich des Nullpunktfehlers durchgeführt werden. Der Nullpunktfehler ist aufgrund der konstruktiven Besonderheit ebenfalls neigungsabhängig und ändert sich sobald die LSW eine Neigungsänderung in X-Richtung erfährt. Mit der Weiterentwicklung FG-LSW-V2 werden mit den erweiterten Neigungseinstellungen die Nullpunktabweichungen untersucht. Es gilt zu prüfen, ob das Verfahren des Umhängens hier ebenfalls verwendet werden kann [3, 6].

Bei der Untersuchung des Neigungseinflusses auf die Sensorablesung treten neben dem Versatz c weitere optische Einflüsse auf. Aufgrund der unterschiedlichen Medien, die der Laserstrahl auf dem Weg zur Sensorzeile durchläuft, entstehen Brechungserscheinungen an den Mediengrenzflächen (s. Kap. 3.4). Der zusätzliche optische Versatz muss dementsprechend auf den Versatz c addiert werden und geht somit ebenfalls in die vertikale Setzungsbestimmung ein. Der Einfluss der optischen Medien auf den Versatz wird in Abb. 10 (Brechung durch Optiken) dargestellt. Durch die Berücksichtigung der Brechungswinkel ändert sich der Versatz um ein Fünftel und muss als zusätzlicher Versatz berücksichtigt werden. Der rote Pfeil zeigt den Versatz c ohne Brechungseigenschaften der Medien. Die schwarzen Linien sowie die Winkelangaben geben die Ausfallwinkel des Laserstrahls ausgehend von 3° Einfallswinkel am ersten Medium an. Durch die Anpassung des Strahls entsteht hier zum Beispiel ein zusätzlicher Versatz von ca. 0,8 mm, der auf den Versatz c extra addiert wird.

3.4 Brechungsindex

Das optische Messprinzip der LSW unterliegt dem Einfluss der integrierten Optikkomponenten, die für die Funktionsweise des Messsystems notwendig sind. Der Laserstrahl durchläuft acht Medien auf dem Strahlengang zur Sensorzeile. Dabei variiert die Strecke des Strahlengangs zwischen ca. 200 mm und 500 mm, je nach Flüssigkeitshöhe (modularer Messaufbau). Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen führen geringe Winkelabweichungen zu signifikanten Ableseränderungen auf der CMOS-Sensorzeile. Das heißt die generierten Messwerte auf der Sensorzeile müssen um den Versatz, der aufgrund der optischen Brechung entsteht, korrigiert werden.

In Abb. 10 wird der theoretische Laserstrahlengang ausgehend vom Auftreffpunkt des Lasers an der Flüssigkeitsoberfläche abgebildet. Dieser zeigt, dass aufgrund der Optiken und Medien ein zusätzlicher Versatz von ca. 0,8 mm bei einem 3° Einfallswinkel entsteht. Es gilt nun zu untersuchen inwieweit eine Änderung des Einfallswinkels, gleichbedeutend mit der Änderung des Neigungswinkels des Systems, diesen Versatz beeinflusst und zudem, wie hoch der Einfluss des Brechungsindex der Flüssigkeit auf diesen Versatz ist. Theoretisch ist bekannt, dass sich die Brechungseigenschaften einer Flüssigkeit durch Temperaturänderungen aufgrund der Dichteanpassung verändern. Daraus folgt, dass eine Temperaturänderung die Beschaffenheit der Flüssigkeit so verändert, dass daraus eine Veränderung des Brechungsindex hervorgeht und somit den ersten Ausfallswinkel beeinflusst. Folglich variiert ebenso der gesamte optische Versatz. Entscheidend ist hierbei lediglich der erste Ausfallswinkel, der aus dem Medienübergang Flüssigkeit zu Glas einhergeht.

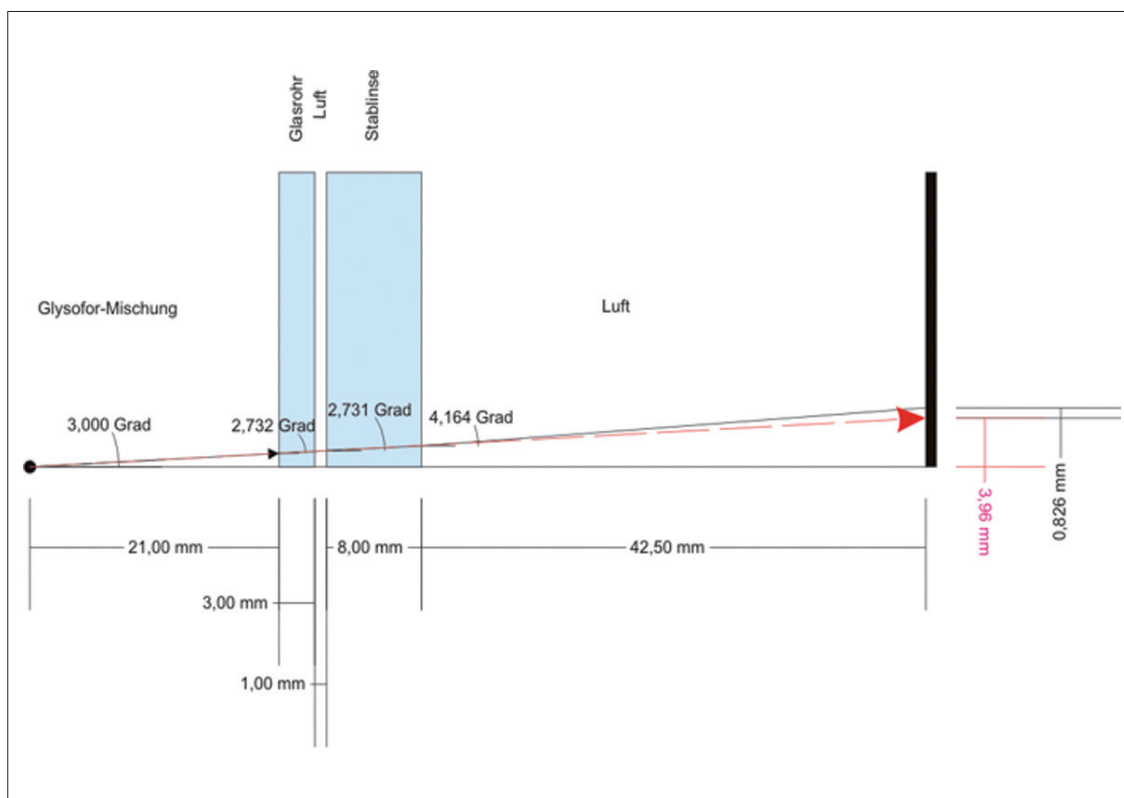


Abb. 10: Optischer Laserstrahl-Versatz mit Brechungsindizes von FG-LSW-V1 mit Glysofor L Flüssigkeit [6]

Die nachfolgenden Medien unterliegen einer festen konstruktiven Anordnung.

Die Berechnung des Strahlengangs erfolgt nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz [6, 7]:

$$n_1 * \sin(\delta_1) = n_2 * \sin(\delta_2) \quad (13)$$

mit:

- n_i ... Brechungsindizes der Medien
- δ_1 ... Einfallswinkel
- δ_2 ... Ausfallswinkel

In Abb. 10 wird verdeutlicht, dass für jeden Grenzübergang an einem Medium der ausfallende Winkel bestimmt und als neuer Einfallswinkel an der nächsten Grenzschicht verwendet wird, sodass der Laserstrahlengang theoretisch ermittelt werden kann. Für den Strahlengang lassen sich der optische Versatz an jedem Medium bestimmen und über den ganzen Strahlengang aufsummieren. Daraus ergibt sich der gesamte optische Versatz v [6, 7]:

$$v_i = \tan(\delta_i) * d_i \quad (14)$$

mit:

- δ_i ... Strahlwinkel
- d_i ... Länge des Mediums

Auf Grundlage dieser Berechnungen lassen sich für unterschiedliche Neigungswinkel und Brechungsindizes die Veränderungen des Strahlenganges nachbilden. Der optische Versatz liegt bei 0,009 mm pro 0,01 Änderung des Brechungsindex bei einem Einfallswinkel von 1°. Diese Relation verhält sich proportional zum Einfallswinkel von 2°, dieser ist demzufolge 0,018 mm pro 0,02 Änderung des Brechungsindex.

Im Zuge dessen muss nachgewiesen werden, wie sich der Brechungsindex der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Temperatur verändert, da seitens des Herstellers keine Daten zur Verfügung stehen. Die Bestimmung des Brechungsindex der Flüssigkeit Glykosol N (gelb) erfolgte mit einem Hohlprisma und einem Goniometer (s. Abb. 11). Ein Goniometer besteht aus einer Lichtquelle, die durch einen Kollimator Licht aussendet. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein horizontal verschiebbares Fernrohr. Zwischen beiden Optiken befindet sich ein Drehtisch. Der Drehtisch sowie das Fernrohr sind zentrisch übereinander aufgebaut und unabhängig voneinander horizontal drehbar.

Der Ablauf zur Bestimmung des Brechungsindex ist wie folgt [4, 6, 7]:

- Kollimation von Fernrohr und Kollimator ohne Hohlprisma
- Ablesung der Horizontalrichtung des Fernrohrs
- Ausrichtung des Hohlprismas auf Drehtisch mit minimaler Ablenkung
- erneute Kollimation von Kollimator und Fernrohr
- erneute Ablesung der Horizontalrichtung des Fernrohrs
- Differenzbildung beider Ablesungen ergibt minimalen Ablenkungswinkel

Aus dem minimalen Ablenkungswinkel lässt sich durch folgende Berechnungsvorschrift nach dem Prinzip der Brechzahlmessung der Brechungsindex für die Flüssigkeit bestimmen [4, 6, 7]:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\alpha + \delta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (15)$$

mit:

- α ... Prismenwinkel (ideal = 60°)
- δ ... minimaler Ablenkungswinkel

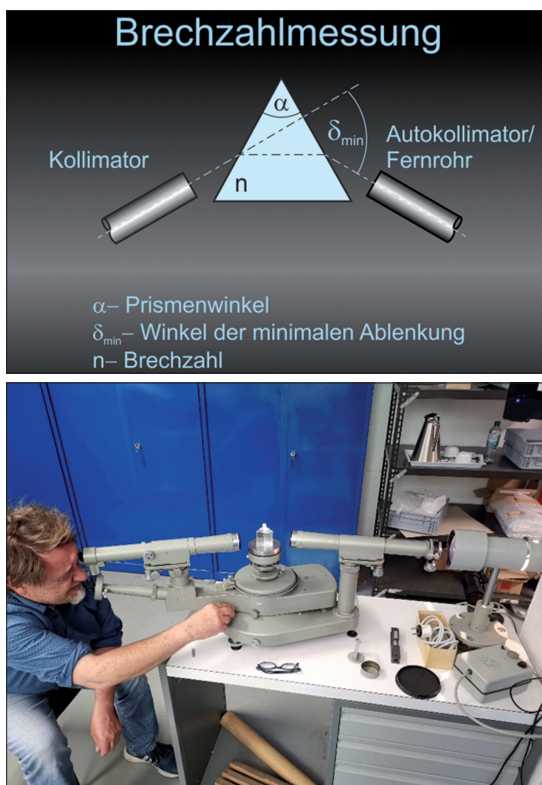
Zur Simulation der Temperaturänderung wurde die verwendete Flüssigkeit Glykosol N (44 vol.%) auf -20 °C in der Kältekammer der FPM Holding GmbH heruntergekühlt. Jedoch zeigte sich, dass der extreme Temperaturwechsel auf Raumtemperatur die optische Messung aufgrund von Kondensation unbrauchbar machte. Deshalb können nur Messreihen bis 0 °C zur Auswertung verwendet werden.

Abb. 12 stellt die Änderung des Brechungsindex von Glykosol N in Abhängigkeit der Temperaturänderung aus der Indexbestimmung mit dem Goniometer dar. Die Trendlinie bildet einen Anstieg von -0,0002 pro K Temperaturänderung ab. Dieser Versuch zeigte, dass der Brechungsindex der Flüssigkeit keine signifikante Änderung bei Temperaturänderung aufweist.

3.5 Temperaturkorrektur

In Kapitel 2.1. wird beschrieben, dass die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Messunsicherheit von hydrostatischen Nivellements besitzt. Die Temperatur wirkt als Einflussgröße auf die Dichte

Abb. 11: Brechzahlbestimmung mittels Goniometer in der FPM Holding GmbH [6, 7]



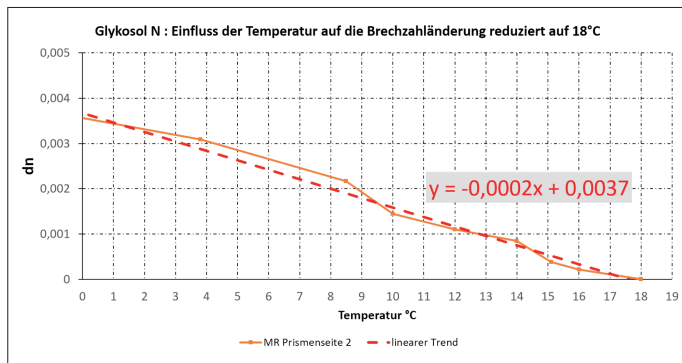


Abb. 12: Messflüssigkeit Glykol N Brechzahländerung im Temperaturbereich 0°C ... + 18°C [6]

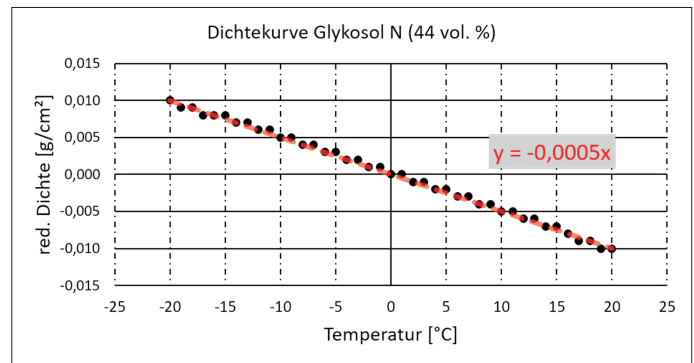


Abb. 13: Dichtekurve der Messflüssigkeit Glykol N (44 vol. %) [6]

der Flüssigkeit. Mit Senkung der Temperatur wird das Volumen der Flüssigkeit verringert und somit die Dichte größer. Analog dazu wird das Volumen der Flüssigkeit größer, sobald die Temperatur steigt und die Dichte folglich abnimmt. Durch den Effekt der Volumenänderung wirkt sich die Temperaturänderung als irrtümliche Messwertänderung aus, da die Flüssigkeitssäule sinkt oder steigt. Aus diesem Grund muss eine Temperaturkorrektur an das System angebracht werden. Da es sich um eine relative Messwertbestimmung handelt, ist hier nur die Temperaturdifferenz von Bedeutung. Kommt es zu einer gleichen Temperaturänderung an den Messpunkten, so verhält sich die Flüssigkeit an beiden Punkten entsprechend gleich.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Temperatur und Dichte kann als Temperaturkorrektur verwendet werden. Nach umfangreichen Flüssigkeitsuntersuchungen wird aktuell die Flüssigkeit Glykol N 44 vol. % verwendet. Für diese Flüssigkeit liegt

die Dichtekurve in Abhängigkeit der Temperatur vor. Anhand der Dichtekurve kann die relative Volumenänderung und somit der Korrektionswert abgeleitet werden (s. Abb. 13).

Aus der linearen Trendanalyse der Dichtekurve von - 25 °C bis + 20 °C ergibt sich die lineare Dichtegleichung [6]:

$$\rho_{korrr}(\vartheta) = -0,0005 * \vartheta \quad (16)$$

mit:

$$\vartheta \dots \text{Temperatur in } [^{\circ}\text{C}]$$

Aufgrund der kubischen Ausdehnung der Flüssigkeit im Glasrohr wird die Korrektur auf eine initiale Flüssigkeitssäule bezogen, die während der Installation des Messsystems ermittelt wird. Dabei wird mit einer Ablesegenauigkeit von 0,5 cm die Flüssigkeitssäulenhöhe bezogen auf einen horizontalen Nullpunkt ermittelt, d. h. Höhe vom Untergrund bis

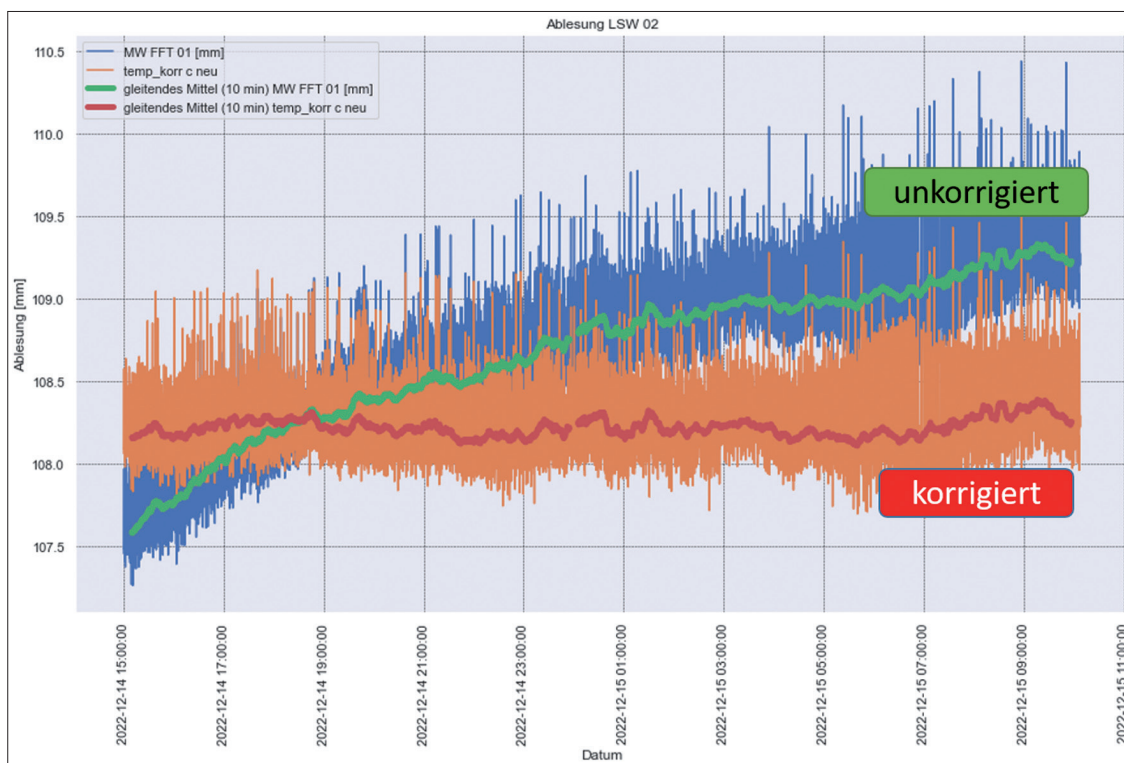


Abb. 14: Temperaturkorrektur [6]

zur Flüssigkeitsoberfläche. Aus der Initialhöhe und der Dichtgleichung resultiert die folgende Temperaturkorrektur (s. Abb. 14) [6]:

$$T_{\text{korr}}(\vartheta, H_{\text{ini}}) = -0,0005 * \vartheta * H_{\text{ini}} \quad (17)$$

mit:

$$H_{\text{ini}} \dots \text{Initialhöhe}$$

Daraus folgt aus Kapitel 3.3 die korrigierte vertikale Skalenablesung [6]:

$$H_{\text{korr}} = H + T_{\text{korr}}(\vartheta, H_{\text{ini}}) \quad (18)$$

In Abb. 14 werden unkorrigierte Messwerte (grüne Kurve) und korrigierte Messwerte (rote Kurve) dargestellt. Die Messwerte veranschaulichen die Ablesewerte einer LSW über einen bestimmten Zeitraum in der Kältekammer. Die Temperatur war zu Beginn des Zeitraums bei -10°C und stieg auf $+16^\circ\text{C}$ an. Anhand der grünen Kurve ist zu erkennen, dass die Flüssigkeitssäule mit steigender Temperatur ebenfalls steigt und eine relative Höhenänderung ermittelt wird, obwohl keine Höhenänderung vorgenommen wurde. Bringt man nun die Temperaturkorrektur nach Formel 17 auf die unkorrigierten Messwerte an, so wird dieser Anstieg korrigiert. Der korrigierte, rote Kurvenverlauf in Abb. 14 zeigt, dass die Temperaturkorrektur erfolgreich durchgeführt werden konnte.

3.6 Automatisierte Höhenreferenzmessung

Für die Verifizierung der Messergebnisse des „HYDRO-LaWa“-Messsystems müssen die Ergebnisse gegenüber einem Referenzmesssystem übergeordneter Ordnung verglichen werden. Für diese messtechnische Aufgabe wurde ein Messaufbau unter Verwendung der Laserinterferometrie gewählt, mit dem es möglich ist, hochpräzise Sollstrecken zu generieren. Für derartige Referenzmessungen verfügt das Geodätische Labor der TU Dresden ein Laser-Interferometer System der Firma RENISHAW mit dem Lasermodul ML10. Das System erreicht für lineare Distanzmessungen im Bereich bis 40 m eine Streckengenauigkeit von $0,1 \text{ ppm} \pm 0,025 \mu\text{m}$ bei einer Messauflösung von 1 nm [8]. Aufgrund der hohen Präzision des Systems eignet es sich für das Referenzieren der LSW (s. Abb. 15).

Im Rahmen des Projekts wurde ein Messaufbau konzipiert und entwickelt, der es erlaubt hochpräzise und automatisierte Höhenverschiebungen für eine LSW-Aufnahme zu simulieren. Der Messaufbau besteht aus einer drei Meter langen Profilschiene auf dem vier kugelgelagerte Führungsschlitten montiert sind. An diesen Führungsschlitten ist ein Schlauchwaagen-Stativ mit einem Höhenbolzen nach Meißer installiert, der eine vertikale Bewegung einer LSW auf dieser Profilschiene ermöglicht. Mit Hilfe eines Linearmotors und einer Spindel, die sich starr verschiebt, kann der Stativschlitten automatisiert bewegt werden. Zur



Abb. 15: Laboraufbau für automatisierte Höhenreferenzmessung der TU Dresden

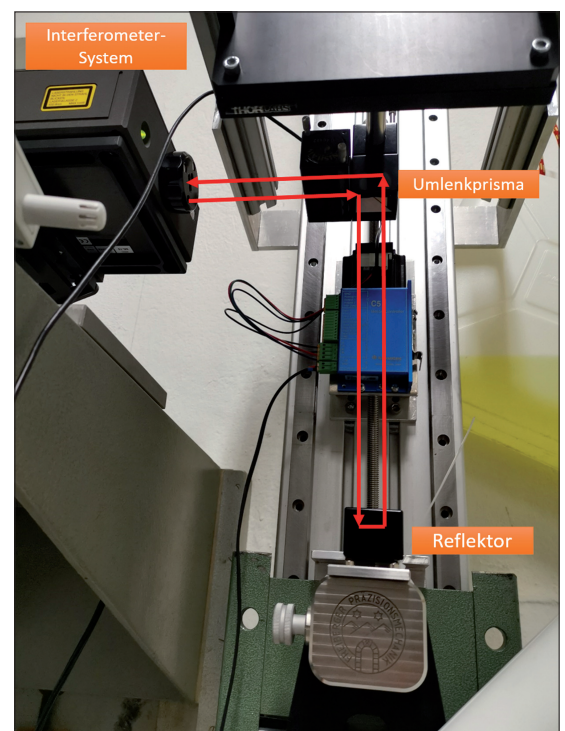


Abb. 16: Höhenreferenzmessung mit Interferometer

Ermittlung der Verfahrstrecke wird das oben genannte Interferometer-System so montiert, dass sich die Laserstrahlstrecke mit der Vertikalbewegung verändert. Die Umlenkung des Laserstrahls auf das Stativ erfolgt mit Reflektoren (s. Abb. 16).

Die Simulation der Höhenverschiebung bestand aus zwei LSW, von der eine an einem stabilen Mauerbolzen und eine am Stativschlitten montiert wurde. Die Schlauchverbindung ist ca. 5 m lang und wurde mit der Messflüssigkeit Glykosol N (44 vol. %) befüllt. Der Messablauf beinhaltete zwei Messungen, die über einen Zeitstempel synchronisiert wurden. Das Laser-Interferometer-System ermittelte die Laserstrecke mit einem Messzyklus von 1 s. Die Messwertbestimmung der LSW unter Verwendung der Software „HYDRO-LaWa 2.0“ erfolgte mit einem Messzyklus von 10 s. Die LSW wurde während der Datenaufzeichnung mit Hilfe des Motors in verschiedene Positionen gefahren. Dabei wurde jeweils der Hin- und Rückweg aufgezeichnet.

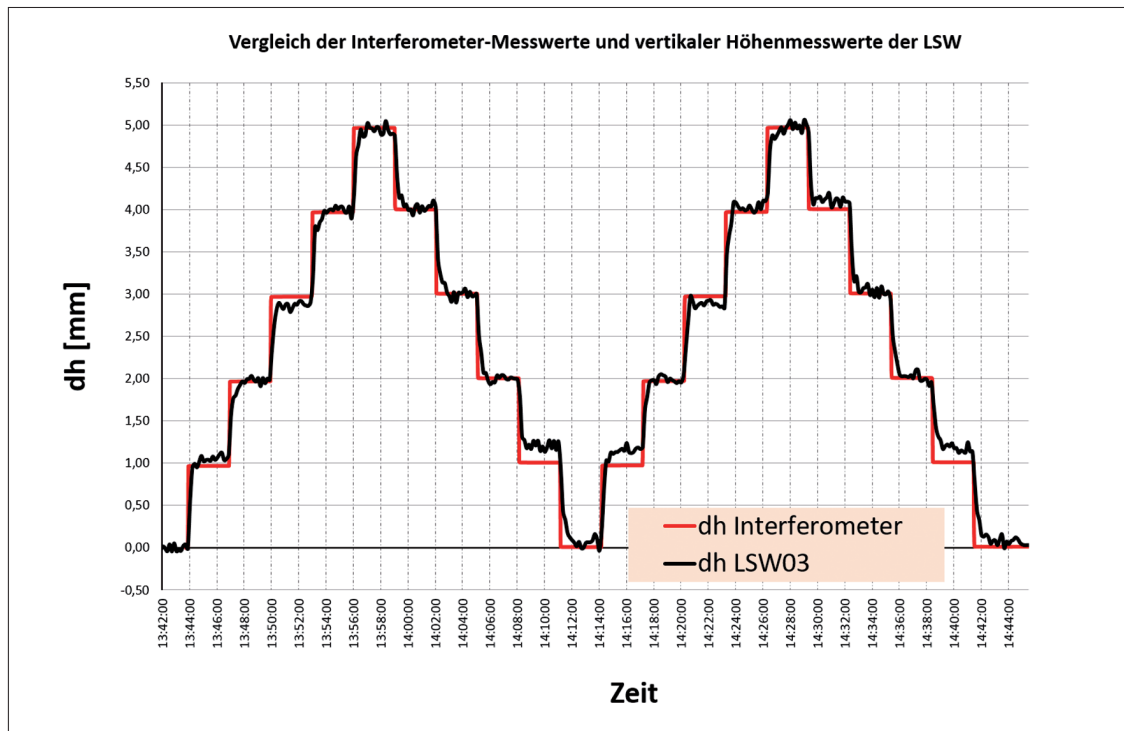


Abb. 17: Vergleich Schrittmotor und Interferometer mit LSW-Höhenmesswerte

Der Hin- und Rückweg wurde jeweils in 5 Positionsänderungen in 5 mm, 1 mm und 0,1 mm großen Schrittweiten durchgeführt. Nachdem die Position exakt angefahren wurde, muss eine Wartezeit von 3 min eingeplant werden, um das Einlaufverhalten der LSW zu berücksichtigen.

Abb. 17 stellt exemplarisch den Durchgang für einen Verfahrensweg von 1 mm dar. Aufgrund der Übersichtlichkeit wurde der Kurvenverlauf für den negativen Verfahrensweg an der X-Achse gespiegelt, so dass beide Richtungen besser vergleichbar sind. Der rote Kurvenverlauf stellt die ermittelte Position des Messschlittens durch das Interferometer-System dar, der als Soll-Position angenommen wird. Zeitlich überlappend

zeigt die schwarze Kurve die vertikale Positionsbestimmung aus den Messwerten der LSW, die berechnet wurde. Die Auswertung zeigt, dass der durch die LSW ermittelte Höhenunterschied im Maß der geforderten Genauigkeit von 0,1 bis 0,2 mm übereinstimmt, da sich die Soll-Ist-Abweichungen in diesem Bereich bewegen. Die Bestimmung der Messwerte unterliegt einer Messgenauigkeit von 0,04 mm, die während der Ruhephasen ermittelt wurde.

Die Auswertung der Messreihen zeigte jedoch auch, dass hohe Soll-Ist-Abweichungen systematisch auftreten und nur für bestimmte Sensorbereiche vorliegen. Die Ursache für diese Systematik muss in weiteren Untersuchungen mit dem Prototyp FG-LSW-V2

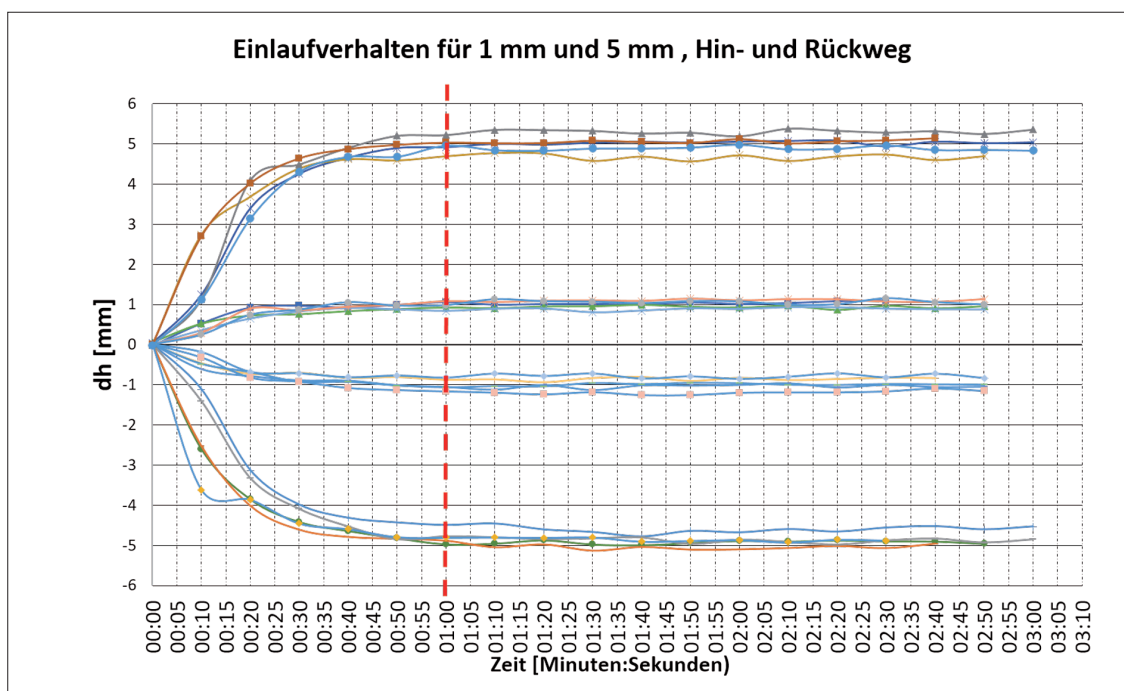


Abb. 18: LSW-Einlaufverhalten mit zwei Schrittmotor-Verfahrenstrecken

evaluiert werden. Eine abschließende Einordnung dieser Abweichung konnte noch nicht vorgenommen werden. Neben dem Soll-Ist-Höhenvergleich liefert die Untersuchung abschließende Erkenntnisse über das Einlaufverhalten der LSW. In Abb. 17 ist zu erkennen, dass die schwarze Kurve aufgrund der Trägheit des hydrostatischen Systems ein wiederkehrendes Einlaufverhalten besitzt.

Auf Grundlage mehrerer Messreihen konnte nachgewiesen werden, dass sich das durchschnittliche Einlaufverhalten auf ca. 1 min ausbildet. In Abb. 18 wird das Einlaufverhalten für zwei Messreihen mit einer sequentiellen Verfahrstrecke von 1 mm und 5 mm dargestellt. Der Gefäßausgleich ist für beide Strecken nach 1 min abgeschlossen.

Weitere Grundlagenversuche sind für den weiterentwickelten Prototyp FG-LSW-V2 im geodätischen Labor der TU Dresden geplant. Aufgrund der Montage der Sensorzeilen entstehen minimale Neigungsänderungen auf der Platine und somit stehen die Sensorzeilen nicht parallel zur Neigungsachse des Laserstrahls. Wie bei einer schräg gehaltenen Nivellierlatte wird deshalb ein zu großer oder zu kleiner Wert abgelesen, der sich im Kosinus-Verhältnis der Neigungsabweichung auswirkt. Deshalb ist es erforderlich in weiteren Grundlagenversuchen die tatsächliche Neigung der Sensorzeile zu ermitteln und gegebenenfalls Korrekturen anzubringen. Hierfür eignet sich der hier beschriebene Versuchsaufbau, um alle CMOS-Sensorzeilen abzutasten. Weiterführend können dadurch Erkenntnisse über die Versetzungsoffsets erlangt werden.

4. Anwendungsgebiete

4.1 Förderschacht-Monitoring „Alte Elisabeth“ Freiberg

Eines der Hauptanwendungsgebiete der Kooperationsentwicklung sind Überwachungsmessungen im Bergbau unter der Expertise der TU Bergakademie Freiberg. Im Rahmen des Projektes wurde ein Förderschacht-Monitoring in der Schachanlage „Alte Elisabeth“ in Freiberg realisiert. Die im 19. Jahrhundert erbaute tonnlägige Schachanlage verfügt über einen Förderkorb, der heutzutage immer noch befahren wird. Anhand einer Langzeituntersuchung soll mit dem „HYDRO-LaWa“-Messsystem die Bewegung und Setzung des Förderkorbes analysiert werden. Die Langzeituntersuchungen fanden insgesamt über einen Zeitraum von etwa 4 Monaten (16.08. – 09.12.2022) statt, da aufgrund von Optimierungsvorgängen zwischenzeitliche Unterbrechungen stattfanden. In den nachfolgenden Abschnitten wird ein vierwöchiger Zeitausschnitt im gesamten Messzeitraum vorgestellt (03.11. - 29.11.2022).

Der Messaufbau besteht aus zwei FG-LSW-V1, die am festen Mauerwerk (LSW 01) des Bergwerks und am bewegten Förderschacht (LSW 02) in einer Höhe von ca. 3,10 m und einer Entfernung von etwa 3 m montiert sind (s. Abb. 19). Zur Minimierung der Schwingungseinflüsse durch den einzie-

henden Förderschacht und durch das freie Hängen des Flüssigkeitsschlauches, wurde ein Drahtgespann zur schwingungsarmen Stabilisierung des Schlauches angebracht. Da die Schachanlage einem spürbaren Luftzug ausgesetzt ist, wurden beide LSW mit einem Luftschlauch als geschlossenes System verbunden. Für die Untersuchung in dem Zeitraum November 2022 kam die Flüssigkeit Glykosol N (44 vol. %) zum Einsatz. Der Messzyklus in dem genannten Zeitraum wurde auf 10 s gesetzt. Zur Verifizierung der Messergebnisse wurden die Ein- und Ausfahrten des Förderkorbes dokumentiert und dienen als Verifizierungsgrundlage der Messergebnisse.

Die Ergebnisse der Langzeituntersuchung stellen das vorhandene Potential des Messsystems hinsichtlich Monitoringaufgaben zur Detektion von Erschütterung im Bergbau dar. In den Abb. 20 und Abb. 21 werden die Neigungsmesswerte beider LSW in X- als auch in Y-Richtung dargestellt. Die blauen Kurven veranschaulichen die Messwerte der LSW am Förderschacht, die orangefarbenen die der LSW am Mauerwerk. Anhand der Graphen wird deutlich, wann eine Seilfahrt bzw. Schachtarbeiten am Förderschacht durchgeführt wurden, da sich zu diesen Zeitpunkten extreme Neigungsamplituden ausbilden. Die stärksten Amplituden werden an der am Förderschacht befindlichen LSW aufgezeichnet, da dort der Schwingungseinfluss am stärksten ist. Dieser Effekt zeichnet sich sowohl bei der X- als auch bei der Y-Neigung ab. Am Förderschacht haben X- und Y-Neigung die gleichen Ausmaße, während hingegen der Sensor am bewegten Förderschacht stärkere Schwingungen in Y-Richtung aufzeichnete. Daraus lässt sich eine Schwingung des Mauerwerks zum Förderschacht hin ableiten. Wie sich derartige Erschütterungen auf die Messwertbestimmung auswirken, wird in Abb. 22 dargestellt.

Analog zu den Neigungsmesswerten ist in blau die LSW am Förderschacht und in orange die LSW am Mauerwerk dargestellt. Der Kurvenverlauf für beide LSW zeigt sich im Trendverhalten linear und polynomial korrelierend. Jedoch wird anhand der Förderschacht-LSW der Einfluss der Erschütterung deutlich. Die Erschütterungen verursachen eine Störung der Flüssigkeitsoberfläche. Durch diese wird das Grenzschichtverhalten gestört und erzeugt eine undefinierte Ablenkung und Zerstreuung des Laserstrahls. Dadurch wird das Messsignal gestört und der Messwert verändert sich. Aufgrund dessen entstehen fälschlicherweise hohe Setzungsamplituden (s. Abb. 23), die aber durch den zusätzlichen Neigungssensor verifiziert werden können.

Abschließend ermöglichte die Langzeituntersuchung die Einschätzung und Evaluierung des Neigungssensors auf starke Erschütterungsbewegungen. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des Messsystems neben der Setzung auch Neigungsdaten für die Interpretation von Bauwerksbewegungen dienen können. Auf Grundlage dieser Erkenntnis können die Neigungsmessungen mit weiteren Sensornetzwerken erweitert werden oder in diese integriert werden. Es gilt in weiteren Untersuchungen zu erörtern, inwieweit



Abb. 19: Anwendungsgebiet Förderschacht-Monitoring „Alte Elisabeth“ Freiberg

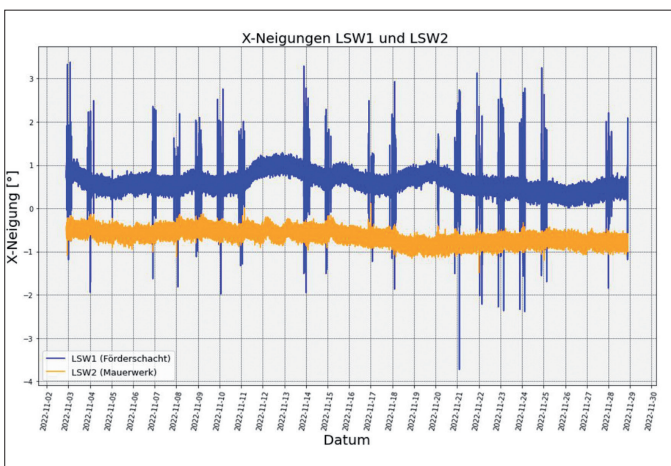


Abb. 20: X-Neigungen Förderschacht-Monitoring „Alte Elisabeth“ Freiberg

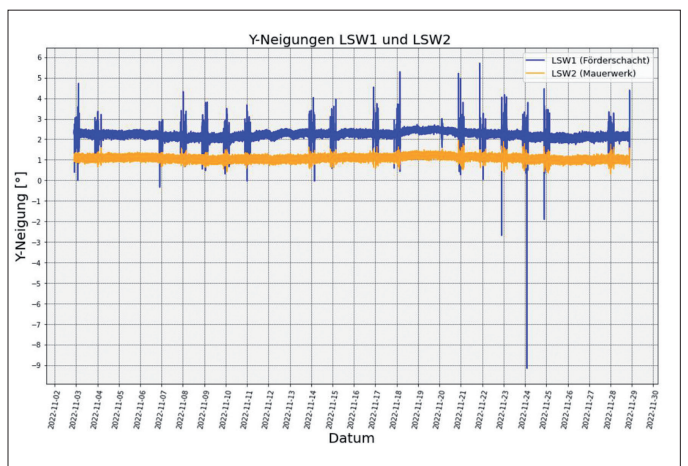


Abb. 21: Y-Neigungen Förderschacht-Monitoring „Alte Elisabeth“ Freiberg

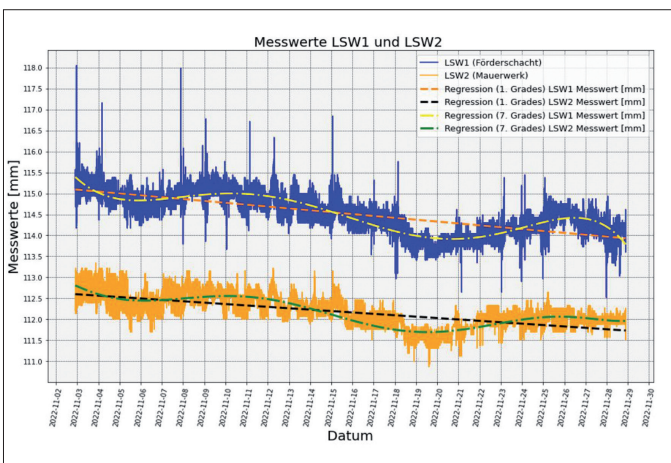


Abb. 22: Skalenmesswerte Förderschacht-Monitoring „Alte Elisabeth“ Freiberg

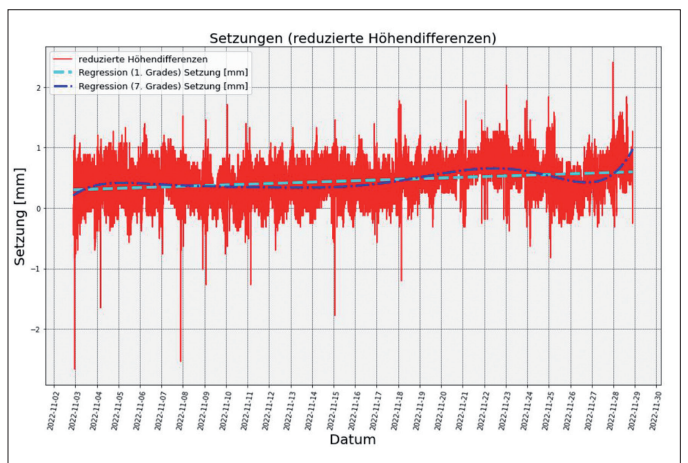
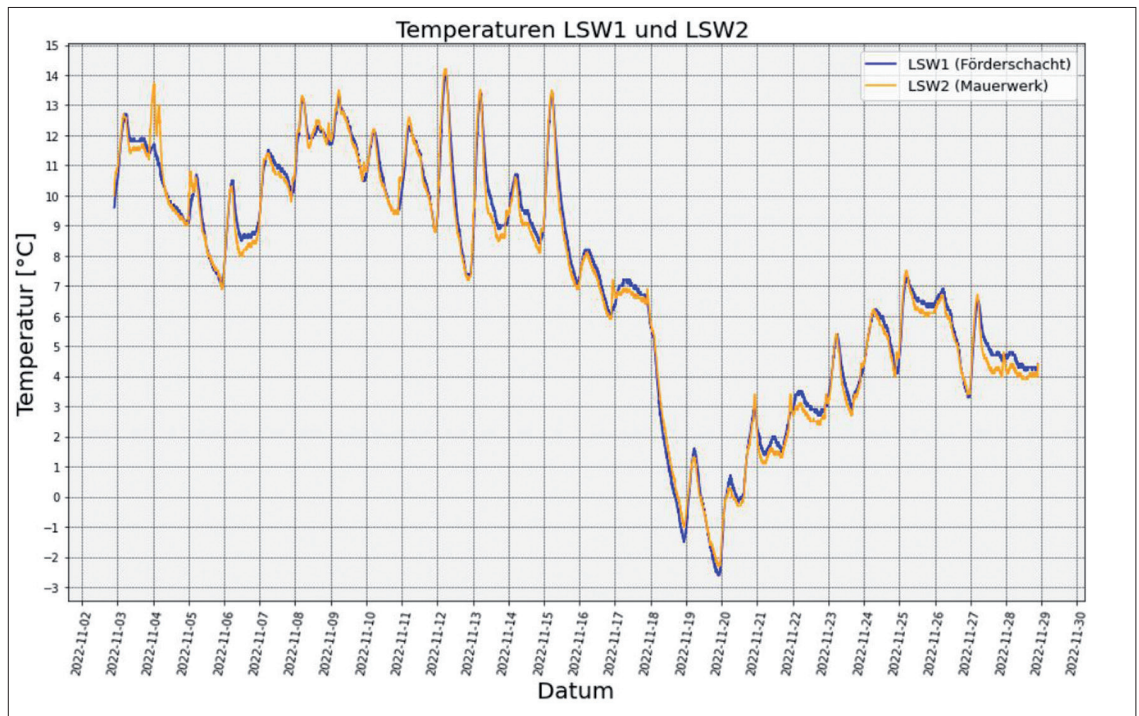


Abb. 23: Setzungen Förderschacht-Monitoring „Alte Elisabeth“ Freiberg

Abb. 24:
Temperaturmesswerte
Förderschacht-
Monitoring „Alte
Elisabeth“ Freiberg



ein direkter Zusammenhang zwischen Neigungsmagnituden des Sensors und der Erschütterungsintensität besteht. In Abb. 24 werden die Temperaturmesswerte der LSW 01 und LSW 02 in dem Zeitraum November 2022 veranschaulicht. Weiterhin konnte über den gesamten Zeitraum vom 16.08.2022 bis 09.12.2022 die Funktionalität des Messsystems in einem Temperaturbereich von -3 °C bis $+29\text{ °C}$ überprüft und erfolgreich nachgewiesen werden.

4.2 Kirchen-Monitoring Dresden Leubnitz-Neuostra

Die Kirche Dresden Leubnitz-Neuostra gehört seit dem Bau im 10. Jahrhundert zu einer der ältesten Kirchen Dresdens. Im Rahmen von jährlichen Vermessungsarbeiten durch die HTW Dresden stellte man fest, dass aufgrund zunehmender Trockenzeiten die Südseite der Kirche starken Setzungen exponiert ist. Diese Setzungen äußerten sich als Mauerwerksrisse in der Fassade. Im Rahmen aufwendiger Baumaßnahmen konnte die Südseite der Kirche mit 13 m tiefen Verankerungen stabilisiert werden. Als langjähriger Begleiter der Baumaßnahmen konnten Dipl.-Ing Jörg Leibiger vom Vermessungsbüro Leibiger Kesselsdorf und Sen.-Prof. Michael Möser das „HYDRO-LaWa“-Projekt in das Restaurationsprojekt integrieren, um einen Langzeiteinsatz mit den LSW zu ermöglichen.

Der Messzeitraum erstreckte sich über zwei Monate vom 29.09.2022 bis 02.12.2022. Innerhalb dieses Zeitraums wurde eine permanente und kontinuierliche Messung der LSW mit einem Messzyklus von 10 s durchgeführt. Als Ergebnis der Messungen wurden über 500 Tsd. Datensätze der zwei LSW aufgezeichnet. Diese Datensätze enthalten die Sensordaten aus dem Beschleunigungssensor, d.h. X- und Y-Neigungen sowie die Temperaturwerte. Darüber hinaus wurden für jeden Messzeitpunkt die Rohdaten, des detek-

tierten Laserpeaks aufgezeichnet und abgespeichert, um diesen im Post-Processing mit der FFT-Methode auszuwerten. Die Installation der Messeinrichtung war so konzipiert, dass eine LSW im Eingangsbereich des Kirchenschiffes als stabiler Höhenpunkt, die zweite LSW an der setzungsanfälligen Mauer der Südseite angebracht wurde (s. Abb. 25).

Die Verbindung der Schlauchwaagen erfolgte über einen 15 Meter langen Schlauch, der am Boden und entlang der Wände fixiert wurde. Zur Referenzierung der Messergebnisse diente vor Messbeginn ein Präzisionsnivelement unter Einbeziehung des Höhenbolzens P0004. Diese Referenzmessung fand vor und nach der Messkampagne statt.

Der Langzeittest des LSW-Messsystems zeigte, dass die Datenakquisition mit allen Hardware- und Softwarekomponenten stabil und zuverlässig läuft. Zudem war es möglich per WLAN-Schnittstelle einen Remote-Zugang zu erhalten und somit Daten per Fernzugriff zu erreichen und auszuwerten.

Die Messwerte in Abb. 26 bestätigen die Stabilität des Messinstruments und zeigen bei gleichen Temperaturverhältnissen einen korrelierenden Messwertverlauf für beide LSW. Besonders auffällig zeigt sich das Einlaufverhalten beider LSW zu Beginn der Messreihen. Eine Ursache dafür ist die Entladung von kleinen Luftbläschen, die durch das Befüllen entstehen. Die Langzeituntersuchung zeigt außerdem, dass die Neigungswerte mit dem Temperaturverlauf korrelieren und außerdem gegenläufig verlaufen. Eine abschließende Ursache für dieses Verhalten konnte noch nicht festgelegt werden. Eine Vermutung für das Verhalten besteht darin, dass der Beschleunigungssensor einem Driftverhalten ausgehend von der Temperatur ausgesetzt ist. Hierzu wurden erste Versuche durchgeführt, diese müssen aber weiter validiert werden.

Die statistische Auswertung der Messergebnisse wird in Abb. 26 rechts visualisiert. Zudem wird in der

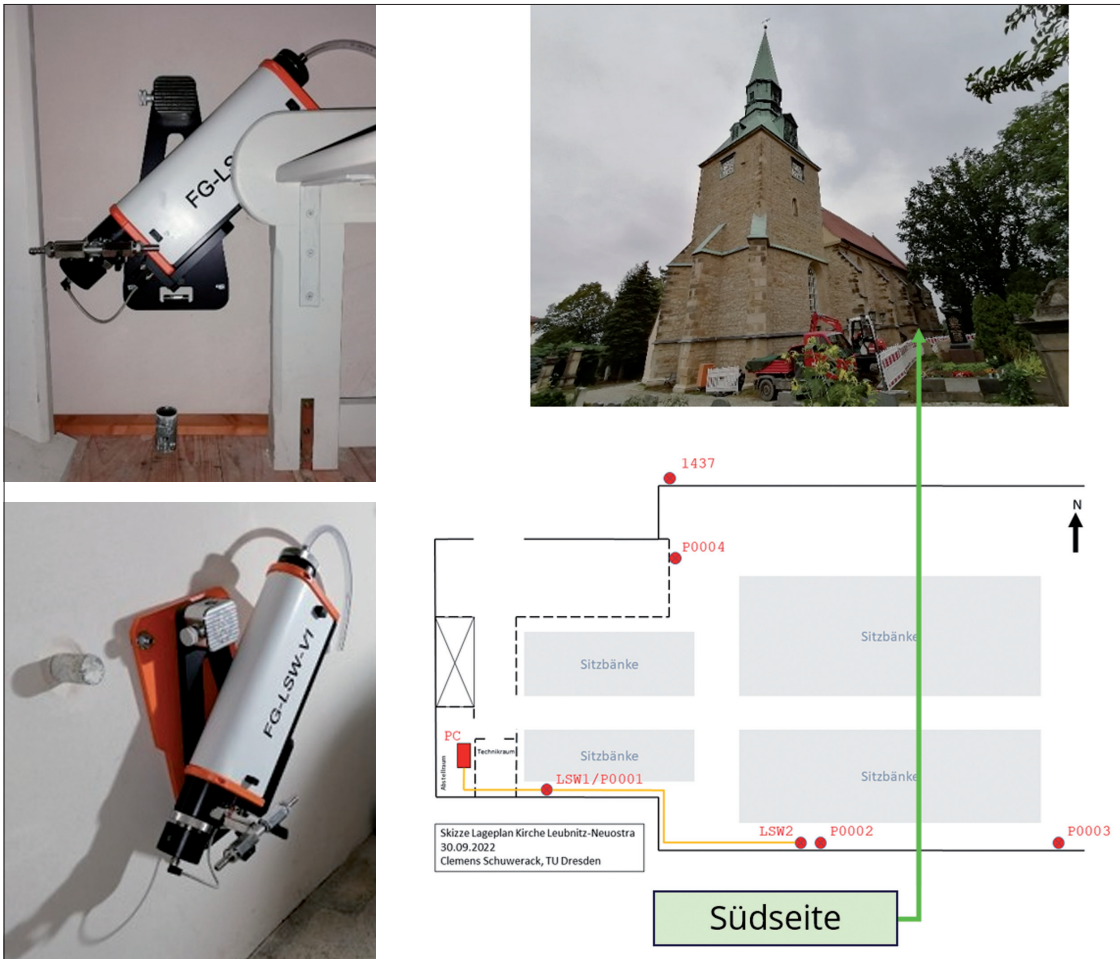


Abb. 25: Kirchen-Monitoring Dresden Leubnitz-Neuostra

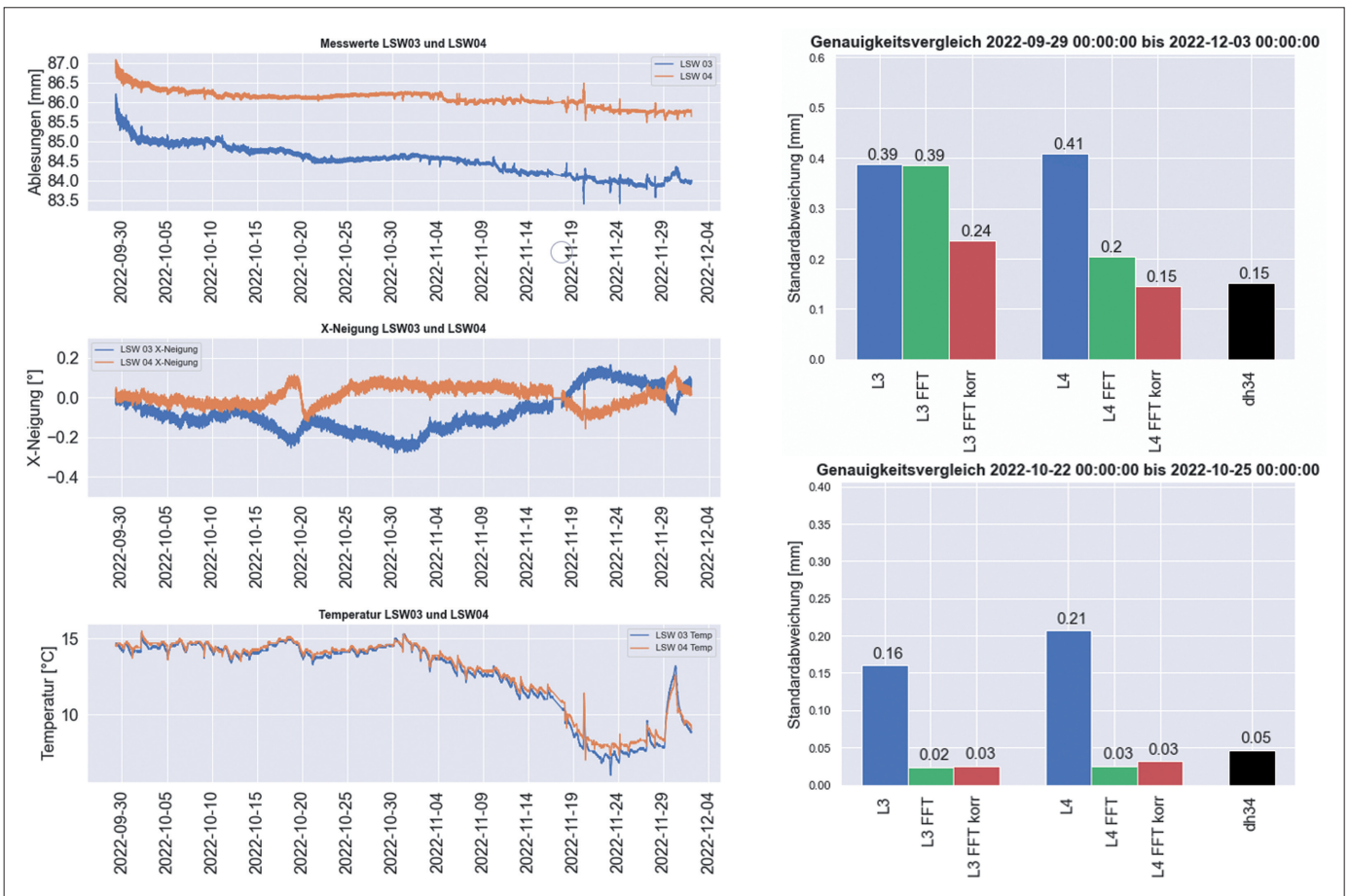


Abb. 26: Messdatenauswertung Kirche Dresden Leubnitz-Neuostra

Abb. 27:
Fundament-Monitoring
Fernsehturm
Dresden

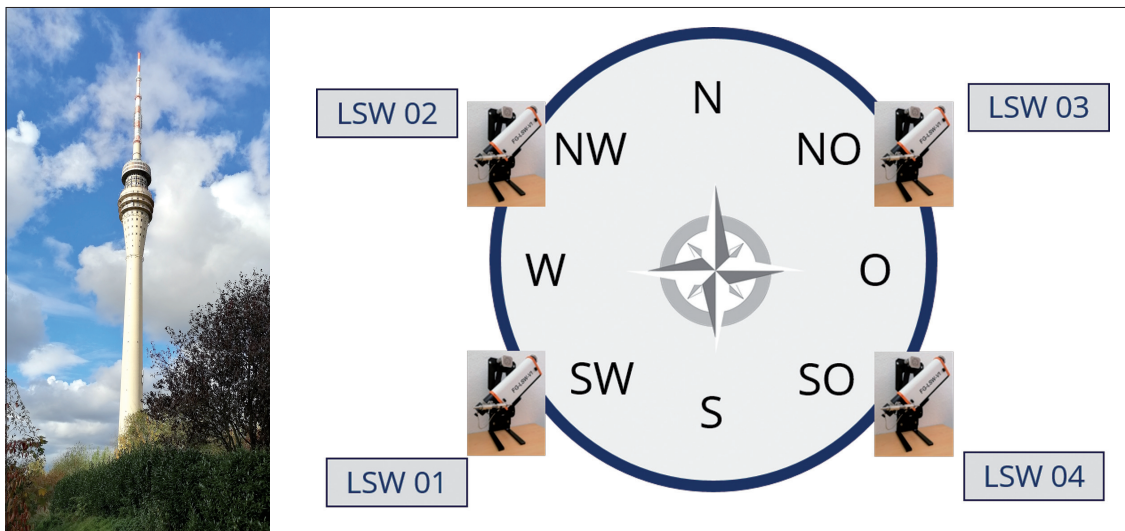


Abb. 26 oben die Messgenauigkeit über den gesamten Zeitbereich dargestellt. Außerdem unterteilt das Säulendiagramm die Standardabweichung auf verschiedene Ansätze der Messwertbestimmung. Von Interesse ist hier hauptsächlich der rote Balken, da hier die in Kapitel 2.3 angeführte Messwertbestimmung nach der FFT-Methode dargestellt wird. Mit Hilfe dieser Berechnungsmethode kann die Standardabweichung gegenüber der anfänglichen Flankenmethode (ohne Signalbereinigung) um mehr als Faktor 2 verbessert werden. Für LSW04 wird die geforderte Messgenauigkeit von $< 0,2$ mm erreicht. Gleiches gilt für die Ablesedifferenz beider LSW (schwarz abgebildet). Jedoch bleibt zu berücksichtigen, ob das Einlaufverhalten signifikante Einflüsse auf das Messergebnis hat. Des Weiteren wurden im Zeitraum der Messung weitere Bauarbeiten am Bauwerk vorgenommen. Wesentlich aussagekräftiger ist daher die Verwendung eines kleineren Zeitabschnitts wie in Abb. 26 unten rechts zu sehen ist. Hier werden Messgenauigkeiten von $< 0,05$ mm über einen Zeitraum von zwei Tagen erreicht. Damit zeigt sich das Genauigkeitspotenzial des Messverfahrens unter Verwendung der FFT-Methode.

Weiterführende Grundlagenversuche sind notwendig, um die tatsächliche relative Höhenänderung zu bestimmen. Diese Untersuchungen sind mit dem Prototyp FG-LSW-V2 durchzuführen. Die Referenz-

messung ergab eine relative vertikale Bewegung des Höhenbolzens LSW2 (LSW04) an der Südseite von $0,5$ mm. Die derzeitigen Erkenntnisse und Korrekturen reichen nicht aus, um die Referenz zu erreichen.

4.3 Fundament-Monitoring Fernsehturm Dresden

Zur Verifizierung der Langzeitstabilität der LSW konnte mit dem Fernsehturm Dresden eine realistische Einrichtung zur Bauwerksüberwachung genutzt werden. Im Rahmen der Lehre durch die Professur für Ingenieurgeodäsie an der TU Dresden werden seit 1964 Bauwerksüberwachungsmessungen im Fundament des Fernsehturms durchgeführt. Aufgrund der vorliegenden Messeinrichtungen (Höhenbolzen nach Meißer) eignet sich dieses als geeignete Anwendungsaufgabe. Das kreisförmige Fundament des Turms besitzt acht Höhenbolzen, die an den vier Haupthimmelsrichtungen sowie deren vier Nebenhimmelsrichtungen installiert sind. Das Monitoring unter Verwendung von vier FG-LSW-V1 sah vor, dass diese Messinstrumente an den Nebenhimmelsrichtungen angebracht werden (s. Abb. 27). Alle vier LSW werden in einem Messsystem verbunden und über ein Steuergerät angewählt. Über eine Ethernet-Verbindung wurde mit Hilfe eines LTE-Mobilfunkrouters der Fernzugriff eingerichtet. Die Messkampagne enthält Messdaten aus acht Messtagen, die zur Auswertung dienen.

Auf Grundlage der jährlichen Untersuchungen, aus den letzten knapp 60 Jahren, konnten im Vorfeld große Setzungen ausgeschlossen werden, da die jahrzehntelang bestehende Gründung im Boden kaum äußeren Einflüssen ausgeliefert ist. Aus dem Jahresbericht 2021 der TU Dresden für die jährlichen Überwachungsmessungen des Fernsehturms resultieren Setzungen im Bereich von $\pm 0,01$ mm bis $\pm 0,04$ mm für die Höhenbolzen [9].

Die Messergebnisse zeigen, dass die LSW als Gesamtsystem unter stabilen Temperaturbedingungen diese Erwartungen erfüllt. Abb. 28 veranschaulicht die Setzungsergebnisse der vier LSW. Die Grafik stellt das Setzungsverhalten in Bezug auf LSW 01, d. h. die Höhenunterschiede LSW 01 zu LSW 02 (dh 12), LSW 01

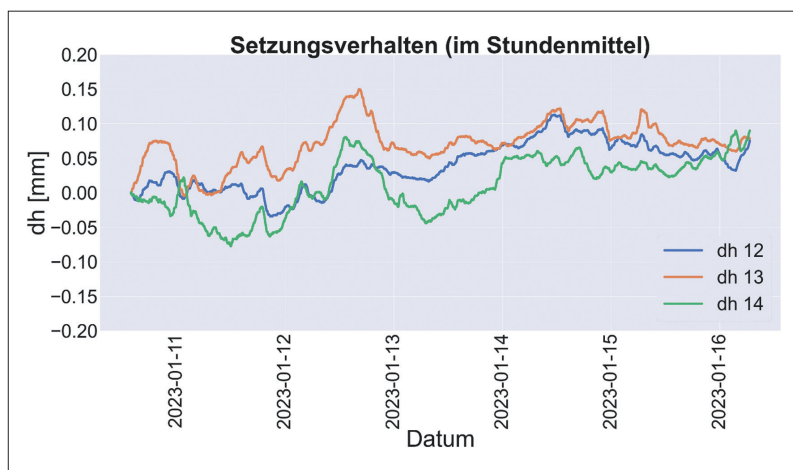


Abb. 28: Setzungsverhalten Fundament-Monitoring Fernsehturm Dresden

zu LSW 03 (dh 13) und LSW 01 zu LSW 04 (dh 14) dar. Die Zeitreihe wurde über den gesamten Messzeitraum mit einem gleitenden Mittel über eine Stunde optimiert. Anhand des Kurvenverlaufs wird ersichtlich, dass sich die Setzung großräumig im Bereich von unter einem Zehntel Millimeter bewegt. Das bestätigt, die aus dem Jahresbericht 2021 vorliegenden Setzungswerte [9].

Die Genauigkeit des hydrostatischen Messsystems zur Bestimmung des Setzungsverhaltens liegt bei:

$$\sigma_{dh12} = 0,03 \text{ mm}$$

$$\sigma_{dh13} = 0,03 \text{ mm}$$

$$\sigma_{dh14} = 0,04 \text{ mm}$$

Zusammenfassung

In dem BMWK ZIM-Kooperationsprojekt „HYDRO-LaWa“ wurde in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, der FPM Holding GmbH mit Unterauftragnehmer Electronic Renaissance Dresden und der TU Bergakademie Freiberg in dem Zeitraum von April 2021 bis März 2023 eine hochgenaue, hydrostatische Laser-Präzisionsschlauchwaage zur präzisen Ermittlung von Neigungen und Setzungen in drei Entwicklungsstufen konzipiert und in drei wesentlichen Anwendungsgebieten messtechnisch untersucht und evaluiert. Die Innovation liegt in der Kombination der zwei Messaufgaben Setzung und Neigung in einem Echtzeit-Messinstrument. Kontinuierlich automatische Messungen zur Überwachung von Deformationsprozessen an Bauwerken, Staudämmen, Talsperren, Brücken, Fundamenten, historischen Gebäuden und Türmen werden mit einer hohen Langlebigkeit bei Temperaturbereichen von -20°C ... $+50^{\circ}\text{C}$, robust, in Echtzeit und mit einer hohen Messgenauigkeit bei geringen Standardabweichungen von $0,1 \dots 0,2 \text{ mm}$ in einem Messbereich von ca. 200 mm (modular erweiterbar) durchgeführt.

Mit dem neuen Instrument sind minimale Echtzeit-Messzyklen von Setzungen, Neigungen und Temperaturen in den Messzyklen 1 s , 10 s und größere Zeitabstände bis 6 h langzeitstabil möglich. Es konnte nachgewiesen werden, dass unter Zuhilfenahme bekannter Messprinzipien hydrostatischer Nivellements, eine innovative Lösung mit optisch-elektronischer Messeinrichtung erfolgreich entwickelt wurde. Mit den aufgeführten Grundlagenversuchen und der Weiterentwicklung des Messprinzips konnte die Messeinrichtung ein hohes Genauigkeitspotenzial und die geforderte Messgenauigkeit von $0,1$ bis $0,2 \text{ mm}$ erzielen.

Die drei Anwendungsgebiete bestätigen die Robustheit, Messgenauigkeit, Langlebigkeit und Echtzeit-Messung des Gesamtsystems in Anbetracht verschiedener Temperatur- und Umgebungseinflüsse. Während dieser Veröffentlichung wurde die dritte Entwicklungsstufe FG-LSW-V2 fertiggestellt, mit dem jetzt weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Diese Versuchsreihen stellen den letzten Entwicklungsschritt zur endgültigen Markteinführung der LSW dar.

Diese Arbeit entstand innerhalb eines geförderten BMWK ZIM-Kooperationsprojektes der AiF Projekt GmbH, Förderkennzeichen KK5281201BA1 (TU BAF), KK5280701BA1 (FPM), KK5291401BA1 (TU Dresden).

Literaturverzeichnis

1. KUBISCH, F.; BENNDORF, J.; MÖSER, M.: ZIM-Antrag, FuE Kooperationsprojekt BMWi / AiF Projekt GmbH, Anhang zur Anlage 4, Neuentwicklung einer hochgenauen, hydrostatischen Laser-Präzisionsschlauchwaage zur präzisen Ermittlung von Neigungen und Setzungen, FPM Holding GmbH, TU Dresden, TU Bergakademie Freiberg, S. 1-40: 2021
2. FPM Holding GmbH, Freiberg: <https://fpm.de/index.php?lang=de>, Stand: 28.02.2023 / Katalog Ausgabe 2017 + 2018, Vermessungsgeräte aus Freiberg, S. 15: 2018
3. MÖSER, M.; HOFFMEISTER H.; MÜLLER, G.; STAIGER, R.; SCHLEMMER, H.; WANNINGER, L.: Handbuch Ingenieurgeodäsie - Grundlagen, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Wichmann VDE Verlag GmbH Berlin und Offenbach, 2012, S. 329 f., S. 336 f.
4. KUBISCH, F.; LORENZ, U.; BÖHME, H.; BÖHME, C.; LEBSUCH-NIACHOS, N.; HARTMANN, R.; VOGEL, U.; SPECK, I.: unveröffentlichte Präsentation für Zwischenbericht ZIM-KOOP-Projekt „HYDRO-LaWa“, FPM Holding GmbH (Freiberger Präzisionsmechanik) mit Unterauftragnehmer Electronic Renaissance Dresden (Lorenz, U.), 31.03.2022, S. 1-32
5. RADACH, C.; MARTIENSSEN, T.; MERKEL, N.; BENNDORF, J.: unveröffentlichte Präsentation für Zwischenbericht ZIM-KOOP-Projekt „HYDRO-LaWa“, TU Bergakademie Freiberg, 31.03.2022, S. 1-27
6. SCHUWERACK, C.; LELLE-NEUMANN, G.; MÖSER, M.: unveröffentlichte Präsentation für Zwischenbericht ZIM-KOOP-Projekt „HYDRO-LaWa“, TU Dresden, 31.03.2022, S. 1-36
7. Haag-Streit, Möller-Wedel Optical: https://www.haag-streit.com/fileadmin/Moeller_wedel_optical/Products/Goniometer/Gonio_II_Messaufgabe_4_MWO_Graphic_800x533.png, Stand: 20.04.2023
8. Renishaw Transducer Systems Limited: „Renishaw Laser-Interferometer-System ML10 Anwenderhandbuch“ Version PC 10/1, 03/1990
9. LELLE-NEUMANN, G.: „Überwachungsmessungen am Fernsehturm Dresden 2021“, TU Dresden Geodätisches Institut Professur f. Ingenieurgeodäsie: 12 / 2021