

## NEUES HOCHAUFLÖSENDES, MINIATURISIERTES UND MONOLITHISCHES TILTMETER DER TU ILMENAU

*Michael Kühnel, Thomas Fröhlich,*  
Institute of Process Measurement and Sensor Technology, TU Ilmenau

### ABSTRACT

Der Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Tiltmeters zur hochpräzisen Neigungsmessung. Die Auflösung liegt bei  $< 1$  mrad wobei der Messbereich  $\pm 2$  mrad beträgt.

*Index Terms* – Tiltmeter, Inklinometer, Nanorad, Pendel

### 1. EINLEITUNG

Mit einem Tiltmeter wird der Winkel zwischen dem Vektor der Erdbeschleunigung (Lotrichtung) und dem Normalenvektor der zu messenden Ebene bestimmt (Neigungsmessung).

Neigungsmessungen mit Nanorad Auflösung sind unter anderem im Bereich der Geophysik, Geodäsie [1-3] und der Präzisions-Kraftmess- und Wägetechnik [4-8] von Bedeutung.

Im Stand der Technik sind verschiedene Prinzipie zur Neigungsmessung beschrieben. Die bekanntesten verwenden mechanische Pendel, Gasblasen oder Flüssigkeitshorizonte als Neigungsreferenz [1]. Hochauflösende miniaturisierte Pendel-Tiltmeter mit kapazitiver Wegmessung werden von der Firma Lippmann Geophysikalische Messgeräte (LGM) produziert und erreichen Auflösungen von 1 mrad in Messbereichen von 0,5 – 2 mrad [9]. Ein Nachteil ist, dass diese aus vergleichsweise vielen Bauteilen mit entsprechend vielen Klemm-, Klebe- und Schraubverbindungen bestehen.

### 2. NEUES TILTMETER

In den vergangenen Jahren wurden an der TU Ilmenau Referenzneigungsmesssysteme (Tiltmeter) mit Nanorad Auflösung, einem sehr großen Messbereich von  $\pm 9$  mrad ( $\pm 0,5^\circ$ ) und sehr guter Linearität entwickelt [10, 11]. Diese Referenztiltmeter basieren auf der Messung von neigungsbedingten Querkräften, die auf hängend gelagerten Präzisionswägezellen wirken. Deren Nachteil ist die vergleichsweise große Komplexität der Mechanik, das hohe Eigengewicht und die hohen Herstellkosten.

Aus diesem Grund wurde ein vereinfachtes Tiltmeter entwickelt, welches nur aus zwei Bauteilen besteht: einer monolithischen Pendelmechanik und einem optischen Wegsensor. Mit dem Wegsensor wird eine Standardabweichung der Wegmessung von  $\sim 50$  pm bei einer Messfrequenz von 10 Hz erreicht. Die Pendellänge beträgt 0,1 m, die Masse des Pendels  $\sim 60$  g.

Die damit theoretisch erreichbare Standardabweichung der Neigungsmessung von  $\sim 0,6$  mrad bei 10 Hz Bandbreite wurde in Messungen mit dem neuen Tiltmeter nachgewiesen. Der Messbereich des neuen monolithischen Tiltmeters beträgt  $\sim \pm 2$  mrad. Durch die

monolithische Bauweise wird eine sehr hohe Langzeitstabilität sowie eine reproduzierbare und einfache Fertigung und Justage angestrebt.

## LITERATUR

- [1] Agnew, D. C., Strainmeters and tiltmeters. *Rev. Geophys.*, 24, 579-624, 1986
- [2] Vaníček, P., The earth tides. Department of Surveying Engineering Lecture Notes 36, University of New Brunswick, Fredericton
- [3] Klügel, T., Bestimmung lokaler Einflüsse in den Zeitreihen inertialer Rotationssensoren, Schlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt, Wettzell 2003
- [4] Diethold, C. and Hilbrunner, F., Force measurement of low forces in combination with high dead loads by the use of electromagnetic force compensation, *Meas. Sci. Technol.* 23 074017 doi:10.1088/0957-0233/23/7/074017
- [5] Vasilyan, S., Fröhlich, T., Direct Lorentz force compensation flowmeter for electrolytes, *Appl. Phys. Lett.* 105 (22)
- [6] Nesterov V., Facility and methods for the measurement of micro and nano forces in the range below  $10^{-5}$  N with a resolution of  $10^{-12}$  N (development concept). *Meas. Sci. Technol.*, 18 pp. 360 doi:10.1088/0957-0233/18/2/S06

## CONTACTS

Dr.-Ing. Michael Kühnel  
Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich

[michael.kuehnel@tu-ilmenau.de](mailto:michael.kuehnel@tu-ilmenau.de)  
[thomas.froehlich@tu-ilmenau.de](mailto:thomas.froehlich@tu-ilmenau.de)