

# Hochpräzise Neigungsmessung mit dem elektronischen Einachspendelsystem HRTM

Timo Kahlmann, ETH Zürich  
Christian Hirt, Universität Hannover  
Hilmar Ingensand, ETH Zürich

**Zusammenfassung:** In der Ingenieurvermessung kommt der Bestimmung absoluter sowie relativer Neigungen eine wesentliche Rolle zu. Im Rahmen dieses Beitrages werden einige wichtige Aspekte, die bei der hochpräzisen Bestimmung von Neigungen beachtet werden müssen, erläutert und Anregungen zur Erhöhung der erreichbaren Genauigkeit gegeben. Die vermittelten Erkenntnisse beruhen auf Erfahrungen mit dem hochauflösenden Pendelneigungsmesser *HRTM* (High Resolution Tiltmeter) der Firma *Lippmann Geophysikalische Messgeräte*.

## 1 Einleitung

Die elektronische Neigungsmessung ist mittlerweile elementarer Bestandteil vieler geodätischer Anwendungen. Jede Totalstation ist heute bereits mit elektronischen Libellen ausgerüstet, um den aufstellungsbedingten Stehachsfehler rechnerisch zu kompensieren. Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der Ingenieurvermessung (z. B. Planaritätsmessung und Ausrichtung von Industrieanlagen), der Geophysik (z. B. Erdbeben, Bodenbewegung und Erosion) und der Geodäsie. Mit dem hochauflösenden Neigungsmesser HRTM der Firma Lippmann Geophysikalische Messgeräte steht ein Sensor zu Verfügung, der z. B. in der astrogeodätischen Lotrichtungsbestimmung Anwendung findet. Am Institut für Erdmessung der Universität Hannover wurde eine digitale Zenitkamera entwickelt, deren Funktionsweise bei Hirt und Seeber (2002) näher beschrieben wird. Der für diesen Beitrag wichtige Aspekt ist in der Genauigkeitsanforderung von besser als 0.1" an die absolute Bestimmung der Neigung der Kamera beim Feldeinsatz zu sehen. Um dieser Forderung gerecht zu werden, sind Überlegungen und Untersuchungen zu den möglichen Einflussfaktoren auf den Neigungssensor notwendig. Im Rahmen dieses Beitrages sollen einige Aspekte näher betrachtet werden.

## 2 Konstruktionsprinzip

Der elektronische Pendelneigungssensor HRTM ist als Drei-Platten-Kondensator konzipiert. Wie Abbildung 1 entnommen werden kann, bildet das Pendel die mittlere Kondensatorplatte, die zwischen den miteinander durch das Gehäuse verbundenen äusseren Kondensatorplatten beweglich ist. Das Pendel besteht aus Aluminium und ist an zwei 50  $\mu\text{m}$  dicken und 3 mm breiten Blattfedern aus Kupfer-Beryllium aufgehängt. Der Raum zwischen den Kondensatorplatten ist mit Luft gefüllt. Auf eine schwingungsdämpfende Flüssigkeit, wie bei der elektronischen Libelle Talyvel, wurde zugunsten einer hohen zeitlichen Auflösung verzichtet. Da die Elektronik auf einer Platine aussen am Gehäuse angebracht ist, wird eine hohe Kompaktheit erreicht.

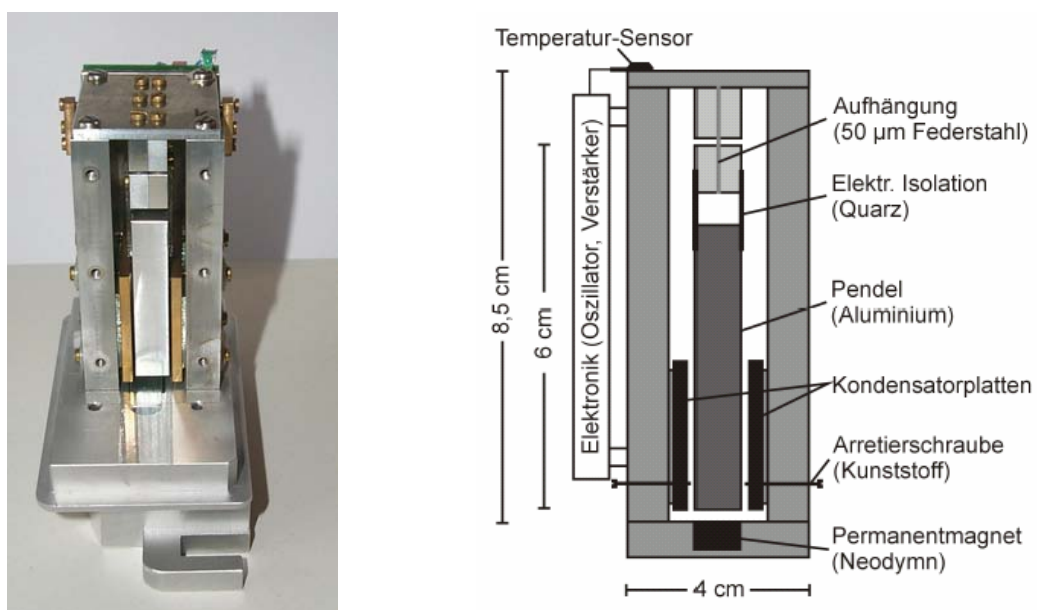


Abbildung 1: Konstruktionsprinzip Neigungssensor HRTM

## 3 Kalibrierung

Die Kalibrierung des HRTM wurde an der ETH Zürich vorgenommen. Dazu standen eine interferometrische Neigungsmesseinrichtung sowie ein spezieller Neigungstisch zur Verfügung. Die Bestimmung der einzelnen Neigungswerte erfolgte mit einer Genauigkeit von 0.01 ". Wie Abbildung 2 vermuten lässt, ist der Zusammenhang zwischen Neigung und Spannungswert linear. Des Weiteren konnte kein Einfluss der Querneigung auf den Massstab festgestellt werden. Dennoch ist eine starke Querneigung und Erschütterung des Sensors zu vermeiden, da plastische Verformungen der Blattfederaufhängung nicht ausgeschlossen werden können und somit der Nullpunkt der Neigungsmesser verändert wird.

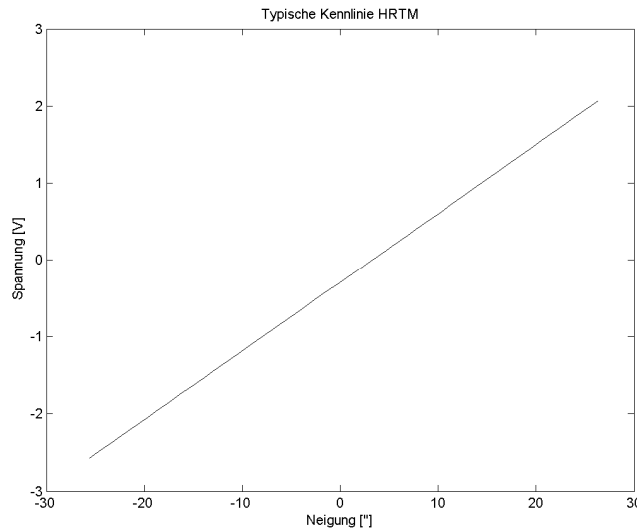


Abbildung 2: Kennlinie HRTM. Auffällig ist die besonders hohe Linearität. Das maximale Residuum beträgt  $0.005V \approx 0.05''$

Beim Einsatz zweier Einachsneigungsmesser zur Bestimmung der linear unabhängigen Neigungsanteile darf eine Scherung zwischen den Sensoren nicht vernachlässigt werden. Setzt man kleine Neigungswinkel voraus, kann mit der Vereinfachung durch lineare Abstände folgender Zusammenhang aufgezeigt werden:

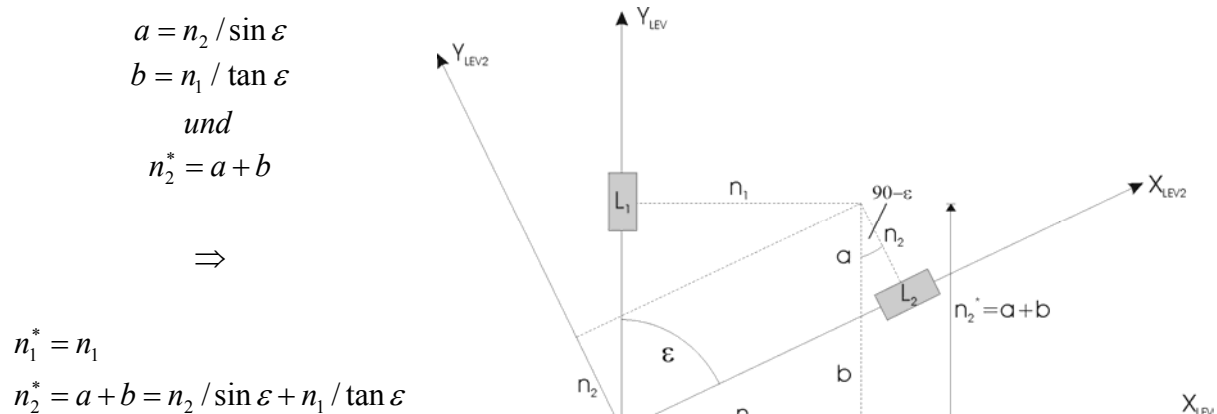


Abbildung 3: Scherung zweier Sensorachsen. Eine ähnliche Darstellung ergibt sich bei der Kalibrierung.

Durch eine Fehlerfortpflanzung kann nun unter Vorgabe einer Zielgenauigkeit  $\sigma_{n_n}^*$  der senkrechten Neigungskomponente und unter Vorgabe der Genauigkeit der Neigungsbestimmung die Genauigkeit der Bestimmung des Scherwinkels  $\varepsilon$  ermittelt werden (Abbildung 4). Dabei wird deutlich, dass die Scherung  $\varepsilon$  besser als  $0,1^\circ$  bestimmt werden muss, damit die Vorgabe der Neigungsmessung von

besser als 0,1 " realisiert werden kann. Eine besondere Ausrichtungsvorrichtung für Einachsneigungsmesser ist daher von entscheidender Bedeutung.

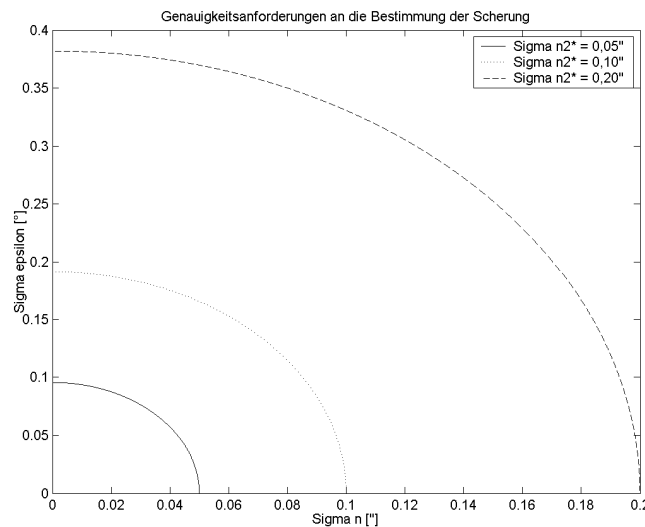


Abbildung 4: In Abhängigkeit von einer vorgegebenen Genauigkeit für die Neigungsbestimmung ( $\Sigma n$ ) und der Zielgenauigkeit der orthogonalen Neigungskomponente ( $\Sigma n2^*$ ) kann die erforderliche Genauigkeit für die Bestimmung der Scherung ( $\Sigma \epsilon$ ) angegeben werden.

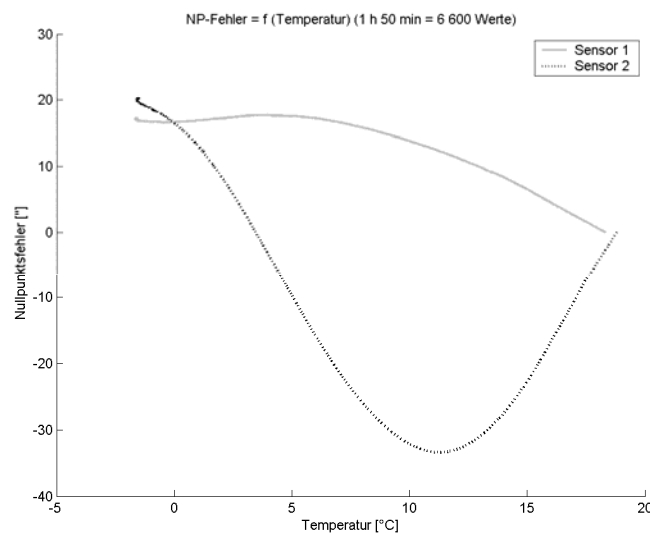
## 4 Sensoreigenschaften

Bei der Untersuchung des HRTM Neigungssensors wurde besonderes Augenmerk auf die Ermittlung der Sensorreaktionen auf Veränderungen der Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte sowie die Einflüsse eines dynamischen Umfeldes gelegt.

### 4.1 Temperatur- und Feuchteinflüsse

Die Einflüsse von Temperatur und Feuchte auf die Neigungsmessung werden unter zwei Gesichtspunkten betrachtet. Einerseits können Temperatur und Feuchte einen Einfluss auf die Kennlinie des Sensors haben. Das bedeutet, dass der Massstab des Neigungssensors von der momentanen Temperatur des Sensors sowie der Temperatur und der Feuchte der Luft zwischen den Kondensatorplatten abhängt. Im Fall der HRTM konnte dieser Einfluss nicht nachgewiesen werden. Andererseits reagiert der HRTM weitaus empfindlicher mit einer Nullpunktänderung auf Temperaturänderungen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Variation des Nullpunktes in Abhängigkeit von der Temperatur des Sensors. Versuche haben gezeigt, dass die Beziehung zwischen Temperatur und Nullpunkt bei einer Temperaturanpassung für jeden Sensor qualitativ ähnlich ist, aber von Sensor zu Sensor stark variiert. Die Sensoren wurden dazu aus einem Raum mit ca. 18° C in eine Klimakammer mit -10° C gebracht und somit einem

Temperaturschock ausgesetzt. Um störende Einflüsse durch die Luftzirkulation und die Turbinentätigkeit zu vermeiden, wurde der Kühlprozess beim Einbringen der Sensoren unterbrochen. Der Einfluss der Feuchte auf die gemessene Neigung wird durch das Einbringen von feuchtigkeitsabsorbierendem Material in das, den Sensor umschliessende, luftdichte Gehäuse unterbunden. Durch diese Maßnahme wird sichergestellt, dass sich keine Feuchtigkeit in den Sensoren durch Kondensation bilden kann. Kondensierte Feuchtigkeit hätte eine Verfälschung der Messungen zur Folge. Der resultierende leichte Anstieg der Temperatur während des Messvorganges stellt eine Fehlerquelle dar, hat aber nur einen geringen Einfluss auf den qualitativen Verlauf der Messwerte. Deutlich ist eine starke Variation der Nullpunkte zu erkennen. Mit bis zu 50" wird die geforderte Genauigkeit von 0.1" um das 500-fache überschritten.



*Abbildung 5: Anpassungsversuch.  
Verlauf des Nullpunktes bei einer Variation der Sensortemperatur.*

Da Feuchtigkeitseinflüsse aufgrund der Isolation und der Einbringung des Trockenmittels ausscheiden, können nur Temperatureffekte als Ursache für die Sensordrift in Frage kommen. Da diese Temperatureffekte erheblich sind, müssen geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden, z. B. Doppelte-Zwei-Lagen-Messung (Kahlmann (2003)) bzw. Vermeidung von Temperaturgradienten. Aufgrund der starken Schwankungen der einzelnen Ergebnisse ist eine rechnerische Korrektur nicht denkbar. Dennoch lässt sich aus weiterführenden Untersuchungen mit einer langsamen Temperaturanpassung ein Temperaturgradient von 0,6 "/K bis 1,2 "/K abschätzen.

## 4.2 *Einschwingverhalten*

Der HRTM ist mit einem Feedbacksystem ausgestattet, das zur Dämpfung kleinster Schwingungen dient. Im Rahmen statischer Anwendungen in der Geophysik ist dieses System hilfreich. Bei der Anwendung in dynamischer Umgebung mit starker Mikroseismik macht sich das Feedbacksystem nicht bemerkbar. Gerade bei Anwendungen, die ein häufiges Umsetzen des Neigungsmessers und ein schnelles Einschwingen des Pendels erfordern, müssen andere Verfahren eingesetzt werden. Mit Hilfe einer Dämpfung nach dem Prinzip der Wirbelstrombremse kann die Einschwingzeit des Pendels von 20 s auf 2 s reduziert werden. Dazu wurden unter dem Pendel starke Neodymmagnete angebracht.

## 5 **Zusammenfassung**

Im Rahmen dieses Beitrages wurde ein kleiner Einblick in die Untersuchungen zur hochpräzisen Neigungsmessung mit dem elektronischen Einachsneigungsmesser des Typs HRTM gegeben. Dabei konnten nur einige ausgewählte Aspekte näher erläutert werden. Schliesslich bleibt festzuhalten, dass der vorgestellte Sensor, unter Beachtung der allgemeingültigen sowie besonderen Zusammenhänge und Eigenschaften, eine sehr genaue absolute und relative Neigungsbestimmung erlaubt.

### **Literatur:**

HIRT, C.; SEEBER, G. [2002]: Astrogeodätische Lotabweichungsbestimmung mit dem digitalen Zenitkamarasystem TZK2-D. Zeitschrift für das Vermessungswesen (ZfV) 6/2002: S.388-396.

KAHLMANN, T. [2003]: Untersuchungen zur hochpräzisen Neigungsmessung mit elektronischen Pendelsystemen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Erdmessung der Universität Hannover.

### **Anschriften:**

ETH Zürich:  
Dipl.-Ing. Timo Kahlmann  
geomETH, Geodätische Messtechnik  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich  
kahlmann@geod.baug.ethz.ch

Universität Hannover:  
Dipl.-Ing. Christian Hirt  
Institut für Erdmessung  
Schneiderberg 50  
30167 Hannover  
hirt@mbox.ife.uni-hannover.de

ETH Zürich:  
Prof. Dr. Hilmar Ingensand  
geomETH, Geodätische Messtechnik  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich  
ingensand@geod.baug.ethz.ch

# Hochpräzise Neigungsmessung mit dem elektronischen Einachspendelsystem HRTM

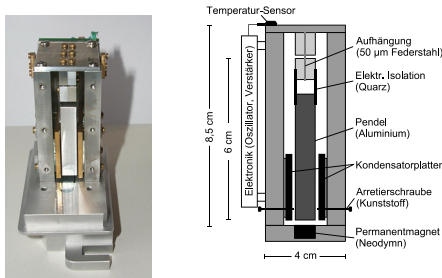
Timo KAHLMANN<sup>1</sup>, Christian HIRT<sup>2</sup> und Hilmar INGENSAND<sup>1</sup>

## High Resolution Tiltmeter (HRTM)

In der Ingenieurvermessung kommt der Bestimmung absoluter sowie relativer Neigungen eine wesentliche Rolle zu. Im Rahmen dieses Beitrages werden einige wichtige Aspekte, die bei der hochpräzisen Bestimmung von Neigungen beachtet werden müssen, erläutert und Anregungen zur Erhöhung der erreichbaren Genauigkeit gegeben. Die vermittelten Erkenntnisse beruhen auf Erfahrungen mit dem hochauflösenden Pendelneigungsmesser HRTM der Firma Lippmann Geophysikalische Messgeräte.

### Konstruktionsprinzip

Der elektronische Pendelneigungssensor HRTM ist als Drei-Platten-Kondensator konzipiert. Der Raum zwischen den Kondensatorplatten ist mit Luft gefüllt. Da die Elektronik auf einer Platine aussen am Gehäuse angebracht ist, wird eine hohe Kompaktheit erreicht.



geöffneter Sensor

Konstruktionsprinzip

### Sensoreigenschaften

- Temperatur- und Feuchteinflüsse

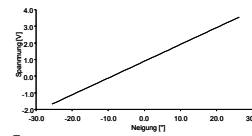
Im Fall der HRTM konnte ein Feuchteinfluss auf die Kennlinie des Sensors nicht nachgewiesen werden. Andererseits reagiert der HRTM empfindlich auf Temperaturänderungen mit einer Nullpunktänderung. Mit 0,6 °/K bis 1,2 °/K kann ein Temperaturgradient nur qualitativ abgeschätzt werden.

- Einschwingverhalten

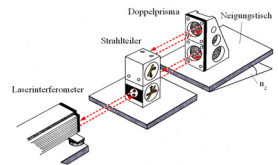
Der HRTM ist mit einem Feedbacksystem ausgestattet, das zur Dämpfung kleinster Schwingungen dient. Größere Amplituden werden nach dem Prinzip der Wirbelstrombremse gedämpft. Die Einschwingzeit des Pendels wird dadurch von 20s auf 2s reduziert. Dadurch wird eine Lagenmessung im Feld möglich.

### Kalibrierung

Die Kalibrierung des HRTM wurde mit Hilfe einer interferometrischen Neigungsmesseinrichtung durchgeführt ( $\sigma \approx 0.01''$ ). Der Zusammenhang zwischen Neigung und Spannungswert ist stark linear (relative Abweichung 0.1%). Ein Einfluss der Querneigung auf den Massstab konnte nicht festgestellt werden.



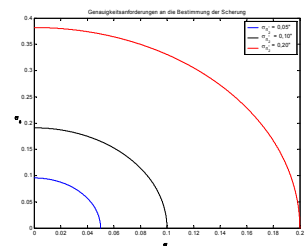
Kennlinie und Residuen (lineare Regression)



Funktionsprinzip laserinterferometrische Neigungsmessung

### Scherung

Beim Einsatz zweier Einachsneigungsmesser zur Bestimmung der linear unabhängigen Neigungsanteile darf eine Scherung zwischen den Sensoren nicht vernachlässigt werden. Es kann abgeleitet werden, dass die Scherung  $\epsilon$  mit besser als 0,1° bestimmt werden muss, damit die Vorgabe der Neigungsmessung von besser als 0,1'' realisiert werden kann.



Anforderungen an die Bestimmung der Scherungsgenauigkeit

<b>Hersteller</b>	Lippmann Geophysikalische Messgeräte
<b>Dimensionen</b>	40 x 50 x 85 mm <sup>3</sup>
<b>Messprinzip</b>	Pendelneigungsmesser / Dreiplattenkondensator
<b>Ausgangssignal</b>	analoge Spannung ±6V
<b>Linearität</b>	0.1%
<b>Einschwingzeit</b>	2s (mit Magnetbremse) 20s (ohne Magnetbremse)
<b>Eigenfrequenz</b>	≈ 3Hz

$a = n_2 / \sin \epsilon$   
 $b = n_1 / \tan \epsilon$   
 $n_2^2 = a + b$   
 $n_1^2 = n_1$   
 $n_2^2 = a + b = n_2 / \sin \epsilon + n_1 / \tan \epsilon$   
 $\Rightarrow \sigma_\epsilon^2 = \left( \sigma_{n_2}^2 - \frac{\sigma_{n_1}^2}{\tan^2(\epsilon)} - \frac{\sigma_{n_2}^2}{\sin^2(\epsilon)} \right) / \left( \frac{-n_2}{\sin^2(\epsilon)} \cos(\epsilon) - \frac{n_1}{\tan^2(\epsilon)} (1 + \tan^2(\epsilon)) \right)^2$

**Einfluss der Scherung auf die Bestimmung orthogonaler Neigungsanteile**