

Hochpräzise Neigungsmessung mit dem elektronischen Pendelneigungssensor HRTM

Christian Hirt und Timo Kahlmann

Zusammenfassung

Seit einiger Zeit ist mit dem elektronischen Pendelneigungsmesser HRTM (High Resolution Tiltmeter) der Firma Lippmann Geophysikalische Messgeräte ein neuartiger hochauflösender Sensor verfügbar, der aufgrund seiner äußerst niedrigen elektrischen Rauscheigenschaften für Neigungsmessungen mit höchsten Genauigkeitsansprüchen interessant ist. In diesem Beitrag wird von einigen Erfahrungen berichtet, die mit dem Neigungssensor HRTM unter Labor- und Feldbedingungen gewonnen werden konnten. Schwerpunkte bilden dabei die Untersuchung des Temperaturverhaltens und die Nutzung des Sensors zur genauen absoluten Neigungsmessung im Rahmen der astrogeodätischen Lotrichtungsbestimmung mit einer Zenitkamera.

Summary

The high-resolution electronic inclination sensor HRTM is of interest for tilt measurements with highest accuracy requirements due to its extremely low noise characteristics. In this contribution some experiences with the HRTM sensor are presented which were obtained under laboratory and field conditions. Emphasis is laid on investigations of the sensor's behaviour under changing temperatures. The HRTM sensor is used for exact tilt measurements in the context of the determination of the plumb line using a zenith camera.

1 Einleitung

Der Prototyp des hochauflösenden Neigungsmessers HRTM wurde von Dipl.-Geophys. Erich Lippmann schon vor 20 Jahren auf der deutschen Antarktisstation »Georg von Neumayer« entwickelt und zur Messung von gezeitenbedingten Neigungsänderungen des antarktischen Schelfeises eingesetzt (Kobarg 1988). Die heute verfügbare Version des HRTM stellt aufgrund der verfeinerten Sensorik eine Weiterentwicklung dar und findet ihren Einsatz unter anderem auf der Fundamentalstation Wettzell im Bereich der Erdrotationsbestimmung mit Ringlasertechnik und am Institut für Erdmessung der Universität Hannover im Bereich der geodätischen Astronomie. Darüber hinaus werden die Neigungssensoren HRTM zur Deformationsmessung in Bohrlöchern und zukünftig auch im Bereich der Vulkanologie genutzt (Lippmann 2004).

In Wettzell werden die HRTM-Sensoren auf dem Großringlaser G (Schreiber 2000 und Klügel et al. 2000) zur hochgenauen Bestimmung von lokalen Neigungsänderungen, die beispielsweise durch den Einfluss der Erd-

gezeiten verursacht werden, im Permanentbetrieb eingesetzt. Der Ringlaser befindet sich in einem temperaturstabilisierten Tiefenlabor, in dem mit den HRTM-Sensoren unter optimalen Bedingungen für die Messung von Neigungsänderungen Genauigkeiten von 1 Nanoradian (etwa 0.2 Millibogensekunden) und besser erreicht werden (Klügel 2003).

Hohe Genauigkeitsanforderungen an die Neigungsmessung werden traditionell bei astrogeodätischen Instrumenten wie einer Zenitkamera gestellt, die zur Bestimmung der lokalen Lotrichtung eingesetzt wird. Aufgrund der hohen Auflösung und Kompaktheit wurden zwei HRTM-Neigungssensoren am Institut für Erdmessung für den Einsatz im transportablen digitalen Zenitkamarasystem TZK2-D (Hirt und Seeber 2002; Hirt und Bürki 2002) konfiguriert. Hier erfüllen die HRTM die Aufgabe, nach der Horizontierung des Instrumentariums verbleibende Restabweichungen zwischen der Stehachse und der physikalischen Lotrichtung zu messen und damit den Bezug zum Erdschwerefeld herzustellen. Im Gegensatz zum Einsatz der HRTM unter Laborbedingungen findet die Neigungsmessung bei astrogeodätischen Feldmessungen unter erschwerten Umgebungsbedingungen (Temperaturänderungen, wechselnde Luftfeuchtigkeit, transportbedingte Erschütterungen) statt, wodurch die Sensornullpunkte variieren können. Der Bezug zur Lotrichtung wird deshalb durch Messung in zwei Lagen hergestellt, die nachfolgend auch als absolute Neigungsmessung bezeichnet werden soll.

In diesem Aufsatz wird über Erfahrungen berichtet, die bei den instrumentellen Untersuchungen der HRTM-Sensoren in Hinblick auf die Nutzung zur absoluten Neigungsmessung gewonnen werden konnten. Einführend wird in Abschnitt 2 das Design und Funktionsprinzip der HRTM dargestellt. Schwerpunkt dieses Beitrages bildet die in Abschnitt 3 vorgestellte Untersuchung der instrumentellen Eigenschaften der HRTM. Neben den Untersuchungen der Eigenfrequenz und der Kennlinie wird insbesondere auf das temperaturabhängige Driftverhalten eingegangen, das durch Messungen in einer Klimakammer untersucht wurde. In Abschnitt 4 wird die erreichte Genauigkeit für die absolute Neigungsmessung mit den HRTM auf der Zenitkamera TZK2-D aufgezeigt.

2 Sensordesign

Der Neigungssensor HRTM (Abb. 1) besteht aus einem kompakten Metallgehäuse der Größe 4 cm × 5 cm × 8.5 cm,

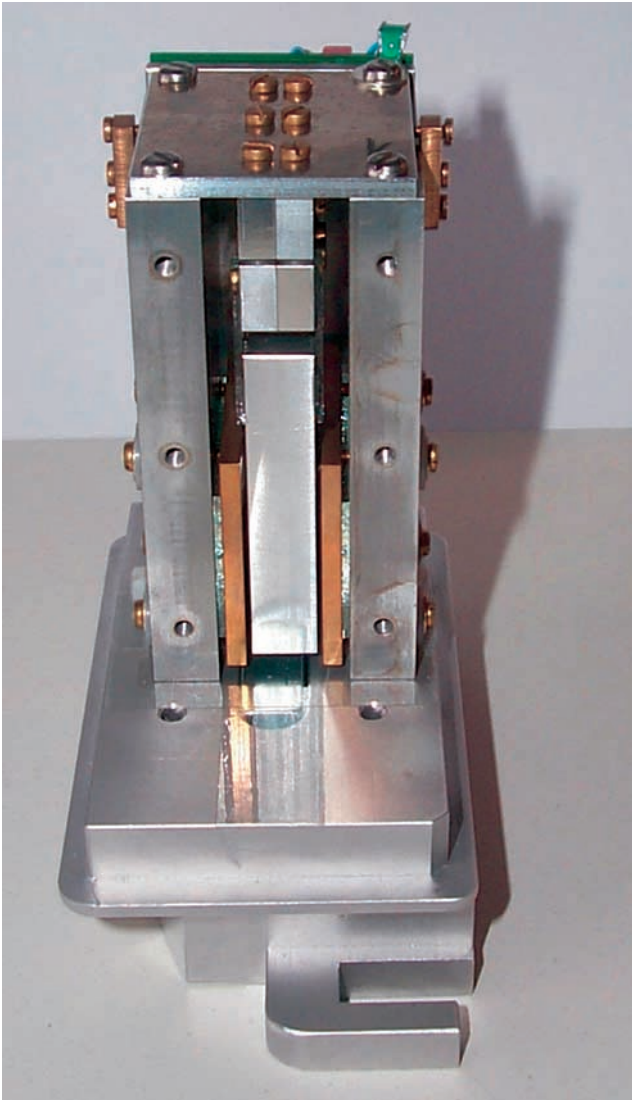


Abb. 1: Ansicht des geöffneten Neigungssensors HRTM

in dem ein Pendel aus Aluminium als schwerkraftsensitives Element mittels zwei $50\ \mu\text{m}$ dicken und $3\ \text{mm}$ breiten Blattfedern aus Kupfer-Beryllium befestigt ist. Die zum Betrieb notwendige Elektronik ist vollständig auf einer Platine an der Seite des Sensors angebracht, wodurch die Kompaktheit erhöht wird. Mit zwei Kunststoffschrauben kann das Pendel für den Transport arretiert oder der maximale Messbereich des Sensors mechanisch begrenzt werden.

2.1 Funktionsprinzip

Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau des HRTM. Der Neigungssensor ist als Dreiplattenkondensator konstruiert, wobei das Pendel die mittlere von drei Kondensatorplatten bildet. Für die elektronische Schaltung wird ein Synchron-Gleichrichter verwendet. Die Lock-In-Verstärkerschaltung arbeitet mit einer Frequenz von etwa $30\ \text{kHz}$ und einem Verstärkungsfaktor von 15. Der Vorteil des Lock-In-Verstärkers liegt in seiner Fähigkeit, selektiv das Nutzsignal zu verstärken und so ein Signal-Rauschver-

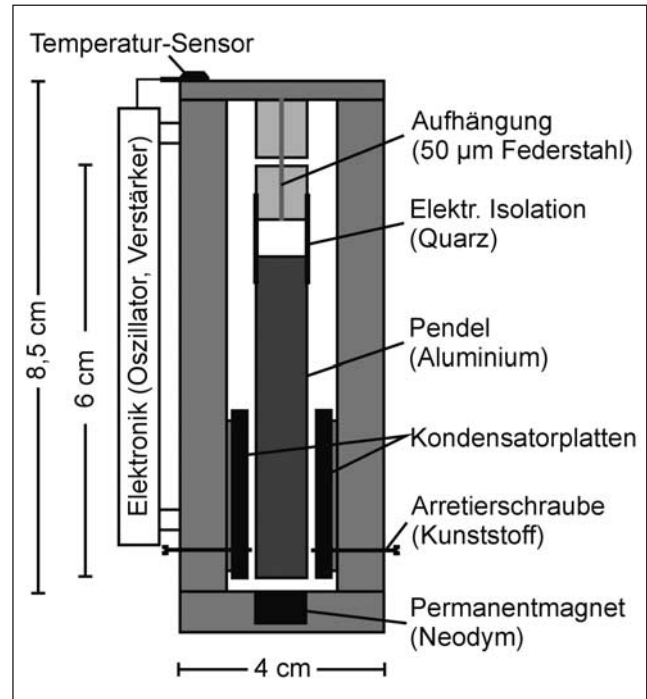


Abb. 2: Konstruktionsprinzip des Neigungssensors HRTM

hältnis zu erzielen, das nahe an der physikalischen Grenze, der Brown'schen Bewegung des Pendels liegt (Lippmann 2004). Dadurch zeigen sich auch kleinste Neigungsänderungen im Nutzsignal des Sensors. Als Ausgangssignal liefert der Neigungssensor HRTM analoge Spannungen im Messbereich von ca. $\pm 6\ \text{V}$, die ein Maß für die Pendelstellung zwischen den Kondensatorplatten und damit für die Neigung des Sensors sind. Der Sensor wird über den Messwerterfassungsrechner mit einer Betriebsspannung von $\pm 12\ \text{V}$ gespeist.

2.2 Analog-Digital-Wandlung

Damit eine Speicherung und Verarbeitung der Daten im Rechner möglich wird, wird das analoge Spannungssignal der HRTM mit einer AD-Wandlerkarte (daqBoard2000 der Firma IO Tech) in digitale Messwerte umgewandelt. Die AD-Wandlerkarte digitalisiert das Sensorsignal mit 16 Bit bei einem Messbereich von $\pm 10\ \text{V}$. Damit entspricht jede Quantisierungsstufe einem Spannungsintervall von $0.305\ \text{mV}$. Die Digitalisierung des analogen Spannungssignals wird mit einer empirisch ermittelten Standardabweichung des Einzelwertes s_{AD} von etwa $0.5\ \text{mV}$ durchgeführt. Da die Signalabtastung mit Frequenzen von bis zu $1000\ \text{Hz}$ durchgeführt wird, kann die Unsicherheit der AD-Wandlung durch Mittelung über ein bestimmtes Zeitintervall reduziert werden. Dennoch ist die Digitalisierung als ein genauigkeitslimitierender Einfluss bei der Beurteilung der mit den HRTM erreichbaren Genauigkeit anzusehen. Die generelle Funktionsweise von AD-Wandlerkarten wird hier ebenso wie die detaillierte Genauigkeitsanalyse zur Digitalisierung nicht behandelt; es sei an dieser Stelle auf Stearns und Hush (1999) verwiesen.

2.3 Messbereiche

Die HRTM-Sensoren verfügen über zwei unterschiedliche Messbereiche, die in Abhängigkeit von der gestellten Messaufgabe durch das Anlegen eines logischen TTL-Signals ausgewählt werden können. Tab. 1 zeigt die beiden nutzbaren Messbereiche der HRTM, die sich sensorseitig um einen Verstärkungsfaktor von 10 unterscheiden. In den ersten beiden Spalten sind die maximalen Ausgabespannungen und die zugehörigen Messbereiche in Bogensekunden angegeben. In der dritten Spalte findet sich die vom Pendel zurückgelegte tangentielle Strecke aus der Mittelstellung bis zum Rand des Messbereiches bei einem ungefähren Umrechnungsfaktor von $0.3 \mu\text{m}$ pro Bogensekunde Auslenkung. Außerhalb der angegebenen Messbereiche ist das Sensorsignal elektronisch begrenzt. Die ungefähren Maßstabsfaktoren (Bogensekunde pro Volt, ["V⁻¹"]), mit denen die gemessenen Spannungen in Neigungswerte konvertiert werden können, sind in der vierten Spalte angegeben. Die fünfte Spalte enthält die Auflösung des Neigungssignals in Bogensekunden pro Digitalisierungseinheit ADU (analog digital unit), die bei der Digitalisierung mit 16 Bit erzielt werden können. In der letzten Spalte findet sich die Standardabweichung s_{AD} der Analog-Digital Wandlung.

Tab. 1: Verfügbare Messbereiche und Auflösungen

Messbereich		Maßstab	Auflösung	s_{AD}	
[V]	["]	[" V ⁻¹]	[" ADU ⁻¹]	["]	
±6	±600	±0.18	100	0.031	0.050
±6	±60	±0.02	10	0.003	0.005

2.4 Rauscheigenschaften

Der Neigungssensor HRTM weist gemäß der vom Hersteller angegebenen Spezifikation ein elektrisches Rauschen von etwa 50 Picoradian $\text{Hz}^{-0.5}$ ($\approx 1 \cdot 10^{-5}$ Bogensekunden $\text{Hz}^{-0.5}$) auf. Diese durch die Sensorelektronik und die Brown'sche Bewegung des Pendels verursachten Rauschanteile stellen damit einen sehr kleinen Posten im Fehlerbudget der elektronischen Neigungsmessungen dar. Größere Anteile am Fehlerbudget haben sensorseitig nicht-elektrische Effekte wie Temperatur und Feuchteinflüsse, die jedoch durch geeignete Maßnahmen reduziert werden können (Abschnitte 3.5 und 3.6), und rechnerseitig die Unsicherheiten bei der Digitalisierung.

1 Durch Wahl eines hohen Signalverstärkungsfaktors an der AD-Wandlertkarte (bis zum Faktor 64) ist es möglich, hier Abhilfe zu schaffen. Durch diese Vorgehensweise wird jedoch der effektiv verfügbare Messbereich reduziert, was die praktischen Einsatzmöglichkeiten des Sensors erheblich einschränken kann. Sollen nur kleinste Neigungsänderungen hochgenau registriert werden, so ist es sicherlich sinnvoll, eine höhere Verstärkung zu wählen.

In der gewählten Konfiguration ist das elektrische Sensorrauschen vernachlässigbar klein im Vergleich zu den Fehlereinflüssen, die mit der Digitalisierung der analogen Sensorsignale durch die AD-Wandlung verbunden sind. In Tab. 1 sind deshalb die Standardabweichung der Analog-Digital-Wandlung s_{AD} (Quantisierungsrauschen) sowie die Auflösung der Signalwandlung¹ mit angegeben.

Ihrer Natur nach sind Pendelneigungsmesser sowohl für Neigungen als auch für Horizontalbeschleunigungen sensitiv. Horizontalbeschleunigungen werden hauptsächlich durch natürliche und anthropogene Mikroseismik verursacht und überlagern das eigentliche Neigungssignal. Die Hauptursache für die *natürliche Mikroseismik* ist die Wellenbewegung auf den Ozeanen, die sich als Meereseismik über alle Kontinente ausbreitet. Die Meereseismik ist als globales Phänomen überall in ähnlicher Weise vorhanden und tritt überwiegend in einem Spektralbereich von etwa 0.1 Hz bis 0.5 Hz mit einem Maximum bei etwa 0.2 Hz bis 0.3 Hz auf. Sie wirkt in diesem Spektralbereich permanent als Horizontalbeschleunigung auf Pendelneigungssensoren ein. Zur natürlichen Mikroseismik tragen darüber hinaus auch noch weitere, örtlich variierende Einflüsse wie Erdbeben und Erdzeiten bei. *Anthropogene Mikroseismik* kann zum Beispiel durch Maschinenbetrieb und Straßenverkehr entstehen und ist ein stark ortsabhängiges Phänomen. Die Summe dieser allgegenwärtigen natürlichen und anthropogenen Störbeschleunigungen können ein breites Spektrum mit hohen Frequenzen von einigen Hertz und mehr bis zu niedrigen Frequenzen in der Größenordnung von 0.01 Hz abdecken. Eine ausführliche Diskussion der Mikroseismik hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften findet sich in Klinge et al. (2002). Durch Tiefpassfilterung können höherfrequente Anteile der Mikroseismik und des Neigungssignals aus dem registrierten Sensorsignal entfernt werden. Dennoch verbleibende niederfrequente Anteile der Mikroseismik, die sich nicht von der Neigung separieren lassen, stellen einen kritischen Fehlereinfluss dar (vgl. Abschnitt 3.1).

Die erreichbare Genauigkeit für die Neigungsmessung ist generell von der Messaufgabe (absolute Neigungsmessung oder Messung von Neigungsänderungen), der gewählten Messanordnung (eine oder zwei Lagen) und der jeweiligen Messumgebung (Seismik, Umwelteinflüsse) abhängig. In Abschnitt 4 wird die Genauigkeit für den Fall der absoluten Neigungsmessung anhand von Wiederholungsmessungen nachgewiesen, die alle hier skizzierten genauigkeitsmindernden Einflüsse mit einschließen.

2.5 Dämpfung

Da es sich bei den Pendelsensoren um schwingfähige Systeme handelt, ist eine an die Anwendung angepasste Dämpfung der Pendel notwendig. Die HRTM weisen zu-

nächst einmal ein sehr schwaches Dämpfverhalten auf. Nach stärkerer Auslenkung des Pendels aus der Lotrichtung, wie sie beispielsweise beim Umsetzen des Neigungssensors zwischen zwei Lagen, aber auch durch Erschütterungen oder abrupte größere Neigungsänderungen auftreten kann, benötigt das Pendel je nach Auslenkung bis zu 15 Sekunden bis zur Beruhigung. Zusätzlich zum vorhandenen elektronischen Feedbacksystem wurde deshalb eine leistungsfähige Magnetdämpfung implementiert, wodurch die Pendelschwingungen nach dem Prinzip der Wirbelstrombremse innerhalb von 1 bis 2 Sekunden gedämpft werden.

2.5.1 Elektronisches Feedbacksystem

Das elektronische Feedbacksystem erzeugt eine geschwindigkeitsproportionale Gegenkraft, die die sonst recht geringe Eigendämpfung des Systems unterstützt. Das Prinzip der Dämpfung mittels eines Feedbacks gliedert sich in mehrere Schritte. Die äußeren Kondensatorplatten des Sensors werden mit einer Gleichspannung von +8 V und -8 V belegt, während das Pendel als mittlere Kondensatorplatte auf 0 V gehalten wird. Das Ausgangssignal des Dreiplattenkondensators wird differenziert und moduliert die Gleichspannung an den äußeren Platten. Dadurch tritt eine elektrostatische Dämpfung der Pendelbewegung ein. Begrenzt durch die zur Verfügung stehende Versorgungsspannung, ist das Feedbacksystem nur für sehr kleine Auslenkungen des Pendels in der Größenordnung einer Bogensekunde wirksam. Bei größeren Auslenkungen hingegen übersteuert das Feedbacksystem.

2.5.2 Magnetdämpfung

Zur effizienten Dämpfung von Pendelschwingungen größerer Amplituden (10 Bogensekunden und höher) dient eine Magnetdämpfung, die nach dem Wirbelstromprinzip arbeitet. Wenige Millimeter unter dem Pendel sind sehr starke Neodym-Permanentmagnete in der Bodenplatte

installiert. Bei der Bewegung des Pendels über den Magneten wird im Pendel ein Strom induziert, der nach der Lenz'schen Regel der verursachenden Pendelbewegung entgegengerichtet ist. Der Pendelbewegung wird hierdurch rasch Bewegungsenergie entzogen. Abb. 3 verdeutlicht die Wirksamkeit der Magnetdämpfung. Ohne die Wirbelstromdämpfung ist beispielsweise die Horizontierung eines Instrumentariums, das mit den HRTM ausgerüstet ist, nur schwer möglich. Die Abbildung zeigt die nach vollständiger Auslenkung des Pendels notwendige Einschwingzeit der HRTM ohne Magnetdämpfung (obere Grafik) und mit Magnetdämpfung (untere Grafik). Die obere Grafik zeigt, dass das Pendel während der ersten vier Sekunden außerhalb des nutzbaren Messbereiches schwingt. Danach ist die allmähliche Dämpfung der Pendelschwingung zu erkennen. Die untere Grafik zeigt deutlich, dass das Pendel bei installierter Magnetdämpfung nach kürzester Zeit beruhigt wird und die Ruhelage – bis auf geringe mikroseismische Einflüsse – erreicht.

2.6 Nullpunktjustierung

Die Notwendigkeit einer Justiereinrichtung für den praktischen Gebrauch der HRTM lässt sich aus folgender Überlegung ableiten. Bei einer Sensorauflagefläche von 4 cm Breite entspricht die Neigung von 1 Bogensekunde einem Höhenunterschied von $0,2 \mu\text{m}$. Entsprechend hohe Anforderungen müssten ohne Justiereinrichtung an die akkurate mechanische Bearbeitung der Sensorauflageflächen in Bezug zum Pendel gestellt werden. Zur Justierung der Nullpunkte sind die HRTM-Sensoren mit einer verschiebbaren Pendelaufhängung ausgestattet, die eine Einstellung der Nullpunkte mit einer Genauigkeit von etwa 10 Bogensekunden innerhalb eines Intervalls von einigen 100 Bogensekunden zulässt. Dadurch wird es bei unterschiedlich geneigten Aufstellerebenen möglich, das Pendel in den Messbereich zu bringen. Dies kann insbesondere dann notwendig sein, wenn der feine Messbereich von ± 60 Bogensekunden (Tab. 1) verwendet wird.

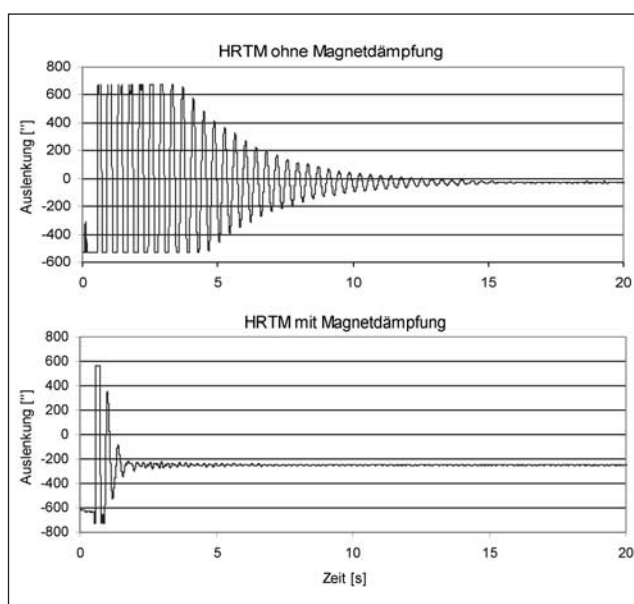


Abb. 3: Einschwingzeit

3 Sensoreigenschaften

In diesem Abschnitt werden einige Eigenschaften der HRTM-Neigungssensoren aufgezeigt, die im Rahmen von Untersuchungen an der Universität Hannover und der ETH Zürich ermittelt werden konnten. Einführend wird anhand von typischen Sensorsignalen der Einfluss der Mikroseismik auf das Sensorsignal gezeigt. Nach der Untersuchung der Eigenfrequenz des Sensors und der Ermittlung der Kennlinie wird die Nullpunktstabilität, die für die Genauigkeit der Neigungsmessung entscheidend ist, ausführlich diskutiert.

3.1 Typische Sensorsignale

Für die erste Untersuchung wurden die beiden HRTM-Sensoren in Parallelstellung auf einem massiven Sockel in einem Laborraum aufgestellt. Die Ausgangssignale der HRTM wurden mit der Analog-Digital-Wandlerkarte bei einer Abtastfrequenz von 200 Hz erfasst. In den Abb. 4 und 5 ist das Ergebnis des Versuches zu sehen, der in einer mikroseismisch stark unruhigen Lage (Stadtgebiet) durchgeführt wurde. Dargestellt sind Ausschnitte der beiden erfassten digitalen Zeitreihen über ein Zeitintervall von 10 Sekunden und als Ausschnittsvergrößerung über ein Intervall von 2 Sekunden. Ohne einen deutlich erkennbaren Trend zeigen beide Sensorsignale unregelmäßige Pendelschwingungen mit Amplituden in der Größenordnung von 1 bis 2 Bogensekunden.

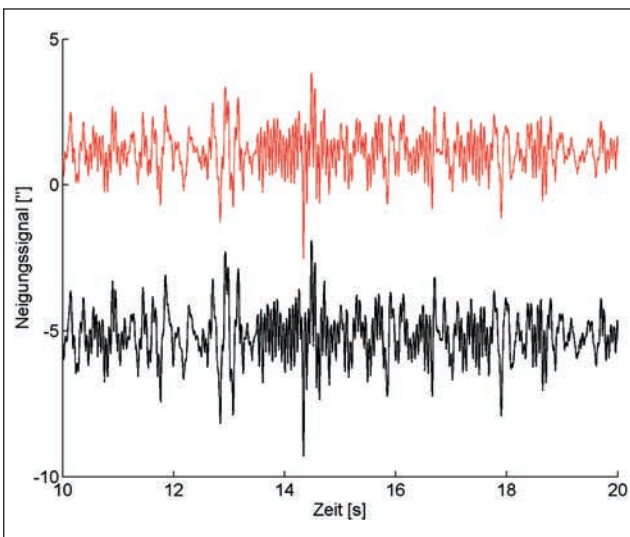


Abb. 4: Typische Sensorsignale der HRTM über 10 s

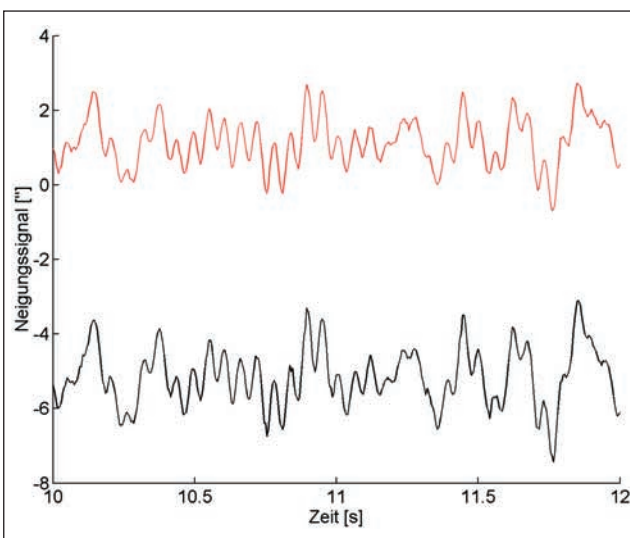


Abb. 5: Typische Sensorsignale der HRTM über 2 s

Sehr auffällig ist, dass beide Pendel in nahezu identischer Phasenlage bei sehr ähnlichen Amplituden Schwingungen ausführen. Diese äußerst hohe Übereinstimmung der beiden Signale spiegelt deutlich die vorhandenen

horizontalen Beschleunigungsanteile der Mikroseismik wider, die die hochfrequenten Pendelbewegungen verursachen. Pendelschwingungen mit Amplituden in der Größenordnung weniger Bogensekunden werden weder vom Feedbacksystem noch von der Wirbelstrombremse gedämpft und überlagern als unerwünschtes Rauschen das eigentliche Neigungssignal.

Eine erhebliche Reduktion der durch die Mikroseismik verursachten Rauschanteile kann durch digitale Tiefpassfilterung der aufgezeichneten Zeitreihen erfolgen. In Abb. 6 sind die tiefpassgefilterten Signale dargestellt. Alle Rauschanteile, jedoch auch mögliche Neigungsanteile mit Frequenzen ≥ 0.3 Hz wurden aus den beiden Sensorsignalen entfernt. In der Darstellung wurde die Kurve von Sensor 2 in der Hochachse so verschoben, dass sie möglichst gut mit dem gefilterten Signal von Sensor 1 vergleichbar ist. Deutlich erkennbar ist die hohe Korrespondenz beider Signale bis auf etwa 0.005 Bogensekunden. Auffällig sind die Schwingungen mit einer Frequenz von etwa 0.25 Hz und einer Amplitude in der Größenordnung von 0.02 Bogensekunden. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich hier um horizontale Störbeschleunigungen, die das Neigungssignal weiterhin überlagern. Aufgrund der Frequenz von 0.25 Hz kommt als Ursache die Meeresmikroseismik in Frage. Die Änderung von 0.05 Bogensekunden über 20 Sekunden ist dagegen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine tatsächliche Neigungsänderung zurückzuführen, die von beiden Sensoren gleichermaßen erfasst wird.

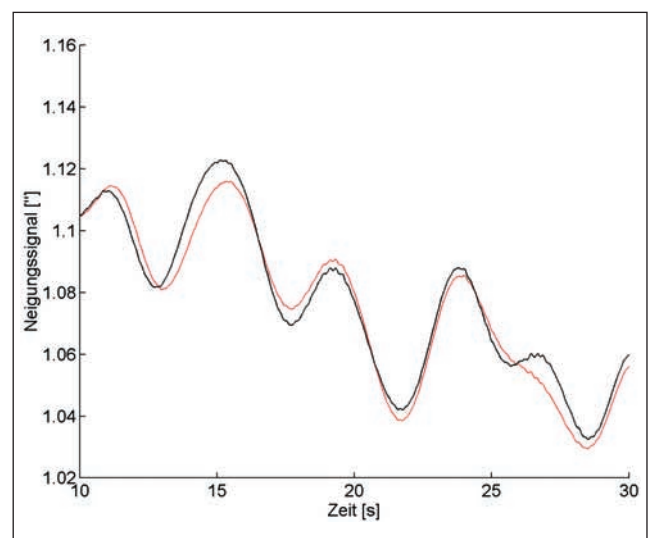


Abb. 6: Digital gefilterte Sensorsignale der HRTM über 20 s

3.2 Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz der HRTM-Sensoren konnte auf zwei verschiedenen Wegen ermittelt werden. Zum einen wurden Anregungsversuche durchgeführt. Dazu wurde ein Sensor auf einem Schwingtisch befestigt und mit verschiedenen, kontinuierlich veränderten Frequenzen angeregt. Abb. 7 zeigt die beim Anregungsversuch gewon-

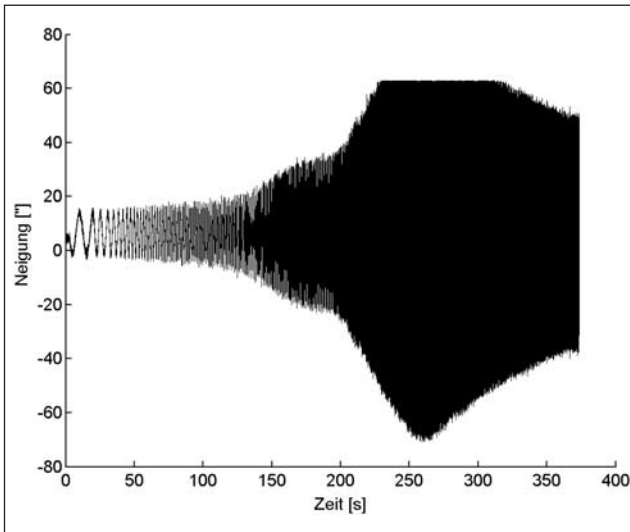


Abb. 7: Messwertregistrierung während der Anregung des HRTM auf einem Schwingtisch

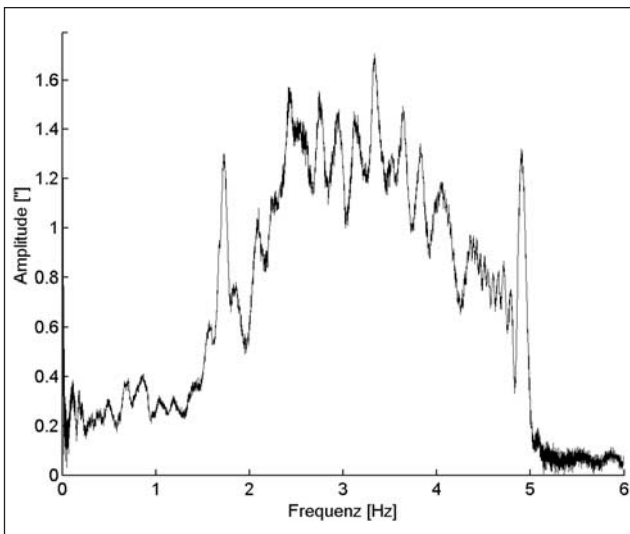


Abb. 8: Frequenzspektrum des Anregungsversuches

nenen Messdaten. Die Anregungsfrequenz wurde mit der Zeit manuell erhöht, so dass die resultierende Zeitreihe ein breites Spektrum an Frequenzen enthält. Bei der Betrachtung der Abbildung fällt auf, dass ab einer bestimmten Anregungsfrequenz das Pendel rasch bis an seinen Anschlag ausgelenkt wird. Die zugehörige Frequenzanalyse mittels einer Fast-Fourier-Transformation zeigt, dass die Eigenfrequenz des Sensors bei etwa 3 Hz liegt.

Der zweite Weg zur Ermittlung der Eigenfrequenz eines schwingfähigen Systems ist die Frequenzanalyse geeigneter Messdaten. In der Regel sind die Eigenfrequenzen in den Messdaten deutlich zu erkennen. Als Anregung für das Pendel reichen meistens die natürlichen und anthropogenen mikroseismischen Einflüsse auf den Sensor aus, da ein breites Frequenzspektrum abgedeckt wird. Auch hier zeigt sich nach der Frequenzanalyse eine Eigenfrequenz von etwa 3 Hz und bestätigt damit das Ergebnis des ersten Versuchs.

3.3 Kalibrierung

Das Ziel der Kalibrierung ist es, den funktionalen Zusammenhang (Kennlinie) zwischen dem Spannungssignal U und der Neigung n herzustellen. Im Idealfall ist der Zusammenhang linear und kann dann mit einem Maßstabsfaktor m ausgedrückt werden:

$$n = m \cdot U. \quad (1)$$

Zur Kalibrierung wird der Neigungssensor mit Hilfe einer Kalibriereinrichtung in unterschiedliche Neigungen gebracht, die Ausgangsspannung des Sensors gemessen und der gemessenen Neigung des Tisches gegenübergestellt. Die Kennlinie erhält man durch Berechnung einer (linearen) Regression zwischen den gemessenen Neigungen und Spannungen. Als Kalibriereinrichtung kann beispielsweise ein Libellenprüfer oder ein interferometrischer Neigungstisch dienen. An dieser Stelle werden die Ergebnisse der Kalibrierung dargestellt, die auf dem interferometrischen Neigungstisch der ETH Zürich gewonnen werden konnten. Bei dieser Kalibriereinrichtung handelt es sich um einen Tisch, dessen Neigung durch hochpräzise Streckendifferenzmessung mit einem Laserinterferometer bestimmt wird. Das Funktionsprinzip des interferometrischen Neigungstisches ist ausführlich in Ingensand (1985) dargestellt und soll an dieser Stelle nicht vertieft behandelt werden.

Auf dem interferometrischen Neigungstisch wurden zur Ermittlung der Kennlinie Kalibriermessungen mit 45 Stützstellen, die über einen Messbereich von 60 Bogensekunden gleichmäßig verteilt wurden, durchgeführt. Für jede Stützstelle wurden die Spannungssignale beider HRTM-Sensoren 30 Sekunden lang mit 100 Hz abgetastet und anschließend mit einem Tiefpassfilter (0.3 Hz Grenz-

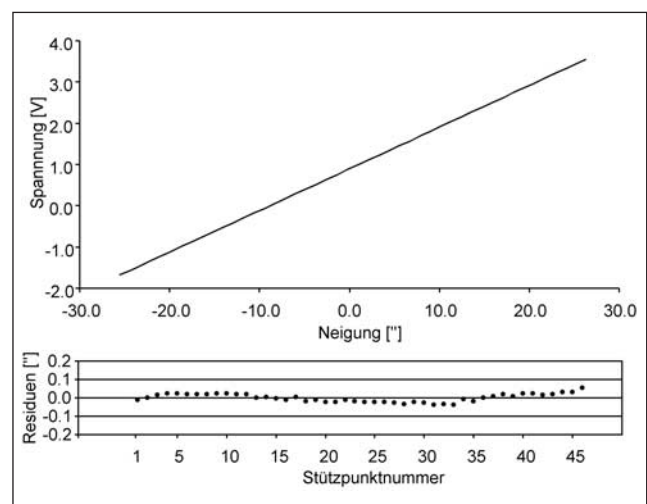


Abb. 9: Linearität zwischen Neigung und Spannung. Im oberen Teil der Grafik sind gemessene Neigungen und Spannungen gegenübergestellt. Die verbleibenden Widersprüche zwischen linearer Kennlinie und den gemessenen Spannungen sind – transformiert in Bogensekunden – im unteren Teil dargestellt.

frequenz) geglättet. Als wesentliches Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Kennlinie im gewählten Messbereich des Sensors streng linear verläuft. Dieses Resultat wird auch von Abb. 9 verdeutlicht. Der Mittelwert des Maßstabes von Sensor 1 konnte zu $9.901''V^{-1}$ bestimmt werden. Die Einzelwerte der Maßstäbe m weisen eine Standardabweichung von etwa $0.1''V^{-1}$ auf; dies entspricht einer relativen Unsicherheit von 0.1 Prozent. Die Standardabweichung der Neigungsmessung, die über die Residuen der Stützstellen (Abb. 9) ermittelt wurde, gibt mit 0.02 Bogensekunden einen realistischen Hinweis auf die mit den HRTM erreichte Genauigkeit im Messlabor der ETH Zürich.

3.4 Nullpunktstabilität

Da die Bestandteile des Sensorgehäuses durch Schraubverbindungen nicht spannungsfrei fixiert sind, kann insbesondere beim Transport der HRTM das Problem auftreten, dass sich die einzelnen Komponenten des Sensors durch Erschütterungen gegeneinander verschieben. Dadurch tritt eine Änderung der Abstände im Dreiplattensensordruckauf, wodurch wiederum der Sensornullpunkt verschoben wird. Eine sprunghafte Nullpunktänderung durch Entspannung des Sensorgehäuses konnte auch in Langzeitexperimenten unter Laborbedingungen in Hannover und in Wettzell (Klügel 2003) beobachtet werden. Eine Unterscheidung zwischen sprunghafter Neigungsänderung und sprunghafter Nullpunktänderung wurde durch Parallelbeobachtung mit zwei Sensoren möglich. Die Nullpunktstabilität ist in der untersuchten Konfiguration der Sensoren als verbesserungswürdig zu bewerten.

Neben sprunghaften Nullpunktänderungen können bei den HRTM auch allmähliche Nullpunktverschiebungen auftreten, die ihre Ursache im Wesentlichen in Temperaturänderungen und Feuchteänderungen haben und im folgenden Abschnitt ausführlich diskutiert werden.

3.5 Temperaturverhalten

Das Verhalten der Neigungssensoren HRTM bei Temperaturänderungen hat entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Neigungsmessungen, insbesondere bei Langzeitregistrierungen. Temperaturänderungen der umgebenden Luft oder der Aufstellfläche können zu thermoelastischen und -plastischen Verformungen der Neigungssensoren führen, die sich durch Verschiebung der Sensornullpunkte (Sensordrift) bemerkbar machen.

Ein grundsätzliches Problem bei der Untersuchung des Temperaturverhaltens von Neigungssensoren ist die temperaturbedingte Verformung der Unterlage (z. B. Pfeiler) und die sich daraus ergebende Notwendigkeit der Separation zwischen Neigungsänderung der Unterlage und der Sensordrift. Auf dieses Problem haben bereits Hallermann und Kalischewski (1978) bei der Untersuchung des Tem-

peraturverhaltes der elektronischen Libelle Talyvel hingewiesen und in ihren Untersuchungen derartige Einflüsse durch Messung in zwei Lagen weitgehend ausgeschaltet.

Zur Untersuchung des Temperaturverhaltens der HRTM wurden im Sommer 2003 einige Temperaturanpassungsversuche in der Klimakammer des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, durchgeführt. Als Unterlage für die Sensoren wurde eine Metallplatte auf einem Metallpfeiler in der Klimakammer befestigt. Neben der Neigung wurde die tatsächliche Sensortemperatur über den integrierten internen Temperaturfühler (Abb. 2) erfasst.

Die durchgeführten Experimente hatten zum Ziel, Gradienten (Bogensekunden pro Grad Kelvin, $''K^{-1}$) als Maß für die temperaturabhängige Nullpunktdrift abzuleiten und können nach der Art der Temperaturanpassung in zwei Varianten unterteilt werden. Bei der ersten Variante wurden die Sensoren einer größeren, sprunghaften Temperaturänderung ausgesetzt. Eine langsame Anpassung der Sensortemperatur über einen längeren Zeitraum wurde in der zweiten Untersuchung verfolgt. Alle Untersuchungen wurden bei paralleler Ausrichtung der beiden HRTM-Sensoren in zwei Lagen durchgeführt, um die Neigungsänderung der Unterlage während der Messung redundant zu erfassen².

3.5.1 Rasche Temperaturanpassung

Bei der ersten Untersuchung wurden die etwa $20^{\circ}C$ warmen Neigungssensoren in die $-10^{\circ}C$ kalte Klimakammer gebracht und damit einer sprunghaften Temperaturänderung ausgesetzt. Die Erfassung des Neigungssignals und der Sensortemperatur wurde über einen Zeitraum von 110 Minuten durchgeführt. Das Experiment wurde insgesamt dreimal in Lage 1 und dreimal in Lage 2 wiederholt. Für Sensor 2 sind exemplarisch die erfassten Neigungen und Sensortemperaturen sowie deren Mittelwerte für die beiden Lagen in den Abb. 10 und 11 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Neigungskurven am Anfang auf den gleichen Wert zentriert. Bei einer Temperaturabnahme von etwa 25 K ändert sich das Neigungssignal in Lage 1 um etwa 10 Bogensekunden und in Lage 2 um etwa 30 Bogensekunden. Besonders auffällig ist ein Überschwingen im Neigungssignal innerhalb der ersten 30 Minuten der Messungen, in denen die Temperaturanpassung zwischen den Sensoren und der kalten Umgebung am schnellsten stattfindet. Aufgrund unterschiedlich langer Aufbauzeiten zu Beginn der einzelnen Wiederholungsmessungen fallen die Neigungskurven nicht genau zusammen, sondern erscheinen bei ähnlichem Kurvenverlauf in der Höhe versetzt.

Die tatsächliche Neigungsänderung der Unterlage und die Nullpunktänderung der Neigungssensoren kann nun

² Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Ergebnisse in geringem Maße von einer etwaig vorhandenen Scherung der beiden Sensorachsen sowie der Nichtparallelität der Aufstellerebenen in Lage 1 und 2 abhängen.

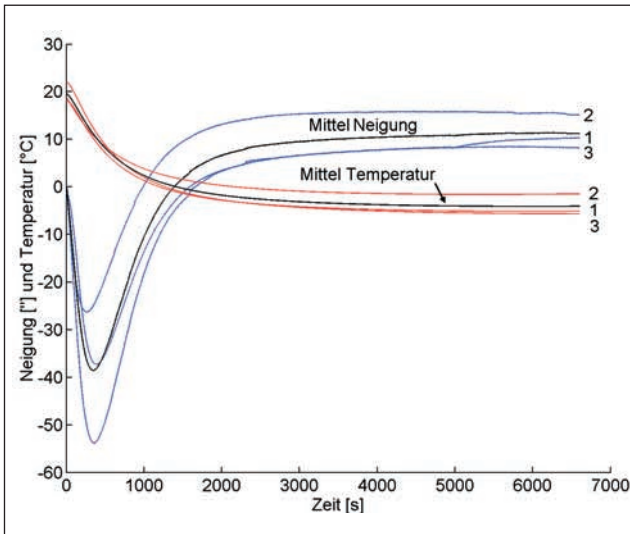


Abb. 10: Neigungs- und Temperatursignale in Lage 1

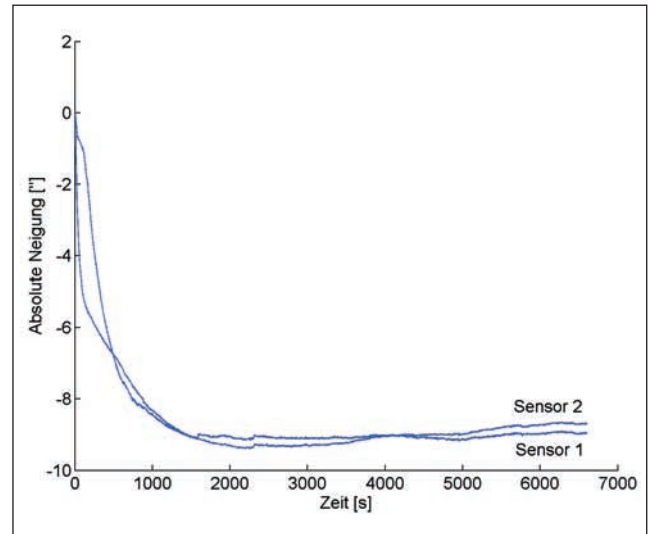


Abb. 12: Neigungsänderung der Unterlage

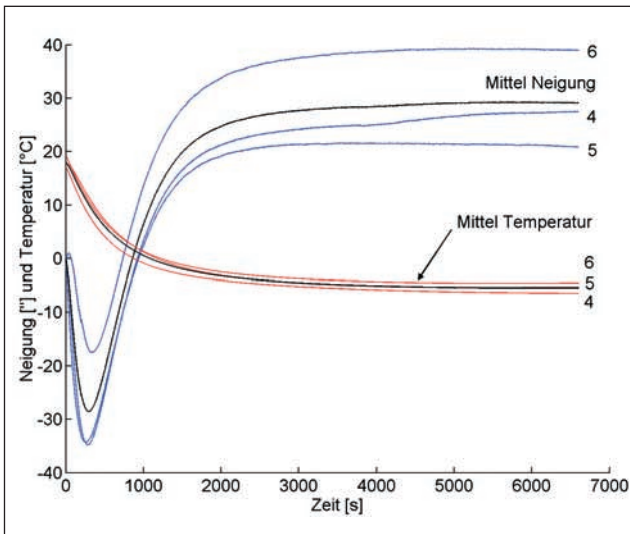


Abb. 11: Neigungs- und Temperatursignale in Lage 2

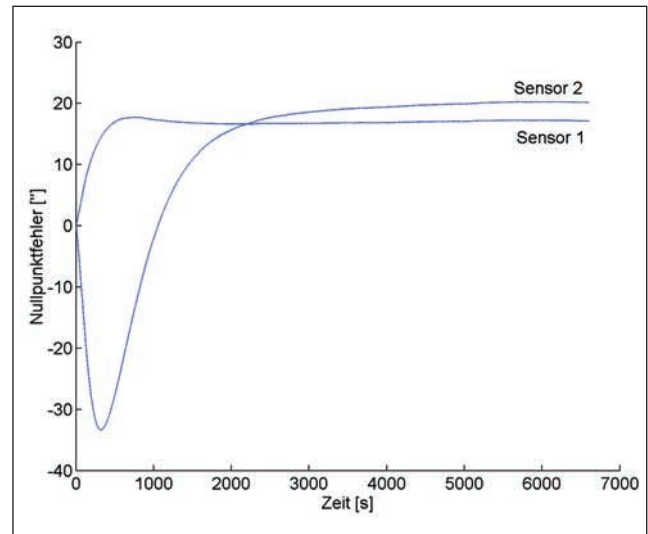


Abb. 13: Nullpunktfehler

durch Differenz- bzw. Mittelbildung der Lagenmittel leicht berechnet werden. Abb. 12 zeigt die Neigungsänderung der Unterlage in der Größenordnung von 10 Bogensekunden, die mit beiden Sensoren in hoher Übereinstimmung redundant ermittelt wurde. Die zeitliche Veränderung der Nullpunkte beider Sensoren ist in Abb. 13 dargestellt. Auffällig ist, dass sich beide Sensoren in der Phase der stärksten Abkühlung am Anfang der Messung unterschiedlich verhalten und der Nullpunkt des Sensors 1 stark ausschwingt. Im weiteren Verlauf der Temperaturanpassung nähern sich die Nullpunktfehler beider Sensoren einander an. Offenbar gibt es mindestens zwei Prozesse mit unterschiedlichen Vorzeichen und verschiedenen Zeitkonstanten, die im Neigungssensor für Temperaturdriften sorgen. Durch Gegenüberstellung der Nullpunktveränderung von 16" (20") für Sensor 1 (2) und der Temperaturänderung von etwa 25 K über einen Zeitraum von 110 min lassen sich nun die Gradienten mit 0.64 K^{-1} und 0.80 K^{-1} abschätzen, wenn der Ausschwingvorgang am Anfang der Messung vernachlässigt wird.

3.5.2 Allmähliche Temperaturanpassung

Beim zweiten Temperaturexperiment wurde die Kühlung der Klimakammer, nachdem die Sensoren in der Klimakammer eine Temperatur von -5 °C erreicht hatten, ausgeschaltet. Neigung sowie Sensortemperatur wurden über einen Zeitraum von 14 Stunden aufgezeichnet; währenddessen erwärmten sich die Sensoren und die Klimakammer allmählich durch langsamen Wärmeaustausch zwischen Klimakammer und Umgebung. Das ganze Experiment wurde für beide Lagen nacheinander durchgeführt. Auf die Darstellung der für beide Lagen aufgezeichneten Neigungswerte und der Neigungsänderung der Unterlage soll an dieser Stelle verzichtet werden. Abb. 14 zeigt den Verlauf der Nullpunktfehler für beide Sensoren über 14 Stunden in Gegenüberstellung mit der Temperaturänderung. Auffällig ist der in guter Näherung lineare Verlauf von Nullpunkt- und Temperaturänderung. In Analogie zum ersten Temperaturexperiment können die Gradienten mit etwa 0.9 K^{-1} und 1.2 K^{-1} abgeschätzt werden.

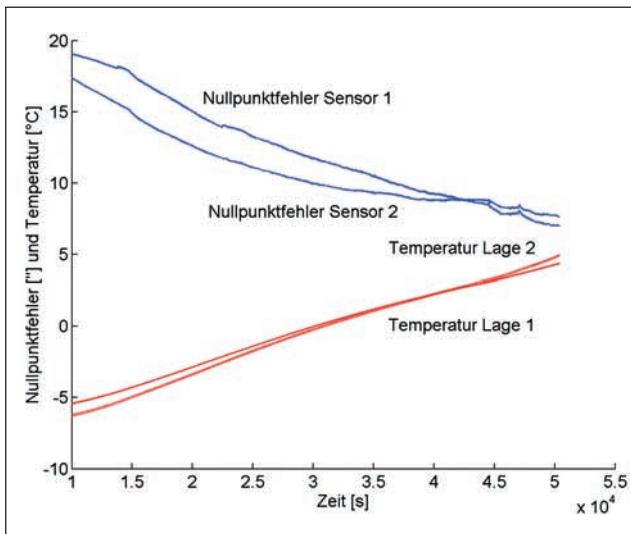


Abb. 14: Nullpunktfehler und Temperatursignale

3.5.3 Ergebnis

Als wesentliches Ergebnis beider Temperaturexperimente kann festgehalten werden, dass Temperaturveränderungen eine Nullpunktdrift im Bereich von $0.6''\text{K}^{-1}$ bis $1.2''\text{K}^{-1}$ verursachen. Im Rahmen von Detailuntersuchungen hat sich herausgestellt, dass Temperaturänderungen zu bleibenden Verlagerungen der Nullpunkte führen, weshalb eine präzise numerische Korrektur der Nullpunktänderungen auf Grundlage der Temperaturmessungen nicht möglich ist.

Aufgrund der nachgewiesenen Temperaturempfindlichkeit der Sensornullpunkte können folgende Schlüsse für den Einsatz der HRTM gezogen werden: Sollen präzise Messungen von Neigungsänderungen in einer Lage durchgeführt werden, so sind möglichst stabile Temperaturverhältnisse notwendig. Diese sind zum Beispiel im Tiefenlabor der Fundamentalstation Wettzell gegeben. Bei absoluten Neigungsmessungen ist die Verwendung eines azimuthal drehbaren Unterbaus notwendig, um die Messung in zwei Lagen zu ermöglichen (Abschnitt 4). Bei stärkeren Temperaturänderungen während der Messung sollte die Erfassung möglichst in der Messanordnung Lage 1 – Lage 2 – Lage 2 – Lage 1 in gleichen Zeitintervallen durchgeführt werden, um die linearen Anteile der Nullpunktdrift vollständig aus dem Mittel eliminieren zu können (Kahlmann 2003).

3.6 Feuchteverhalten

Bei dem Einsatz der HRTM ohne schützendes Gehäuse sind unter hoher Luftfeuchtigkeit allmähliche Verlagerungen der Nullpunkte zu beobachten. Bei der Untersuchung des Feuchteverhaltens der HRTM konnte Klügel (2003) Gradienten von bis zu $0.1''/\%$ bestimmen. Als Ursache kommen hierfür feuchtebedingte Leckströme auf der Sensorelektronik und eine Änderung des Dielektrikums (Luft) im Dreiplattenkondensator des Sensors in

Frage. Feuchteinflüsse auf den Sensor können jedoch durch Verwendung eines zusätzlichen äußeren luftdichten, aber nicht druckdichten Gehäuses vermieden werden, das möglichst mit einem Trockenmittel (Silikagel) ausgestattet ist.

4 Anwendung

Am Institut für Erdmessung werden die HRTM-Sensoren im Rahmen des digitalen Zenitkamarasystems TZK2-D eingesetzt, mit dem die Lotrichtung und Lotabweichung automatisiert bestimmt werden können (Hirt und Seeber 2002; Hirt und Bürki 2002). Die beiden Neigungssensoren werden in orthogonaler Stellung zueinander (Abb. 15) zur präzisen Orientierung der Zenitkamera an der Lotrichtung genutzt. Dazu wird die Stehachse der Kamera mit den Fußschrauben mit einer Unsicherheit weniger Bogensekunden an der Lotrichtung ausgerichtet. Während der Fotografie des zenitalen Sternfeldes werden die verbleibende Neigung (Stehachsenfehler) sowie mögliche Änderungen (Einsinken des Instrumentes) mit den Neigungssensoren zur späteren rechnerischen Korrektur erfasst. Die Zenitkamera ist mit einem präzisen Drehkreis ausgestattet, wodurch die Messung in zwei Lagen zur Elimination der Nullpunktfehler möglich wird. Die genaue Erfassung der Neigung zwischen Lotrichtung und Stehachse des Instrumentes spielt im Fehlerhaushalt von Zenitkammermessungen eine entscheidende Rolle, da sich Unsicherheiten in den Neigungskorrekturen linear auf die Lotrichtung und damit die Lotabweichungen auswirken.

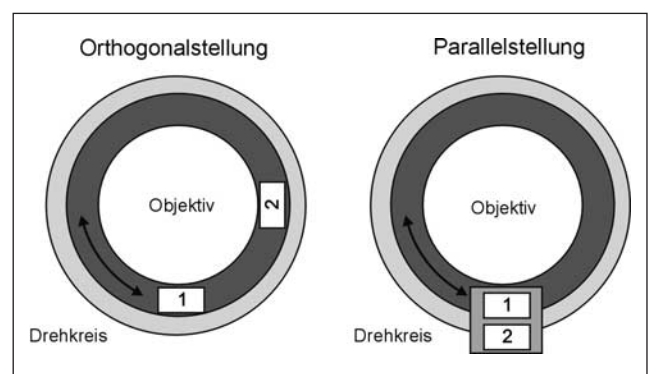


Abb. 15: Drehkreis der Kamera mit Neigungssensoren

4.1 Genauigkeitsnachweis

Ein empirischer Genauigkeitsnachweis für die mit den HRTM durchgeführten Neigungsmessungen wird nachfolgend anhand der Analyse von Wiederholungsmessungen gegeben. Zuvor sollen jedoch noch einige Bemerkungen zur Methodik der Messungen gemacht werden. Ein idealer drehbarer Unterbau soll die Funktion erfüllen, die Neigungssensoren zwischen den beiden Lagen geometrisch innerhalb einer Ebene zu drehen. Hierbei gilt es

zu bedenken, dass auch ein sehr präzise gefertigter Drehkreis diese Funktion aufgrund seines Taumelfehlers nur innerhalb einer gewissen Genauigkeit erfüllen kann. In der Praxis kann mit einem Drehkreis die Neigungsmessung in zwei Lagen nur in zwei *unterschiedlichen* Ebenen realisiert werden, die zueinander geringfügig verkippt sind. Bei der Mittelwertbildung zwischen den beiden Lagen zur Elimination der Nullpunktfehler wird demnach die Neigung einer *mittleren* Ebene berechnet (Abb. 16). Die Lage der mittleren Ebene ist bei wiederholter Zweilagennmessung nicht exakt reproduzierbar, sie zeigt eine gewisse Streuung, die nachfolgend als Wiederholgenauigkeit der Drehung bezeichnet wird.

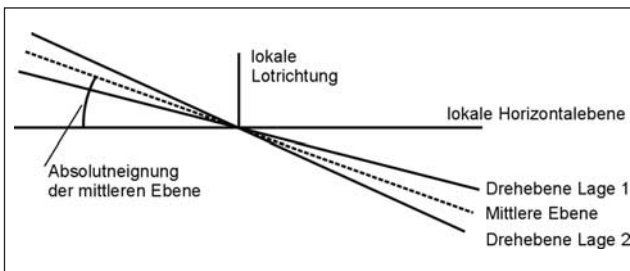


Abb. 16: Drehkreisebenen

Werden wiederholte Neigungsmessungen mit nur einem Sensor auf einem Drehkreis durchgeführt, so beinhaltet die Streuung der Neigungsmessungen sowohl die Genauigkeit des Neigungssensors als auch die Wiederholgenauigkeit der Drehung. Eine Separation beider Einflüsse wird möglich, wenn zwei Neigungssensoren in Parallelstellung gebracht werden. In dieser Konfiguration wird die Neigung der Kamera in einer Richtung redundant erfasst und erlaubt die Unterscheidung zwischen der Genauigkeit der Neigungssensoren und der Genauigkeit des Drehkreises.

Für das Experiment wurden die beiden HRTM parallel zueinander ausgerichtet und gemeinsam auf dem Drehkreis der Zenitkamera befestigt (Abb. 15, rechts). Die Neigungsmessung wurde nach der Horizontierung des Drehkreises in zwei Lagen durchgeführt und insgesamt 100-mal wiederholt. Die Neigungssignale wurden mit einer Frequenz von 100 Hz digitalisiert und mit einer Grenzfrequenz von 0.3 Hz tiefpassgefiltert.

Abb. 17 zeigt die mit beiden Sensoren ermittelte Neigung der Kamera gegenüber der Lotrichtung nach Auswertung der Zweilagennmessungen. Sehr auffällig ist, dass mit beiden Neigungssensoren die Neigung der Kamera in hoher Übereinstimmung gemessen wird. Die Wiederholgenauigkeit der Drehung zeigt sich in den höherfrequenten Variationen beider Signale und kann mit 0.2 bis 0.3 Bogensekunden abgeschätzt werden. In der Abbildung ist deutlich ein abfallender Trend in beiden Signalen zu erkennen. Hier zeigt sich eine allmähliche Neigungsänderung des Instrumentes gegenüber der Lotrichtung. Die Residuen zwischen den beiden Neigungskurven spiegeln die Genauigkeit der HRTM wider und werden im unteren Teil der Abb. 17 gezeigt. Die aus den Residuen

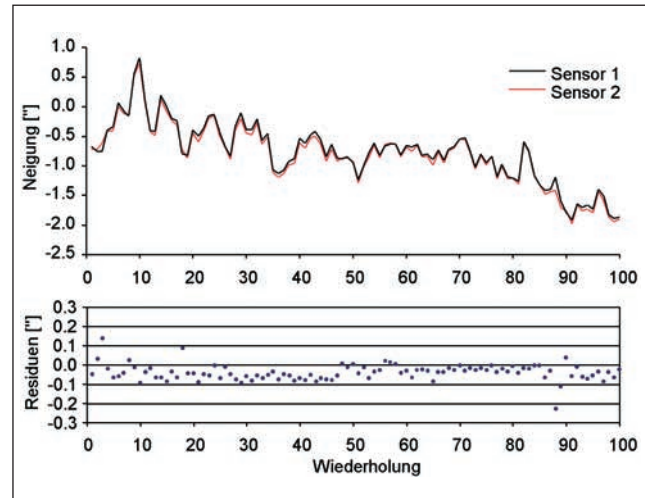


Abb. 17: Neigung der Kamera und Residuen

berechnete Standardabweichung beträgt etwa 0.04 Bogensekunden und kann als realistische Genauigkeitsangabe für Neigungsmessung in zwei Lagen angesehen werden. Damit leisten die HRTM einen wertvollen Beitrag im Rahmen der präzisen Lotrichtungsbestimmung.

4.2 Nullpunktverschiebung durch Pendelauslenkung

An dieser Stelle soll auf ein Problem hingewiesen werden, das bei der Verwendung der HRTM zur genauen Neigungsmessung in zwei Lagen auftreten kann. Während der azimuthalen Drehung des Drehkreises zwischen den beiden Lagen treten Fliehkräfte auf, die die Pendel nach außen – in Richtung der äußeren Kondensatorplatte – auslenken. Durch den Einfluss der Fliehkräfte wird die empfindliche Blattfederaufhängung in tangentialer Richtung nicht nur elastisch, sondern auch geringfügig plastisch deformiert, wodurch der Nullpunkt dauerhaft verschoben wird. Der Effekt kann bis zu 1 Bogensekunde³ betragen und stellt ohne Gegenmaßnahmen einen äußerst kritischen Anteil im Fehlerbudget von absoluten Neigungsmessungen mit den HRTM-Sensoren dar.

Eine erhebliche Reduzierung des Effektes kann durch Verwendung der Arretierschrauben erzielt werden. Diese lassen sich so einstellen, dass das Pendel während der Drehung die Arretierschraube berührt und damit mechanisch nur geringfügig ausgelenkt wird (vgl. Stellung der Schrauben in Abb. 2). Hierdurch kann eine Deformation der Blattfeder in Folge der Pendelauslenkung weitgehend vermieden werden und die Nullpunktverschiebung während der Drehung auf wenige 0.01 Bogensekunden reduziert werden. Abb. 18 zeigt die Wirksamkeit der Maßnahme anhand der Residuen aus Wiederholungsmessungen

³ Der bewegliche Teil der Blattfeder hat eine Länge von etwa 1 mm (vgl. Abb. 2). Mit der Bogenformel kann abgeschätzt werden, dass eine Deformation von 1 Bogensekunde in tangentialer Richtung einer Verbiegung von nur 5 Nanometern (!) entspricht.

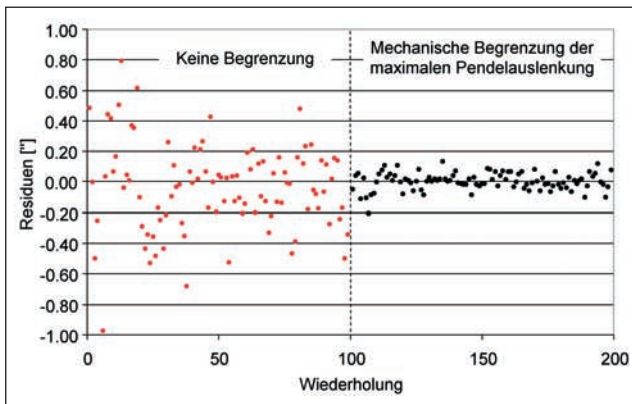


Abb. 18: Residuen im Vergleich

101 bis 200 im Vergleich zu den Messungen 1 bis 100 deutlich. Trotz der kleinen Residuen ist der Effekt der auslenkungsbedingten Nullpunktverschiebung als Genauigkeitsbegrenzend im Anwendungsfall der absoluten Neigungsmessung in zwei Lagen zu bewerten.

5 Schluss

Mit dem hochauflösenden Neigungssensor HRTM können in der gegenwärtigen Konfiguration Neigungsmessungen in zwei Lagen mit einer Genauigkeit von besser als 0.05 Bogensekunden durchgeführt werden. Dazu ist es notwendig, die Vielzahl von Fehlerquellen, die die Nullpunktstabilität beeinflussen, zu beherrschen. Unter stabilen Laborbedingungen kommen die Stärken des HRTM-Sensors vollständig zur Geltung, nämlich die Fähigkeit zur hochauflösenden Messung kleinster Neigungsänderungen wie beispielsweise der Lotschwankung aufgrund von Erdzeiten. Es bleibt festzustellen, dass der untersuchte HRTM-Sensor weit über das Leistungsvermögen von anderen bekannten Neigungssensoren hinausgeht und deshalb das Potenzial hat, zukünftig auch in weiteren Anwendungsfeldern eingesetzt zu werden.

Dank

Die Autoren danken Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand für die Bereitstellung der Klimakammer und des interferometrischen Neigungstisches, Dr. Thomas Klügel für den Erfahrungsaustausch sowie Dipl.-Ing. Ortwin Krüger für die wertvollen Diskussionen. Herrn Dipl.-Geophys. Erich Lippmann sei für die gute Unterstützung bei der Anpassung der Neigungssensoren für den Einsatz auf der digitalen Zenitkamera herzlich gedankt.

Literatur

- Hallermann, L. und Kalischewski, N.: Bemerkungen zum Temperatureinfluß bei der elektronischen Libelle Talyvel. *ZfV* 103: S. 20–27, 1978.
- Hirt, C. und Bürki, B.: The Digital Zenith Camera – A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Vertical Deflections. *Proceed. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki*, S. 161–166, 2002.
- Hirt, C. und Seeber, G.: Astrogeodätische Lotabweichungsbestimmung mit dem digitalen Zenitkameranystem TZK2-D. *zfv* 127: S. 388–396, 2002.
- Ingensand, H.: Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung hochgenauer elektronischer Neigungsmeßsysteme für kontinuierliche Messungen. *Veröffentlichungen der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften; Heft Nr. 308*, München, 1985.
- Kahlmann, T.: Untersuchungen zur hochpräzisen Neigungsmessung mit elektronischen Pendelsystemen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Erdmessung der Universität Hannover, 2003.
- Klinge, K., Kroner, C. und Zürn, W.: Broadband seismic noise at stations of the GRSN. Veröffentlicht in: Korn, M. (ed.): *Ten Years of German Regional Seismic Network (GRSN)*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- Klügel, T.: Bestimmung lokaler Einflüsse in den Zeitreihen inertialer Rotationssensoren. *Schlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt LOK-ROT, Fundamentalstation Wettzell*, 2003.
- Klügel, T., Schreiber, U., Schneider, M., Riepl, S., Schlüter, W., Weber, H. und Stedman, G. E.: Realisierung des Großringlasers G auf der Fundamentalstation Wettzell, 2000. Veröffentlicht im WWW unter der URL: <http://www.wettzell.ifag.de/publ/publ/wtz152a.pdf>.
- Kobarg, W.: Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekstroem-Schelfeises; *Berichte zur Polarforschung Nr. 50*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1988.
- Lippmann, E.: schriftliche Mitteilungen an Christian Hirt, 2004.
- Schreiber, U.: Ringlasertechnologie für geowissenschaftliche Anwendungen. *Mitt. Bundesamt f. Kartographie u. Geodäsie, Band 8*, Frankfurt, 2000.
- Stearns, S. D. und Hush, D. R.: *Digitale Verarbeitung analoger Signale*. Oldenbourg Verlag, München, 1999.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Christian Hirt
 Institut für Erdmessung
 Universität Hannover
 Schneiderberg 50
 30167 Hannover
 Tel.: 0511 7623892
hirt@mbox.ife.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Timo Kahlmann
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
 ETH Hönggerberg HIL D 46.1
 CH-8093 Zürich
 Tel.: +41 1 63 33044
kahlmann@geod.baug.ethz.ch