

Temperaturabhängigkeit der Kreiselmessungen mit einem GYROMAT 2000

Werner Lienhart und Fritz K. Brunner

Zusammenfassung

Die geforderte Genauigkeit für die Absteckung von langen Tunneln ist nur durch den Einsatz von Vermessungskreisen erreichbar. Der derzeit genaueste Kreiselmessgerät ist der vollautomatisierte DMT GYROMAT 2000. Unsere Untersuchungen und die Ergebnisse anderer Labors zeigen, dass die Genauigkeit der gemessenen Azimute durch nicht kompensierte Temperatureffekte beeinträchtigt wird. Dies ist vor allem bei großen Tunnelprojekten mit Temperaturunterschieden von bis zu 50 °C zwischen Oberfläche und Tunnel kritisch.

Wir berichten über die Ergebnisse von Systemkalibrierungen eines GYROMAT 2000 im Temperaturbereich von -10 °C bis +40 °C. Anhand von mehrtägigen Zyklen von Azimutmessungen zeigen wir, dass mit einer um einen hyperbolischen Ansatz erweiterten linearen Korrekturfunktion Azimutmessungen mit einer Standardabweichung von 0,77 mgon auch bei extremen Temperaturunterschieden von 50 °C möglich sind.

Summary

Precise azimuth measurements using gyroscopes have become indispensable for large tunneling projects. Currently, the most accurate gyroscope is the fully automatic DMT GYROMAT 2000. Our investigations and the work of other laboratories show that the accuracy of the measurements is affected by uncompensated temperature effects. This is a critical issue, especially for large tunneling projects with temperature differences up to 50 °C between the surface and the tunnel.

We report the results of system calibrations of a GYROMAT 2000 in the temperature range between -10 °C and +40 °C. With data from two cycles of azimuth measurements we show that a linear correction function extended with a hyperbolic term yields azimuth measurements with a standard deviation of 0.77 mgon even for the extreme temperature variation of 50 °C.

1 Einleitung

Kreiselmessungen sind unerlässlich für Kontrollvermessungen in langen Tunneln. In den üblicherweise sehr schmalen Tunnelnetzen mit ihrer unvermeidbaren schlechten Geometrie für die Richtungsübertragung bieten Kreiselmessungen die einzige Möglichkeit einer Stabilisierung der Genauigkeit der Tunnelrichtung. Die sich daraus ergebenden Hauptanwendungen für Vermessungskreisel im Tunnelbau sind

- Richtungsübertragung vom oberirdischen Netz in das Tunnelnetz, z. B. in einem vertikalen Schacht,

- Verbesserung der Fehlerfortpflanzung im Tunnelnetz und damit Verkleinerung des Durchschlagsfehlers und
- Reduktion der Horizontalrefraktionseffekte.

Die Genauigkeit und Präzision von Kreiselmessungen ist durch unterschiedliche Effekte beeinflusst. Insbesondere nicht detektierbare temperaturabhängige Azimutabweichungen haben in letzter Zeit eine kritische Beachtung gefunden, besonders angeregt durch Azimutübertragungen über mehrere 100 m tiefe Schächte, wie zum Beispiel beim Bau des Gotthardtunnels am Zwischenangriff Sedrun (Carosio und Ebnetter 1998). Das über dem Tunnel liegende Bergmassiv kann Untergrundtemperaturen von mehr als +40 °C verursachen, während die Temperaturen an der Oberfläche im Winter durchaus unter -10 °C liegen können. Daher sind Temperaturunterschiede von fast 50 °C zwischen den Kalibrierungen auf den oberirdischen Stationen und den unterirdischen Azimutmessungen möglich.

Um temperaturbedingte Einflüsse zu berücksichtigen, wird die Temperatur im GYROMAT 2000 gemessen und die Messwerte werden intern korrigiert. Die Parameter der dafür notwendigen Temperaturkorrekturfunktion werden durch Kalibrierungen bei der Deutschen Montan Technologie (DMT) bestimmt. Heister (1992) und Carosio und Ebnetter (1998) zeigten aber, dass mit der internen Korrektur nicht immer die Nennmesspräzision eingehalten werden kann. Dies war der Anlass, die Temperaturabhängigkeit der Azimutmessungen des institutseigenen GYROMAT 2000 zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden an der TU Graz spezielle Kalibrieranlagen entwickelt (Grillmayer 2003). Alternativ zu den Kreiselmessungen mit der internen Temperaturkorrektur hat sich in Zusammenarbeit mit DMT die Möglichkeit ergeben, auch Messungen ohne die interne Temperaturkorrektur durchzuführen. Aus den umfangreichen Kalibrierungen wurden Korrekturfunktionen abgeleitet. Wir zeigen, dass bei der richtigen Berücksichtigung der Temperatureinflüsse Azimutbestimmungen über einen Temperaturbereich von 50 °C mit einer Präzision von 0,77 mgon mit dem GYROMAT 2000 möglich sind.

2 DMT GYROMAT 2000

Der GYROMAT 2000 wurde von DMT 1991 erstmals vorgestellt und ist derzeit der genaueste am Markt erhältliche Vermessungskreiselmessgerät. Eichholz und Schäfler (1978) beschrieben bereits 1978 den Originalaufbau eines Gyro-

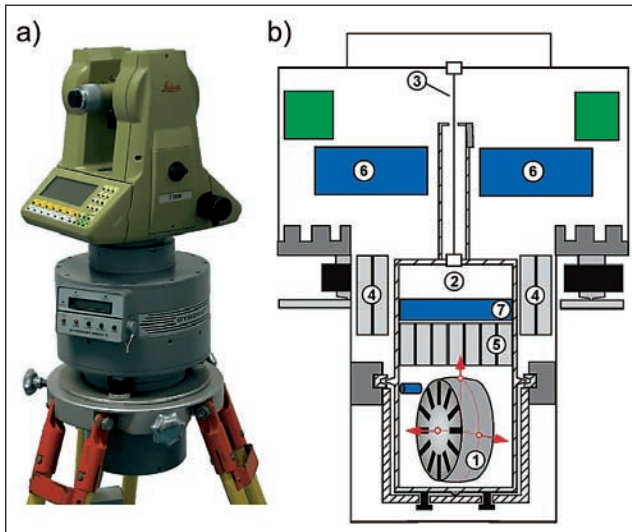


Abb. 1: (a) GYROMAT 2000 mit fest montiertem Theodolit Leica T 1800; (b) Schnittzeichnung des GYROMAT 2000 (Beschreibung der nummerierten Komponenten siehe Text)

mat. Die Entwicklung des Instrumentes und dessen Arbeitsweise wurden von Korritke (1997) zusammengefasst.

Der GYROMAT 2000 ist ein vollautomatisch arbeitender, bandgehängter Deklinationskreisel. Abb. 1a zeigt das Instrument mit einem fest montierten Leica T 1800 Theodolit, Abb. 1b eine Schnittzeichnung des Kreisels (Grillmayer 2003). Der Rotor (1) mit einer Masse von 2 kg befindet sich gemeinsam mit der internen Batterie (5) und der Elektronik (7) in der sogenannten Läuferbuchse (2). Diese hängt an einem Stahlband (3). Die interne Batterie wird über eine externe Batterie (4) geladen und die Messungen werden in einer Berechnungseinheit (6) ausgewertet. Der Rotor wird von einem Gleichstrommotor bei geringer Wärmeentwicklung angetrieben. Nach Eichholz (1980) verursacht der Läufer im Betrieb einen internen Temperaturanstieg von ca. 1 °C.

Die Präzision der Messungen mit einem Vermessungskreisel ist abhängig vom Breitengrad des Beobachtungsstandpunktes. Sie ist am Äquator am größten und verschlechtert sich in Richtung der Pole auf Grund des kleiner werdenden Richtmomentes. Heister et al. (1992) leiteten aus umfangreichen Kreismessungen mit einem Gyromat eine breitenabhängige Formel zur Abschätzung der Genauigkeit ab. Für die Breite von Graz (47°03') ergibt sich daraus eine Genauigkeit von 0.91 mgon. Wendet man die im Handbuch des GYROMAT 2000 angegebene breitenabhängige Formel an, so erhält man für die Breite von Graz eine Präzision von 0.73 mgon. Für die Bestimmung der Präzision einer Azimutbestimmung s_A muss neben der Präzision der eigentlichen Kreismessung s_N noch die Präzision der Richtungsmessung mit dem Theodoliten s_R berücksichtigt werden:

$$s_A = \sqrt{s_N^2 + s_R^2} \quad (1)$$

Korritke (1997) leitete aus mehreren Messreihen eine kombinierte Standardabweichung s_A für den GYROMAT

2000 von 0.8 mgon ab, wobei die verwendeten Theodolit-typen nicht angegeben wurden. In der DMT Broschüre und im Handbuch wird die Präzision des GYROMAT 2000, unter Berücksichtigung der Präzision der Richtungsmessung, mit ≤ 1.0 mgon für den gesamten Arbeitsbereich von -20 °C bis $+50$ °C angegeben.

Sowohl die Bandnulllage (Rotor in Ruhe) als auch die mittlere Position des oszillierenden Rotors sind temperaturabhängig. Zur Vermeidung von Temperaturgradienten während der Messung ist eine ausreichende Akklimation des Instrumentes erforderlich. Laut Hersteller sind Messungen mit einer Präzision unter 1.0 mgon nur möglich, wenn der Temperaturunterschied zwischen der Umgebungsluft und der Innentemperatur des Instrumentes weniger als 5 °C beträgt (DMT 1993). Bei einer Temperaturdrift von mehr als 0.25 °C/min gibt der GYROMAT 2000 eine Warnung, und die Messung sollte verworfen werden. Mit den intern gemessenen Temperaturen T_i wird folgende Azimutkorrektur dA automatisch angebracht (Rommel 1991):

$$dA = \beta_1 \cdot \Delta_B \cdot dT + \beta_2 \cdot T_i \quad (2)$$

wobei Δ_B der Winkel zwischen der Kreiselreferenzmarke und der Nulllage des Stahlbandes, dT die Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kreismessung und T_i die mittlere innere Temperatur des Kreisels ist. Die Koeffizienten β_1 und β_2 werden durch die Kalibrierung vom Hersteller bestimmt. Mit dieser Kalibrierfunktion sollte die Einhaltung der Nennmesspräzision möglich sein.

Allerdings haben Untersuchungen durch verschiedene geodätische Labors gezeigt, dass dies häufig nicht der Fall ist. Heister (1992) berichtete über systematische Azimutfehler von ca. 2 mgon im Temperaturbereich von -5 °C bis $+30$ °C. Carosio und Ebner (1998) untermauerten diese Ergebnisse mit eigenen Experimenten und beobachteten Abweichungen von ca. 5 mgon im Temperaturbereich von -10 °C bis $+40$ °C. Als Konsequenz empfahlen sie die Entwicklung einer neuen Kalibrierfunktion und Reduktion der Messwerte auf eine Referenztemperatur.

3 Kalibriereinrichtung

Im geodätischen Messlabor der TU Graz wurde daher eine Kalibriereinrichtung zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit von Vermessungskreiseln entwickelt. Details über das Design und die speziell für die Kalibrieranlage gebauten Ausstattungen, z. B. Halterungen, Ziele, Autokollimation, sind in Grillmayer (2003) ausführlich beschrieben. Das Instrument wird in einer Klimakammer, mit der definierbare Umgebungstemperaturen realisiert werden können, aufgebaut. Die Ziele befinden sich allerdings außerhalb der Klimakammer im Labor bei konstanter Umgebungstemperatur (22 ± 0.3 °C). Damit können



Beobachtungsfenster

Abb. 2: Klimakammer

temperaturbedingte Änderungen der Ziele ausgeschlossen werden.

Die Klimakammer wurde so gestaltet, dass sich nur der Kreisel in der Kammer befindet. Der Pfeiler, auf dem der Kreisel mit einem Kreiseltopf montiert ist, befindet sich bereits außerhalb der Kammer, siehe Abb. 2. Dies hat den Vorteil, dass keine temperaturinduzierten Bewegungen des Pfeilers auftreten können. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass nur ein Volumen von weniger als 1 m³ Luft klimatisiert werden muss. Daher können Temperaturänderungen in relativ kurzer Zeit realisiert werden. Als thermische Barriere zwischen Pfeiler und Klimakammer wird faserverstärkter Kunststoff mit niedrigem thermischen Übertragungskoeffizient verwendet. Die Klimakammer ist vom Pfeiler mechanisch entkoppelt und durch zwei Gummiringe abgedichtet. Zur manuellen Bedienung des Kreisels und des aufgesetzten Theodolits werden Gummihandschuhe verwendet (Abb. 3).

Der Nachteil der Konstruktion besteht darin, dass keine manuelle Anzielung durch das Okular möglich ist. Daher wird zur Beobachtung des Zielbildes und des Strichkreuzes eine CCD-Kamera verwendet (Abb. 4). Ein spezieller Träger für die Kamera wird auf den Theodolit aufgesetzt.

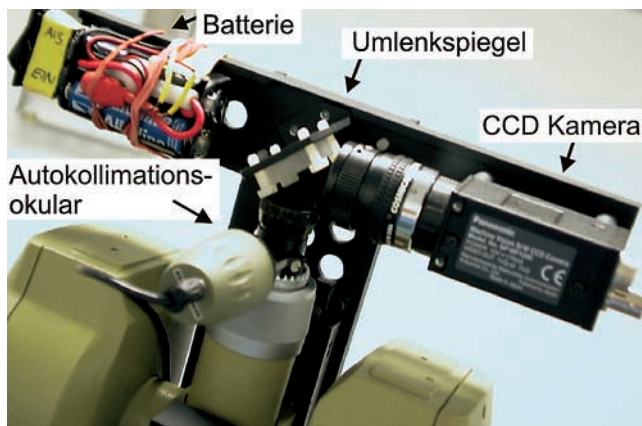


Abb. 4: Autokollimationsaufsatz

Abb. 3: Bedienung des Kreisels in der Kammer



Gummiring

Pfeilerplatte

Zusätzlich sind auf diesem Träger ein Spiegel zur Ablenkung des Fadenkreuz- und Zielbildes und die Batterien zur Stromversorgung des Autokollimationsokulars montiert. Die Batterien dienen gleichzeitig als Gegengewicht zur CCD-Kamera. Der Theodolitaufsatz wurde so gestaltet, dass ein Durchschlagen und damit Messen in zwei Kreislagen möglich ist. Das CCD-Bild wird vom Beobachter zum Anzielen auf einem Bildschirm außerhalb der Klimakammer betrachtet.

Azimummessungen werden durch Kreiselmessungen und (nahezu horizontale) Richtungsmessungen zu zwei externen Autokollimationsspiegeln durchgeführt. Für die Messungen zu den Autokollimationsspiegeln wurden spezielle Glasfenster in die Klimakammer eingesetzt (Abb. 2 und Grillmayer 2003).

4 Bisherige Ergebnisse von Kalibrierungen

4.1 Einfluss einer zyklischen Temperaturänderung bei interner Temperaturkorrektur

Wie zuvor beschrieben wird die Temperatur im GYROMAT 2000 gemessen und die Messwerte werden intern korrigiert. Carosio und Ebnetter (1998) berichteten über Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit mit dem GYROMAT 2000 der ETH Zürich, der einen fest montierten Theodoliten Leica T 1600 hat. Sie beobachteten Variationen von 5.0 mgon für einen Temperaturunterschied von 50 °C in der Klimakammer der ETH Zürich. Interessanterweise waren die Abweichungen abhängig vom Vorzeichen der Temperaturänderung, d. h. Abkühlung oder Erwärmung.

Desiderio und Koch (1998) verwendeten den ETH Zürich GYROMAT 2000, im Weiteren GYR-ETH genannt, für weitere, detailliertere Untersuchungen und beobachteten eine Hysterese in allen Messzyklen im Temperaturbereich

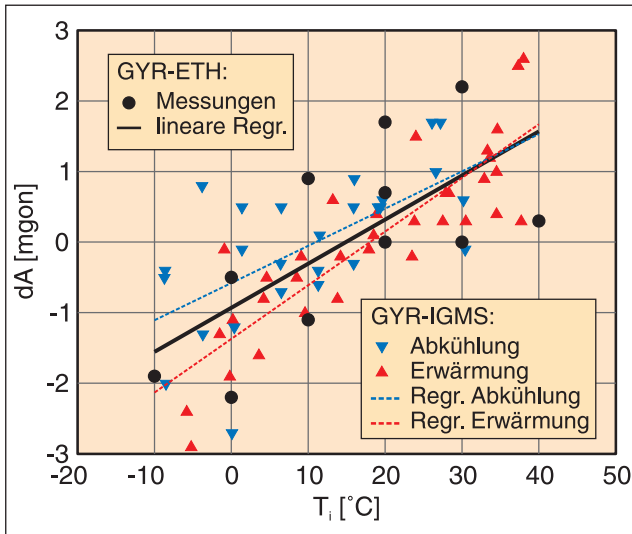


Abb. 5: Temperaturabhängigkeit der Azimutmessungen von GYR-ETH und GYR-IGMS (Brunner und Grillmayer 2002)

von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ihre Messungen vom 5.5.1997 sind in Abb. 5 als schwarze Punkte dargestellt. Die Residuen der Azimutabweichungen können mit einer einfachen Regressionsgeraden mit einer Steigung von $0.062\text{ mgon}/^{\circ}\text{C}$ modelliert werden. Wird dieses lineare Regressionsmodell auf die Messwerte angewendet, reduziert sich die empirische Standardabweichung einer einzelnen Azimutbeobachtung von 1.5 mgon auf 1.1 mgon .

Unser GYROMAT 2000, im Folgenden GYR-IGMS bezeichnet, hat einen fest montierten Theodoliten Leica T 1800. Damit wurde von Grillmayer (2003) eine unabhängige Verifikation der ETH Zürich Ergebnisse in einem fünftägigen Temperaturzyklus ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$) durchgeführt. Obwohl über diese Resultate bereits von Brunner und Grillmayer (2002) berichtet wurde, sollen sie hier nochmals zum Vergleich gezeigt werden. In diesem Test wurden die internen (DMT) Temperaturkorrekturen vom Gerät angebracht. Die Temperatur in der Klimakammer wurde in $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Schritten verändert, mit jeweils einer Akklimatisationszeit von zwei Stunden vor dem Beginn jeder Kreiselmessung. Abb. 5 zeigt die Azimutänderungen als eine Funktion der internen Temperatur T_i mit unterschiedlichen Farben für Erwärmung und Abkühlung der Umgebungstemperatur. Die Standardabweichung um den Mittelwert beträgt 1.1 mgon . Eine lineare Regression aus allen Daten ergibt:

$$dA = -0.93 + 0.062 \cdot T_i, \text{ in [mgon]} \quad (3)$$

wobei die Kreiselinnentemperatur T_i in $^{\circ}\text{C}$ verwendet wird. Die Steigung der Regressionsgeraden ist mit $0.062 \pm 0.013\text{ [mgon}/^{\circ}\text{C}]$ statistisch signifikant. Korrigiert man die Daten mit dieser linearen Funktion, dann reduziert sich die Standardabweichung auf 0.75 mgon und stimmt nun mit den Herstellerangaben überein.

Interessant ist ein Vergleich mit den Ergebnissen von Desiderio und Koch (1998) in Abb. 5, die mit dem GYR-ETH erzielt wurden. In beiden Fällen war der Temperatur-

bereich $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, und die vom Hersteller bestimmten internen Korrekturen wurden vom jeweiligen Kreisel angebracht. Unsere Klimakammer unterscheidet sich aber von dem wesentlich größeren Klimaraum der ETH Zürich. Zusätzlich wurden unterschiedliche Theodolite und andere Verfahren zur Richtungsmessung verwendet. Trotzdem ergab sich in beiden Untersuchungen eine identische Steigung der Regressionsgeraden von $0.062\text{ mgon}/^{\circ}\text{C}$. Wichtig ist, dass diese zusätzliche Korrektur an die bereits intern vom Gerät korrigierten Werte angebracht werden soll. Dies wirft die Frage auf, ob es nicht möglich wäre, die Korrektur des Gerätes so durchzuführen, dass eine nochmalige nachträgliche Korrektur unnötig wird, so wie es das Konzept des GYROMAT 2000 eigentlich vorsieht.

4.2 Kalibrierung des GYR-IGMS ohne interne Temperaturkompensation

Um eine effektive Temperaturkompensation zu entwickeln, wurden mit der Hilfe von DMT die Koeffizienten der internen Temperaturkompensation des GYR-IGMS auf Null gesetzt. Grillmayer (2003) führte mit dem nun nicht mehr temperaturkompensierten Kreisel Messungen über einen mehrtägigen Temperaturzyklus von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch (November 2001). Aus diesen Daten wurden Polynome zweiten Grades zur Interpolation der Azimutabweichungen dA in mgon abgeleitet (Brunner und Grillmayer 2002):

$$dA = a_0 + a_1 \cdot T_i + a_2 \cdot T_i^2 \quad (4)$$

wobei T_i in $^{\circ}\text{C}$ verwendet wird. Gleichung (4) setzt eine Referenztemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, wie auch von DMT verwendet, voraus. Die Polynomannpassung durch alle Punkte ergibt eine Standardabweichung von 0.74 mgon und liegt bereits innerhalb der Spezifikation. Nachdem andere Benutzer über einen »Einschalteffekt« (Heister und DMT; persönliche Mitteilungen) berichteten, wurden die ersten Messungen nach einem Temperatursprung und nach der Ruhephase (während der Nacht) eliminiert. Dadurch wird die Standardabweichung (std) noch weiter reduziert und beträgt 0.69 mgon , siehe Tab. 1. Der Koeffizient a_0 wird in Tab. 1 nicht gezeigt, da er in die Eichkonstante E einfließt, welche vor und nach den Azimutmessungen im Feld auf Eichlinien bestimmt wird.

Tab. 1: Ergebnisse der Polynomannpassung mit Referenztemperatur $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Brunner und Grillmayer 2002)

Nov. 2001	Alle Daten	Ohne erste Beob. jeder Messgruppe
# Daten	46	31
$a_1\text{ [mgon}/^{\circ}\text{C}]$	0.432	0.407
$a_2\text{ [mgon}/^{\circ}\text{C}^2]$	-0.0014	-0.0009
std [mgon]	0.74	0.69

Brunner und Grillmayer (2002) untersuchten zusätzliche Polynome für Erwärmung, Abkühlung und konstante Temperatur, konnten aber keine nennenswerten Unterschiede für die einzelnen Temperaturzustände feststellen.

5 Neue Untersuchungen

5.1 Systemkalibrierung

In unseren Untersuchungen wird das Konzept der Systemkalibrierung angewendet (Brunner und Woschitz 2001). Als Messsystem betrachten wir die Kombination Kreisel – Theodolit inklusive sämtlicher Korrekturen und Datenauswertung durch die Firmware. Das Verhalten von individuellen Komponenten ist nicht von Interesse, sondern nur das Resultat einer Messung, welches mit den »richtigen« Werten verglichen wird. In der Kalibriereinrichtung der TU Graz sind die »richtigen« Werte die Richtungen der Spiegelnormalen der Autokollimationsziele, die so konstruiert wurden, dass sie während eines Messdurchgangs definitiv in Ruhe bleiben. Als Resultat der Untersuchungen der Temperatureffekte liefert die Systemkalibrierung Residuen, also die Abweichungen der beobachteten Azimute von den konstanten Spiegelnormalen.

5.2 Erreichbare Präzision ohne Temperatureinfluss

Damit der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Azimutmessungen richtig abgeschätzt werden kann, soll zuerst untersucht werden, welche Präzision mit unserem Messsystem, inklusive planparalleler Glasplatten, Autokollimationsspiegel und CCD-Kamera, bei konstanter Umgebungstemperatur überhaupt erreichbar ist.

Zu diesem Zweck wurden bei offener Klimakammer, also konstanter Umgebungstemperatur von 22 °C, acht Azimutmessungen durchgeführt. Die aus diesen Messungen berechnete Standardabweichung einer einzelnen Azimutbestimmung beträgt 0.62 mgon. Dies bedeutet, dass selbst bei der vollständigen Korrektur der Temperatureinflüsse die Standardabweichung bei diesem Gerät nicht besser als 0.62 mgon sein kann. Deshalb wird dieser Wert für die Modellierung des Temperatureinflusses als optimales Ziel festgelegt.

5.3 Neue Kreiselmessungen bei Temperaturzyklus

Zur Verifikation der von Brunner und Grillmayer (2002) abgeleiteten Korrekturfunktion wurde im März 2003 ein fünftägiger Zyklus von Azimutmessungen im Temperaturbereich von -10 °C bis +40 °C beobachtet. Die Korrekturwerte der internen Korrekturfunktion des GYR-IGMS wurden wieder zu Null gesetzt. Wie bereits in Abschnitt 4.2 angeführt ist es sinnvoll, die erste Messung nach ei-

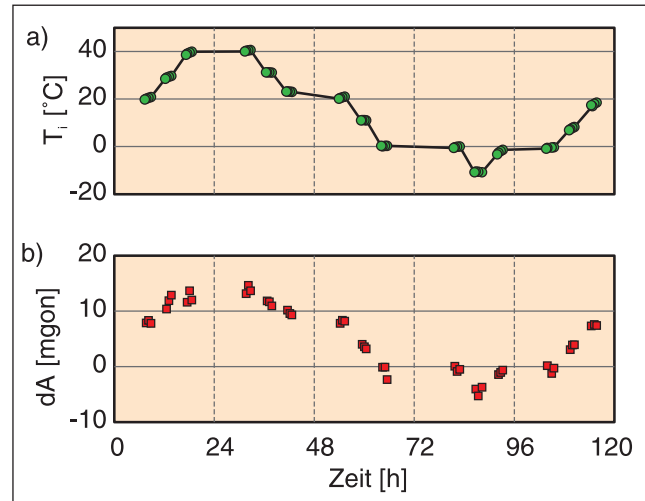


Abb. 6: Fünftägiger Zyklus: (a) Intern gemessene Temperaturen, T_i ; (b) gemessene Azimutänderungen dA

ner längeren Ruhepause oder nach einer großen Temperaturänderung nicht zu verwenden. Daher wurden bei der jeweils ersten Kreiselmessung keine Richtungsmessungen durchgeführt und diese erste Kreiselmessung jeder Serie eliminiert. Eine Akklimatisationszeit von mehr als drei Stunden wurde nach jeder Temperaturänderung eingehalten. Abb. 6a zeigt die internen Kreiseltemperaturen T_i und Phasen der Erwärmung und Abkühlung des Temperaturzyklus. Über Nacht wurde die jeweils letzte Temperatur konstant gehalten. Aus Abb. 6b ist ersichtlich, dass die unkorrigierten Azimutabweichungen dA dem Temperaturverlauf folgen und eine Spannweite von fast 20 mgon besitzen.

Die Abhängigkeit der Azimutabweichungen von der Kreiselinnentemperatur ist in Abb. 7 dargestellt. Eine Korrektur der Azimutabweichungen mit dem in Tab. 1 angeführten Polynom zweiten Grades (ohne erste Beobachtungen) liefert eine Standardabweichung von 0.96 mgon für die einzelne Azimutbestimmung. Dieser Wert unterscheidet sich statistisch signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$) von der Standardabweichung der korrigierten Azimute vom November 2001 (0.69 mgon). Eine Bestimmung von neuen Koeffizienten aus den Messungen vom März 2003 reduziert die Standardabweichung auf 0.84 mgon, siehe Tab. 2, liefert aber noch immer nicht zufrieden stellende Ergebnisse. Es wurde daher beschlossen, einen anderen Funktionstyp zur Azimutkorrektur zu verwenden.

Tab. 2: Korrektur der Messungen vom März 2003 mit Polynomen zweiten Grades

März 2003	Poly. 2. Grades alte Koeff.	Poly. 2. Grades neue Koeff.
# Daten	45	45
a_1 [mgon/°C]	0.407	0.453 ± 0.020
a_2 [mgon/°C ²]	-0.0009	-0.0028 ± 0.0006
std [mgon]	0.96	0.84

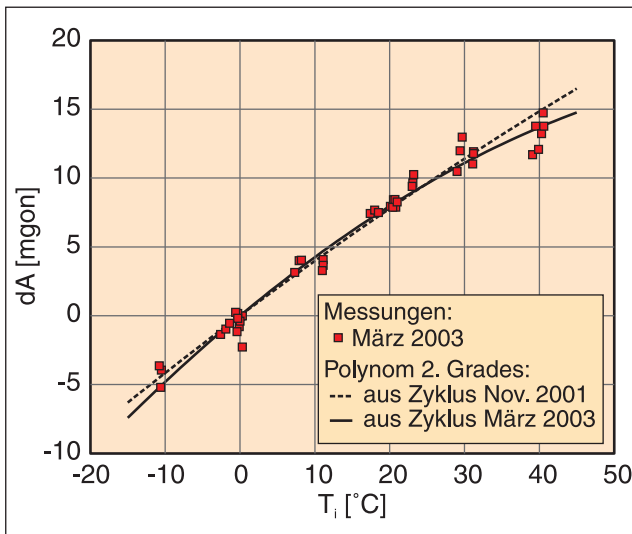


Abb. 7: Fünftägiger Zyklus März 2003: Unkorrigierte Azimutabweichungen dA gegenüber internen Temperaturen T_i und Korrekturpolynome 2. Grades

Eine detaillierte Betrachtung von Abb. 7 zeigt zwei Temperaturabhängigkeitsbereiche der Azimutabweichungen unter und über 20°C . Eine Modellierung dieser Situation wäre durch eine Trennung in zwei lineare Teilstücke mit einem Schnittpunkt bei 20°C möglich. Der Nachteil einer stückweisen linearen Regression ist, dass die Korrekturfunktion nicht in geschlossener Form angegeben werden kann. Dieser Nachteil kann beseitigt werden, indem man eine Übergangsregion einführt, in der ein stetiger Übergang zwischen beiden Geraden erfolgt. Prunty (1983) verwendet dafür einen Ansatz, bei dem die beiden Geraden der stückweisen linearen Funktion zu Asymptoten einer stetigen Funktion werden. Für eine Kurve mit zwei geraden Abschnitten lautet die allgemeine Funktion:

$$dA = b_0 + b_1 \cdot T_i + b_2 \cdot (|T_i - e|^c + d)^{1/c} \quad (5)$$

Gleichung (5) entspricht einer Erweiterung einer linearen Regression. Der Schnittpunkt der beiden linearen Teilstücke wird durch e , hier 20°C , angegeben. Die Krümmung, und damit die Größe des Übergangsbereiches wird durch die Koeffizienten c und d bestimmt. Je größer c und je kleiner d , desto schärfer erfolgt der Übergang. Für d gleich 1 und c gleich 2 entspricht der Erweiterungsterm von Gleichung (5) einer Hyperbel. Die Koeffizienten b_1 und b_2 gleichen im Allgemeinen nicht den Steigungen einer linearen Regression mit zwei Ästen. Wird dieser Ansatz mit c gleich 2 und d gleich 1 angewendet, so erhält man eine Standardabweichung von 0.79 mgon für die korrigierten Azimute.

5.4 Kombination der Messresultate

Abschließend soll eine Kombination beider Messzyklen vom März 2003 und November 2001 (Grillmayer 2003)

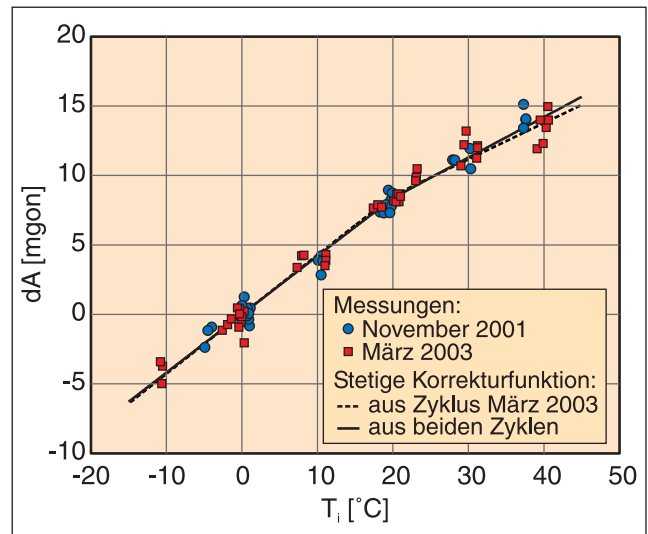


Abb. 8: Fünftägige Zyklen: Unkorrigierte Azimutabweichungen dA gegenüber internen Temperaturen T_i und stetige Korrekturfunktionen

untersucht werden. Abb. 8 zeigt die Azimutabweichungen gegenüber der internen Temperaturen für beide Messzyklen. Der Zyklus vom November 2001 besitzt ebenfalls eine stärkere Abhängigkeit der Azimutabweichungen von der Innentemperatur im Temperaturbereich von unter 20°C . Über 20°C wird der Einfluss der Temperatur geringer, wobei dieser Zusammenhang bei $+40^\circ\text{C}$ weniger stark ausgeprägt ist als bei den Messungen vom März 2003. Im Temperaturbereich bis $+30^\circ\text{C}$ stimmen die Messergebnisse sehr gut überein. Wendet man die in Abschnitt 5.2 bestimmte stetige Korrekturfunktion auf alle Daten an, dann beträgt die Standardabweichung der einzelnen Azimutbestimmung weiterhin 0.79 mgon. Bestimmt man neue Koeffizienten für die stetige Korrekturfunktion (mit $c=2$, $d=1$), verringert sich die Standardabweichung auf 0.77 mgon, siehe Tab. 3. Ein statistischer Test ergibt, dass sämtliche Koeffizienten bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=5\%$ signifikant sind.

Wenn man die zuvor definierte Grenze der Modellierung von 0.62 mgon berücksichtigt, wird mit dieser Korrekturfunktion der größte Anteil des Temperatureinflusses eliminiert. Für den GYR-IGMS ohne interne Temperaturkorrektur ergibt sich die derzeit beste Korrekturfunktion mit:

$$dA = b_0 + 0.355 \cdot T_i - 0.064 \cdot (|T_i - 20|^2 + 1)^{1/2}, \text{ in [mgon]} \quad (6)$$

Tab. 3: Stetige Korrekturfunktion mit zwei Asymptoten für die Messungen vom März 2003 und die Kombination beider Zyklen ($c=2$, $d=1$)

	Zyklus März 2003	beide Zyklen
# Daten	45	76
b_1 [mgon/°C]	0.344 ± 0.009	0.355 ± 0.007
b_2 [mgon/°C]	-0.084 ± 0.015	-0.064 ± 0.012
std [mgon]	0.79	0.77

Der Koeffizient b_0 ist nicht angegeben, da er in die Eichkonstante E einfließt, welche vor und nach den Azimutmessungen auf Eichlinien im Feld zu bestimmen ist. Wendet man die Korrekturfunktion separat auf die Messungen beider Zyklen an, so ergibt sich eine Standardabweichung von 0.81 mgon für den Zyklus vom März 2003 und eine Standardabweichung von 0.72 mgon für den Zyklus vom November 2001. Unter Berücksichtigung der Anzahl der Messungen und bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ ist der Unterschied beider Standardabweichungen nicht signifikant.

5.4 Diskussion

Anhand unserer Daten und der Ergebnisse anderer Labors wurde gezeigt, dass mit der internen Temperaturkompensation des GYROMAT 2000 eine Präzision von besser als 1.0 mgon selten erreicht werden kann. Wird die derzeit von DMT verwendete interne Temperaturkorrektur angewendet, sollte nachträglich zumindest noch eine zusätzliche lineare Korrekturfunktion mit einer Steigung von 0.06 mgon/°C angebracht werden.

Beim GYR-IGMS wurde die interne Temperaturkorrektur ausgeschaltet und in weiterer Folge unterschiedliche Korrekturfunktionen zur Verbesserung der Präzision untersucht. Als besonders geeignet stellte sich eine lineare Regression durch Erweiterung mit einem Hyperbelansatz heraus. Anhand von zwei Datensätzen konnte gezeigt werden, dass mit der abgeleiteten Korrekturfunktion Azimutmessungen mit dem GYROMAT 2000 mit einer Standardabweichung von 0.77 mgon auch bei extremen Temperaturunterschieden von 50 °C möglich sind. Die optimale Standardabweichung einer Azimutmessung wurde für die Kalibrieranlage und den GYR-IGMS mit 0.62 mgon bestimmt.

Aus den Ergebnissen schließen wir, dass die nachträgliche Korrektur der Azimutabweichungen effizienter ist als die interne Temperaturkorrektur. Wir möchten erneut darauf hinweisen, dass durch die Elimination der ersten Messung nach einer Ruhephase oder einer Temperaturänderung die Präzision verbessert werden kann.

Danksagung

Unser Dank gehört Dr. E. Grillmayer für seinen Einsatz bei der Entwicklung der Kalibrieranlage und den ersten Kalibriermessungen. Weiters möchten wir Ing. R. Presl für die mechanischen Umbauten im Labor herzlichst danken. Ebenfalls bedanken möchten wir uns bei Prof. H. Heister (UniBW München) für die fruchtbringenden Diskussionen und bei den Mitarbeitern von DMT für die Bereitstellung der Testinformation für den GYROMAT 2000.

Literatur

- Brunner, F. K., Grillmayer, E.: On the temperature dependence of gyroscopic measurements using the GYROMAT 2000. In: XXII FIG Congress Washington Proceed., 11 Seiten, 2002.
- Brunner, F. K., Woschitz, H.: Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In: Heister H. und Staiger R. (eds.), Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, DVW-Schriftenreihe 42, S. 70–90, Wittwer, Stuttgart, 2001.
- Carosio, A., Ebneter, F.: Geodetic Methods, Mathematical Models and Quality Management for Underground Surveying in the Swiss Alps. In: XXI FIG Congress Brighton Proceed., Commission 6 Vol., S. 407–426, 1998.
- Desiderio A., Koch, R.: Der Einfluss der Temperatur auf Kreiselazimute hoher Präzision. ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht 281, Zürich, 1998.
- DMT: Bedienungsanleitung des Vermessungskreisels GYROMAT – 2000. 1993.
- Eichholz, K., Schäfler, R.: Gyromat, ein automatischer Vermessungskreisels höchster Präzision. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 85, S. 281–293, 1978.
- Grillmayer, E.: Untersuchungen systematischer Fehlereinflüsse bei Messungen mit dem Kreisel DMT Gyromat 2000. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2003.
- Heister, H., Lechner W., Schödlbauer A.: Zur Genauigkeit und Kalibrierwertstabilität automatisierter Vermessungskreisel. In: Schödlbauer A. (Hrsg.), Moderne Verfahren der Landesvermessung, Teil III: Vermessungskreisel, Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 38-2, Neubiberg, 1990.
- Heister, H.: Zur Anordnung von Kreiselmessungen unter besonderer Berücksichtigung von systematischen Fehlereinflüssen. In: Matthias H. J., Grün A. (Hrsg), Ingenieurvermessungskurs 1992, Zürich, Dümmler Verlag, Bonn, Beitrag I7, 1992.
- Korittke, N.: Zur Anwendung hochpräziser Kreiselmessungen im Bergbau und Tunnelbau. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig 14, 1997.
- Prunty, L.: Curve Fitting with Smooth Functions that are Piecewise-Linear in the Limit. Biometrics 39, S. 857–866, 1983.
- Rommel, N.: Funktionsprinzip und technisches Konzept des Präzisionsvermessungskreisels Gyromat 2000. DMT, Bochum, 1991.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Werner Lienhart
 Univ. Prof. Dr. Fritz K. Brunner
 Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
 Technische Universität Graz
 Steyrergasse 30
 8010 Graz
 Österreich
 werner.lienhart@tugraz.at
 fritz.brunner@tugraz.at