

Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale Temperaturschwankungen

Cornelia ESCHELBACH

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Organisationskomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, wie der störende Einfluss von zeitlichen und vor allem örtlichen Temperaturvariationen in Messräumen für geodätische Präzisionsmessungen über die Bestimmung des Temperaturfeldes eliminiert werden kann. Von einem allgemein gehaltenen Modellansatz für Korrekturgrößen ausgehend, wird an konkreten Fallbeispielen die Vorgehensweise zur Bestimmung, Auswertung und Interpretation von lokalen dreidimensionalen Temperaturfeldern erläutert, sodass festgestellt werden kann, ob meteorologische Korrekturen der geodätischen Messungen nötig sind, und wann sie gegebenenfalls nötig werden.

1 Meteorologisches Abhängigkeitsverhalten von geodätischen Messelementen

Das Medium aller terrestrischen geodätischen Messungen ist die Atmosphäre der Erde. Ob im Freien oder in geschlossenen Räumen, immer basiert die geodätische Messung auf den Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen im Medium Luft. Für geodätische Messungen wird vor allem der Bereich des Spektrums des sichtbaren Lichts genutzt, zum einen durch künstlich erzeugtes Laserlicht zum anderen – passiv und unscheinbarer – durch visuelle Anzielung.

Einfluss auf diese Ausbreitungseigenschaften haben hier Dichteveriationen entlang des Ausbreitungsweges und Dichteveriationen rechtwinklig dazu. Fehlen Informationen über die Dichte entlang des gesamten Messstrahls und seiner direkten Umgebung oder liegen sie nur mit unzureichender Genauigkeit vor, wird auch die Genauigkeit von gemessenen Strecken und Richtungen reduziert.

Als Maß zur Beurteilung des Verhaltens elektromagnetischer Wellen im Medium Luft wird der Brechungsindex $n = c_0/c$ verwendet, der über die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium c relativ zur Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 den Bezug zur optischen Dichte n des Mediums herstellt. Die Formel (1) nach (RÜEGER 1999) beschreibt die Abhängigkeit des Brechungsindex n von den meteorologischen Größen Temperatur $T_{[K]}$, Druck $p_{[hPa]}$ und Partialdruck des Wasserdampfes $e_{[hPa]}$, sowie vom Gruppenbrechungsindex n_{Gr} .

$$n = 1 + \left(\frac{273,15}{1013,25} \cdot \frac{(n_{Gr} - 1) \cdot p}{T} \right) - \frac{11,27 \cdot e}{T} \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Bei geodätischen Messungen werden die meteorologischen Parameter lokal an einem Standpunkt ermittelt, um einen Näherungswert des vorherrschenden Brechungsindex zu berechnen. Man setzt dadurch voraus, dass die meteorologischen Bedingungen entlang des geodätischen Messstrahls örtlich gleich sind. Eine Übersicht über weitere Möglichkeiten der Korrektur geodätischer Refraktion im Freien findet sich in (BINNENBRUCK 2001) oder (HENNES 2002). Für geschlossene Räume eignen sich einige der Verfahren aufgrund der beengten Verhältnisse (z. B. Turbulenztheorie) jedoch nicht. Auch wenn sich in geschlossenen Räumen Druck- und Feuchteinhomogenitäten kaum oder gar nicht ausbilden, ist der meteorologische Einfluss auf die geodätischen Messungen immer vorhanden. Druck und Feuchte werden hier als konstant angenommen, die Änderungen von Brechungsindex und Temperatur im gleichen Luftsystem sind also mit $dn \approx -dt_{[^\circ\text{C}]} \cdot 10^{-6}$ als vollständig wechselseitig begründet anzusehen. Ein homogenes Temperaturfeld kann in geschlossenen Räumen oft schon deshalb nicht entstehen, weil durch Belüftungsanlagen, Heizungen, Fensterfronten und sogar durch die Raumbeleuchtung lokal sehr begrenzt ein Teil der Raumluft erwärmt oder abgekühlt wird. Konvektionsströme bis hin zu turbulent aufsteigender warmer Luft führen immer wieder zu Temperaturveränderungen im ganzen Raum. Für geodätische Anwendungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen ist also der störende Einfluss der Temperatur auch in geschlossenen Räumen weiterhin präsent.

Die Klassifizierung von Messräumen nach verschiedenen temperaturbezogenen Verhaltensmerkmalen der Raumluft ist festgelegt in der VDI-Richtlinie 2627 und gibt u. a. Grenzwerte für Temperaturschwankungen und Temperaturgradienten vor, die sich auf die raumtypisch festgelegte Grundtemperatur beziehen. Je nach Güteklasse kann also die meteorologische Unsicherheit einer geodätischen Messung aus den Klassifizierungskennwerten berechnet werden. Die gleiche Unsicherheit erhält man jedoch auch in einem Messraum geringerer Güteklasse, wenn die Temperatur an jeder Raumposition bekannt ist und die geodätische Messung rechnerisch meteorologisch korrigiert werden kann.

2. Messung und Bewertung von Temperaturfeldern in Messräumen

Je nach geodätischem Anwendungsgebiet werden unterschiedliche Anforderungen an die meteorologischen Eigenschaften der Labor- oder der Messraumatmosfera gestellt (vgl. auch HENNES 2006a). Aus der allgemeinen Darstellung des Temperaturfeldes im Raum werden anwendungsspezifische Darstellungen abgeleitet, die die Abschätzungen der Störgröße Temperatur und die Entwicklung von Korrekturmodellen vereinfachen.

2.1 Allgemeine analytische Vorgehensweise

Für eine umfangreiche Untersuchung der meteorologischen Bedingungen in den Messräumen ist die Erfassung des Temperaturfeldes die eindeutigste, aber auch aufwändigste Methode. Generell ist ein Feld bzw. Skalarfeld eine Funktion $\varphi = \varphi(x, y, z)$, die jedem Punkt im Raum einen Zahlenwert, hier die Temperatur $t_{[^\circ\text{C}]}$ (oder auch den Brechungsindex n), zuordnet, ähnlich einer dreidimensionalen Matrix, deren Inhalt z. B. den gemessenen oder nachträglich interpolierten Temperaturwerten im wirklichen Raum entspricht. Die partielle

Ableitung eines Temperaturfeldes φ_t nach den drei Raumkomponenten x , y und z liefert ein dreidimensionales Vektorfeld, in dem jeder Vektor für sich die Information des lokalen dreidimensionalen Temperaturgradienten enthält.

$$\nabla\varphi = \text{grad}\varphi_t = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \cdot \vec{e}_y + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \cdot \vec{e}_z = (\partial\varphi/\partial x, \partial\varphi/\partial y, \partial\varphi/\partial z)^T \quad (2)$$

Dieser Vektor ist also gleichzeitig die lokale Flächennormale der Isofläche der Temperatur und spielt bei einer Beurteilung des Temperaturfeldes hinsichtlich der Korrekturmodelle für verschiedene geodätische Messungen eine wesentliche Rolle.

2.1.1 Korrekturansatz für Streckenmessungen

Die meteorologische Korrektur der Strecke S verlangt nach einem repräsentativen Brechungsindex $n_{rep} = \frac{1}{S} \int n ds$. Da die Abweichung der realen Verbindungskurve vom geometrisch geradlinigen Verbindungsvektor \vec{s} keine nennenswerte Änderung des Brechungs-

indexes zur Folge hat, kann alternativ auch nach $n = \frac{1}{S} \int_0^S n(t) ds$ für diese Zielrichtung gesucht werden. Die Reihenentwicklung erster Ordnung nach Taylor (Restglieder vernachlässigbar da $n''(t_0) < |10^{-9}/[^\circ\text{C}]^2|$) für $n(t)$ an der Stelle t_0 ergibt

$n(t) = n(t_0) + n'(t_0) \cdot (t - t_0)$ mit $n'(t_0) \approx -\frac{10^{-6}}{[^\circ\text{C}]} = \text{const.}$, so dass weiter gilt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{S} \int_0^S n(t) ds &= \frac{1}{S} \left(\int_0^S n(t_0) ds + \int_0^S (n'(t_0) \cdot t) ds - \int_0^S (n'(t_0) \cdot t_0) ds \right) = \\ &= n(t_0) + \frac{1}{S} \cdot n'(t_0) \cdot \left(\int_0^S t ds - t_0 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Somit ergibt sich dann

$$n_{rep} = n(t_{rep}) = n \left(\frac{1}{S} \cdot \int_0^S t ds \right) = n \left(\frac{1}{S} \cdot \int_0^S t(s) ds \right) \quad (4)$$

$$\text{mit } t_{rep} = \frac{1}{S} \int_0^S t(s) ds. \quad (5)$$

Für die meteorologische Korrektur von Streckenmessungen wird also nach der repräsentativen Temperatur t_{rep} für die gesamte Strecke S gesucht.

2.1.2 Korrekturansatz für Richtungsmessungen

Für die Korrektur von Richtungsmessungen muss der Temperaturgradient rechtwinklig zum Zielstrahl betrachtet werden (vgl. MORITZ 1961). Um die ganzheitliche lokale Richtungsabweichung eines Messstrahls auf eine Entfernung darstellen zu können, benötigt man die Information des lokalen dreidimensionalen Gradientenvektors an dieser Position. Es ist sinnvoll, die Richtungsabweichung durch Refraktion in die zwei für geodätische Messungen bevorzugten Richtungen zu trennen und einen Refraktionswinkel jeweils für horizontale Richtungsmessungen und Vertikalwinkel anzugeben. Für beide Refraktionswinkel δ_{hor} und δ_v wird diejenige Komponente des Gradientenvektors aus dem lokalen dreidimensionalen Gradientenvektor ermittelt, die rechtwinklig vom Messstrahl \vec{s} weg und in positive Zählrichtung der gemessenen Richtung zeigt. Da der dreidimensionale Gradientenvektor immer zum differenziell wärmeren Bereich hin orientiert ist, wird durch die Miteinbeziehung der Zählrichtung der Komponente des Gradientenvektors ein Vorzeichen zugewiesen. Diese Vorüberlegungen führen zu einer neuen mathematischen Schreibweise (Gleichungen (6) und (8)), die den dreidimensionalen Charakter der Refraktion eindeutig darstellen. Für horizontale Richtungsmessungen ergibt sich ein Refraktionswinkel δ_{hor} von

$$\delta_{hor} = \frac{10^{-6}}{n} \cdot \frac{1}{S} \cdot \int_0^S ((s - S) \cdot \text{grad}\varphi_t \cdot \vec{e}_{hor} ds), \quad (6)$$

wobei \vec{e}_{hor} rechtwinklig vom Messstrahl \vec{s} weg und in positive Zählrichtung der Messgröße orientiert und normiert ist. Das Skalarprodukt der Vektoren $\text{grad}\varphi_t$ und \vec{e}_{hor} liefert vorzeichenrichtig die wirksame Komponente des lokalen Temperaturgradienten. Der Vektor \vec{e}_{hor} lässt sich angeben durch

$$\vec{e}_{hor} = \frac{\vec{s}_{hor}}{|\vec{s}_{hor}|} = \frac{1}{|\vec{s}_{hor}|} \cdot (-s_y, s_x, 0)^T. \quad (7)$$

Für Vertikalwinkelmessungen wird nach gleichem Prinzip verfahren, und der Refraktionswinkel bei Vertikalwinkelmessungen zu

$$\delta_v = \frac{10^{-6}}{n} \cdot \frac{1}{S} \cdot \int_0^S ((s - S) \cdot \text{grad}\varphi_t \cdot \vec{e}_v ds) \quad (8)$$

angegeben. Der Einheitsvektor \vec{e}_v rechtwinklig vom Messstrahl \vec{s} weg und in positive Zählrichtung der Vertikalwinkelmessung lässt sich schreiben als

$$\vec{e}_v = \frac{\vec{s}_v}{|\vec{s}_v|} = \frac{1}{|\vec{s}_v|} \cdot \left(\frac{s_x}{|\vec{s}_{hor}|} \cdot s_z, \frac{s_y}{|\vec{s}_{hor}|} \cdot s_z, -|\vec{s}_{hor}| \right)^T. \quad (9)$$

Spätestens an dieser Stelle wird klar, dass dieser sehr allgemein gehaltene Modellansatz nur durch weitere vereinfachende Annahmen zu einer nutzbaren Formel für die Praxis führen kann. Da die Abweichungen der realen Verbindungskurve vom geometrisch geradlinigen Verbindungsvektor nicht messbare Änderungen der wirksamen Komponente des Gradienten-

tenvektors nach sich ziehen, können für das Anwendungsgebiet in geschlossenen Räumen die Vektoren \vec{e}_{hor} und \vec{e}_v , vom Vektor Standpunkt - Zielpunkt abgeleitet und für die gesamten Messstrahlänge als konstant angenommen werden. Somit sind in den Gleichungen (6) und (8) nur noch die Werte des lokalen Gradientenvektors $grad\varphi_i$ unbekannt und entlang des Messstrahls variierend.

2.2 Sensorart und Messprinzip zur Erfassung des Temperaturfeldes

Für die Konkretisierung der Modelle zur Strecken- und Richtungskorrektur ist die Erfassung des Temperaturfeldes im Messbereich nötig. Es bietet sich die punktuelle Temperaturmessung an, bei der an ausgewählten Raumpositionen die Temperatur gemessen wird. Für Positionen im Raum, an denen keine Temperaturmessungen stattfanden, muss interpoliert werden.

Mit den Temperatursensoren des Indoor-Temperaturmesssystems des GIK wurde das Temperaturfeld in zwei Messlaboren des GIK zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst und analysiert. Die PT100-Temperatursensoren (Sensorgenauigkeit: 1/10 DIN Kl. B) des Temperaturmesssystems wurden im Vorfeld für den zu erwartenden relevanten Temperaturbereich mit einer empirischen Standardabweichung von 0,05 °C über den zu erwartenden Temperaturbereich absolut kalibriert (Referenzsensor: GMH 3750 der Firma Greisinger elektronik GmbH). Die Ansprechrate der Sensoren beträgt $t_{90} = 10$ sec, die kleinstmögliche Scanrate des A/D-Wandlers beträgt 3 sec, was für die zu erwartenden Variationen der Temperaturschwankungen ausreichend ist. Eine sinnvolle Verwendung der Sensoren zur Korrektur von kinematischen geodätischen Messungen hängt also von den zu erwartenden zeitlichen Temperaturänderungen und der geforderten Temperaturgenauigkeit ab. Die Temperaturmessungen in den Laboren wurden über mehrere Tage und bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt,

2.3 Abschätzung der Güte der Korrekturmodelle

Die Güte des Korrekturmodells ist stark korreliert mit der Güte des erfassten Temperaturfeldes. Bei ungünstiger Wahl der Temperaturmesspunkte kann eine Korrektur eine Messung sogar noch verschlechtern. Nur durch Vereinfachungen und Annahmen ist es möglich eine Funktion anzugeben, durch die Korrekturgrößen bestimmt werden können. Der Modellfehler m ist ein Indiz für die Güte des Korrekturmodells und setzt sich zusammen aus dem Positionsfehler p der Temperatursensoren und dem Interpolationsfehler i des Modells. Der Positionsfehler p kann durch die Positioniergenauigkeit σ_{pos} der Sensoren im Raum zu $grad\varphi_i \cdot \sigma_{pos}$ abgeschätzt werden, beträgt also für gewöhnlich bei 3 cm Positioniergenauigkeit 3 % der lokalen Temperaturdifferenz pro Meter. Der Interpolationsfehler i wird gewonnen aus der Abweichung des Modellwertes vom wahren Wert. Als Ersatz für den gewöhnlich nicht bekannten wahren Wert kann zur Berechnung entweder das gleiche Modell mit mehr Stützstellen oder das Korrekturmodell nächst höherer Ordnung herangezogen werden.

In der Praxis wird zur Streckenkorrektur zwischen den Temperaturmesspunkten in diskreten Abständen linear interpoliert, um die repräsentative Temperatur zu berechnen. Um die Zahl der Stützstellen des Temperaturfeldes zu optimieren, wird der Interpolationsfehler i als Teil

des Gesamtmodellfehlers für das Modell berechnet. Dabei werden vorzugsweise diejenigen Messpunkte als Stützstellen verwendet, die mit den Maxima und Minima der Isoflächen der Temperatur im Raum zusammenfallen (bei nicht-horizontalem Messstrahl sollte an diesen Stellen gelten: $\vec{s} \cdot \text{grad}\varphi_t = 0$). Die Differenz des mit der Stützstellenanzahl k gerechneten Temperaturwertes zur gerechneten Temperatur mit der maximalen Anzahl m ergibt den Interpolationsfehler i_k zu

$$i_k = t_{rep_k} - t_{rep_m} \quad \text{mit} \quad (10)$$

$$t_{rep_k} = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^{k-1} \frac{1}{2} \cdot (t_{j+1} + t_j) ds_j. \quad (11)$$

Erweist sich der Interpolationsfehler für eine Messkonstellation nachweislich als konstant und reproduzierbar, kann er als zusätzliche Korrekturgröße angebracht werden. Ist es nicht möglich, zumindest zeitweise das Temperaturfeld auch zwischen den Stützstellen im Raum zu ermitteln, bleibt zur Abschätzung des Interpolationsfehlers nur die Beurteilung des Temperaturfeldes in der Nähe der Messpunkte. Eine Verschiebung eines Maximums und Minimums der Isofläche der Temperatur lässt sich leicht nachweisen durch $\vec{s} \cdot \text{grad}\varphi_t \neq 0$. Geschieht dies an einem oder mehreren Stützstellen, ist das gewählte Korrekturmodell nicht mehr repräsentativ, da sich die Temperatur zwischen den Stützstellen nachweislich nicht linear ändert.

Für Richtungskorrekturen werden in der Praxis ebenfalls zwischen den Stützstellen Annahmen getroffen, die Position der Stützstellen ist jedoch abhängig von der Entfernung zum Richtungsmessgerät. Die Gradientenmessungen sollten in Entfernungen, die quadratisch mit der Entfernung vom Reflektor zum Messgerät steigen, durchgeführt werden. Bei der Berechnung des Refraktionswinkels wird allgemein $\text{grad}\varphi_t \cdot \vec{e}_{hor}$ bzw. $\text{grad}\varphi_t \cdot \vec{e}_v$ als Funktion $g(S)$ ausgedrückt. Vereinfachend kann für den Bereich zwischen zwei Stützstellen P_i und P_{i+j} auch ein konstanter Temperaturgradient mit $g(S) = dt/dq$ festgelegt werden. Ein Näherungswert für den Interpolationsfehler kann hier angegeben werden durch die Differenz zum Refraktionswinkel unter der Annahme einer linearen Interpolation zwischen den Stützstellen. Mit $\Delta_j \frac{dt}{dq} = \left. \frac{dt}{dq} \right|_j - \left. \frac{dt}{dq} \right|_{j+1}$ und $s_j = S_{j+1} - S_j$ berechnet sich der Interpo-

lationsfehler aufsummiert über alle Teilstücke s_j der Strecke $S = \sum_{j=1}^{m-1} s_j = S_m - S_1$ nach

$$i = \frac{10^{-6}}{n} \cdot \frac{1}{S} \cdot \sum_{j=1}^{m-1} \left(\Delta_j \frac{dt}{dq} \cdot \frac{1}{s_j} \cdot \int_{S_j}^{S_{j+1}} (s - S) \cdot (s - S_j) ds \right). \quad (12)$$

Erweist sich der Interpolationsfehler für das aktuell vorherrschende Temperaturfeld und die darin durchzuführenden Messungen als zu groß, kann das Korrekturmodell unter Annahme der linearen Interpolation verwendet werden. Die Güte dieses Modells ist mit der Bestimmung seines Interpolationsfehlers entweder durch Verdichtung des Temperaturmesspunkt-

feldes oder durch die Entwicklung eines Korrekturmodells mit einer Funktion $g(S)$ höherer Ordnung möglich.

3. Anwendungen der Korrekturmodelle

3.1 Korrektur von Streckenmessungen (Fallbeispiel 1)

Im IB-Labor des GIK ist ein Korrekturmodell für Streckenmessungen auf der neuen 24 m langen Präzisionslinearmessbahn PHIL (vgl. HENNES 2006b) zu bestimmen, das eine meteorologisch begründete Streckenmessunsicherheit von unter $2,5 \mu\text{m}$ ermöglicht. Dies bedeutet, dass die Temperatur entlang des horizontalen Messstrahls mit einer Unsicherheit von $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ bekannt sein muss. Der Schwerpunkt der Temperaturfeldbestimmung im IB-Labor lag also auf der Umgebung der 24 m messenden Linearmessbahn, wofür Profilmessungen mit 18 Stützstellen über die gesamte Bahnlänge durchgeführt wurden. Zur Beurteilung dieser Messungen wurden diese ergänzt durch Vertikalgradientenmessungen über und unterhalb des Interferometermessstrahls und Messungen des Querprofils an ausgewählten Positionen im Raum.

Bei unterschiedlichen Betriebsarten des Labors ergeben sich wie erwartet unterschiedliche horizontale Temperaturprofile (Abbildung 1). Die Atmosphäre im Labor ist gestört, so dass sich keine horizontalen Isoflächen der Temperatur ausbilden können. Die Ursache dafür kann z. B. der wechselnde Unterbau der Linearmessbahn sein.

Zur Reduktion der Stützstellen des Korrekturmodells wurde sein jeweiliger Interpolationsfehler nach (10) basierend auf verschiedenen Kombinationen von Stützstellen berechnet, und so das Modell mit dem besten Kompromiss aus Stützstellenanzahl und Modellfehler ausgewählt und realisiert. Mithilfe des gemessenen horizontalen Temperaturprofils konnte die Zahl der dauerhaft zu installierenden Temperatursensoren auf sechs reduziert werden. Nach messsimultanem Abgriff der Temperatur an diesen sechs Stützstellen wird die repräsentative Temperatur nach (13) berechnet, durch die die Messungen des Laserinterferometers bzw. des zu prüfenden EDM meteorologisch korrigiert werden. Es addieren sich so die empirischen Varianzen der Sensorgenauigkeit σ_{rel}^2 , der Kalibrierung σ_{Abs}^2 und des Korrekturmodells $\sigma_{Mod}^2 \approx \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k [i \cdot i]_j + \sigma_p^2$ nach (13) zur Varianz der repräsentativen Temperatur $\sigma_{t_{rep}}^2$ für die meteorologische Korrektur von Streckenmessungen.

$$t_{rep} = \frac{1}{S} \int_0^S t \cdot ds \approx \frac{1}{S} \sum_{j=1}^{k-1} \frac{1}{2} \cdot (t_{j+1} + t_j) \cdot ds_j \quad \text{mit } S = \sum_{j=1}^{k-1} ds_j \quad (13)$$

$$u_{S[\text{ppm}]}^2 \approx u_n^2 \approx u_{t_{rep}}^2 \cdot \left(\frac{1}{[^\circ\text{C}]} \cdot 10^{-6} \right)^2 \quad \text{mit } u_{t_{rep}}^2 \approx \sigma_{t_{rep}}^2 = \sigma_{rel}^2 + \sigma_{Abs}^2 + \sigma_{Mod}^2 \quad (14)$$

Die empirische Standardabweichung σ_{Mod} liegt in diesem Fallbeispiel je nach Messbedingungen bei etwa $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$. So ergibt sich für die zu erwartende meteorologisch begründete Streckenmessunsicherheit u_S (unter der Annahme $u_{t_{rep}} \approx \sigma_{t_{rep}}$ für die vollständige Erfassung aller Einflussfaktoren von t_{rep}) nach (14) ein Wert von $0,07\text{ ppm}$, was unterhalb der geforderten Unsicherheit von $0,1\text{ ppm}$ liegt.

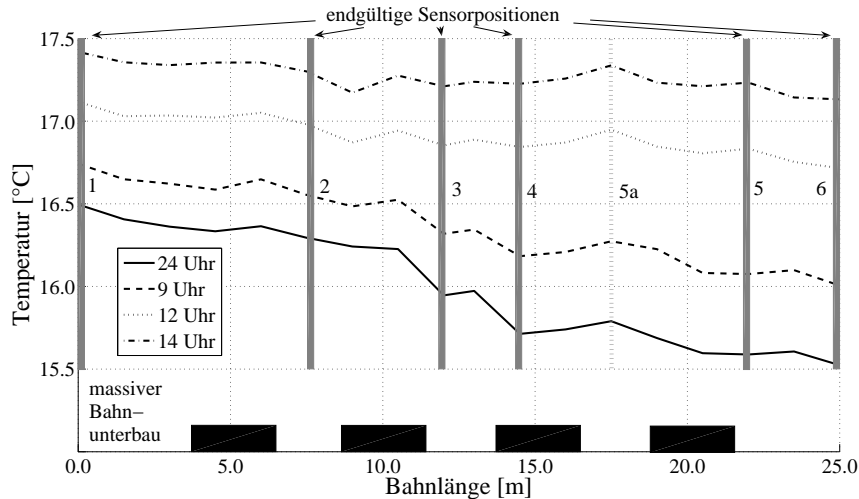


Abb. 1: Horizontale Temperaturprofile entlang der Linearmessbahn zu verschiedenen Zeitpunkten; mit Bahnunterbau und den endgültigen Positionen für die Temperatursensoren (Vertikale Balken); Position 5a als Alternative für Position 5.

Die Gradientenmessungen über und unter Strahlhöhe sowie die gemessenen Querprofile sind zwar für das eigentliche Korrekturmodell nicht weiter von Belang, geben aber Spielraum für Interpretationen bezüglich Entstehung und Stabilität der Luftschichtung und tragen damit auch zum Verständnis und zur Beurteilung der meteorologischen Korrektur hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit bei. Ermittelt wurde ein Vertikalgradient von $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ in Messstrahlhöhe, der horizontale Temperaturgradient quer zum Messstrahl ist gleich Null, was sich durch die Gegebenheiten im Labor leicht erklären lässt. Die Deckenheizung des Labors erwärmt nur die oberen Luftschichten, während die kalte Luft am kalten Boden verbleibt. Durch die Belüftungsschächte des Labors fällt lokal sehr begrenzt kalte Luft ohne sich mit der wärmeren Laborluft zu vermischen direkt zu Boden und füllt so stetig den Raum von unten her, bis sich ein Gleichgewicht von warmer und kalter Luft einstellt. So herrscht zwar ein großer vertikaler Temperaturgradient in Messstrahlhöhe, Temperaturen und Gradient bleiben allerdings zeitlich wie räumlich sehr stabil und könnten somit bei Bedarf in einer Korrekturformel für Zenitwinkelmessungen einfach kompensiert werden.

3.2 Korrektur von Richtungsmessungen (Fallbeispiel 2)

Zur Prüfung kinematischer Messeinrichtungen befindet sich im Messlabor des GIK ein automatisierter Dreharm mit einer Armlänge von 1 m , der einen anzumessenden Reflektor

auf einer vertikalen Kreisbahn auch auf unmittelbare Boden- und Deckenbeleuchtungshöhe führt. Zenitwinkelmessungen zu diesem Reflektor dürfen nicht durch einen Temperaturgradienten verfälscht werden, die Richtungsunsicherheit durch den Einfluss der Unsicherheit des vertikalen Temperaturgradienten muss deutlich unterhalb der Messgenauigkeit des jeweiligen Tachymeters bzw. Lasertrackers angesiedelt werden ($\sigma_{Gerät} > 0,15 \text{ mgon}$). Die Bestimmung des Temperaturfeldes im Messstrahlbereich wurde durch punktuelle Raumtemperaturmessungen mittels 10 Sensoren durchgeführt.

Da der horizontale Temperaturgradient nahezu Null ist, kann für den Refraktionswinkel δ_V mit der Vertikalkomponente des dreidimensionalen Temperaturgradienten gerechnet werden. Dadurch vereinfacht sich (7) für einen gemessenen Zenitwinkel α_Z zu

$$\delta_V = \frac{10^{-6}}{n} \cdot \frac{1}{S} \cdot \int_0^S (s-S) \cdot \frac{dt}{dz} \cdot \sin \alpha_Z ds . \quad (15)$$

Diese u. ä. Formen sind gebräuchliche Darstellung für den Spezialfall bei horizontaler Luftschichtung (vgl. auch BINNENBRUCK, CASOTT & WITTE 2000) und basieren auf den Ansätzen von (MORITZ 1961).

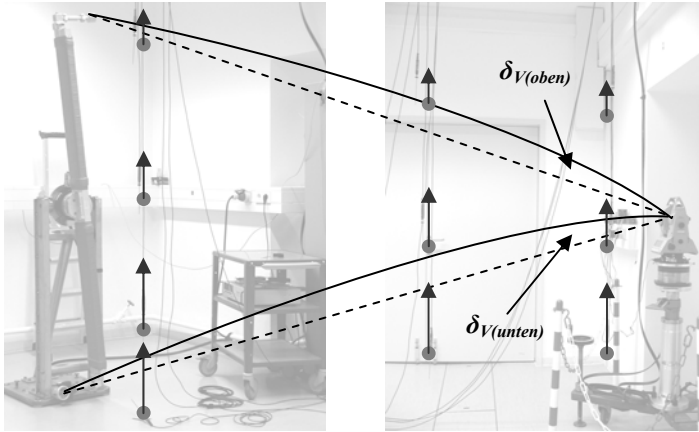


Abb. 2: Temperaturgradienten an verschiedenen Raumpositionen bei Vertikalwinkelmessungen zur Abschätzung der Refraktionswinkel $\delta_{V(oben)}$ und $\delta_{V(unten)}$.

Im DA-Labor variiert der vertikale Temperaturgradient zwischen $0,4 \text{ °C/m}$ in Messstrahlhöhe (1,10 m), $0,3 \text{ °C/m}$ im Deckenbereich und $1,0 \text{ °C/m}$ in Bodennähe. Der Refraktionswinkel δ_V mit dem am Gerätestandpunkt gemessenen Gradienten von $0,4 \text{ °C/m}$ beträgt auf 6 m $0,07 \text{ mgon}$. Das übergeordnete Korrekturmodell sieht eine lineare Interpolation zwischen den drei Stützstellen (horizontale Entfernung vom Gerät: 0 m, 1,3 m, 6 m) vor, die Differenz zwischen dem Modell eines konstanten Temperaturgradienten ($0,4 \text{ °C/m}$) und dem der linearen Interpolation ergibt nach (12) bei einem Zenitwinkel von 110 gon einen maximalen Interpolationsfehler von $-0,02 \text{ mgon}$. Die gleiche Formel (12) kann auch verwendet werden, um zu berechnen, um wie viel sich der Vertikalwinkel über den relevanten Messbereich ändert. Mit der maximalen Gradientendifferenz im Zielpunktbereich (0,10 m

bis 2,00 m) von $0,7 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ergibt sich auf eine Entfernung von 6 m eine Abweichung von $0,04 \text{ mgon}$ zwischen dem Refraktionswinkel für den höchsten Zielpunkt $\delta_{V(\text{oben})}$ und dem Refraktionswinkel für den tiefsten Zielpunkt $\delta_{V(\text{unten})}$ (Abbildung 2).

Zwar wurde der Dreharm während der Temperaturmessungen nicht gedreht, das Verhalten der Temperatur bei Störungen wie z. B. Verwirbelungen der Luft ergab aber, dass sich an allen untersuchten Positionen im Raum der Temperaturgradient dann verringert. Dies lässt die Vermutung zu, dass der Maximalwert der lokalen Temperaturgradienten bei unbewegter Laborluft vorliegt, wenn sich also die Isoflächen der Temperatur zeitlich stabil sind. Hier kann also die Korrektur des Vertikalwinkels bei tachymetrischen Relativmessungen zu Punkten am Messobjekt ausbleiben. In Fällen mit höheren Genauigkeiten der Messgeräte (z. B. Lasertrackermessungen mit einer Winkelauflösung von $0,05 \text{ mgon}$), größeren Gradienten, steileren Beobachtungswinkeln oder weiteren Entfernungen zum Ziel ist die Abschätzung wie beschrieben mit den aktuellen Zahlenwerten neu zu berechnen, und gegebenenfalls der Refraktionswinkel als Korrekturwert an die Vertikalwinkel anzubringen.

3.3 Abschätzungen für mehrdimensionale Messsysteme

Die unterschiedliche Verwendung des Temperaturgradientenvektors für die Korrekturmodelle von Strecke und Richtung stellt ein Problem für mehrdimensionale Messsysteme dar, die über die Kombination von Strecken- und Richtungsmesssystem Positionen im ganzen Raum anmessen. Zwar sind die Korrekturmodelle ohne weiteres auch hier anwendbar, die Erfassung des Temperaturfeldes wird jedoch ungleich komplexer, wenn die geodätischen Messungen sich nicht auf einen kleinen Bereich des Raumes beschränken. Für eine erste Abschätzung müssen die Temperaturverhältnisse im Messbereich z. B. durch einen umschließender Kubus mit acht Temperatursensoren erfasst werden, der je nach Größe des Raumes in kleinere Volumenintervalle unterteilt wird, an geplanten Gerätestandpunkten empfehlen sich zusätzlich bis zu vier Temperatursensoren (angeordnet ähnlich dem Dreibein des Koordinatensystems). Maßgeblich sind bei der anschließenden Untersuchung des Temperaturfeldes die Modellfehler, die sich bei der Berechnung des Einflusses der Temperaturvariationen nach (4), (6) und (8) beim Wegfall von Stützstellen oder Absenkung des Interpolationsgrades zwischen den Stützstellen ergeben. Oft können beispielsweise Sensoren in Bereichen, in denen sich die Temperatur über die gesamte Zeit hinweg gleichartig verhalten hat, durch einen Sensor ersetzt werden.

Bei der mobilen Feldprüfung eines Lasertrackers direkt vor Beginn der eigentlichen Projektmessungen stellt der Prüfbereich von 5-10 m einige Anforderungen an das Temperaturfeld. Während der Dauer der Prüfung sollte das Temperaturfeld weitgehend stabil bleiben, zeitliche Temperaturschwankungen von bis zu $0,2 \text{ }^\circ\text{C/h}$ sind noch akzeptabel. Es wird empfohlen, einen Bereich zu nutzen, in dem sich eine stabile Luftschichtung mit horizontalen Isoflächen der Temperatur bilden kann. Dann genügt zur Abschätzung für Refraktionswinkel

$$\delta_{[\text{mgon}]} \approx 0,03 \cdot \frac{\Delta t_{[\text{ }^\circ\text{C}]}}{\Delta z_{[\text{m}]}} \cdot s_{[\text{m}]} \quad \text{und für Streckenlängenänderungen} \quad ds_{[\mu\text{m}]} \approx 0,5 \cdot \Delta t_{[\text{ }^\circ\text{C}]} \cdot s_{[\text{m}]},$$

wobei Δt die Temperaturdifferenz von Gerätestandpunkt und Zielpunkt und Δz den Höhenunterschied von Gerätestandpunkt und Zielpunkt darstellt. Um z. B. den Einfluss der Temperatur auf Vertikalwinkelmessungen auf $0,1 \text{ mgon}$ begrenzen zu können, darf der Temperaturgradient $0,4 \text{ }^\circ\text{C/m}$ nicht überschreiten, für Streckenmessungen ergibt sich bei einem Grenzwert von $2 \mu\text{m}$ ein Temperaturunterschied von maximal $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Im mobilen

Einsatz kann mit einem Temperatursensor nacheinander an verschiedenen Positionen im Raum die Temperatur gemessen werden, erweisen sich die Temperaturfeldvariationen als den Anforderungen entsprechend tolerierbar, reduziert sich die Nutzung des Temperatursensors als Temperaturwertgeber in der Nähe des Messkopfes des Lasertrackers zur Berechnung des repräsentativen Brechungsindex.

4. Generelle Hinweise zur Messung und Bewertung von Temperaturfeldern in geschlossenen Räumen

Für die Ermittlung der repräsentativen Temperatur zur meteorologischen Streckenkorrektur sind eine Absolutkalibrierung der Temperatursensoren und eine vollständige Abdeckung des Messstrahlbereichs mit Messstellen in Messstrahlrichtung für das Temperaturkorrekturmodell nötig. Die Erfassung des Temperaturprofils ermöglicht dann die Auswahl der Maxima und Minima der Isoflächen der Temperatur als Stützstellen des Temperaturmodells für die spätere Korrektur der Streckenmessung. Gradientenmessungen rechtwinklig zum Messstrahl sind hier vor allem von Bedeutung, wenn es darum geht, die Ursachen von nichthorizontalen Isoflächen der Temperatur im Raum zu ermitteln, was der Zuverlässigkeit des Temperaturmodells zugute kommt.

Die Untersuchung des Temperaturfeldes eines Messlabors für hochpräzise Richtungsmessungen muss darauf ausgelegt sein, Temperaturgradienten rechtwinklig zum Zielstrahl aufzudecken. Es ist damit zu rechnen, dass der vertikale Temperaturgradient das Zehnfache des horizontalen Temperaturgradienten annehmen kann, sodass für die horizontale Komponente quer zum Zielstrahl eine einfache Gradientenmessung genügt, während die vertikale Komponente durch mehrere Temperatursensoren abgedeckt werden sollte, um ein nichtlineares vertikales Temperaturprofil aufdecken zu können. Die Gradientenmessungen sollten in Entfernungen, die quadratisch mit der Entfernung vom Reflektor zum Messgerät steigen, durchgeführt werden. Die maximale Anzahl der so zusätzlich ermittelten Gradienten entlang der Zielstrahls hängt ab von der maximalen Entfernung zum Zielpunkt und der zu erreichenden Genauigkeit der Richtungsmessung, beläuft sich jedoch erfahrungsgemäß selten auf mehr als zwei weitere Positionen im Raum zuzüglich der Position am Gerätstandpunkt. Da keine absoluten Temperaturen in die Korrektur mit einfließen, genügt für die Temperatursensoren eine Relativkalibrierung.

Die Berechnung des Interpolationsfehlers als ein Teil des Modellfehlers ist wesentlich für die Beurteilung der Güte des Korrekturmodells. Stellt sich der Interpolations- oder sogar der Modellfehler für bekannte Laborbedingungen als konstant und reproduzierbar heraus, kann er zur Minderung der Unsicherheit der meteorologischen Korrektur zusätzlich als Korrekturwert an der repräsentativen Temperatur angebracht werden.

Bisher nicht angesprochene Temperaturvariationen in der Zeitkomponente lassen sich für alle Korrekturmodelle in drei Kategorien aufteilen, in hochfrequente Fluktuationen, in kurzzeitige Störungen des Gleichgewichts der Luftschichtung und in sich immer wieder ähnlich ausbildende Tagesgänge der gesamten Temperaturfeldes. Ist die Automatisierung der Temperaturmessung simultan zu den geodätischen nicht möglich, genügt für den Fall der Kompensierung von Tagesgängen eine abhängig vom zeitlichen Temperaturprofil zeitnahe Bestimmung der Temperatur. Bei Störungen, die die Isoflächen der Temperatur im

Raum kurzzeitig verlagern, stellt sich der vorherige Zustand nach einiger Zeit auch wieder ein. Das Temperaturfeld lässt sich einfach testen, indem in der Nähe eines Temperatursensors die Isoflächen absichtlich gestört werden, durch genau die Arbeiten, Abläufe und Bewegungen im Messbereich, die später auch während oder zwischen der Messung durchgeführt werden müssen. Die Zeit, bis sich an einem Sensor wieder annähernd die ursprüngliche Temperatur eingestellt hat, wird als Wartezeit definiert, die eingehalten werden muss, falls bei den geodätischen Messungen eben diese Arbeiten, Abläufe und Bewegungen im Messbereich durchgeführt werden müssen. Kurzperiodische Fluktuationen sind in geschlossenen Räumen von untergeordneter Bedeutung, da ihre Amplituden meist unter der geforderten Messgenauigkeit des Systems liegen, und darüber hinaus oft nicht signifikant vom Messrauschen getrennt werden können.

Zusammengefasst kann unter Kenntnis eines vierdimensionalen Temperaturfeldes eines Raumes einwandfrei bestimmt werden, ob und in wie weit die Temperaturvariationen die geodätischen Präzisionsmessungen verfälschen können. Sollen also die Meteorologie betreffend fehlerfreie hochgenaue geodätische Messungen durchgeführt werden, muss entweder ein Raum gefunden werden, in dem die Störgröße Temperaturvariation nachweislich vernachlässigbar ist, oder die Störgröße Temperaturvariation muss auch während der geodätischen Messungen erfasst und in ein Korrekturmodell für die geodätischen Messungen nach oben beschriebener Vorgehensweise integriert werden.

Literatur

- Binnenbruck, B., N. Casott & B. Witte (2000): Einsatzmöglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung zur Bestimmung der Vertikalrefraktion. Harald Schlemme (Hg.): Festschrift anlässlich der Vollendung des 65. Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Bernhard P. Wrobel, Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, Heft 10.
- Binnenbruck, B., O. Mozzuchin & B. Witte (2001): New Techniques to Determine the Influence of Geodetic Refraction. Proceedings of the 4th International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days", 2.-6. April 2001, Berlin.
- Hennes, M. (2006a): Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse. AVN 3/2006, S. 85-94.
- Hennes, M. (2006b): Präzises und kinematisches Prüfen - Möglichkeiten der Präzisions-High-Speed-Messbahn. ZfV 6/2006, S. 353-358
- Hennes, M. (2002): Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. FuB, Heft 2/2002, S.73-86.
- Moritz, H. (1961): Zur Refraktion elektromagnetisch gemessener Strecken und beobachteter Winkel wegen Refraktion. ZfV, Nr. 7/1961, S. 246-252.
- Rüeger, J. M. (1999): Refractive Indices of Light, Infrared and Radio Waves in the Atmosphere. Report of the Ad-Hoc Working Party of the IAG Special Commission SC3 on Fundamental Constants, 1993 - 1999, 22nd General Assembly of IUGG, Birmingham, UK, 18-30 July 1999, 25 pages.
- o. A. A.: VDI-Richtlinie 2627 (1998). Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Beuth Verlag GmbH, Berlin.