

Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung

M. Hennes

Erschienen in FuB,
Heft 2, 2002, S. 73-86

Zusammenfassung: Bei terrestrischen geodätischen Verfahren übersteigt der Refraktionseinfluss vielfach die instrumentell erreichbare Genauigkeit. Insbesondere bei Präzisionsrichtungs- und -höhenbestimmungen treten praxisrelevante kritische Fälle auf. Basierend auf der Ableitung typischer Größenordnungen für die Störparameter wird dies anhand von Beispielen für gängige Messanordnungen verdeutlicht. Zur Eliminierung bzw. Reduzierung dieses Störeinflusses wurden in jüngster Vergangenheit an verschiedenen Institutionen auf zwei Gebieten Erfolge erzielt: Mit einem auf der Dispersometrie basierenden Funktionsmuster, das im Hinblick auf eine spätere Implementierung in einen handelsüblichen Theodoliten entwickelt wurde, konnten *refraktionsfreie* Richtungen bestimmt werden. Andererseits erreicht man mit der technisch deutlich weniger aufwendigen, turbulenzbasierten OTTM-Methode (OTTM = Optical Turbulent Transfer Model) eine *Reduktion* des Refraktionseinflusses. Die dieser Methode zu Grunde liegenden Phänomene werden vorgestellt und erste erfolgversprechende Resultate aufgezeigt, die mit in modernen geodätischen Instrumenten verwendeten Technologien erzielt wurden. Die Implementierbarkeit der OTTM-basierten Methode in handelsübliche Instrumente wird diskutiert.

Abstract: Regarding terrestrial geodetic methods refraction effects often exceed the accuracy achieved by precision surveying instruments. This is especially crucial with respect to direction and height transfer. In this contribution, this issue is illustrated by deriving typical magnitudes of interference for conventional observation set ups. For elimination or reduction of refraction effects, institutes succeeded recently in two fields: Refraction-free directions were observed using a functional model based on dispersometry which was developed with respect to a future implementation in an ordinary theodolite. In contradiction to the elimination of refraction effects, a technologically definitely less demanding method based on the OTTM (Optical Turbulent Transfer Model) reduces refraction effects more or less dramatically. This method is explained phenomenologically and first encouraging results are presented which were generated with similar technologies as already integrated in modern geodetic instruments. The possibility of implementation of this OTTM-based method in ordinary instruments is discussed.

1 Einleitung

Refraktionseffekte werden grundsätzlich durch Inhomogenitäten im Ausbreitungsmedium elektromagnetischer Wellen verursacht. Sind die Inhomogenitäten räumlich und zeitlich modellierbar, werden sie im Instrumentenbau nutzbringend eingesetzt, z.B. durch die Verwendung von Linsen, Lichtleitern, akustooptischen Bauteilen zur Strahlablenkung oder von Polarisationsmodulatoren. Demgegenüber bewirken die atmosphärisch bedingten Inhomogenitäten unerwünschte Störeinflüsse. Obwohl sie grundsätzlich durch allgemeine Modellansätze (vgl. Kap. 2) leicht beschreibbar sind, hat sich deren Anwendung nicht konsequent durchgesetzt, da die Erfassung des räumlich und zeitlich variierenden Brechungsindex sehr aufwendig ist. Sie erscheint allerdings bei hohen Genauigkeitsforderungen sinnvoll, da die innere Messgenauigkeit handelsüblicher Präzisionsinstrumente in der Regel den refraktionsbedingten Fehlereinfluss deutlich unterschreitet (vgl. Abschnitt 2.4). Letztendlich erwartet der Nutzer geodätischer Instrumente, dass möglichst alle Störeinflüsse – ohne sein weiteres Zutun unmittelbar während der Beobachtung selbst – kompensiert werden. Ausgehend von der Zusammenstellung der grundsätzlichen Refraktionskorrekturen für terrestrische geodätische Messelemente und ausgewählten Beispielen für die Größenordnung refraktionsbedingter Fehler soll hier ein zusammenfassender Einblick gegeben werden, welche Beiträge die Forschung und die Entwicklung der Messtechnik geliefert haben und in Zukunft insbesondere durch die fortschreitende Instrumententechnologie werden liefern können, um dieses Ziel zu erreichen.

2 Refraktionskorrekturen

2.1 Zusammenstellung der grundlegenden Korrektionsmodelle

Terrestrische geodätische Messungen zielen in der Regel auf polare oder angulare Messelemente (Distanzen D und Richtungen r bzw. v) oder auf nivellierte Höhenunterschiede ΔH ab. Die Korrektionsformeln, die aus strengen Ansätzen im Hinblick auf die Instrumentengenauigkeit vereinfacht sind, lauten:

- für eine Distanz auf Vakuum bezogen

$$\Delta D = \int_0^s (1 - n) ds' \quad \begin{array}{l} n = \text{Brechungsindex} \\ s = \text{optischer Weg} \end{array} \quad (1)$$

bzw. auf den geräteintern implementierten Brechungsindex n_0 bezogen

$$\Delta D = \int_0^s (n_0 - n) ds' \quad (2)$$

- für eine Richtung (r oder v)

$$\delta = \frac{1}{n} \frac{1}{s} \int_0^s (x - s) \frac{dn}{dq} dx, \quad (3)$$

wobei q diejenige Querkomponente senkrecht zum Ausbreitungsweg x meint, die in diejenige Richtung weist, in der der Refraktionswinkel δ beschrieben werden soll und

- für eine nivellitische Ablesung

$$\Delta h = \frac{1}{n_0} \int_0^s (x - s) \frac{dn}{dz} dz \quad (4)$$

wobei z die Höhenkoordinate bedeutet.

Weil der Brechungsindex n die optische Dichte des Ausbreitungsmediums repräsentiert, das durch die variierenden Partialdrücke der beteiligten Gase (p für trockene Luft, e für Wasserdampf) und ihrer Temperatur T gekennzeichnet wird, variiert er entlang des Ausbreitungswegs und mit der Zeit t : $n = n(x, y, z, t)$. Da trockene Luft dispersiv wirkt, besteht außerdem eine Abhängigkeit der Wellenlänge λ des verwendeten Signals, wobei für visuelle Beobachtungen üblicherweise $\lambda = 555 \text{ nm}$ und für elektrooptische Detektionssysteme ihre mittlere spektrale Empfindlichkeit anzunehmen ist, falls keine aktive Lichtquelle definierter, aber deutlich abweichender spektraler Zusammensetzung eingesetzt wird. Für die folgenden Betrachtungen wird auf die explizite Darstellung des funktionalen Modells für den Brechungsindex verzichtet, weil es ausführlich in der Literatur behandelt wurde und in Lehrbüchern dokumentiert ist (z.B. [Rüeger, 1990]). Um die Auswirkung der Einflussparameter auf die geodätischen Beobachtungsgrößen ableiten zu können, müssen jedoch

- die Einflussfaktoren und
- die Unsicherheit der Störparameter

bekannt sein.

2.2 Die meteorologischen Einflussfaktoren

Für die Berechnung der meteorologischen Einflussfaktoren kann von konstanten mittlerer Verhältnissen entlang des Ausbreitungsweges – in EDM-Modulen durch die Festlegung der Modulationsfrequenz hardwaremäßig implementiert und beschrieben durch den Bezugsbrechungsindex n_0 ausgegangen werden, wodurch sich (2) zu $\Delta D = D(n - n_0)$ vereinfacht und sich das totale Differential

$$d \frac{\Delta D}{D} = \frac{\partial n}{\partial T} dT + \frac{\partial n}{\partial p} dp + \frac{\partial n}{\partial e} de + \frac{\partial n}{\partial \lambda} d\lambda \quad (5)$$

ergibt. Der Ausdruck für den Refraktionswinkel (3) und die refraktive Höhenabweichung (4) vereinfachen sich zu

$$\delta = \rho \frac{s}{2} \frac{dn}{dq} \quad \text{bzw.} \quad \Delta h = \frac{s^2}{2} \frac{dn}{dz} \quad , \quad (6)$$

wodurch sich analog (5) unter Berücksichtigung der Variabilität der Quergradienten (bei $n \approx 1$ und Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung)

$$d\delta = \rho \frac{s}{2} \left(\left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_0 d \frac{dT}{dq} + \left. \frac{\partial n}{\partial p} \right|_0 d \frac{dp}{dq} + \left. \frac{\partial n}{\partial e} \right|_0 d \frac{de}{dq} + \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_0 \frac{\partial n}{\partial \lambda} d\lambda \right) \quad (7)$$

bzw.

$$d \Delta h = \frac{s^2}{2} \left(\left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_0 d \frac{dT}{dz} + \left. \frac{\partial n}{\partial p} \right|_0 d \frac{dp}{dz} + \left. \frac{\partial n}{\partial e} \right|_0 d \frac{de}{dz} + \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_0 \frac{\partial n}{\partial \lambda} d\lambda \right) \quad (8)$$

ergibt und der optische Weg s durch D ersetzt werden kann. Setzt man mittlere atmosphärische Daten ein ($T = 17^{\circ}\text{C}$, $e = 11 \text{ hPa} \hat{=} 60\%$ relative Feuchte, $p = 1000 \text{ hPa}$, $\lambda = 555 \text{ nm}$), so ergeben sich die partiellen Ableitungen – interpretierbar als Einflussfaktoren – zu

$$\left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_0 = -1,0 \times 10^{-6} / \text{K} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial p} \right|_0 = 0,3 \times 10^{-6} / \text{hPa}$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial e} \right|_0 = -0,04 \times 10^{-6} / \text{hPa}$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_0 = -0,02 \times 10^{-6} / \text{nm (Phase) bzw.} \\ -0,06 \times 10^{-6} / \text{nm (Gruppe) .}$$

Es wird deutlich, dass die Unsicherheit des Störparameters Temperatur (dT) bzw. ihres Gradienten $d(dT/dq)$ die Refraktionskorrektur am meisten beeinflusst. Die Unsicherheit in der Erfassung der Störparameter ist sowohl von der räumlichen und zeitlichen Variabilität der meteorologischen Verhältnisse als auch von der durch die Erfassungstechnik erreichbaren Genauigkeit abhängig.

2.3 Variabilität der meteorologischen Verhältnisse

Für die Variation der Lufttemperatur ist der Mechanismus des Wärmeübergangs entscheidend. Im Hinblick auf das in Abschnitt 5 beschriebene OTTM soll bereits hier auf diesen Mechanismus näher eingegangen werden: Durch die Strahlungsenergie der Sonne wird hauptsächlich der Boden erwärmt und deutlich weniger die bodennahe Luftschicht. Erst der Wärmeübergang an die angrenzende Luftschicht verursacht den größten Anteil an der Temperaturänderung. Die Wärmeleitung innerhalb der bodennahen Luftschicht erfolgt überwiegend aufgrund der Konvektion, d.h. aufgrund des natürlichen Auftriebs (von wärmeren und damit leichteren „Luftpaketen“). Es bilden sich Wirbel aus, deren Größe von der Auftriebsenergie sowie der vorherrschenden Windgeschwindigkeit abhängt. Deswegen ist die Temperaturverteilung sowohl von den Faktoren abhängig, die die Wärmeeinstrahlung auf den Boden steuern, wie Jahreszeit, Tageszeit, Bewölkung, als auch von den Wärmeübergangswerten zwischen Boden und Luft. Durch letztere sind horizontale Temperaturgradienten bedingt, die bei extremen Verhältnissen bis zu $2 \text{ K}/100 \text{ m}$ abgeschätzt werden können. Aus vertikal verteilten Temperaturmessungen liegt ein empirisches funktionales Modell vor,

$$dT / dz = a z^{-b} \quad (10)$$

dessen Parameter a und b aus Tabellen mit jahres- und tageszeitlichen Eingangsgrößen entnommen werden können [Brocks, 1948]. Der Parameter a liegt typischerweise zwischen $-0,35 \text{ K}/\text{m}$ und $-15 \text{ K}/\text{m}$ und der Parameter b zwischen $0,8$ und $0,9$; sie gelten für die Verhältnisse über einer Wiese in mittlerer geographischer Breite. Typische Werte variieren zwischen $-0,8 \text{ K}/\text{m}$ mittags im Sommer und $0,4 \text{ K}/\text{m}$ im Winter [Best et al, 1952]. In größeren Höhen wird, wenn adiabatische Verhältnisse (d.h. die mit der Abkühlung eines aufsteigenden Luftpaketes verbundene Druckreduktion entspricht dem vertikalen Druckgradienten) herrschen, der theoretische Wert von $dT/dz = -0,01 \text{ K}/\text{m}$ erreicht, was recht gut dem (oftmals auch fälschlich für den bodennahen Bereich verwendeten) Refraktionskoeffizienten $k = 0,13$ entspricht.

Bei Bauwerken liegen die Wärmequellen nicht notwendigerweise im Boden, sondern auch in Teilen des Baukörpers und damit bei Vermessungsarbeiten auch seitlich oder oberhalb der Visur. Beispielsweise ist bei Tunnelbauten bei großer Überdeckung mit hohen Felstemperaturen zu rechnen (40°C beim derzeit in Bau befindlichen Alptransit-Basistunnel), hinzu kommen Störeffekte durch künstliche Einrichtungen wie Lutten und Baumaschinen. Beispielhaft seien zwei Temperaturfelder in Abb. 1 und Abb. 2 aufgezeigt, wobei im Vereina-Tunnel eine 12 m lange Lokomotive im Anfangsbereich positioniert war [Hennes et al, 1999]. Das zeitliche Temperaturverhalten eines klimatisierten Raumes zeigt Abb. 3, wobei die zyklischen Schaltvorgänge der Klimaanlage deutlich hervortreten. In der Literatur wird von ähnlichen Größenordnungen berichtet (z.B. [Johnston, 1991], [Möser, 2000], jeweils bis zu 0,4 K/m).

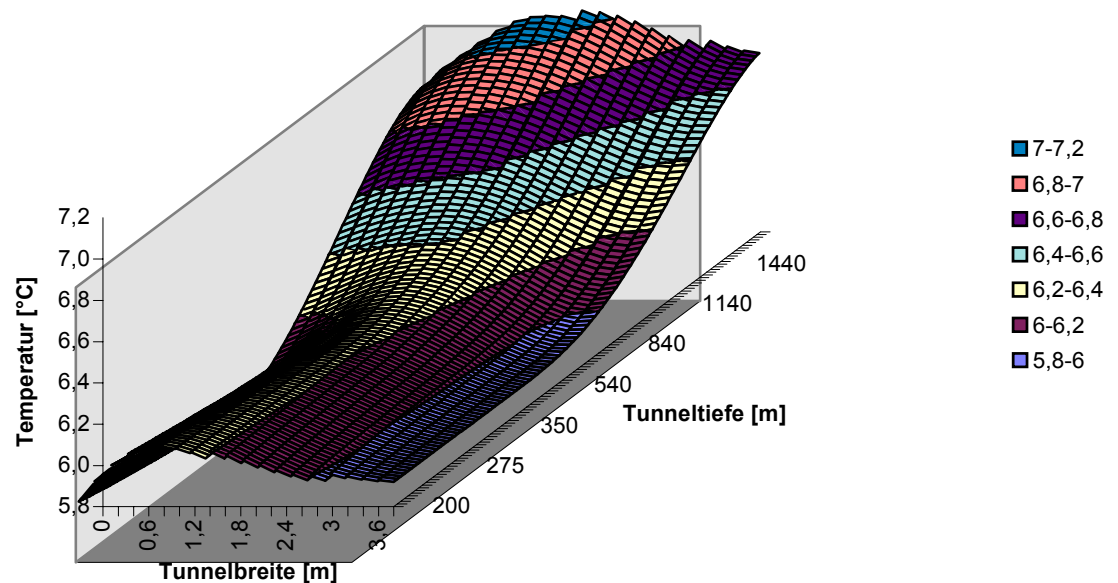


Abb. 1: Temperaturfeld im Albula-Tunnel, Temperatur in °C

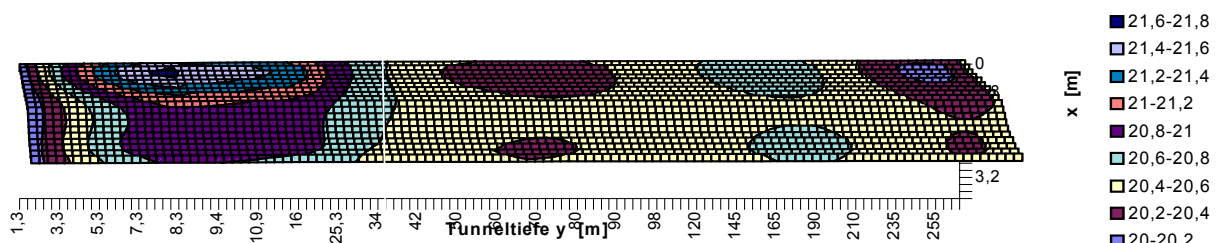


Abb. 2: Temperaturfeld im Vereina-Tunnel mit künstlicher Wärmequelle (Lokomotive), Temperatur in °C

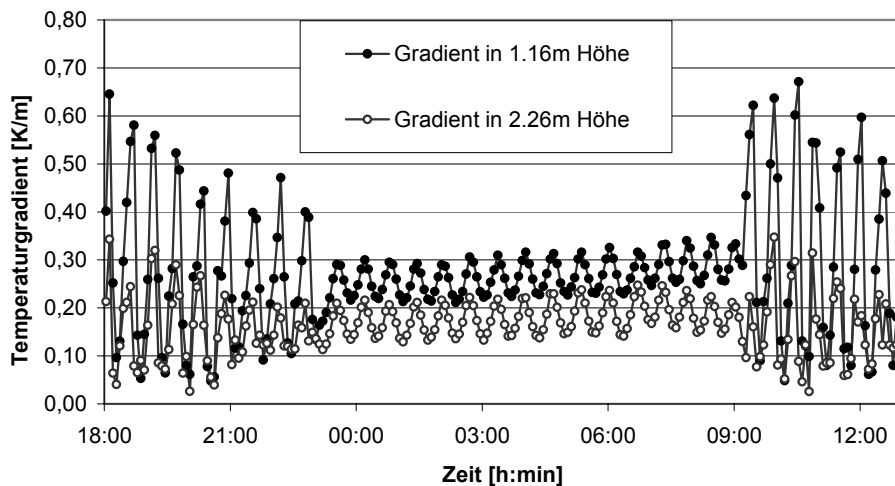


Abb. 3: Zeitliches Verhalten des Temperaturgradientenprofils in einem klimatisierten Raum

Demgegenüber sind Druckgradienten problemlos zu erfassen, folgen sie doch vertikal dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und der Zustandsgleichung eines idealen Gases, wodurch sich im bodennahen Bereich $dp/dz = 0,125 \text{ hPa/m}$ ergibt. Horizontale Gradienten leiten sich aus großräumigen Wetterfronten ab und betragen in der Regel nicht mehr als $0,01 \text{ hPa/km}$ mit einer zeitlichen Änderung von üblicherweise wenig als 1 hPa/km . In Bauwerken herrschen ähnliche Gradienten. Der Gesamteinfluss ist auf Grund des Einflussfaktors $0,3 \cdot 10^{-6} / \text{hPa}$ deutlich weniger kritisch als derjenige der Temperatur. Der Einflussfaktor des Gradienten des Wasserdampfpartialdruckes ist um Faktor 8 kleiner, weswegen auch dieser unbedeutend ist.

2.4 Refraktionskorrekturen in Relation zu der instrumentell erreichbaren Genauigkeit

In den Abbildungen Abb. 4 und Abb. 5 sind instrumentelle oder verfahrensbezogene Messgenauigkeiten (y-Achse) den refraktionsbedingten Unsicherheiten (x-Achse), die lediglich in geringerem Maße rein messtechnischen Ursprungs und in größerem Maße Ursache der räumlich-zeitlichen Variabilität des Ausbreitungsmediums sind, gegenübergestellt. Für alle Beispiele, die oberhalb der Diagonalen (1:1-Linie) markiert sind, gilt, dass die Güte der jeweils beschriebenen Refraktionserfassung ausreichend ist.

Für die Distanzmessverfahren wird die Druckmessgenauigkeit mit 1 hPa veranschlagt und davon ausgegangen, dass sich bei gleichmäßigen Bedingungen und sehr sorgfältiger Messung (vgl. Abschnitt 3.1) die für die gesamte Strecke repräsentative Temperatur mit einer Unsicherheit von 1 K bestimmen lässt. Die in Abb. 4 verzeichneten instrumentellen Genauigkeiten leiten sich aus Herstellerangaben ab und unterschreiten bei Präzisionsinstrumenten die durch Refraktion induzierten Unsicherheiten. Dies trifft in besonderem Maße auf interferometrische Verfahren zu, was durch die gepunktete Linie angedeutet wird. Die Herstellerangaben für polare Messsysteme im industriellen Bereich (Lasertracker) sind nicht unmittelbar miteinander vergleichbar, weil anhand unterschiedlicher Merkmale spezifiziert wird. Deswegen sind in Abb. 4 die Genauigkeitsangaben auf Vergleichsdistanzen bezogen worden. Weil die erreichbare Auflösung der Systeme (in der Abbildung bezogen auf eine Distanz von 10 m) deutlich besser ist, ist zu vermuten, dass auch refraktionsbedingte Unsicherheiten in den herstellereitigen Genauigkeitsangaben berücksichtigt sind – inwieweit, geht nicht aus den Angaben hervor. Er-

gänzend gibt die Firma SMX für ihren Temperatursensor eine Genauigkeit von 0,2 K an. Es wird deutlich, dass der integrale Mittelwert der Temperatur in dieser Größenordnung bestimmt werden muss, um in die Leistungsfähigkeit der Systeme ausreichend nutzen zu können.

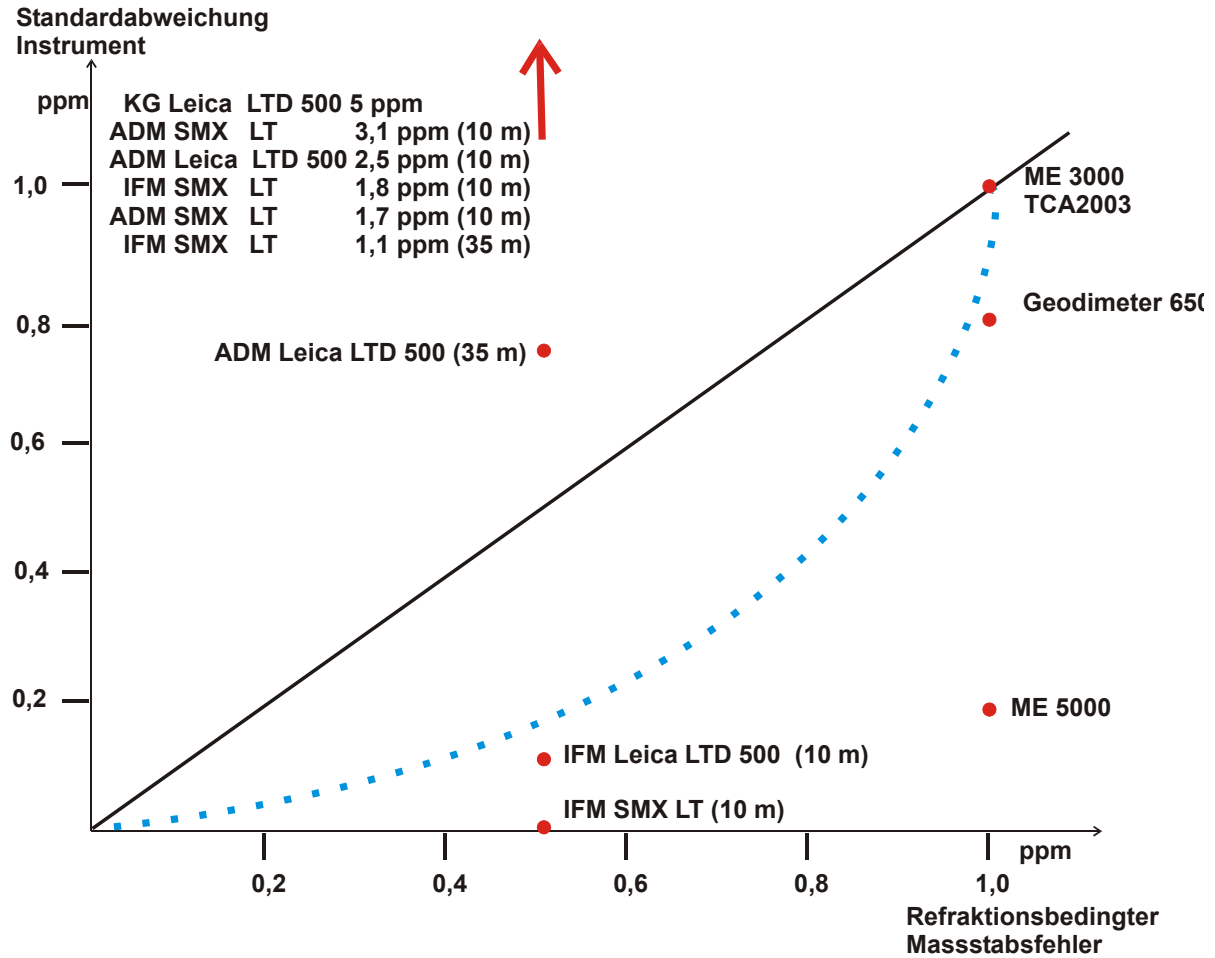


Abb. 4: Vergleich von Distanzmessgenauigkeiten ausgewählter Instrumente mit refraktionsbedingten Unsicherheiten (LT = Lasertracker, IFM = Interferometer, ADM = Absolutdistanzmesser)

Im Hinblick auf die Richtungsübertragung sei vorweg auf die quadratische Distanzabhängigkeit verwiesen, wenn die resultierende Querabweichung betrachtet wird. Berücksichtigt man beispielsweise bei der trigonometrischen Höhenübertragung den Refraktionskoeffizienten $k = 0,13$ oder vernachlässigt man vollkommen den Brechungsindexgradienten, ergibt sich bei einer Distanz von lediglich 100m eine refraktionsbedingte Abweichung des Zenitwinkels von 0,63 mgon, falls in Zielstrahlhöhe der Temperaturgradient $-0,2 \text{ K/m}$ beträgt. Diese Abweichung übersteigt die Instrumentengenauigkeit um bis zu einer halben Größenordnung und ist im Sommer über aufgeheizten Böden auch bei üblichen Zielstrahlhöhen von 1,50 m durchaus anzutreffen. Wie Abb. 3 zeigt, können in klimatisierten Räumen auch größere Temperaturgradienten auftreten, beispielhaft wurde in Abb. 5 für eine Distanz von 20 m der Wert $-0,5 \text{ K/m}$ angenommen. Für Verhältnisse im Tunnelbau wurden die Temperaturbeobachtungen im Albula-Tunnel herangezogen: Die nach zwei Polygonseiten von je 500 m Länge resultierende Querabweichung von mehr als 50 mm für die wandnahe Führung bzw. 16 mm tunnelachsnahe Führung [Hennes et al, 1999] wurde in eine Richtungsabweichung umgerechnet und diese der allein aus der Instrumentengenauigkeit für vier Richtungsbeobachtungen erreichbaren Standardabweichung gegenübergestellt. Auch bei dem zur Reduktion symmetrischer Refraktionsabweichungen vorgeschlagenen Zick-Zack-Verfahren bleibt der Temperaturgradient der genauigkeitslimitierende Faktor. Leicht

günstiger, aber auch nicht unkritisch, muss eine Visur entlang lokaler Wärmequellen bewertet werden, wobei in Abb. 5 der gemäß (3) aus den in Abb. 2 dargestellten Temperaturmessungen abgeleitete Refraktionswinkel für eine 250 m lange Visur dargestellt ist, die in 1 m Distanz an der oben erwähnten (Wärmequelle) Lokomotive vorbei führt. Im Bereich der industriellen Messtechnik kann die Winkelauflösung des LTD 500 nur dann voll ausgeschöpft werden, wenn die Objektdistanz auf 14 m beschränkt bleibt und der vorherrschende Temperaturgradient 0,1 K/m nicht überschreitet.

Aus den Forderungen für das Alignment des geplanten Linearbeschleunigers des DESY lässt sich eine Richtungsgenauigkeit von 0,05 mgon ableiten [Schwarz, 1997]. Falls optische Verfahren zum Einsatz kommen, würde ein Temperaturgradient von 0,1 K/m die Forderung bereits um den achtfachen Betrag überschreiten.

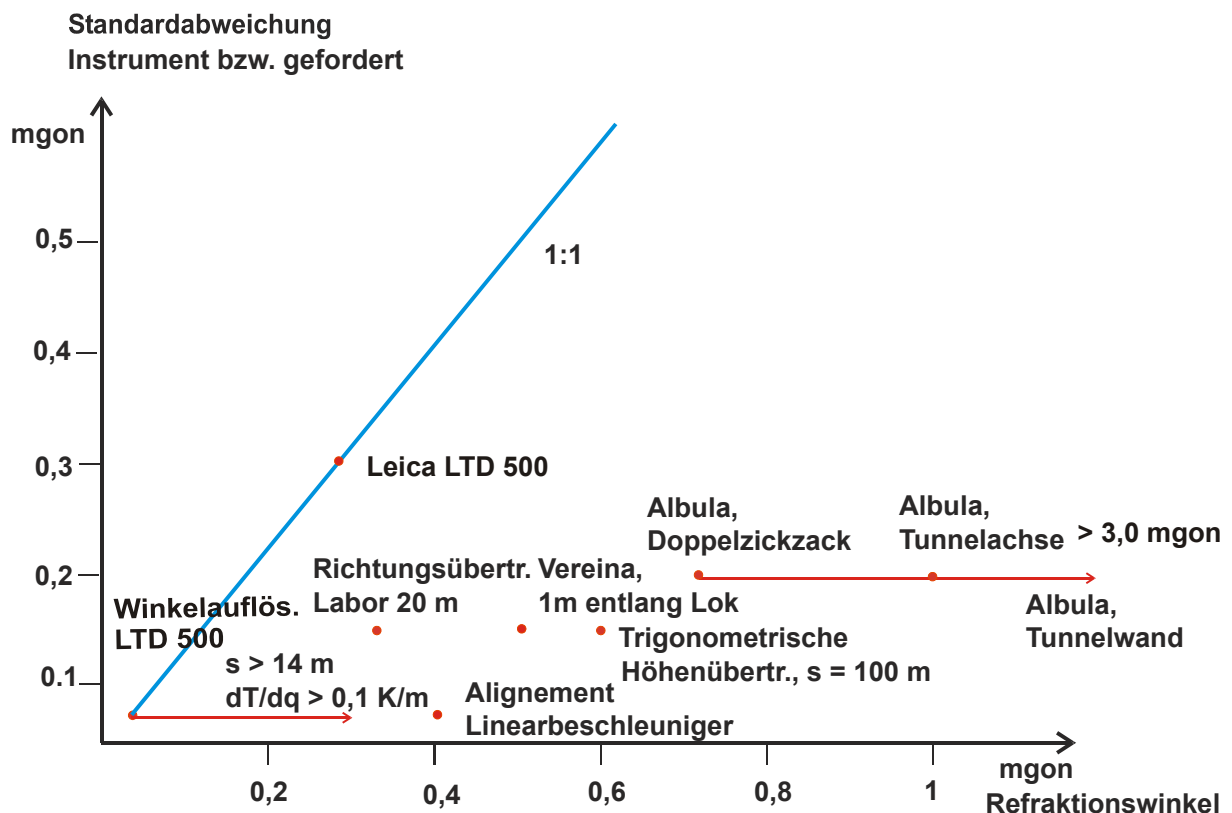


Abb. 5: Richtungsmessgenauigkeiten ausgewählter Instrumente und Verfahren gegenüber refraktionsbedingten Unsicherheiten

Die analog zu betrachtende Instrumentengenauigkeit für die Höhenübertragung kann auf verschiedene Weise abgeschätzt werden: Aus Untersuchungen am GIK (Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe) ergab sich aus Versuchsreihen ein Auflösungsvermögen von besser 0,01 mm für das DiNi 10, für Dauermessungen über 20 m kann die Standardabweichung mit 0,02 mm angegeben werden [Helmstädter, Meier-Hirmer, 1997], während der Hersteller pessimistischer von einer Genauigkeit, abgeleitet aus Doppelbeobachtungen, von 0,05 mm auf 25 m spricht [Marold, 2001]. Geht man von diesem pessimistischen Ansatz aus, ergibt sich für eine 1 km lange Nivellementsstrecke eine Standardabweichung von $\sigma_0 \approx 0,3$ mm für den Höhenunterschied. Refraktionseffekte eines als vollkommen gleichmäßig angenommenen Temperaturgradienten von 0,12 K/m ergeben bereits bei der pessimistischen Annahme einen etwa gleich großen – aber *systematischen* – Fehler, wenn sich die Zielweiten systematisch um 2 m unterscheiden. Für ein 1 km langes Nivellement über eine gleichmäßig mit 3 % ansteigende Straße (vorschriftsmäßig mit exakt gleichen Zielweiten) folgt beispielsweise bei $a = 0,3$

und $b = -0,99$ in (10) eine systematische refraktionsbedingte Abweichung von 0,7 mm, die die instrumentelle Genauigkeit von Präzisionsnivellieren deutlich übersteigt.

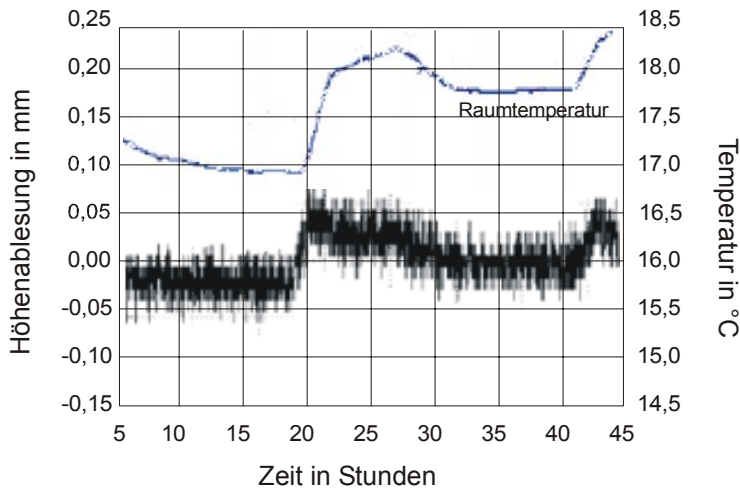


Abb. 6: Dauerbeobachtung im Labor [Helmstädter, 1996]

Auch die 1996 durchgeführten Versuche zur Leistungsfähigkeit von Präzisionsnivellieren geben Aufschlüsse über temperaturbedingte Effekte. Die in Abb. 6 dargestellte Änderungen der Höhenablesung korrespondierte mit dem Öffnen der Labortür, wodurch sich die Raumtemperatur ebenfalls um 1 K änderte. Interpretiert man die resultierende Höhenänderung in ihrer vollen Größe refraktiv, ergäbe sich eine durchaus plausible Änderung des Temperaturgradienten von ca. 0,1 K/m (vgl. Abb. 3).

3 Messverfahren zur Refraktionsbestimmung

3.1 Parametrische Verfahren

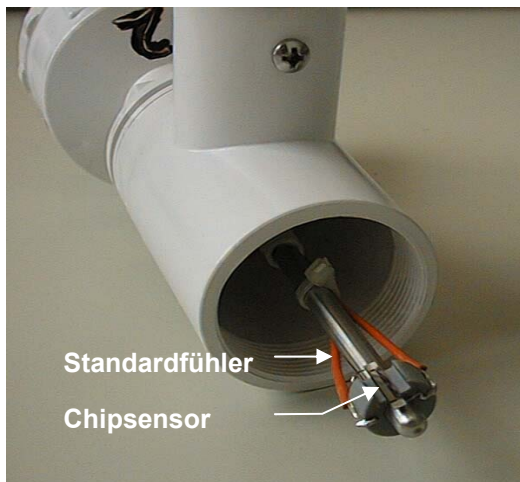


Abb. 7: Temperaturgradientenmesssystem: Sensorkopf ohne Strahlungsschutz (eingesetzt bei den in Abb. 2, 3, 4 gezeigten Messungen)

Über die Möglichkeiten der parametrischen Bestimmung berichtet ausführlich Sparla [1993]. Das größte Augenmerk ist auf die Temperaturbestimmung zu legen (vgl. Abschnitt 2.2). Im Hinblick auf die Temperaturgradientenbestimmung haben sich resistive Sensoren (Widerstandsthermometer) bewährt. Um den Einfluss von Widerstandsänderungen in den Zuleitungen zu reduzieren, empfehlen sich Pt1000 (anstelle der üblichen Pt100), wobei DIN-Klasse B als ausreichend erachtet wird, wenn eine sehr stabile Konstant-Stromquelle bzw. Verstärkereinheit verwendet und durch Kalibrierung die Relationen der Nullpunktabweichungen ermittelt werden: Bei Kalibrierungen in Luft bei dicht beieinander liegenden Sensorpositionen in wechselnden Anordnungen konnten gute Ergebnisse erzielt werden: mit einem Sensorsystem der Fa. YOUNG, das auf $\pm 0,3$ K spezifiziert ist, konnte eine innere Genauigkeit der Temperaturdifferenz besser als 0,04 K erreicht werden [Hennes et al., 1999]. Allerdings erscheint die Ansprechzeit dieser stabförmigen Sensoren mit 42 s etwas lang, weswegen für Versuchszwecke jeweils zusätzlich ein schneller Pt1000 in Chip-Form appliziert wurde; die Montage des Chipsensors ist in Abb. 7 deutlich erkennbar. Dieser zeigte eine geringfügig schlechtere Reproduzierbarkeit. Es sei darauf hingewiesen, dass nur ein sehr guter Strahlungsschutz gekoppelt mit einer

Genauigkeit der Temperaturdifferenz besser als 0,04 K erreicht werden [Hennes et al., 1999]. Allerdings erscheint die Ansprechzeit dieser stabförmigen Sensoren mit 42 s etwas lang, weswegen für Versuchszwecke jeweils zusätzlich ein schneller Pt1000 in Chip-Form appliziert wurde; die Montage des Chipsensors ist in Abb. 7 deutlich erkennbar. Dieser zeigte eine geringfügig schlechtere Reproduzierbarkeit. Es sei darauf hingewiesen, dass nur ein sehr guter Strahlungsschutz gekoppelt mit einer

wärmeabgeschirmten Ventilationseinrichtung eine zufriedenstellende lokale Temperaturmessung garantieren kann.

Obwohl parametrische Messverfahren zur Bestimmung des Brechungsindex prinzipiell geeignet und entsprechende Messinstrumente verfügbar sind, bleiben wesentliche Nachteile bestehen. Derartige Messsysteme mit ausreichender Auflösung sind im Vergleich zur geodätischen Ausrüstung relativ teuer. Abgesehen von permanenten Beobachtungsanordnungen übersteigt der Messaufwand denjenigen der geodätischen Beobachtung um ein Vielfaches: Mit einem solchen System werden Daten erhoben, aus denen der Brechungsindex lokal, also streng genommen nur am Messort abgeleitet werden kann. Eine räumlich verdichtete Datenerfassung erhöht den Messaufwand zusätzlich und überproportional, weil eine Möglichkeit der Datenübertragung von den entfernt gelegenen Messstellen realisiert werden muss oder die Messdaten erst in einem post processing nach der lokalen Speicherung zu einem repräsentativen Wert zusammengefügt werden können. Daraus ergibt sich die Forderung nach integralen und integrierten Messverfahren.

3.2 Integrale und integrierte Verfahren

Integrale Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass der Brechungsindex als integraler Wert entlang des optischen Wegs ermittelt wird. Im Hinblick auf die Richtungskorrektur ist zusätzlich die Gewichtung mit der Zielweite, ausgedrückt durch den Term $(x-s)$ in Gleichung (3),(4) anzustreben. Diese Forderung wird von nachfolgend beschriebenen Verfahren der Dispersometrie streng erfüllt, durch die OTTM-basierten Verfahren bedingt.

Unter integrierten Messverfahren sollen diejenigen verstanden werden, die keine zusätzliche Messausrüstung erfordern. Das Modul zur Ermittlung der Refraktionskorrektur befindet sich im Instrument. Obwohl einige Totalstationen mit Temperatursensoren ausgestattet sind, kann die hiermit erfasste Temperatur im Hinblick auf die Repräsentativität der tatsächlichen Verhältnisse entlang der Messstrecke nur als grober Näherungswert verstanden werden. Es sind also verfeinerte Verfahren anzustreben. Ihnen sind die beiden folgenden Abschnitte gewidmet. Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Reduktion von Refraktionseinflüssen auch durch eine geeignete Versuchsanordnung geschehen kann. Im Hinblick auf die heute gegebenen instrumentellen Möglichkeiten durch automatisierbare Messabläufe tritt das sogenannte „local scale parameter model“ für Überwachungsmessungen wieder in den Vordergrund. Hier werden Referenzmessungen zu bekannten Punkten im Beobachtungszyklus eingeschlossen, woraus die Refraktionskorrekturen unter der Voraussetzung abgeleitet werden können, dass die meteorologischen Verhältnisse der Referenzbeobachtung denen der eigentlichen Messgröße entsprechen. Mit heutigen automatisierten geodätischen Instrumenten (motorisierte Digitalnivelliere und Totalstationen mit automatischer Zielerfassung) ist diese Beobachtungsweise wirtschaftlich geworden; entsprechende Auswertemodule existieren ebenfalls. Möglicherweise können aber die Referenzwerte erst gestützt durch parametrische Messmethoden ermittelt werden. Trotz allem bleibt aber die Unwägbarkeit des gleichartigen Verhaltens der Struktur des Ausbreitungsmediums.

4 Dispersionsbasierte Verfahren

4.1 Grundlagen

Dispersionsbasierte Verfahren beruhen auf der Wellenlängenabhängigkeit der Refraktionsabweichungen, die jeweils im letzten Term von (5) bzw. (7) deutlich wird. Aus der Beobachtung des zu erfassenden Messelements (Strecke oder Richtung) mit zwei möglichst unterschiedlichen Wellenlängen, von

denen die kürzere vorteilhaft im blauen Spektralbereich liegt, lässt sich bei Vernachlässigung des Wasserdampfpartialdrucks die Refraktionskorrektur gewinnen, indem die Differenz der beiden refraktionsverfälschten Messwerte mit einem lediglich wellenlängenabhängigen Faktor (typischerweise 20 ... 40) multipliziert wird. Demzufolge müssen die beiden Messelemente mit entsprechend vielfacher Genauigkeit im Verhältnis zu der für die refraktionsfreie Beobachtung erwünschten Genauigkeit bestimmt werden.

4.2 Aktuelle Entwicklung

Mit fortschreitender Entwicklung des GPS verlor die klassische terrestrische Distanzmessung an Bedeutung und Entwicklungsprojekte zur refraktionsfreien Distanzmessung mittels dispersionsbasierter Verfahren wurden eingestellt. Demgegenüber verlangen herausfordernde Ingenieurprojekte (Alptransit, Teilchenbeschleuniger) eine hochpräzise Richtungsübertragung in meteorologisch inhomogenen Bereichen (vgl. Abb. 1, Abb. 2, Abb. 3). Demzufolge wurde die in den 80er Jahren begonnene Studie im Auftrag des NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) für das refraktionsfreie trigonometrische Nivellement (RPLS, Rapid Precision Leveling System) wieder aufgegriffen [Böckem, 2001]. Die hierin dargestellten technologischen Entwicklungen führten zu einer weitgehend neuen konstruktiven Realisierung. Hervorzuheben ist hier ein frequenzverdoppelnder Laser, der am Institut für Quantenelektronik der ETH Zürich entwickelt wurde und der gleichzeitig Strahlung der Wellenlängen 430 nm und 860 nm emittiert. Vorteilhaft erweist sich, dass es sich hierdurch um eine koinzidente Strahlungsquelle für beide Farben handelt. Andererseits resultiert aus der spektralen Verteilung der Strahlung, dass der Differenzwinkel beider Refraktionswinkel mit einer 40-fachen Genauigkeit bezogen auf die letztendlich erwünschte Genauigkeit der refraktionsfreien Richtung gemessen werden muss.

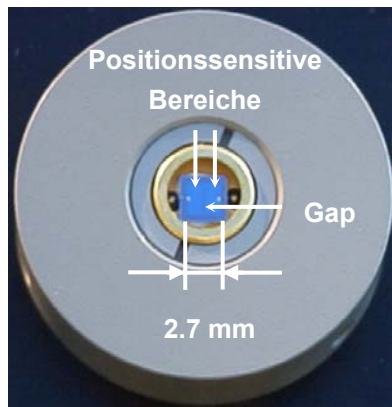


Abb. 8: Empfangseinheit

des realisierten System besteht in der synchronen Erfassung beider Empfangssignale: Hierdurch wird der Turbulenzeinfluss deutlich reduziert, wie die spektrale Analyse der gemessenen Individualwinkel zeigen [Böckem, 2001].

4.3 Zukunftsperspektiven

Erst mit der Verfügbarkeit einer robusten, langlebigen Laserdiode, die im blauen Bereich des sichtbaren Lichts emittiert, zu einem vertretbaren Preis, wird ein weiterer notwendiger Schritt in Richtung der Weiterentwicklung zu einem Feldgerät getan sein. Die wegen der Strahlkoinzidenz vorteilhafte Alternative der Miniaturisierung des frequenzverdoppelnden Lasers ist zwar technisch möglich, aber noch

kostenintensiver. Obwohl bei [Böckem, 2001] gezeigt wurde, dass Sende- und Empfangsmodul sehr kompakt gestaltet werden können, werden weitere Entwicklungsschritte vom Funktionsmuster zu einem Prototypen basierend auf einem bestehenden Theodoliten erforderlich sein. Somit bleibt die Wirtschaftlichkeit einer solchen Geräteentwicklung im Rahmen der Marktchancen nicht unumstritten.

5 OTTM-basierte Verfahren

5.1 Das Optical Turbulent Transfer Model (OTTM)

Das OTTM beruht auf dem in den 80er Jahren für geodätische Anwendungen bekannt gewordenen Turbulent Transfer Model (TTM) unter Einbeziehung der optischen Turbulenz, die sich durch Szintillationseffekte und Richtungsfluktuationen darstellt. Sie ist durch die Integration von positionsempfindlichen Sensoren in geodätische Instrumente nun auch mit diesen bestimmbar geworden. Die grundsätzliche Modellbildung ist in der Literatur ausführlich dargestellt: z.B. in geschlossener Form im Hinblick auf diese Anwendung in [Deußen, 2000]. Im vorliegenden Beitrag sollen mittels phänomenologischer Betrachtungsweise die prinzipiellen Mechanismen erläutert werden und die erforderliche Genauigkeit der Eingangsparameter beschrieben werden.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Ausbildung des für die Strahlkrümmung relevanten Brechungsindexgradienten eng mit der turbulenten Bewegung von „Luftpaketen“ bzw. Wirbeln unterschiedlicher optischer Dichte und damit unterschiedlicher Brechungsindizes verknüpft. Diese Wirbel gehorchen den allgemeinen Gesetzen der Turbulenz; sie können im wesentlichen mit zwei Parametern beschrieben werden (Strukturparameter C_n^2 und kleinste Wirbelgröße l_0). Der Zusammenhang zwischen diesen Größen und dem vertikalen Temperatur- bzw. Brechungsindexgradienten wird über die Similaritätstheorie der Meteorologie hergestellt [z.B. Deußen, 2000]. Da die turbulenten Wirbel auf die Ausbreitung des Messstrahls wie Linsen und Planplatten wirken, werden sie in der geodätischen Beobachtung als Strahlrichtungsänderung erkennbar. Aus der Varianz der Richtungsänderung lässt sich unmittelbar C_n^2 ableiten. Legt man der Anschauung die elektromagnetische Welle zu Grunde, werden auch Intensitätsschwankungen verständlich, da unterschiedlich verzögerte und abgelenkte Wellen untereinander interferieren. Diese Intensitätsschwankungen sind bei optischen Beobachtungsverfahren als Szintillation bekannt. Da sowohl diese als auch die quasistochastische Richtungsänderungen für das hier vorgestellte Verfahren genutzt werden, soll hier der Begriff OTTM-basiertes Verfahren als messtechnische Erweiterung des TTM geprägt werden.

Im folgenden Abschnitt (5.2) soll anhand einer Auswahl von Versuchen, die sich stark an die heute in geodätischen Instrumenten verwendeten Sensoren anlehnen, gezeigt werden, dass zumindest der vertikale Temperaturgradient bzw. der Brechungsindexgradient bestimmbar ist, um danach (in Abschnitt 6) zu erörtern, inwieweit mit kommerziellen Instrumenten dieses Verfahren realisiert werden kann. Abschätzungen ergeben, dass für das OTTM-Verfahren eine Richtungsauflösung von ca. 0,1 mgon – und, falls die Intensität als Messgröße verwendet wird, ein Signalrauschverhältnis (SNR) von 9 dB – erreichbar sein muss [Casott, 1999; Flach, 2000]. Die spektrale Auflösung der Erfassung sollte bei etwa 100 Hz liegen, um auch Situationen mit großen Windgeschwindigkeiten und demzufolge kleinen Wirbelgrößen messtechnisch erfassbar zu machen.

5.2 Stand der Forschung

Der grundsätzliche Ansatz besteht also darin, die quasi-stochastisch gestörte geodätische Beobachtung unmittelbar zu nutzen, um die Parameter der optischen Turbulenz zu ermitteln. In der Meteorolo-

gie werden auf diesem Prinzip basierende Instrumente mit Erfolg genutzt, ein weit verbreitetes Gerät ist das Scintillometer SLS 20 (Scintec, Tübingen), das auf einer Entwicklung am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg basiert. Obwohl mit den Arbeiten von Brunner bereits 1979 die Idee der Ausnutzung der Turbulenz zur Ermittlung der Refraktionswinkel aus Varianzen des Zenitwinkels Eingang in die Geodäsie fand, blieben die messtechnischen Realisierungen bis vor einigen Jahren eher spärlich. Dies ist wohl auf die vor 20 Jahren noch begrenzten Möglichkeiten geodätischer Instrumente hinsichtlich automatisierter Datenerfassung mit ausreichend hoher Datenrate zurückzuführen. Bei den relevanten experimentellen Aufbauten im Hinblick auf geodätische Applikation wurden entweder kommerzielle geodätische Instrumente benutzt, wobei auf eine Modifizierung der Hardware – abgesehen vom Abgriff des analogen oder digitalen Messsignals möglichst unmittelbar an der Empfangseinheit des Lichtsignals – verzichtet wurde [Hennes, 1995], [Hennes, Flach, 1998], oder es wurden die Module geodätischer Instrumente nachgebildet. Einschränkungen, wie beispielsweise Grenzfrequenzen von 25 Hz bei Videosignalen, lassen lediglich die Ermittlung des Strukturparameters C_n^2 zu und erfordern weitere Informationen, die von externen Sensoren gewonnen werden müssen [Flach, 2000]. Neben den Unterschieden in den Versuchsaufbauten wurden verschiedene Vorgehensweisen zur Ableitung der Turbulenzparameter verfolgt. Exemplarisch sollen einige Versuche herausgegriffen werden.

Tabelle 1: Versuchs- und Instrumentenparameter zur Nutzung des OTTM

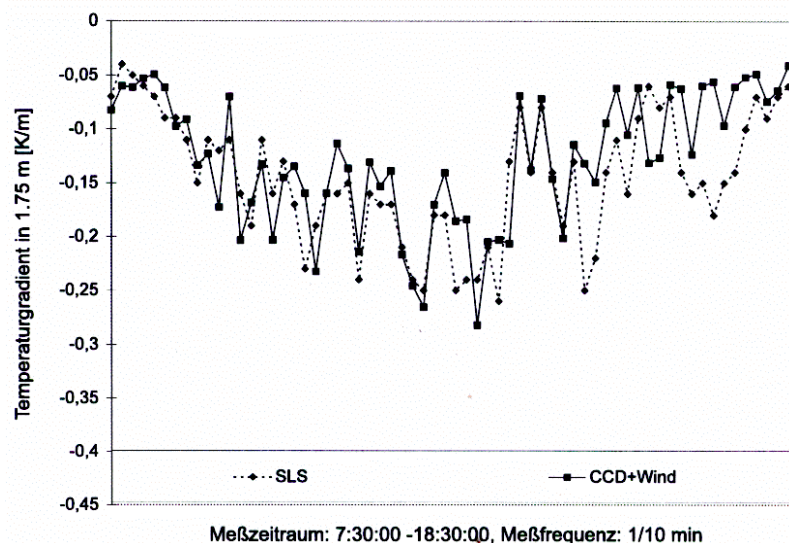


Abb. 9: Temperaturgradientenvergleich (aus [Deußen, 2000])

Am Geodätischen Institut der Universität Bonn wurde von Casott [1999] und Deußen [2000] eine CCD-Kamera verwendet, deren Charakteristika der Tabelle 1 zu entnehmen sind. Beide Autoren ermittelten Richtungsfluktuationen aus dem Bildpunktanzahl von neun kreisförmigen Zielmarken. Deußen beschränkte sich auf die Erfassung der Winkelfluktuation und nahm als zweiten Eingangsparameter für die Similaritätstheorie (vgl. Abschnitt 5.1) Windbeobachtungen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung (vgl. Abb. 9) mit Temperaturgradienten, die mit einem Scintillometer SLS 20 bestimmt wurden. Die Beobachtungsdistanz betrug 55 m. Deußen gibt aus den Analysen vieler Feldversuche die Genauigkeit für sein Verfahren mit 28%38% an.

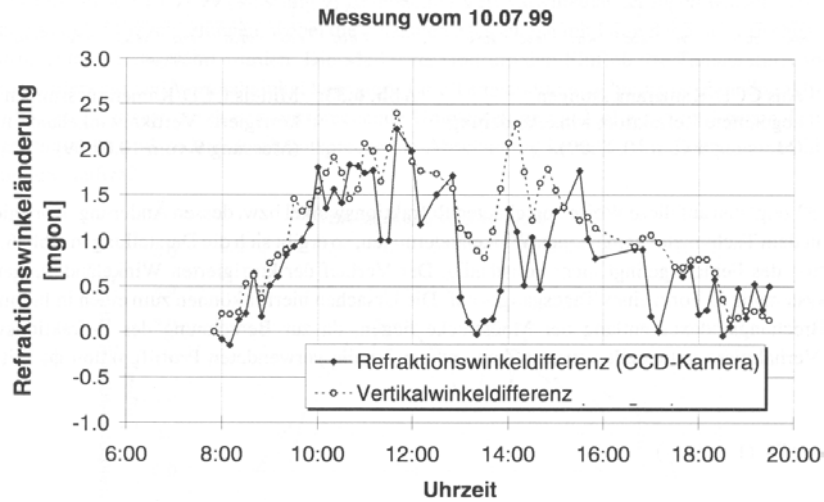


Abb. 10: Refraktionsbedingte Vertikalwinkeländerung (gestrichelt) und Korrektionswert mittels der OTTM-Methode (aus [Casott, 1999])

Casott [1999] verzichtete auf zusätzliche externe Messwerte und leitete den zweiten Eingangsparameter ebenfalls aus den Bilddaten ab, indem er die spektrale Verteilung des Bildpunktanzens analysierte. Abb. 10 zeigt ein Beispiel: Obwohl die einsetzende Bewölkung gegen 12:50 zu einem zu niedrigen

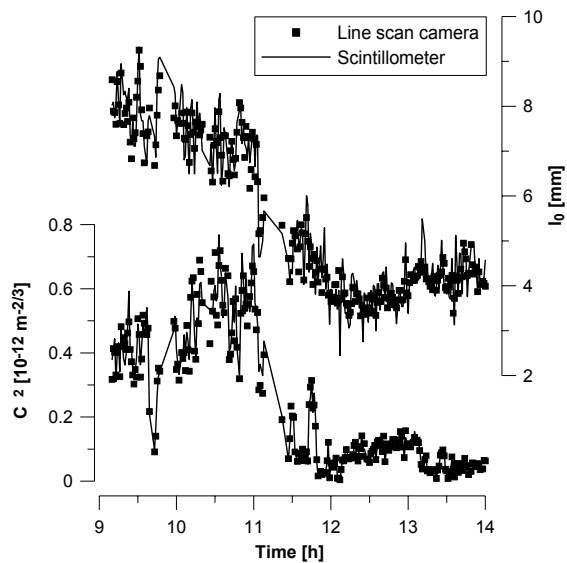


Abb. 11: Vergleich der mit dem Scintillometer SLS 20 und der Zeilenkamera ermittelten Turbulenzparameter [Böckem et al, 2000]

[Weiss, 2002]).

Korrektionswert führt, erlaubt auch diese Vorgehensweise eine deutliche Reduktion des störenden refraktiven Einflusses. Flach [2000] benutzte eine CCD-Kamera vom Typ L 120, Basler, in Verbindung mit einem Nikon-Objektiv (vgl. Tabelle 1) und eine handelsübliche codierte Nivelierlatte. Er leitete die Eingangsparameter für das TTM aus der Winkelfluktuation ab. Die Übereinstimmung der „geodätisch“ ermittelten Turbulenzparameter zu Scintillometerdaten zeigt Abb. 11. Die Korrelation zwischen dem lokal gemessenen Temperaturgradienten und den durch das OTTM-basierten Verfahren bestimmten Werte bei Messungen über einer Wiese über 74 m demonstriert Abb. 12. Die Unterschätzung der – integralen – OTTM-basiert erfassten Gradienten in Bezug auf die punktuell resistiv erfassten Gradienten könnte auf einer nicht ausreichend repräsentativen Position der lokalen Sensoren zurückzuführen sein. Genauere Analysen bilden den Gegenstand weiterer Forschungen (z.B.

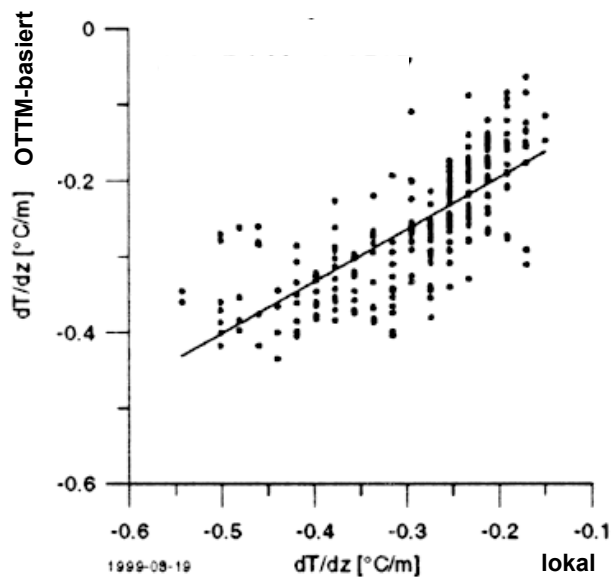


Abb. 12: Korrelation zwischen lokal und OTTM-basiert bestimmten Temperaturgradienten (aus [Flach, 2000])

5.3 Integrierbarkeit des OTTM in kommerzielle geodätische Instrumente

Diese Versuche geben Anlass, die technischen Möglichkeiten heutiger Instrumente zu analysieren. Betrachtet man die Spezifikationen heutiger Digitalnivelliere, zeigt sich beim Zeiss DiNi 12 eine knapp ausreichende innere Genauigkeit. Die mit einem pixel erreichbare Richtungsauflösung liegt beim Topcon DL101 in derselben Größenordnung, während mit Instrumenten des Typs Leica NA 2000/3000 wegen einer Pixelanzahl von 256 und einer Pixelgröße von $25\ \mu\text{m}$ die erforderliche Richtungsauflösung nicht erreichbar scheint. Mit allen Systemen können bei guter Beleuchtung ausreichende Datenraten erzeugt werden, allerdings lassen die

derzeit implementierten Module nicht zu, die notwendige Bildinformation, die sich über einige Hundert Zeilen erstrecken sollte, zwischenspeichern. Eine diesbezügliche Erweiterung sollte im Hinblick auf den aktuellen Stand der Sensortechnologie jedoch leicht realisierbar sein.

Die Implementierbarkeit des OTTM Leistungsfähigkeit in Robottachymeter hängt wesentlich vom verwendeten Sensorsystem der automatischen Zielerfassung ab. Die Firmen Leica und Zeiss (heute Trimble) benutzen CCD-Arrays mit einer Auflösung, die derjenigen der Experimentiersysteme entspricht (vgl. Tabelle 1). Trotzdem wird mit dem Experimentiersystem eine höhere Auflösung erreicht. Es bleibt zu analysieren, inwieweit die Algorithmen zur Bildauswertung dafür verantwortlich sind. Nachteilig wirkt sich bei den kommerziellen Systemen auch die geringe Datenrate aus. Trotzdem erreicht Troller mit einem TCA1800 [Troller, 2000] eine ca. 80%ige Korrelation [Troller, 2001] zu Messungen mit dem CCD-System von Flach und zu Szintillometermessungen: In Abb. 13 sind die Standardabweichung der turbulenzbedingten Richtungsfluktuationen gegenübergestellt, die unmittelbar vom Strukturparameter C_n^2 abhängen. Um die Verhältnisse im Bildraum des TCA1800 zu veranschaulichen, sind die Daten des Szintillometers SLS 20 über den Strukturparameter in Richtungsfluktuationen transformiert worden. Es ist anzumerken, dass die Ausbreitungswege der Referenzsysteme als identisch anzusehen sind, während die Visur des TCA quer dazu angeordnet war und dass sich die Windverhältnisse gegen Mittag änderten.

Unter der Annahme, dass der Eintreffzeitpunkt eines Lichtpunktes auf einem Photodetektor mit einer Unsicherheit von 10 ns bestimmt werden kann, was im Hinblick auf die Technologie der Impulslaufzeit-Entfernungsmesser als durchaus gerechtfertigt erscheint, wäre auch mit dem Topcon APL1A die Erfassung von Daten für das OTTM möglich, weil sich hierdurch eine Richtungsauflösung von besser als 0,1 mgon ergibt und die Datenrate mit 150 Hz ausreichend hoch ist. Dieses System hat den Vorteil, dass die Zwischenspeicherung von umfangreichen Bildinhalten und deren „post-processing“ entfällt. Die Erfassung der Intensitätsfluktuation würde eine kleine Hardware-Modifikation erfordern, wobei die Signalstärke lediglich A/D-gewandelt und ebenfalls zwischengespeichert werden müsste. Bei Systemen, die einen positionssensitiven Detektor für die Richtungserfassung verwenden (beispielsweise

Trimble System 5600, TOPCON GTS 800) kann ebenfalls von einer ausreichend hohen Datenrate ausgegangen werden. Über die erreichbare Richtungsaufösung liegen der Verfasserin keine Angaben vor, wobei allerdings davon ausgegangen werden kann, dass die Herstellerangabe für die Richtungsmessgenauigkeit von 0,3 mgon unterschritten wird, da diese ja das gesamte Fehlerbudget beinhaltet und üblicherweise für die Erfassung von Richtungsfluktuationen auf den – ebenfalls zumindest stochastischen Streuungen unterliegenden – Richtungsencoderabgriff verzichtet werden kann, weil die Signale der positionssensitiven Detektoreinheit ausreichen.

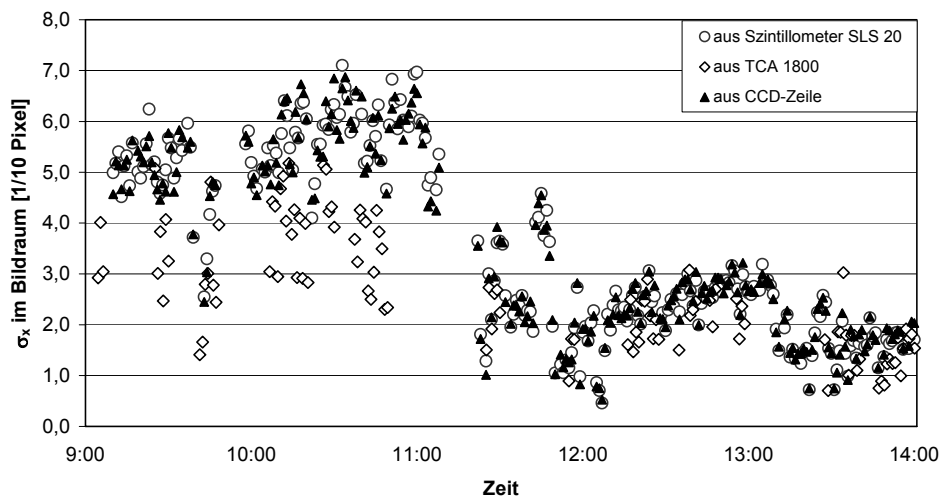


Abb. 13: Vergleich zwischen den Standardabweichungen zwischen einem CCD-basierten Tachymetersystem (hier Leica TCA 1800), dem Zeilenkmerasystem nach Flach und dem Scintillometer [Troller, 2000], bezogen auf die x-Koordinate im Bildraum des TCA

6 Ausblick

Die in diesem Beitrag aufgeführten Beispiele der Forschungsarbeiten der letzten zehn Jahre an verschiedenen Institutionen zeigen, dass in der Entwicklung von Verfahren zur Minderung von Refraktionsinflüssen aufgrund der technischen Möglichkeiten Fortschritte gemacht werden konnten. Wesentliche Beiträge lieferte die Anwendung der Dispersometrie zur refraktionsfreien Richtungsübertragung. Die Umsetzung in ein marktreifes Produkt hängt in technischer Hinsicht vor allem von der Verfügbarkeit einer geeigneten Lichtquelle im kurzwelligen Bereich ab. Inzwischen ist eine solche verfügbar, die allerdings sehr kostspielig ist. Unterdessen ist es auch technisch möglich, das im Funktionsmuster verwendete Lasermodul ausreichend zu miniaturisieren. Trotz der mit dem Funktionsmuster aufgezeigten Machbarkeit werden nicht zu unterschätzende Entwicklungskosten für die Integration in bestehende Theodolite und Tachymeter verbleiben, die sich entweder in hohe Produktionskosten für die bei Präzisionsanwendungen benötigten Kleinserien niederschlagen oder auf die gesamte Produktpalette umgewälzt werden müssen. Deswegen ist kaum mit einer baldigen Markteinführung zu rechnen, obwohl die Präzisionsingenieurvermessung ein solches Produkt erwartet.

Für die Implementierung der OTTM-basierten Verfahren beschränkt sich der Aufwand auf die Erweiterung der Software und in sehr beschränktem Maße auf kleinere Modifikationen der Hardware, die mit großer Wahrscheinlichkeit im Zuge der technologischen Entwicklung ohnehin in naher Zukunft vorgenommen werden: Mittlerweile sind High-speed-Kameras auf dem Markt, die frei programmierbare Bildbereiche ausreichender Größe im kHz-Takt erfassen können. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass OTTM-basierte Verfahren im Gegensatz zu dispersionsbasierten Verfahren lediglich zur Refrak-

tionseinflussminderung beitragen. Die Effizienz hängt überwiegend von der Repräsentativität der in der Similaritätstheorie verwendeten Skalierungsfunktionen ab. Da bisher lediglich Funktionen für gleichförmige Geländetypen bekannt waren (die auch bei den gezeigten Beispielen verwendet wurden) und das OTTM-basierte Verfahren sich vielversprechend zeigte, wird an der Erweiterung gearbeitet [z.B. Weiss, 2002].

Gerade bei Vermessungen mit Lasertrackern ist im Hinblick auf ihre hohe Auflösung und ihre hohe Datenrate den oben beschriebenen Verfahren besonderes Augenmerk zu schenken. Zumindest bei der statischen Punktmessung mit Lasertrackern sind beide Verfahren prinzipiell realisierbar, weil beide gewisse Integrationszeiten (je nach Turbulenzsituation mindestens einige Sekunden) nicht unterschreiten dürfen. Beim Dispersionsverfahren wird die Implementierung einer weiteren Lichtquelle auf der Senderseite und die Trennung der Signale auf der Empfängerseite zu einer besonderen Herausforderung. Bei der Anwendung des OTTM müssen allerdings die Ähnlichkeitsfunktionen noch für geschlossene Räume modifiziert werden.

7 Literatur

BAYER, G. [2001]: Pers. Kommunikation

BEST, A.; KNIGHTING, E.; PEDLOW, R.; STORMONTH, K. [1952]: Temperature and humidity gradients in the first 100 m over SE-England. Geophys.Mem. 89, London.

BINNENBRUCK, B.; MOZZUCHIN, O.; WITTE, B. [2001]: New techniques to determine the influence of, 4th Int. Symp. "Turkish-German Joint Geodetic Days" April 3-6, 2001, Berlin, 12 p.

BINNENBRUCK, B.; WITTE, B. [2000]: Present and Future Ways of Determining the Effect of Vertical Refraction by Use of Digital Surveying Instruments, Proceedings of the Seminar of Mediterranean Surveyors in the new Millennium vom 18.-21. September 2000 in Malta.

BÖCKEM, B. [2001]: Development of a Dispersometer for the Implementation into Geodetic High-Accuracy Direction Measurement Systems. Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 14252, 140 S.

BÖCKEM, B.; FLACH, P.; WEISS, A.; HENNES, M. [2000]: Refraction influence analysis and investigations on automated elimination of refraction effects on geodetic measurements. Paper to XVI IMEKO World Congress 2000, 25-28 Sept. 2000, Vienna.

BÖCKEM, B.; FLACH, P.; WEISS, A.; HENNES, M. [2000]: Refraction influence analysis and investigations on automated elimination of refraction effects on geodetic measurements. Paper to XVI IMEKO World Congress 2000, 25-28 Sept. 2000, Vienna.

BROCKS, K. [1948]: Über den täglichen und jährlichen Gang der Höhenabhängigkeit der Temperatur in den unteren 300 Metern der Atmosphäre und ihren Zusammenhang mit der Konvektion. Bericht des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone Nr. 5, Bad Kissingen.

CASOTT, N.; DEUSSEN, D. [2000]: Vom "Bildflimmern" zur refraktionskorrigierten Vertikalwinkelmessung. AVN, S.286-292.

CASOTT, N. [1999]: Erfassung des Einflusses der turbulenten Refraktion auf optische Richtungsmessungen mit CCD-Sensoren. Diss., Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Heft Nr. 86.

CASOTT, N.; DEUSSEN, D.; WITTE, B. [1998]: Methoden zur Bestimmung der geodätischen Refraktion bei terrestrischen Präzisionsmessungen. VR 60/4 (Juni 1998), S. 193-204.

CHRISTEN, A. [1999]: Labortechnische Voraussetzungen zur Bestimmung von Leistungsmerkmalen trackender Tachymeter. Interner Bericht VTB WS 98/99, IGP, ETHZ.

DEUSSEN, D. [2000]: Meßverfahren zur Erfassung der Vertikalrefraktion unter Nutzung der atmosphärischen Turbulenz. Shaker-Verlag, Aachen.

FLACH, P. [2000]: Analysis of refraction influences in geodesy using image processing and turbulence models. Diss. ETH No 13844, in Druck als Mitteilung des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie.

- GEISS, M. [2002]: pers. Kommunikation.
- HELMSTÄDTER, S. [1996]: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Präzisionsdigitalnivelliere Wild NA 3003 und Zeiss DiNi 10. Diplomarbeit, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht.
- HELMSTÄDTER, S.; MEIER-HIRMER, B. [1997]: Laboruntersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Präzisionsdigitalnivelliere WILD NA 3003 und ZEISS DiNi 10. VR, S. 296-304..
- HENNES, M., DÖNICKE, R. CHRIST, H. [1999]: Zur Bestimmung der temperaturgradienteninduzierten Richtungsverschwenkung beim Tunnelvortrieb. VPK, 8/99, S. 418-426.
- HENNES, M.; FLACH, P. [1998]: Techniken zur Ermittlung von Refraktionskorrekturen aus Videobildern von geodätischen Messinstrumenten. AVN 1998, S. 41-49.
- HENNES, M. [1995]: Entwicklung eines Meßsystems zur Ermittlung von Turbulenzparametern der Atmosphäre für Anwendungen in der Geodäsie. Diss, GIUB, DGK, Reihe C, Heft 438.
- JOHNSTON, A. [1991]: Lateral Refraction in Tunnels. Survey Review, S. 201-220.
- MAROLD, T. [2001]: pers. Kommunikation
- MÖSER, M.; MÜLLER, G.; SCHLEMMER, H.; WERNER, H. [2000]: Handbuch der Ingenieurgeodäsie - Grundlagen. 3. Neubearbeitete Auflage, Wichmann, Heidelberg.
- RÜEGER, J. M. [1990]: Electronic Distance Measurement. Springer, Berlin, ISBN 3-540-51523-2.
- SCHWARZ, W. [1997]: Concept for the Alignment of the planned Linear Collider at DESY. IWAA97, 5th International Workshop on Accelerator Alignment, ANL/FNAL, Oct. 13-17, 1997, Argonne, IL.
- SPARLA, P. [1993]: Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des Brechungsindex der Atmosphäre mit Hilfe von elektronischen Sensoren. Diss, Veröff. d. RWTH Aachen, Heft 50.
- TROLLER, M. [2001]: Szintillometrie zur Refraktionskorrektur von Tachymetermessungen? Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 9/2001, S.603-607.
- TROLLER, M. [2000]: Szintillometrische Refraktionsbeobachtung. Diplomarbeit, IGP, ETHZ, unveröffentlicht.
- WEISS, A. [2002]: Determination of thermal stratification and turbulence of the atmospheric surface layer over various types of terrain by optical scintillometry. In Druck.
- WEISS, A.; HENNES, M.; ROTACH, M. [2000]: Derivation of refractive index and temperature gradients from optical scintillometry for the correction of atmospherically induced problems in highly precise geodetic measurements. Paper to EGS 2000, Nizza, 25.-29.4.2000. In: Kluwer Academic Press, Netherlands.
- N.N.: Firmenprospekte und Internetangaben der Firmen: Leica, SMX, Topcon, ZSP, mikrotron
- Anschrift der Verfasserin: Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes, Englerstr.7, D-76128 Karlsruhe, Tel.: 0721/608-2300, Fax: 0721/608-6552, e-mail: hennes@gik.uni-karlsruhe.de