

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 99 (2001)

Heft: 9

Artikel: Szintillometrie zur Refraktionskorrektur von Tachymetermessungen?

Autor: Troller, Marc

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235814>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Szintillometrie zur Refraktionskorrektur von Tachymetermessungen?

Moderne geodätische Instrumente messen heutzutage so genau, dass der Refraktions-einfluss den grössten Messfehler ausmacht. Als erfolgsversprechendes Verfahren zur Korrektur des Refraktionseinflusses bei geodätischen Visuren in Bodennähe erweist sich die Szintillometrie. Darunter versteht man die Analyse der optischen Turbulenz, die im Fernrohr als Flimmern beobachtet wird. In diesem Beitrag wird anhand von praktischen Messungen die Einsatztauglichkeit von Tachymetern für szintillometrische Messungen untersucht. Die Daten wurden an topografisch unterschiedlichen Orten erhoben und mit unabhängigen Messverfahren verglichen. Die Resultate bestätigen den praktischen Nutzen der Szintillationstheorie, zeigen aber auch deren Mängel und die Notwendigkeit zu ergänzenden Untersuchungen.

A l'heure actuelle, les instruments géodétiques sont d'une précision telle que la réfraction est la source d'erreur principale. La scintillométrie se révèle être une méthode efficace pour corriger l'effet de la réfraction induit dans les visures géodétiques à proximité du sol. Cette méthode permet d'analyser les turbulences optiques qui induisent des oscillations dans le télescope. Dans cet article, l'aptitude du tachymètre à mesurer les effets scintillométriques est étudiée par l'analyse de données réelles. Ces données proviennent de mesures faites à différents sites topographiques et en utilisant différentes méthodes. Les résultats obtenus prouvent l'utilité de l'application de la théorie du scintillement mais en montre aussi les limitations et le besoin d'approfondir les recherches dans ce domaine.

Al giorno d'oggi gli strumenti geodetici moderni misurano a un livello di precisione così alto che l'influsso della rifrazione rappresenta l'errore principale. La scintillometria si rivela un metodo promettente per correggere misure geodetiche in vicinanza del suolo. Questo metodo permette di analizzare le turbolenze ottiche che causano oscillazioni nel telescopio. In questo rapporto è studiata l'idoneità di tacheometri per misurare gli effetti scintillometrici. I dati sono stati rilevati in luoghi topograficamente diversi e confrontati con procedure di misurazione indipendenti. I risultati confermano la praticabilità della teoria di scintillazione, dimostrano però anche i suoi difetti e inoltre la necessità di ulteriori ricerche.

M. Troller

1. Einleitung

Der Refraktionseinfluss stellt sich bei modernen tachymetrischen Messungen immer mehr als grösste Fehlerquelle heraus. Zurzeit sind daher diverse Untersuchungen zur Verbesserung dieses Fehlers im Gange. Es wird vorwiegend in zwei Hauptrichtungen geforscht. Einerseits ist ein sogenanntes Dispersometer in Entwicklung [Ingensand et. al, 1997], welches refraktionsfreie Messungen ermög-

lichen soll, andererseits wird versucht die Einflüsse messtechnisch, unter anderem über Messung der Turbulenzeinflüsse zu erfassen [Casott, 1999; Flach, 2000]. Im vorliegenden Artikel sollen die theoretischen Erkenntnisse zu Turbulenzeinflüssen mit praktischen Messungen überprüft und die praktische Einsatztauglichkeit untersucht werden. Die theoretische Modellierung basiert auf einem homogenen ebenen Gelände. Für die praktischen Messungen wurden als Messorte einerseits eine horizontale Wiese mit möglichst homogenen Luftschichten, andererseits

aber auch eine sehr hügelige Topographie im Gebirge (Val Nalps bei Sedrun, GR) mit kompliziert verlaufenden Luftschichten gewählt. Der Artikel stellt die Untersuchungen der Diplomarbeit Troller [2000] in gekürzter Form dar.

2. Refraktion und Szintillation

Die Refraktion kann in eine quasi-statische und eine turbulente oder szintillometrische Komponente unterteilt werden. Der quasi-statische Anteil hängt vom Brechungsindex ab und hat den Effekt, dass ein Lichtstrahl in der Luft gekrümmt wird. Dies verursacht eine systematische Verfälschung der Messungen. In der Praxis wird dieser Fehler über den Refraktionskoeffizient κ modelliert. Bei standardisierten Auswertungen wird der Wert der Variablen häufig auf $\kappa = 0.13$ gesetzt. Dieser standardisierte Wert wurde jedoch als Mittel von Messungen im Hochgebirge erhoben, wobei die Visuren weit über Bodenhöhe waren. Unter anderen topographischen Gegebenheiten und bei einseitigen Messungen hat dieser Wert nur eine beschränkte Gültigkeit. Insbesondere bei den üblichen Messvisuren in Bodennähe bildet sich eine labile Unterschicht, in welcher grössere Temperaturveränderungen auftreten können und daher κ sehr stark variiert.

Um den Einfluss der Refraktion genau bestimmen zu können, benutzt man statt des Refraktionskoeffizienten meist den Refraktionswinkel δ_s . Dieser berechnet sich zu [Moritz, 1962; Gottwald, 1985]:

$$\delta_s = \frac{1}{s} \int_0^s \frac{1}{n} \left(-0.92 \frac{\partial T}{\partial h} + 0.27 \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot (s-x) \cdot dx \quad (1)$$

δ_s : Refraktionswinkel
 s : Weglänge
 n : Brechungsindex
 dT/dh : Temperaturgradient
 dp/dh : Druckgradient
 x : Integrationsvariable

Der szintillometrische Anteil der Refraktion entsteht aufgrund der atmosphärischen Turbulenzen. Bei Sonnenschein wird der Boden erhitzt. Die bodennahen, wärmeren Luftschichten erfahren einen Auftrieb, wodurch eine Wirbelbildung ausgelöst wird. Die optische Turbulenz, welche sich im Tachymeterfernrohr als Flimmern wahrnehmen lässt, nennt man Szintillation.

Dieser Effekt beeinflusst nun auch den Lichtstrahl und erzeugt daher eine Änderung des Refraktionswinkels. Zwischen der systematischen Richtungsabweichung durch Refraktion und der beobachteten Fluktuation (Szintillation), die sich z. B. als Standardabweichung einer Richtung ausdrücken lässt, besteht ein physikalischer Zusammenhang [Hennes et. al, 1998]. Er lässt sich mathematisch wie folgt formulieren:

$$\sigma_z^2 = 1.05 \cdot C_n^2 \cdot \frac{f^2}{p^2} \cdot a^{-\frac{1}{3}} \cdot s \quad (2)$$

σ_z : Standardabweichung der Bildkoordinatenstreuung
 C_n^2 : Strukturparameter des Brechungsindex
 f : Brennweite
 p : Umrechnungskonstante [m/Pixel]
 a : Apertur
 s : Distanz

3. Geodätische Richtungsmessungen

Die geodätischen Messungen werden mit einem modernen Tachymeter TCA 2003 mit dem ATR Verfahren durchgeführt. Um Fluktuationen messen zu können, muss eine sehr hohe Datenrate erreicht werden. Die übliche Winkelmessung, welche nacheinander eine Feinanziehung, Distanz-, Richtungs- und CCD-Messung ausführt [Haag et. al, 1997] ist für diese Zwecke zu langsam. Ausserdem sind für die Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der Fluktuationen nur die Ablagen auf dem CCD-Chip gegenüber dem Chipzentrum notwendig. Es wird daher

direkt auf die Ablagemessungen des Chips zugegriffen. Mit dieser Methode lässt sich eine genügend grosse Datenrate von etwa 30 Messungen pro Sekunde realisieren. Um die anfallenden, grossen Datenmengen verarbeiten zu können, wird der Tachymeter über eine RS232-Schnittstelle direkt mit einem Computer verbunden. Die Ansteuerung des TCA2003 erfolgt mit einem unter LABVIEW entwickelten Programmpaket.

4. Modellierung des Refraktionswinkels

Zum Vergleich der Tachymetermessungen wird der Refraktionswinkel aus Meteodaten gemäss der Formel (1) modelliert. Die hierfür notwendigen Temperaturgradienten werden mit dem Temperaturgradientenmesssystem der *geomETH* [Hennes et al., 1999], mit vier ventilierten Temperatursensoren bestimmt. Durch regelmässige Messungen der Temperaturen können drei Temperaturgradienten während der ganzen Messperiode berechnet werden. Für die Berechnung des Refraktionswinkels entlang eines spezifischen Messstrahls werden die nun notwendigen Temperaturgradienten mittels einem funktionalen Modell interpoliert. Aufgrund der Komplexität dieser Modellierung wird die Interpolationshöhe auf die bodennahe Luftschicht und die darüberliegende labile Unterschicht bis etwa 30 m über Bodenhöhe beschränkt. Selbst für diesen kleinen Bereich ist die Wahl des funktionalen Modells in der Fachwelt noch sehr umstritten [Gottwald, 1985]. Für diese Arbeit wird eine logarithmische Abhängigkeit der Temperatur von der Höhe verwendet [Brocks, 1948]:

$$\frac{dT}{dh} = a \cdot b \cdot h^{b-1} \quad (3)$$

T : Temperatur
 h : Höhe
 a, b : funktionale Parameter

Für die Berechnung des Druckgradienten sei auf Gottwald [1985] verwiesen. Da der Einfluss des Drucks etwa viermal kleiner

als derjenige der Temperatur ist, kann dieser Gradient mit der Standardformel modelliert werden.

Der Refraktionswinkel berechnet sich nun als Integration des Temperatur- und Druckgradienten entlang des Messstrahls (1). Abbildung 1 zeigt die Veränderung des Refraktionswinkels und -koeffizienten während eines Tages für einen ca. 150 m langen, horizontalen und ungefähr 1.7 m über Bodenhöhe verlaufenden Messstrahl.

Eine Überprüfung des so modellierten Refraktionswinkels mit einem aus Szintillometerdaten bestimmten Refraktionswinkels ergibt eine rechnerische Korrelation von 67%, was aufgrund der grossen Modellunsicherheiten als gut bewertet werden kann.

5. Resultate

5.1 Auswertung der Richtungsmessungen

Die Auswertung der Richtungsmessungen bestätigt den Erfolg des gewählten Messverfahrens. Abbildung 2 stellt die vollständige Horizontalrichtung bzw. Vertikalwinkel im Verlauf einer Messperiode dar. Es zeigt sich eine Variation der Messwerte von bis zu 6 mgon, obwohl die Messgenauigkeit des benutzten Tachymeters TCA2003 unter 0.3 mgon liegt. Die Variation, welche das übliche Messrauschen deutlich überwiegt, kann daher als Fluktuation gewertet werden.

5.2 Untersuchung der Standardabweichungen

Abbildung 3 zeigt die entsprechenden Standardabweichungen für drei verschiedene Messtage. Aus organisatorischen Gründen mussten die Messungen leider zu teilweise unterschiedlichen Zeiten am jeweiligen Tag erhoben werden. Trotzdem lässt sich die turbulenz erzeugte Standardabweichung von bis zu 6 mgon deutlich erkennen. Die Werte vom 21.7. morgens und 26.7. nachmittags sind generell höher als die Standardabweichungen der Nachmittage vom 21.7. und 28.7. Dies stimmt genau mit der damals aktuellen Wettersituation überein: Während im ers-

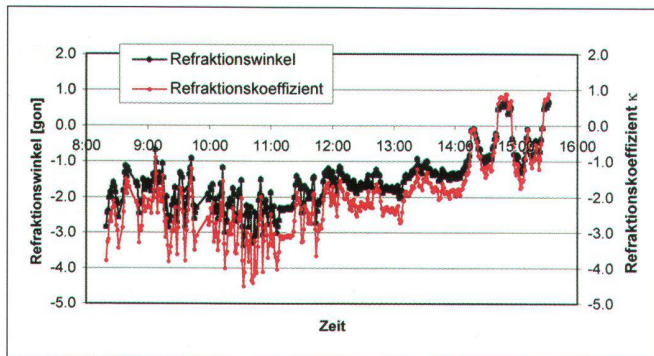


Abb. 1: Refraktionswinkel und -koeffizient der Messungen vom 21.7.99 in Claro/TI.

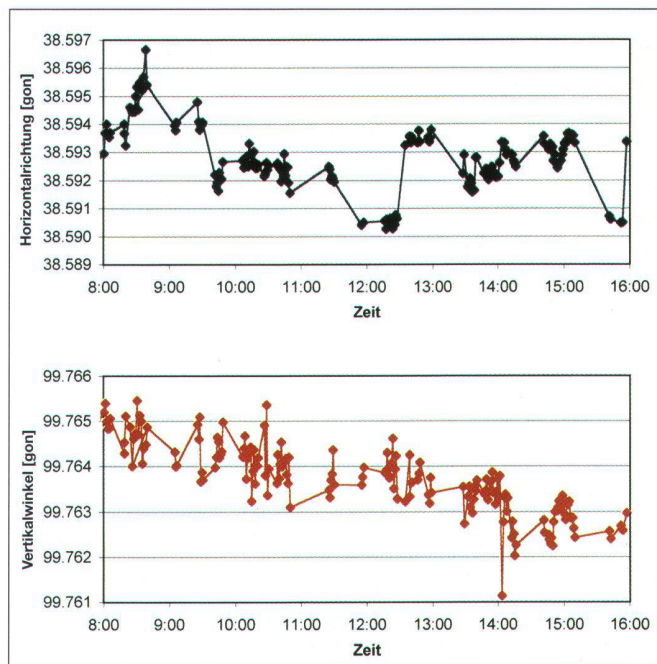


Abb. 2: Vollständige Horizontalrichtung (oben) und Vertikalwinkel (unten) des Messtages vom 21.7.99 in Claro/TI.

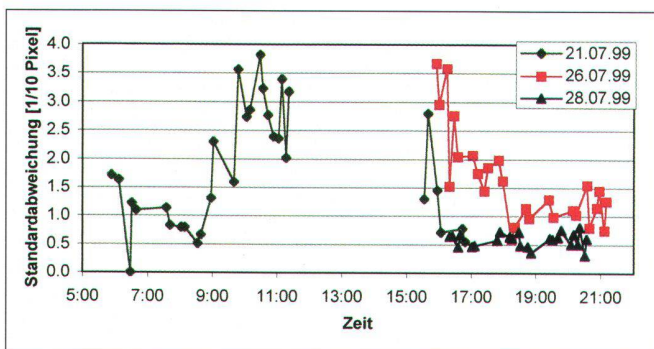


Abb. 3: Standardabweichungen in y-Richtung des Punktes 1004 der Messungen im Val Nalps bei Sedrun/GR.

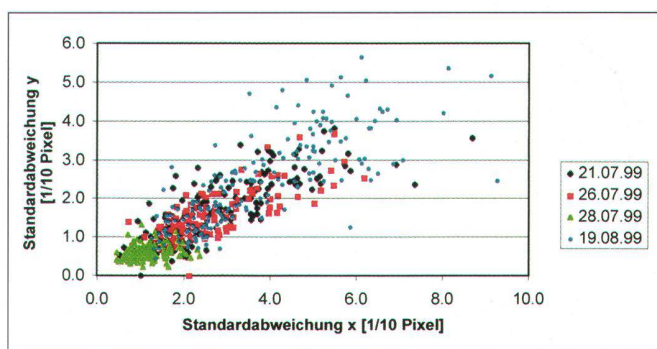


Abb. 4: Standardabweichungen in x- vs. y-Richtung vier verschiedener Messtage im Val Nalps bei Sedrun/GR und in Claro/TI.

ten Fall eine starke Sonneneinstrahlung vorherrschte, war der Himmel am 21.7. nachmittags und am 28.7. bewölkt. Diese Korrelation mit dem aktuellen Wetter konnte auch anhand weiterer Messungen verifiziert werden.

In Abbildung 3 ist auch die halbtägige Periodizität der Messungen sichtbar. Jeweils um ca. 8 Uhr und 19 Uhr sind die Standardabweichungen am geringsten. Dies deshalb, weil tagsüber der Boden wärmer als die Luft ist und daher die bodennahen Luftschichten erwärmt werden. Ohne die Sonneneinstrahlung hingegen kühlt sich der Boden sehr schnell ab und wird nachts

kühler als die umliegende Luft. Zum Zeitpunkt der Temperaturinversion jeweils morgens und abends muss die Standardabweichung der Messungen minimal sein.

5.3 Vergleich der Richtung und Höhe

Die szintillometrischen Turbulenzen entstehen hauptsächlich durch die unterschiedlichen Temperaturen entlang der Vertikalen. In früheren Arbeiten wurde vorwiegend die Höhenkomponente untersucht, um eine Korrektur für die Vertikalwinkel anbringen zu können. In die-

sem Teil soll die Lage mit der Höhe verglichen werden um die Ausbreitung der Turbulenzen im dreidimensionalen Raum erfassen zu können.

Der Vergleich zeigt eine eindeutige Korrelation dieser beiden Messgrößen, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. In Tabelle 1 sind die Korrelationskoeffizienten numerisch aufgetragen. Je sonniger das Wetter und dementsprechend je turbulenter die Luft ist, desto variabler sind die Standardabweichungen und umso größer auch die Korrelationen. Die geringe Korrelation der Messepoche vom 28.7. lässt sich durch die bewölkte Wetterlage

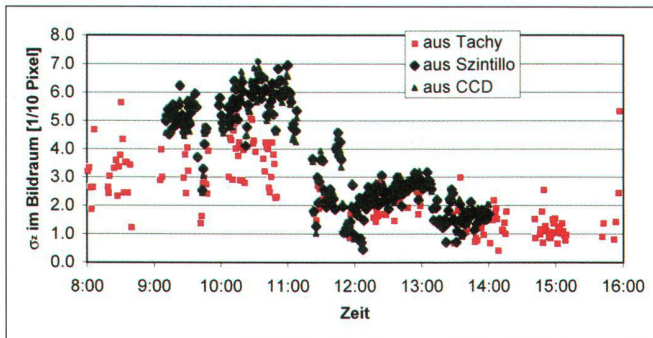


Abb. 5: Vergleich der Standardabweichungen der Bildkoordinatenstreuung von Tachymeter, Szintillometer und CCD-Kamera; Messung vom 19.8.99 in Claro/TI.

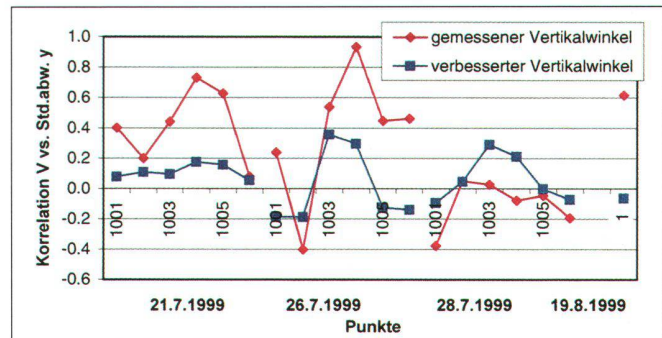


Abb. 6: Korrelation des gemessenen bzw. verbesserten Vertikalwinkels mit den Standardabweichungen in y-Richtung mit mehreren Punkten an verschiedenen Messtagen im Val Nalps bei Sedrun/GR und in Claro/TI.

Messtag	Korrelationskoeffizient	Regression Steigung
alle	85.4 %	1.51
21.7.99	82.5 %	1.58
26.7.99	78.3 %	1.64
28.7.99	21.0 %	1.76
19.8.99	76.1 %	1.44

Tab. 1: Korrelation der Standardabweichungen x und y.

und die dadurch konstant tiefen Standardabweichungen erklären. Das zufallsverteilte Messrauschen überwiegt hier den Anteil der Turbulenz.

5.4 Vergleich mit anderen Messverfahren

An einem Messtag wurden neben den tachymetrischen Messungen zeitgleich mit einem Szintillometer und einer CCD-Kamera [Flach, 2000] ebenfalls szintillometrische Daten erhoben. Die aus den drei unabhängigen Messverfahren errechneten Standardabweichungen der Bildstreuung sind in Abbildung 5 dargestellt. Die sichtbare Korrelation der drei Datensätze lässt sich auch statistisch verifizieren. Der Korrelationskoeffizient zwischen den Daten der CCD-Kamera und den Tachymeterauswertungen beträgt ca. 80% und liefert somit eine unabhängige Bestätigung für die Richtigkeit der Tachymetermessungen.

5.5 Korrelation der einzelnen Parameter

Im folgenden wird nun die Korrelation der szintillometrischen Daten mit den gemessenen Winkeln untersucht. Auffallend ist, dass grosse Korrelationen nur bei Sonnenschein und entsprechend starken Luftturbulenzen vorhanden sind. Die Messepochen mit Bewölkung hingegen weisen keine signifikanten Korrelationen zwischen den einzelnen Parametern auf. Abbildung 6 stellt die Korrelation der Vertikalwinkel mit den Standardabweichungen y an verschiedenen Messpunkten und mehreren Messtagen dar. Während der gemessene Vertikalwinkel hohe Korrelationskoeffizienten aufweist, sind die entsprechenden Werte für den Vertikalwinkel, welcher um den nach szintillometrischen Methoden berechneten Refraktionswinkel verbessert worden ist, wesentlich geringer. Dies weist darauf hin, dass das szintillometrische Verfahren einen deutlichen Genauigkeitsgewinn liefert.

6. Schlusswort

Die vorgestellten Auswertungen haben gezeigt, dass die szintillometrische Refraktionsbeobachtung für die Korrektur refraktionsbeeinflusster Messstrahlen geeignet ist. Die ausreichend genaue Bestimmung der notwendigen Messgrößen mit dem Tachymeter ist in der Praxis nur mit einem sehr kleinen Zeitverlust verbunden. Für den Einsatz in hügeligem Ge-

biet und bei schwierigen meteorologischen Bedingungen müssen jedoch noch weitere Grundlagen erarbeitet werden. Die Untersuchungen zeigen dennoch, dass dieses Verfahren sehr vielversprechend ist und gute Chancen hat, in absehbarer Zeit in der Praxis eingesetzt zu werden.

Dank

Diese Untersuchungen konnten im Rahmen einer Diplomarbeit bei Prof. Dr. Hilmar Ingensand am *geomETH* (geodetic metrology) der ETH Zürich realisiert werden. Der überwiegende Teil der Feldmessungen wurde im vom *geomETH* organisierten Diplomfeldkurs 1999 im Val Nalps bei Sedrun/GR durchgeführt. Ein spezieller Dank für die sehr engagierte und kompetente Betreuung gilt Prof. Dr. Maria Hennes. An dieser Stelle seien auch alle anderen Mitarbeiter der *geomETH* erwähnt, welche bei den vielseitigen Problemstellungen tatkräftig Hilfe leisteten.

Literatur:

- 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.
- Brunner, F.K. [1984]: Modelling of Atmospheric Effects on Terrestrial Geodetic Measurements. In Brunner F.K. (Ed) Geodetic Refraction Ef-

fects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokio pp. 143–161.

Flach, P. [2000]: Analysis of refraction influences in geodesy using image processing and turbulence models, Dissertation ETH No. 13844, IGP, ETH Zürich.

Casott, N. [1999]: Erfassung des Einflusses der «turbulenten Refraktion» auf optische Richtungsmessungen mit CCD-Sensoren, Inaugural-Dissertation, Universität Bonn.

Gottwald, R. [1985]: Zur Genauigkeitssteigerung und Erstellung eines automatisierten Datenflusses beim trigonometrischen Nivellement mit kurzen Zielweiten. Dissertation, RWTH Aachen, Veröff. des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 37.

Haag, R.; Bayer, G.; Zimmermann, M.; Scherrer, R. [1997]: Vermessen mit der automatischen Feinzielung des TCA 1800 von Leica. In: VPK, 7/97, S.466–471.

Hennes, M., Dönicke, R. Christ, H. [1999]: Zur Bestimmung der temperaturgradienteninduzierten Richtungsverswenkung 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.

Ingensand, H.; Böckem, B. [1997]: A High-Accuracy Alignment System Based on the Dispersion Effect. IWAA97, 5th International Workshop on Accelerator Alignment, ANL/FNAL, Oct. 13–17, 1997, Argonne, IL.

Moritz, H. [1962]: Zur Geometrie der Refraktion. OeZfV 1962 S. 3–13.

Troller, M. [2000]: Szintillometrische Refraktionsbeobachtung, Diploma thesis, IGP, ETH Zürich, unpublished.

Marc Troller
dipl. Ing. ETH
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich
troller@geod.baug.ethz.ch



Mit Sicherheit funken.



Anmelde- und
gebührenfrei
bis 0.5 Watt



Ideal, günstig, schnell und sicher.
Überall wo rationell gearbeitet
wird. Für Industrie, Bau, Unterhal-
tungs- und Servicedienste.

KENWOOD

PMR 446

0.5 Watt

CHF 385.–

inkl. MwSt.

HANDY 430

2.5 Watt

CHF 459.–

inkl. MwSt.

Betriebsbereit, mit Akku und Ladegerät.



JA, ich möchte mit KENWOOD funken.

- ☐ Bitte senden Sie mir weitere Gratisinformationen.
- ☐ Wo ist mein nächster KENWOOD-Stützpunkt?

Name/Vorname

Firma

Strasse

PLZ/Ort

Telefon

Telefax

E-Mail

Gleich
Gratisinfos
anfordern.

MOTCOM
Communication

Motcom Communication AG
Herostrasse 9, CH-8048 Zürich
Telefon 01-437 97 97 / Telefax 01-437 97 99
contact@motcom-com.ch, www.motcom-com.ch

20012