

Diss. ETH No 14252

**Development of a Dispersometer
for the Implementation into Geodetic
High-Accuracy Direction Measurement Systems**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Burkhard Böckem

Dipl.-Ing., University of Bonn

born August 16, 1971

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hilmar Ingensand, examiner

Dr. Bernhard Gächter, co-examiner

Dr. Roger Dangel, co-examiner

2001

Abstract

In the course of the progressive developments of sophisticated geodetic systems which offer a very high accuracy potential strategies for correcting atmosphere-related effects will become increasingly important. These atmosphere-related effects arise in a large span of time scales: systematic deviations caused by a quasi-stationary refractive index gradient environment, generally referred to as refraction in geodetic context, slowly transfer to stochastic deviations resulting from optical turbulence. Refraction corrected optical direction and angle measurements are required in numerous high-accuracy measurement applications. These applications include surveying tasks in connection with civil engineering projects, the alignment of particle accelerator facilities, surveying tasks in context within assembling processes in industrial environments, e.g. aircraft industry, tasks wherein surveying instruments provide the spatial guidance of large machines, etc. A dispersometer, based on the dual-wavelength method by utilizing atmospheric dispersion, constitutes a metrological solution to atmosphere-related effects. Another decisive advantage of a dispersometer is that the envisaged correction of atmosphere-related effects works integrally and is available in real time. The aim of this thesis was to develop this dispersometer to overcome atmospherically induced limitations in very high-accuracy direction and angle measurements.

The dispersometer consists of two modules: the dual-wavelength transmitter and the detection system being composed of the dispersion telescope and a position sensitive detector. By applying the dual-wavelength method, the major challenges in instrumental realization are the generation of coaxial single-mode emission at two spectrally optimized wavelengths and the achievement of optical position sensing accuracy in the order of a few nanometers. The development of the dispersometer is principally made possible by focussing on three key technologies: dual-wavelength generation by frequency conversion, optical fiber technology, and gap-technology. Within this work detailed studies of these three key technologies are performed.

In this work it is demonstrated that a dual-wavelength laser by frequency conversion is clearly suited for the implementation in the dual-wavelength transmitter. Furthermore, a novel technique for achieving coaxial single-mode propagation at two spectrally wide-separated wavelengths by one single-mode fiber is established within this thesis. Due to the application of optical fiber technology it is now possible to couple both beams into one optical channel of a modern geodetic total station. In order to achieve optical position sensing with the accuracy of a few nanometers by using a short-focal-length receiving telescope, gap-technology by utilizing special segmented position sensitive detectors is applied. This thesis contains a complete treatment addressed to this technology. Within the course of dispersometer performance tests, difference position sensing accuracy of $\sigma = 7.3$ nm was achieved. Additionally, the existence of the position sensitive detector inherent dispersion was demonstrated. In combination with the dispersion of the receiving optics, the position sensitive detector inherent dispersion has to be considered for the measurement of the atmospheric dispersion induced displacement between both beams of different wavelengths. As a solution a self-calibration procedure which corrects the dispersion of the complete detection system is described. This self-calibration procedure which utilizes the impact of optical turbulence possesses the decisive advantages that it obviates the need of additional measurements and the dispersion correction can be computed and applied in real time.

A substantial part of this thesis is devoted to dispersometer measurements. Two basic atmospheric conditions which are typical for industrial measurement tasks indoors were simulated. Additionally, a detailed study of the influence of the aperture diameter on the dispersometer measurements was performed.

The optimal aperture diameter for the present instrumental layout and for the prevailing ambient conditions was 30 mm. For theodolite-like and smaller apertures it is confirmed that the accuracy of the refraction angle improves with the square root of the integration time. Due to dispersometer performance by using theodolite-like and possibly smaller apertures in combination with the self-calibration procedure, the implementation of a standard theodolite-telescope is proposed. In a moderately turbulent atmosphere the accuracy of the refraction angle for single-face telescope observation was found to be $0.2 \mu\text{rad}$ (0.01 mgon) after an integration time of 12 s and a sight length of 17 m.

Summarizing the theoretical investigations, the key technologies involved in the instrumental development, and the experimental results, presented in this dissertation, it can be concluded that the realized dispersometer in combination with a theodolite is capable of the refraction corrected angular measurements, the influences of optical turbulence notwithstanding. The application of optical fiber technology and the envisaged implementation of a standard theodolite-telescope confirm the presumption that the realized dispersometer can be implemented into modern geodetic total stations. Improvements with respect to field-operativeness are expected by an industrial realization of the dispersometer and by implementing the dispersometer into modern geodetic total stations. The integration of blue laser diodes, when meeting the standards of nowadays infrared laser diodes, would significantly enhance efficiency and reduce overall costs. Due to the technologies presented within this thesis such an integration is clearly feasible.

Kurzfassung

Im Zuge der fortschreitenden Entwicklung technologisch hochstehender geodätischer Messsysteme, die ein sehr hohes Genauigkeitspotential aufweisen, gewinnen Strategien zur Korrektur atmosphärisch induzierter Effekte immer grössere Bedeutung. Diese atmosphärisch induzierten Effekte entstehen in einem grossen Zeitmassstabsbereich: systematische Abweichungen, im geodätischen Zusammenhang Refraktion genannt, verursacht durch eine Brechungsindexgradientenumgebung, gehen langsam zu stochastischen Abweichungen über, die durch optische Turbulenz hervorgerufen werden. Refraktionskorrigierte optische Richtungs- und Winkelmessungen sind im Rahmen zahlreicher Aufgabenfelder auf dem Gebiet der hochgenauen Vermessung erforderlich. Diese Aufgabenfelder beinhalten beispielsweise Vermessungsanwendungen im Bereich von Hoch- und Tiefbauvorhaben, im Zusammenhang mit Alignieraufgaben bei Teilchenbeschleunigern, bei industriellen Montageprozessen, z.B. in der Flugzeugbauindustrie, und zur räumlichen Steuerung grosser bewegter Maschinen. Eine messtechnische Lösung atmosphärisch induzierter Effekte stellt das Dispersometer dar, welches auf der Zwei-Wellenlängenmethode unter Ausnutzung der atmosphärischen Dispersion basiert. Ein entscheidender Vorteil des Dispersometers gegenüber anderen Methoden besteht darin, dass die hierdurch erzielte Korrektur atmosphärisch induzierter Effekte integral wirkt und ausserdem in Echtzeit verfügbar ist. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation sollte ein Dispersometer zur messtechnischen Überwindung der atmosphärisch induzierten Genauigkeitsschranken bei der hochgenauen Richtungs- und Winkelmessung entwickelt werden.

Das Dispersometer besteht aus zwei Modulen: einem zwei Wellenlängen emittierendem Sendesystem und einem Detektionssystem, das sich aus einem Dispersionsfernrohr und einem positionsempfindlichen Detektor zusammensetzt. Bei der Anwendung der Zwei-Wellenlängenmethode bestehen die hauptsächlichen Herausforderungen für die instrumentelle Umsetzung in der Erzeugung coaxialer Monomodeausstrahlung zweier spektral optimierter Wellenlängen und in der Erzielung optischer Positionsdetektionsgenauigkeit in der Grössenordnung weniger Nanometer. Die Entwicklung des Dispersometers wurde in erster Linie durch die Konzentration auf drei Schlüsseltechnologien realisiert: Zwei-Wellenlängen-Erzeugung durch Frequenzkonvertierung, optische Fasertechnologie und Gap-Technologie. Im Rahmen dieser Arbeit wurden detaillierte Untersuchungen dieser drei Schlüsseltechnologien ausgeführt.

Es wird gezeigt, dass ein auf Frequenzkonvertierung basierender zwei Wellenlängen emittierender Laser eindeutig für eine Implementierung in das Sendesystem geeignet ist. Des Weiteren wird eine neuartige Technik vorgestellt, mit der die Erzeugung coaxialer Monomodepropagation zweier spektral weit auseinanderliegender Wellenlängen mittels einer einzelnen Monomodefaser erreicht werden kann. Diese Technik wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelt. Aufgrund der Verwendung optischer Fasertechnologie ist es nun möglich beide Strahlen direkt in einen optischen Kanal einer modernen geodätischen Totalstation einzukoppeln. Zur Erzielung optischer Positionsdetektionsgenauigkeit in der Grössenordnung weniger Nanometer in Verbindung mit einem kurzbrennweitigen Empfangsfernrohr wurde die Gap-Technologie unter Verwendung spezieller segmentierter positionsempfindlicher Detektoren im Rahmen dieser Entwicklung angewendet. Die vorliegende Arbeit enthält eine umfassende Abhandlung dieser Technologie. Im Verlauf von Tests zur Evaluation des Leitungsverhaltens des Dispersometers wurde eine Differenz-Positionsdetektionsgenauigkeit von $\sigma = 7.3$ nm erzielt.

Des Weiteren konnte die inhärente Dispersion des verwendeten positionsempfindlichen Detektors nachgewiesen werden. Neben der Dispersion der Empfangsoptik muss die inhärente Dispersion des positionsempfindlichen Detektors bei der Detektion der durch die atmosphärische Dispersion induzierten Ablage zwischen den Strahlen beider Wellenlängen berücksichtigt werden. Zur Herbeiführung einer Lösung wird eine Selbstkalibrierung beschrieben, die die Dispersionskorrektur des gesamten Detektionssystems bewirkt. Diese Selbstkalibrierung, die den Einfluss der optischen Turbulenz ausnutzt, besitzt die entscheidenden Vorteile, dass keine zusätzlichen Messungen ausgeführt werden müssen und dass die Dispersionskorrektur in Echtzeit berechnet und angebracht werden kann.

Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit Dispersionsmessungen. Zwei grundlegende atmosphärische Bedingungen wurden simuliert, die für industrielle Messaufgaben in Gebäuden als typisch angesehen werden können. Zusätzlich wurden Untersuchungen bezüglich des Einflusses des Aperturdurchmessers auf die Dispersionsmessungen durchgeführt.

Der optimale Aperturdurchmesser für die vorliegende instrumentelle Entwicklung und für die vorherrschenden Umgebungsbedingungen beträgt 30 mm. Es wird für theodolit-ähnliche und kleinere Aperturen bestätigt, dass die Genauigkeit mit der Quadratwurzel der Integrationszeit steigt. Basierend auf dem Leistungsverhalten des Dispersionsmeters für theodolit-ähnliche und kleinere Aperturen im Zusammenspiel mit der Selbstkalibrierung wird die Implementierung eines standardmässigen Theodolitfernrohres vorgeschlagen. In einer mässig turbulenten Atmosphäre wurde für die Genauigkeit des Refraktionswinkels für eine Fernrohrlage $0.2 \mu\text{rad}$ (0.01 mgon) nach einer Integrationszeit von 12 s und einer Visurlänge von 17 m erzielt.

Aufgrund der theoretischen Untersuchungen, der Schlüsseltechnologien, die bei der instrumentellen Entwicklung einbezogen wurden, und der experimentellen Ergebnisse, die im Rahmen dieser Dissertation vorgestellt werden, kann geschlossen werden, dass es mit dem realisierten Dispersionsmeter in Verbindung mit einem Theodoliten möglich ist, auch bei turbulenter Atmosphäre, refraktionskorrigierte Winkelmessungen zu erzielen. Durch die Anwendung optischer Fasertechnologie und der vorgeschlagenen Implementierung eines standardmässigen Theodolitfernrohres lässt sich bestätigen, dass das realisierte Dispersionsmeter in moderne geodätische Totalstationen eingebaut werden kann. Verbesserungen im Hinblick auf ein Feldgerät sind bei einer industriellen Umsetzung und durch eine Implementierung des Dispersionsmeters in moderne geodätische Totalstationen zu erwarten. Der Einbezug von blauen Laserdioden, sobald diese den Standard derzeitiger Infrarot-Laserdioden erreicht haben, würde eine signifikante Effizienzsteigerung bei einer Gesamtkostenreduktion bewirken. Aufgrund der Verfügbarkeit der im Rahmen der vorliegenden Dissertation vorgestellten Technologien wäre eine solche Implementierung eindeutig machbar.