



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

## DISSERTATION

# Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften  
unter der Leitung von

o.Univ. Prof. Dr.-Ing. **Heribert Kahmen**  
Institut für Geodäsie und Geophysik  
Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, TU Wien

und

o.Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. **Wolfgang Niemeier**  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, TU Braunschweig

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik

von

**Dipl.-Ing. Ismail Kabashi**

aus Gurrakoc (Kosova)

Matr. Nr.: 96 25 991

Heinrich-Öschlg. 19/1/8

3430-Tulln

Wien, November 2002

*Ismail Kabashi*

*„ES IST NICHT GENUG ZU WISSEN,  
MAN MUSS AUCH ANWENDEN,  
ES IST NICHT GENUG ZU WOLLEN,  
MAN MUSS AUCH TUN.“*

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

## Kurzfassung

Die Konstruktion von Messrobotern mit Videosensoren ermöglicht, dass die geodätischen Präzisionsmessungen hochgenau, zuverlässig und unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden können. Da in diesen geodätischen Instrumenten eine CCD-Kamera integriert ist, erscheint es erstmals möglich, Refraktionseffekte „hochfrequent“ über kontinuierliche Zenitwinkelbeobachtungen zu bestimmen.

In dieser Arbeit soll dargestellt werden, dass unter Verwendung von zwei Videotheodoliten sowie mit zwei identischen speziell angefertigten Zielmarken ein Messsystem mit vollautomatischer Zielerfassung zur hochfrequenten und streng synchronen Messung von gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkel realisiert wurde.

Durch das Verfahren von gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessungen mit Videotheodoliten wird gezeigt, dass unter bestimmten Voraussetzungen die trigonometrische Höhenübertragung in den Genauigkeitsbereich des geometrischen Feinnivellements vordringen kann. Es wird ein neues Modell entwickelt, welches mit hoher Frequenz die Zenitwinkelmessung erlaubt. Im Rahmen von Laboruntersuchungen wird die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Messsystems gezeigt. Hieran schließen sich die Messungen unter realen Atmosphärenbedingungen in Feldversuchen an.

Bei den Feldexperimenten auf kurzen Strecken konnten am Tage bei jeder Witterung ähnliche Genauigkeiten wie bei den Laborversuchen erzielt werden. Auf längeren Strecken erhält man entsprechende Ergebnisse nur bei Messungen in der Nacht oder bei bedecktem Himmel. Die Sessionslänge ist abhängig von der Streckenlänge, Tag/Nacht Messungen und den Witterungsbedingungen. Die Autokorrelationsfunktionen der Höhenunterschiede zeigten für verschiedene Messserien unterschiedliche Korrelationszeiten. Sie sind unabhängig von der Streckenlänge aber abhängig von äußeren Bedingungen. Es wird experimentell gezeigt, dass sich mit dem Modell in der Praxis Genauigkeiten von etwa 1 mm bei extremen Wetterbedingungen und bei Höhenübertragungen über Wasserflächen mit Entfernungen bis zu 400 m erreichen lassen.

Durch Berechnung mehrerer Nivellementschleifenschlüsse in einer vernetzten Messkonfiguration konnten die Genauigkeitsangaben zur Höhenübertragung bestätigt werden. Es werden Genauigkeiten erreicht, wie sie beim Feinnivellement gefordert werden. Schlussfolgerungen und Vorschläge zur weiteren Überprüfung und Minituriasierung des Messsystems beenden diese Arbeit.

## **Abstract**

The development of measurement robots with video sensors enabled that geodetic precision measurements can be conducted with a high precision and reliability and under the aspect of economy. Since in these geodetic instruments a CCD camera is integrated, it made for the first time possible to determine refraction effects with a high frequency using continuous zenith angle observations.

In this work a measurement system with fully automatic target recognition was realized for high frequency and strictly synchronous observation of simultaneous reciprocal zenith angles using of two video theodolites as well as two identical particularly made targets.

It can be shown that using simultaneous reciprocal zenith angle measurements with video theodolites for height determination can achieve the accuracy level of geometrical fine leveling under certain conditions. A new model is developed, which permits the zenith angle measurement with high frequency. In the context of laboratory tests the operability of the measurement system could be shown. Further experiments are conducted under real atmospheric conditions in field tests.

With the field experiments similar accuracies could be obtained over short distances as with the lab tests by day under different weather conditions. Over long distances appropriate results can be obtained only when measurements are taken at night or under covered sky. The session length depends on the distance, day/night measurements and the weather conditions. The autocorrelation functions of the differences in height showed different correlation times for different measurement series. They are independent of the measurement distance, however, depend on outside conditions. It could be experimentally shown that with the model accuracies of approximately 1 mm can be achieved in practice under extreme weather conditions and for height determination over water surfaces with distances up to 400 m.

By computation of several leveling loops in a bridge network the precision requirements could be confirmed for height determination. Accuracies could be achieved that are usually demanded using geometrical leveling. Conclusions and suggestions on the further development and refinement of the measurement system conclude this work.

## Danksagung

Dieses Werk ist das Produkt langer und harter Arbeit, bei der zuerst und zuletzt der eigene Wille stand. Diese Arbeit soll mit dem Dank an all diejenigen enden, die (direkt oder indirekt) Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten.

Mein Dank gilt dem Österreichische Staat, der es mir ermöglicht hat, meinem Studium der Geodäsie an der TU Wien in Frieden nachzugehen.

Insbesondere gilt dieser Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Heribert KAHMEN, der die Anregung zu dieser Arbeit gab und deren Begutachtung übernommen hat. Weiters danke ich Herrn Prof. Kahmen für die Möglichkeit zum Studieren und Arbeiten in seinem Institut sowie für die Erfahrungen und das Lernen mit ihm und seinen Assistenten und Mitarbeitern in der Ingenieurgeodäsie. Ich bedanke mich sehr herzlich sowohl für seine Betreuung dieser Arbeit als auch für vielfältige Hilfen, unter anderem bei der wissenschaftlichen Formulierung dieser Arbeit und seine tatkräftige Unterstützung während der Beobachtung. Schließlich bedanke ich mich für die Bereitstellung der Sensoren.

Weiters danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfgang NIEMEIER von der TU Braunschweig für die Übernahme des Koreferates und die Gelegenheit in die Reihe seiner Doktoranden einzutreten.

Dank gebührt allen Mitarbeitern des Instituts für die gute und freundliche Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren. Bei Ass. Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Günther Retscher bedanke ich mich, im speziellen, für seine aufwendige Mithilfe bei der deutschen Formulierung der Arbeit sowie für die Korrekturlesung der Arbeit vor der Einreichung. Bei Dipl.-Ing. H. von Webern bedanke ich mich sehr herzlich für seine aufwendige Mithilfe bei der deutschen Formulierung der Arbeit sowie bei fachlichen Problemen. Bei Dipl.-Ing. Dr. techn. A. Niessner bedanke ich mich für die Mithilfe bei Messungen im Freien. Außerdem möchte ich mich sehr herzlich bei den Assistenten und Mitarbeitern der Abteilung für Angewandete Geodäsie und Ingenieurgeodäsie bedanken: bei Dipl.-Ing. Dr. techn. J. Fabiankowitsch, Dipl.-Ing. M. Haberler, Dipl.-Ing. A. Reiterer, Dipl.-Ing. E. Fragner und Institutsreferentin S. Spitaler.

Ebenfalls danke ich folgenden Personen: e. o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Kurt Bretterbauer für seine Unterstützung bei der Besprechung fachlicher Probleme und seiner Gattin Dr. Shpresa-Regina Bretterbauer für ihr Verständnis und ihre Ermunterung, HR Dipl.-Ing. H. Plach (†2001), o. Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. T. Wunderlich, a.o. Univ. Prof. Dr.-Ing. R. Weber, Dipl.-Ing. Dr. techn. K. Chmelina und Dipl.-Ing. Dr. techn. A. de Seixas.

Bei den Herren Cand.-Ing. Zrin Ziborski und Cand.-Ing. Antonio Batovanja bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Umsetzung der mathematischen Algorithmen in lauffähige Programmcodes. Bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Avni Pllana bedanke ich mich für seine Mithilfe bei der Matlab-Programmierung.

Meinem Bruder Esat gilt der wichtigste Dank für meine finanzielle Unterstützung, ohne die mein Studium an der TU Wien und diese Arbeit nicht möglich gewesen wären.

Schließlich schulde ich meinen Eltern (Metë und Hatmane) und Geschwistern (Daut, Qaush, Ilir und Lirije) sowie meinen Cousins (Adem, Shaban, Xhevdet und Ramadan) einen ganz besonderen Dank für ihr Verständnis und ihre Unterstützung.

Ich bedanke mich ebenfalls herzlich bei dem an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät in Prishtina tätigen Dr. sc. Murat Meha (meinem Lehrer für Vermessungswesen an der Mittelschule) für die Zusammenarbeit, Kontakte und wissenschaftliche Unterstützung. Ich möchte Herrn Professor Meha, der sein Leben der Geodäsie gewidmet hat mit dieser Arbeit ehren.

Außerdem möchte ich meinen Dank an die Professoren (Institut für Vermessungswesen und Geoinformation der Abteilung für Vermessungswesen in Sarajevo) Herrn Prof. Dr. Nihad Kapetanovic und Prof. Dr. Faruk Seleskovic sowie an meinen Kollegen und Freund Univ. Ass. Dipl.-Ing. Admir Mulahusic aussprechen.

Weiters danke ich den Herren Prof. Mag. Dr. iur. Eqrem Zenelaj, Dervis Djurdjevic dipl. ecc. und Dipl.-Ing. Fadil Kukiqi. Bei Herrn Stefan Mayerhofer bedanke ich mich für die Kontakte zur NÖ Landesregierung, Gruppe Straßen-Abteilung Brückenbau, um die Stromanschlüsse an beiden Ufern der Donau bei Tulln zu ermöglichen.

Der wichtigste Dank aber gilt meiner lieben Frau Miradije, die zusammen mit unserer Tochter Fiona für so viel Zeit auf mich verzichtet hat und mich dennoch immer wieder davon überzeugt hat, wie wichtig es ist diese Arbeit fertigzustellen.

*Meinen Eltern, Metë und Hatmane  
Kabashi, widme ich in Liebe und  
Dankbarkeit diese Arbeit.*

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung und Motivation.....	1
<b>2</b>	<b>Einige Grundlagen für den Aufbau der Atmosphäre und das Refraktionsfeld</b> .....	<b>4</b>
2.1	Aufbau der Atmosphäre .....	4
2.1.1	Der Wärme- und Strahlungsumsatz an der Bodenoberfläche .....	6
2.1.2	Zur Strahlablenkung in der turbulenten Atmosphäre .....	7
2.1.3	Das Turbulente Transfer Model (TTM)- Stand der Technik .....	8
2.2	Die Lichtstrahlkrümmung .....	9
<b>3</b>	<b>Modellbildung zur Erfassung und Beseitigung der Refraktionseinflüsse</b> .....	<b>12</b>
3.1	Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelbeobachtung .....	13
3.1.1	Stand der Technik.....	13
3.1.2	Einsatz eines automatischen Zielsystems für streng synchrone gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung.....	14
<b>4</b>	<b>Entwicklung des Messsystems</b> .....	<b>17</b>
4.1	Kurze Beschreibung der vorhandenen Hardware.....	17
4.1.1	Aufbau der Videotheodolite .....	17
4.2	Zielmarken und ihre Eigenschaften.....	22
4.3	Synchronisation und Beschleunigung der Messungen.....	24
4.3.1	Synchronisation der Messung .....	24
4.3.2	Erhöhung der Abtastrate und Frequenz.....	25
<b>5</b>	<b>Versuchsmessungen im Labor-Kalibrierung des Verfahrens</b> .....	<b>27</b>
5.1	Untersuchung der Abtastrate mit verschiedenen Zielmarken .....	27
5.2	Genauigkeitsuntersuchungen mit verschiedenen Zielmarken.....	29
5.2.1	Einsatz von verschiedenen Zielmarken - Untersuchungen von drei verschiedenen Varianten .....	29
5.3	Synchronisation der beiden Messstationen .....	31
5.4	Überprüfung der Stabilität des Referenzrahmens auf dem CCD-Feld.....	32
5.5	Untersuchungen der Systemgenauigkeit .....	33
5.6	Simulation der Atmosphäre durch eine Glasplatte.....	34
5.6.1	Versucherklärung .....	34
5.6.2	Ableitung der mathematischen Beziehungen.....	34
5.6.3	Auswertung und Diskussion der Messergebnisse .....	36
<b>6</b>	<b>Auswertung der Zeitreihen</b> .....	<b>38</b>
6.1	Korrelationsstatistische Auswertung der Messungen.....	38
6.2	Filterung von Zeitreihen.....	40
6.2.1	Tiefpassfilter.....	40
<b>7</b>	<b>Feldexperimente</b> .....	<b>42</b>
7.1	Beschreibung der Feldversuche-Aufbau und Messablauf.....	42
7.2	Beobachtungen auf einer 46.0 m langen Strecke .....	42
7.2.1	Beschreibung des Testfeldes .....	42
7.2.2	Wetterbedingungen .....	44
7.2.3	Berechnungsergebnisse .....	44
7.2.3.1	Zenitwinkel.....	44
7.2.3.2	Meteorologische Daten .....	44
7.2.3.3	Varianzen der Zenitwinkel .....	44
7.2.3.4	Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln.....	45
7.2.3.5	Statistische Analyse der Höhenunterschiede.....	47
7.2.3.6	Kurze Zusammenfassung .....	49
7.3	Beobachtungen auf einer 125.10 m langen Strecke .....	50

7.3.1	Beschreibung des Ortes .....	50
7.3.2	Messungen .....	51
7.3.3	Wetterbedingungen .....	51
7.3.4	Berechnungsergebnisse .....	51
7.3.4.1	Zenitwinkel.....	51
7.3.4.2	Meteorologische Daten .....	52
7.3.4.3	Varianzen der Zenitwinkel .....	53
7.3.4.4	Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln.....	54
7.3.4.5	Statistische Analyse der Höhenunterschiede.....	55
7.3.4.6	Kurze Zusammenfassung .....	56
7.4	Messungen über große Entfernungen (378 m) an der Donau bei Tulln.....	57
7.4.1	Beschreibung des Ortes und der Wetterbedingungen .....	57
7.4.2	Messungen am 18./19.06.2002.....	58
7.4.3	Berechnungsergebnisse der Messungen am Nachmittag/Abend des 18./19.06.2002 (Messpfeiler S3-N7).....	58
7.4.3.1	Zenitwinkel.....	58
7.4.3.2	Varianzen der Zenitwinkel .....	59
7.4.3.3	Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln.....	59
7.4.3.4	Statistische Analyse der Höhenunterschiede.....	61
7.4.3.5	Kurze Zusammenfassung .....	62
7.4.4	Berechnungsergebnisse der Messungen in der Nacht vom 18./19.06.2002 (Messpfeiler S3-N7).....	63
7.4.4.1	Zenitwinkel.....	63
7.4.4.2	Varianzen der Zenitwinkel .....	63
7.4.4.3	Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln.....	64
7.4.4.4	Statistische Analyse der Höhenunterschiede.....	65
7.4.4.5	Kurze Zusammenfassung .....	67
7.4.5	Vergleich der Messergebnisse vom 18./19.06.02 (Nachmittag/Abend) und 18./19.06.02 (Nacht).....	67
7.4.6	Messungen am 11./12.09.2002 (Messpfeiler S4-N8).....	67
7.4.6.1	Wetterbedingungen .....	67
7.4.6.2	Berechnungsergebnisse .....	68
7.4.6.2.1	Zenitwinkel.....	68
7.4.6.2.2	Meteorologische Daten.....	68
7.4.6.2.3	Varianzen der Zenitwinkel.....	69
7.4.6.2.4	Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln.....	69
7.4.6.2.5	Statistische Analyse der Höhenunterschiede.....	71
7.4.6.2.6	Kurze Zusammenfassung .....	72
7.4.6.3	Vergleich der Messergebnisse vom 11./12.09.02 (Nacht) und 11./12.09.02 (Tag) .....	73
7.4.7	Messungen am 10.10.2002 (Messpfeiler S4-N8).....	74
7.4.7.1	Wetterbedingungen .....	74
7.4.7.2	Berechnungsergebnisse .....	74
7.4.7.2.1	Zenitwinkel.....	74
7.4.7.2.2	Meteorologische Daten.....	74
7.4.7.2.3	Varianzen der Zenitwinkel.....	75
7.4.7.2.4	Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln.....	76
7.4.7.2.5	Statistische Analyse der Höhenunterschiede.....	77
7.4.7.2.6	Kurze Zusammenfassung .....	78
7.5	Optimierung des Verfahrens .....	78
7.5.1	Optimierung der Sessionsdauer.....	78
7.6	Untersuchungen zur äußeren und inneren Genauigkeit der berechneten Höhenunterschiede .....	80
7.7	Der Gang des wirksamen Refraktionskoeffizienten $k$ über Wasserflächen .....	84

---

<b>8 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>87</b>
<b>9 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>89</b>
<b>10 Anhang 1 .....</b>	<b>96</b>
<b>11 Anhang 2.....</b>	<b>98</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Zielsetzung und Motivation

Die atmosphärische Strahlenbrechung beeinflusst die trigonometrische Höhenmessung im allgemeinen weitaus stärker als andere geodätische Messverfahren. Durch die vertikale Komponente der terrestrischen Refraktion werden Zenitwinkel und damit auch trigonometrisch bestimmte Höhenunterschiede mehr oder weniger stark systematisch verfälscht. Die Refraktionsfehler können dabei beachtliche Beträge erreichen, die weit über den Fehlereinflüssen anderer in die Berechnung der Höhendifferenzen eingehender Größen liegen. Im Laufe der Zeit sind viele unterschiedliche Modelle entwickelt worden, mit denen der Einfluss der Refraktion auf die Beobachtung sowohl rechnerisch als auch messtechnisch erfasst und unter bestimmten Voraussetzungen sogar eliminiert werden kann (*Brunner, 1984*). Die Auswirkung der Refraktion auf die in der Geodäsie am häufigsten durchzuführenden Beobachtungen der Richtungs- und elektro-optischen Distanzmessung ist unterschiedlich und hat zufälligen und systematischen Charakter.

Seit vielen Jahren ist man in der Geodäsie bemüht, die Genauigkeit der Messinstrumente weiter zu erhöhen. Weiters will man die Messungen automatisieren, um subjektive Fehlerquellen, die durch einen Beobachter in den Messablauf eingebracht werden, zu reduzieren. Die neuen Präzisionsinstrumente (zielverfolgende elektronische Tachymeter, digitale Nivelliere, Videotheodoliten) gewährleisten, dass die geodätischen Präzisionsmessungen sehr genau, zuverlässig und unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit zusätzlich auch noch sehr schnell durchgeführt werden können. Diese Sensoren ermöglichen weiters eine schnellere und leichtere Weiterverarbeitung der Originaldaten. Hinsichtlich der modernen Instrumente und schnellerer Beobachtungen schrieb schon Tralles<sup>1</sup> im Jahre 1806 (Zitat):

*„Vollkommenere Instrumente wären vortheilhaft gewesen, nicht so wohl um die Beobachtungen weniger mühsam, sondern mit noch größerer Sicherheit schneller und häufiger noch vollbringen zu können“.*

Als vollkommenere Instrumente bieten sich die Videotheodolite besonders zur Erforschung integraler Refraktionseinflüsse an, da sie hochgenau und hochfrequent die turbulenten Einflüsse ausmessen können und somit die effektivste Art und Weise der Refraktionserfassung darstellen. Bei speziellen Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, bei Präzisionsmessungen, lassen sich die hohen Genauigkeiten dieser Instrumente nicht ausnutzen, wenn nicht zugleich auch die ausreichende Kenntnis der äußeren Einflüsse vorliegt. Die atmosphärischen Refraktionsvorgänge stellen die größte Fehlerquelle dar, die die Beobachtung in erheblichem Maße verfälschen. Je präziser Instrumente und Messverfahren werden, um so mehr spürt man die atmosphärischen oder meteorologischen Einflüsse (*Bahnert, 1977*). Je vollkommener die geodätischen Instrumente, Geräte und Verfahren, je höher die Anforderungen an die Produktivität werden, desto intensiver sind die Bemühungen um die Eliminierung systematischer, vor allem der atmosphärischen Einflüsse auf die Messungsergebnisse. Es ist daher nicht verwunderlich, dass man besonders in jüngster Zeit dieser Problematik wieder verstärkt Beachtung schenkt.

Videotheodolite ermöglichen neben einer Vereinfachung und Beschleunigung des Messablaufs eine vollautomatische Messung (Zielerfassung), wobei anschließend die beobachteten Messwerte und Änderungen der Messwerte oder bestimmte, davon abgeleitete Größen, ebenfalls vollautomatisch zur späteren Weiterverarbeitung oder Analyse offline abgespeichert und zugänglich gemacht werden.

---

<sup>1</sup> Tralles: „Betrachtungen über die atmosphärische Refraktion der Lichtstrahlen irdischer Gegenstände“

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist unter Verwendung von zwei Videotheodoliten, TM 3000V und TM 3000VD, und zwei speziell konstruierten Zieleinrichtungen (aktive Zielmarke) ein Messsystem zur vollautomatischen und kontinuierlichen gleichzeitig-gegenseitigen Zielerfassung (Messung der Horizontal- und Zenitwinkel) mit „hoher“ Frequenz und Genauigkeit zu konzipieren und zu erproben. Speziell sollen durch simultanen Einsatz zweier Videotheodolite gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkel zwischen zwei Stationen gemessen werden. Mit diesem System ist es mit (vertretbarem Aufwand) möglich, auch in der Präzisions-Höhenmessung einen automatisierten Datenfluss zu realisieren.

Die Idee für ein solches Experiment zur Messung von gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln ist nicht neu. Ausgangspunkt für dieses Experiment waren ältere Studien, wie zum Beispiel die Arbeiten von Bessel (1830) und Baeyer (1834). Hier wird schon die Annahme getroffen, dass die Kurve des Lichtstrahls an beiden Standpunkten mit der Sehne gleiche Winkel einschließt.

Dieses Verfahren setzt voraus, dass zur Zeit der Messung in zwei Richtungen dieselbe Refraktion auftritt. Im allgemeinen wird dann eine konstante Krümmung der Lichtkurve, also ein kreisbogenförmiger Verlauf des Zielstrahls unterstellt. Dies bedeutet, dass die Refraktionswinkel die zugehörigen Zenitwinkel um gleich große Beträge verfälschen. Besondere Aufmerksamkeit gebührt der Synchronisation beider Videotheodolite. Das Messsystem soll integral (d.h. kontinuierlich und entlang der gesamten Distanz) arbeiten, da nur so zuverlässige Aussagen über die Refraktion und deren Wirkung auf die Messung getroffen werden können.

Das zweite Kapitel stellt einige Grundlagen für den Aufbau der Atmosphäre und das Refraktionsfeld vor, soweit sie hier notwendig sind. Der wichtigste Parameter im Kontext der Refraktionstheorie ist der Brechungsindex  $n$ , der eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  des zur Messung verwendeten Lichtes ist. Hinzu kommt eine Abhängigkeit von den meteorologischen Parametern Temperatur  $t$ , Luftdruck  $p$  und Luftfeuchte  $e$ . Der Brechungsindex unterliegt infolgedessen einer Orts- und Zeitabhängigkeit, die am stärksten mit der Höhe variiert. Die Betrachtungen beziehen sich lediglich auf optische Messungen in den bodennahen Luftschichten.

Die Entwicklung und Erprobung eines „hochfrequenten“ Messsystems für strenge simultane Beobachtungen steht im Mittelpunkt der Arbeit. Zuvor werden in Kap. 3 die Modellbildung zur Erfassung und Beseitigung der Refraktionseinflüsse beschrieben. In der gewöhnlichen Messpraxis wird der Aspekt der Refraktionsbeseitigung insoweit berücksichtigt, dass allein durch die Art und Weise der Messanordnung selbst der Refraktionseinfluss weitgehend eliminiert wird.

In Kap. 4 folgt eine Darstellung der vorhandenen und weiteren Entwicklung der Hard- und Software. Die neue Software und neue aktive Zielmarken erlauben eine Abtastrate bis zu 25 Hz, um so die turbulenten<sup>2</sup> Refraktionseinflüsse zu erfassen. Besonders große Aufmerksamkeit ist der Synchronisation zwischen beiden Videotheodoliten geschenkt.

Anschließend wird in Kap. 5 die Kalibrierung des Messsystems beschrieben. Mit Versuchsmessungen werden die möglichen Fehlerquellen untersucht, um diese zu beseitigen. Damit die Abtastrate von 25 Hz erreicht wird, wird mit verschiedenen Zielgrößen und verschiedenen Distanzen experimentiert. Um die Funktionsfähigkeit des Verfahrens zu überprüfen, wird die Brechung der Lichtstrahlen in der Atmosphäre mit einer Glasplatte simuliert.

In Kap. 6 wird kurz die Theorie der Zeitreihenanalyse vorgestellt, wobei die statistische Analyse (Autokorrelationsfunktionen) und Filterung der Zeitreihen von Bedeutung sind. Kap. 7 befasst sich mit den praktischen Messungen, die die Feldtauglichkeit des gesamten Messsystems letztendlich unter Beweis stellen sollen, wobei die Beobachtungen an drei verschiedenen Orten, die sich durch ihre Topographie unterscheiden, durchgeführt werden. Alle Versuchstrecken

---

<sup>2</sup> Der turbulente Anteil der Refraktion wird häufig als Fluktuation oder Szintillationen bezeichnet (Casott, 1999).

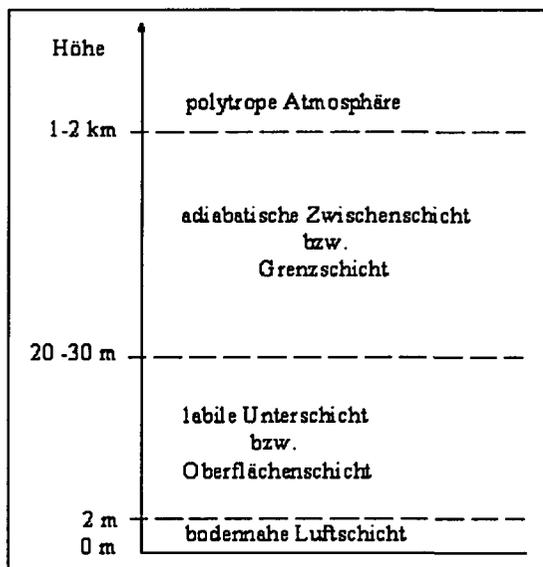
werden so ausgewählt, dass Topographie und Bewuchs entlang der Strecke homogene Verhältnisse vermuten lassen, um möglichst günstige Voraussetzungen für das angewandte Messverfahren zu haben. Besonders interessant und charakteristisch ist das dritte Messgebiet in Tulln bei der neuen Donaubrücke, wobei es sich um ein symmetrisches Profil auf beiden Seiten des Donauufers handelt. Die statistische Analyse der Höhenunterschiede und Optimierung des Messverfahrens hinsichtlich der erreichten Messergebnisse schließen diese Arbeit ab.

## 2 Einige Grundlagen für den Aufbau der Atmosphäre und das Refraktionsfeld

### 2.1 Aufbau der Atmosphäre

Hier wird nicht versucht, einen vollständigen Überblick über den Aufbau der Atmosphäre zu geben, sondern es sollen nur einige prinzipielle Komponenten dargestellt werden, die am Aufbau der Atmosphäre beteiligt sind bzw. sie beeinflussen. Eine ausführlichere Beschreibung über den Aufbau der Atmosphäre ist in einschlägiger meteorologischer Literatur wie z.B. (Broks, 1948; Mitter, 1962; Bahnert, 1970) zu finden.

Nach (Broks, 1948) lässt sich das bodenbeeinflusste Temperaturfeld in eine labile Unterschicht und eine adiabatische Zwischenschicht einteilen. Darüber befindet sich die polytrope Atmosphäre (Abb. 2-1). Eine Atmosphäre wird als adiabatisch bezeichnet, wenn sie sich in völligem Gleichgewicht befindet. In der labilen Unterschicht nimmt die Temperatur mit der Höhe logarithmisch ab. Als beschreibenden Parameter bedient man sich des Temperaturgradientes, der für jede Schicht typische Beträge annimmt. Aufgrund des



Wärmetransportes in der labilen Unterschicht treten die stärksten Änderungen in der Temperaturverteilung auf. Man unterscheidet hier drei Zustände, die von der Sonneneinstrahlung und somit letztendlich auch von der Tageszeit abhängen. Nachts findet man in der Regel eine stabile Schichtung vor. Die vertikale Bewegung der Luft kommt hierbei zum Stillstand, da aufsteigende Luft in wärmere und absteigende Luft in kältere Umgebung gelangt. Ein Sonderfall ist die Inversion, bei der positive Temperaturgradienten vorherrschen. Diese Umkehr des vertikalen Temperaturgradienten ist vorhanden, wenn nach Beendigung der Sonneneinstrahlung vom Boden Wärme ausgestrahlt wird und die Grenzschicht zwischen Luft- und Bodenoberfläche die tiefste Temperatur annimmt (Deumlich, 1963).

Abb. 2-1: Schichtungen der unteren Atmosphäre nach (Broks, 1948)

Eine neutrale Schichtung ist bei einem Temperaturgradienten von  $\sim -0.01^\circ\text{C}/\text{m}$  anzutreffen (Casott, 1999). Die Atmosphäre befindet sich dann im sogenannten indifferenten Gleichgewicht, indem vertikal verschobene Luftteilchen die gleiche Temperatur besitzen wie die Umgebung.

Bei einem Temperaturgradienten von  $< -0.01^\circ\text{C}/\text{m}$  (überdiabatisch) liegt der Fall der labilen Schichtung vor, der zumeist am Tag durch starke Sonneneinstrahlung und der daraus resultierenden Konvektion verursacht wird. Diesen Fall trifft man in der Regel am Tage in Bodennähe an.

Ist schließlich der Temperaturgradient  $> -0.01^\circ\text{C}/\text{m}$ , dann ist eine stabile Schichtung vorhanden. Bewegt man Luftteilchen nach oben/unten, so ist die Umgebungstemperatur höher/niedriger. Die bewegte Luftmasse ist bestrebt in ihre Ausgangslage zurückzugelangen.

Über der adiabatischen Zwischenschicht erfolgt langsam der Übergang zur Temperatur der freien Atmosphäre. Der Übergang zwischen der labilen Unterschicht und der adiabatischen

Zwischenschicht (vgl. Abb. 2-1) ist dabei fließend und bewegt sich zwischen 10 Uhr und 16 Uhr zwischen 15-30 m (Tegeleer 1971).

Der Temperaturgradient<sup>3</sup> wird aufgrund umfangreicher Untersuchungen von (Broks, 1948) häufig gemäß Gleichung (2.1) angegeben, wobei die Parameter  $a$  und  $b$  je nach dem aktuellen Zustand der Atmosphäre unterschiedliche Werte annehmen können.

$$\tau = \frac{dT}{dz} = az^b \tag{2.1}$$

Am Tag nimmt  $b$  Beträge um  $-1$  an. Beide Parameter unterliegen einer Zeitabhängigkeit, was insbesondere im Hinblick auf die Umkehrung der Richtung des Gradienten zwischen Tag und Nacht deutlich wird (Abb. 2-2). Dies kann auch anhand der Temperaturhöhenverläufe, die zu unterschiedlichen Tageszeiten gemessen wurden, veranschaulicht werden (Abb. 2-3).

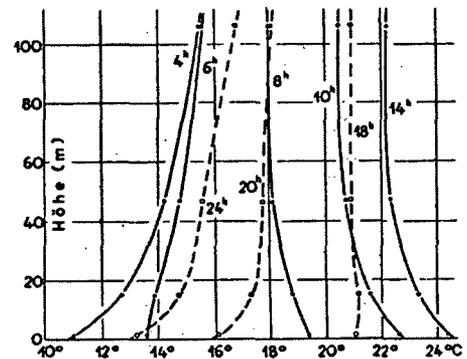
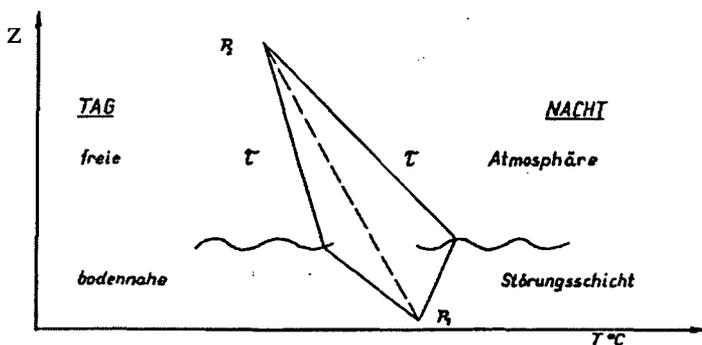


Abb. 2-2: Tagesgang der Temperaturgradienten

Abb. 2-3: Temperaturverlauf zu unterschiedlichen Tageszeiten (aus Geiger, 1961)

Der Aufbau des bodennahen Temperaturfeldes bei Tage ist fast in allen Wetterlagen, also auch bei völliger Bedeckung, durch den Einstrahlungseffekt der Sonne (Abb. 2-4) bedingt. Je nach Stärke der Einstrahlung wird die bodennächste Luftschicht durch Wärmeleitung und langwellige Rückstrahlung vom Boden aus mehr oder weniger stark erwärmt und teilt ihre Wärme durch turbulente Austauschvorgänge (Konvektion) auch den darüber lagernden Luftschichten mit. Ein Lichtstrahl wird am Tag entgegen der Erdkrümmung nach oben abgelenkt (Abb. 2-4 (a)).

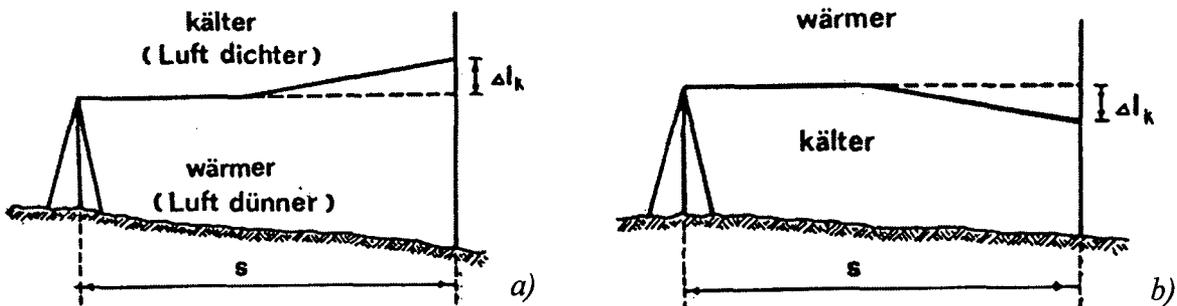


Abb. 2-4: Ein- und Ausstrahlungstyp (aus Hübner, 1980)

Den Aufbau des bodennahen Temperaturfeldes bei Nacht unterteilt Broks in eine Inversionsunterschicht und eine Zwischenschicht. Auch hier zeigt sich in der bodennächsten Schicht eine logarithmische Temperaturänderung mit der Höhe, allerdings mit positivem Gradienten. Die durchschnittliche Stärke entspricht praktisch genau der labilen Unterschicht bei Tag und beträgt

<sup>3</sup> In der Literatur sind auch andere Funktionen für den Temperaturgradienten zu finden (Reissmann, 1954; Gottwald, 1985; Witte, 1990).

etwa um Mitternacht im Jahresmittel 20 m. Bei Nacht erfolgt eine Wiederausstrahlung der während des Tages eingestrahlt und vom Boden gespeicherten Sonnenenergie in Form von langwelliger Wärmestrahlung bei gleichzeitiger Abkühlung des Bodens. Dabei wird auch die darüber liegende oder darüber streichende Luft abgekühlt (*Broks, 1948*). Ein Lichtstrahl in Bodennähe wird in diesem Fall nach unten abgelenkt (Abb. 2-4 (b)).

Auf Grund dieser Gesetzmäßigkeit kann man prinzipiell sagen, dass die Temperatur in starkem Maße vom Abstand zum Boden abhängig ist. Da der Messstrahl auf seinem Weg durch die Atmosphäre sehr unterschiedliche Bodenabstände hat, ändert sich damit häufig in seiner Umgebung die Temperatur.

### 2.1.1 Der Wärme- und Strahlungsumsatz an der Bodenoberfläche

Die Wärmeübertragung innerhalb der Atmosphäre kann auf verschiedene Weise erfolgen. Für den Wärmetransport in der Luft ist nach (*Geiger, 1961*) der Massenaustausch entscheidend. Ein Maß für die Größe des Transportes von Eigenschaften in der Luft, hier speziell der Lufttemperatur, ist der Austauschkoefizient. Der allgemein turbulent verlaufende Massenaustausch hat zwei Ursachen:

- Reibungsaustausch und
- Konvektionsaustausch.

Reibungsaustausch entsteht durch die Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Bedingt durch die Rauigkeit der Bodenoberfläche nimmt die Windgeschwindigkeit und somit der Koeffizient des Reibungsaustausches im allgemeinen mit der Höhe zu. Konvektionsaustausch entsteht, wenn Luftmassenteilchen am Boden erwärmt werden und das Bestreben haben aufzusteigen, während kältere Luftmassenteilchen an deren Stelle absinken. Die Konvektion ist also ausschließlich durch thermische Vorgänge bedingt.

Folgende meteorologische Vorgänge bestimmen den Wärmeumsatz an der Bodenoberfläche (*Geiger, 1961*):

(1) in der Atmosphäre:

- die Ein- und Ausstrahlung,
- die Wärmeübertragung durch die über der Oberfläche liegende Luft in Form von physikalischer Wärmeleitung und von Massenaustausch,
- die Verdunstung,
- das Heranführen von Luftmassen unterschiedlicher Temperatur an den betrachteten Ort durch Wind,
- die Wärmeübertragung durch Niederschlag.

(2) im Boden:

der Wärmefluss durch die physikalische Wärmeleitung, entweder von der Grenzschicht der Bodenoberfläche nach innen (Sommertag) oder hinaus (Winternacht).

Abb. 2-5 zeigt, welchen großen Anteil bei Tag die Globalstrahlung (I+D) an der Bodenerwärmung hat. Die Globalstrahlung (I+D) setzt sich aus der direkten Sonneneinstrahlung (kurzwellige) (I) und der ungerichteten diffusen Himmelstrahlung (D) zusammen. Die Energie dringt zum Teil in den Boden als Bodenwärmestrom (G) ein. Die restliche Wärme wird in verschiedenen Formen wieder an die über dem Boden liegenden Luftschichten abgegeben. Dabei wird die Wärme nur zu einem unwesentlichen Anteil durch physikalische Wärmeleitung in der Luft weitergetragen.

Als Einstrahlung bei Nacht wirkt nur die atmosphärische Strahlung (A), umgekehrt nur die Erdausstrahlung. Es kommt zu einer Abhängigkeit des Wärmehaushalts von der Bodenbeschaffenheit, was mit lokalen Winden usw. zu einer zusätzlichen Ortsabhängigkeit führt.

Die meteorologischen Parameter und insbesondere die Lufttemperatur sind folglich Orts- und Zeitfunktionen, die vorwiegend mit der Höhe variieren und weitgehend als Zufallsvariable aufgefasst werden können.

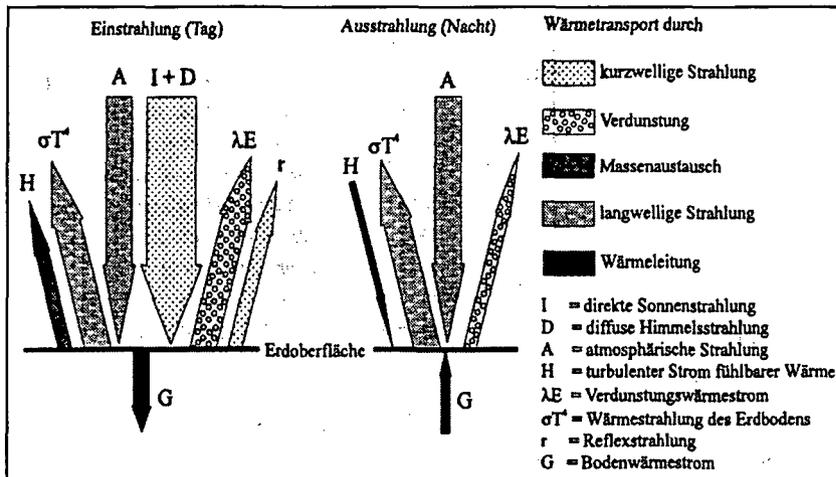


Abb. 2-5: Wärmehaushalt an der Bodenoberfläche bei Tag und Nacht (Casott, 1999)

### 2.1.2 Zur Strahlableitung in der turbulenten Atmosphäre

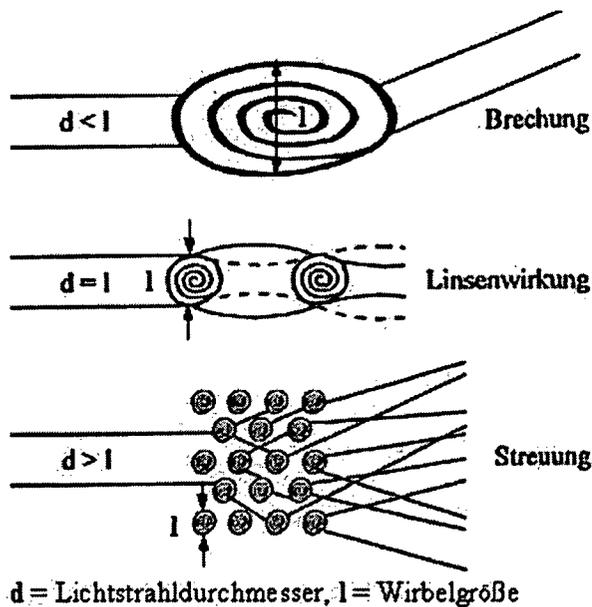
Die Atmosphäre kann als ein Gemisch von Turbulenzelementen (oder Wirbeln) dargestellt werden. Sie ist also eine variable Erscheinung. Es überlagern sich niederfrequente und hochfrequente atmosphärische Änderungen. Dabei wirken die Inhomogenitäten der Atmosphäre recht unterschiedlich, denn nicht nur ihre Größe, auch ihre Bewegungsrichtung beeinflussen die Strahlrichtung statistisch zufällig. Die Grundlagen für turbulente Modelle der Atmosphäre beruhen auf dem Modell, das von Monin und Obuchow aus Untersuchungen auf dem Gebiet der Turbulenztheorie unter Anwendung von Ähnlichkeitsbetrachtungen entwickelt wurde (Deussen, 2000).

Der turbulente Stand der Atmosphäre verursacht eine absolute Irregularität in der Bahn des Lichtstrahles, da die verschiedenen warmen und feuchten Luftschichten sich in stetiger Unruhe befinden. Die Erdoberfläche ist durch verschiedene warme und feuchte Luftschichten charakterisiert. Eine Messung dieser Parameter der Atmosphäre entlang der Bahn des Lichtstrahles ist schwierig (praktisch ausgeschlossen).

Die räumlichen und zeitlichen Schwankungen der den Lichtstrahl beschreibenden Parameter beruhen auf Streuungen der Wellen an den Inhomogenitäten des turbulenten Ausbreitungsmediums. Als Ursache der optischen Effekte im turbulenten Medium sind die räumlichen und zeitlichen Schwankungen des Brechungsindex anzusehen, die durch die Fluktuation der Temperatur, des Druckes und der Feuchte hervorgerufen werden. Die Turbulenzelemente bewegen sich zufällig im Raum. Grosse Turbulenzelemente zerfallen in immer kleinere, so lange in ihnen die *Reynold'sche* Zahl einen kritischen Wert überschreitet. Wird der kritische Wert schließlich nicht mehr überschritten, so herrschen wesentlich laminare Strömungsverhältnisse vor (Kahmen, 1973).

Die optische Turbulenz lässt sich im Videotheodolitenfernrohr und in anderen geodätischen Instrumenten als Flimmern wahrnehmen. Sie wirken sich auf optische Messungen aus und verursachen eine zufällige Abweichung des aktuellen Messwertes von einem Mittelwert. Bei

geodätischen Messungen erzeugt die Turbulenz neben dem Bildflimmern auch eine Positionsänderung des Ziels aufgrund des beeinflussten Refraktionswinkels. Die Wirbel beeinflussen die Ausbreitung eines Lichtstrahls in Abhängigkeit vom Verhältnis des Strahldurchmessers zu dem des Wirbels gemäß Abb. 2-6.



Ausbreitung eines Lichtstrahls (Cassot, 1999)

Es werden drei Fälle berücksichtigt:

**Fall A:** Ist der Strahldurchmesser kleiner als die Mehrzahl der vorhandenen Turbulenzelemente, so kommt es zu regellosen Strahl- ablenkungen. Da der Strahl als ganzer abgelenkt wird, treten bei diesem Effekt in erster Näherung keine Amplituden und Phasenstreuungen auf (Höhn, 1969).

Im **Fall B:** wird der Strahl wie bei einer Linse gebündelt, erweitert, abgelenkt und verformt.

Im **Fall C:** beeinflusst jedes Element, das kleiner ist als der Strahldurchmesser, die Richtung des Strahles, es spaltet diesen sogar in Teilstrahlen auf und bewirkt so auch eine Aufweitung.

Abb. 2-6: Einfluss der Wirbelgröße auf die

### 2.1.3 Das Turbulente Transfer Modell (TTM)<sup>4</sup>- Stand der Technik

Angus-Leppan und Brunner (1976); Brunner und Fraser, (1977) haben dieses Modell auf geodätische Messungen übertragen. Es ist in der Geodäsie als Turbulent Transfer Modell (TTM) bekannt (Brunner, 1979).

Obwohl die Idee der Ausnutzung der Turbulenz zur Ermittlung der Refraktionswinkel aus Varianzen des Zenitwinkels (Brunner, 1979) Eingang in der 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 automatischer Datenerfassung mit ausreichend hoher Datenrate zurückzuführen. Einige Arbeiten sollen herausgegriffen werden.

Lepuschitz (1980) untersucht das Turbulenzmodell nach Monin und Obuchow und dessen Anwendbarkeit in der Geodäsie. Zur praktischen Überprüfung des Modells wurden meteorologische Messungen auf der Donauparkwiese in Wien durchgeführt. Die daraus ermittelten meteorologischen Profile wurden mit den am Donauturm direkt in der Atmosphäre bis eine Höhe von 225 m gemessenen Werten verglichen. Es geht daraus hervor, dass bei labilen Verhältnissen (= starke Sonneneinstrahlung, große Turbulenz) befriedigende Ergebnisse durch das Turbulenzmodell erzielt werden können. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass das Modell unter stabilen Verhältnissen (geringe Turbulenz) zumeist nicht repräsentativ ist. Weiteres wurde von ihm die Anwendung dieses Modells in der Geodäsie zur meteorologischen Reduktion von elektronisch gemessenen Distanzen und Zenitdistanzen untersucht. Bei Testmessungen, durchgeführt in einem Gelände, das nicht ideal für die Anwendung des Turbulenzmodells geeignet ist, konnte dennoch durch die Anbringung der meteorologischen Reduktion die innere Genauigkeit der Zenitdistanzdauermessung um rund 40% gesteigert werden (Lepuschitz, 1980).

<sup>4</sup> In der letzten Zeit als OTTM (Optical Turbulent Transfer Model) bekannt (Hennes, 2002).

Casott (1999) entwickelte ein Mess- und Auswertekonzept, das die Bestimmung der hochfrequenten Richtungsschwankungen erlaubt. Er führte die Messungen mit einer schwarzweiß CCD-Kamera mit einer Frequenz von 200 Hz (Messzeit 5 Sekunden) in Echtzeit unter der Methode der hochfrequenten Turbulenzmessung zur Ableitung von Refraktionsinflüssen durch. Es wurden mehrere Parallelmessungen mit dem Kamerasystem und dem Szintillometer auf einer 55 m langen Strecke durchgeführt. Dabei konnten ausgeprägte Tagesgänge der Turbulenzen und somit der Refraktion gemessen werden, wobei das Szintillometer hierbei die gesuchten Turbulenzparameter liefert. Die Feldversuche beinhalten auch die Parallelmessung des Kamerasystems mit einem zielverfolgenden Präzisionstachymeter und einem Digitalnivellier. Die Messungen mit dem Szintillometer zeigten insbesondere im Tagesverlauf eine hohe Korrelation, die im Fall des Strukturparameters teilweise sogar über 0.9 lag. Mit dem Tachymeter konnte durch die automatische Messung der Vertikalwinkel zu einem festen 256 m entfernten Ziel gemessen werden. Parallel dazu werden mit dem Kamerasystem die Turbulenzparameter abgeleitet und der Temperaturgradient mit Hilfe der Turbulenztheorie berechnet. Er stellte eine hohe Übereinstimmung zwischen den neuen Kamerabeobachtungsgrößen und den szintillometrisch bestimmten Größen her. Es konnten sogar der geodätisch gemessene Vertikalwinkel um den Refraktionseinfluss reduziert werden. Mit dem Digitalnivellier wurden relative Höhenänderungen zu zwei Invarbandlatten gemessen. Die Messungen mit dem Nivellier führten zu keinem Ergebnis, da sich die im Tagesverlauf gemessenen Höhenunterschiede, in denen sich der Refraktionswinkel als Tagesgang wiederfinden soll, fast konform mit der Änderung der Umgebungstemperatur verhielten. Da lediglich weniger Messreihen ausgeführt wurden, konnte Casott in seiner Arbeit keine universell gültige Parameter bestimmen.

Duessen (2000) entwickelte eine Methode, die die Vertikalrefraktion ohne großen zusätzlichen instrumentellen Aufwand aus dem turbulenten Bildpunkttauschen von neuen kreisförmigen Zielmarken ableiten lässt. Dieses basiert auf Nutzung der atmosphärischen Turbulenz und der damit verbundenden Streuung im geodätischen Beobachtungsmaterial. Dabei soll dieses Verfahren die Bestimmung des Brechungsindex- bzw. Temperaturgradienten aus Bildfrequenzen mit niedrigen Frequenzen im Bereich 10 Hz ermöglichen. Die erhaltenen Ergebnisse mittels CCD-Kamera verglich er mit den mit Hilfe der meteorologischen Referenzinstrumente (Ananometer und Szintillometer SLS 20) erhaltenen Größen. Die Beobachtungsdistanz betrug 55 m. Duessen gibt aus Analysen vieler Feldversuche die Genauigkeit für sein Verfahren mit 28%-38% an, wobei die höchsten Genauigkeiten bei mittlerer Windstärke erreicht wurden.

Troller (2001) führte die geodätischen Richtungsmessungen zur Bestimmung der Fluktuationen mit einem modernen Tachymeter TCA 2003 mit dem ATR Verfahren an drei verschiedenen Tagen durch. Bei der Auswertung der Richtungsmessungen (Horizontalrichtung bzw. Vertikalwinkel) zeigte sich eine Variation der Messwerte von bis 6 mgon, obwohl die Messgenauigkeit des benutzten Tachymeters unter 0.3 mgon liegt. Diese Variation kann daher als Fluktuation gewertet werden. Die Standardabweichungen für drei verschiedene Messtage betragen bis zu 6 mgon und die turbulenz erzeugten Standardabweichungen sind deutlich erkennbar.

## 2.2 Die Lichtstrahlkrümmung

Beim Durchgang elektromagnetischer Wellen durch ein Medium variabler Dichte treten folgende miteinander verknüpfte Erscheinungen auf:

- Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit,
- Änderung der Ausbreitungsrichtung (Refraktion),
- Strahlzerlegung (Dispersion).

Die beschriebenen Erscheinungen beeinflussen geodätische Messungen stark. Hier soll nur der zweite Effekt betrachtet werden.

Die elektromagnetischen Wellen breiten sich im Vakuum entlang gerader Verbindungslinien zwischen Sender und Empfänger aus. Im Medium Luft jedoch ist die Wellenausbreitung beeinflusst, weil es keinen für alle Teile der Atmosphäre (Luft) einheitlichen Brechungsindex gibt. Durch den Brechungsindex verursachte Laufzeitänderungen sind kritisch bei der elektrooptischen Streckenmessung und die Zielstrahlablenkungen bei der Richtungsmessung. Die physikalische Grundlage für diese beiden Effekte ist das *Fermat'sche* Prinzip. Dieser Satz sagt aus, dass ein elektromagnetisches Signal (das Licht) zwischen zwei Punkten stets den zeitlich kürzesten Weg nimmt und die Laufzeit  $t$  minimal wird:

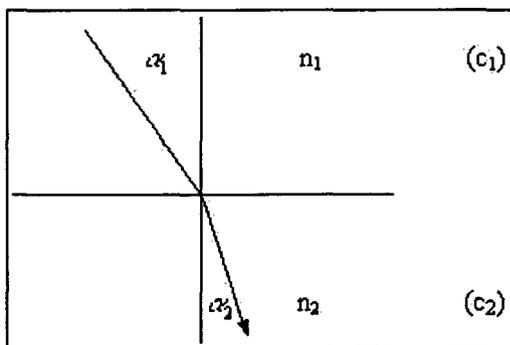
$$\text{Fermat'sches Prinzip } S = \int_A^B n(x, y, z, t) ds = \min. \quad (2.2)$$

Darin bedeutet  $S$  die Weglänge,  $n$  den vom Ort und Zeit  $t$  abhängigen Brechungsindex. Der Brechungsindex ist definiert als

$$n = \frac{c_0}{c}. \quad (2.3)$$

Der Parameter  $n$  gibt das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum ( $c_0 = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ ) zu jener im Medium  $c$  an.

Beim Übergang eines Lichtstrahls von einem dünneren in ein dichteres Medium (also mit anderem Brechungsindex) ändert ein Lichtstrahl mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit seine Richtung (Abb. 2-7). Diese als Brechung oder Refraktion bezeichnete Erscheinung wird für optisch isotrope Stoffe durch das Brechungsgesetz von Snellius beschrieben, das eine direkte



Konsequenz des *Fermat'schen* Prinzips ist (*Bretterbauer, 1969*). Für den leeren Raum ist  $n = 1$ , für alle Medien  $n > 1$ .

Dieser Parameter  $n$  ist die entscheidende Kenngröße für die Beschreibung der Refraktion und deren Einflüsse und hängt von der Wellenlänge, der Temperatur, dem Druck und dem Zustand der Luft ab. Eine Abhängigkeit von der Wellenlänge (*Dispersion*) besteht in der Troposphäre nur im optischen Wellenbereich (*Bolsakov, u.a. 1985*).

Abb. 2-7: Wellenbrechung an einer Grenzfläche

Mit Hilfe der Ein- und Ausfallswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  lässt sich das Brechungsgesetz für die Ebene von *Snellius* darstellen:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

oder

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 = \dots = \text{const.} \quad (2.5)$$

Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen dabei in einer Ebene. In der Erdatmosphäre können die Trennflächen von differentiellen Schichten verschiedenen Brechungsindizes in erster Näherung als konzentrische Kugelflächen aufgefasst werden, die die Erde umschließen. Es gilt dann nach *Snellius* (Abb. 2-8):

$$\frac{\sin \xi_i}{\sin \xi'_j} = \frac{n_i}{n_j} \quad \text{und} \quad \frac{\sin \xi_i}{\sin \xi'_j} = \frac{r_j}{r_i}. \quad (2.6)$$

Löst man beide Gleichungen nach  $\sin \xi'_j$  und setzt sie gleich, folgt

$$\sin \xi_j \cdot \frac{n_j}{n_i} = \sin \xi_i \cdot \frac{r_i}{r_j}, \text{ oder}$$

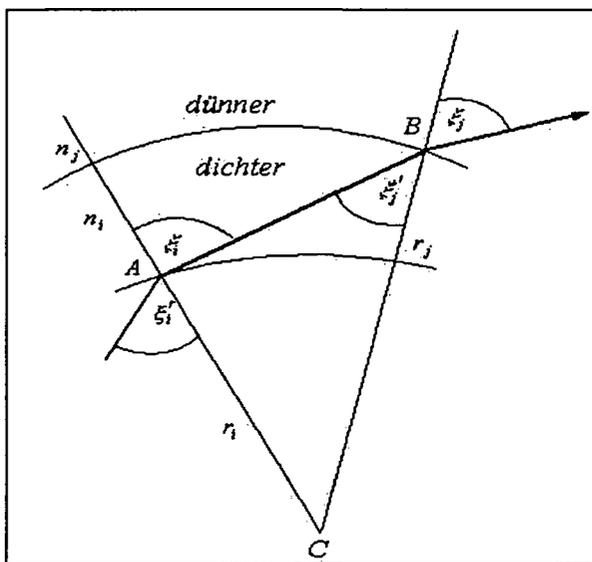
$$n_i \cdot r_i \cdot \sin \xi_i = n_j \cdot r_j \cdot \sin \xi_j, \text{ d. h. } n \cdot r \cdot \sin \xi = \text{const.} \quad (2.7)$$

Es bedeuten:

$n$  = Brechungsindex der Luftschicht,

$r$  = Entfernung der Grenzfläche vom Erdmittelpunkt,

$\xi$  = Zenitwinkel der Lichtkurve im Durchstoßpunkt durch die Grenzfläche.



Dieses sphärische Brechungsgesetz bzw. diese Strahlgleichung besagt, dass in einem kugelsymmetrischen Dichtefeld für jeden Punkt der Lichtkurve das Produkt  $n \cdot r \cdot \sin \xi$  den gleichen Wert hat. Davon ausgehend kann nun die Zielstrahlkrümmung betrachtet werden. Die Krümmung der Lichtkurve hängt vom Brechungsvermögen der einzelnen Luftschichten ab.

Abb. 2-8: Lichtstrahlverlauf zwischen zwei Luftschichten unterschiedlichen Brechungsindizes  $n$

Die Krümmung des Lichtweges ist

$$\frac{1}{r_L} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \sin \xi^5 \quad (2.8)$$

Da der Brechungsindex der Luft  $n \cong 1$  und bei flachen Visuren  $\sin \xi = 1$  sind, vereinfacht sich Gl. (2.8) in guter Näherung zu

$$\frac{1}{r_L} = -\frac{dn}{dh}. \quad (2.9)$$

Daher können aus der Formel (2.8) folgende wichtige Erkenntnisse gewonnen werden:

Die vertikale Krümmung des Zielstrahls wird einerseits physikalisch durch die Änderung des Brechungsindex der Luft mit der Höhe  $dn/dh$  und andererseits geometrisch durch die Neigung  $\xi$  der Visur zu den Flächen mit gleichem Brechungsindex bestimmt. Ist also die vertikale Änderung des Brechungsindex  $n$  bekannt, lässt sich die Krümmung des Zielstrahls bestimmen.

<sup>5)</sup> Auf eine ausführliche Herleitung der Formeln wird hier verzichtet. Es sei auf die Literatur verwiesen, z.B. (Past, 1965; Tegeler, 1971). In Anbetracht der relativ hohen Unsicherheit der Erfassung der meteorologischen Verhältnisse längs der Visur und der Tatsache, dass die horizontale Komponente der Refraktion ungleich kleiner als die Vertikale, kann man von strengen Lösungen, z.B. nach (Moritz, 1961) unbedenklich abgehen und den Refraktionseinfluss unter Beschränkung auf die ebene Rechnung behandeln.

### 3 Modellbildung zur Erfassung und Beseitigung der Refraktionseinflüsse

Seit weit mehr als hundert Jahren wird versucht, die Refraktionseinflüsse auf geodätische Messungen zu eliminieren. Dabei kamen je nach Entwicklungsstand der geodätischen Mess- und Auswertetechnik unterschiedliche Verfahren zum Zuge, die sich grob in bestimmte Gruppen (nach *Wunderlich, 1986*) gliedern lassen:

- physikalische Methoden,
- mathematische Methoden und
- geometrische Methoden.

Die **physikalischen** Methoden arbeiten mit zwei recht unterschiedlichen Ansätzen und werden in zwei Gruppen unterteilt. Zur **ersten** gehören die Ansätze, welche aus den bekannten meteorologischen Parametern Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Bewölkungsgrad und Windstärke bei Zugrundelegung eines Modells den tatsächlichen Lichtstrahlverlauf zu berechnen vermögen. Es werden während der Zenitwinkelmessung sorgfältig Parameter des atmosphärischen Zustands erhoben sowie mit Modellvorstellungen über den Aufbau der brechenden Luftschichten Refraktionswinkel hochgerechnet. Typische abgeleitete Parameter sind Temperaturgradienten, der turbulente Wärmestrom und die Reibungsgeschwindigkeit. Je nach atmosphärischen Verhältnissen werden stabile (z.B. *Kukkamäki, 1950*) oder turbulente Modelle (z.B. *Brunner, 1984*) verwendet. Die praktische Erprobung des Turbulenzmodells für die Geodäsie erfolgte u.a. durch (*Lepuschitz, 1981; Casott, 1999; Dueßen, 2000; Flach, 2000; Weiss, 2002*).

Die **zweite Gruppe** der physikalischen Methoden versucht instrumentell die atmosphärische Refraktion aus dem optischen Dispersionseffekt des Lichtes zu bestimmen (*Gleißman, 1976; Fasching, 1990; Brein, 1968*). Die theoretischen Grundlagen finden sich bei Nähbauer (1929). Einen Überblick über die Verfahren geben Williams und Kahmen (1984). Unter Bezeichnung RPLS (Rapid Precision Levelling System) ist ein Gerät für refraktionsfreie Richtungsmessungen zur Höhenübertragung mit Zielweiten bis zu 250 m von der Firma Leica entwickelt worden (*Ingensand, 1990*).

Mit **mathematischen** Methoden sind diejenigen Verfahren gemeint, die ohne Einbeziehung der physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre und ohne Beachtung der Geometrie des Zielstrahls einen Refraktionskoeffizienten als Stations- oder Netzunbekannte in einer Netzausgleichung mitbestimmen. Hier besteht jedoch die Gefahr, dass andere die Messung beeinflussende systematische Fehlereinflüsse, die in dem deterministischen Model nicht berücksichtigt wurden, der Refraktion zugeschlagen werden, sodass dies zu systematischen Verfälschungen der Ergebnisse führen kann (*Gottwald, 1985*).

Die **geometrischen** Methoden versuchen seit Beginn des 19. Jahrhunderts (vgl. S. 2) durch spezielle Wahl der Messanordnung den Betrag von Refraktionswinkeln aus geometrischen Bedingungen (Geometrie der Messung) zwischen den Messgrößen abzuleiten. Zu dieser Methode zählten auch all jene Vorgangsweisen, welche eine einfache geometrische Vorschrift über die Zielstrahlkrümmung treffen. Zur letzteren gehört z.B. die Methode der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessungen, die einen kreisbogenförmigen Strahlverlauf annimmt, bei der sich der Einfluss der Refraktion auf die Höhenübertragung eliminieren lässt (*Kahmen, 1997*).

Der erste Versuch, die geometrische Konfiguration von Messungen zur Ermittlung von Refraktionswinkeln zu nutzen, stammt vom argentinischen Geodäten Sanchez (1962 und 1967). Dabei wurden vertikale Dreiecke oder Vierecke vollständig ausgemessen, was natürlich nur in gebirgigem Gelände sinnvoll ist. Des weiteren muss auch hier eine simultane Beobachtung aus

den bereits bekannten Gründen durchgeführt werden, wodurch das Verfahren instrumentell und personell sehr aufwendig wird (*Wunderlich, 1983; Gottwald, 1985*).

Für das Verfahren der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessungen sind völlig neue Voraussetzungen gegeben, da die Richtungsmessungen mit Theodoliten inzwischen vollständig automatisiert wurden. Dieses automatisierte Verfahren wird daher nachfolgend vertieft untersucht.

### 3.1 Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelbeobachtung

#### 3.1.1 Stand der Technik

Das Verfahren der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessung gehört zu den geometrischen Methoden zur Eliminierung bzw. Reduzierung der Refraktionseinflüsse und gründet sich auf die gleichzeitige Anwendung zweier Instrumente, die auf zwei gegenseitig sichtbaren Standpunkten stehen. Dabei setzt man voraus, dass die Strahlbrechung auf beiden Standpunkten gleich sei, das heißt, man nimmt an, dass der Bogen des Lichtstrahls an beiden Standpunkten mit der Sehne gleiche Winkel einschließt, was streng genommen nur dann auftreten kann, wenn die Gradienten des Brechungsindex  $n$  an beiden Endpunkten gleich sind.

Drodofsky (1960) führte beim Stromübergangsnivellement an beiden Flussufern gleichzeitige Messungen durch. Als Standardabweichung des Ergebnisses von 6 bis 8 Sätzen bei mittleren atmosphärischen Verhältnissen errechnete er 1 mm/1 km.

Kakkuri (1966) führte die Stromübergänge auf 413, 931 und 2080 m langen Strecken mit Doppelinstrumenten aus. Der zu messende Höhenunterschied wurde mit zwei Doppelinstrumenten A und B unter Anwendung des Verfahrens gleichzeitig-gegenseitiger Beobachtungen bestimmt. Aufgrund viertägiger Beobachtung erhielt er als Standardabweichungen des Mittelwertes über 413 m  $\pm 0.15$  mm, über 913 m  $\pm 1.12$  mm und über 2080 m  $\pm 1.75$  mm.

Tegeler (1971) untersuchte die Genauigkeit der trigonometrischen Höhenmessung im Flachland und im Mittelgebirge (in den unteren Hektometern) der Atmosphäre bei unterschiedlichen Wetterbedingungen (klar-wechselnd-bedeckt) und verschiedener Höhe der Zielstrahles. Er führte umfangreiche gleichzeitig-gegenseitige Zenitdistanzmessungen in verschiedenen Testnetzen (Northen, Seelze, Sarstedt, etc.) durch. Die Visuren waren zwischen 1 und 25 km. Da die Entfernung zwischen den Punkten verschieden war, variierten die Standardabweichungen der Höhenunterschiede abhängig von den Wetterbedingungen und Entfernungen. Z.B. erhielt er bei der Entfernung von 2.5 km bei klarem Wetter Standardabweichungen von 2 cm (S. 53) und bei der Entfernung von 20.9 km von 14 cm (S. 82). Er konnte nachweisen, dass die Genauigkeit der trigonometrischen Höhenmessung in der labilen Unterschicht nicht nur von der Entfernung, sondern in besonderem Maße auch von der Höhe des Zielstrahles über dem Gelände abhängig ist.

Wunderlich (1983) führte für die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln die Messungen von gleichzeitig-gegenseitigen Zenitdistanzen durch. In einem eigenen Testnetz in der Nähe Wiens (vertikales Viereck „Hohe Wand“) erfolgten für die „Methode des vertikalen Viereckes“ mehrere 24-stündige simultane Zenitdistanzbeobachtungen zur Refraktionsbestimmung. Voraussetzung dafür waren spezielle Zieltafeln für die gleichzeitig-gegenseitige Messung. Ein großes Problem stellte die Erfüllung der Gleichzeitigkeit aller 12 Zenitdistanzbeobachtungen dar. Durch die vollständige Ausmessung eines solchen vertikalen Diagonalvierecks (elektronische Distanzen, Zenitdistanzen) und einige zusätzliche Messungen (Lotabweichungsbestimmungen, Präzisionsnivellement) ist es möglich, aus rein geometrischen Bedingungen die Refraktionswinkel in der Messanordnung voraussetzungsfrei zu bestimmen. Das Verfahren ist nur für große Höhenunterschiede (mehrere 100 m) anwendbar und unterliegt

enorm hohen Anforderungen an die Distanzmessgenauigkeit ( $md/d \leq 1 \cdot 10^{-6}$ ). Mit beträchtlichem instrumentellen und personellen Aufwand konnten die geforderten hohen Messgenauigkeiten erreicht werden. Im Schnitt lag die Genauigkeit der berechneten Refraktionswinkel bei  $\pm 3''$ . Die Höhenunterschiede wurden mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 5 \text{ mm}/1000 \text{ m } \Delta h$  ermittelt.

Gottwald (1985) hat unter Verwendung eines elektronischen Tachymeters sowie einer neu entwickelten Zieleinrichtung ein Messsystem zum trigonometrischen Nivellement hoher Genauigkeit konzipiert und erprobt. Bei praktischen Messungen in einem Testnetz konnte er a priori berechnete Genauigkeitsangaben zur Höhenübertragung bestätigen. Bei einer Zielweite von  $s = 200 \text{ m}$  und einer quasi-simultanen Zenitwinkelmessung ergab sich eine Standardabweichung für eine 1 km lange Nivellementsstrecke von 1.6 mm.

Kuntz und Schmidt (1985) haben Präzisionshöhenmessungen durch Beobachtung gleichzeitig-gegenseitiger Zenitdistanzen im Rahmen eines größeren Bauprojektes durchgeführt. Die Aufgabe war, die Bewegung von Steilhängen nach Lage und Höhe mit sehr hoher Genauigkeit zu überwachen. Gefordert und angestrebt wurde daher in Lage und Höhe eine Genauigkeit von ca.  $\pm 1 \text{ mm}$ , wodurch für die Höhenmessung nur das genaueste trigonometrische Verfahren gleichzeitig-gegenseitiger Zenitdistanzen in Frage kam. In einem Deformationsnetz mit Seitenlängen zwischen 10 m und 300 m wurde achtmal gemessen. Die Streuungen zwischen den einzelnen Epochen liegen zwischen 0.1 und 0.4 mm (S. 432). Der Schleifenschlussfehler beträgt hierbei 2.3 mm und erreicht die Größenordnung der Schleifenschlussfehler des geometrischen Nivellements.

Die erwähnten Autoren haben gleichzeitig-gegenseitige Zenitdistanzbeobachtungen durchgeführt, die nicht streng synchron waren. Wunderlich (1983) berichtete über das Problem der Erfüllung der Gleichzeitigkeit aller 12 Zenitdistanzbeobachtungen. Solche Probleme hatten auch die anderen Autoren, weil als Messinstrument die herkömmlichen Instrumente (konventionelle Theodolitsysteme) eingesetzt worden sind, mit denen nicht streng synchron gemessen werden konnte, d.h. es wurde gleichzeitig-gegenseitig bzw. quasi-simultan (Gottwald, 1985) beobachtet. Die Gleichzeitigkeit der Beobachtungen wurde nie exakt erfüllt, weil an den Standpunkten zwei Beobachter gestanden sind, die die Gleichzeitigkeit der Beobachtungen auf verschiedene Weise (z.B. durch Handzeichen, durch Funkkontakt etc.) zu erreichen suchten.

Bei Beobachtung mit automatischer Zielerfassung ist die Gleichzeitigkeit der Beobachtungen möglich. In Kap. 3.1.2 wird beschrieben wie sich mit zwei Videotheodoliten streng gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelbeobachtungen durchführen lassen.

### **3.1.2 Einsatz eines automatischen Zielsystems für streng synchrone gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung**

Bei den erwähnten früheren Experimenten (vgl. Kap. 3.1.1) konnten noch keine schnellen Sensoren eingesetzt werden, welche es erlauben, vollautomatisch und mit höher Frequenz zu messen, wie es im Rahmen dieser Arbeit geschehen ist. Erst der Einsatz von solchen schnellen Instrumenten (Videotheodoliten mit einer Abtastrate bis zu 25 Hz) erlaubt es, auch die turbulenten Einflüsse auf die zu messenden Zenitwinkel zu erfassen.

Der turbulente Anteil der Refraktion bzw. stochastische Anteil (vgl. Casott, 1999) resultiert aus den atmosphärischen Turbulenzen, der sich als hochfrequente, stochastische Richtungsfluktuation im Fernrohr geodätischer Instrumente zeigt. Bei der automatischen Beobachtungsmethode werden mit beiden Videotheodoliten (CCD-Kameras) Bilder der Zielmarken zeitsynchron aufgezeichnet, sodass aufgrund des Vergleichs zeitlich aufeinanderfolgender Bilder Aussagen über die Refraktionseffekte gemacht werden können. Die Entwicklung dieser Methode ist Gegenstand der Arbeit.

Der Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln wird nach Kahmen (1997) berechnet, indem die Lichtkurve als symmetrisch (so ist  $\delta_1 = \delta_2$ ) betrachtet wird (Abb. 3-1 und 3-2):

$$\Delta H = (\Delta H_{12} - \Delta H_{21}) / 2 = \frac{S^R}{2} (\cos \xi_1 - \cos \xi_2) + i_1 - i_2 + t_2 - t_1^6 \quad (3.1)$$

mit  $R =$  Erdradius,  $S^R =$  Schrägestrecke,  $i =$  Instrumentenhöhe, und  $t =$  Zielhöhe.

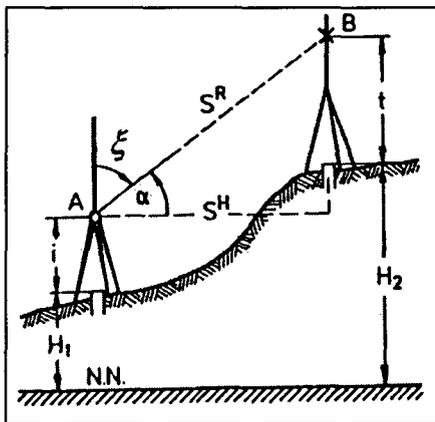


Abb. 2-1: Höhenunterschied aus Distanz und Zenitwinkel (aus Kahmen, 1997)

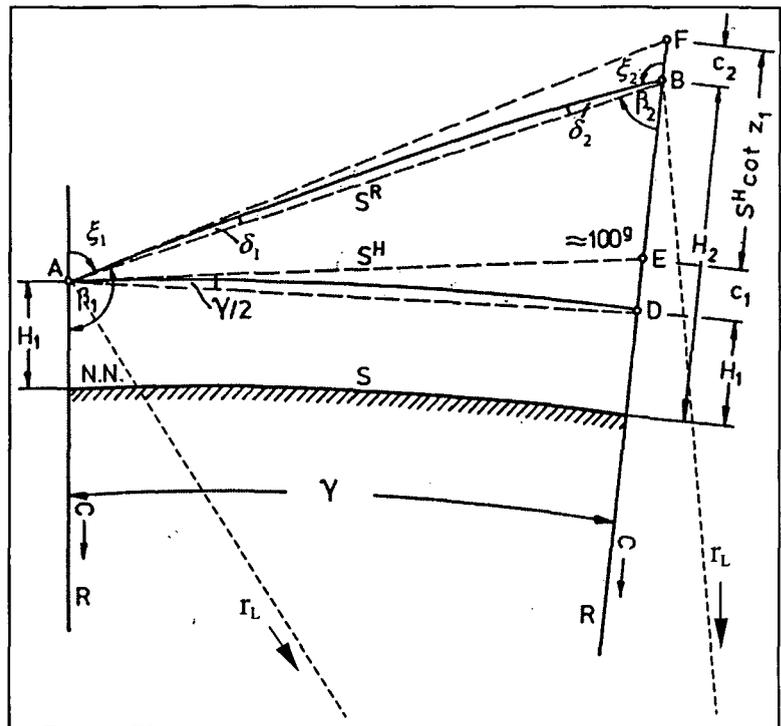


Abb. 2-2: Refraktionsbestimmung durch gegenseitige Zenitwinkelmessung (aus Kahmen, 1997)

Die Reduktion der Refraktionserscheinungen setzt streng simultan gemessene Zenitwinkel auf beiden Streckenendpunkten voraus. Bei der Berechnung kann dann der Refraktionseinfluss eliminiert werden, wenn eine symmetrisch gekrümmte Lichtkurve angenommen wird. Die Beobachtungsgleichung (3.1) basiert auf Modellen, die homogene atmosphärische Verhältnisse auf der Messstrecke voraussetzen. Dazu muss die Bedingung erfüllt sein, dass ein gleichmäßig ausgebildetes Geländeprofil und identische atmosphärische Bedingungen im Bereich der Messstrecke vorliegen. Um dieser Bedingung zu genügen, ist bei den Messungen darauf zu achten, dass der Untergrund zwischen Stand- und Zielpunkt weitestgehend homogen ist.

Der Refraktionskoeffizient aus Gegenvisuren lässt sich nach (Kahmen, 1997) berechnen:

$$k = 1 - \frac{\xi_1 + \xi_2 - 200 \text{ gon}}{200 / \pi} \cdot \frac{R}{S^H} \quad (3.2)$$

Streng genommen gilt Gl. (3.2) nur wenn beide Zenitwinkel simultan gemessen werden. Dann erhält man einen Refraktionskoeffizienten, der den mittleren atmosphärischen Verhältnissen längs der Messstrecke während der Dauer der Winkelmessung entspricht. Gleichzeitig-

<sup>6</sup> Auf eine ausführliche Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Literatur verwiesen (Kahmen, 1997; Jordan/Eggert/Kneissl, 1956; Past, 1965).

gegenseitige Zenitwinkel ergeben also den mittleren Refraktionskoeffizienten zwischen beiden Beobachtungspunkten.

Als Ergebnis der Auswertungen bekommt man den Refraktionskoeffizienten und den Höhenunterschied zwischen den Standpunkten. Der zeitliche Verlauf des Höhenunterschieds zwischen beiden Beobachtungspunkten, über die Zeit aufgetragen, sollte eine Gerade sein und unabhängig davon, zu welcher Zeit und wie lange man misst. Wenn das der Fall ist, kann man sagen, dass der Refraktionseinfluss eliminiert wurde.

In dieser Arbeit sollen folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Wann ist das Refraktionsfeld symmetrisch und eliminiert sich der Refraktionseinfluss jederzeit durch gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelbeobachtung?
- Wann und wie lange müsste beobachtet werden, damit die Refraktionseinflüsse herausfallen?
- Welche Messfrequenz ist optimal?
- Gelingt es, günstige Zeiten für eine Bestimmung des Höhenunterschieds festzulegen?
- Gibt es Zeiten ohne Störeinfluss?
- Zu welchen Zeiten darf nicht gemessen werden?
- Was für eine Restsystematik ist enthalten?

## 4 Entwicklung des Messsystems

### 4.1 Kurze Beschreibung der vorhandenen Hardware

In diesem Kapitel wird das Instrumentarium vorgestellt. Das Messsystem besteht aus zwei Leica Videotheodoliten TM3000V (Abb. 4-1) und TM3000VD (Abb. 4-2), die mit je einer CCD-Kamera ausgerüstet sind, zwei Steuercomputern (Personal Computer (PC) & Eltec (EL)<sup>7</sup>), zwei Bildverarbeitungskarten (Framegrabber), einem Videomonitor (für den EL) und zwei Computerbildschirmen. Computerbildschirm und Videomonitor beim EL bestehen aus zwei getrennten Einheiten, was beim Experimentieren den Vorteil größter Übersichtlichkeit bietet (s. Abb. 4-4 und 4-5). Später sollen diese Komponenten durch je einen miniaturisierten Rechner für den Feldgebrauch ersetzt werden.

Die Beschreibung der verwendeten Messinstrumente und deren Zusammenwirken soll sich auf das zum Verständnis der Arbeit notwendige Maß beschränken. Weitere Angaben hierzu befinden sich u.a. im Handbuch der Videotheodolite (Wild, 1989) und in den Publikationen von (Loser, 1988), (Huep, 1988; Fabiankowitsch, 1990; Kahmen, 1992; Kabashi, 2000).

#### 4.1.1 Aufbau der Videotheodolite

Den Kern des Systems bilden die zwei Leica TM3000 Videotheodolite, die eine Weiterentwicklung des Präzisionstheodolits T3000 sind und die beide kurz beschrieben werden, da sie sich in wesentlichen Bauteilen unterscheiden. Besondere Elemente des Videotheodolits sind, neben den Motoren für die Achsen und Fokussierlinse, die CCD-Kamera sowie der in den Theodolit integrierte Commandprozessor. Gemeinsam ist beiden Videotheodoliten die Servomotoransteuerung für die Horizontalrichtungs- und Zenitwinkeleinstellung sowie die serielle Schnittstelle für die wechselseitige Datenübertragung vom und zum Computer. Die beiden Achsen der Theodolite sind über Servomotoren angetrieben, wobei durch eine entsprechend gewählte Untersetzung der Getriebe Positioniergenauigkeiten von etwa 0.1 mgon erreichbar sind.

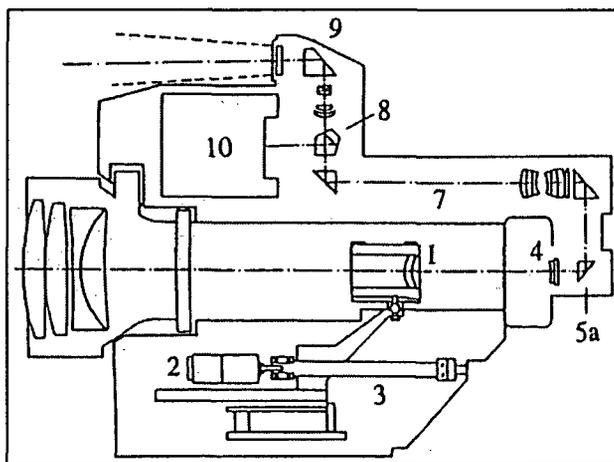
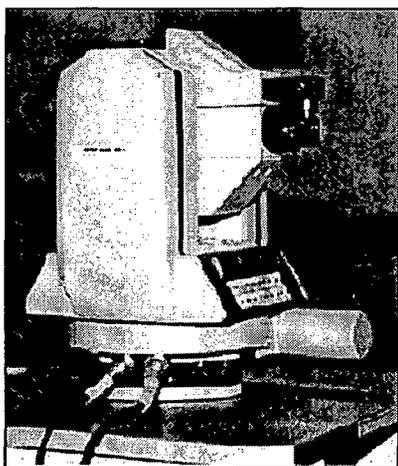


Abb. 4-1: Videotheodolit und Fernrohrkörper des Videotheodoliten Leica TM3000V (nach Katowski, 1989)

Abb. 4-1 zeigt den Aufbau des Fernrohrkörpers des Videotheodolits TM3000V. Er unterscheidet sich in zahlreichen Bauteilen von dem konventioneller Theodolite. Die Teile 1-3 dienen der Fokussierung; im einzelnen handelt es sich um die bewegliche Fokussierlinse (1), den Schrittmotor (2) für deren Verstellung und den Präzisionsglasmaßstab (3) zur Ablesung der

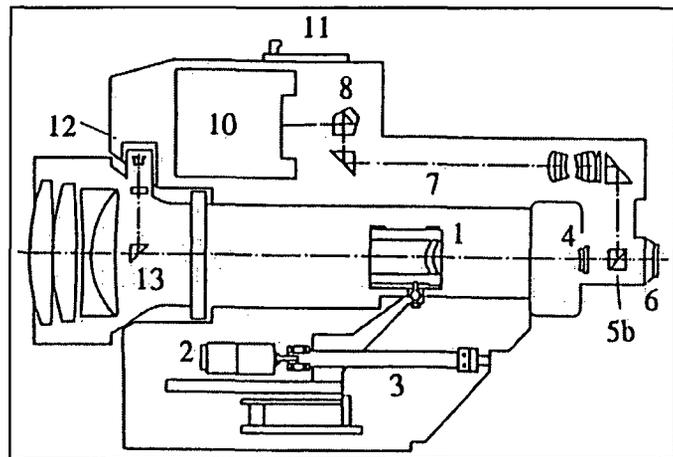
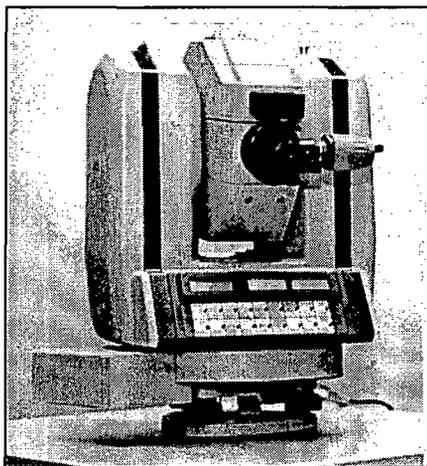
<sup>7</sup> Im weiteren Text nur PC und EL genannt.

Fokussierlinsenposition. Der TM3000V ist außerdem mit einer Weitwinkeloptik ausgerüstet, um ein Übersichtsbild des Objektraumes zu erhalten.

Der beleuchtbare Referenzrahmen (4) befindet sich exakt dort, wo bei anderen Theodoliten das Fadenkreuz liegt, d.h. in der Bildebene des Objektivs. Er ist fix mit dem Fernrohrgehäuse verbunden und stellt den wichtigsten Bauteil für die Orientierung des CCD-Sensorfeldes dar. Das Umlenkprisma (5a) hinter dem Referenzrahmen leitet alles einfallende Licht zur Nachvergrößerungseinheit (7) weiter, so dass kein Okular mit Einblickmöglichkeit vorhanden sein kann. Das Pentaprisma (8) lässt sich derart bewegen, dass der Strahlengang entweder von der Nachvergrößerungseinheit oder von der Weitwinkeloptik (9) zur CCD-Kamera (10) geleitet wird.

Die Weitwinkeloptik dient einzig der Gewinnung eines Überblickbildes, d.h. sie ersetzt den fehlenden Okulareinblick. Sie lässt sich nicht ausreichend zuverlässig kalibrieren, weil der Strahlengang durch einen beweglichen Bauteil (Pentaprisma), aber keinen fest mit dem Instrument verbundenen Referenzrahmen läuft.

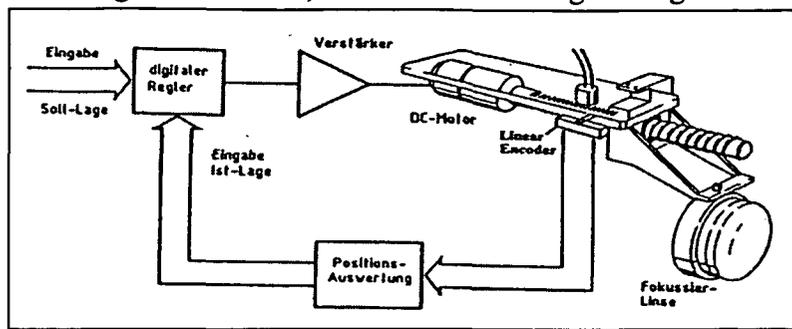
Der zweite Theodolit, Leica TM3000VD (Abb. 4-2), unterscheidet sich rein äußerlich vom ersten dadurch, dass er statt der Weitwinkeloptik über eine Aufsatzplatte für einen Distanzmesser (11) verfügt. Weiters besitzt er einen Zielbeleuchter, der auch als Zielmarke verwendet werden kann. Es gibt auch im inneren Aufbau erhebliche Differenzen. So befindet sich an der Position des Umlenkprismas (Abb. 4-1, 5a) ein dichroitischer Teilerwürfel (5b, zum Funktionsprinzip des Dichroismus sei z.B. auf (Bergmann/Schaefer, 1993) verwiesen). Dieser reflektiert fast ausschließlich Licht von einer Wellenlänge  $> 650$  nm zur Nachvergrößerungseinheit. Das verbleibende Licht gelangt zum Okular (6) und ermöglicht eine Betrachtung der eingestellten Szene.



**Abb. 4-2:** Fernrohrkörper des Videotheodoliten Leica TM3000VD (nach (Leica, 1991))

Mit der internen Zielbeleuchtungseinheit (12) wird normalerweise ein infrarotes Strahlenbündel durch ein Prisma (13) in den Strahlengang eingespiegelt, so dass Reflektoren und Reflexionsfolien wie aktive Zielmarken verwendet werden können. Eine Anpassung an die Objektentfernung kann leicht mit der variabel steuerbaren Beleuchtungsintensität (sieben Abstufungen) erfolgen. Bei der Messung eines Zielpunktes liefert der Zielbeleuchter ein Infrarotlicht mit einer Wellenlänge von 850 nm auf das Prisma. Dieses reflektiert das Infrarot zurück in das Fernrohr, an welches die oberhalb des Fernrohres montierte CCD-Kamera über ein Optiksistem gekoppelt ist. Dieses bildet das auf der Bildebene des Fernrohres entstehende Bild des Zielpunktes mit zehnfacher Vergrößerung auf dem CCD-Feld ab. Der Reflex wird detektiert, und eine automatische Korrektur für die Ablage des Punktes gegen die Fernrohrachse wird berechnet.

Bei dem Fernrohr des TM3000V handelt es sich um ein panfokales<sup>8</sup> Zielfernrohr. Um Scharfabbildung zu erreichen, kann mit einem regelkreisgesteuerten Schrittmotor die Brennweite des optischen Systems verändert werden. Die Fokussierung kann durch Eingabe der Objektweite erfolgen oder durch schrittweise Steuerung des Fokusantriebes.



Die Position der Fokussierlinse wird elektronisch an einem codierten Lineargeber abgelesen (Abb. 4-3).

Abb. 4-3: Fokussierlinse mit Lineargeber

Da die technischen Daten die Möglichkeit eines Messsystems begrenzen, seien die wichtigsten in der folgenden Tabelle genannt. Mit Tab. 4-1 wird ein Überblick über die Eigenschaften der Videotheodolite gegeben.

Kriterium	Leica TM3000V	Leica TM3000VD
<b>Messgenauigkeit:</b> Horizontalwinkelablesung Vertikalwinkelablesung	0.15 mgon 0.15 mgon	0.15 mgon 0.15 mgon
<b>Auflösung, CCD-Kamera:</b> Abtastbereich Pixel	8,8 mm × 6,6 mm (H × V) 500 × 582 (H × V)	8,8 mm × 6,6 mm (H × V) 500 × 582 (H × V)
<b>Öffnungswinkel:</b> Normaloptik (10 m Entf.) Weitwinkeloptik	0,19 gon × 0,13 gon (H × V) 13,9 gon × 10,6 gon (H × V)	0,19 gon × 0,13 gon (H × V) nicht vorhanden
<b>Zielmarken</b>	nur aktive	aktive, Reflektoren, Reflektionsfolien
<b>Vergrößerung</b>	130 – 430 fach	130 – 430 fach
<b>Reflektionsgrad:</b> bei 550 nm bei 850 nm	Umlenkprisma: annähernd 100 % annähernd 100 %	Teilerwürfel: ca. 2 % ca. 95 %
<b>Minimaler Objektabstand</b>	0,6 m	0,6 m
<b>Dauer einer Einzelmessung:</b>	0.04s - 0.9s	0.04s <sup>9</sup> -0.9s

Tab. 4-1: Technische Daten der Videotheodolite Leica TM3000V/VD

<sup>8</sup> Panfokal heißt, dass sich Vergrößerung und Gesichtsfeld in einem festen Verhältnis zur Zielweite ändern.

<sup>9</sup> Bei Präzisionsmessungen im Hochfrequenzbereich, was sich im Laufe eigener Arbeiten zeigte.

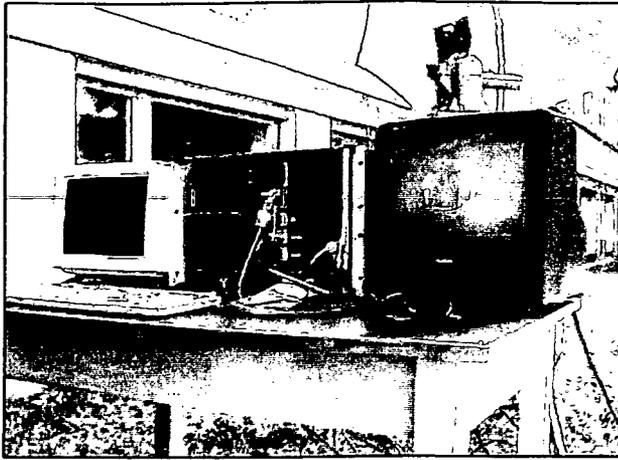


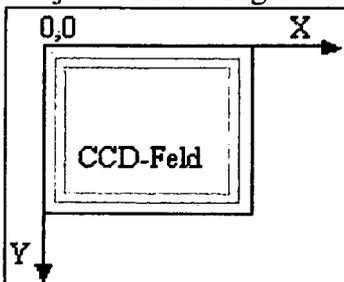
Abb. 4-4: EL-Computerbildschirm und Videomonitor



Abb. 4-5: PC- Computerbildschirm und Steuerungsfenster

Ein Merkmal des Videotheodolits ist das im Fernrohrkörper integrierte digitale Abtastsystem (CCD-Kamera). Dabei dient ein CCD-Chip der Bildaufnahme und übernimmt die sensorischen Eigenschaften des menschlichen Auges. Der Chip besteht aus  $500 \times 582$  Pixel, deren Fläche je  $17 \times 11 \mu\text{m}^2$  beträgt. Das einfallende Licht wird vom CCD-Chip erfasst und an den Framegrabber, der eine Diskretisierung und Digitalisierung durchführt, weitergeleitet. Danach ist das erfasste Licht jedes einzelnen Pixel in einen Grauwert von 0 bis 255 klassifiziert.

Mit einem Theodolit werden prinzipiell Richtungen zu einem Zielpunkt gemessen, der auf der Zielachse liegt. Das Fernrohr des TM3000V/VD enthält kein Strichkreuz, mit dem wie bei einem herkömmlichen Theodolit die Zielachse festgelegt wird. Anstatt des Strichkreuzes wird ein Referenzrahmen (4) verwendet, der in der Bildebene des Objektivs angeordnet ist. Der Referenzrahmen ist fest im Fernrohr montiert. Dieser besteht aus einer rechteckigen Markierung von  $0,69 \times 0,46 \text{ mm}^2$ . Der Referenzrahmen umschließt den Messbereich des Fernrohres und wird mit jeder Szene zugleich im CCD-Feld abgebildet. Der Referenzrahmen ersetzt also hinsichtlich



der Definition der Zielachse das Strichkreuz (Kahmen, 1997). Er bildet sich als dunkler Rahmen mit hellem Hintergrund ab (Abb. 4-6). Seine vier Eckpunkte sind in Bezug auf die optische Achse des Fernrohres labormäßig von der Fa. Leica kalibriert worden und sie werden ebenfalls auf den Sensor bzw. das Computer-Koordinatensystem (KS) projiziert. Das Strichkreuz in der Fokusebene definiert das  $x_t$ ,  $y_t$ -Teleskop (KS) (Abb. 4-7).

Abb. 4-6: Abbildung des Referenzrahmens auf dem CCD-Feld

Videotheodolite sind hybride Messsysteme, da in ihnen zwei unterschiedliche Sensoren kombiniert sind, nämlich die Richtungsmessvorrichtung der Theodolite und das CCD-Array der Videokamera (Grün, 1992). Folglich wird zur Richtungsmessung mit Videotheodoliten eine Umrechnung von den Pixelkoordinaten (= Koordinaten im System des CCD-Kamera) des Ziels in Richtungen benötigt. Die Transformation von Pixelkoordinaten in Richtungen (Hz, V) ist in jeder Software für die Auswertung von Videotheodolitmessungen implementiert.

Der automatische Zielvorgang umfasst folgende Schritte (Kahmen, 1992):

- Die Koordinaten des geometrischen Zentrums der Zielmarke werden durch Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in dem Computer (KS) bestimmt.

- Die Koordinaten des Computers (KS) werden aufgrund einer Transformation zwischen projektiven Ebenen in das Fernrohr (KS) transformiert, wobei die Transformationsparameter aus den Koordinaten der Rahmeneckpunkte gewonnen werden, da diese identische Punkte sind.
- Aus den Koordinaten der Zielmarke  $x_{ti}, y_{ti}$  im Fernrohr (KS) können jetzt Korrekturen für die Hz- und V-Richtung der optischen Achse des Theodolits gerechnet werden, da der Abstand der Strichkreuzebene von dem Schnittpunkt der Theodolitenachsen bekannt ist. Die neu berechneten Richtungen können jetzt als neue Führungsgrößen in dem Regelkreis verwendet werden.

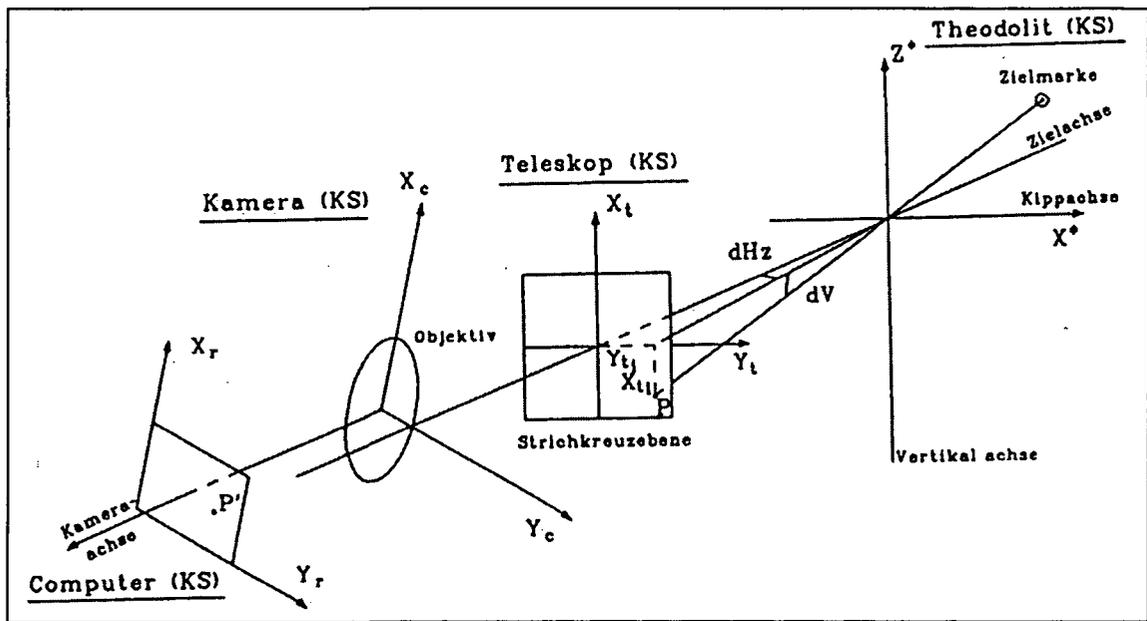


Abb. 4-7: Abbildungssystem von CCD-Kamera und Zielfernrohr (Kahmen, 1992)

Die Transformation der Koordinaten des Computer (KS) in die des Teleskop (KS) erfolgt mit folgender Beziehung (Huep, 1988)

$$\begin{pmatrix} x_{ti} \\ y_{ti} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{01} \\ c_{02} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{21} \\ c_{12} & c_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

mit

- $x_{ri}, y_{ri}$  Bildkoordinaten (Pixel) der Eckpunkte ( $i = 1, \dots, 4$ ),
- $x_{ti}, y_{ti}$  Koordinaten in der Strichplattenebene ( $i = 1, \dots, 4$ ),
- $c_{ij}$  Transformationsparameter ( $i = 0, \dots, 2; j = 0, \dots, 2$ ).

Die sechs Parameter ( $c_{ij}$ ) beschreiben alle Transformationen, Rotationen und Maßstabsveränderungen und ermöglicht es, beliebig erfasste Zielpunkte auf dem CCD-Feld in das Strichplattensystem zu transformieren. Auch mögliche Drifterscheinungen und ungünstige Auswirkungen wegen der hohen Nachvergrößerung werden berücksichtigt. Die Parameter ( $c_{01}, c_{02}$ ) sind die beiden Translationen in X- und Y-Richtung, die vier Parameter  $c_{ij}$  einer Drehmatrix berücksichtigen, dass die Orthogonalitätsbedingungen nicht erfüllt werden.

Die transformierten rechtwinkligen Bildkoordinaten im Strichplattensystem müssen in entsprechende Richtungsdifferenzen ( $dHz, dV$ ) transformiert werden, welche die Abweichungen der

Ziellinie von der Fernrohrachse darstellen (Abb. 4-7). Der mathematische Zusammenhang zwischen den „Ablagewinkeln“  $dHz$  und  $dV$  einerseits und den linearen Bildablagen  $(x_i, y_i)$  und der Fokussierdistanz  $D$  andererseits kann durch eine hyperbolische Funktion modelliert werden. Das Abbildungsgesetz lässt sich in folgender Formel darstellen (Huep, 1988):

$$\begin{pmatrix} \tan dHz \\ \tan dV \end{pmatrix} = (A_1 D^2 + A_2 D + A_3)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Die Ablageparameter  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  werden direkt aus den optischen Fernrohrberechnungen für verschiedene Wellenlängen abgeleitet, sollten jedoch nach endgültiger Fernrohrjustierung in verschiedenen Distanzen kalibriert werden.

Die endgültigen Richtungen für einen exzentrisch liegenden Zielpunkt sind:

$$Hz_k = Hz \pm dHz \quad \text{und} \quad V_k = V \pm dV. \quad (4.3)$$

Mit  $Hz_k$  und  $V_k$  sind die korrigierten (tatsächlichen) Richtungen und mit  $Hz$  und  $V$  die Kreislesungen bezeichnet.

## 4.2 Zielmarken und ihre Eigenschaften

Für hochgenaue Beobachtungen der Zenitwinkel mit dem Messsystem kommt den Zielmarken besondere Bedeutung zu. Sie müssen den Zielpunkt eindeutig und stabil definieren. Die Bildverarbeitung für die automatische Zielung funktioniert nur, wenn sich die Zielmarke gut vom Hintergrund abhebt. Der Zusammenhang zwischen Zielpunkt und Schwerpunkt des Zieles muss garantiert sein, daher kommen nur symmetrische Zielmarken in Frage. Für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit werden aktive und passive Zielmarken verwendet. Anhand der Genauigkeit und der gewonnenen Abtastrate wird entschieden, was für eine Zielmarke verwendet wird.

**Aktive Zielmarken:** Als aktive Zielmarke fungiert im Labortest eine fixe Lichtquelle die hinter einer Lochblende montiert ist (Abb. 5-4). Dafür kann z.B. eine Halogenlampe eingesetzt werden. Als aktives Ziel wurde auch eine Taschenlampe bzw. Scheinwerfer und der interne Zielbeleuchter des TM3000VD verwendet.

Für Feldmessungen wurde eine Lampe, die auf einem Bügel („Bügel mit Lampe“) montiert wurde, verwendet. Die Lichtquelle (Lampe) wird mit einer bestimmten Spannung gespeist. Für eine konstante Speisespannung sorgt ein präzises regelbares Netzgerät.

**Passive Zielmarken:** Als passive Zielmarke wurde ein Reflektor (Prisma) verwendet, der durch Beleuchtung zu einer aktiven Zielmarken wird. Als Prisma wird ein Sechskantprisma verwendet, das auf einem Bügel („Bügel mit Prisma“<sup>10</sup>) montiert ist und vom internen Zielbeleuchter beleuchtet wird.

Als Zielmarke für den Videotheodolit TM3000V kann einerseits der Zielbeleuchter (12), der sich im vorderen Teil des Fernrohres des TM3000VD befindet, verwendet werden (Abb. 4-2). Mit der internen Zielbeleuchtungseinheit wird normalerweise ein infrarotes Strahlenbündel durch ein Prisma (13) in den Strahlengang eingespiegelt.

<sup>10</sup> Der Bügel trägt die Zielmarke. „Bügel mit Prisma“ und „Bügel mit Lampe“ sind von der Konstruktion gleich. Nur kann entweder ein Prisma oder eine Lampe montiert.

Der Bügel mit Lampe (Abb. 4-8) wurde nach Angaben des Verfassers angefertigt. Er soll folgende Eigenschaften besitzen:

- (a) Er soll auf die Griffhalterung des Videotheodolits leicht auf- und abmontierbar sein.
- (b) Die senkrechte Ebene, in der sich die Kippachse des Videotheodolits befindet, soll mit der senkrechten Ebene des Prismas übereinstimmen.
- (c) Das Durchschlagen des Fernrohrs des Videotheodolits sollte weiterhin möglich sein.
- (d) Die Lampe des „Bügels mit Lampe“ soll so gefertigt werden, dass das Licht auch in etwa 1-2 Kilometern Entfernung noch deutlich zu sehen ist.
- (d) Um Fehlerkomponenten durch die Wärmeentwicklung der Lampe auszuschließen, soll ein Kühlkörper die Lampe umgeben.

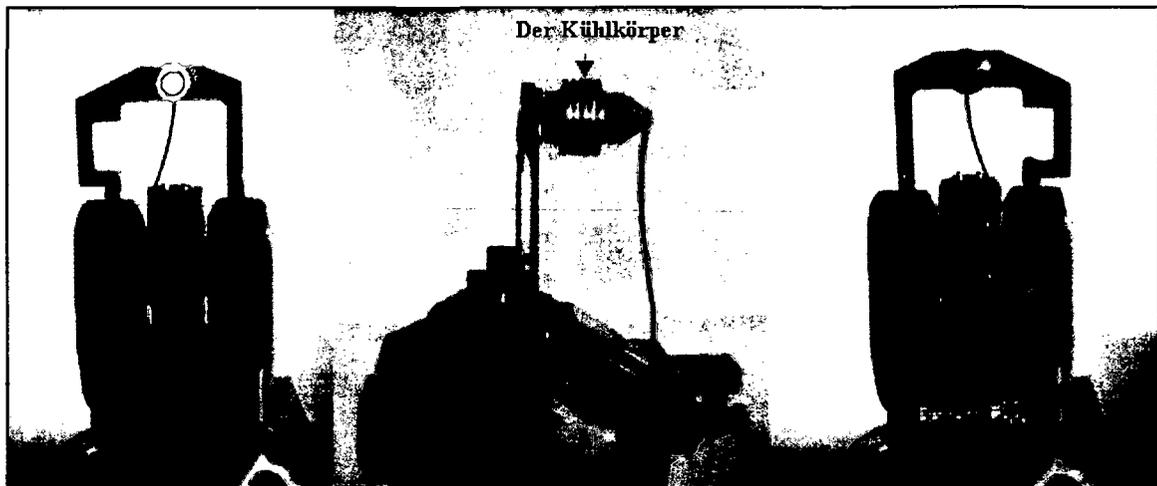


Abb. 4-8: Aufgeschraubter „Bügel mit Lampe“ auf dem Videotheodolit

Für jeden Videotheodolit wurde eine solche Ausrüstung angefertigt, die anstelle des Haltegriffes so befestigt wird, dass die Lampe in der ersten Fernrohrlage erscheint. Der Abstand von der Kippachse bis zu Mitte der Lampe ist mit hoher Genauigkeit (0,1 mm) zu bestimmen, weil er in die Höhenberechnung eingeht. Die Differenz Zielhöhe-Instrumentenhöhe ist eine im Labor bestimmbare Konstante. Beide Möglichkeiten für das automatisch Zielen sind in Abb. 4-9 dargestellt.

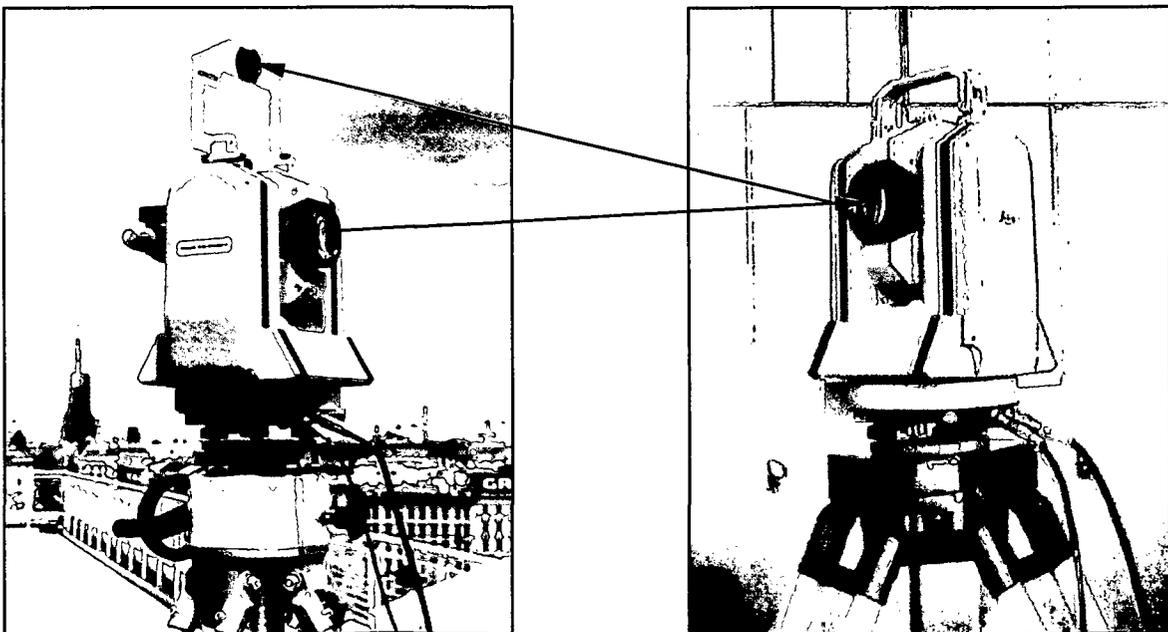


Abb. 4-9: Die Messanordnung der Videotheodolite mit eingezeichneten Zielstrahlen

### 4.3 Synchronisation und Beschleunigung der Messungen

Im Hinblick auf die aktuelle Instrumententechnologie stellt sich nun die Frage, ob Videotheodolite mit integrierter CCD-Kamera geeignet sind, Zenitwinkelmessungen in möglichst kurzen Zeitabständen, also mit hoher Frequenz, durchzuführen. Das hier verwendete System ist ursprünglich für die Automobil- und Flugzeugindustrie entwickelt worden, mit ihm sollten Positionen von Konstruktionen mit einer Genauigkeit von 0.01 mm erfasst werden. Die Messgeschwindigkeit spielte dabei eine untergeordnete Rolle. Für die hier gestellte Aufgabe werden daher zwei weitere Entwicklungen notwendig:

- Die Messungen zweier Stationen müssen untereinander synchronisiert werden und
- die Frequenzen der Messungen müssen erhöht werden.

Es ist ein Messsystem zu entwickeln, das mit hoher Frequenz die Einflüsse der Refraktion (s. Kap. 3), die während der Messung im Untersuchungsgebiet auftreten, optimal erfassen kann. Ein Messsystem, welches mit hoher Frequenz arbeitet, wird im folgenden beschrieben. Besonders interessant wird dieses System für die Erfassung von Turbulenzen, da diese vergleichsweise hochfrequente Fluktuationen erzeugen (Casott, 1999); ebenso sollen mit dem Instrumentarium auch niederfrequente atmosphärische Änderungen erfasst werden.

#### 4.3.1 Synchronisation der Messung

Für die Synchronisation (vgl. Abb. 4-10) soll das Lichtsignal genutzt werden, welches von den Zielmarken ausgesendet wird. Nachdem beide Geräte aufeinander ausgerichtet worden sind, der Messvorgang eingeschaltet wurde und die Kalibrierparameter bestimmt worden sind, startet man die Suche der Zielmarken, was zunächst nicht synchron verläuft. Die Suche der Zielmarken läuft so lange, bis beide Videotheodolite eine Zielmarke gefunden haben. Man ruft dann künstlich den Zustand (vgl. Abb. 4-10) „nicht gefunden“ hervor, indem man für wenige Sekunden mit einer Abdeckplatte die Sichtverbindung zwischen beiden Geräten unterbricht. Die Unterbrechung wird wieder aufgehoben und die erste Zielfindung in beiden Geräten gilt als Nullmessung, d.h. als Zeitpunkt  $T_0$ . Diese Vorrang dauert im Schnitt ca. 1 Sekunde. Die Messdaten der beiden Geräte sind dann über  $T_0$  miteinander synchronisiert. Die Synchronisation wird nur zu Beginn der Messungen durchgeführt.

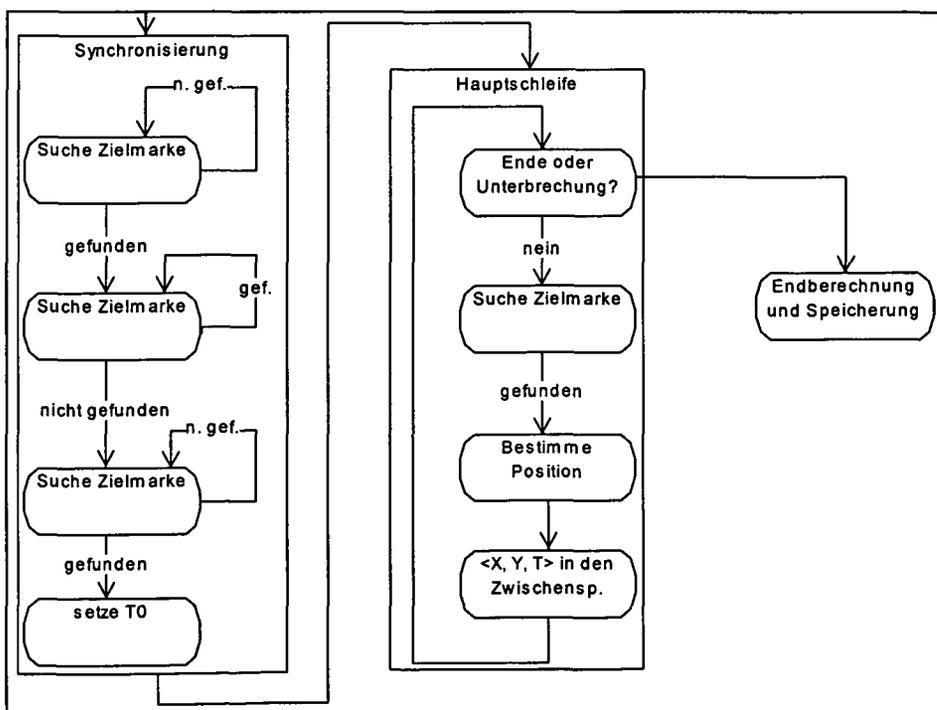
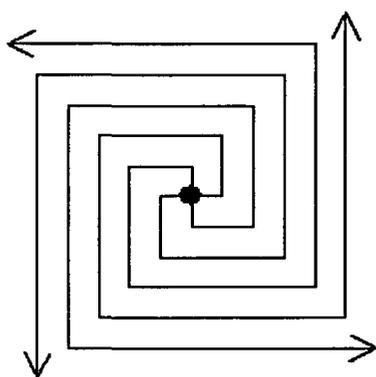


Abb. 4-10: Das Programmmodul für Refraktionsmessungen mit hoher Frequenz

### 4.3.2 Erhöhung der Abtastrate und Frequenz

In der Hauptschleife (Abb. 4-10) wird wiederholt die Zielmarke gesucht, die Startzeit  $T_0$  wird festgehalten und die genaue Position der Zielmarke anhand von gewichteten Grauwerten gemessen. Es ergeben sich X- und Y-Koordinaten mit Subpixelgenauigkeit, die schließlich in dem Arbeitsspeicher zwischengespeichert werden. Die Operationen in der Hauptschleife wurden auf das notwendige Minimum reduziert, um eine möglichst hohe Abtastrate zu erzielen. Auf eine wiederholte Bestimmung der Kalibrierparameter wurde verzichtet. Die einzige zeitaufwendige Operation in der Hauptschleife ist die Suche und die Bestimmung der genauen Position des Ziels. Diese Vorgänge sind von der konkreten Größe der abgebildeten Zielmarke und dem Ausmaß ihrer Fluktuationen abhängig.

Die automatische Zielsuche bezieht sich auf das geometrische Zentrum (den Schwerpunkt) des Bildes der Zielmarke. Der Suchvorgang wird in der Mitte des Bildes, dem Schnittpunkt der Diagonalen des Referenzrahmens gestartet und spiralförmig fortgesetzt, um die gesuchte Region schneller zu finden. Die Suche bei zentrisch eingestellten Zielpunkten ist wesentlich schneller als die Suche von Punkten, die im Randbereich des CCD-Feldes liegen. Weiters baut die Bestimmung des Zieles im vorliegenden System auf der Berechnung des Schwerpunktes einer Zielregion auf (Berger, 1989). Der Zusammenhang zwischen Zielpunkt und Schwerpunkt des Zieles muss gegeben sein, daher kommen nur symmetrische Zielmarken in Frage. Für die Zielsuche wird der letzte bekannte Punkt festgehalten und es wird zuerst in der Umgebung von diesen Koordinaten



gesucht. Ist die Zielmarke dort nicht zu finden, so wird das Feld „4-fach spiralenförmig“ (Abb. 4-11) abgesucht, wobei die „Spiralen“, wie in der Abb. 4-11 dargestellt, aussehen. Wird die Zielmarke nicht gefunden, sucht das System ununterbrochen weiter, bis die Zielmarke wieder erscheint oder eine vorgegebene Zeit zu Ende ist. In diesem Fall prüfen verschiedene Algorithmen zunächst die Funktionsfähigkeit der Hardwarekomponenten. Ist diese nicht gegeben, wird die Messung mit einer entsprechenden Fehlermeldung abgebrochen. Zielausfälle werden am Bildschirm und in den Dateien vermerkt.

Abb. 4-11: Spiralförmige Zielsuche

Die einfachste Bestimmung der Position  $\langle X, Y \rangle$  ist bei einer runden Zielmarke gegeben. Die Formel für die Schwerpunktbestimmung lautet (Kraus, 1993):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i,j} g(i,j) \cdot \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix}}{\sum_{i,j} g(i,j)} \quad (4.4)$$

wobei  $i$  und  $j$  die Pixelkoordinaten sind.

Es werden nur die Pixel mit einem Grauwert  $g(i,j) \geq \text{Schwellwert}$  berücksichtigt. Ausgehend von einem Punkt mit entsprechendem Grauwert werden rekursiv alle benachbarten Pixel, welche die Bedingung erfüllen, gesucht. Dabei werden Minima und Maxima jener Pixel-Koordinaten festgehalten, die die Schwellenwertbedingung erfüllen. Diese Werte bilden ein Rechteck  $x_{\min} \leq i \leq x_{\max}, y_{\min} \leq j \leq y_{\max}$ , in dem dann die Berechnung des Schwerpunktes erfolgt.

Die Zeit ist auf  $T_0$  bezogen und mit einer Genauigkeit von 100 ms gegeben. Das Ergebnis der Messung ist eine Tabelle mit den Datensätzen in der Form  $\langle \text{time [s]}, dHz, dV, Hz, V \rangle$  (vgl. Tab.

4-1). Begleitend werden noch Randinformationen wie Datum, Uhrzeit, Abtastrate und die vom Benutzer eingegebene Beschreibung gespeichert. Eine Auswertesoftware von der Erfassung bis hin zur Analyse der Messdaten ermöglicht eine „online“ Auswertung. Auf die Software selbst wird hier nicht weiter eingegangen. Es soll genügen, zu erwähnen, dass durch sie die Erfassung und Speicherung der Messdaten in Echtzeit ermöglicht ist.

## 5 Versuchsmessungen im Labor-Kalibrierung des Verfahrens

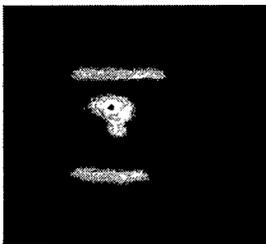
Das Ziel dieses Kapitels ist die Erprobung des Messsystems unter Laborbedingungen. Unter Laborbedingungen soll überprüft werden:

- welche Zielmarken sich am besten eignen,
- ob eine maximale Abtastrate (25 Hz) erreicht werden kann,
- ob die beiden Systemeinheiten (PC & EL) gleichwertige Ergebnisse liefern,
- ob die Synchronisation zwischen beiden Systemeinheiten mittels des Lichts gelingt und
- welche Genauigkeit bei der Kalibrierung erzielt werden kann.

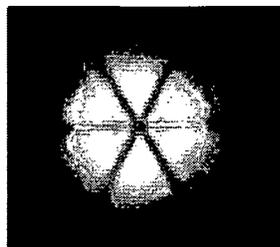
Zur Überprüfung der oben angeführten Bedingungen wurden mit den Videotheodoliten verschiedene Versuche durchgeführt. Die Versuchsanordnung und die Ergebnisse der Versuche werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

### 5.1 Untersuchung der Abtastrate mit verschiedenen Zielmarken

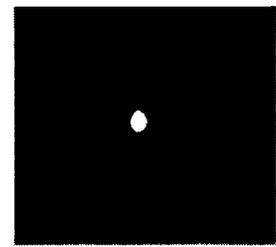
Sämtliche nachfolgend beschriebenen Experimente wurden im Labor (Messkeller) der Abteilung „Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie“ (TU Wien) über kurze und lange Distanzen sowie mit unterschiedlichen Zielen (Zielbeleuchter, passive Zielmarken (Prisma) und aktiven Zielmarken (Lampe)) ausgeführt (vgl. Kap. 4.2). Die ersten Versuche haben das Ziel, die Zeitdauer zwischen zwei Messungen zu verringern. Nach Firmenangabe ist eine Dauer von 0,9 s erreichbar (s. Tab. 4-1, S. 19). Es wurden Entfernungen von rund 10 m, 15 m, 20 m, 30 m und 50 m zum Ziel verwendet. Die Beobachtung der Zielmarke erfolgte mit Hilfe der im TM3000VD und TM3000V integrierten CCD-Kamera.



**Abb. 5-1:** Signalbild am Videomonitor von der Austrittspupille des Zielbeleuchters



**Abb. 5-2:** Signalbild am Videomonitor vom Prisma

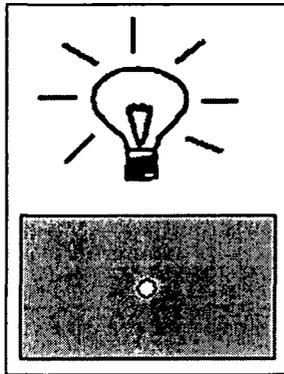


**Abb. 5-3:** Ideales Signalbild am Videomonitor von der aktiven Lichtquelle

Für die ersten Versuche wurde der Zielbeleuchter als Zielmarke verwendet. In 10 m Entfernung ist der Lichtfleck am CCD-Feld groß und die Abtastrate war kleiner als 1 Hz. Das Bild, das auf dem CCD-Feld abgebildet ist, ist unregelmäßig und setzt sich aus drei Teilen (s. Abb. 5-1) zusammen. Mit Vergrößerung der Distanz beginnt der Lichtfleck sich zu verkleinern und gleichzeitig erhöht sich die Abtastrate auf über 1 Hz. Es ist ersichtlich, dass die Verkleinerung des Ziels am CCD-Feld die Abtastrate beeinflusst. Die Abtastrate bei der automatischen Zielung ist also von dem Durchmesser des Bildes auf dem CCD-Feld abhängig. Um den Auswerteprozess zu beschleunigen, wird außerdem von dem CCD-Feld nur ein begrenztes Feld benutzt. Dieses Feld bezeichnet man als *Region of Interest (RoI)*. Es ist daher wichtig, dass die Zielmarke in diesem Bereich des CCD-Feldes liegt. Jedes Pixel dieser RoI liefert mit einer Taktrate von 2/100 Sekunden einen Grauwert zwischen 0 und 255 an den PC. Liegt dieser Grauwert über einem vom Benutzer gewählten Grenzwert, wird dieser Grauwert in einer Datei

verspeichert. Je heller das Ziel am CCD-Feld ist, desto höher wird daher der Grauwert gewählt und umgekehrt (*Kabashi et al., 1999*).

Um die Beschleunigung der Abtastrate zu erhöhen, wurde ein Prisma für weitere Experimente als Zielmarke verwendet. Ihr Bild ist weitgehend symmetrisch (vgl. Abb. 5-2). Mit dem verwendeten Prisma als Zielmarke wurde die Abtastrate erhöht, aber sie erreicht noch nicht die gewünschten Werte.



Um den Abtastvorgang zu beschleunigen, wurde eine weitere Lichtquelle entwickelt. Da am Anfang der Experimente noch kein „Bügel mit Lampe“ (s. Kap. 4.2.1) vorhanden war, wurde hinter einer Lochblende eine fixe Lichtquelle Abb. 5-4 montiert. Dafür wurde z.B. eine Halogenlampe verwendet. Der Lichtstrahl wird auf dem CCD-Feld des Theodolits als Lichtfleck abgebildet. Der Durchmesser der Öffnung in der Lochblende beträgt maximal 1-2 mm, da sonst der Lichtfleck<sup>11</sup> im Bild bei kurzen Entfernungen zur Zielmarke zu groß werden wird.

Abb. 5-4: Lichtquelle mit Lochblende

Die Experimente mit verschiedenen Zielgrößen und Beobachtungen im Labor zeigten, dass maximale Abtastraten von 25 Hz erreicht werden können. Tab. 5-1 zeigt den Ausschnitt eines Messfiles mit einer Messfrequenz von 25 Hz. *Time limit* bezeichnet die Versuchsdauer in Sekunden und *interest area* die Größe der RoI in Pixel. Die *number of cycles* dient dem Benutzer für Zeitstudien (im Beispiel: 7485 in 299.76 s (**24.970 c/s**)).

Entscheidend für die hohe Abtastrate sind folglich:

- **die Größe<sup>12</sup> des Ziels auf dem CCD-Feld**, d.h. je kleiner das Ziel ist, desto höher ist die Anzahl der Messungen pro Sekunde (Abb. 5-5),
- **die Amplitudenbewegung des Ziels am CCD-Feld**, d.h. je weniger das Ziel schwankt, desto höher ist die Anzahl der Messungen pro Sekunde.

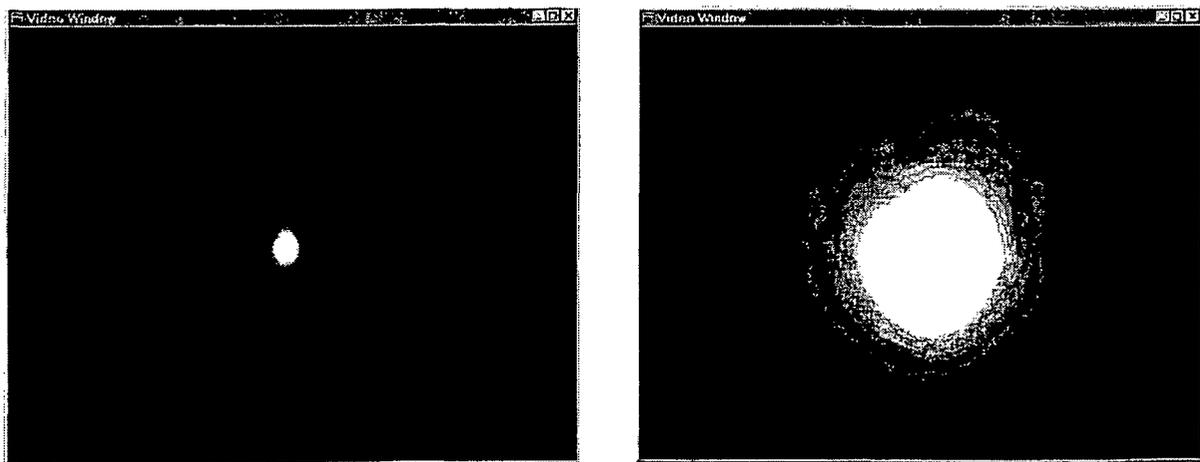


Abb. 5-5: Größe des Ziels am Videomonitor

<sup>11</sup> Durch die starke Vergrößerung der Optik des TM3000V hat dieser Lichtfleck stets eine Ausdehnung über mehrere Pixel. Dessen Grauwerte unterscheiden sich jedoch signifikant von der Umgebung.

<sup>12</sup> Untersuchungen von (*Beyer, 1992*) belegen, dass eine Größe des Bildes der Zielmarke von etwa 10 Pixeln ausreichend ist.

```

GEOIPP: Target Oscilations:
time: 1999-06-23 11:50:45
log comment: 990623 Versuch 5, 5 min
time limit 300 s
ticks per second 100
interest area 32 x 15
stop time: 11:56:17
start time: 42677 s 24 ticks
stop time: 42977 s 0 ticks
number of cycles: 7485 in 299.76 s (24.970 c/s)
number of records 7485

```

time[s]	dHz[Gon]	dV[Gon]	Hz[Gon]	V[Gon]
1.02	-0.000245	-0.000839	349.561965	99.997631
1.06	-0.000262	-0.000844	349.561948	99.997626
1.10	-0.000248	-0.000846	349.561962	99.997624
1.14	-0.000221	-0.000737	349.561989	99.997733
1.18	-0.000223	-0.000808	349.561987	99.997662
1.22	-0.000216	-0.000768	349.561994	99.997702
1.26	-0.000198	-0.000728	349.562012	99.997742
1.30	-0.000197	-0.000705	349.562013	99.997765
1.34	-0.000194	-0.000705	349.562016	99.997765
1.38	-0.000193	-0.000717	349.562017	99.997753
1.42	-0.000173	-0.000715	349.562037	99.997755
1.46	-0.000192	-0.000752	349.562018	99.997718
1.50	-0.000172	-0.000749	349.562038	99.997721
1.54	-0.000171	-0.000756	349.562039	99.997714
1.58	-0.000160	-0.000759	349.562050	99.997711
1.62	-0.000139	-0.000777	349.562071	99.997693
1.66	-0.000126	-0.000791	349.562084	99.997679
1.70	-0.000142	-0.000790	349.562068	99.997680
1.74	-0.000155	-0.000786	349.562055	99.997684
1.78	-0.000161	-0.000755	349.562049	99.997715
1.82	-0.000145	-0.000776	349.562065	99.997694
1.86	-0.000158	-0.000814	349.562052	99.997656
1.90	-0.000124	-0.000791	349.562086	99.997679
1.94	-0.000131	-0.000831	349.562079	99.997639
1.98	-0.000156	-0.000821	349.562054	99.997649

Tab. 5-1: Ausschnitt aus einem Messdatenfile mit 25 Hz (Messkeller)

## 5.2 Genauigkeitsuntersuchungen mit verschiedenen Zielmarken

Da Pfeiler mit Zwangszentrierung im Messkeller vorhanden sind, zentriert man zwei Videotheodolite auf diesen in einer Entfernung von 48.5 m. Für die ersten Versuche wurde der Zielbeleuchter auf einer Station als Zielmarke verwendet und das Prisma auf der zweiten Station (I. Variante). In weiteren Untersuchungen wurden ein Prisma, und eine aktive Lichtquelle (II. Variante) als Ziele verwendet. Für weitere Untersuchungen sowohl im Labor als auch im Freien wurden zwei spezielle identische „Bügel mit Lampe“ (vgl. Kap. 4.2.1) verwendet (III. Variante).

### 5.2.1 Einsatz von verschiedenen Zielmarken - Untersuchungen von drei verschiedenen Varianten

#### I. Variante: Als Ziel dient auf Station 1 ein Zielbeleuchter und auf Station 2 ein Bügel mit Prisma (passive Zielmarke)

Wie die Abb. 5-1 zeigt, ist die Abbildung des Zielbeleuchters auf dem Videofenster nicht kreisförmig, sondern ein unregelmäßig geformtes Bild. Sie ist nicht als kompaktes und symmetrisches Bild geformt, sondern setzt sich aus drei Teilen zusammen. Wegen dieser unregelmäßigen Form des Signals ist der Wert der Schwankungen der Zenitwinkel, verglichen mit einem Zenitwinkel, der von einer aktiven Zielmarke (Bügel mit Lampe) stammt, fünf- bis sechsmal größer (s. Abb. 5-6). Diese Signalform tritt sowohl im Messlabor als auch im Freien auf (s. Abb. 5-7).

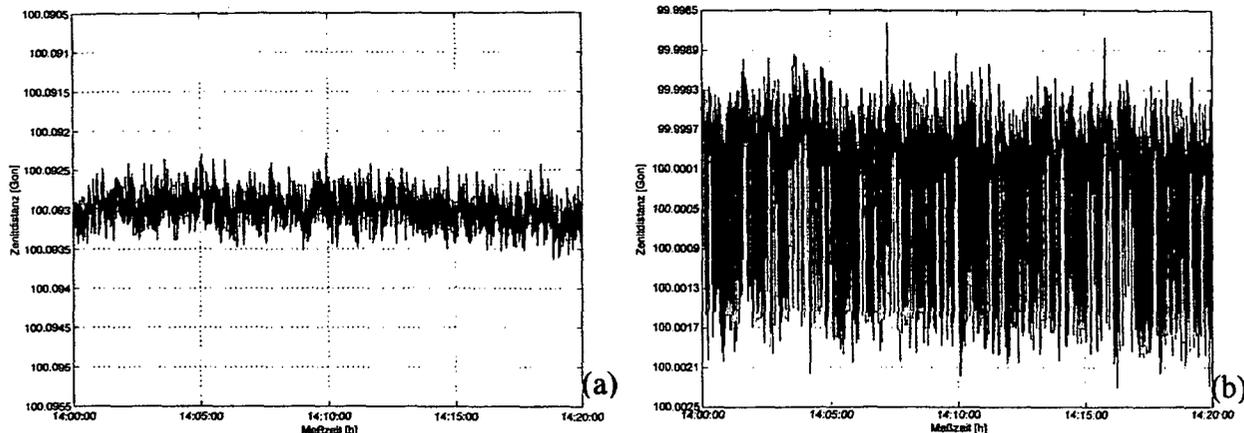


Abb. 5-6: Vergleich der Zenitwinkel mit aktivem Ziel (Bügel mit Lampe)(a) und Zielbeleuchter (b) bei Messungen im Labor

Aus der Abb. 5-7 ist ersichtlich, dass in dem beobachteten Zeitintervall von 15 min die gemessenen Zenitwinkel zu der passiven Zielmarke (Prisma) (Station 2, in der Abb. 5-7 mit rot bezeichnet) innerhalb eines Wertebereichs von ca. 3.5 mgon relativ konstant blieben. Die im selben Zeitraum mit dem Zielbeleuchter (Station 1, in der Abb. 5-7 mit blau bezeichnet) beobachteten Zenitwinkel auf der Gegenstation schwanken jedoch erheblich. Der Unterschied zwischen den Maximalwerten der Winkel betrug bei diesem Gerät immerhin ca. 15.0 mgon. Als Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt sich, dass der Zielbeleuchter sich nicht als Zielmarke eignet und daher nicht mehr verwendet wird.

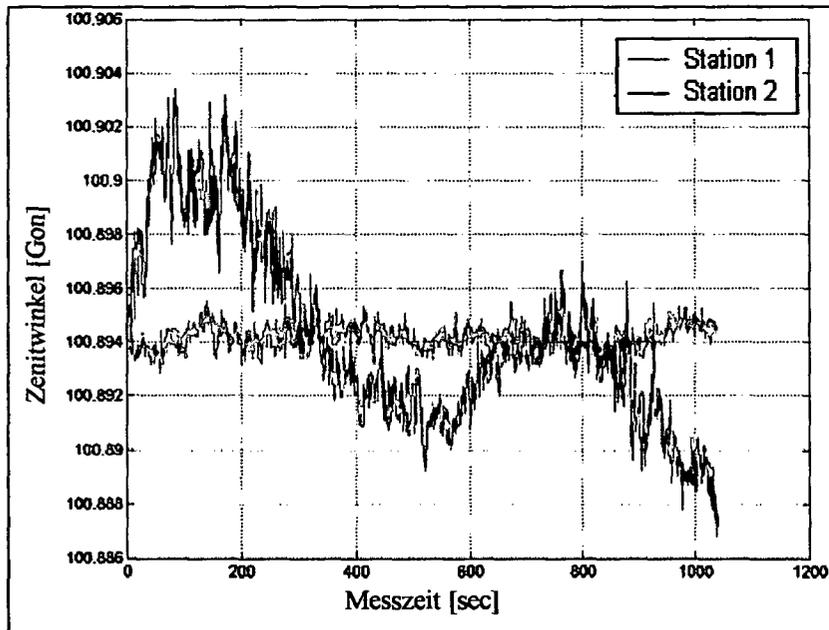


Abb. 5-7: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 (Zielbeleuchter) und 2 (Prisma)

## II. Variante: Als Ziel dient auf Station 1 eine passive Zielmarke und auf Station 2 eine aktive Zielmarke

Anstelle des Zielbeleuchters wird eine aktive Zielmarke verwendet. Auf einer Station ist nun folglich eine aktive Zielmarke und auf der anderen Station eine passive Zielmarke vorhanden. Die Schwankungen der Zenitwinkel stimmen wieder nicht auf beiden Standpunkten überein. Die

Messungen mit dem Prisma zeigen größere Schwankungen im Vergleich zur aktiven Zielmarke. Dieser Messaufbau wird daher nachfolgend nicht weiter verwendet.

### **III. Variante: Als Ziel dient auf beiden Stationen eine identische aktive Zielmarke (Bügel mit Lampe)**

Die dritte Variante führte zum gewünschten Erfolg. Hier wurden als Zielmarken zwei vollkommen identische aktive Lichtquellen (vgl. Abb. 4-8) verwendet. Sowohl im Messlabor (vgl. Abb. 5-10 und 5-11) als auch im Freien war die Größe und Schwankung der Zenitwinkel immer ident. Für weitere Untersuchungen werden in dieser Arbeit nur aktive Zielmarken verwendet, da diese sich besonders vom Hintergrund abheben und hohe Genauigkeit aufweisen.

Mit Hilfe des Tests von verschiedenen Zielmarken wurde herausgefunden:

- Die Abtastrate wird durch den Einsatz von aktiven Zielmarken erhöht, da die Zielgröße am Videofenster mittels einer Lochblende verkleinert werden kann.
- Aktive Zielmarken brauchen eine Beleuchtung (Lichtquelle, Batterie, etc.). Die Intensität des Lichtes für längere Beobachtungszeiten ist nicht so einfach konstant zu halten.
- Mit der Verwendung des internen Zielbeleuchters als Zielmarke konnte die gewünschte Frequenz nicht erreicht werden, weil das Bild am Videofenster nicht regelmäßig und überdies zu groß für eine optimale Abtastrate (25 Hz) war. Der Zielbeleuchter als Zielmarke verursachte große Schwankungen der Zenitwinkel im Vergleich zu einer anderen aktiven Zielmarke.
- Die Schwankung und Streuung der Zenitwinkel nach Ersetzen des Zielbeleuchters und des Prismas sind bei den Systemen auf beiden Stationen gleich.
- Bei der Verwendung von zwei vollkommen identischen aktiven Zielmarken (Bügel mit Lampe) erreichen die Schwankungen der Zenitwinkel auf beiden Stationen gleich. Sie liefern eine bessere Genauigkeit als andere Ziele und wurden für weitere Untersuchungen sowohl im Labor als auch im Freien verwendet.

### **5.3 Synchronisation der beiden Messstationen**

Die beiden Videotheodolite wurden auf einen Pfeiler gesetzt (Abb. 5-8). Als Zielmarke wurde auf einen anderen Pfeiler der Bügel mit Lampe montiert. Da eine Synchronisation durch Abschalten des Lichtes erzeugt wird, wurde das Licht für eine Zeitdauer von ca. 3-5 sec abgeschaltet. Das Einschalten des Lichtes gilt als Beginn der Messungen. Zur Kontrolle, ob die beiden Instrumente gleichzeitig messen sowie das Einschalten des Lichtes der Zielmarke zur strengen Synchronisation verwendet werden kann, wurde ein Laborversuch mit einer Glasplatte vorgenommen. Diese Glasplatte wurde in der Mitte der Beobachtungsstrecke in der Höhe des Zielstrahls gehalten und ein Mal in Richtung beider Videotheodolite langsam gedreht und ein Mal in Richtung des Zieles.

Wie aus Abb. 5-9 zu sehen ist, haben beide Videotheodolite gleichzeitig die Drehung der Glasplatte verfolgt, d.h. die Synchronisation funktionierte streng. Die Genauigkeit der Synchronisation beträgt ca. 1 ms.



Abb. 5-8: Einseitige (parallele) Aufstellung der Instrumente

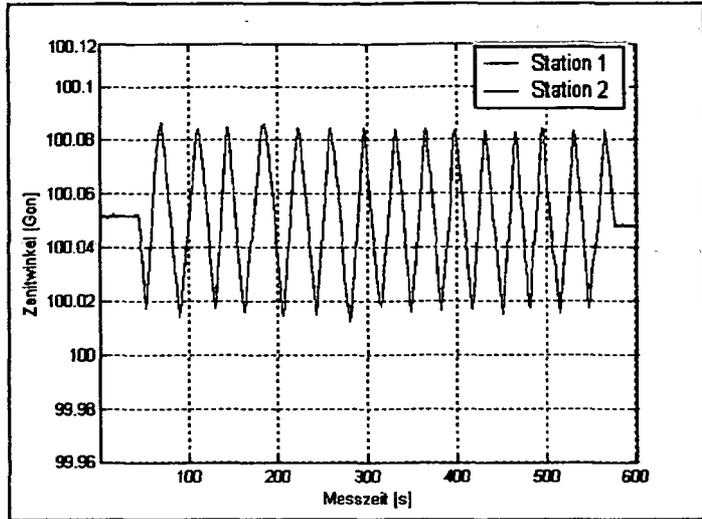


Abb. 5-9: Vergleich der Zenitwinkelschwankungen und Synchronisation der Station 1 und 2

### 5.4 Überprüfung der Stabilität des Referenzrahmens auf dem CCD-Feld

Für gewöhnlich müssen während jeder Messung die Rahmeneckpunkte des Referenzrahmens bestimmt und gespeichert werden (Kap. 4). Der Rahmen wird bei jeder Messung mit auf das CCD-Feld abgebildet. Ziel dieses Laborversuchs ist, zu überprüfen, ob eine Messung des Referenzrahmens jedes Mal vor jeder Einzelmessung notwendig ist. Da eine aktive Zielmarke verwendet wurde, wurde auch gleichbleibende Grundhelligkeit garantiert. Für eine konstante Speisespannung sorgt ein präzise regelbares Netzgerät. Man konnte beobachten, dass die Intensität des Signals auf dem Monitor während der Untersuchung stabil geblieben ist. Das wurde am Anfang der Messungen und am Schluss durch das Ausmessen der Grauwerte zusätzlich nachgewiesen.

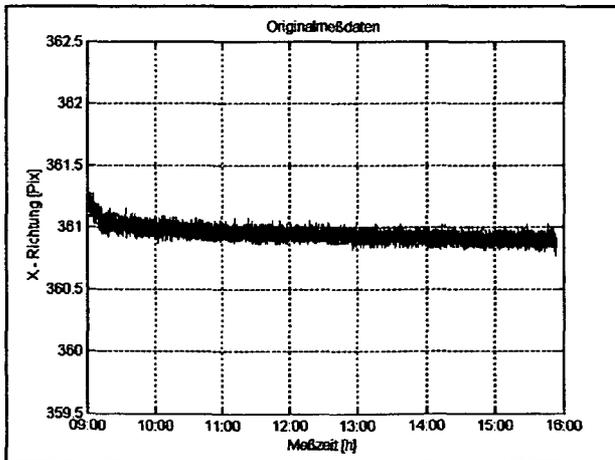


Abb. 5-10: Stabilität der optischen Achse in Y - Richtung

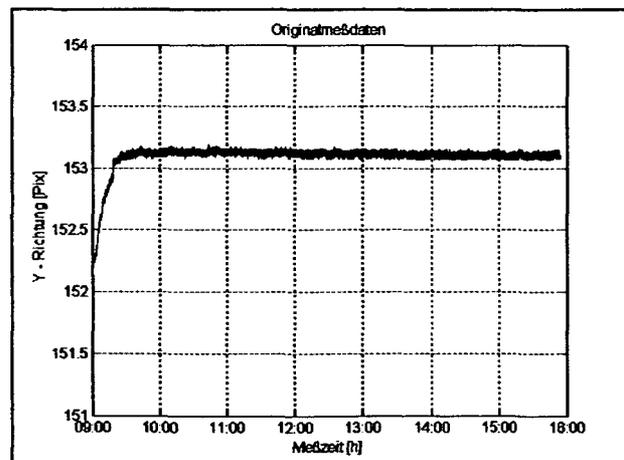


Abb. 5-11: Stabilität der optischen Achse in X - Richtung

Die Auswertung der Beobachtungen zeigt folgendes Ergebnis. Die hier diskutierten Messreihen sind in einem einheitlichen Maßstab dargestellt. Wie aus den Abb. 5-10 und 5-11 zu sehen ist, zeigt sich zu Beginn der Messung ein etwa 50-60 minütiges Einlaufverhalten erklärbar durch das Aufwärmen des Instrumentes. Nach 30 Minuten Anfangsdrift, wobei die X-Achse nach unten und die Y-Achse nach oben wandern, stabilisiert sich die Kurve (Abb. 5-10 und 5-11). Das betrifft besonders die Y-Richtung. Anschließend bleiben die Positionen mit den Werten  $X_{Mittel} =$

360.945 und  $Y_{\text{Mittel}} = 153.091$  Pixel annähernd konstant. Die entsprechenden Standardabweichungen ergeben sich  $S_x = \pm 0.05$  und  $S_y = \pm 0.12$  Pixel, also etwa 1/10 Pixel. Nach dem Einlaufverhalten betragen die Standardabweichungen  $S_x = \pm 0.039$  und  $S_y = \pm 0.017$  Pixel.

## 5.5 Untersuchungen der Systemgenauigkeit

Unter Laborbedingungen sollte erprobt werden, ob der gewonnene Höhenunterschied aus dem neu entwickelten Messverfahren mit der nivellierten Höhe (Sollwert) übereinstimmt. Während der Kalibrierung herrschte eine Temperatur von 23,5 °C. Die Messung erfolgte über eine Distanz von 48,5 m zwischen zwei Messpeilern. Am Anfang wurde dem System jeweils ausreichend Zeit zur Akklimatisierung und Aufwärmung auf Betriebstemperatur eingeräumt, um den Effekt des Einlaufverhaltens ausschließen zu können. Das Einlaufverhalten erstreckt sich über ca. eine Stunde (s. Kap. 5.4).

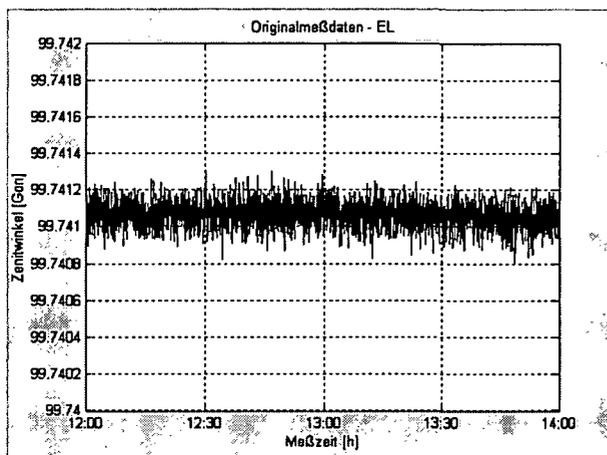


Abb. 5-12: Zenitwinkeländerung auf Station 1

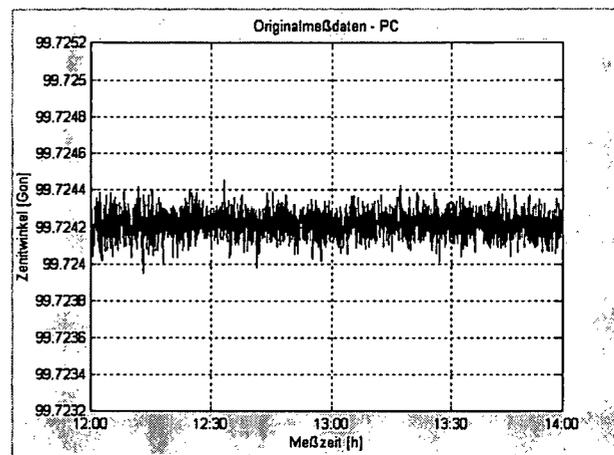
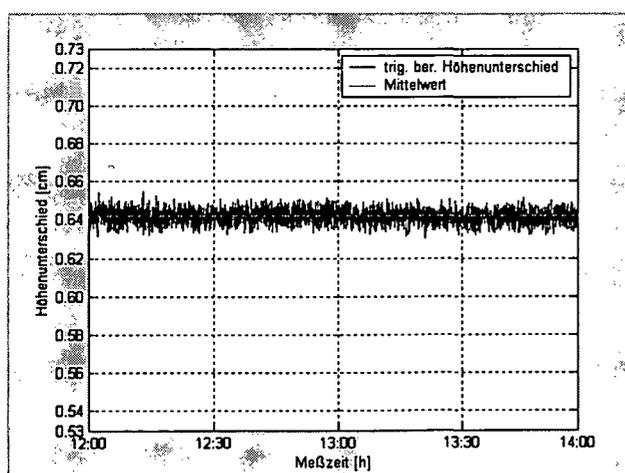


Abb. 5-13: Zenitwinkeländerung auf Station 2

Nach der Akklimatisierung des Messsystems wurde mit den Messungen begonnen. Es wurde kontinuierlich und simultan über zwei Stunden mit einer Abtastrate von 1 Hz gemessen. Die Abb. 5-12 und 5-13 zeigen die gemessenen Zenitwinkel von beiden Stationen. Sie haben einen symmetrischen Verlauf, d.h. sie verhalten sich gleich und schwanken über zwei Stunden um ca. 0.15 mgon. Die kurzperiodischen Fluktuationen betragen bis zu 0.20 mgon.



Die Höhenunterschiede wurden anhand von (Gl. 3.1) berechnet. Abb. 5-14 stellt die ermittelten Höhenunterschiede aus simultan gemessenen Zenitwinkeln über 2 Stunden dar. Der Mittelwert aus allen Einzelmessungen entspricht dem Sollwert des geometrischen Nivellements (Feinnivellements) mit einer Genauigkeit von 0.1 mm.

Abb. 5-14: Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)

## 5.6 Simulation der Atmosphäre durch eine Glasplatte

### 5.6.1 Versucherklärung

Ziel dieses Experiments ist es, im Rahmen von Laborbedingungen die Funktionsfähigkeit des Messsystems für unterschiedliche Lichtstrahlenbahnen unter Beweis zu stellen. Dazu wurden zwei Messanordnungen im Messlabor der TU-Wien mit Hilfe einer Glasplatte simuliert (Abb. 5-15). Es wurden sowohl einseitige (Abb. 5-16) als auch zweiseitige Messanordnungen gewählt. Die Videotheodolite bzw. die Zielmarken wurden wiederum auf zwei Pfeilern im Abstand von 48.5 m aufgestellt. Für die einseitige Messanordnung wurden beide Instrumente auf einem, sowie die Zielmarke (Bügel mit Lampe) auf einem anderen Pfeiler aufgebaut (Abb. 5-16). Für die zweiseitige Messanordnung wurden die Instrumente auf je einem Pfeiler aufgebaut.

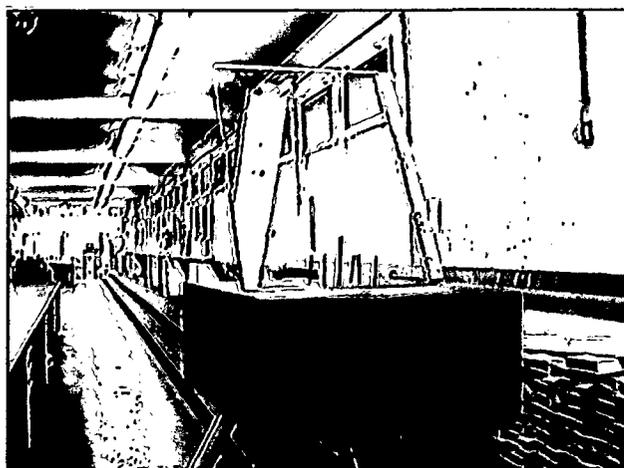


Abb. 5-15: Die Aufstellung der Glasplatte auf dem Stativ

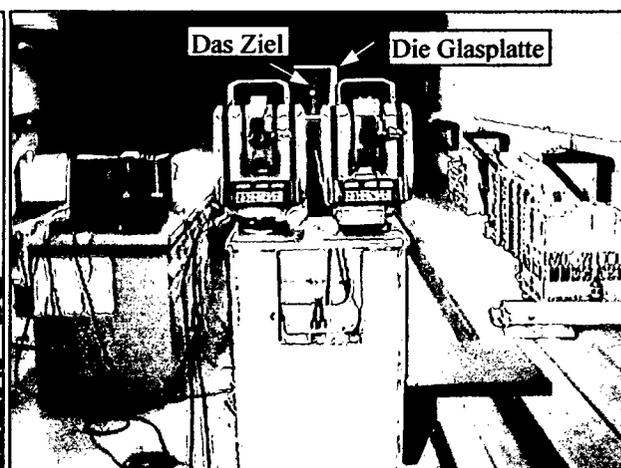


Abb. 5-16: Einseitige Aufstellung der Videotheodolite

Die Glasplatte (0.48 x 0.345 x 0.031 m) in Abb. 5-15 wurde in der Mitte der Strecke angeordnet und wurde auf einem Stativ folgendermaßen aufgestellt: Auf das Stativ wurde ein Gestell (0.60 x 0.40 x 0.20 m) stabil aufgesetzt und mit einer Wasserwaage horizontalisiert. Die Höhe des Stativs entspricht der Höhe der Pfeiler, auf denen die Instrumente aufgesetzt wurden. In der Mitte des Gestells wurde ein Nagel (Länge ca. 20 cm) befestigt. Auf beiden Seiten dieses Nagels wurden 4 kleinere Nägel (Länge ca. 3 cm) derart eingeschlagen, dass die Glasplatte, die an dem langen Nagel angelehnt und von den kleineren Nägeln gestützt wird, mit dem Gestell einen Winkel von 50 gon einschließt. Der große Nagel ermöglicht eine stabile Position der Glasplatte während der Messungen, sowie ein schnelles Wechseln der Glasplattenneigung. Die Glasplatte konnte in beide Richtungen geneigt werden, so dass sie mit der Zielachse einen Winkel von 100 oder 50 gon einschloss.

### 5.6.2 Ableitung der mathematischen Beziehungen

Abb. 5-17 zeigt den Verlauf des Lichtstrahles durch die Glasplatte. Der einfallende bzw. ausfallende Lichtstrahl bzgl. der schräggestellten Glasplatte haben die gleiche Richtung. Es erfolgt keine Ablenkung, aber eine Parallelverschiebung um den Betrag  $a$ . Diese Parallelverschiebung ist um so größer, je größer die Dicke  $d$  der Glasplatte, die Brechzahl  $n'$  und der Einfallswinkel  $\varphi$  sind. Für eine Berechnung der durch die Glasplatte erzeugten Lichtstrahl-ablenkung ist der Winkel  $\alpha$  abzuleiten. Die theoretisch berechnete Richtung lässt sich dann mit der tatsächlich am Theodolit eingestellten vergleichen.

Gesucht ist also der kleine Winkel  $\alpha$  als Funktion der Strecke  $S$  zwischen den beiden Stationen, der Dicke  $d$  der Glasplatte, des Einfallswinkels  $\varphi$  und der Brechzahl der Glasplatte  $n'$ . Mathematisch kann dies folgendermaßen ausgedrückt werden:

Gesucht:  $\alpha = f(d, S, \varphi, n')$

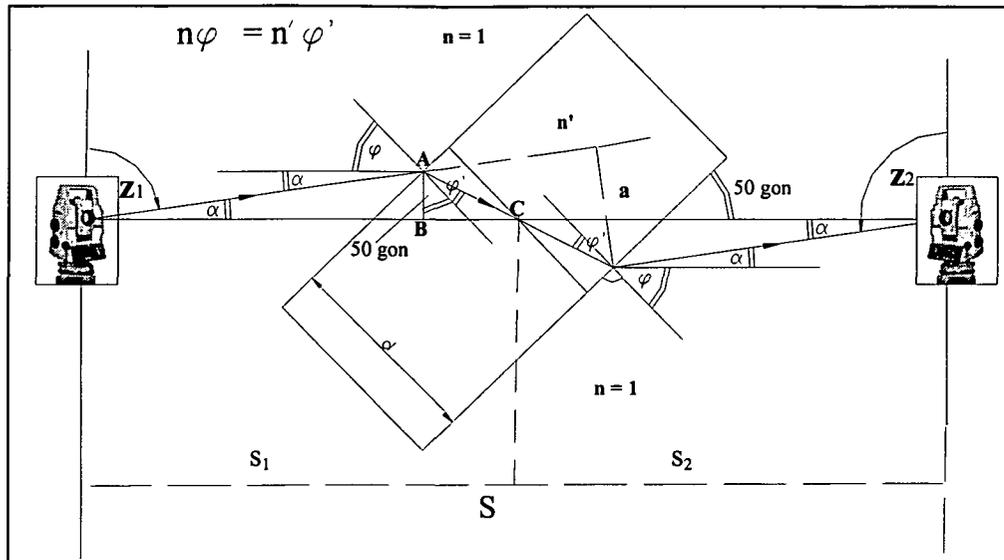


Abb. 5-17: Parallelversatz von Lichtstrahlen durch eine Glasplatte beobachtet mittels zwei Videotheodoliten (Skizze nicht maßstäblich)

Aus Abb. 5-17 und dem Lichtbrechungsgesetz (vgl. Kap. 2.2) folgt

$$n \sin(\varphi + \alpha) = n' \sin \varphi'. \tag{5.1}$$

Weiters folgt

$$s_1 \sin \alpha + s_2 \sin \alpha = a$$

$$(s_1 + s_2) \sin \alpha = a$$

$$s_1 + s_2 = S$$

und somit

$$2 \sin \alpha = a. \tag{5.2}$$

Ebenso folgt aus Abb. 5-17

$$\frac{d}{\cos \varphi'} \sin(\varphi + \alpha - \varphi') = a. \tag{5.3}$$

Da das Gleichungssystem (5.1), (5.2) und (5.3) analytisch nicht nach  $\alpha$  lösbar ist, suchen wir eine Näherungslösung durch die Annahme  $\varphi + \alpha \approx \varphi$ . Dadurch bekommen wir das folgende Gleichungssystem

$$n \sin \varphi = n' \sin \varphi', \tag{5.4}$$

$$2 \sin \alpha = a, \tag{5.5}$$

$$\frac{d}{\cos \varphi'} \sin(\varphi - \varphi') = a. \tag{5.6}$$

Aus (5.5) und (5.6) folgt

$$\begin{aligned} \frac{d}{\cos \varphi'} (\sin \varphi \cos \varphi' - \cos \varphi \sin \varphi') &= 2S \sin \alpha \\ \frac{d}{2} (\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi') &= \sin \alpha. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Aus (5.7) folgt

$$\tan \varphi = \frac{n \sin \varphi}{\sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (5.8)$$

Schließlich bekommen wir aus (5.7) und (5.8)

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{d \sin \varphi}{S} \left( 1 - \frac{n \cos \varphi}{\sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 \varphi}} \right) \right]. \quad (5.9)$$

Aus (5.5) und (5.9) folgt für die Verschiebung

$$a = d \sin \varphi \left( 1 - \frac{n \cos \varphi}{\sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 \varphi}} \right). \quad (5.10)$$

Numerisches Beispiel aus der Messanordnung (Abb. 5-19):

Gegeben:

$$d = 3.1 \text{ mm}, S = 48.5 \text{ m}, \varphi = 50 \text{ gon},$$

$$n = 1, n' = 1.5 \text{ (ist ein typischer Wert für die Brechzahl einer Glasplatte}^{13}\text{)}$$

Man erhält

$$\alpha = 1.8 \text{ mgon},$$

$$a = 1.3 \text{ mm}.$$

### 5.6.3 Auswertung und Diskussion der Messergebnisse

#### (1) Einseitige Messanordnung

Bei der einseitigen Beobachtung verlaufen die Lichtstrahlen von beiden Theodoliten parallel zum Ziel. Wie zu erwarten, zeigen beide Sensoren die gleiche Parallelverschiebung bei verschiedenen Positionen der Glasplatte (Abb. 5-18 und 5-19). In den Zeiträumen  $t_0$  bis  $t_1$  wie zwischen  $t_2$  bis  $t_3$  stand die Glasplatte senkrecht zum Lichtstrahl. In den anderen Zeiträumen  $t_1$  bis  $t_2$  und  $t_3$  bis  $t_4$  war sie um 50 gon geneigt. Die Änderung des Zenitwinkels ergab tatsächlich den berechneten Wert von 1.8 mgon. Auch die Schwankungen an beiden Stationen ist annähernd gleich.

<sup>13</sup> Der Wert für  $n'$  wurde aus *Bergmann/Schaefer (1993; Auszug aus der Tabelle 1.1, S. 51)* entnommen.

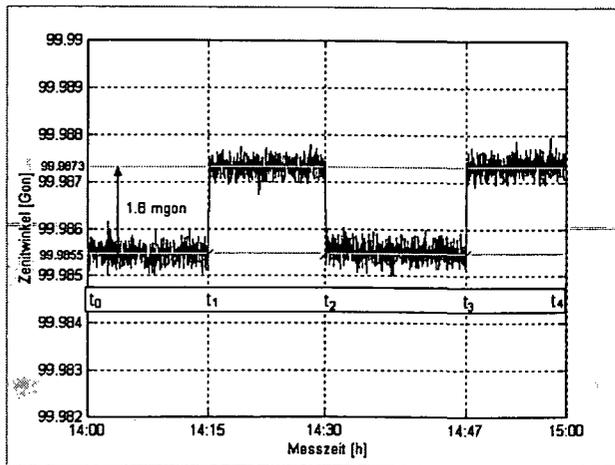


Abb. 5-18: Zenitwinkeländerung in Abhängigkeit von der Glasplattenneigung auf Station 1

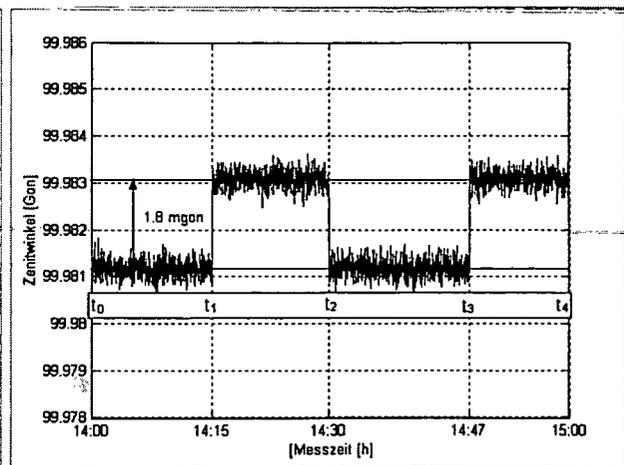


Abb. 5-19: Zenitwinkeländerung in Abhängigkeit von der Glasplattenneigung auf Station 2

(2) Gleichzeitig-gegenseitige Messanordnung

Wie aus den Abb. 5-20 und 5-21 ersichtlich ist, wird der in Station 1 auftreffende Lichtstrahl nach der ersten Neigungsänderung (Zeitraum  $t_0$  bis  $t_1$ ) der Glasplatte nach unten versetzt, der auf Station 2 auftreffende Lichtstrahl nach oben versetzt. Die Kurven zeigen also spiegelbildliches Verhalten. Wie die theoretische Ableitung und Abb. 5-17 zeigen, ist dieses Verhalten richtig. Die Änderung des Zenitwinkels hat tatsächlich auch bei der zweiseitigen Messanordnung den berechneten Wert von 1.8 mgon. Auch die Schwankungen an beiden Sensoren sind annähernd gleich.

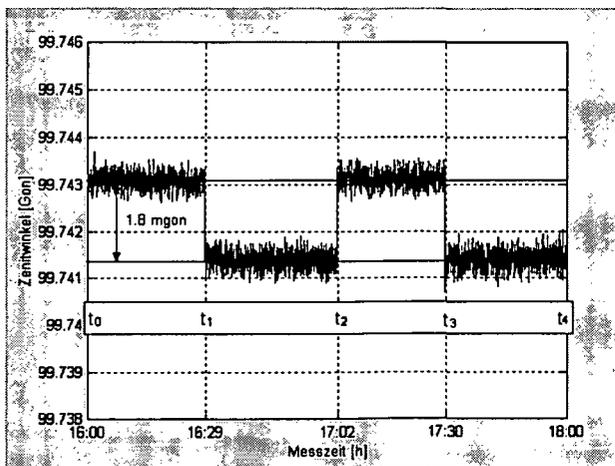


Abb. 5-20: Zenitwinkeländerung in Abhängigkeit von der Glasplattenneigung auf Station 1

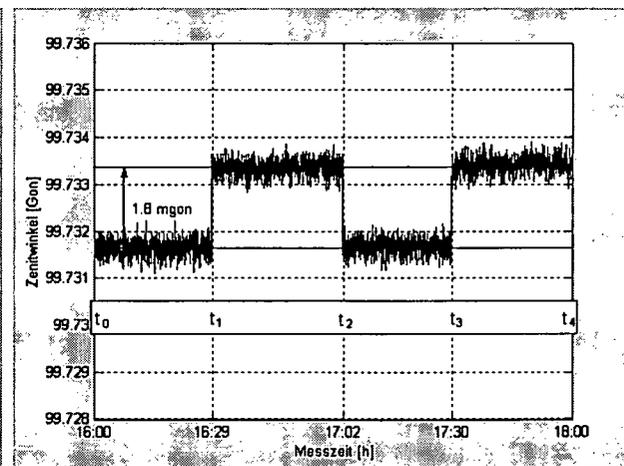


Abb. 5-21: Zenitwinkeländerung in Abhängigkeit von der Glasplattenneigung auf Station 2

Die Ergebnisse bei der einseitigen und der gleichzeitig-gegenseitigen Messanordnung in diesem Simulationsexperiment bestätigen die Funktionalität des Messsystems bzw. der verwendeten Software. Als Ergebnis dieser Messreihen kann festgehalten werden, dass die in diesem Experiment aufgestellten theoretischen Überlegungen durch die einseitigen und gleichzeitig-gegenseitigen Messanordnungen verifiziert werden konnten und der gewählte Ansatz durch die Glasplatte zur Bestimmung der Lichtstrahlablenkung theoretisch und messtechnisch gleich ist.

## 6 Auswertung der Zeitreihen

### 6.1 Korrelationsstatistische Auswertung der Messungen

In der Zeitreihenanalyse werden Beobachtungen als Zufallsgrößen betrachtet, die eine Funktion der Zeit oder des Ortes sind. Hier soll von einer Funktion der Zeit ausgegangen werden. Mathematisch-statistische Parameter sind dabei wesentliche Kriterien zur Beschreibung und Interpretation beobachteter Zeitreihen. Dabei ist eine zuverlässige Bestimmung der Parameter sehr wichtig, denn unter speziellen Umständen können unsichere Kenngrößen und Funktionen zu Fehlerinterpretationen führen. Bei neueren geodätischen Messverfahren mit kontinuierlicher automatisierter Registrierung der Messergebnisse reicht die Auswertetechnik (einfache Bestimmung der Standardabweichung, bzw. Varianz) nicht aus. Im Unterschied zu den herkömmlichen geodätischen Messverfahren ist die Anzahl der Messwerte in diesen Messreihen relativ groß und erfordert eine der Problemstellung entsprechende Auswertetechnik. In diesem Fall ist es erforderlich, die Methoden der sogenannten Zeitreihentheorie anzuwenden (Taubenheim, 1969; Niemeier, 1980), da in den Messreihen sowohl zufallsbedingte Fehler (Rauschen) als auch die zu bestimmende Größe (Signal<sup>14</sup>) enthalten sind.

Die hier zu untersuchenden Zenitwinkelschwankungen sind verursacht durch Turbulenzeigenschaften der Atmosphäre. Für weitere Berechnungen (ermittelten Höhenunterschied vgl. Kap. 7) setzt man einen stationären<sup>15</sup>, stochastischen Prozess voraus. Unter dieser Hypothese ist die Autokovarianz  $C_{xx}$  einer Zeitreihe  $x(t)$  oder die Kreuzkovarianz  $C_{xy}$  nur von der zeitlichen Verschiebung (Abstand)  $\tau = t_2 - t_1$  abhängig. Die statistischen Eigenschaften, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Aufgabestellungen von Interesse sind, sind der Mittelwert, die Varianz bzw. die Standardabweichung und die Autokorrelationsfunktion der Messreihen. In diesen Vorbemerkungen sollen die Auswerteformeln für eine in diskreten Werten vorliegende Zeitreihe zusammengestellt werden. Für die vorliegende Kenngröße soll keine Formelableitung gegeben werden, da die entsprechende Literatur sehr zahlreich vorhanden ist (z.B. Taubenheim, 1969; Koch und Schmidt, 1994; Schlitten und Stretberg, 1997; Niemeier, 2002). Es werden im folgenden einige Kenngrößen mit ihren Algorithmen vorgestellt:

Der Mittelwert  $\bar{x}$  einer Zeitreihe ist der durchschnittliche Wert der Zeitreihe.

$$\mu_0 = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

Die Varianz  $s^2$  einer Zeitreihe ist die durchschnittliche quadratische Abweichung vom Mittelwert.

$$\sigma_0^2 = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (6.2)$$

Um ein Maß zu finden, dass dem Absolutabstand näher ist, zieht man die Wurzel aus der Varianz. Die so erhaltene Größe heißt *Standardabweichung* und ergibt sich zu

$$s_0 = \sqrt{s^2}. \quad (6.3)$$

<sup>14</sup> Ein Signal ist eine physikalische Größe, die Informationen beinhaltet (Kahmen, 1980).

<sup>15</sup> Ein Prozess ist stationär, wenn er sich in einem stabilen Zustand befindet und sich nicht mit der Zeit entwickelt (Koch und Schmidt, 1994; S. 162).

Die **Autokovarianzfunktion** bietet eine Möglichkeit, periodisches Verhalten einer Zeitreihe zu erkennen. Sie ist die wichtigste Kenngröße einer Zeitreihe, in der die zeitliche Reihenfolge der Messwerte berücksichtigt wird und die alle für die weitere Bearbeitung wesentlichen Informationen enthält. Die Rechenformel zur Bestimmung der Autokovarianzfunktion lautet (Niemeier, 1980):

$$C'_{xx}(\tau) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}). \quad (6.4)$$

Dabei ist  $k = 0, 1, 2, \dots, m$ ,  $m \leq n/10$ ,

$\tau = k\Delta t$  die Zeitverschiebung,

$\Delta t$  der zeitliche Abstand der äquidistanten Messwerte und

$n$  die Anzahl der Beobachtungen.

Es ist leicht zu erkennen, dass die Autokovarianzfunktion an der Stelle  $\tau = 0$  in die Varianz übergeht. Statt der Autokovarianzfunktion wird oft die Autokorrelation  $R(\tau)$  eingeführt, die man aus  $C'_{xx}(\tau)$  durch einfache Normierung mit  $\sigma_0^2$  erhält

$$R(\tau) = \frac{C'_{xx}(\tau)}{\sigma_0^2}. \quad (6.5)$$

Durch die Normierung sind verschiedene Autokovarianzfunktionen miteinander vergleichbar. Sinkt  $R(\tau)$  sehr schnell auf Werte nahe Null, so sind die Messwerte untereinander nur wenig korreliert (Niemeier, 2002). Ihr Betrag ist stets  $|R(\tau)| \leq 1$ .

Nach El Sheimy (2002) ist die Autokorrelation

$$R(t) = \sigma^2 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

d.h.

$$R(t) = \sigma^2 e^{-1} = \frac{\sigma^2}{e} = \frac{\sigma^2}{2.7} = 0.3678\sigma^2 \quad (6.6)$$

wobei mit  $\sigma^2$  die Varianz des Rauschens und die Schätzung der Korrelationszeit auf  $t = \tau$  bezeichnet ist. Abb. 6-1 zeigt ein Beispiel für eine Autokorrelationsfunktion.

Die **Autokorrelation** ist charakteristisch für jeden stochastischen Prozess und sorgt dafür, dass jeder Messwert der Abtastfolge aus einer Realisierung des Prozesses bereits eine gewisse Menge von Information über die vorhergehenden und die nachfolgenden Messwerte enthält (Pelzer, 1980; Taubenheim, 1969).

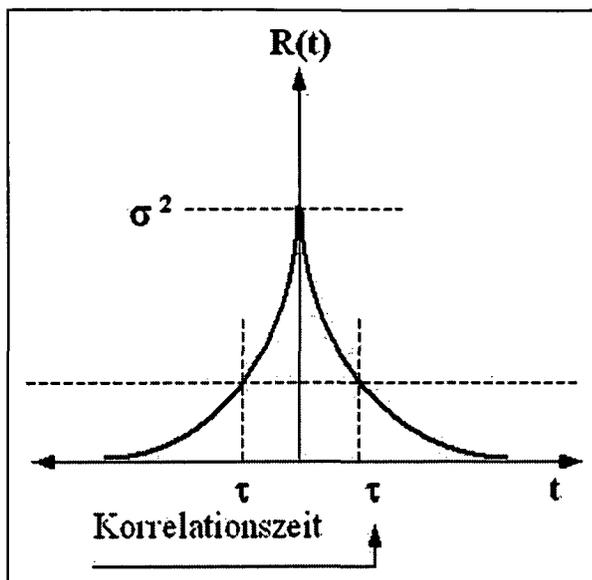


Abb. 6-1: Autokorrelationsfunktion (nach El Sheimy, 2002)

Um dieses Kapitels nicht zu überlasten, wird nicht näher auf die umfangreiche Theorie der kontinuierlichen Prozesse und den sich ergebenden Berechnungsformeln eingegangen. Ausführliche Ableitungen und Anleitungen dazu finden sich in (Taubenheim, 1969; Niemeier, 1980, Koch und Schmidt, 1994; Schlitten und Stretberg, 1997).

## 6.2 Filterung von Zeitreihen

Unter Filterung wird jede Operation verstanden, die in eindeutiger Weise eine vorhandene Zeitfunktion  $x(t)$  in eine andere  $X(t)$  überführt. Zwischen den Zeitfunktionen besteht folgende Grundbeziehung (Niemeier, 1980):

$$x(t) = L \cdot X(t) \quad (6.7)$$

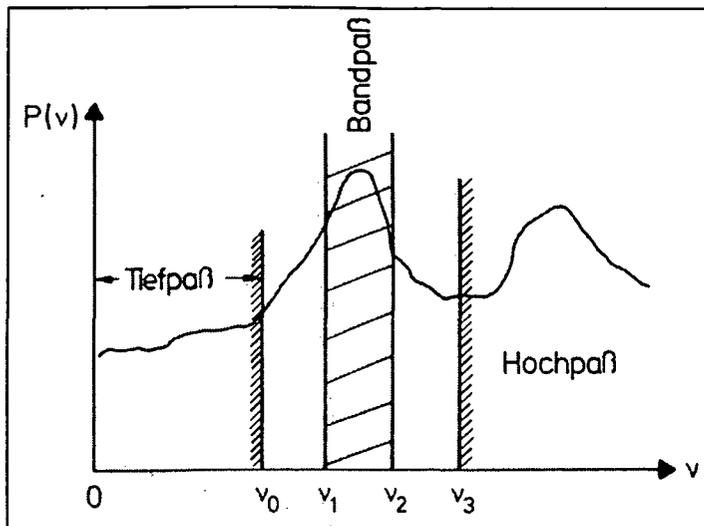
wobei  $L$  ein linearer Operand ist.

Die Filterwirkung soll darin bestehen, nicht benötigte Informationen wie bandbegrenztetes Rauschen und weißes Rauschen möglichst zu eliminieren. Je nach den gewünschten Eigenschaften der Folgezeitreihe unterscheidet man zwischen einer Tiefpass-, Hochpass- oder Bandpassfilterung, je nachdem welche Frequenzen des Spektrums man nicht benötigt. Für diese charakteristischen Filterarten sind die durchgelassenen Frequenzen etwas vereinfacht in Abb. 6-2 dargestellt. Für den ermittelten Höhenunterschied in dieser Arbeit wurden Tiefpassfilter verwendet. Um geeignete Filter zu finden, müssen die Eigenschaften des Signals und des weißen Rauschens bekannt sein. Diese Eigenschaften lassen sich durch den Einsatz der Zeitreihenanalyse finden. Zuvor muss aber der Trend von der Zeitreihe abgespalten werden. Für den ermittelten Höhenunterschied (vgl. Kap. 7) in dieser Arbeit wurden Tiefpassfilter verwendet.

### 6.2.1 Tiefpassfilter

Tiefpassfilter werden benötigt, wenn ein vorwiegend niederfrequentes Signal von einem vorwiegend hochfrequenten Rauschen befreit werden soll, d.h. die hochfrequenten Anteile sollen „herausgefiltert“ werden. Liegt eine Zeitreihe vor, die kein ausgeprägtes Signal besitzt bzw. deren Signal von einem starken weißen Rauschen überlagert ist, soll ein einfaches Tiefpassfilter eingesetzt werden. Hierzu wird die Zeitreihe in Einzelintervalle aufgeteilt und pro Zeitintervall das arithmetische Mittel aus den darinliegenden Beobachtungswerten berechnet. Die neue

Anzahl der Werte der gefilterten Zeitreihe ist somit identisch mit der Zahl der gewählten Einzelintervalle. Als Bezugszeit pro Wert bietet sich die mittlere Zeit des der Mittelberechnung zugrunde liegenden Intervalls an.



**Abb. 6-2:** Charakteristische Filtereigenschaften (aus Niemeier, 1980)

Bei der Hochpassfilterung ist es umgekehrt, man will die langsamen Variationen unterdrücken, und bei der Bandpassfilterung sollen nur bestimmte Frequenzbereiche in der Folgezeitreihe enthalten sein. Die Theorie der Filter ist ein äußerst komplexes Problem und soll hier nicht näher erörtert werden. Ausführliche Ableitungen und Anleitungen dazu finden sich in (Taubenheim, 1969; Kahmen, 1978; Niemeier, 1980; Pelzer, 1980).

## 7 Feldexperimente

### 7.1 Beschreibung der Feldversuche-Aufbau und Messablauf

Es werden Beobachtungen an drei verschiedenen Orten, die sich durch ihre Topographie unterscheiden, durchgeführt. Weiters fanden die Beobachtungen zu verschiedenen Jahreszeiten, unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen sowie veränderten Vegetations- und Bodenverhältnissen statt. Die Experimente begannen mit kurzen Punktabständen und wurden dann mit immer längeren fortgesetzt.

- Der erste Test diente zur Überprüfung der Instrumente und des Modells auf einer kurzen Distanz.
- Der zweite und dritte Test sollte überprüfen, wie sich Höhenübertragungen über größere Distanzen mit automatischer Zielerfassung ausführen lassen.

### 7.2 Beobachtungen auf einer 46.0 m langen Strecke

#### 7.2.1 Beschreibung des Testfeldes

Die Beobachtungsstrecke befindet sich in einem Hof, der von Gebäuden umgeben ist (s. Abb. 7-1). Die Strecke weist gleichen Untergrund auf. Während der Versuche gab es eine gleichmäßige Sonnenbestrahlung.

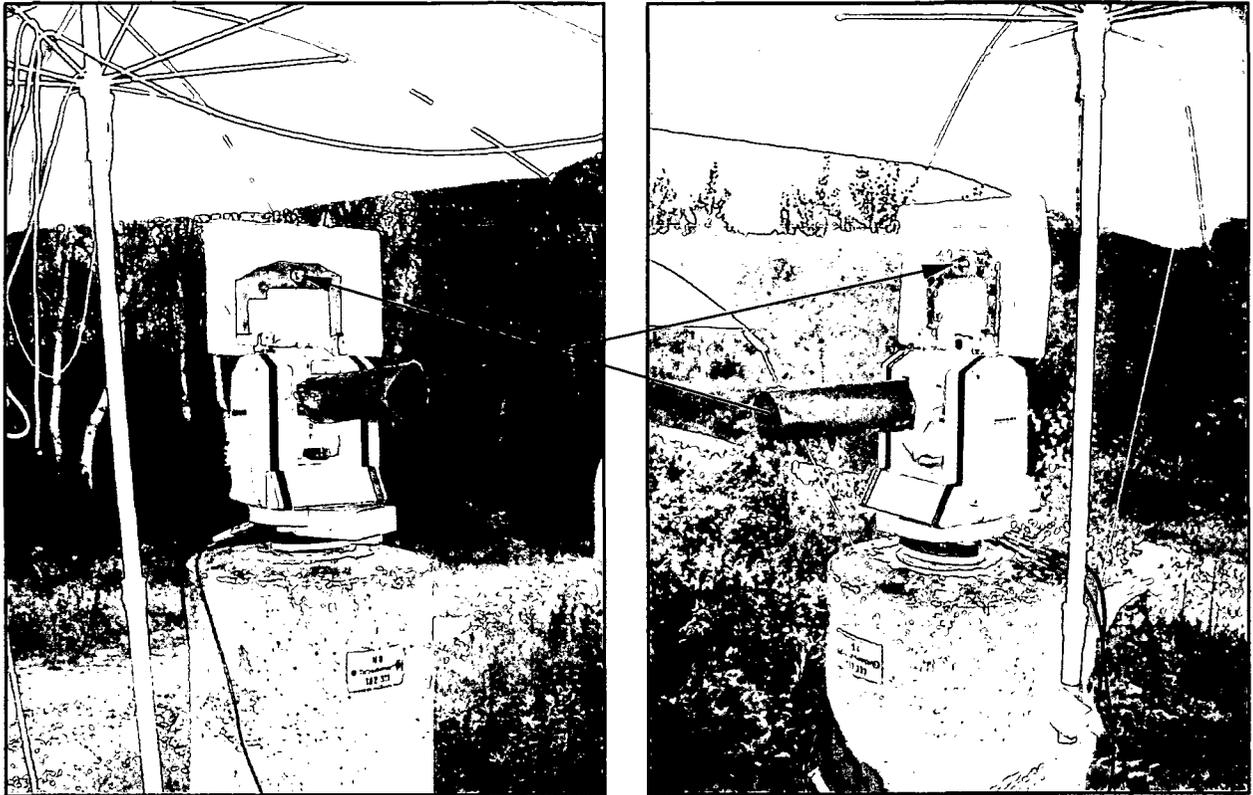


Abb. 7-1: Messgebiet im Hof des Institutsgebäudes der TU Wien

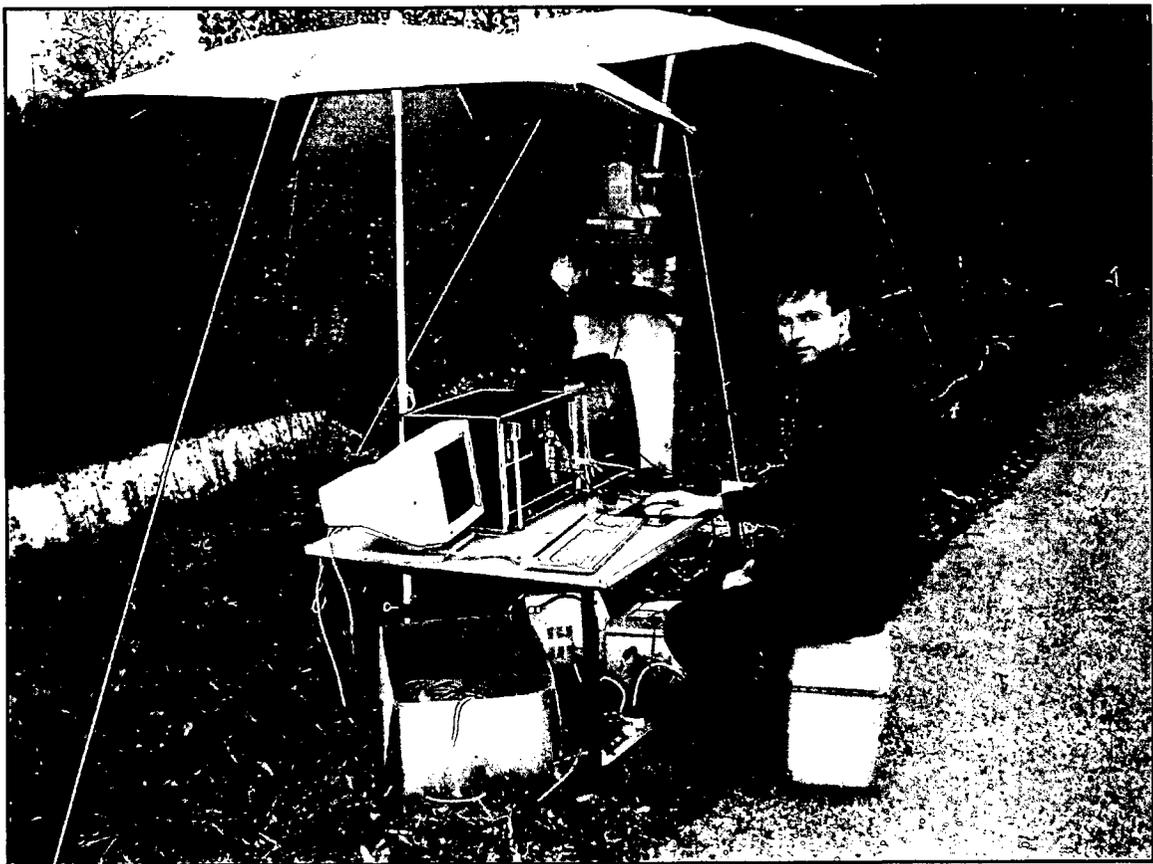
Um den Einfluss des Umfeldlichtes gering zu halten, wurden folgende Maßnahmen getroffen (Abb. 7-2):

- die Fernrohre der Videotheodolite wurden je durch ein Rohr von ca. 15-20 cm Länge geschützt,
- der Hintergrund der Bügel, welche die Zielmarken tragen, wurde durch einen viereckigen Schirm abgedeckt, um einen Lichteinfall von hinten zu vermeiden.

Diese Schutzmassnahmen wurden immer bei allen Beobachtungsserien eingesetzt. Abb. 7-3 zeigt das Instrumentarium einer Beobachtungsstation.



**Abb. 7-2:** Schutz des optischen Systems gegen Umfeldlicht



**Abb. 7-3:** Versuchsaufbau: Steuerrechner, Videotheodolit (Photo: Dr. Retscher)

## 7.2.2 Wetterbedingungen

Es herrschte diffuse Sonnenbestrahlung vor, da der Himmel leicht bedeckt war. Während der gesamten Versuchszeit war die Ausleuchtung der Versuchsstrecke homogen.

## 7.2.3 Berechnungsergebnisse

### 7.2.3.1 Zenitwinkel

Die Zenitwinkel wurden mit einer Frequenz von 5 Hz beobachtet. Die Beobachtungsserie begann um 17:00 und erstreckte sich über eine Stunde. Ein visueller Vergleich (ohne numerische Analyse) der graphisch aufgetragenen Messwerte der Zenitwinkel auf beiden Stationen (Abb. 7-4) zeigt, dass die Zenitwinkel einen symmetrischen Verlauf haben, d.h. sie verhalten sich gleich. Die Änderungen betragen insgesamt  $\pm 0.8$  mgon. Aber auch die kurzperiodischen Fluktuationen erreichen Werte von  $\pm 1.0$  mgon. Die trendhafte Veränderung der Zenitwinkel korreliert mit der Lufttemperatur (Abb. 7-5). Für alle folgenden Berechnungen (Analysen) und Abbildungen wurde die Mathematik-Software MATLAB verwendet.

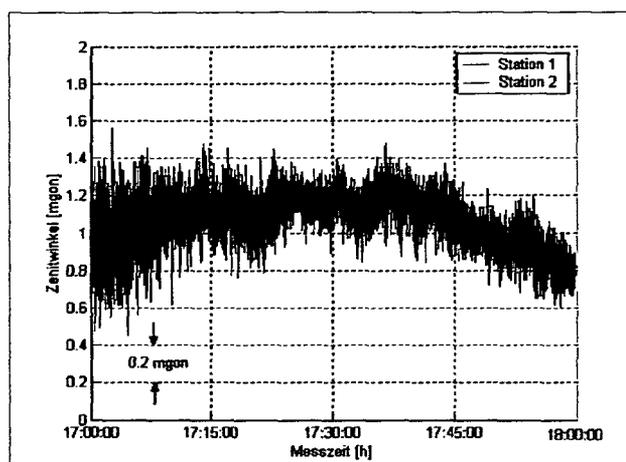


Abb. 7-4: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 und 2

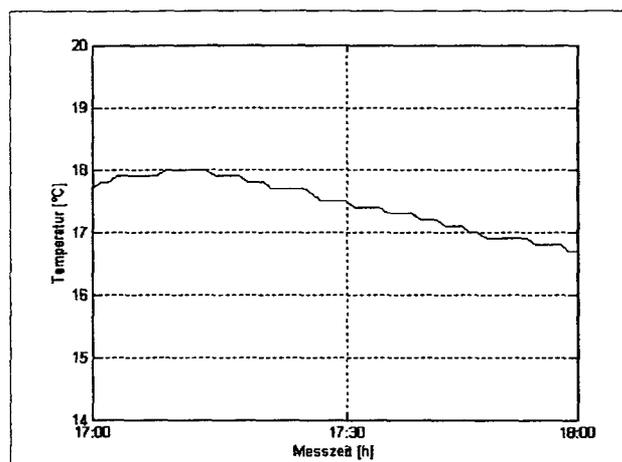


Abb. 7-5: Gemessene Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

### 7.2.3.2 Meteorologische Daten

Die Lufttemperatur (Abb. 7-5) änderte sich um  $1^{\circ}\text{C}$  in einer Stunde. Am Anfang zeigte sie einen kleinen Anstieg, dann stabilisiert sie sich, und ab 17:15 Uhr sank sie ab.

### 7.2.3.3 Varianzen der Zenitwinkel

Mit der Berechnung von Varianzen für bestimmte Messepochen lassen sich die kurzperiodischen Schwankungen beschreiben. Sie werden anhand Gl. (6.2) berechnet. Die Abb. 7-6 und 7-7 stellen die Varianzen der Zenitwinkel dar, welche für 15 Minuten-Intervalle auf Station 1 und 2 berechnet wurden. Am Anfang zeigen die Abbildungen größere Varianzen. Wie schon aus Abb. 7-4 zu erkennen ist, werden die Varianzen in den ersten 15 Minuten deutlich kleiner und behalten dann ihre niedrigen Werte bei.

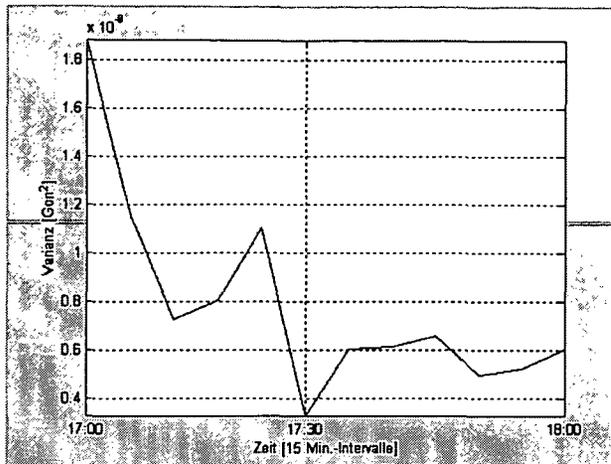


Abb. 7-6: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 1 [Messepochen<sup>16</sup> von je 15 min]

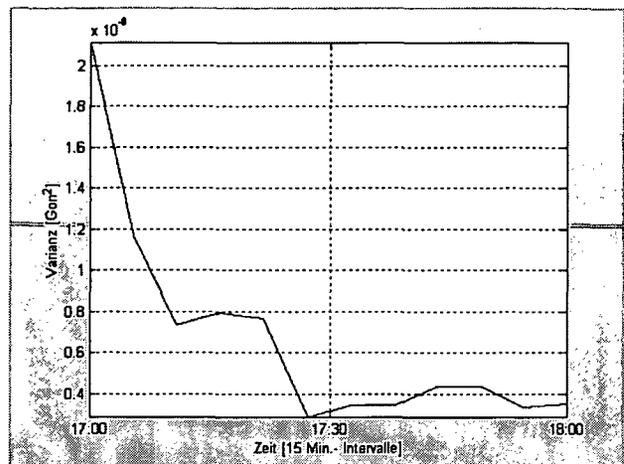


Abb. 7-7: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 2 [ME von je 15 min]

### 7.2.3.4 Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln

Die Höhenunterschiede wurden anhand von Gl. (3.1) s. Kap. 3.1.2 berechnet. Der zeitliche Verlauf des trigonometrischen Höhenunterschieds (Abb. 7-8) zwischen beiden Standpunkten kann durch eine Gerade approximiert werden, die durch den Mittelwert aller Messungen festgelegt ist. Er entspricht dem Soll-Wert des geometrischen Nivellements mit einer Genauigkeit von 0.2 mm.

Auffällig ist, dass der gewonnene Höhenunterschied (s. Abb. 7-8) im gesamten Messintervall keine trendartigen Schwankungen aufweist, es überwiegen kurzperiodische Fluktuationen. Um herauszufinden, wie sich die Fluktuationen kurzperiodisch unterdrücken lassen, wurden die Höhenunterschiede durch Mittelbildungen geglättet. Die Mittelbildungen, die wie ein Tiefpassfilter (s. Kap. 6) wirken, wurden mit 1 s (Mittelwert aus je 5 Daten), 1 min-, 2 min-, 3 min-, 4 min- und 5 min-Epochen durchgeführt. Die Abb. 7-9 bis 7-15 zeigen die durch das Tiefpassfilter geglätteten Werte. Man erkennt, dass die für die einzelnen Messepochen berechneten Höhenunterschiede deutlich geringere Werte aufweisen, wenn die Dauer der Epochen verlängert wird. Tab. 7-1 zeigt die maximalen Schwankungen für die Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Sie sind deutlich geringer als die der Originaldaten und verringern sich um nahezu eine Größenordnung, wenn die Epochenlänge von 1 s auf 5 min ausgedehnt wird. Der Höhenunterschied lässt sich mit 3 min-Epochen bereits genauer bestimmen als sich die Kalibrierung unter Laborbedingungen ausführen lässt (vgl. Kap. 5.5).

Zeitintervall	max. Schwankungen	Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen
0.2 s (Originaldaten)	0.25 mm	0.05 mm
1 s (gemittelt)	0.18 mm	0.03 mm
1 min (gemittelt)	0.10 mm	0.02 mm
2 min (gemittelt)	0.08 mm	0.02 mm
3 min (gemittelt)	0.05 mm	0.01 mm
4 min (gemittelt)	0.04 mm	0.01 mm
5 min (gemittelt)	0.03 mm	0.01 mm

Tab. 7-1: Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge

<sup>16</sup> Im weiteren Text nur ME genannt.

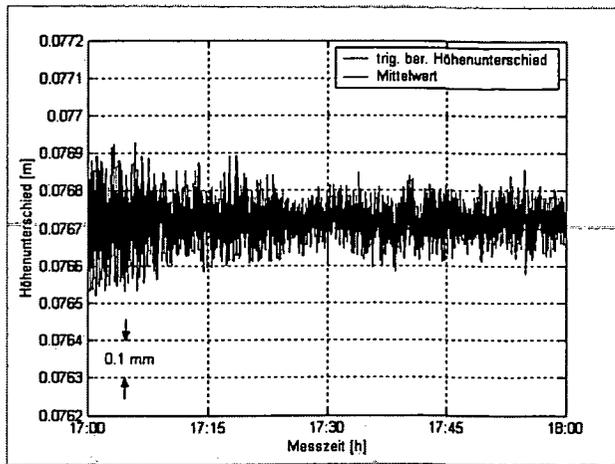


Abb. 7-8: Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)

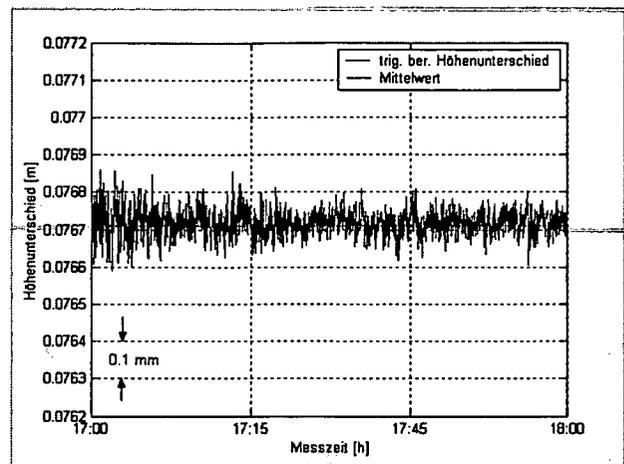


Abb. 7-9: Höhenunterschiede der 1 s-Epochen

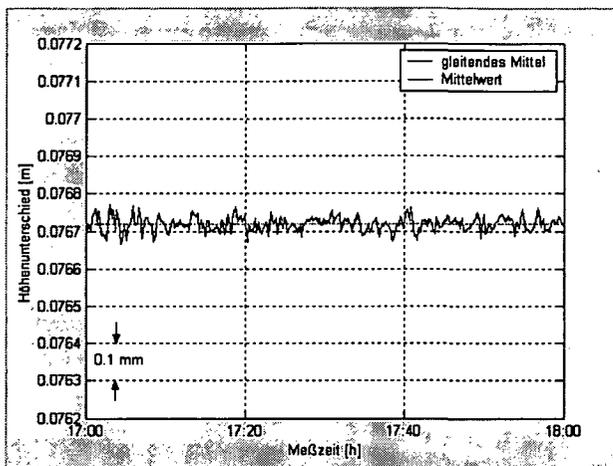


Abb. 7-10: Höhenunterschiede der 1 min-Epochen

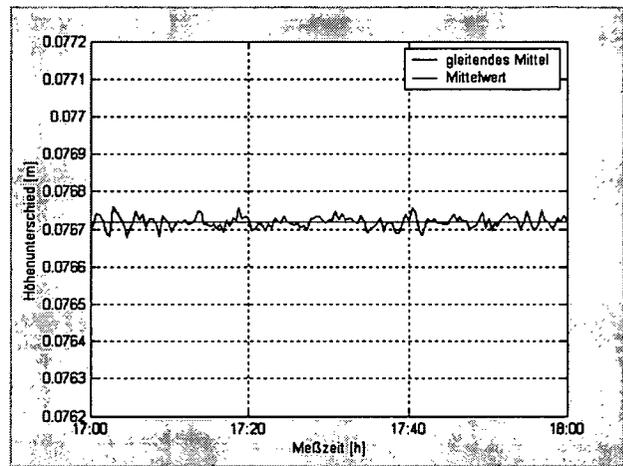


Abb. 7-11: Höhenunterschiede der 2 min-Epochen

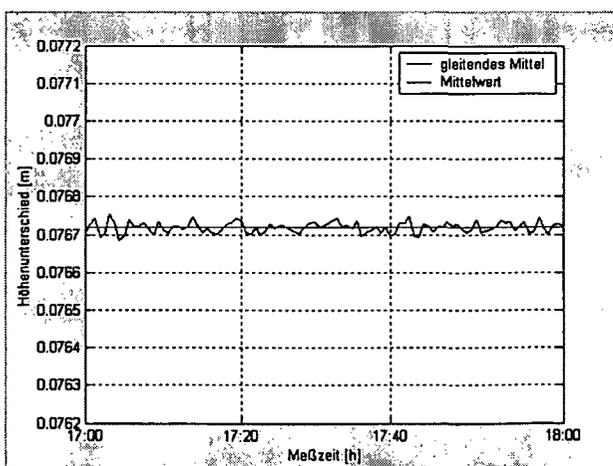


Abb. 7-12: Höhenunterschiede der 3 min-Epochen

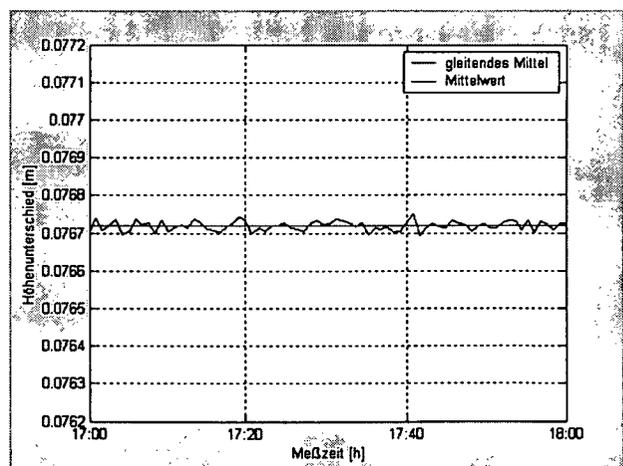


Abb. 7-13: Höhenunterschiede der 4 min-Epochen

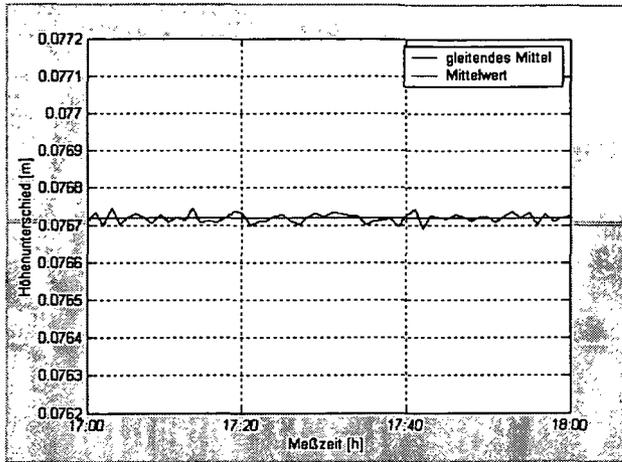


Abb. 7-14: Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

7.2.3.5 Statistische Analyse der Höhenunterschiede

Wiederholte Beobachtungen der gleichen Zenitwinkel können miteinander korreliert sein. Diese physikalischen Korrelationen sind abhängig vom Zustand der Atmosphäre, dem Stand der Sonne und vom Profil (Bruns, 1976).

Die Autokorrelationsfunktionen für die Messreihen der Abb. 7-8 bis 7-14 sind in den Abb. 7-15 bis 7-23 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten  $4.5 \cdot 0.2 = 0.9$  s. In diese Zeitspanne fallen etwa 5 berechnete Höhenunterschiede (vgl. Abb. 7-16). Mit Zunahme der Epochenlänge geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 7-18 bis 7-24). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger 1 min (vgl. Abb. 7-20) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Es treten folglich praktisch keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse weitestgehend eliminiert werden. Die Standardabweichungen der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen sind in Spalte 3 der Tab. 7-1 wiedergegeben. Die maximalen Werte sind etwa um den Faktor 4 größer als die Standardabweichungen.

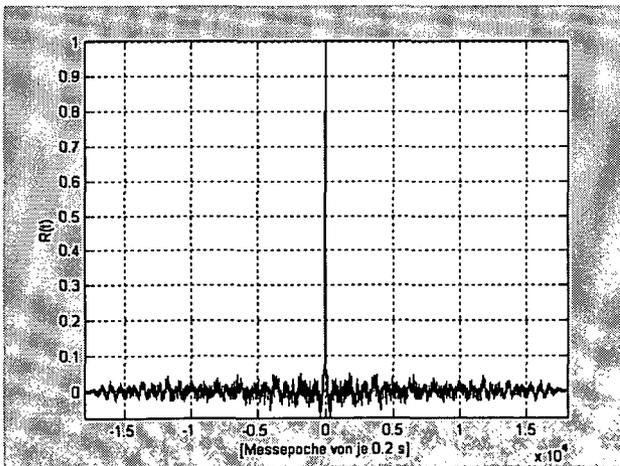


Abb. 7-15: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 0.2 s]

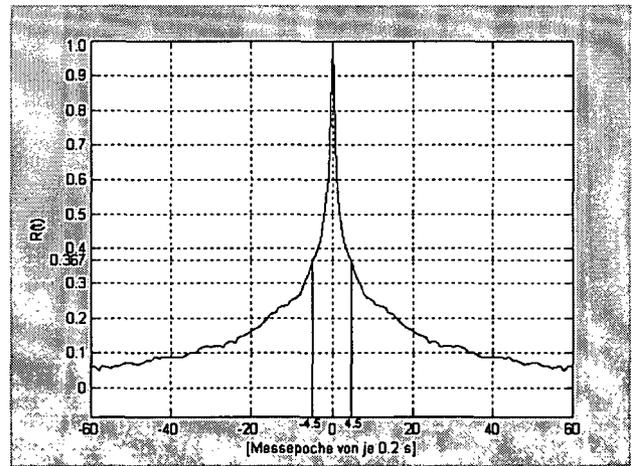


Abb. 7-16: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

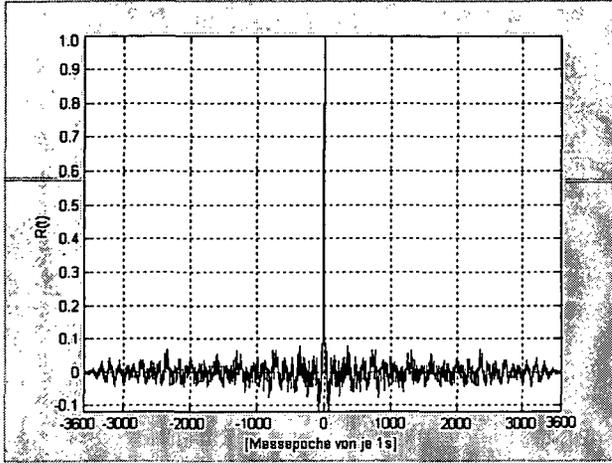


Abb. 7-17: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 1 s-Epochen

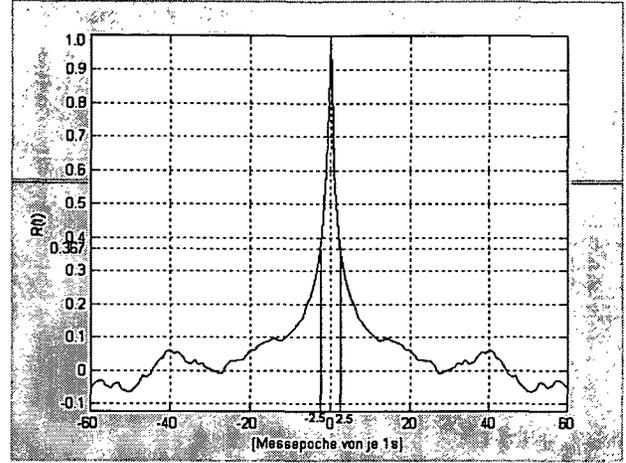


Abb. 7-18: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

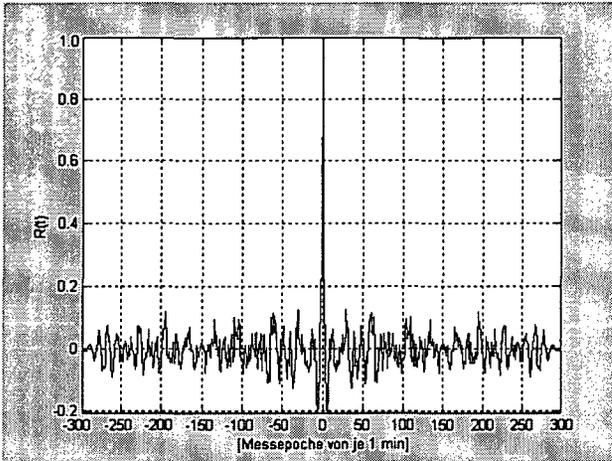


Abb. 7-19: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 1 min-Epochen

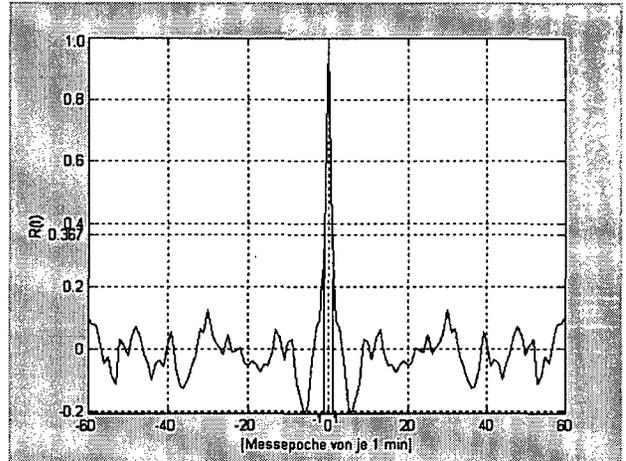


Abb. 7-20: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

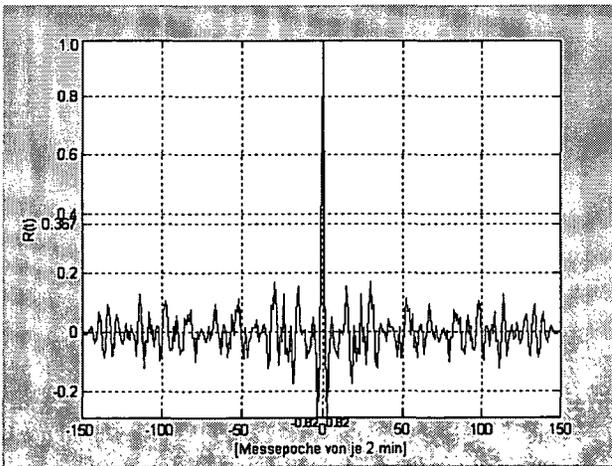


Abb. 7-21: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 2 min-Epochen

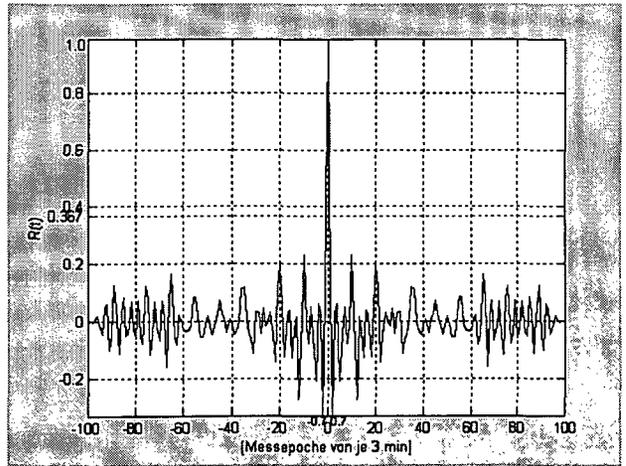


Abb. 7-22: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 3 min-Epochen

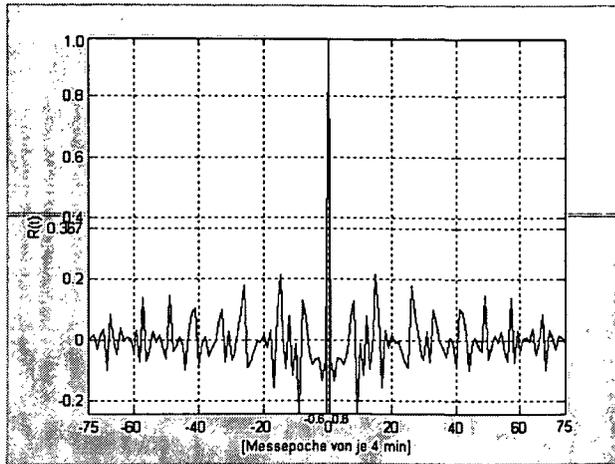


Abb. 7-23: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 4 min-Epochen

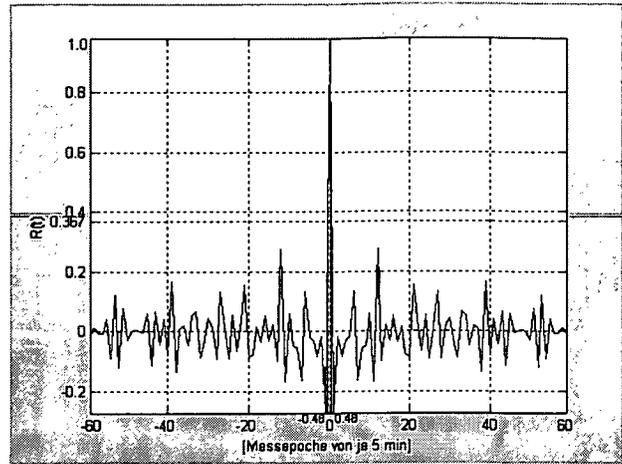


Abb. 7-24: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen

### 7.2.3.6 Kurze Zusammenfassung

Aus Tabelle 7-1 und Abb.7-20 ist zu erkennen, dass Epochen  $< 1$ -min sich im Sinne eines Feinnivellements als optimal erweisen, da die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Epochenmittel dann nur noch 0,02...0,03 mm betragen. Epochenmittel aus Epochen  $< 1$  min können praktisch als praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Unterschiedliche Varianzen der Zenitwinkel haben bei 1 min-Epochenmittelwerten keinen Einfluss auf das Ergebnis.

## 7.3 Beobachtungen auf einer 125.10 m langen Strecke

### 7.3.1 Beschreibung des Ortes

Die Messungen fanden auf dem Gelände des Kraftwerks Wien-Simmering (Abb. 7-25) statt. Die Beobachtungsstrecke beträgt 125.10 m und verläuft entlang einer unbeschatteten Strasse (Abb. 7-26). Das Gefälle ist konstant und auf der Oberfläche wächst Rasen. Es sind somit alle Voraussetzungen für einen symmetrischen Verlauf des Beobachtungsstrahls gegeben (Kap. 3.1.2). Diese Beobachtungsstrecke wurde ausgewählt, weil die beiden Endpunkte relativ leicht zugänglich sind und ein Stromanschluss an beiden Seiten vorhanden ist.

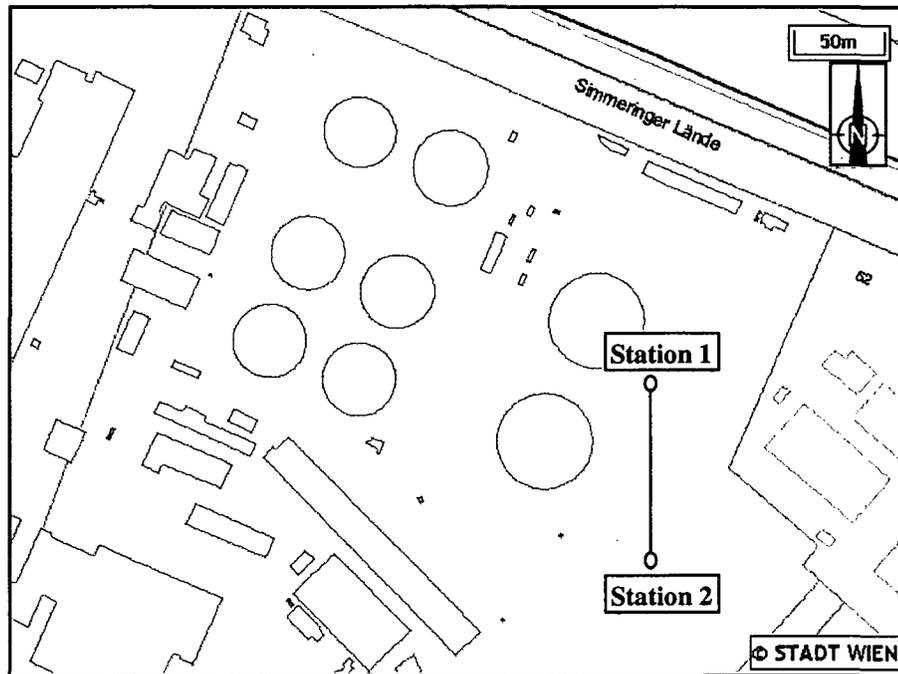


Abb. 7-25: Testgebiet am KW- Simmering (Ausschnitt)

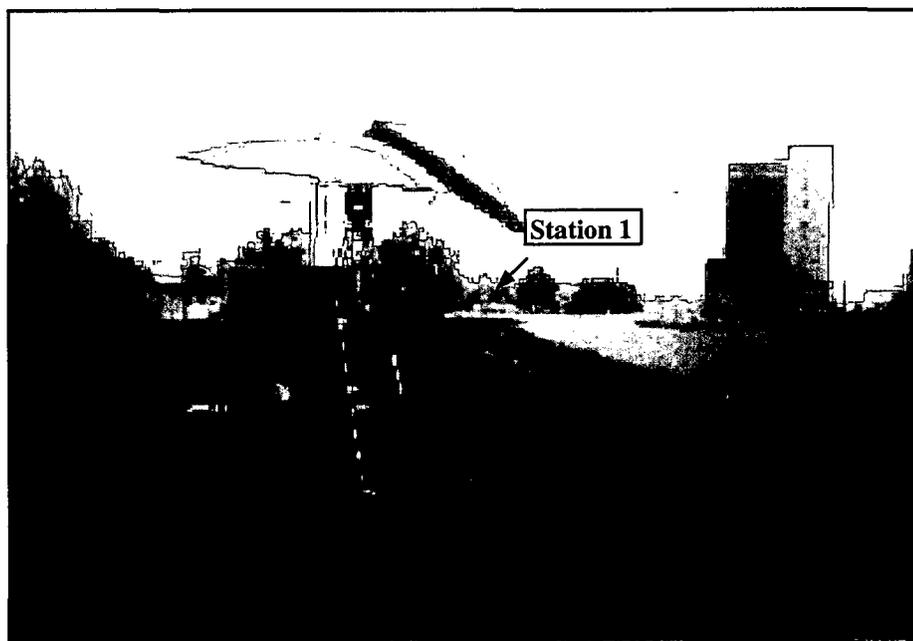


Abb. 7-26: Aufbau der Beobachtungsstationen am Messgebiet KW-Simmering

### 7.3.2 Messungen

Die Messungen wurden am 10.10.2001 gegen 12:30 Uhr begonnen und erstreckten sich bis 12:30 Uhr am nächsten Tag. Es wurde simultan und ununterbrochen aufgrund der Ergebnisse des vorausgehenden Kapitels 7.2 (s. Abb. 7-16), mit einer Frequenz von 1 Hz beobachtet. Gleichzeitig wurden meteorologische Parameter (Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) erfasst. Die gleichzeitige automatische Erfassung der meteorologischen Parameter ermöglicht für jede Messreihe einen detaillierten Einblick in die atmosphärischen Bedingungen.

### 7.3.3 Wetterbedingungen

Am ersten Tag (10.10.2001) gab es dichte Bewölkung (8/8)<sup>17</sup>. Die Beobachtungsstrecke war daher zu Beginn der Messungen diffus beleuchtet. Am späteren Nachmittag begann der Himmel langsam aufzuklären (zeitweilige Aufheiterungen), wodurch die Sonne sich nur kurz durchsetzen konnte (16:20-16:35). Der Wind wehte ununterbrochen (vgl. Abb. 7-29), die Windstärke betrug bis zu 4 m/s. In der Nacht begann der Himmel aufzuklären. Der Wind war schwach abgesehen von kurzen Unterbrechungen (vgl. der Zeitraum von 19:00-05:40 in der Abb. 7-29).

Am zweiten Tag (11.10.2001) setzte sich die Sonne durch und es gab starke Sonneneinstrahlung mit Temperaturen bis 24°C. Der Himmel war wolkenlos und der Wind wehte ununterbrochen (vgl. Abb. 7-29); die Windstärke betrug bis zu 7 m/s.

### 7.3.4 Berechnungsergebnisse

#### 7.3.4.1 Zenitwinkel

In Abb. 7-27 ist das Ergebnis der simultan über 24-Stunden auf beiden Stationen gemessenen Zenitwinkel graphisch dargestellt. Sie verhalten sich weitestgehend gleich (symmetrischer Verlauf). Der Tagesgang der Refraktion ist wegen der sich ändernden Wetterlage nicht so deutlich ausgeprägt. Die Zenitwinkel beider Stationen nehmen im Laufe des Nachmittags ab und erreichen gegen 20:10 ihr Minimum. In der Zeit von 21:00 bis 05:40 zeigen die Zenitwinkel einen ausgeglichenen Verlauf sowie drei Minima; während dieser Zeit (vgl. Abb. 7-27) war es windstill. Unmittelbar nach Sonnenaufgang (ca. 7:00 Uhr) traten bei einem starken Temperaturanstieg (vgl. Abb. 7-28) außerordentlich starke Luftturbulenzen auf, welche die Zenitwinkel stark beeinflusst haben. Im weiteren Verlauf des Morgens am 11.10.2001 nahmen die Zenitwinkel stetig zu und erreichten gegen 08:30 ihr Maximum. Nachher stabilisierten sie sich in den darauffolgenden zwei Stunden. Die größten Zenitwinkelschwankungen wurden zwischen 10:00 und 11:00 Uhr beobachtet. Durch die Sonneneinstrahlung bei Tag entstanden vertikale Luftströmungen, die einer stabilen Temperaturschichtung entgegenwirkten (vgl. Kap. 2). In den Messungen bei Nacht traten die kleinsten Fluktuationen (geringe Schwankungen) der Zenitwinkel (vgl. Zeitraum ab 20:30-05:00, Abb. 7-27) auf. Die Zenitwinkel schwankten über 24 Stunden um ca.  $\pm 14$  mgon. Die kurzperiodischen Fluktuationen betragen bis zu 16 mgon.

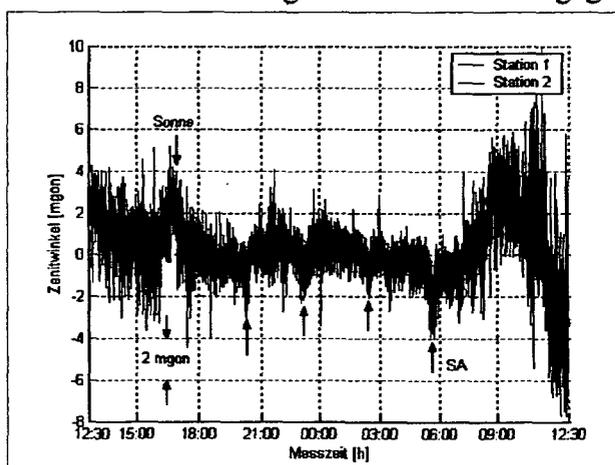


Abb. 7-27: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 und 2 (Originaldaten)

<sup>17</sup> Bewölkungsgrad in Prozent der Himmelsbedeckung.

7.3.4.2 Meteorologische Daten

(1) Lufttemperatur

Abb. 7-28 zeigt den Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit. Sie hat am Anfang einen ausgeglichenen Verlauf. Ab 16:40 Uhr sinkt sie bis 05:40 des nächsten Tages schnell ab und erreicht ihr Minimum kurz vor 6:00 Uhr. Da sich am nächsten Tag die Sonne durchsetzte, stieg die Temperatur schnell an. Es zeigte sich eine relativ hohe Korrelation zwischen Temperatur und der trendhaften Veränderung der Zenitwinkel bis 09:00 Uhr. Im vorliegenden Fall bedeutet das, dass sich die Temperaturgradienten mit der Zeit ähnlich wie die Temperaturen selbst änderten (vgl. *Deichl und Reinhart, 1969*). Ab 08:30 stimmte der Verlauf der Zenitwinkel nicht mehr mit dem Verlauf der Temperatur überein. Die erstaunlich gute Korrelation der Temperaturen und der Zenitwinkel von Beginn der Messungen bis 8:30 Uhr ist interessant. Diese Korrelation war nicht von vornherein zu erwarten, weil die Zenitwinkel in erster Linie vom Temperaturgradienten, also von der Änderung der Temperatur mit der Höhe abhängen und erst in zweiter Linie von der Temperatur und dem Luftdruck selbst (*Schelling, 1982*). Wie Abb. 7-31 zeigt, treten die Maxima und Minima der Gradienten gegenüber denen der Temperatur zeitlich verzögert auf.

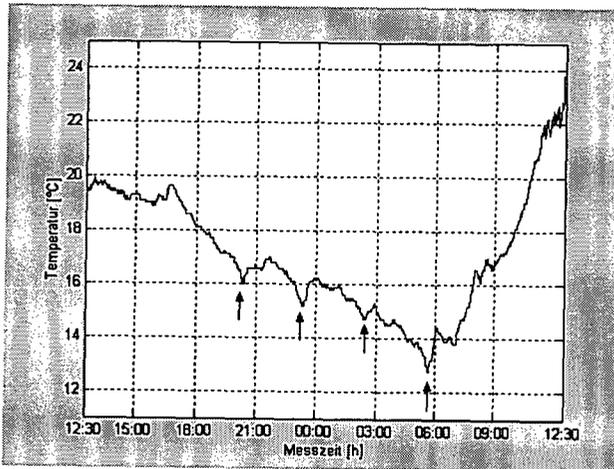


Abb. 7-28: Gemessene Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

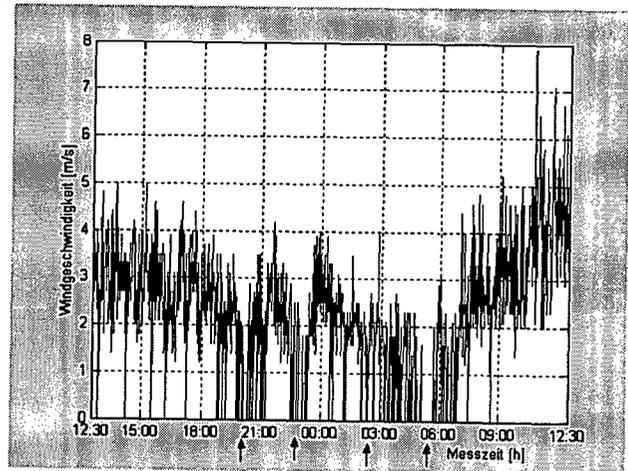


Abb. 7-29: Gemessene Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit

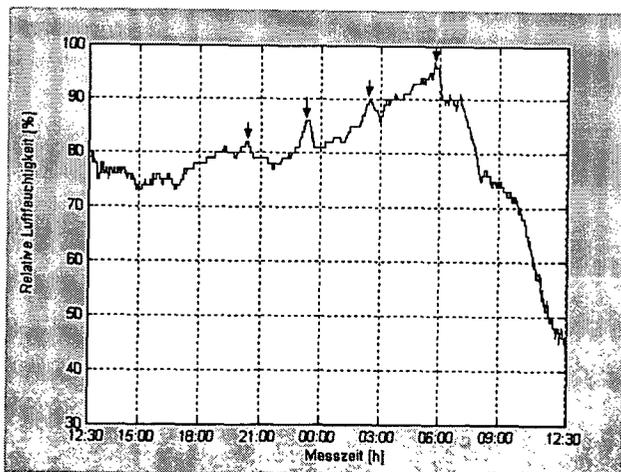


Abb. 7-30: Gemessene relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit

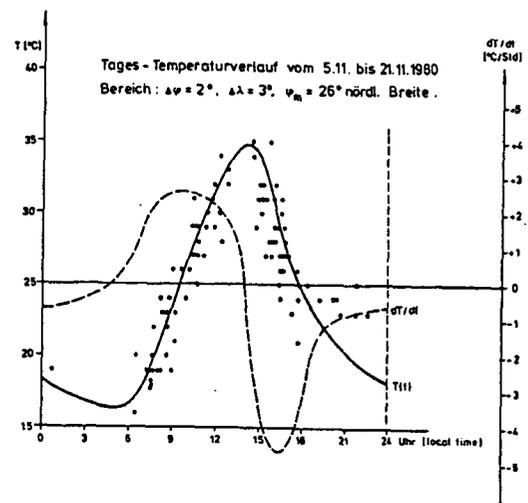


Abb. 7-31: Mittlerer Tagesverlauf der Lufttemperatur  $T(t)$  und des Lufttemperaturgradienten  $dT/dt$  (*Schelling, 1982*)

## (2) Windgeschwindigkeit

Abb. 7-29 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Sie hat einen ähnlichen Verlauf wie die Lufttemperatur. Ein größerer Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Temperatur war deutlich zu sehen, wenn die Windgeschwindigkeit Null war. Zu diesen Zeiten sind kleine Minima der Temperatur deutlich zu sehen, was mehrmals auftrat (ca. 20:00, 23:20, 02:40, 05:30, 06:30)<sup>18</sup>.

## (3) Relative Luftfeuchtigkeit

Abb. 7-30 zeigt sehr anschaulich den Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit. Im Verlauf des Nachmittags am 10.10.2001 und nachts fiel die Temperatur stetig ab. Im Vergleich dazu stieg die relative Luftfeuchtigkeit stetig an und wies in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit mehrere Maxima auf. Der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit korreliert negativ mit der Temperatur. Je mehr die Temperatur sinkt, desto höher wird die relative Luftfeuchtigkeit.

Über die meteorologischen Parameter und ihre Einflüsse auf die Zenitwinkel kann zusammenfassend gesagt werden, dass ein Zusammenhang zwischen Windstärke, Temperatur und Größe des Zenitwinkels besteht. Bei Windgeschwindigkeiten von Null zeigt die Temperatur Minima, die Luftfeuchtigkeit ein Maximum. Das bedeutet, dass bei starkem Wind die Temperatur steigt. Der Wind hat warme Luft herangeweht. Mit der Temperaturabnahme sinken die Werte der Zenitwinkel, bei Temperaturzunahme steigen die Werte. Daraus wird ersichtlich, dass der Wind die Temperatur beeinflusst, was in weiterer Folge zu einer Beeinflussung der Größen der Zenitwinkel führt (vgl. Abb. 7-27, 7-28 und 7-29).

### 7.3.4.3 Varianzen der Zenitwinkel

Die Abb. 7-32 und 7-33 zeigen die Varianzen der 15 Minuten-Intervalle der Zenitwinkel auf den Stationen 1 und 2. Am Anfang sind die Varianzen kleiner, in der Nacht verkleinern sie sich noch mehr, und am nächsten Tag steigen die Varianzen durch die Sonnenbestrahlung sehr schnell an. Besonders hoch sind sie in der Zeit zwischen 10:00-11:00 Uhr.

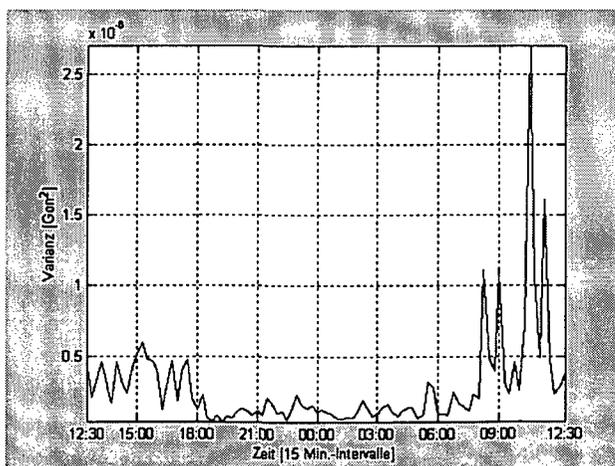


Abb. 7-32: Varianzen der Zenitwinkel auf ST 1 [ME von je 15 min]

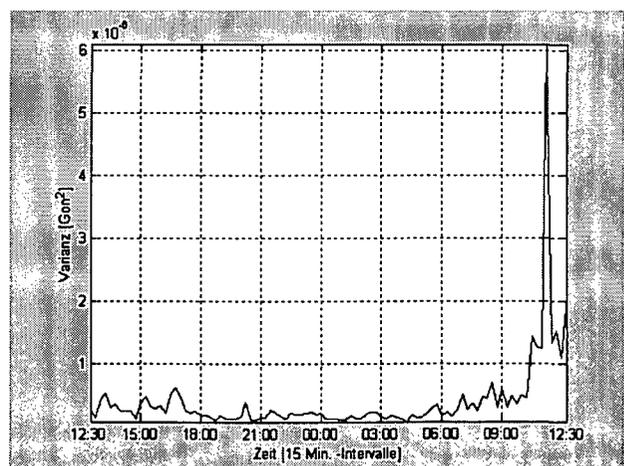


Abb. 7-33: Varianzen der Zenitwinkel auf ST 2 [ME von je 15 min]

<sup>18</sup> In der Abbildung 7-28 und 7-29 mit Pfeilen gekennzeichnet.

### 7.3.4.4 Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln

Abb. 7-34 stellt die ermittelten Höhenunterschiede aus simultan gemessenen Zenitwinkeln über 24 Stunden dar. Der Mittelwert aus allen Einzelmessungen entspricht dem Sollwert des geometrischen Nivellements (Feinnivellements) mit einer Genauigkeit von 0.4 mm. Auffällig ist, dass die gewonnenen Höhenunterschiede im gesamten Messintervall keine trendartigen Schwankungen aufweisen, es überwiegen kurzperiodische Fluktuationen die durch Mittelbildungen geglättet wurden. Die Abbildungen 7-35 bis 7-38 zeigen die geglätteten Werte. Man erkennt, dass die für die einzelnen Messepochen berechneten Höhenunterschiede deutlich geringere Werte aufweisen, wenn die Dauer der Epochen verlängert wird. Tab. 7-2 zeigt die Maximalwerte für die Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Sie sind deutlich geringer als die der Originaldaten und verringern sich um nahezu eine Größenordnung, wenn die Epochenlänge von 5 min auf 60 min ausgedehnt wird.

Betrachtet man die Mittelwerte der unterschiedlichen langen Epochen, so fällt auf, dass die Ergebnisse von 10:30 bis 12:30 deutlich unter dem Mittelwert liegen. In Abbildungen. 7-32 und 7-33 erkennt man, dass hier die berechneten Höhenunterschiede sehr große Varianzen aufweisen. Daher ist es interessant, die vorangegangenen Untersuchungen ohne diesen Zeitabschnitt zu wiederholen, was zu einer merklichen Verbesserung der Ergebnisse (vgl. Tab. 7-2) führt.

Beobachtungsintervall	max. Schwankungen/ Zeitraum: 12:30-12:30/ 12:30-10:30	Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen/ Zeitraum: 12:30-10:30/12:30-10:30
1 s (Originaldaten)	10.0 mm/5.6 mm	0.87 mm/0.71 mm
5 min (gemittelt)	3.20 mm/1.8 mm	0.55 mm/0.40 mm
15 min (gemittelt)	2.20 mm/1.4mm	0.50 mm/0.33 mm
30 min (gemittelt)	1.90 mm/1.0 mm	0.45 mm/0.28 mm
60 min (gemittelt)	1.60 mm/0.7 mm	0.43 mm/0.23 mm

Tab. 7-2: Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge

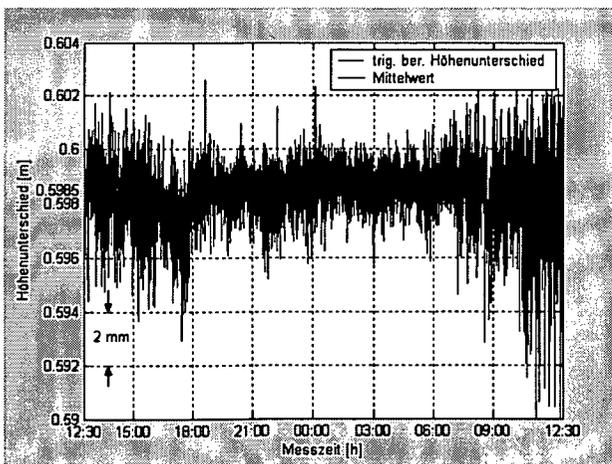


Abb. 7-34: Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)

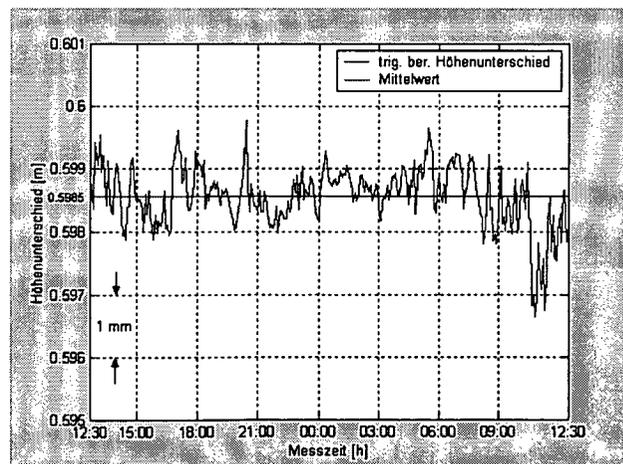


Abb. 7-35: Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

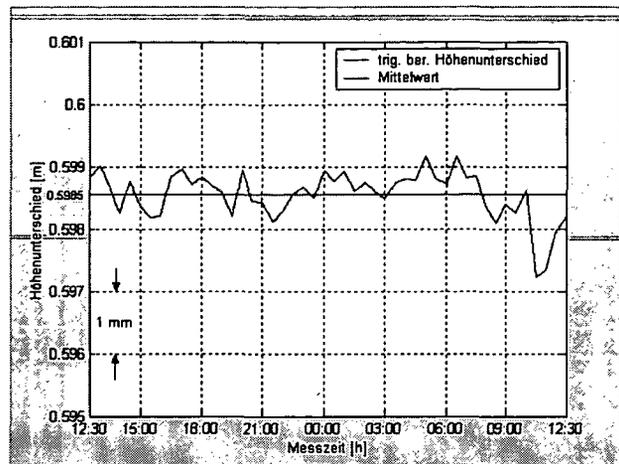
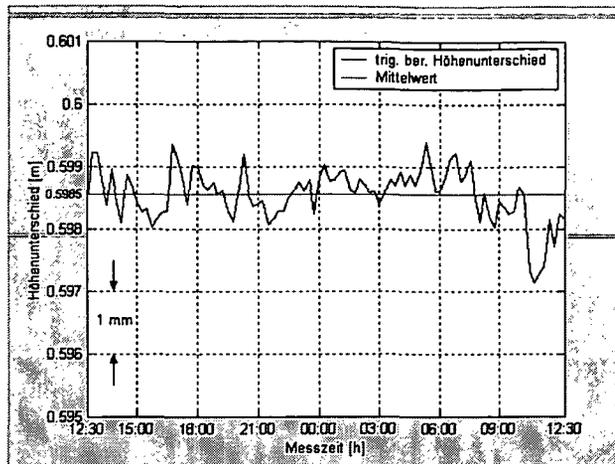


Abb. 7-36: Höhenunterschiede der 15 min-Epochen    Abb. 7-37: Höhenunterschiede der 30 min-Epochen

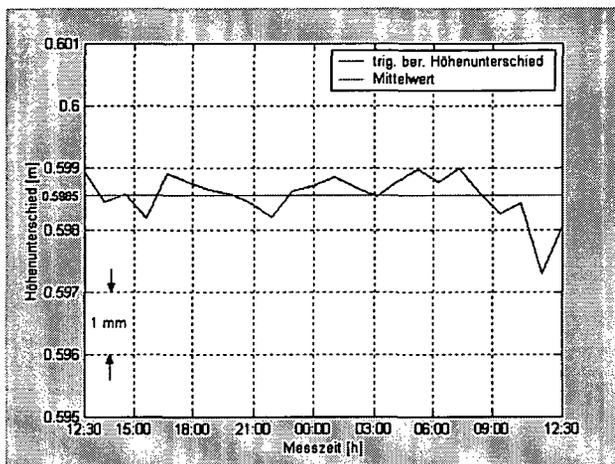


Abb. 7-38: Höhenunterschiede der 60 min-Epochen

Es hat sich damit gezeigt, dass es bei kurzen Distanzen durch schnelle Veränderung der meteorologischen Parameter zu größeren Modellstörungen kommt (vgl. Abb. 7-34, Zeitintervall: 10:00-11:00).

### 7.3.4.5 Statistische Analyse der Höhenunterschiede

Bei der Berechnung der Autokorrelationsfunktion für die Messreihen der Abb. 7-34 bis 7-38 wurde wegen der genannten Gründe (vgl. Kap. 7.3.4.4) ebenfalls nur der Messabschnitt von 12:30 bis 10:30 betrachtet. Autokorrelationsfunktionen sind in den Abb. 7-39 bis 7-44 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Die nach Gl. (6.6, s. Kap. 6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten 35 s. (vgl. Abb. 7-40). Mit Zunahme der Epochenlänge (5 min, 15 min, 30 min und 60 min) geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 7-41 bis 7-44). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger als 30 min (vgl. Abb. 7-43) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden (vgl. Abb. 7-43 und 7-44). Es treten folglich praktisch keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trend-erzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse weitgehend eliminiert werden.

Die Standardabweichungen der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Mittelwerte der Epochen sind in Spalte 3 der Tab. 7-2 wiedergegeben, die maximalen Abweichungen in Spalte 2. Die maximalen Abweichungen sind um den Faktor 4 bis 5 größer als die Standardabweichungen. Die Statistische Analyse der Höhenunterschiede im gesamten Zeitraum (12:30-12:30) befindet sich in Anhang 1.

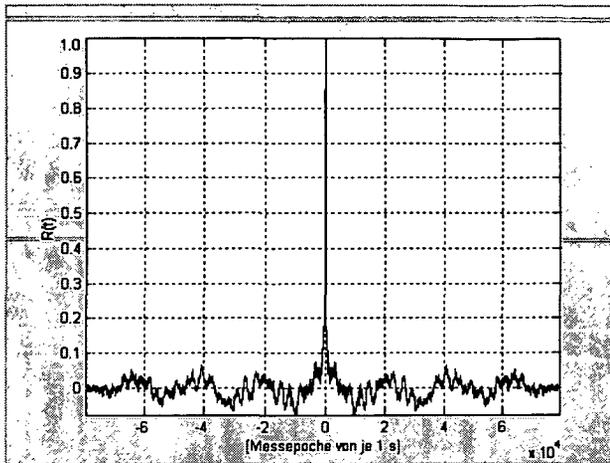


Abb. 7-39: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]

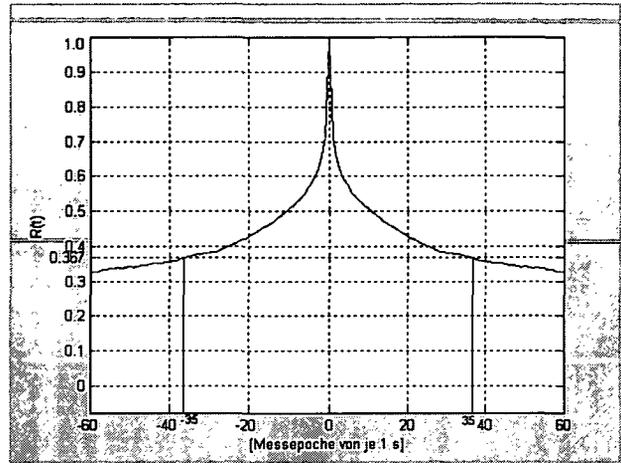


Abb. 7-40: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

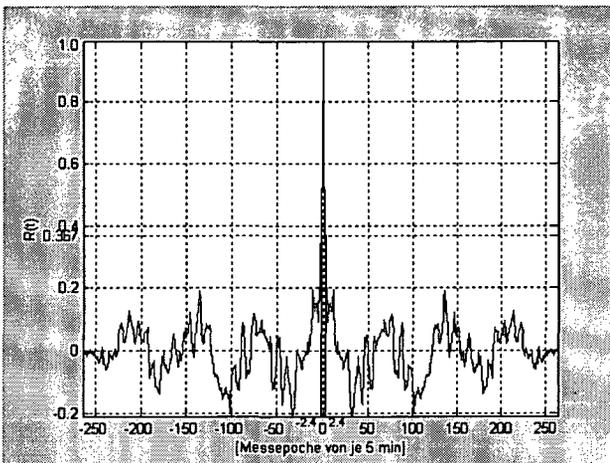


Abb. 7-41: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen

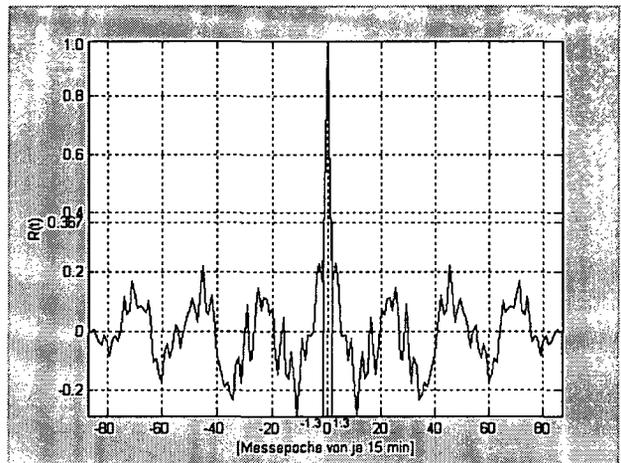


Abb. 7-42: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 min-Epochen

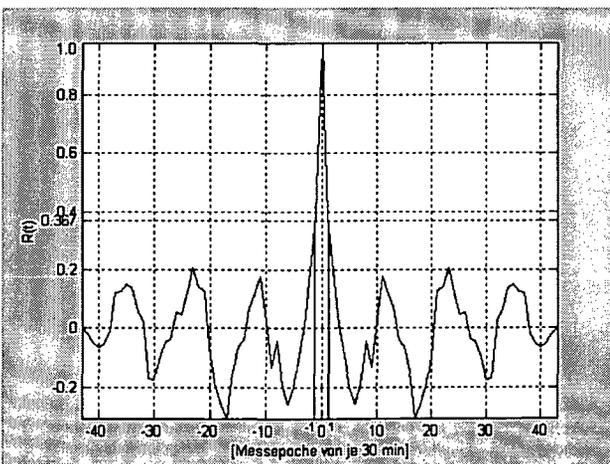


Abb. 7-43: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30 min-Epochen

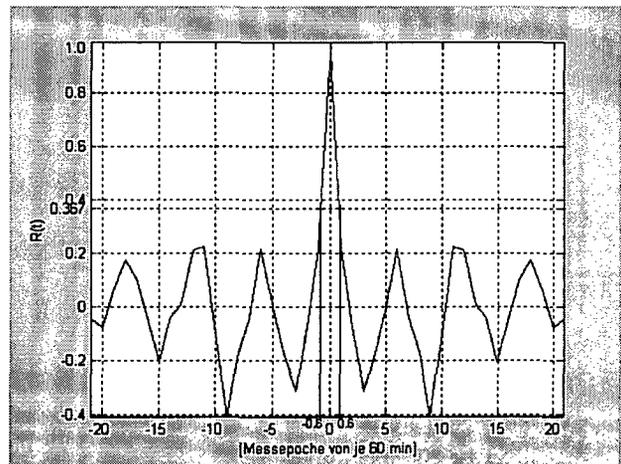


Abb. 7-44: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 60 min-Epochen

**7.3.4.6 Kurze Zusammenfassung**

Aus Tabelle 7-2 und Abb.7-43 ist ersichtlich, dass Epochen < 30 min sich im Sinne eines Feinnivellements als optimal erweisen, da die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Epochenmittel dann nur noch 0.2...0.3 mm betragen. Epochenmittel aus Epochen > 30 min können praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Unterschiedliche Varianzen der Zenitwinkel zeigen bei allen Epochenmitteln erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse.

## 7.4 Messungen über große Entfernungen (378 m) an der Donau bei Tulln

### 7.4.1 Beschreibung des Ortes und der Wetterbedingungen

Das Versuchsgebiet (Abb. 7-45) befindet sich bei einer Brücke in Tulln. Die neue Donaubrücke bei Tulln, die den Namen Rosenbrücke trägt, wurde etwa 2,3 km stromaufwärts von der Stadt Tulln im Dez. 1995 errichtet. Für die Absteckungsmessungen der Brücke während der Bauzeit und die Überwachungsmessungen wurden 8 Messpfeiler (s. Abb. 7-46) eingerichtet. Auf der Nord- und Südseite sind je 4 Pfeiler aufgebaut und zwar links und rechts der Brücke jeweils zwei.

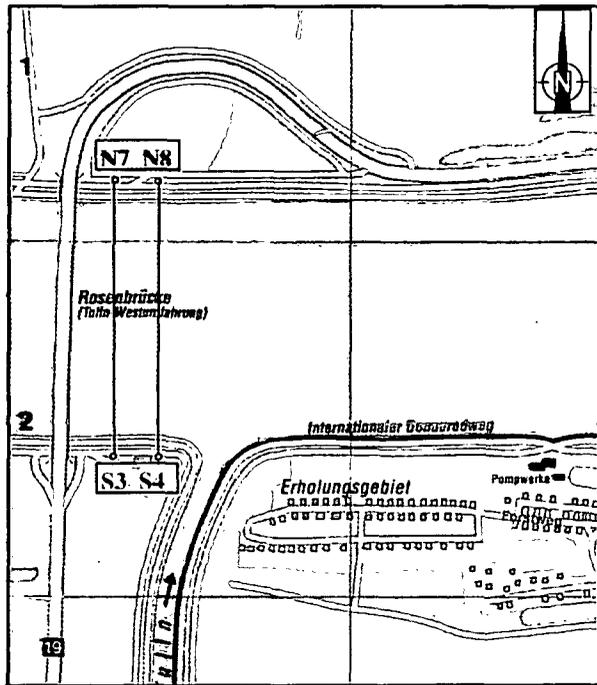


Abb. 7-45: Das Versuchsgebiet

Abb. 7-46: Messpfeiler mit Zentrierschraube

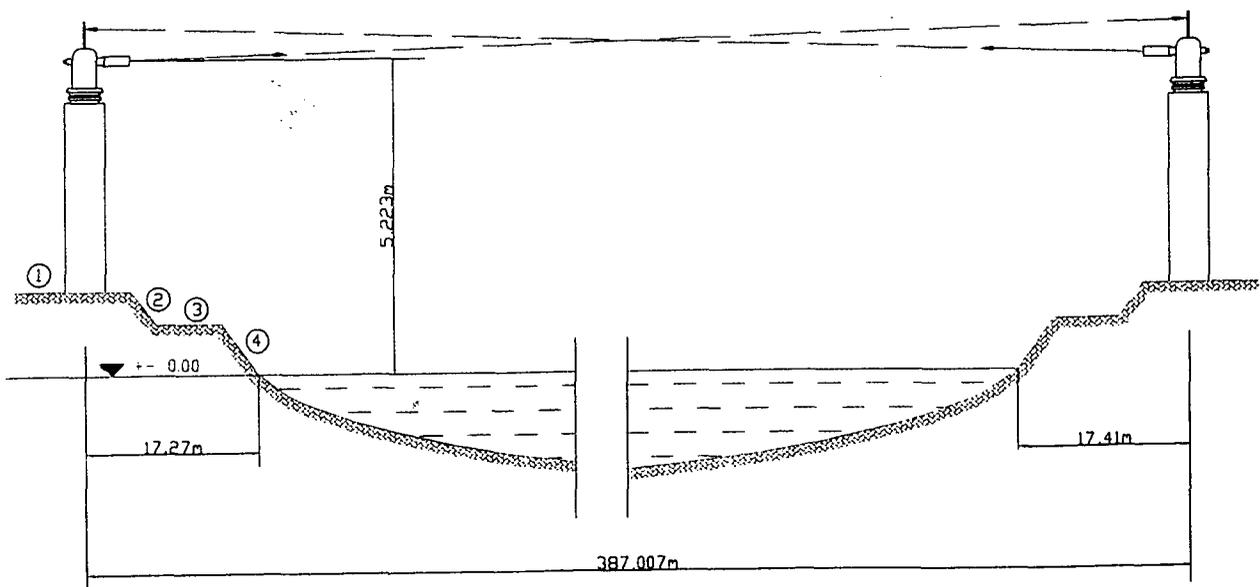


Abb. 7-47: Längsprofil der Messstrecke an der Donau bei der Rosenbrücke bei Tulln (Skizze nicht maßstäblich)

Wie man aus dem Längsprofil (Abb. 7-47) ersehen kann, handelt es sich um ein weitestgehend, wirklich symmetrisches Profil (s. Voraussetzungen in Kap. 3.1.2) auf beiden Seiten des Donauufers. Die Ufer sind treppenförmig abgestuft und setzen sich aus 4 Teilabschnitten zusammen. Der erste Teil ist horizontal, beginnt mit Rasen und setzt sich mit Asphalt fort. In diesem Teilbereich liegen die Pfeiler, auf denen die Instrumente aufgesetzt wurden. Der zweite und vierte Teil besteht aus einer um  $45^\circ$  geneigten Böschung mit Grasbewuchs. Der dritte Teil besteht aus einem befestigten Weg. Die Topographie des Ufers ist auf beiden Seiten identisch.

Im Gegensatz zu Messungen über Land führt hier der Zielstrahl über die völlig gleichmäßige Topographie der Wasserober- und Uferfläche. Das Brückennetz, mit seinen sehr stabilen Messpfeilern mit Zentrierschraube und Stromanschluss auf beiden Seiten des Donauufers, bietet eine sehr gute Möglichkeit, das neu entwickelte Messsystem zu überprüfen.

Nachfolgend werden praktische Messungen vorgestellt, die in erster Linie die Funktionsfähigkeit des Messsystems über längere Distanzen und Wasserflächen demonstrieren sollen. Die Messungen über der Donau bei Tulln werden, nach ihrer zeitlichen Reihenfolge geordnet, in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Die Messungen fanden zu zwei verschiedenen Jahreszeiten und somit unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen statt:

- bei extremen Wetterbedingungen (hohe Temperaturen, starke Sonneneinstrahlung (vgl. Kap. 7.4.3, 7.4.4 und 7.4.5))
- bei bedecktem Himmel (niedrige Temperaturen (vgl. Kap. 7.4.6)).

Gleichzeitig mit der Zenitwinkelmessung wurden auch die meteorologischen Messungen durchgeführt. Die meteorologischen Messungen erfolgten in unmittelbarer Nähe des Messpfeilers auf der Nordseite der Donau.

#### **7.4.2 Messungen am 18./19.06.2002**

Während des Beobachtungszeitraums war der Himmel am Tag und in der Nacht wolkenlos und es war windstill. Zu Beginn der Beobachtung um 15:00 Uhr war die Lufttemperatur  $32^\circ\text{C}$  und stieg bei starker Sonneneinstrahlung bis zu  $33.2^\circ\text{C}$  um 17:00 Uhr an (vgl. Abb. 7-49). In der Zeit von 18:00 Uhr bis 05:00 Uhr morgens (vgl. Abb. 7-66 s. S. 64) sank die Lufttemperatur auf bis zu  $20.6^\circ\text{C}$  ab. Die Wassertemperatur betrug  $21^\circ\text{C}$ . Aus den Angaben geht hervor, dass die Messungen am 18./19.06.2002 unter Wetterverhältnissen erfolgten, die für Junitage an der Donau sehr typisch sind. Der Beobachtungstag war heiß und trocken, so dass ein starker Refraktionseinfluss vorhanden war.

Die Beobachtungen fanden über dem Wasser in 5.22 m Höhe (mittlerer Wasserstand, vgl. Abb. 7-47) an einem warmen Sommertag ab 15 Uhr nachmittags sowie bei Nacht statt. Wegen eines technischen Problems musste die Messung um 21:00 Uhr gestoppt werden. Eine Stunde später fing die zweite Messserie an und erstreckte sich bis 05:00 Uhr morgens am nächsten Tag. Alle Beobachtungsreihen wurden mit 1 Hz beobachtet. Die Auswertungen der Messserien vor und nach der Unterbrechung sind getrennt in Kap. 7.4.3 und 7.4.4 dargestellt.

#### **7.4.3 Berechnungsergebnisse der Messungen am Nachmittag/Abend des 18./19.06.2002 (Messpfeiler S3-N7)**

##### **7.4.3.1 Zenitwinkel**

In der Abb. 7-48 werden die zeitlichen Verläufe der beobachteten Zenitwinkel dargestellt. Die Zenitwinkel auf beiden Stationen weisen große Schwankungen aber einen symmetrischen Verlauf auf. Sie korrelieren nicht mit dem Verlauf der Lufttemperatur (Abb. 7-49). Es gibt

Verlauf auf. Sie korrelieren nicht mit dem Verlauf der Lufttemperatur (Abb. 7-49). Es gibt insgesamt Schwankungen bis ca.  $\pm 9$  mgon. Am Anfang der Messung ist der Verlauf ruhiger. Die Zenitwinkel werden bis 18:30 Uhr langsam kleiner. Ab diesem Zeitpunkt zeigen sie größere Turbulenzen.

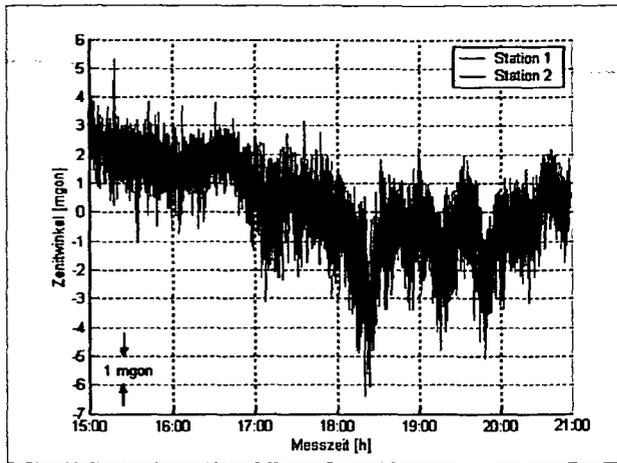


Abb. 7-48: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 (S3) und 2 (N7) (Originaldaten)

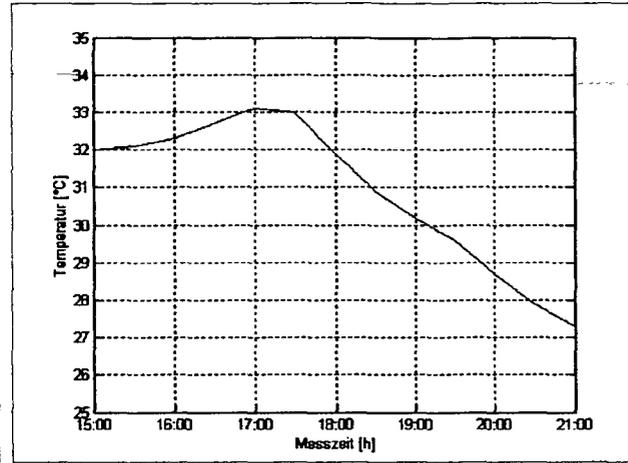


Abb. 7-49: Gemessene Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

### 7.4.3.2 Varianzen der Zenitwinkel

Die Abb. 7-50 und 7-51 zeigen die Varianzen für 15 Minuten-Intervalle der Zenitwinkel von den Stationen S3 und N7. Am Anfang waren die Varianzen kleiner, ab 16:50 Uhr stiegen sie sehr schnell an, besonders hoch waren sie in der Zeit zwischen 18:20 und 18:30 Uhr.

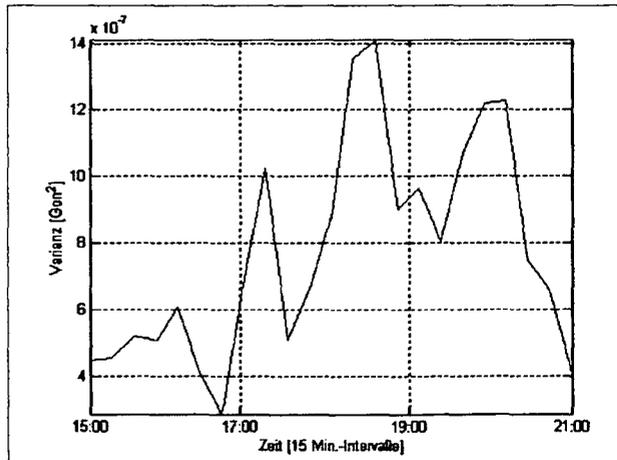


Abb. 7-50: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 1 [ME von je 15 min]

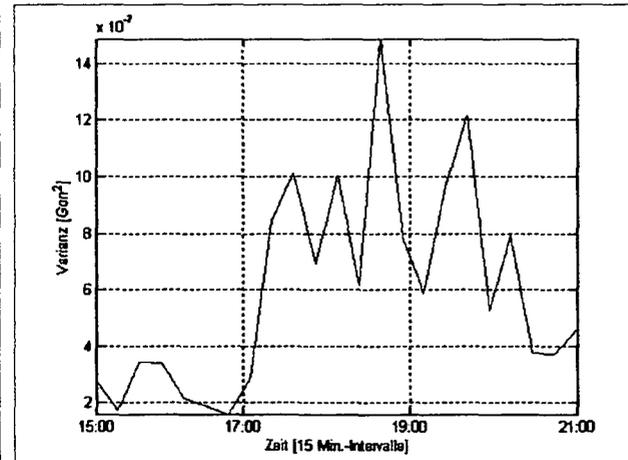


Abb. 7-51: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 2 [ME von je 15 min]

### 7.4.3.3 Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln

Abb. 7-52 stellt die ermittelten Höhenunterschiede aus simultan gemessenen Zenitwinkeln für 6 Stunden dar. Der Mittelwert aller Messungen beträgt 0.0208 m. Auffällig ist, dass der gewonnene Höhenunterschied im gesamten Messintervall keine trendartigen Schwankungen aufweist, es überwiegen kurzperiodische Fluktuationen, die durch Mittelbildungen geglättet wurden. Die Standardabweichung eines Einzelwerts beträgt 3,31 mm. Die Standardabweichungen der Höhenunterschiede der Originaldaten und Epochen sind zur besseren Übersicht in der Tabelle 7-3 gegenübergestellt. Bei den Höhenunterschieden aus Originaldaten traten Schwankungen von bis zu  $\pm 22$  mm auf, bei über 60 min gemittelten Daten bis  $\pm 0.6$  mm. Durch

zunehmend weggefiltert werden (vgl. Abb. 7-53 bis 7-56). Man erkennt, dass die für die einzelnen Messepochen berechneten Höhenunterschiede deutlich geringere Werte aufweisen, wenn die Dauer der Epochen verlängert wird. Die Maximalwerte für die Mittelwerte verschiedener Epochen sind deutlich geringer als die der Originaldaten und verringern sich um nahezu eine Größenordnung, wenn die Epochenlänge von 5 min auf 60 min ausgedehnt wird.

Beobachtungsintervall	max. Schwankungen	Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen
1 s (Originaldaten)	22.0 mm	3.31 mm
5 min (gemittelt)	5.0 mm	1.03 mm
15 min (gemittelt)	2.0 mm	0.52 mm
30 min (gemittelt)	1.2 mm	0.45 mm
60 min (gemittelt)	0.6 mm	0.16 mm

Tab. 7-3: Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge

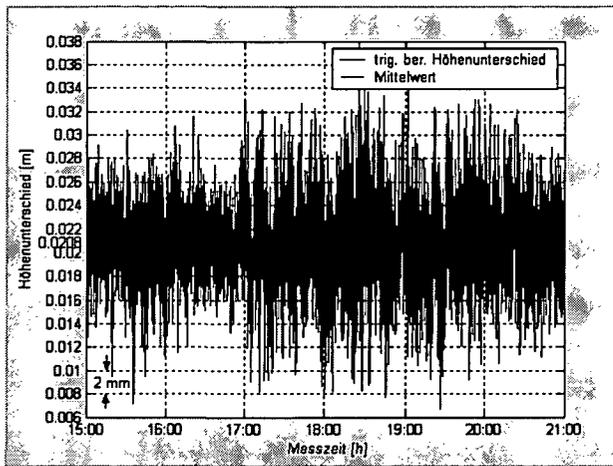


Abb. 7-52: Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)

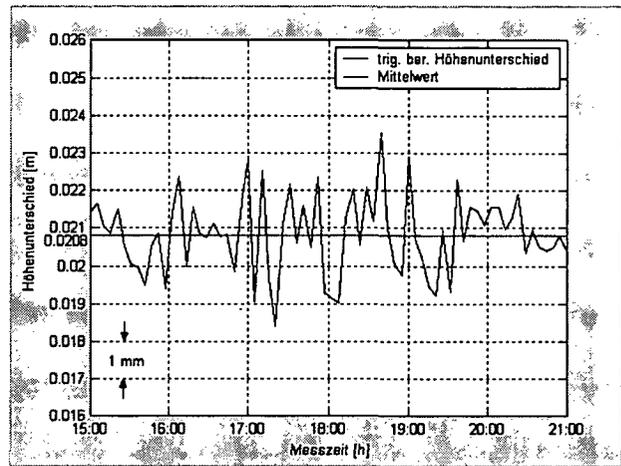


Abb. 7-53: Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

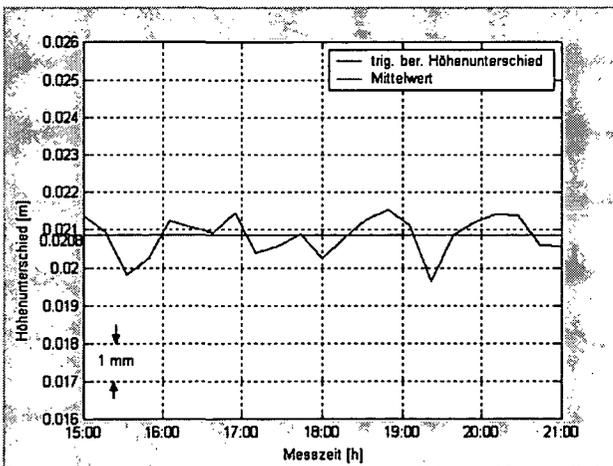


Abb. 7-54: Höhenunterschiede der 15 min-Epochen

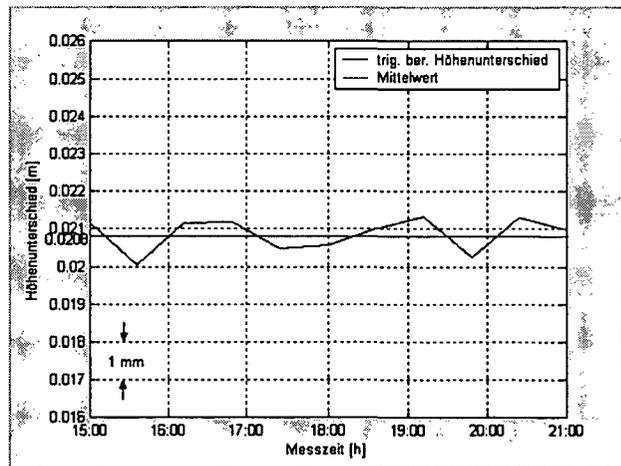


Abb. 7-55: Höhenunterschiede der 30 min-Epochen

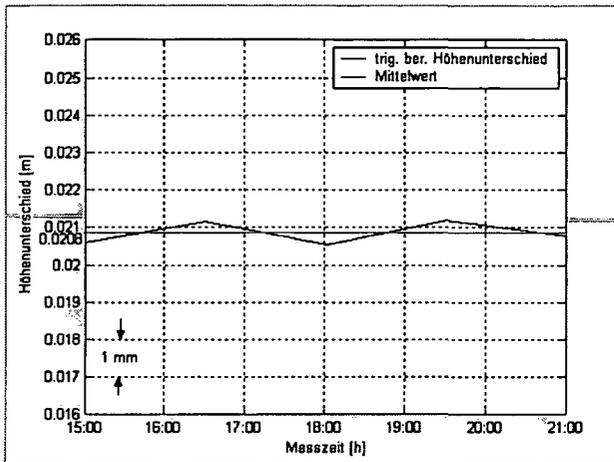


Abb. 7-56: Höhenunterschiede der 60 min-Epochen

### 7.4.3.4 Statistische Analyse der Höhenunterschiede

Die Autokorrelationsfunktionen für die Messreihen der Abb. 7-52 bis 7-56 sind in den Abb. 7-57 bis 7-64 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten 3.5 s. (vgl. Abb. 7-58). In diese Zeitspanne fallen 3.5 berechnete Höhenunterschiede. Mit Zunahme der Epochenlänge (5 min, 15 min, 30 min und 60 min) geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 7-61 bis 7-64). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger als 1.5 min (vgl. Abb. 7-60) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden (vgl. Abb. 7-61 bis 7-64). Es treten folglich praktisch keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse eliminiert werden. Die Maximalwerte sind um den Faktor 3 bis 5 größer als die Standardabweichungen (vgl. Tab. 7-3).

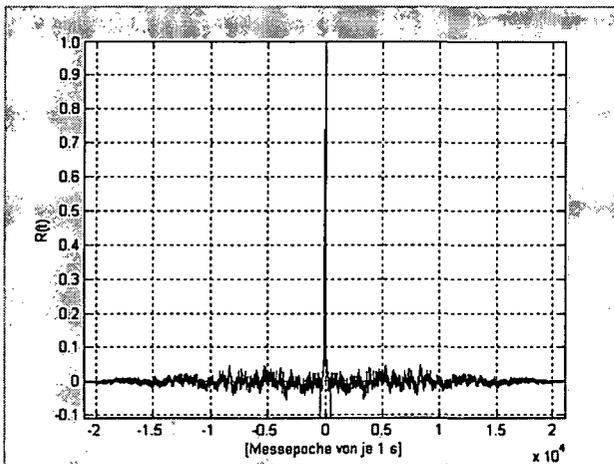


Abb. 7-57: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]

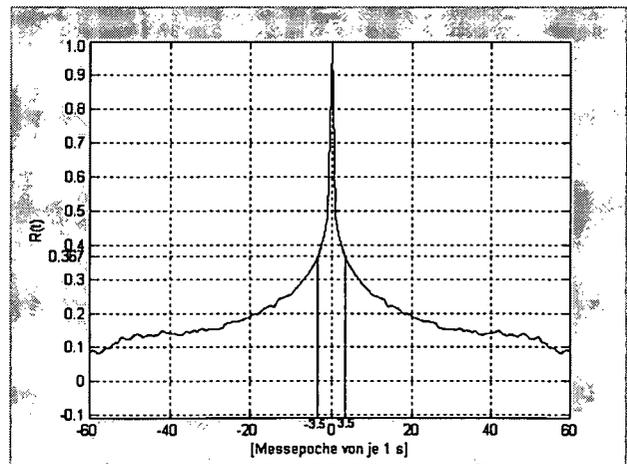


Abb. 7-58: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

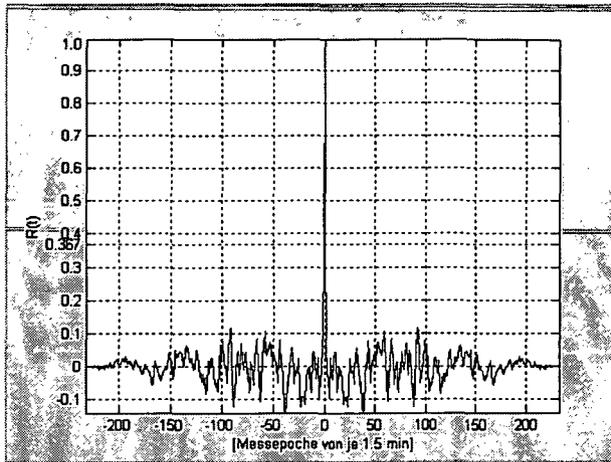


Abb. 7-59: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 1.5 min-Epochen

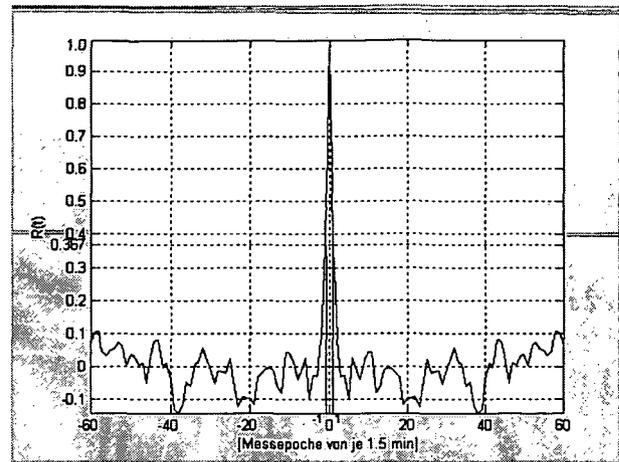


Abb. 7-60: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

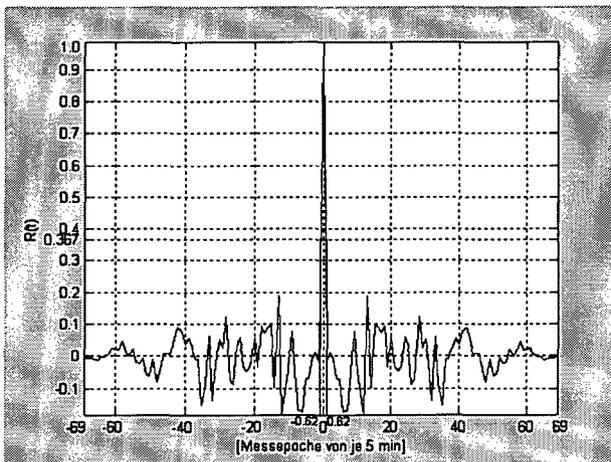


Abb. 7-61: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen

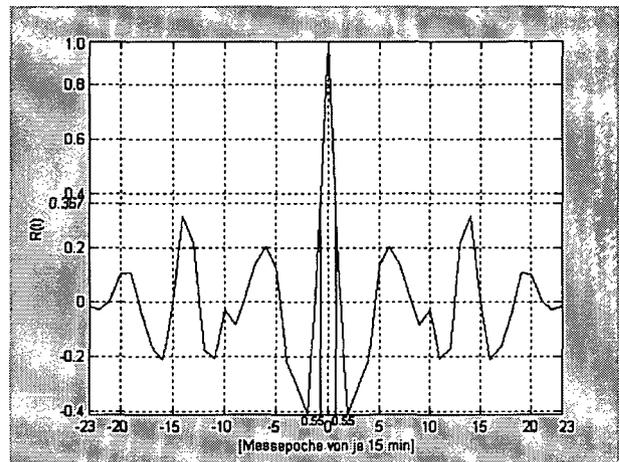


Abb. 7-62: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 min-Epochen

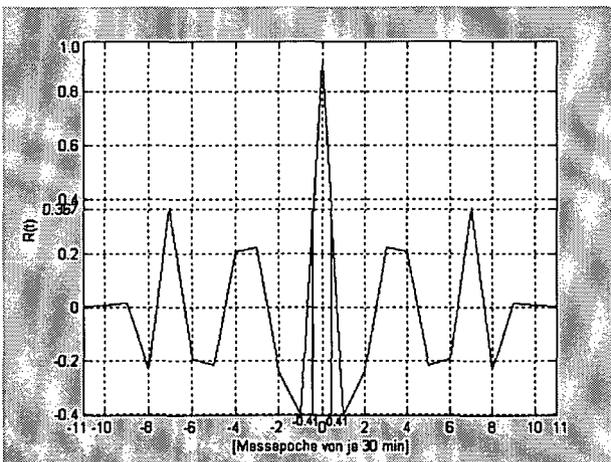


Abb. 7-63: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30 min-Epochen

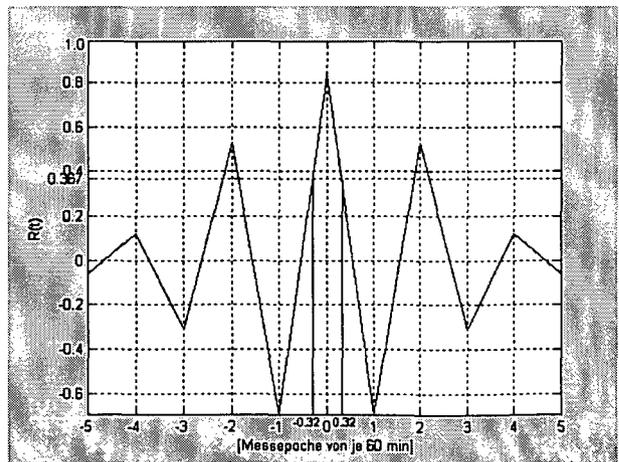


Abb. 7-64: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 60 min-Epochen

### 7.4.3.5 Kurze Zusammenfassung

Aus Tabelle 7-3 und Abb.7-60 wird deutlich, dass Epochen  $< 60$  min sich im Sinne eines Feinnivellements als optimal erweisen, da die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Epochenmittel dann nur noch etwa 0.2 mm betragen. Epochenmittel aus Epochen  $> 1,5$  min können praktisch

als unkorreliert betrachtet werden. Unterschiedliche Varianzen der Zenitwinkel wirken sich hier kaum auf die Messergebnisse aus.

**7.4.4 Berechnungsergebnisse der Messungen in der Nacht vom 18./19.06.2002 (Messpfeiler S3-N7)**

**7.4.4.1 Zenitwinkel**

Im Vergleich mit den Messungen am Nachmittag/Abend des 18.06.2002 (vgl. Kap. 7.4.3) verlaufen die Zenitwinkel ruhiger. Es sind kleinere Schwankungen der Zenitwinkel (Abb. 7-65) zu beobachten. Sie betragen bis zu  $\pm 5.5$  mgon. In der Zeit ab 01:30 bis zum Ende der Messungen traten die geringsten kurzperiodischen Schwankungen der Zenitwinkel auf. Die Trendfunktion steigt jedoch weiter an. In diesem Zeitraum ist in Abb. 7-66 deutlich zu sehen, dass die Lufttemperatur langsam abfiel. Die Zenitwinkel zeigen einen symmetrischer Verlauf. Sie korrelieren nicht mit dem Verlauf der Lufttemperatur (Abb. 7-66).

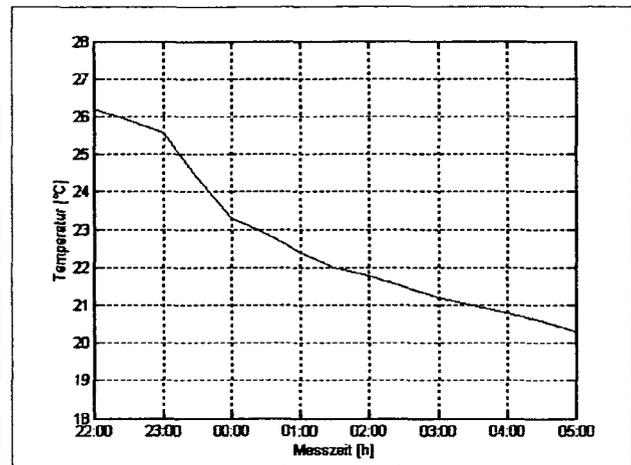
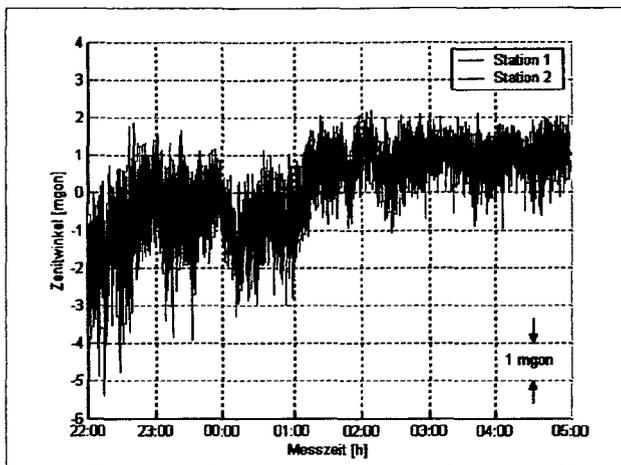


Abb. 7-65: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 (S3) und 2 (N7) (Originaldaten)

Abb. 7-66: Gemessene Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

**7.4.4.2 Varianzen der Zenitwinkel**

Die Abb. 7-67 und 7-68 zeigen die Varianzen für 15 Minuten-Intervalle der Zenitwinkel von Station S3 und N7. Am Anfang steigen die Varianzen schnell an, erreichen um 23:00 einen Höchstwert und fallen dann ab.

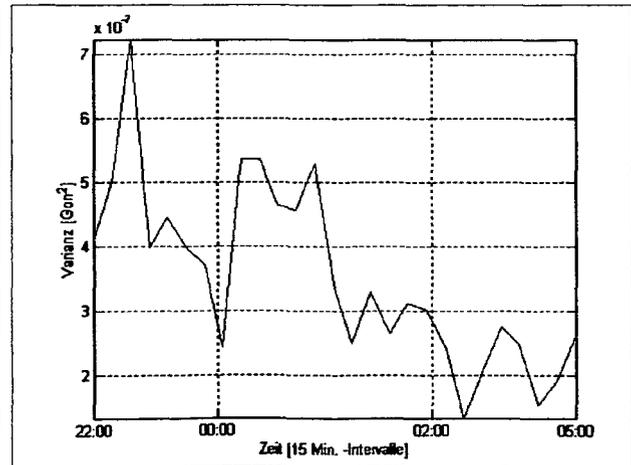
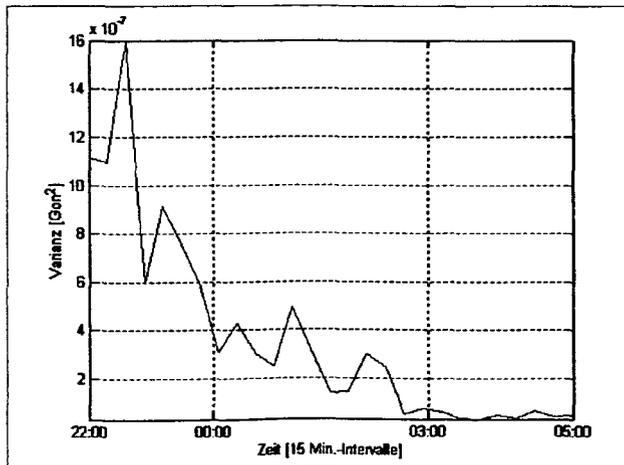


Abb. 7-67: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 1 [ME von je 15 min]

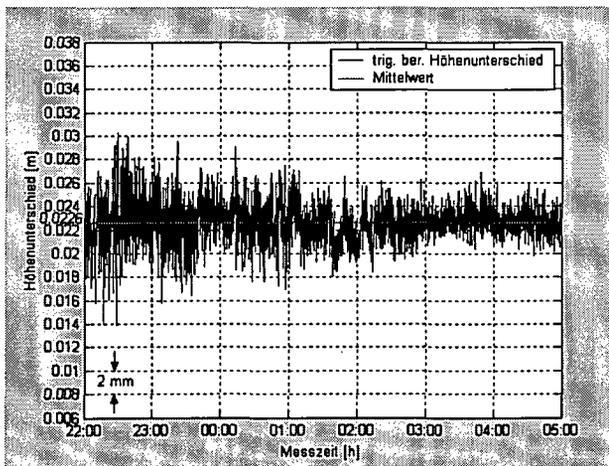
Abb. 7-68: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 2 [ME von je 15 min]

**7.4.4.3 Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln**

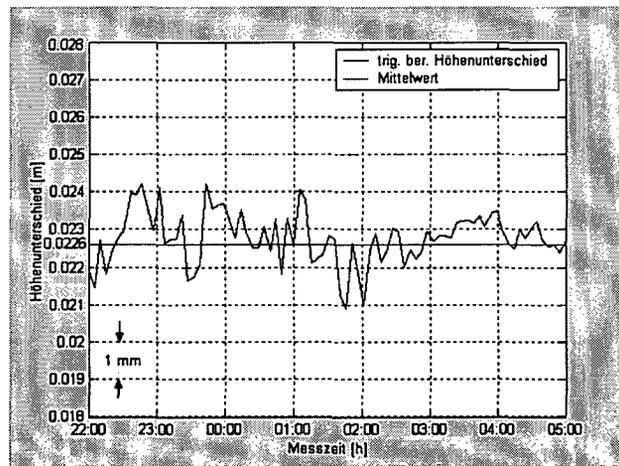
Abb. 7-69 zeigt die ermittelten Höhenunterschiede aus simultan gemessenen Zenitwinkeln für 7 Stunden. Der Mittelwert aller Messungen entspricht 0.0226 m. Er stimmt daher nicht mit dem Wert von 0.0208 m, der am Nachmittag/Abend des 18.06.2002 (vgl. Kap. 7.4.3) bestimmt wurde, überein. Der Unterschied beträgt 1.8 mm. Auffällig ist, dass der gewonnene Höhenunterschied im gesamten Messintervall keine trendartigen Schwankungen aufweist, es überwiegen kurzperiodische Fluktuationen, die durch Mittelbildungen geglättet wurden. Die Standardabweichung eines Einzelwerts beträgt 2.34 mm. Die Standardabweichungen der Höhenunterschiede der Originaldaten und Epochen sind zur besseren Übersicht in der Tabelle 7-4 gegenübergestellt. Bei den Höhenunterschieden aus Originaldaten traten Schwankungen von bis zu  $\pm 12$  mm auf, bei über 60 min gemittelten Daten von bis zu  $\pm 0.9$  mm. Durch Mittelungsprozesse von 5 min-, 15 min-, 30 min- und 60 min-Epochen kann das Rauschen zunehmend weggefiltert werden. Die Abbildungen 7-70 bis 7-73 zeigen die durch das Tiefpassfilter geglätteten Werte. Man erkennt, dass die für die einzelnen Messepochen berechneten Höhenunterschiede deutlich geringere Werte aufweisen, wenn die Dauer der Epochen verlängert wird. Tab. 7-4 zeigt die Maximalwerte für die Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Sie sind deutlich geringer als die der Originaldaten und verringern sich auf etwa 1/3 des Betrages, wenn die Epochenlänge von 5 min auf 60 min ausgedehnt wird.

Beobachtungsintervall	max. Schwankungen	Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen
1 s (Originaldaten)	12.0 mm	2.34 mm
5 min (gemittelt)	3.3 mm	0.61 mm
15 min (gemittelt)	2.0 mm	0.44 mm
30 min (gemittelt)	1.4 mm	0.35 mm
60 min (gemittelt)	0.9 mm	0.20 mm

**Tab. 7-4:** Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge



**Abb. 7-69:** Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)



**Abb. 7-70:** Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

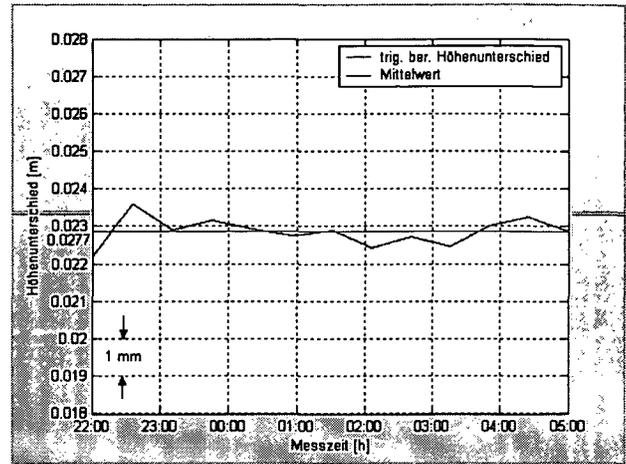
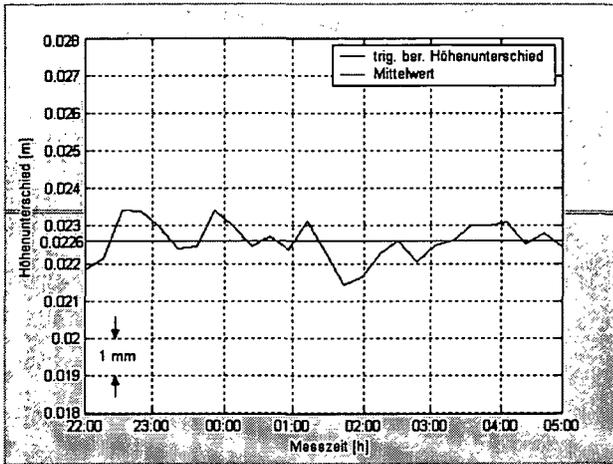


Abb. 7-71: Höhenunterschiede der 15 min-Epochen

Abb. 7-72: Höhenunterschiede der 30 min-Epochen

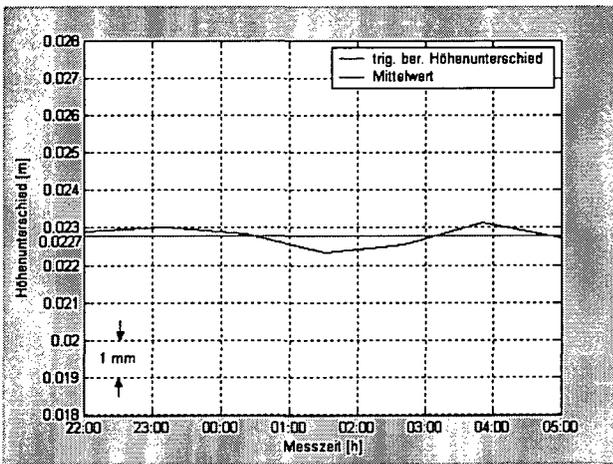


Abb. 7-73: Höhenunterschiede der 60 min-Epochen

#### 7.4.4.4 Statistische Analyse der Höhenunterschiede

Die Autokorrelationsfunktionen für die Messreihen der Abb. 7-69 bis 7-73 sind in den Abb. 7-74 bis 7-80 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten 1.7 s (vgl. Abb. 7-75). In diese Zeitspanne fallen etwa 2 berechnete Höhenunterschiede. Mit Zunahme der Epochenlänge (5 min, 15 min, 30 min und 60 min) geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 7-76 bis 7-80). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger als 10 min (vgl. Abb. 7-77) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden (vgl. Abb. 7-78 bis 7-80). Es treten folglich keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse eliminiert werden. Die Standardabweichungen der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Mittelwerte der Epochen sind in Spalte 3 der Tab. 7-4 wiedergegeben, die maximalen Abweichungen in Spalte 2. Die maximalen Abweichungen sind um den Faktor 5 größer als die Standardabweichungen.

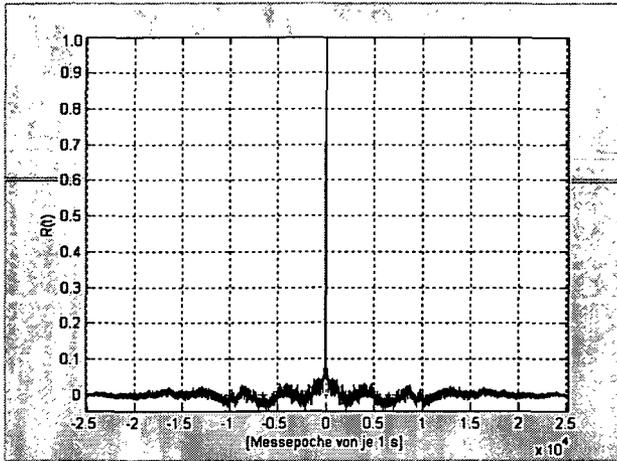


Abb. 7-74: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]

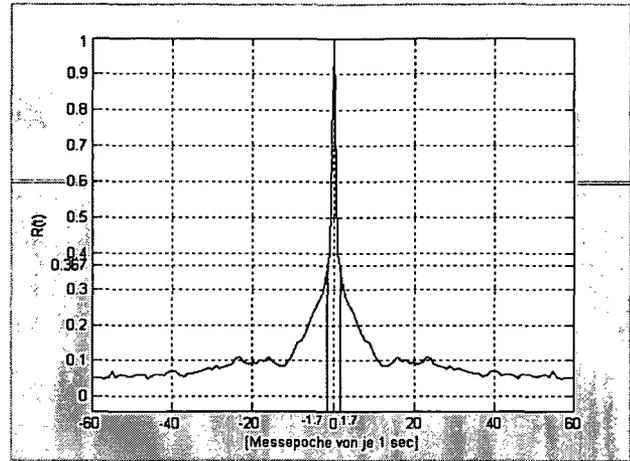


Abb. 7-75: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

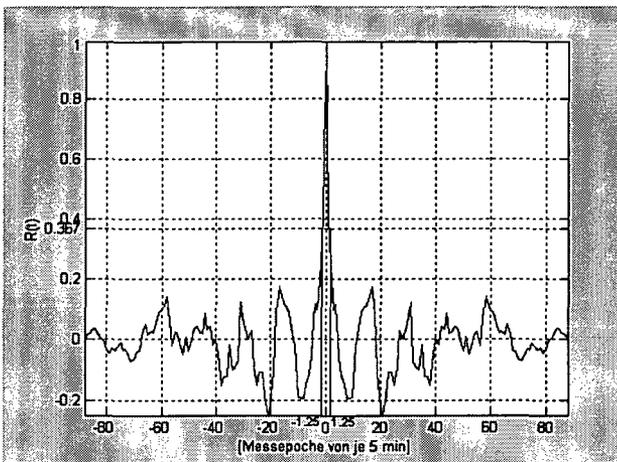


Abb. 7-76: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen

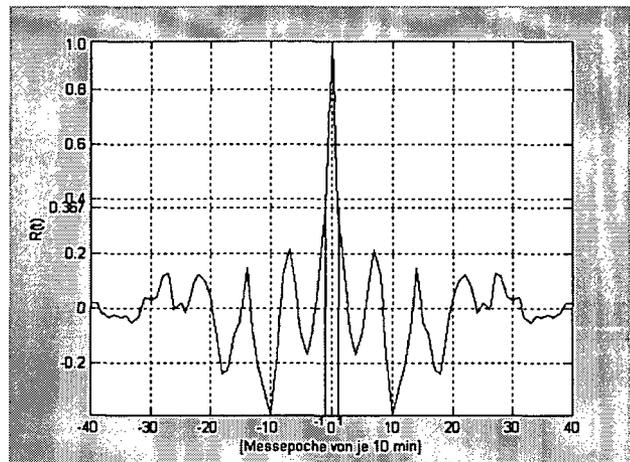


Abb. 7-77: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 10 min-Epochen

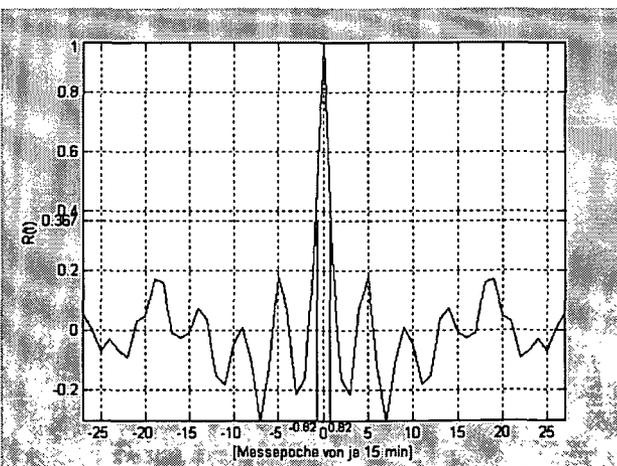


Abb. 7-78: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 min-Epochen

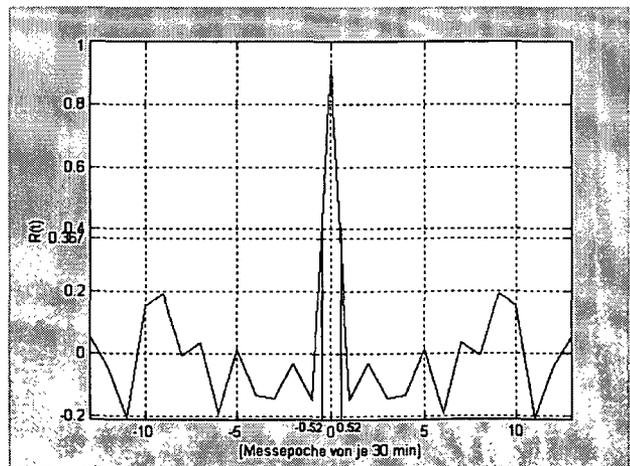


Abb. 7-79: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30 min-Epochen

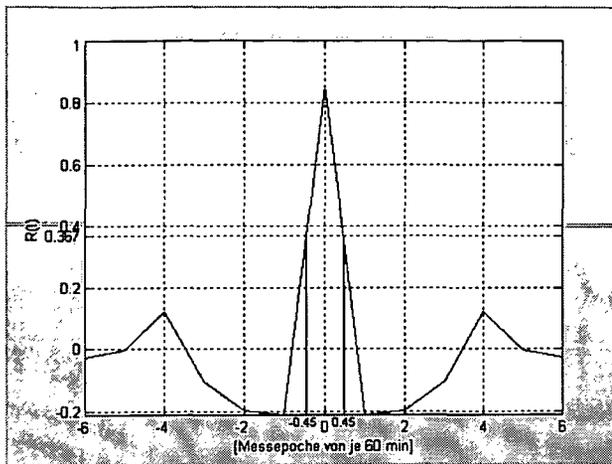


Abb. 7-80: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 60 min-Epochen

#### 7.4.4.5 Kurze Zusammenfassung

Aus Tabelle 7-4 und Abb. 7-77 wird deutlich, dass Epochen  $< 60$  min im Sinne eines Feinnivellements als optimal betrachtet werden können, da die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Epochenmittel dann nur noch  $0,2$  mm betragen. Epochenmittel aus Epochen  $> 10$  min können praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Unterschiedliche Varianzen der Zenitwinkel wirken sich auch bei ausgedehnteren Epochenmitteln noch erheblich auf die Messergebnisse aus.

#### 7.4.5 Vergleich der Messergebnisse vom 18./19.06.02 (Nachmittag/Abend) und 18./19.06.02 (Nacht)

Zwischen dem Gesamtmittel aus allen Messungen am Nachmittag/Abend und in der Nacht ist eine Höhendifferenz von  $1,8$  mm zu erkennen. Es gibt auch Unterschiede in den Schwankungen und Standardabweichungen zwischen den ermittelten Höhenunterschieden am Nachmittag und in der Nacht. Die maximalen Schwankungen des Höhenunterschieds am Nachmittag betragen  $\pm 22,0$  mm, entsprechende Standardabweichungen betragen  $3,31$  mm (vgl. Tab. 7-3), während die entsprechenden Werte für die ermittelten Höhenunterschiede in der Nacht  $\pm 12$  mm und  $2,34$  mm betragen. Diese hohen Werte in den Schwankungen sind aufgrund der hohen Lufttemperaturen, der starken Sonnenbestrahlungen und (oder) größerer Temperaturunterschiede zwischen Luft und Wasser möglich.

#### 7.4.6 Messungen am 11./12.09.2002 (Messpfeiler S4-N8)

Um die Differenz im Höhenunterschied (vgl. Kap. 7.4.5) aufzudecken, wurde eine weitere Messserie über 24 Stunden durchgeführt. Diese Messserie begann um 20:30 Uhr des 11.09.2002 und erstreckte sich ununterbrochen über 24 Stunden. Die Beobachtungsfrequenz betrug  $1$  Hz. Die Beobachtungsstrecke beträgt  $386.007$  m. Im Vergleich mit der Messserie im Juni 2002 wurden für diese Messserie zwei andere Messpfeiler (S4 und N8, vgl. Abb. 7-45) benutzt. Damit ist es möglich eine Schleife über alle 4 Messpfeiler (vgl. Kap. 7.6) zu bilden, die grobe Fehler der Höhenübertragung aufdecken kann.

##### 7.4.6.1 Wetterbedingungen

Die Wetterlage war durch rasche Variationen der Tagestemperatur charakterisiert (Abb. 7-82). Es war anzumerken, dass am Anfang der Messserie dichte und dunkle Wolken den Himmel bedeckten (8/8), die sich dann jedoch um etwa 03:00 in der Früh langsam auflösten. Der Tag war wolkenlos mit starker Sonneneinstrahlung. Am Anfang der Messserie bis 22:30 Uhr wehte ein leichter Wind (Abb. 7-83). In der Nacht war es windstill. Am nächsten Tag ab ca. 8:40 beginnt

der Wind wieder ununterbrochen, mit einer Geschwindigkeit bis zu 2.5 m/s, zu wehen. Nach 19:00 Uhr war es wieder windstill.

### 7.4.6.2 Berechnungsergebnisse

#### 7.4.6.2.1 Zenitwinkel

Abbildung 7-81 zeigt den Tagesgang der Zenitwinkel und somit des Refraktionsfeldes. Bereits bei der visuellen Betrachtung der abgebildeten Messserien wird der unterschiedliche (zeitlich variante) Verlauf deutlich. Während bei der Messung in den Abendstunden die Veränderung der Zenitwinkel eher glatt und ruhig ist, wird sie mit zunehmender Sonnenintensität deutlich unruhiger. Aus Abb. 7-81 ist ersichtlich, dass die Zenitwinkel bis ca. 03:00 Uhr kleiner werden, dann nehmen sie langsam bis ca. 07:30 Uhr zu und erreichen ihre Maxima. Die Schwankungen in diesem Zeitraum (20:30-07:30) betragen ca.  $\pm 4$  mgon. Ab 07:30 Uhr beginnen die Zenitwinkel rasch zu sinken und erreichen ihre Minima um ca. 14:00 Uhr. Dieser rasche Abfall der Zenitwinkel wird von einem steilen Anstieg der Tagestemperatur begleitet. Ab ca. 14:00 Uhr kehrt sich der Verlauf der Zenitwinkel dann langsam um bis ca. 18:00 Uhr. Ab 18:00 Uhr steigen die Zenitwinkel nur noch langsam und erreichen ab 20:00 Uhr ähnliche Werte wie zu Beginn der Messserie. Aus Abbildung 7-81 sieht man, dass insgesamt Schwankungen von  $\pm 36$  mgon auftraten. Die trendhafte Veränderung der Zenitwinkel ist negativ mit dem Verlauf der Lufttemperatur korreliert.

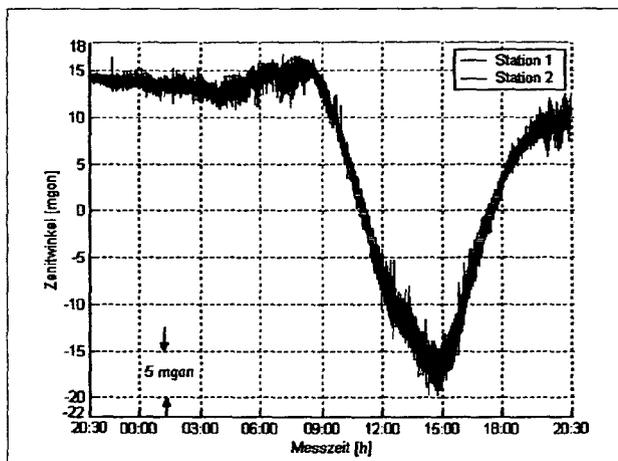


Abb. 7-81: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 (S4) und 2 (N8) (Originaldaten)

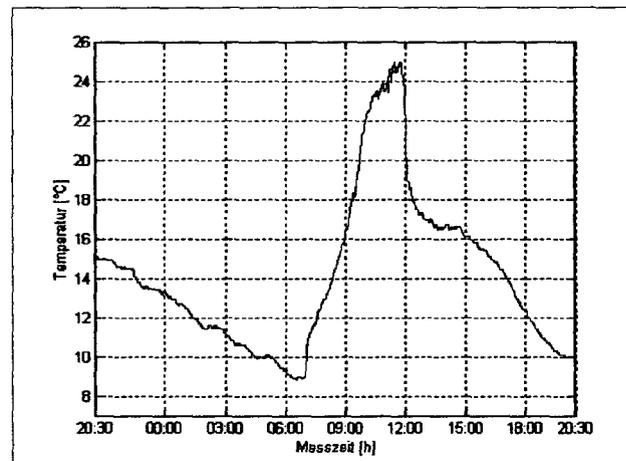


Abb. 7-82: Gemessene Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

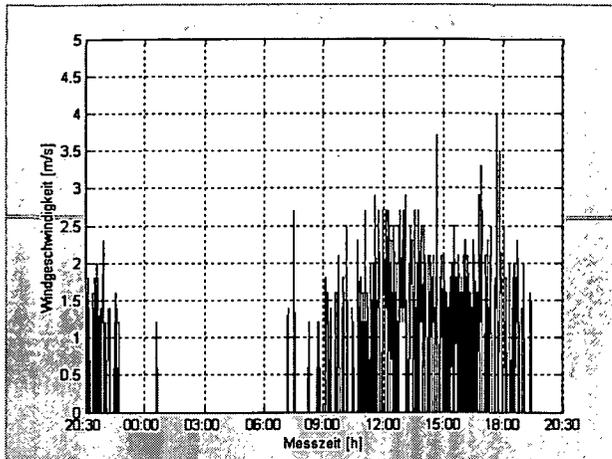
#### 7.4.6.2.2 Meteorologische Daten

##### (1) Lufttemperatur

Der Verlauf der Lufttemperatur ist in Abb. 7-82 dargestellt. Zu Beginn der Messserie sank sie von 15°C bis 9°C ab. Von 07:20 bis 11:40 steigt sie von 9°C auf 24.5°C. Dann fällt sie sehr rasch ab, so dass sie um 13:00 Uhr nur mehr 17°C beträgt. In den folgenden zwei Stunden stabilisiert sich die Temperatur und im weiteren Verlauf fällt sie wieder bis 20:30 Uhr ab und beträgt dann ca. 10°C. Die während der Beobachtungen gemessenen Lufttemperaturen schwankten zwischen + 9° und + 24.5°C.

##### (2) Windgeschwindigkeit

Abb. 7-83 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit. Vom Anfang der Messserie (20:30 Uhr) bis 22:30 Uhr wehte ein leichter Wind mit Geschwindigkeiten bis 2 m/s. Nachts war es windstill.



Am nächsten Tag ab ca. 8:40 Uhr begann der Wind wieder ununterbrochen mit Geschwindigkeiten bis zu 2.5 m/s zu wehen. Nach 19:00 Uhr war es wieder windstill.

Abb. 7-83: Gemessene Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit

#### 7.4.6.2.3 Varianzen der Zenitwinkel

Die Abb. 7-84 und 7-85 zeigen die Varianzen der Zenitwinkel für 15 Minuten-Intervalle von Stationen S4 und N8. In der Nacht sind die Varianzen kleiner und ihr Verlauf ist ruhiger. Am Tag hatten sie einen turbulenten Verlauf, der durch rasche Anstiege und Abfälle charakterisiert war.

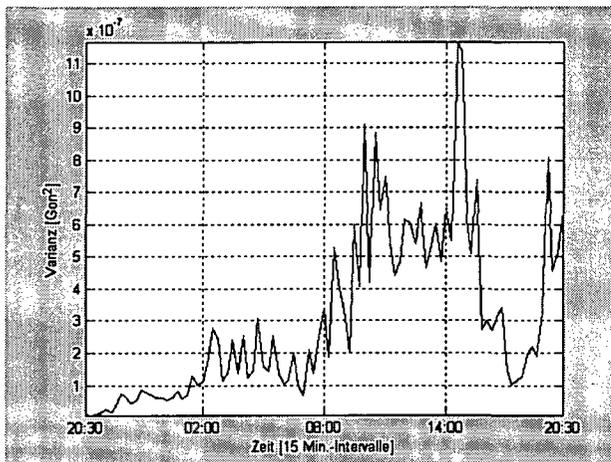


Abb. 7-84: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 1 [ME von je 15 min]

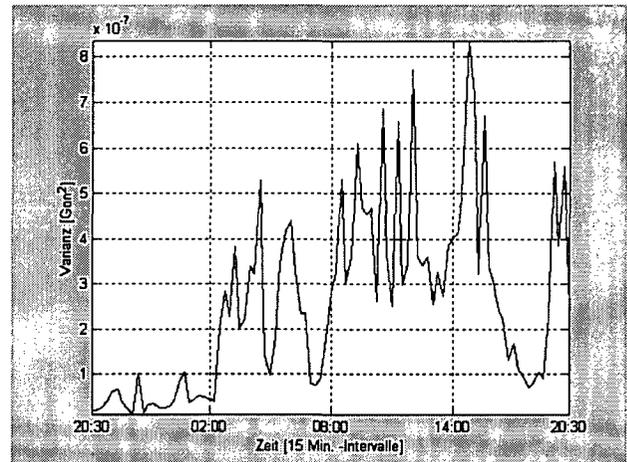


Abb. 7-85: Varianzen der Zenitwinkel auf Station 2 [ME von je 15 min]

#### 7.4.6.2.4 Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln

Die Abb. 7-86 zeigt die ermittelten Höhenunterschiede aus simultan gemessenen Zenitwinkeln für 24 Stunden. Der Mittelwert aller Messungen beträgt 0.0266 m. Auffällig ist, dass die gewonnenen Höhenunterschiede im gesamten Messintervall trendartige Schwankungen aufweisen, es überwiegen jedoch die kurzperiodische Fluktuationen.

Die Standardabweichung eines Einzelwertes beträgt 2.23 mm. Aus der Tabelle 7-5 erkennt man, dass bei den Höhenunterschieden aus Originaldaten Schwankungen von bis zu  $\pm 20$  mm, bei den über 60 min gemittelten Daten bis zu  $\pm 2.8$  mm auftraten. Durch Mittelungsprozesse von 5 min-, 15 min-, 30 min- und 60-min Epochen kann das Rauschen zunehmend weggefiltert werden. Man erkennt, dass die für die einzelnen Messepochen berechneten Höhenunterschiede deutlich geringere Schwankungen aufweisen, wenn die Dauer der Epochen verlängert wird.

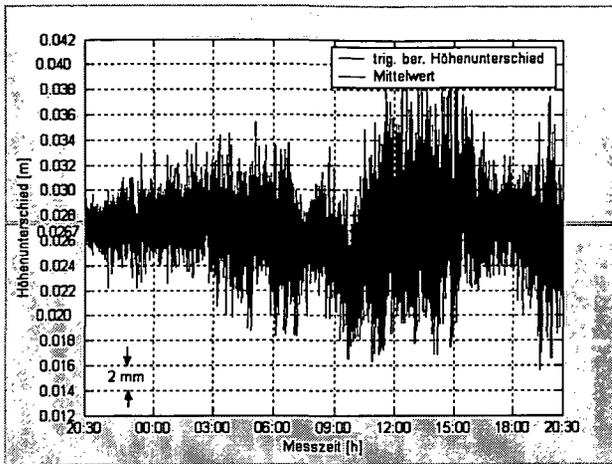


Abb. 7-86: Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)

Tab. 7-5 zeigt die Maximalwerte und Standardabweichungen für die Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Sie werden deutlich geringer nach Mittelbildungen. Die Standardabweichungen verringern sich nahezu um den Faktor 1.4, wenn die Epochenlänge von 5 min auf 60 min ausgedehnt wird.

Beobachtungsintervall	max. Schwankungen	Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen
1 s (Originaldaten)	20.0 mm	2.23 mm
5 min (gemittelt)	5.5 mm	1.04 mm
15 min (gemittelt)	4.3 mm	0.93 mm
30 min (gemittelt)	3.6 mm	0.81 mm
60 min (gemittelt)	2.8 mm	0.72 mm

Tab. 7-5: Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge

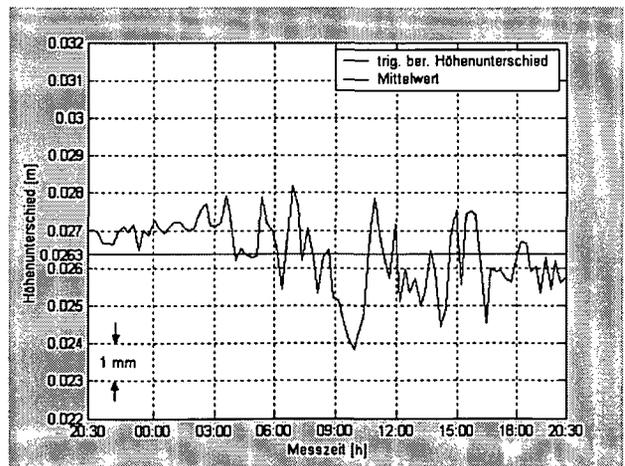
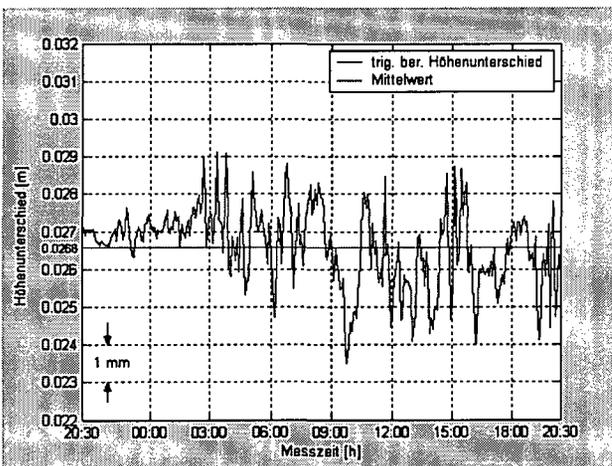


Abb. 7-87: Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

Abb. 7-88: Höhenunterschiede der 15 min-Epochen

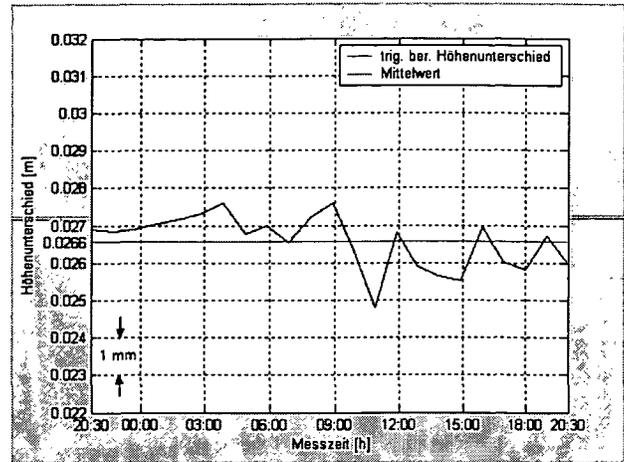
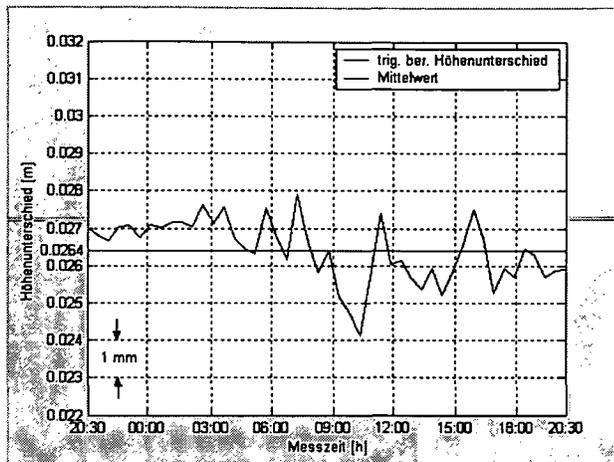


Abb. 7-89: Höhenunterschiede der 30 min-Epochen    Abb. 7-90: Höhenunterschiede der 60 min-Epochen

### 7.4.6.2.5 Statistische Analyse der Höhenunterschiede

Die Autokorrelationsfunktionen für die Messreihen der Abbildungen 7-86 bis 7-90 sind in den Abbildungen 7-91 bis 7-97 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten 72 s bzw. das Korrelationsintervall hat eine Länge von 72 Messwerten (vgl. Abb. 7-92). Mit Zunahme der Epochenlänge geht die Breite der Korrelationsintervalle zurück (vgl. Abb. 7-93 bis 7-97). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger als 55 min (vgl. Abb. 7-96) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden (vgl. Abb. 7-97), weil das Korrelationsintervall kleiner als 1 ist. Es treten folglich praktisch keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse eliminiert werden.

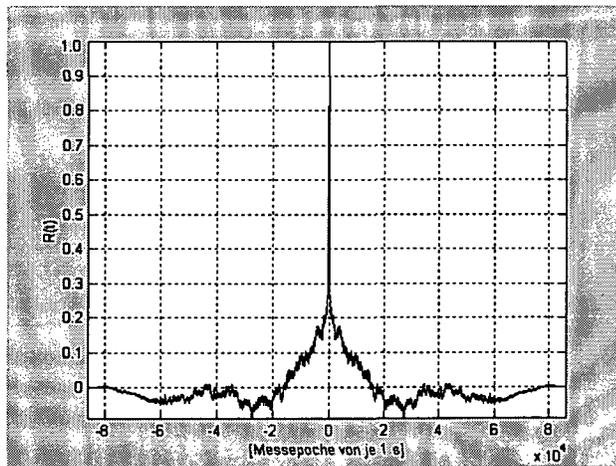


Abb. 7-91: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]

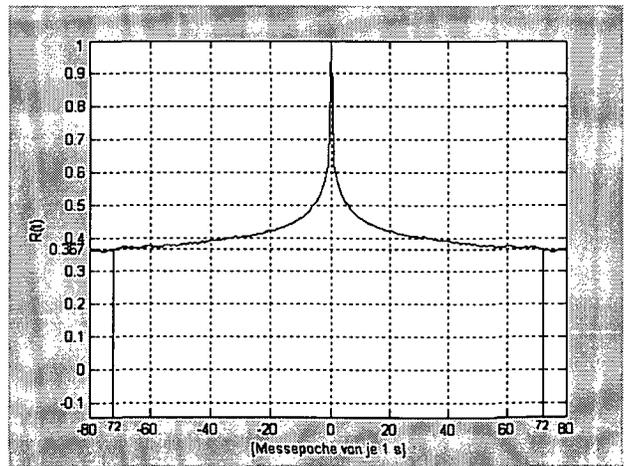


Abb. 7-92: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 80 Werte

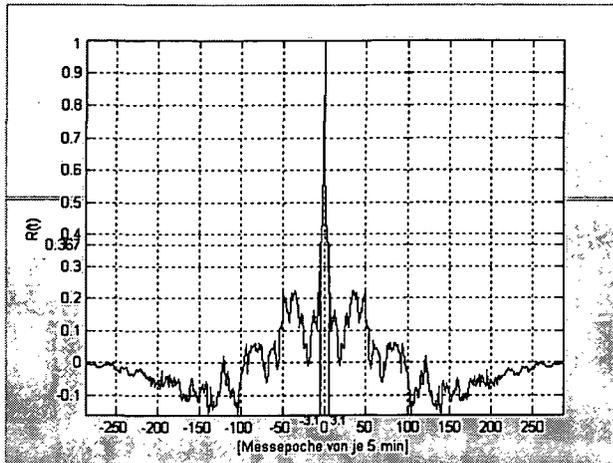


Abb. 7-93: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen

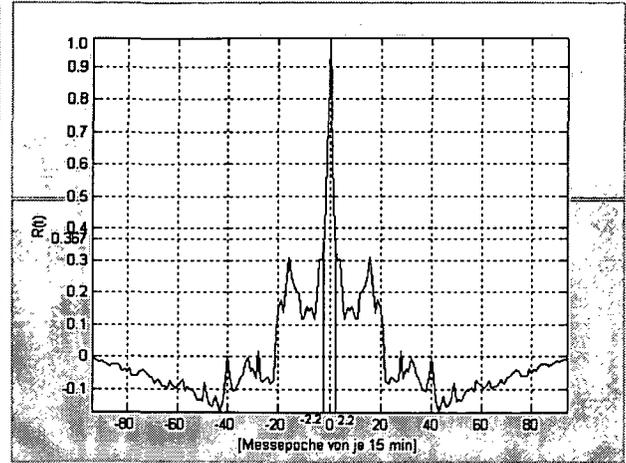


Abb. 7-94: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 min-Epochen

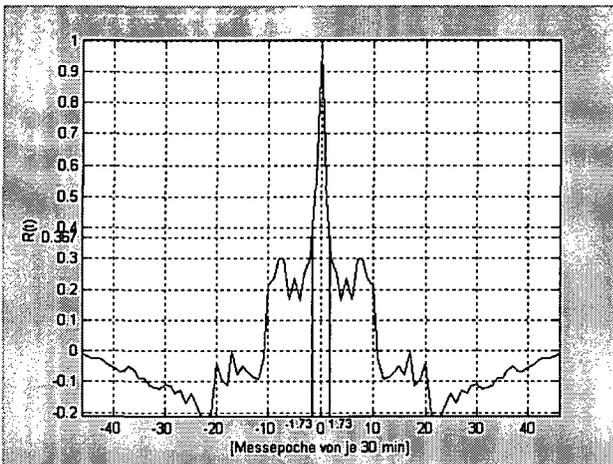


Abb. 7-95: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30 min-Epochen

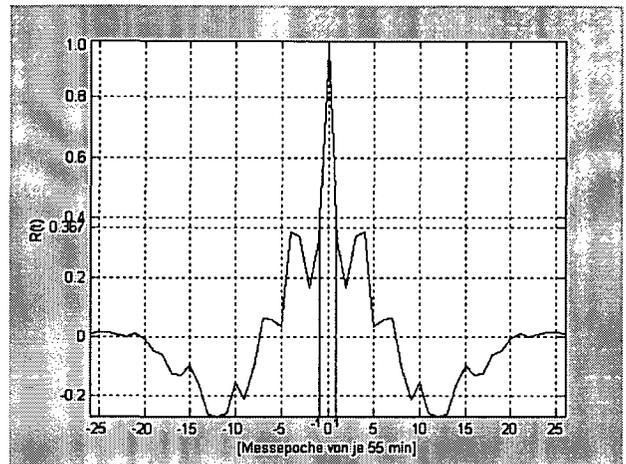


Abb. 7-96: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 55 min-Epochen

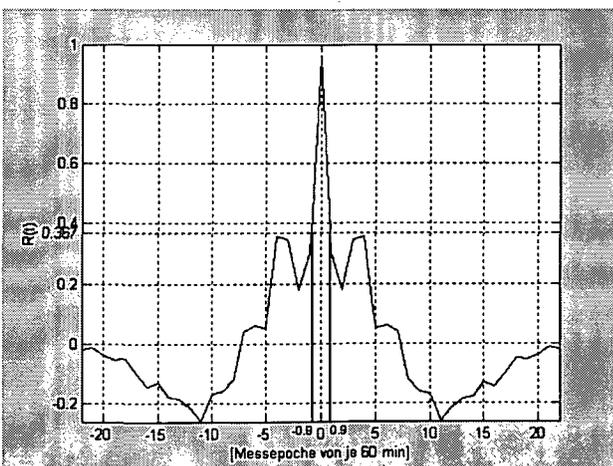


Abb. 7-97: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 60 min-Epochen

#### 7.4.6.2.6 Kurze Zusammenfassung

Aus Tabelle 7-5 und Abb. 7-96 geht hervor, dass selbst Epochen von 60 min Dauer im Sinne eines Feinnivellements keine optimale Ergebnisse hervorbringen, da die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Epochenmittel auch dann noch ca. 0.7 mm betragen. Epochenmittel aus Epochen > 55 min können praktisch als unkorreliert betrachtet werden.

### 7.4.6.3 Vergleich der Messergebnisse vom 11./12.09.02 (Nacht) und 11./12.09.02 (Tag)

Um eine detaillierte Analyse in bezug auf Tag- und Nachtmessungen durchzuführen (vgl. Kap. 7.4.5), wurde der gesamte Messbereich in zwei Teile geteilt. Der erste Teil zeigt den Höhenunterschied in der Nacht (vgl. Abb. 7-98) und der zweite Teil zeigt den Höhenunterschied am Tag (vgl. Abb. 7-99). Zwischen dem Gesamtmittel aus allen Messungen am Tag (Zeitraum: 06:30-20:30) und in der Nacht (Zeitraum: 20:30-06:30) ist eine Höhendifferenz von + 0.9 mm zu erkennen.

Dass die gemessenen Höhenunterschiede eine Abhängigkeit von der Tageszeit haben, zeigte sich auch am Beispiel des Weserübergangs bei Dedesdorf. Im Ergebnis fällt auf, dass das Mittel von 4 Übergängen am Vormittag einen um 3 mm größeren Höhenunterschied ergibt als das Mittel von den Übergängen am Nachmittag (*Gronwald, 1957*).

Aus den Abbildungen 7-98 und 7-99 ist ersichtlich, dass die Werte der Höhenunterschiede in der Nacht kleinere Schwankungen aufweisen als am Tag (vgl. Tab. 1, Anhang 2). Auch die Standardabweichungen der Höhenunterschiede bei Nacht und Tag unterscheiden sich; die in der Nacht sind kleiner als die am Tag. Die Differenz im Höhenunterschied zwischen den Messungen in der Nacht und am Tag wurde wieder festgestellt wie bei den Messungen im Juni 2002 (vgl. Kap. 7.4.5). Der Betrag ist jedoch kleiner als in Juni. In beiden Fällen ergibt sich in der Nacht ein größerer Höhenunterschied als am Tage. Weitere Informationen und Analysen sind im Anhang 2 enthalten.

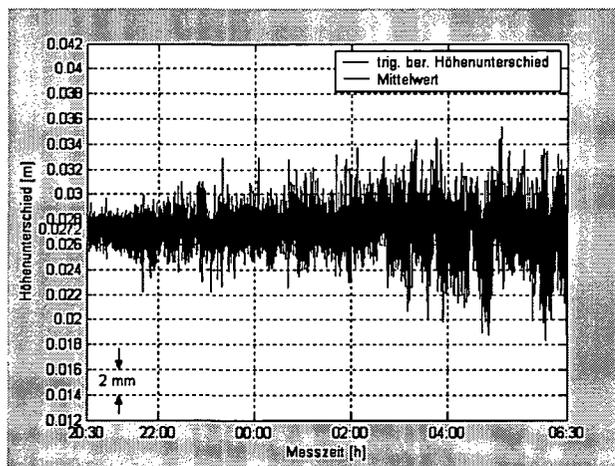


Abb. 7-98: Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten) Nacht

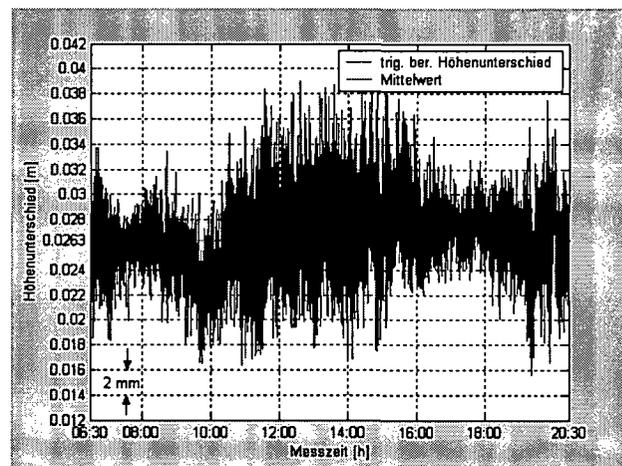


Abb. 7-99: Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten) Tag

Welche Ursache maßgeblich die unterschiedlichen Messergebnisse bei Tag und bei Nacht hervorrief, war nicht eindeutig zu erkennen. Es ist zu vermuten, dass der Sonnenstand den Höhenunterschied beeinflusst hat, da die beiden Donauufer unterschiedlich besonnt waren, d.h. eine asymmetrische Bestrahlung der Uferseiten vorlag. Am frühen Vormittag lag das Nordufer vollständig im Schatten, während das Südufer stark von der Sonne beschienen war. Ab den späten Vormittagstunden (ca. 11:00 Uhr) bis zum Nachmittag waren beide Donauufer gleichmäßig beleuchtet. Ab dem späten Nachmittag war die Situation umgekehrt. Die Symmetrie längs der Messstrecke war folglich gestört. Um diese Messergebnisse und die Systematik der Differenz im Höhenunterschied (Tag/Nacht) zu bestätigen, sollte eine weitere Messerie bei bedecktem Himmel während des Tages durchgeführt werden.

## 7.4.7 Messungen am 10.10.2002 (Messpfeiler S4-N8)

### 7.4.7.1 Wetterbedingungen

Im wesentlichen waren am 10.10.2002 gleichmäßige und günstige Bedingungen gegeben. Im Messgebiet wurden geringe Änderungen der Lufttemperatur zwischen  $8.3^{\circ}\text{C}$  und  $9.5^{\circ}\text{C}$  festgestellt (Abb. 7-101). Ein ununterbrochen wehender leichter Wind (Abb. 7-102) bis zu  $2.5\text{ m/s}$  aus gleichbleibender nördlicher Richtung ließ ein einheitliches von einem Luftkörper geprägtes Refraktionsfeld erwarten. An diesem Tag war der Himmel über die gesamte Beobachtungszeit vollständig bedeckt (8/8). Die Beobachtungsstrecke war daher während der Beobachtungszeit diffus beleuchtet.

Da der Beobachtungstag aufgrund des Nebels keine intensive Sonneneinstrahlung zuließ, waren nur kleine Zenitwinkelschwankungen zu erwarten (Abb. 7-100). In den Nachmittagsstunden ab ca. 14:30 Uhr löste sich der Nebel auf, der Himmel blieb allerdings bedeckt und die Sonne kam nicht zum Vorschein. Die relative Luftfeuchtigkeit (Abb. 7-103) nahm nach 14:00 Uhr ab, was eine geringe Änderung des Refraktionseinflusses bedingte, denn auf beiden Stationen ist gleichzeitig eine Abnahme der Zenitwinkel zu sehen.

Diese Wetterverhältnisse wurden für die Untersuchungen gewählt, um die systematischen Unterschiede zwischen den Tag- und Nachtmessungen (vgl. Kap. 7.4.5 und Kap. 7.4.6.3) weiter zu untersuchen.

### 7.4.7.2 Berechnungsergebnisse

#### 7.4.7.2.1 Zenitwinkel

Die Zenitwinkel auf beiden Stationen zeigten einen ausgeglichenen Verlauf. Auffällig war der Sprung der Zenitwinkel in der Zeit ab 15:30 Uhr bis zum Ende der Messzeit von  $0.3\text{ mgon}$ , der auf den aufsteigenden und sich lictenden Nebel, bzw. die Abnahme der Luftfeuchtigkeit, zurückzuführen ist. Es ist bemerkenswert, dass beide Geräte nicht nur zeitgleich den Refraktionseffekt feststellen, sondern in etwa auch einen ähnlich großen Betrag desselben Effekts ausweisen (vgl. Kap. 5.3, Abb. 5-9, S. 31). Wie sich später noch zeigte, hat dieser Sprung keinen Einfluss auf die Berechnung des Höhenunterschieds bewirkt (vgl. Abb. 7-106).

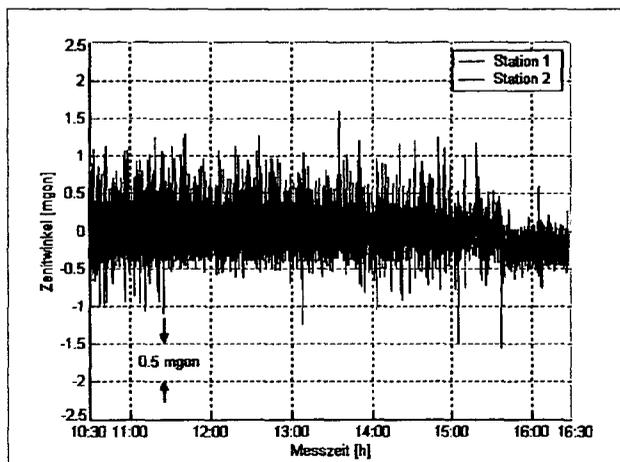


Abb. 7-100: Vergleich der Zenitwinkel der Stationen 1 (S4) und 2 (N7) (Originaldaten)

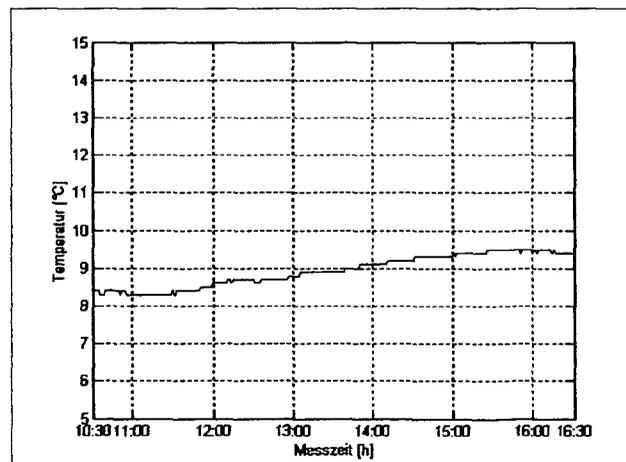


Abb. 7-101: Gemessene Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

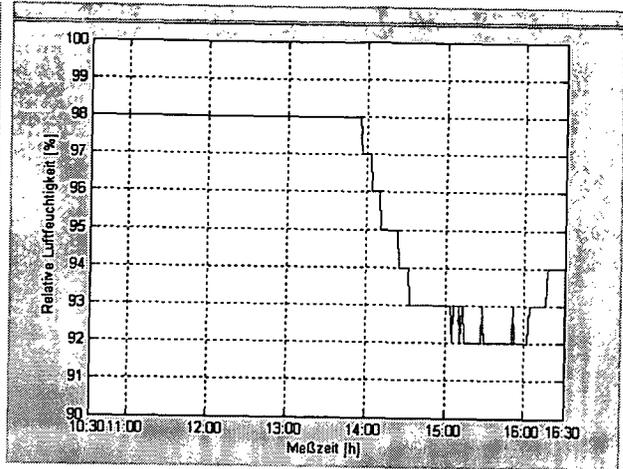
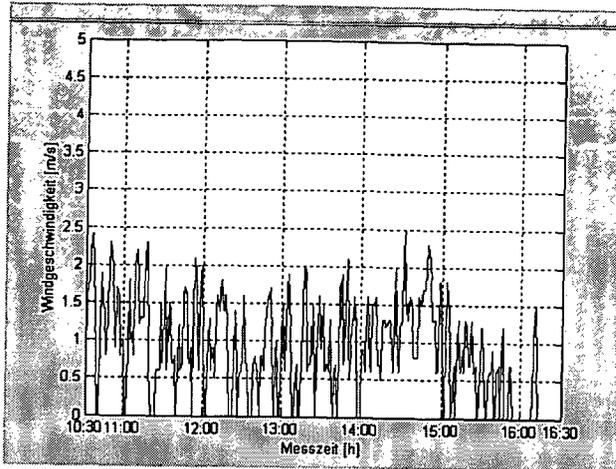
#### 7.4.7.2.2 Meteorologische Daten

##### (1) Lufttemperatur

Während der Beobachtungszeit herrschte eine ausgeglichene Lufttemperatur. Im Messgebiet wurden geringe Änderungen der Lufttemperatur zwischen  $8.3^{\circ}\text{C}$  und  $9.5^{\circ}\text{C}$  festgestellt (Abb. 7-101).

**(2) Windgeschwindigkeit**

Abb. 7-102 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Während der Beobachtungszeit wehte ununterbrochen ein leichter Wind. Die Windgeschwindigkeit betrug meist 1.5 m/s, mitunter bis zu 2.5 m/s.



**Abb. 7-102:** Gemessene Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit

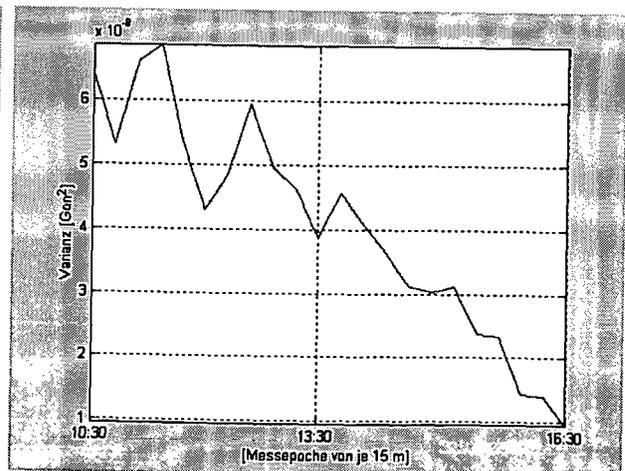
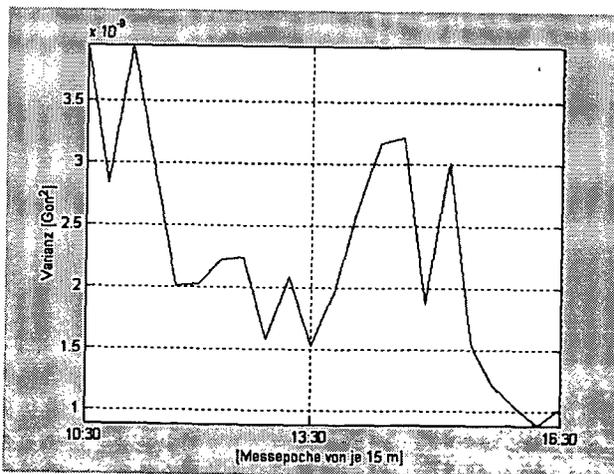
**Abb. 7-103:** Gemessene relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit

**(3) Relative Luftfeuchtigkeit**

Die Abb. 7-103 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Zu Beginn der Beobachtungen von 10:30 Uhr bis 14:00 Uhr hat die relative Luftfeuchtigkeit einen konstanten Verlauf; sie beträgt 98%. Ab 14:00 Uhr sank die relative Luftfeuchtigkeit langsam, sodass sie um 15:00 Uhr 92% betrug. Ab 16:00 Uhr stieg sie langsam wieder.

**7.4.7.2.3 Varianzen der Zenitwinkel**

Die Abb. 7-104 und 7-105 zeigen die Varianzen für 15 Minuten-Intervalle der Zenitwinkel von Station S4 und N8. Zu Beginn der Messserie sind die Varianzen größer, danach fallen sie schnell ab.



**Abb. 7-104:** Varianzen der Zenitwinkel auf Station 1 [ME von je 15 min]

**Abb. 7-105:** Varianzen der Zenitwinkel auf Station 2 [ME von je 15 min]

### 7.4.7.2.4 Höhenunterschiede aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln

Abb. 7-106 zeigt die ermittelten Höhenunterschiede aus simultan gemessenen Zenitwinkeln für 6 Stunden. Der Mittelwert aller Messungen beträgt 0.0278 m. Er entspricht daher dem Wert 0.028 m vom 11./12.09.2002 mit einer Genauigkeit von 0.6 mm, was die Interpretation am Ende von Kap. 7.4.6.3 bestätigt. Der gewonnene Höhenunterschied weist im gesamten Messintervall keine trendartigen Schwankungen auf. Es überwiegen kurzperiodische Fluktuationen die durch Mittelbildungen geglättet wurden. Durch Mittelungsprozesse von 5 min-, 15 min-, 30 min- und 60 min-Epochen kann das Rauschen zunehmend weggefiltert werden. Die Abb. 7-107 bis 7-109 zeigen die geglätteten Werte. Man erkennt, dass die für die einzelnen Messepochen berechneten Höhenunterschiede deutlich geringere Werte aufweisen, wenn die Dauer der Epochen verlängert wird. Tab. 7-6 zeigt die Maximalwerte und die Standardabweichungen für die Originalwerte und die Mittelwerte aus Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Die Mittelwerte aus 5 min-Epochen unterschreiten bereits die Genauigkeit, mit der das System in Labor kalibriert werden kann. Die Maximalwerte der Mittel sind etwa viermal größer als die zugehörigen Standardabweichungen.

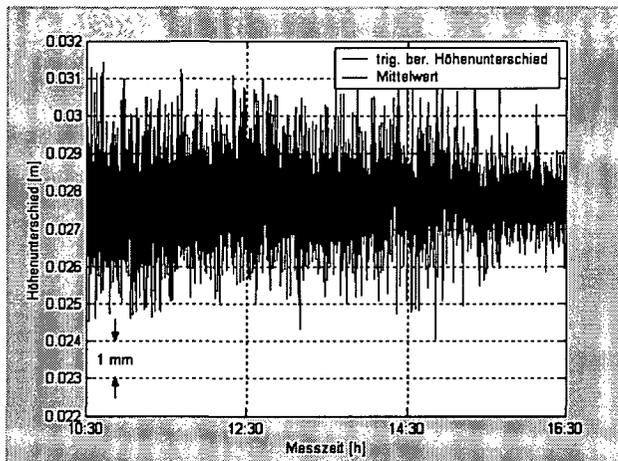


Abb. 7-106: Höhenunterschied aus gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkeln (Originaldaten)

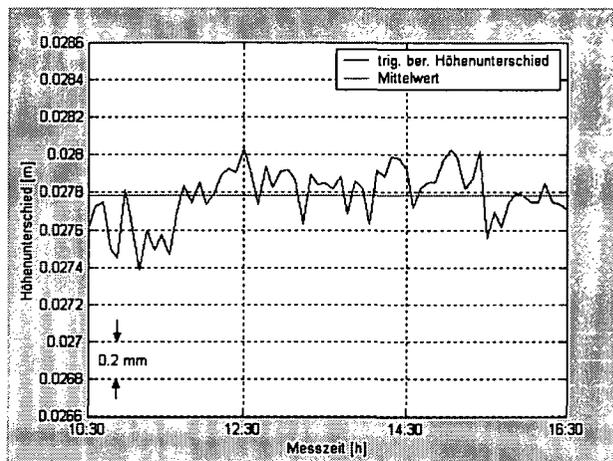


Abb. 7-107: Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

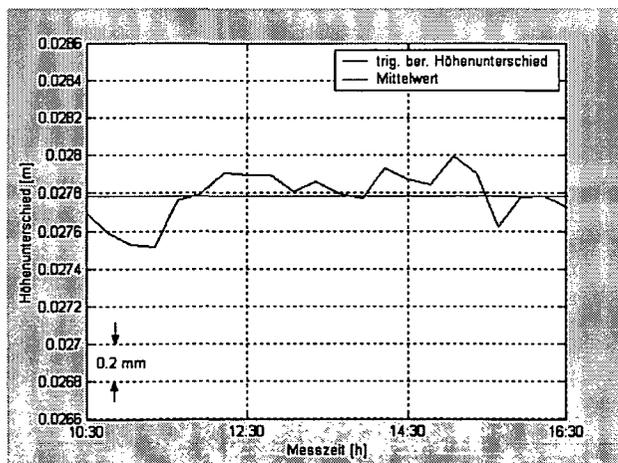


Abb. 7-108: Höhenunterschiede der 15 min-Epochen

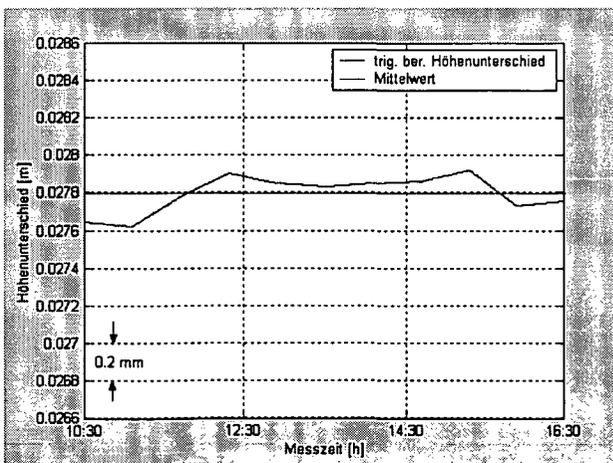


Abb. 7-109: Höhenunterschiede der 30 min-Epochen

Die Standardabweichungen der Höhenunterschiede der Originaldaten und Epochen sind zur besseren Übersicht in der Tab. 7-6 gegenübergestellt. Die Standardabweichung eines Einzelwerts

beträgt 0.75 mm. Bei den Höhenunterschieden aus Originaldaten traten Schwankungen von bis zu  $\pm 6$  mm auf, bei über 30 min gemittelten Daten traten Schwankungen bis zu  $\pm 0.30$  mm auf.

Beobachtungsintervall	max. Schwankungen	Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen
1 s (Originaldaten)	6.00 mm	0.75 mm
5 min (gemittelt)	0.61 mm	0.17 mm
15 min (gemittelt)	0.43 mm	0.15 mm
30 min (gemittelt)	0.35 mm	0.14 mm

Tab. 7-6: Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge

7.4.7.2.5 Statistische Analyse der Höhenunterschiede

Die Autokorrelationsfunktionen für die Messreihen der Abb. 7-106 bis 7-109 sind in den Abb. 7-110 bis 7-114 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

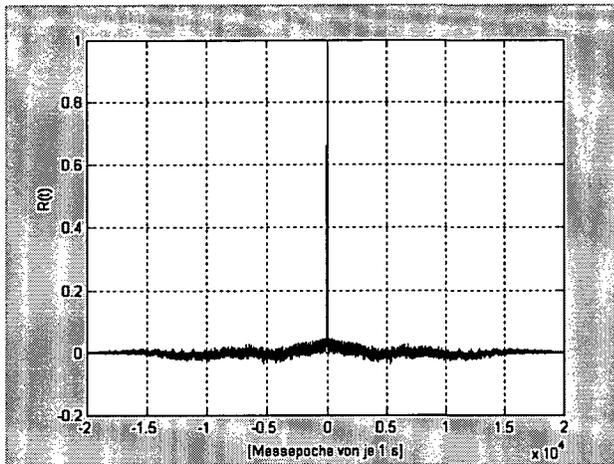


Abb. 7-110: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]

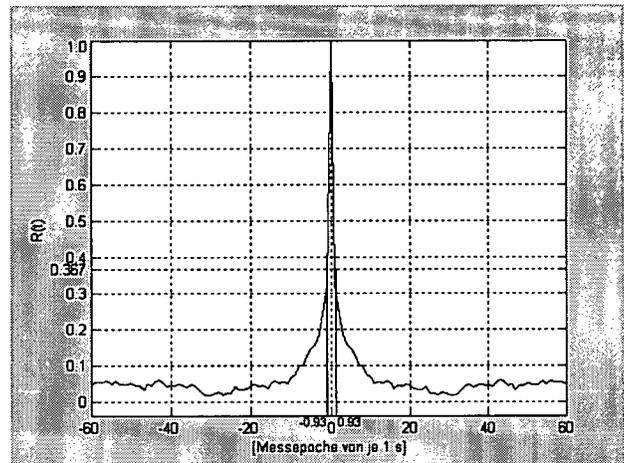


Abb. 7-111: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte

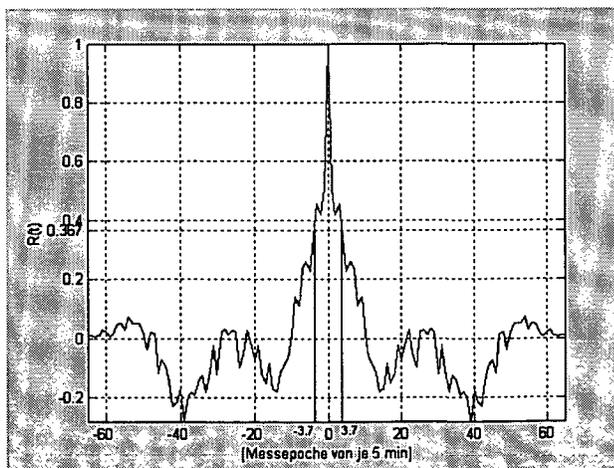


Abb. 7-112: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen

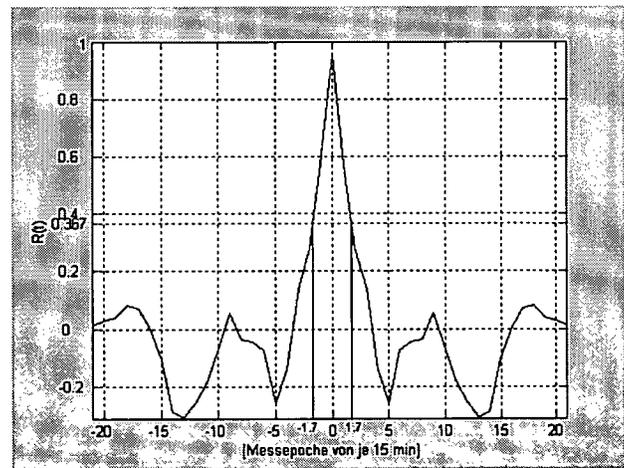
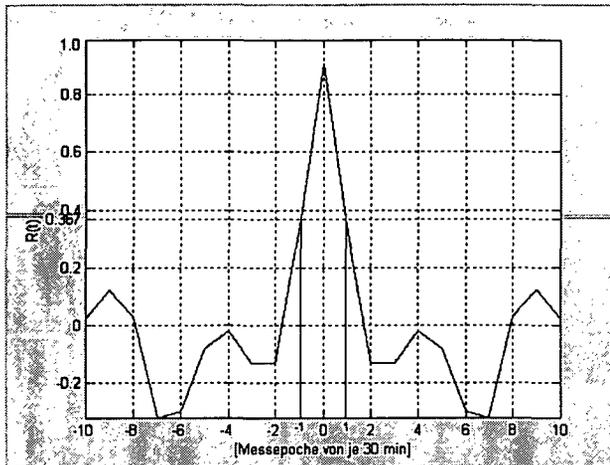


Abb. 7-113: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 min-Epochen



Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten 0,9 s (vgl. Abb. 7-111). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger als 30 min (vgl. Abb. 7-114) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Es treten folglich keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse eliminiert werden.

Abb. 7-114: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30-min-Epochen

#### 7.4.7.2.6 Kurze Zusammenfassung

Aus Tabelle 7-6 geht hervor, dass Epochen  $> 5$  min im Sinne eines Feinnivellements als optimal betrachtet werden können. Allerdings können erst Epochenmittel von Epochen  $> 30$  min als praktisch unkorreliert betrachtet werden. Unterschiedliche Varianzen der Zenitwinkel wirken sich hier nicht merkbar auf die Messergebnisse aus.

### 7.5 Optimierung des Verfahrens

Alle Versuchstrecken waren so ausgewählt worden, dass Topographie und Bewuchs entlang der Strecke homogene Verhältnisse vermuten lassen, um möglichst günstige Voraussetzungen für das angewandte Messverfahren zu haben. Die Messungen wurden teils bei extremen Wetterbedingungen (starke Sonneneinstrahlung, Temperaturschwankungen, teilweise bei Bewölkung mit geringen Temperaturschwankungen) durchgeführt. Auf diese Weise konnte untersucht werden, wie weit optimale Ergebnisse des Messverfahrens von äußeren Bedingungen abhängen. Die Voraussetzungen für die einzelnen Experimente und Teile ihrer Ergebnisse sind in der Tabelle 7.7 wiedergegeben. Als wichtige Ergebnisse sollen in dieser Tabelle zunächst diskutiert werden:

- (a) ab welcher Sessionsdauer sind die Sessionsmittel unkorreliert und
- (b) mit welchem Sessionsmitteln wird eine Genauigkeit erreicht, die der Kalibrier-genauigkeit des Messsystems von ungefähr 0,1 mm (s. Kap. 5.5) möglichst nahe kommt.

#### 7.5.1 Optimierung der Sessionsdauer

##### (1) Zeitdauer unkorrelierter Sessionsmittel

Es fällt zunächst auf, dass die Zeitdauer nach der die einzelnen Sessionsmittel nicht mehr miteinander unkorreliert sind, unabhängig von der Streckenlänge ist. Die Zeitdauer fällt lang aus, wenn in kürzerer Zeit große Temperaturschwankungen vorliegen. Sie ist außerdem groß, wenn die Varianzen relativ klein sind. Wenn die Varianzen groß sind, haben schon die einzelnen Messwerte eine große Unhängigkeit.

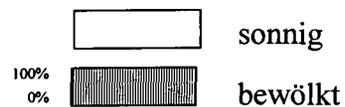
##### (2) Optimale Sessionsdauer und Genauigkeit

Die Genauigkeit auf den Teststrecken kann dann als optimal betrachtet werden, wenn sie derjenigen entspricht, welche etwa bei der Kalibrierung im Messkeller erreicht wurde. Wie Tab. 7-7 zeigt, ist die erreichbare Genauigkeit weniger abhängig von der Streckenlänge als vielmehr hauptsächlich von äußeren Bedingungen. Die Kalibrierungsgenauigkeit wurde annähernd auf der kurzen Strecke (46,0 m) im Hof bei diffusen Sonneneinstrahlungen und bei gleichmäßigen

Datum	Strecke	Länge [m]	Zeit [h]	Bewölkungsgrad <sup>1</sup> [%]	Temperatur (°C) [min.-max.]	Zeitdauer für unkorrelierte Sessionsmittel [mm]	Optimale Sessions- dauer/Genauigkeit [mm]/(1σ)
10.09.2001	Hof	46.0	17:00-18:00		16.7-18.0	1	1 0.2
13/14.10.2001	KW Simmerig	125.10	12:30-12:30		12.8-23.9	30	30 0.3
18.06.2002	S3-N7	387.007	15:00-21:00		26.3-20.4	1.5	60 0.2
18/19.06.2002	S3-N7	387.007	22:00-05:00		26.3-20.4	10	60 0.2
11/12.09.2002	S4-N8	386.775	20:30-20:30		9.1-24.5	55	60 0.7
11/12.09.2002	S4-N8	386.775	20:30-06:30		15.2-9.1	15	60 0.3
12.09.2002	S4-N8	386.775	06:30-20:30		9.1-24.5	30	60 0.7
10.10.2002	S4-N8	386.775	10:30-16:30		8.3-9.5	30	5 0.2

Tab. 6-7: Bewölkungsgrad, Lufttemperatur, Zeitdauer für unkorrelierte Sessionsmittel und optimale Sessionsdauer/Genauigkeit der Messungen

Legende:



<sup>1</sup> Bewölkungsgrad in Prozent der Himmelbedeckung.

Temperaturverhalten sowie auf der 125 m langen Strecken erreicht. Gleich gute Ergebnisse wurden aber auch bei kürzerer Sessionsdauer auf der Strecke S4-N8 (387 m) bei gleichmäßigen Temperaturen aber bei bedecktem Himmel erreicht. Die optimale Sessionsdauer beträgt auf der kurzen Strecke 1 min und auf den anderen beiden 30 min.

In allen anderen Fällen wird eine bessere Genauigkeit erst nach einer Sessionsdauer von 60 min erreicht. Die Standardabweichungen betragen 0.2 mm ( $1\sigma$ ), wenn für die Strecke S3-N7 zwischen Tag- und Nachtmessungen unterschieden wurde. Bei Unterteilung in Nacht- und Tagmessungen blieben die Temperaturunterschiede gering.

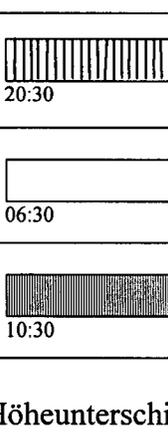
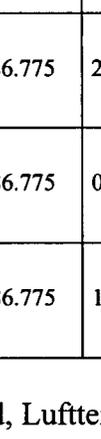
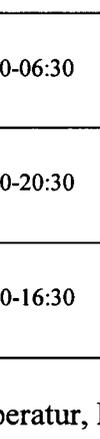
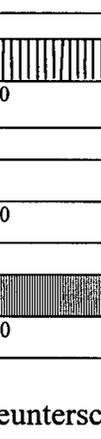
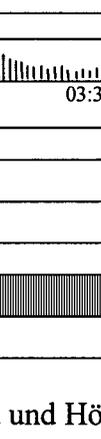
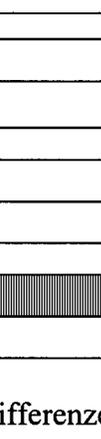
Eine relative geringe Genauigkeit von 0.7 mm wurde auf der Strecke S4-N8 erreicht (Messung vom 11./12.09.2002), als über 24-Stunden beobachtet wurde. Die Temperaturunterschiede betragen während der Beobachtungszeit bis zu 15°C. Genauigkeitssteigerungen gibt es, wenn man auch hier die gesamte Messzeit in eine Nacht- und Tagepoche unterteilt. In der Nacht konnte bei geringen Temperaturänderungen eine Genauigkeiten von 0.3 mm ( $1\sigma$ ) und am Tag bei relativ hohen Temperaturänderungen (ca. 15°C) eine Genauigkeit von 0.7 mm ( $1\sigma$ ) erreicht werden.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass mit dem hier entwickelten Messsystem bei homogenem Untergrund, auch bei extremen Wetterbedingungen, Höhenunterschiede mit einer Genauigkeit besser als 1 mm erzielt werden können. Dies gilt auch für Strecken von einigen 100 m Länge. Genauigkeiten, die nahezu denen eines Feinnivellements entsprechen lassen sich entweder bei bedecktem Himmel erzielen oder dann, wenn zwischen Nacht- und Tagepochen unterschieden wird. Beim Wechsel vom Tag zur Nacht können die Messergebnisse geringfügig systematisch verfälscht werden. Dies soll im folgenden Kapitel 7.6 untersucht werden.

## **7.6 Untersuchungen zur äußeren und inneren Genauigkeit der berechneten Höhenunterschiede**

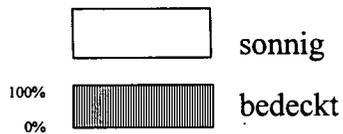
Um zu überprüfen, wie weit es sich bei den bisher berechneten Genauigkeitsmaßen um äußere Genauigkeiten handelt, sollen nun noch im Brückennetz Nivellementsschleifenschlüsse (siehe Abb. 7-115) berechnet werden. Durch Feinnivellements zwischen den Pfeilern S3-S4 und N7-N8 gelang es eine Schleife zu bilden und so die Messergebnisse zu verproben. Die Schleifenberechnung ist eine Kombination von geo- und trigonometrischem Nivellement. Es stehen vier Pfeiler (S3, S4, N7 und N8) zur Verfügung, von denen die drei erwähnten Beobachtungsreihen durchgeführt wurden. Für die erste Messserie wurde zwischen den Messpfeilern S3 und N7 beobachtet, für die zweite und dritte Messserie zwischen den Messpfeilern S4 und N8. Zwischen den Messpfeilern S3-N7 und S4-N8 wurde der Höhenunterschied trigonometrisch berechnet, während zwischen den Messpfeilern S3-S4 und N7-N8 geometrisch nivelliert wurde. Mit dem Nivellier Ni 2000 wurden auf beiden Ufern je 6 Messungen (Hin und Rück) in verschiedenen Zeiträumen durchgeführt, so dass der Mittelwert aus 6 Messungen als Wert für weitere Berechnungen angenommen wurde.

In der Tabelle 7-8 sind für das Testnetz an der Donau (s. Abb. 7-115) die äußeren Bedingungen der Experimente, sowie die einzelnen Höhenunterschiede und die Höhendifferenzen zwischen Nacht und Tag zusammengestellt. Die Ergebnisse der Strecke S3-N7 zeigen, dass der Höhenunterschied in der Nacht sich um 1.8 mm größer ergab als am Tag. Die Strecke S4-N8 wurde 24 Stunden beobachtet. Unterteilt man die gesamte Beobachtungsdauer in eine Nacht- und Tagesepoche, so erkennt man, dass der Höhenunterschied in der Nacht um 0.9 mm größer ist als am Tag. Der Vergleich der Ergebnisse bestätigt so, dass beim Übergang vom Tag zur Nacht systematische Effekte die Messergebnisse beeinflussen, wenn am Tag starke Sonneneinstrahlung gegeben war.

Datum	Strecke	Länge [m]	Zeit [h]	Bewölkungsgrad (%)	Temperatur (°C) [min.-max.]	Höhenunterschied <sup>1</sup> [m]	Höhendifferenzen (Tag/Nacht) [mm]
18.06.2002	S3-N7	387.007	15:00-21:00		32.0-27.4	0.0208	1.8
18./19.06.2002	S3-N7	387.007	22:00-05:00		26.3-20.4	0.0226	
11./12.09.2002	S4-N8	386.775	20:30-20:30		9.1-24.5	0.0267	0.9
11./12.09.2002	S4-N8	386.775	20:30-06:30		15.2-9.1	0.0272	
11./12.09.2002	S4-N8	386.775	06:30-20:30		9.1-24.5	0.0263	
10.10.2002	S4-N8	386.775	10:30-16:30		8.3-9.5	0.0278	

**Tab. 6-8:** Bewölkungsgrad, Lufttemperatur, Höheunterschied und Höhendifferenzen (Tag/Nacht) der Messungen

Legende:



<sup>1</sup> Der Mittelwert des Höhenunterschieds aus allen Einzelmessungen (Originaldaten)

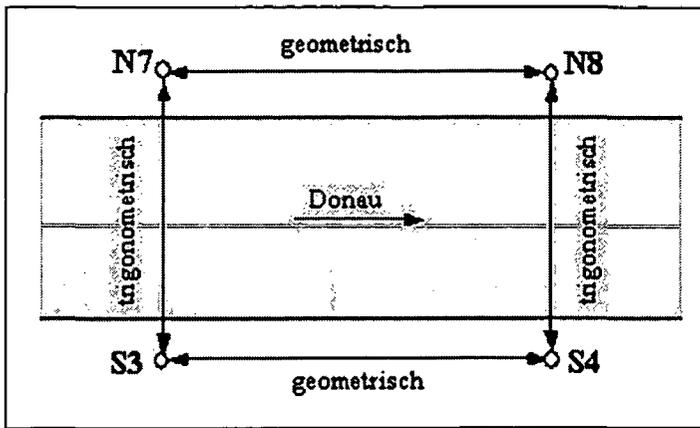


Abb. 7-115: Schematische Darstellung der geschlossenen Schleife (Skizze nicht maßstäblich)

Die am 10.10.02 auf der Strecke S4-N8 durchgeführten Messungen, die bei bedecktem Himmel und niederen Temperaturen durchgeführt wurden, unterscheiden sich nur geringfügig von denen, die am 11./12.09.2002 auf der gleichen Strecke in der Nacht ausgeführt wurden. Der Unterschied zwischen Tag und Nacht beträgt hier 0.6 mm. Der Unterschied zwischen den Tagesergebnissen am 10.10.2002 und 11./12.09.2002 beträgt 1.5 mm. Bei extremen Witterungsbedingungen können die Nachtmessungen also als qualitativ (hoch)genau betrachtet werden.

Um dies weiter zu bestätigen sind eine Anzahl von Schleifenschlüssen berechnet worden (s. S. 82 und 83). Es konnte so auch das Ergebnis der Nachtmessungen der Strecke S3-N7 in Betracht gezogen werden. Nachfolgend sind mehrere Schleifen mit unterschiedlichen Kombinationen des Höheunterschiedes berechnet worden. Die optimalen Ergebnisse beim Schleifenschluss ergeben sich, wenn die Strecke S3-N7 (in der Nacht) und S4-N8 am Tag (bei bedecktem Himmel) am 10.10.2002 verwendet werden. Der Widerspruch beträgt dann in der Schleife nur 0.3 mm. Der größte Widerspruch beträgt 3.6 mm (vgl. Schleife (6)) wenn beide Strecken (S3-N7 am 18/19.06.2002 und S4-N8 am 11./12.09.2002) vom Tag (wolkenloser Himmel) verwendet werden. Insgesamt bestätigen die Schleifenschlüsse, dass die Messungen am Tag systematisch verfälscht werden, wenn starke Sonneneinstrahlung vorliegt, was auch am Ende des Kapitels 7.5 begründet wird. Die Genauigkeitsangaben am Tage bei starker Sonneneinstrahlung können daher nur als innere Genauigkeit betrachtet werden.

### (1) Erste Schleife

S3 - S4 = + 0.0090 m	(g)	g...geometrisch nivelliert
S3 - N7 = + 0.0226 m	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
N8 - N7 = - 0.0597 m	(g)	g...geometrisch nivelliert
S4 - N8 = + 0.0278 m	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h$	= - 0.0003 m	

### (2) Zweite Schleife (alle Messungen in der Nacht)

S3 - S4 = + 0.0090 m	(g)	g...geometrisch nivelliert
S3 - N7 = + 0.0226 m	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
N8 - N7 = - 0.0597 m	(g)	g...geometrisch nivelliert
S4 - N8 = + 0.0272 m	(t)	t...trigonometrisch (11./12.09.2002, Nacht)
$\Sigma\Delta h$	= - 0.0008 m	

### (3) Dritte Schleife

S3 - S4 = + 0.0090 m	(g)	g...geometrisch nivelliert
S3 - N7 = + 0.0226 m	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)

$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0266 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (11./12.09.2002, 24-Stunden)
$\Sigma\Delta h = - 0.0015 \text{ m}$		

**(4) Vierte Schleife (alle Messungen am Tag)**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0208 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18.06.2002, Tag)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0278 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = - 0.0021 \text{ m}$		

**(5) Fünfte Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0208 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18.06.2002, Tag)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0266 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (11./12.09.2002, 24-Stunden)
$\Sigma\Delta h = - 0.0033 \text{ m}$		

**(6) Sechste Schleife (alle Messungen am Tag)**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0208 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18.06.2002, Tag)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0263 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (12.09.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = - 0.0036 \text{ m}$		

**(7) Siebente Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0230 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0277 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = 0.0000 \text{ m}$		

**(8) Achte Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0229 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0280 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta = + 0.0001 \text{ m}$		

**(9) Neunte Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0228 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0281 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = + 0.0002 \text{ m}$		

**(10) Zehnte Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0227 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)

$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0275 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = - 0.0003 \text{ m}$		

**(11) Elfte Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0222 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0278 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = - 0.0007 \text{ m}$		

**(12) Zwölfte Schleife**

$S3 - S4 = + 0.0090 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S3 - N7 = + 0.0224 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (18./19.06.2002, Nacht)
$N8 - N7 = - 0.0597 \text{ m}$	(g)	g...geometrisch nivelliert
$S4 - N8 = + 0.0272 \text{ m}$	(t)	t...trigonometrisch (10.10.2002, Tag)
$\Sigma\Delta h = - 0.0011 \text{ m}$		

**7.7 Der Gang des wirksamen Refraktionskoeffizienten  $k$  über Wasserflächen**

Die beobachteten Zenitwinkel sollten außer zur Berechnung der Höhenunterschiede auch zur Ermittlung der wirksamen Refraktionskoeffizienten dienen. Bei der trigonometrischen Höhenmessung zwischen zwei Uferpunkten über die Wasserflächen hinweg enthält der Refraktionskoeffizient sowohl den Einfluss der Wasserfläche als auch den des Festlandes. Der Refraktionskoeffizient wurde direkt aus den geodätischen Messungen der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkel (s. Kap. 3.1.2) zwischen den beiden Pfeilern ermittelt.

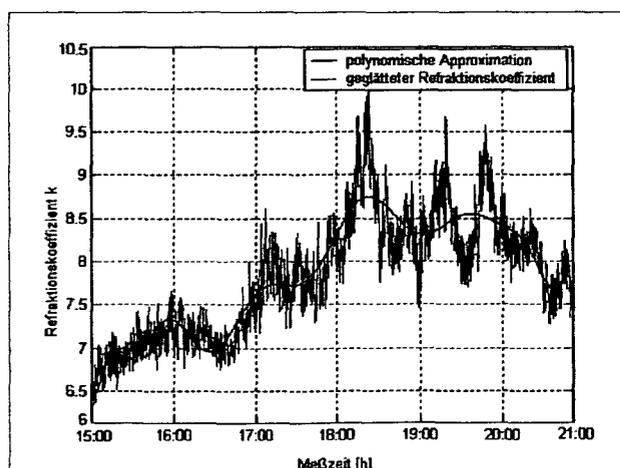


Abb. 7-116: Gang der Refraktionskoeffizienten am 18.06.2002 Messzeit 15:00-21:00 Uhr (klarer Tag)

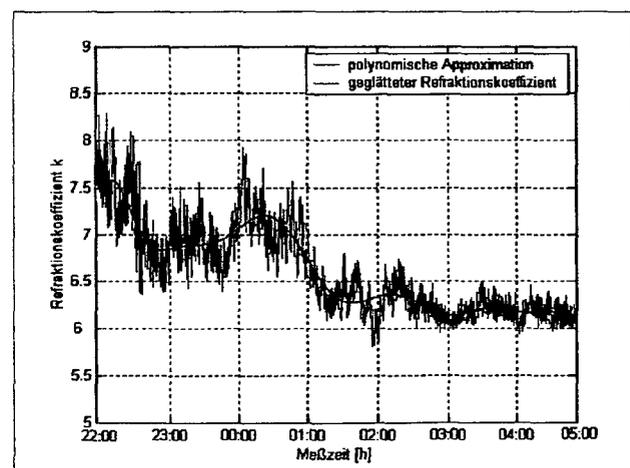


Abb. 7-117: Gang der Refraktionskoeffizienten am 18./19.06.2002, Messzeit 22:00-05:00 Uhr (klare Nacht)

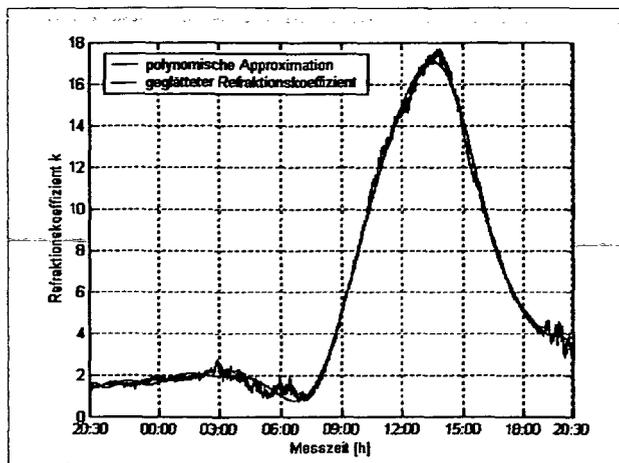


Abb. 7-118: Gang der Refraktionskoeffizienten am 11./12.09.2002 (24 Stunden, klarer Tag)

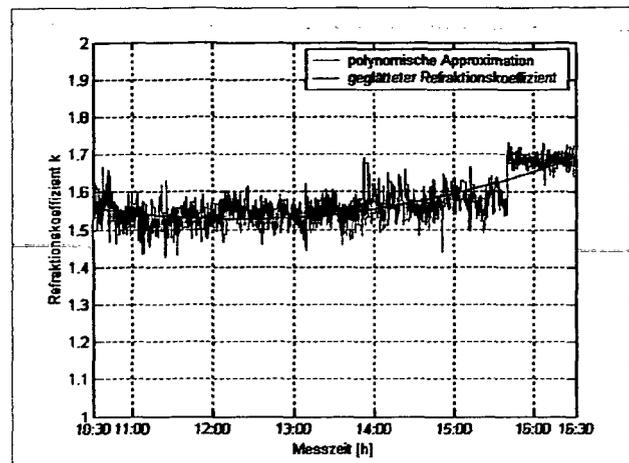


Abb. 7-119: Gang der Refraktionskoeffizienten am 10.10.2002, Messzeit 10:30-16:30 Uhr (bedeckter Tag)

Der Verlauf aller bestimmten Refraktionskoeffizienten gleicht dem Verlauf der gemessenen Temperatur, d.h. sie sind während der Nacht kleiner als bei Tag. Für einen klaren Tag Mitte September schwankt der Refraktionskoeffizient am Tag wegen der raschen Variationen der Temperatur (Abb. 7-118) sehr stark (von 1 bis zu 18). Dagegen ist der Verlauf des Refraktionskoeffizienten an einem klaren Tag und langsamen Temperaturänderungen ruhiger (Abb. 7-119). Bei Messungen in der Nacht schwankt der Refraktionskoeffizient aufgrund der ausgeglichenen Temperatur wenig (Abb. 7-117). Die großen Schwankungen der Refraktionskoeffizienten um Werte bis 18 (Messreihe am 11./12.09.2002) und im Mittelwert ( $k = 7.823$  am 18./19.06.2002, Nachmittag/Abend;  $k = 6.607$  am 18./19.06.02, Nacht;  $k = 5.784$  am 11./12.09.2002 und  $k = 1.569$  am 10.10.2002, Tag) sind ein Zeichen dafür, dass die Wasseroberfläche einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf des Zielstrahles ausübt.

Bei Messungen über die Wasserfläche eines ca. 20 m breiten Flussarmes mit Zielweiten von 20-100 m kommt Heinert auf Refraktionskoeffizienten zwischen  $-4$  und  $+5$  (vgl. Abb. 3.2a, S. 85, in Heinert, et al., 2002). Er vermutet der Grund in der möglichen Inversion der Luftschichten, insbesondere in den frühen Morgenstunden (Heinert, et al., 2002).

Hübner (1980) kommt bei seinen umfangreichen Untersuchungen mit Lasern über unterschiedliche Bodenbedeckungen (Rasen, Betondecke und Kiesboden) und verschiedenen Bodenhöhe (ab 0.5 m bis 2.5 m) zu solchen und noch extremeren Werten der Refraktionskoeffizienten. Hübner erhielt nämlich für unterschiedliche Ziel- und Lichtstrahlhöhen über Rasenflächen an klaren Sommertagen Refraktionskoeffizienten zwischen  $+14$  bis  $-10$  (vgl. Abb. 35, S. 53 in Hübner, 1980).

Nach der Theorie der Refraktion sind die Werte der Refraktionskoeffizienten zu Mittag am geringsten; dies hat sich bei den Beobachtungsreihen in Tulln nicht gezeigt. Die Werte der Refraktionskoeffizienten zu Mittag erreichen im Tagesverlauf höchste Werte. Dieser Verlauf der Refraktionskoeffizienten ist von Resnik (1995) durch das trigonometrische Nivellement auf antarktischen Schneeoberflächen bestätigt worden. Er erhielt Werte des Refraktionskoeffizienten zwischen  $+2.5$  zu Mittag und  $-1.3$  in der Nacht (vgl. Abb. 5, S.343, in Resnik, 1995).

An bedeckten Tagen ist der Verlauf von  $k$  so geglättet, wie man dies auf Grund eines Bewölkungsgrades von 8/8 erwartet. Eine Helligkeit des Himmels gegen 15:30 Uhr drückt sich sofort in einer Änderung des  $k$ -Wertes aus. Im Oktober zeigt der ermittelte Refraktionskoeffizient einen ausgeglichenen Wert. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass diese Messungen bei voll bedecktem Himmel und bei einem gleichmäßigen Temperaturverlauf ausgeführt worden sind.

Aus den Beobachtungsreihen hat sich gezeigt, dass ein normalerweise verwendetes  $k$  von 0.13 nicht empfehlenswert ist. Die Verwendung des „standardisierten“ Refraktionskoeffizienten würde zu unzulässigen Fehlern der Höhenübertragung unter diesen Bedingungen führen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist das Vorhaben beschrieben, mittels zweier Videotheodolite ein Messsystem für hochfrequente geodätische Beobachtungen mit automatischer Zielerfassung zu entwickeln und für simultane Zenitwinkelbeobachtungen zu erproben.

Im Rahmen von Laboruntersuchungen in Kap. 5 werde das Messsystem auf seine Funktionsfähigkeit hin untersucht. Es wurde eine Kalibrierung des gesamten Messsystems durchgeführt. Höhenunterschiede wurden mit dem Modell der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitwinkelmessung bestimmt und konnten mit dem Resultat eines Feinnivellements verglichen werden. Weiters wurde bestätigt, dass eine Synchronisation der Messungen mit Hilfe von aktiven Zielmarken möglich ist. Dazu wurde die Atmosphäre im Labor durch eine Glasplatte simuliert. Die Simulation bestätigte außerdem, dass das Meßsystem funktioniert. Die Ergebnisse der Testmessungen im Labor zeigten schließlich, dass die vorgeschlagene Methode bei der Kalibrierung erfolgreich arbeitet. Mit dem zusammengestellten Instrumentarium sind simultane Beobachtungen (Hz, V) von beiden Stationen möglich. Die Differenzen des Höhenunterschieds zwischen dem Feinnivellement und dem Ergebnis des Messsystems ist 0.1 mm. Die Standardabweichungen des Höhenunterschieds liegen unter 0.1 mm.

Im Anschluss an die Laboruntersuchungen wurde das Messsystem unter realen Bedingungen im Feld eingesetzt. Der Höhenunterschied im gesamten Messintervall weist trendartige Schwankungen auf, es überwiegen die kurzperiodischen Schwankungen. Um diese unerwünschten Fluktuationen zu unterdrücken, wurden die Höhenunterschiede durch Mittelbildungen geglättet. Die Epochenlänge betragen 1 bis 60 min, sind unabhängig von der Streckenlänge aber abhängig von den äußeren Bedingungen.

Die Kalibrierengenauigkeit konnte auf kurzen Strecken am Tage bei jeder Witterung näherungsweise erzielt werden. Auf längeren Strecken (ca. 125 m) entweder nur in der Nacht oder bei bedecktem Himmel. Auf kurzen Strecken kann die Sessionslänge bis zu 30 min betragen, bei langen Strecken betrug die Sessionslänge 30 min. Bei längeren Strecken (387 m) betrug die Sessionslänge am Tag 60 min und in der Nacht 5 min. Am Tage lassen sich bei jeder Witterung die Ergebnisse besser als 1 mm bei einer Sessionlänge von 60 min erzielen. Generell können bei extremen Witterungsbedingungen Höhenübertragungen über einige 100 m auf 1 mm erreicht werden.

Abhängig von den Wetterbedingungen zeigten die Autokorrelationsfunktionen für verschiedene Messserien unterschiedliche Korrelationszeiten. Ab den Zeitpunkten ab denen die Höhenunterschiede als unkorreliert betrachten werden können, treten praktisch keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse weitestgehend eliminiert werden. Die Korrelationszeit ist unabhängig von der Streckenlänge aber abhängig von äußeren Bedingungen. Sie ist kurz in der Nacht bei geringeren Temperaturschwankungen und bei größeren Varianzen der kurzperiodischen Fluktuationen. Sie ist lang bei größeren Temperaturschwankungen und bei kleinen Varianzen der kurzperiodischen Fluktuationen.

Bei praktischen Messungen in einer vernetzten Messkonfiguration konnten die berechneten Genauigkeitsangaben zur Höhenübertragung bestätigt werden, indem Nivellementschleifenschlüsse berechnet wurden. Der kleinste Widerspruch der Schleifenschlüsse beträgt 0.3 mm, wenn nur Strecken einbezogen werden, die bei Nacht oder bei bedecktem Himmel am Tag gemessen wurden. Die gemittelten Messepochen führen zu den besten Ergebnissen. Es werden Genauigkeiten erreicht, wie sie beim Feinnivellement gefordert werden.

Es hat sich herausgestellt, dass die günstigsten Zeiträume für eine zuverlässige Bestimmung des Höhenunterschiedes mittels dieses Modells in der Nacht und am Tag bei bedecktem Himmel sind. Beobachtungsmessungen am Tag bei starker Sonneneinstrahlung und bei klarem Wetter sollen möglichst vermieden werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das hier entwickelte Messsystem seine prinzipielle Tauglichkeit unter Beweis gestellt hat und bei homogenem Untergrund und günstigen Wetterbedingungen (bedeckter Himmel und in der Nacht) die Genauigkeit eines Feinnivellements erreicht werden kann. Auch bei extremen Wetterbedingungen können Höhenunterschiede genauer als 1 mm bestimmt werden.

In Zukunft sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die zeigen sollen wie weit das Messsystem bei nicht symmetrischen Geländeprofil eingesetzt werden kann. Die Beobachtung wird so ausgewählt, dass möglichst unterschiedliche Witterungsbedingungen von starker Sonneneinstrahlung (klarer Himmel) bis zu starker Bewölkung (geringe Einstrahlung) herrschen. Außerdem soll die Richtigkeit des Messsystems, welche für homogenes Gelände zutrifft, auch in einem inhomogenen Gelände überprüft werden. Dazu sollen Messungen auch in einem engen steilen Gebirgstal vorgenommen werden. Schließlich sollen die Messungen im Tunnel durchgeführt werden.

Um die Praxistauglichkeit des Messsystems zu erhöhen, ist für weitere Untersuchungen zu empfehlen, dass die Bildverarbeitungskarte (Framegrabber) in einen Laptop installiert wird. Vorteilhaft ist bei den Laptops die Stromversorgung über Batterie; dann könnte man überall im Feld beobachten. Die PCs können aufgrund ihrer Größe, wegen der Stromversorgung und ihrer geringen Feldtauglichkeit nicht überall eingesetzt werden.

Abschließend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit bei den experimentellen Untersuchungen und den Genauigkeitsabschätzungen insbesondere in bezug auf die verwendeten Sensoren und in der Programmentwicklung liegt.

Nach Schauerte (1995) lässt sich eine Regel in jedem Fall weitergeben, die nicht nur in der Vergangenheit Gültigkeit hatte, sondern auch in der Zukunft gültig bleibt:

„Will man präzise Messungen ausführen, die auch hohe (äußere) Messgenauigkeit aufweisen, müssen optimale Messbedingungen vorliegen!“

Mit dem vorliegenden Instrumentarium ist ein Schritt zur Verbesserung der Beobachtungstechnik und zur Automatisierung der Beobachtungen getan, der die Bestimmung refraktionsfreier Höhenunterschiede ermöglichen soll.

## 9 Literaturverzeichnis

Dieses Literaturverzeichnis enthält neben den in der Arbeit zitierten Literaturstellen auch solche, die zur Bearbeitung des Stoffes herangezogen, aber nicht zitiert wurden.

Verwendete Abkürzungen:

AVN	Allgemeine Vermessungs-Nachrichten
DGK	Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
RFWU	Rheinisch Friedrich- Wilhelms-Universität
RWTH	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule
VPK	Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik
VT	Vermessungstechnik
VR	Vermessungswesen und Raumordnung
ZfV	Zeitschrift für Vermessungswesen

- Askoy, A., Franke, P., Witte, B., Yalin, D. (1994): *Eine modifizierte Methode des trigonometrischen Nivellements zur exakten Bestimmung von Höhenänderungen*. VR 56, 1994, S. 45-60.
- Baeyer, J.J. (1840): *Nivellement zwischen Swinemünde und Berlin*. Berlin 1840.
- Baeyer, J.J. (1849): *Die Küstenvermessung und ihre Verbindung mit der Berliner Grundlinie*. Berlin, 1849.
- Bahnert, G. (1970): *Möglichkeiten und Grenzen der trigonometrischen Höhenmessung*. Teil 1 und 2. Habilitation. TU Dresden, Arb. Vermess.- u. Kt.-Wesen DDR, Leipzig, Bd. 24 und 25.
- Bahnert, G. (1977): *Einige physikalische und meteorologische Grundlagen äußerer Einflüsse auf geodätische Messungen*. VT, Heft 9/1977, S. 309-312.
- Bahnert, G. (1977): *Meteorologische Einflüsse auf geodätische Messungen*. VT, Heft 10/1977, S. 345-349.
- Bahnert, G. (1986): *Refraktion und Refraktionskoeffizient*. VT, Heft 4/1986, S. 277-279.
- Bahnert, G. (1982): *Grundlagen der interferometrischen Messung kleiner Winkel*. VT Heft 10/982, S. 305-307.
- Bahnert, G. (1982): *Dirspersometer mit interferometrischer Winkelmessung*. VT Heft 10/1982, S. 375-379
- Bahnert, G. (1983): *Dirspersometer mit einfacher optischer Abbildung der Lichtquelle*. VT Heft 31/1983, S. 58-61.
- Bahnert, G. (1987): *Zur Bestimmung lokaler Refraktionskoeffizienten*. VT Heft 1/1987, S. 14-17.
- Berger, W. (1989): *Entwicklung eines neues optischen Zielverfahrens*. Diplomarbeit TU Wien.
- Bergman/Schaefer, (1993): *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Band 3; Optik; Hrsg. Niedrig; 9. Auflage: Walter de Gruyter Verlag, Berlin-New York, 1993.

- Bessel, F.W., Baeyer, J.J. (1838):** *Gradmessung in Ostpreußen*. Berlin 1838.
- Beyer, H. A. (1992):** *Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera based Photogrammetric Close- Range System*. Mitteilung Nr. 51 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.
- Bomford, G. (1980):** *Geodesy*. Oxford 1980.
- Bolsakov, V.D., Deumlich, F., Golubev, A.N.; Vasilev, V.P. (1982):** *Elektronische Streckenmessung*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1982.
- Brein, R. (1968):** *Die Bestimmung der atmosphärischen Refraktion aus der Dispersion des Lichtes*. DGK Reihe B, Heft Nr. 165.
- Bretterbauer, K. (1969):** *Beiträge zum Refraktionsproblem in der Höheren Geodäsie*. Dissertation Technische Hochschule, Wien.
- Bretterbauer, K. (1965):** *Der mittlere Luftdruck entlang eines Geodimeterstrahls*. AVN Heft 8/1965, S. 300-303.
- Broks, 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*. Ber. d. Dt. Wetterdienstens in der U.S. Zone Nr. 5, Bad Kissingen.
- Brunner, F.K., Angus-Leppan, P.V. (1976):** *On the Significance of Meteorological Parameters for Terrestrial Refraktion*. Unisurv. G 25; S. 95-108, University of New South Wales.
- Brunner, F.K. (1979):** *Atmospheric Turbulence: The Limiting Factor to Geodetic Precision*. Austr. Journ. Geod. Foto. Surv. No. 31, 1979, S. 51-64.
- Brunner, F.K., Fraser, C.S. (1977):** *Application of the Atmospheric Turbulent transfer Model for the Reduction of Microwave. EDM*. Unisurv. G-27, S. 3-26.
- Brunner, F.K. (1984):** *Modelling of Atmospheric Effects on Terrestrial Geodetic Measurements*. In: Brunner (Eds.): *Geodetic Refraction*. Springer-Verlag, Berlin 1984.
- Bruns, P. (1976):** *Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung der trigonometrischen Höhenmessung*. Diss. Uni Hannover, Nr. 61.
- Brückner, R. (1981):** *Zur Scintillation bei terrestrischen geodätischen Messungen*. Diss., Wiss. Arbeiten d. Fachr. Vermessungswesen, Uni Hannover, Nr. 89.
- Casott, N. (1999):** *Erfassung des Einflusses der „turbulenten Refraktion“ auf optische Richtungsmessungen mit CCD-Sensoren*. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der RFW-Universität Bonn, Nr. 86.
- Casott, N., Deußen, D., Witte, B. (1998):** *Methoden zur Bestimmung der geodätischen Refraktion bei terrestrischen Präzisionsmessungen*. VR 60/4, S. 193-206.
- Chatfield, CH. (1982):** *Analyse von Zeitreihen*. Carl Hanser Verlag München Wien.
- Deichl, K., Reinhart, E. (1969):** *Zur Bestimmung des Brechungsindex bei der elektromagnetischen Entfernungsmessung*. AVN Heft 7/1969, S. 269-281.
- Deichl, K. (1984):** *Der Brechungsindex für Licht und Mikrowellen*. AVN Heft 3/1984, S. 85-100.
- Deumlich, F. (1963):** *Zum Einfluß der bodennahen Refraktion bei der optischen Streckenmessung mit vertikaler Latte*. Diss. TU Dresden, Veröff. Geod. Inst. TU Dresden.
- Drodofsky, M. (1960):** *Stromübergangsnivellement mit dem Zeiss-Nivellier Ni 2*. ZfV 85, S. 227-235.

- Deußen, D. (2000):** *Meßverfahren zur Erfassung der Vertikalrefraktion unter Nutzung der atmosphärischen Turbulenz.* Diss. Universität Bonn, Shaker-Verlag, Aachen.
- El-Sheimy, N. (2002):** *Course lecture notes on "Inertial Navigation".* giver at TU Wien, Dec. 2002.
- Fabiankowitsch, J. (1990):** *Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzenbildern.* Dissertation TU Wien.
- Fasching, M. (1990):** *Erfassung der Luftinhomogenitätsbedingten Lichtstrahlkrümmung.* Dissertation TU Wien.
- Flach, P. (2000):** *Analysis of refraction influences in geodesy using image processing and turbulence models.* Diss. ETH Zürich.
- Geiger, R. (1961):** *Das Klima der bodennahen Luftschicht.* 4. Aufl., Vieweg, Braunschweig 1961.
- Gleißmann, T. (1978):** *Zur Bestimmung des Refraktionswinkels über die Dispersion des Lichtes mittels positionsempfindlicher Photodioden.* Diss. Universität Hannover Nr. 62.
- Gottwald, R. (1985):** *Zur Genauigkeit und Erstellung eines automatisierten Datenflusses beim trigonometrischen Nivellement mit kurzen Zielweiten.* Veröff. des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 37.
- Grün, A. (1992):** *Digitale Nachbereichsphotogrammetrie.* AVN Heft 8+9/1992, S. 324-343.
- Gronwald, W. (1957):** *Höhenmessungen über die Elbe im Zuge des zweiten Nordseeküsten-Nivellements in den Jahren 1954 und 1955.* Niedersächsisches Landesvermessungsamt Hannover und Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein, Kiel 1957.
- Gülland, A. (1924):** *Über den theoretischen Refraktionskoeffizienten aus meteorologischen Elementen.* ZfV 39, S. 369-385.
- Hartl, H. (1884):** *Über mittlere Refraktionen-Coeffizienten.* in: Mitteilungen des kaiserl. Königl. Militär-Geographischen Institutes, S. 157-175.
- Hartung, J. (1996):** *Statistik: Lehrbuch der angewandten Statistik.* R. Oldenburg Verlag München-Wien 1996.
- Heinert, M., Reiser, S. (2002):** *Continuous building monitoring using adaptive Kalman-Filtering for real-time data screening and pre-processing.* In: Kahmen/Niemeier/Retscher (Hrsg.): Second Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, May 21-24, 2002, Berlin, Germany, pg. 82-91.
- Helmert, F.R. (1884):** *Die mathematische und physikalischen Theorieen der höheren Geodäsie.* Teil 2, Teubner-Verlag.
- Hennes, M. (1995):** *Entwicklung eines Meßsystems zur Ermittlung von Turbulenzparametern der Atmosphäre für Anwendungen in der Geodäsie.* DGK Reihe C, Heft Nr. 438.
- Hennes, M. (2002):** *Refraktionseinflüsse auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und Instrumentenentwicklung.* Flächenmanagement und Bodenordnung (FuB), 2/2002, S. 73-86.
- Hodara, H. (1969):** *Laser wave propagation through the atmosphere.* Proc. IEEE, Vol. 54, No. 3 March.
- Hübner, E. (1977):** *Einfluß der terrestrischen Refraktion auf den Laserstrahl in bodennahen Luftschichten.* VT Heft 10/1977, S. 349-353.
- Hübner, E. (1980):** *Experimentelle Untersuchungen des Einflusses der Vertikalrefraktion bei der Laserleitstrahlsteuerung linienförmiger Bauprozesse.* Geod. Geoph. Veröff. R. III. Heft 46, Berlin.

- Höhn, D.H. (1990):** *Zur Ausbreitung eines Laserstrahls in der Atmosphäre.* Optik 1969, S. 161-170 und 234-256.
- Huep, W. (1988):** *Konzeption und Einsatzmöglichkeiten eines automatischen Theodolitsystems.* X. Inter. Kurs für Ingenieurmessung, Band 1; Ferd. Dümmers Verlag, Bonn.
- Huep, W., Katowski, O. (1988):** *Theodolitsysteme für industrielle und geodätische Messungen.* Sonderdruck aus TR Nr. 39.
- Ingensand, H. (1990):** *Die Entwicklung eines automatischen trigonometrischen Nivellementssystem mit integriertem Dispersometer.* VR Heft 2+3/1990, S. 105-114.
- Jähne, B. (1989):** *Digitale Bildverarbeitung.* Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1989.
- Jakob, G. (1982):** *Beitrag zur mathematisch-statistischen Untersuchung von Zeitreihen.* VT Heft 8/1982, S. 268-271.
- Jakob, B. (1983):** *Weitere Betrachtung zur mathematisch-statistischen Untersuchung von Zeitreihen.* VT Heft 7/1983, S. 234-237.
- Joeckel, R., Stober, M. (1995):** *Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung.* 3. Aufl., Wittwer-Verlag, Stuttgart 1985.
- Jordan/Eggert/Kneissl, (1956):** *Handbuch der Vermessungskunde.* Band III Höhenmessung-Tachymetrie, 10 Aufl. Stuttgart 1956.
- Kabashi, I., Retscher, G., Niessner A. (1999):** *Study of Refraction Variation Observation Using Video Theodolits.* IUGG 99, July 18-30, Birmingham, UK.
- Kabashi, I. (2000):** *Primjena mjernih robota u geodeziji.* Geodetski Glasnik, Nr. 33, S. 37-56, Sarajevo 2000.
- Kabashi I., Niessner, A. (2001):** *Investigation of near-surface refraction by means of high frequency reciprocal zenith angle measurement.* In: Kahmen/Grün (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques V, Oct. 1-3, Wien, Austria.
- Kabashi, I. (2000):** *Untersuchung der Refraktionseffekte bei Vertikalwinkelmessung mit Video-Theodoliten.* Vortrag: Institutstag für Forschung Geodäsie, Geophysik und Ingenieur-geodäsie, unpubliziert.
- Kabashi, I., Retscher, G., Niessner A. (2002):** *High frequent simultaneous observation of zenith angles using videotheodolits.* In: Kahmen/Niemeier/Retscher (Hrsg.): Second Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, May 21-24, 2002, Berlin, Germany, pg. 528-530.
- Kahmen, H. (1973):** *Untersuchungen von analogen und digitalen Phasenmeßsystemen in der elektrooptischen Entfernungsmessung.* DGK Reihe C, Nr. 187.
- Kahmen, H. (1980):** *Anwendung der stochastischen Prozesse auf die Modelbildung am Beispiel der Vertikalwinkelmessung und elektronischen Entfernungsmessung.* In: Hans Pelzer (Hrsg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1980.
- Kahmen, H. (1985):** *Grundlagen zur Erfassung und Verarbeitung stochastischer und deterministischer Signale.* In: Hans Pelzer (Hrsg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1985.
- Kahmen, H. (1992):** *Hochpräzise Zielerfassung durch Robotertheodolit.* In: Matthias/Gruen (Hrsg.): Ingenieurvermessung 92, Bonn (92a) 1992.
- Kahmen, H. (1997):** *Vermessungskunde.* 19. A. Walter de Gruyter, Berlin-New York 1997.

- Kakkuri, J. (1966):** *Versuche mit dem automatischen Doppelinstrument Zeiss Ni 2. beim Stromübergangsnivellement.* ZfV 91 S. 160-164.
- Kapatanović, N., Selesković, F. (1999):** *Geodezija.* Gradjevinski Fakultet, Sarajevo 1999.
- Katowski, O. (1989):** *Deformationmessungen an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS.* in: Grün/Kahmen (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques*; S. 393-304, Wichmann Verlag Karlsruhe 1989.
- Koch, K. R., Schmidt, M. (1994):** *Deterministische und stochastische Signale.* Dümmler Verlag Bonn 1994.
- Krack, K., Schödlbauer, A., Widmann, R. (1990):** *Entwicklung eines automatisierten Meßsystems zum trigonometrischen Nivellement (Sprungstand-Verfahren mit bündelweiser Messung von Zenitwinkeln und Strecken).* VR 75 Heft 2+3/1990, S. 87-96.
- Kraus, K. (1993):** *Photogrammetry. Volume 1: Fundamentals and Standard Processes.* Ferd. Dümmlers Verlag Bonn 1993.
- Kukkamäki, T. J. (1950):** *Über das Flimmern und Schweben des Zielbildes.* Geofisica pura et applicata, 18, S. 120-127.
- Kuntz, E., Schmitt, G. (1985):** *Präzisionsmessungen durch Beobachtung gleichzeitigergegenseitiger Zenitdistanzen.* AVN Heft 11+12/1985, S. 427-434.
- Lepuschitz, R. (1981):** *Praktische Überprüfung und geodätische Anwendung der Turbulenzen Theorie in der bodennahen Atmosphäre.* Dissertation TU Wien.
- Levallois, J.J. (1969):** *Geodesie Generale.* Tome1, Paris 1969.
- Loser, R. (1988):** *Zur automatischen Messung mit Theodoliten.* Inter. Kurs für Ingenieurmessung, X. Inter. Kurs für Ingenieurmessung, Band 1; Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Meha, M. (1994):** *Gjeodezia dhe matjet në miniera.* Fakulteti i Xehtarisë dhe Metalurgjisë, Universiteti i Prishtinës, Prishtinë 1994.
- Meha, M., Kabashi, I. (1998):** *Analysis of Deformation of Rotary Furnaces with Geodetic Methods.* in: Kahmen/Brückl/Wunderlich (Hrsg.): *Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, April, 20-22, Eisenstadt, Austria, pg. 258-263.
- Meha, M., Kabashi, I. (1998):** *Correlation between furnace support displacements and furnace deformations on vertical plane at "Ferronikel".* in: Stanek/Kopacik (Hrsg.): *Papers presented at the International Conference on Engineering Surveying INGENO'98*, October 21-23, Bratislava, Slovakia, pg. 219-224.
- Meha, M., Fetaj, J., Kabashi, I. (1999):** *Analysis of the Accuracy of Cadastral Plans on the Formation of Digital Basis of Cadastral in Kosovo.* in: *Proceedings of the Third Turkish-German Joint Geodetic Days*, June 1-4, 1999, Istanbul, Turkey.
- Meha, M. (1999):** *Metodat gjeodezike dhe analiza e deformimeve në objektet industriale.* Dissertation. Universiteti Politeknik i Tiranës, Fakulteti i inxhinierisë së ndertimit, Departamenti i Gjeodezisë, Tiranë.
- Meha, M. (2000):** *Hartografia.* Universiteti i Prishtinës. Fakulteti Shkencave Matematike-Natyrore, Prishtinë 2000.
- Mischke, A. (1998):** *Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten.* Dissertation TU Wien.
- Mitter, J. (1962):** *Über die Bestimmbarkeit des Ausbreitungsgeschwindigkeit der Trägerwellen bei elektronischen Entfernungsmessung.* AVN Heft 5/1962, S. 139-158.

- Moritz, H. (1961):** *Zur Reduktion elektronisch gemessener Strecken und beobachteter Winkel wegen Refraktion.* ZfV Heft 7/1967, S. 247-252.
- Moritz, H. (1962):** *Zur Geometrie der Refraktion.* ÖzfVuPh Jg. 50, S. 3-13.
- Nähbauer, K. (1929):** *Terrestrische Strahlenbrechung und Farbenzerstreuung.* Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-naturwissenschaftlich Abteilung, Neue Folge 3.
- Nehler, J. (1995):** *Thema Erfahrungen beim Einsatz von Bildverarbeitungssystemen in der Industrie.* In: Bildverarbeitung in der industriellen Praxis; Kap. RMV; Hrsg. Prenninger; PROFACTOR Produktionsforschungs GmbH-1995.
- Niemeier, W. (1980):** *Zur Auswertung geodätischer Messreihen.* AVN Heft 1/1980, S. 41-59.
- Niemeier, W. (2001):** *Persönliche Mitteilung.*
- Niemeier, W. (2002):** *Ausgleichsrechnung.* Walter de Gruyter, Berlin-New York 2002.
- Past, F. (1965):** *Kritischer Vergleich der Refraktionsformeln für trigonometrische Höhenmessung und Versuch einer systematischen Ordnung.* DGK, Reihe C, Heft Nr. 75.
- Pasalić, S. (1988):** *Račun izravnanja.* Gradjevinski Fakultet, Sarajevo 1988.
- Pasalić, S. (1995):** *Inženjerska geodezija.* Gradjevinski Fakultet, Sarajevo 1995.
- Pelzer, H. (1980):** *Besonderheiten der Auswertung kontinuierlicher Messungen und Probleme ihrer Interpretation.* „Kontinuierliche Messungen in der Geodäsie“, Veröffentlichung des Geo. Inst. der RWTH Aachen Nr. 28, S. 151-172.
- Reißmann, G. (1954):** *Untersuchungen zur Ausschaltung des Einflusses der Vertikalrefraktion beim Präzisionsnivellement.* Dissertation TU Dresden.
- Sanchez, R.N. (1962):** *Terrestrial refraction in mountainous countries.* 2<sup>nd</sup> Symp. of 3D-Geodesy.
- Sanchez, R.N. (1967):** *Results of terrestrial refraction in mountainous countries by the investigation of vertical triangles.* SH Nr. 25 d. ÖZ, Wien.
- Schauerte, W., Witte, B. (1994):** *Aspekte zur experimentellen Bestimmung des Brechungsindex der Atmosphäre.* ZfV Heft 9/1994, S. 470-480.
- Schauerte, W. (1995):** *Erfordert der Einsatz moderner Präzisionsdigitalnivelliere neue Beobachtungstechniken?* Verm.-Ing. Heft 5/1995, S. 223-231.
- Schelling, G. (1982):** *Trigonometrisches Nivellement in ariden Zonen.* In: Geodäsia Universalis, Festschrift Karl Rinner zum 70. Geburtstag, Mitteilungen der geodätischen Institute der TU Graz, Folge 40, S. 297-304.
- Scherer, M. (1977):** *Der Gebrauch der Spektralanalyse zur Ermittlung periodischer Fehler bei geodätischen Messinstrumenten.* ZfV Heft 6/1977, S. 251-261.
- Schirmer, W. (1994):** *Universaltheodolit und CCD-Kamera –ein unpersönliches Messsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen.* DGK Reihe C, Nr. 427, München
- Schlittgen, R., Stretberg, B.H.J. (1999):** *Zeitreiheanalyse.* Oldenbourg, München 1999.
- Taubenheim, J. (1969):** *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten.* Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Porting K.-G., Leipzig 1969.
- Tegeler, W. (1971):** *Untersuchungen zur Genauigkeit der trigonometrischen Höhenmessung im Flachland und Mittelgebirge.* Dissertation Uni Hannover, Nr. 45.

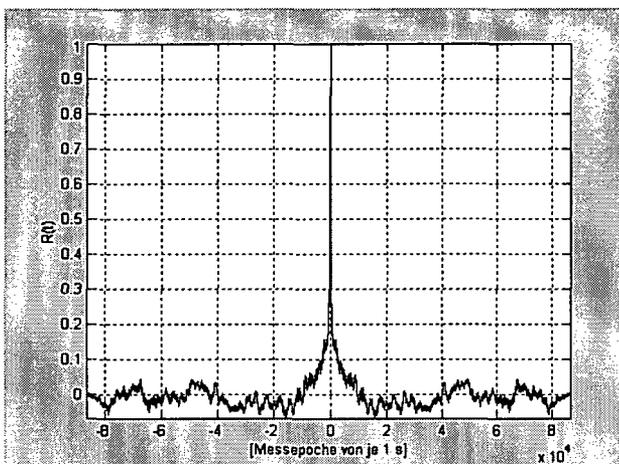
- Tegenström, E. U., Teleki, G. (1978):** *Refractional Influences in Astrometry and Geodesy. International Astronomical Union. Symposium No. 89*, Riedel Publishing.
- Tralles (1806):** *Betrachtungen über die atmosphärische Refraktion der Lichtstrahlen irdischer Gegenstände*. Abh. der kgl. Akad. d. Wiss., Berlin 1804-1811, S. 101.
- Troller, M. (2000):** *Szintillometrische Refraktionsbeobachtung. Diplomarbeit*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- Walter, A. (1898):** *Theorie der Atmosphärischen Strahlenbrechung*. Druck und Verlag von B.G. Teubner, Leipzig 1898.
- Wehmann, W. (1990):** *Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung der trigonometrischen Höhenbestimmung*. Dissertation TU Dresden.
- Weiss, A. (2002):** *Determination of thermal stratification and turbulence of the atmospheric surface layer over various types of terrain by optical scintillometry*. Diss. ETH, Zürich.
- Wieser, A. (1995):** *Ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen mit Videotheodoliten*. Diplomarbeit TU Wien.
- Wild (1989):** *Wild Leitz TM3000*. Gebrauchsanweisung, Heerbrugg.
- Wild (1991):** *WILD TM3000*. Gebrauchsanweisung, Leica Heerbrugg AG. Heerbrugg.
- Williams, D.C., Kahmen, H. (1984):** *Two Wavelength Angular Refraktions Measurement*. In: Brunner (Hrsg.): *Geotetic Refraktion*, Springer Verlag Berlin 1984.
- Witte, B. (1990):** *Möglichkeiten und Grenzen des trigonometrischen Nivellements*. VR Heft 2+3/1990, S. 87-96.
- Wunderlich, Th. (1983):** *Die voraussetzungsfree Bestimmung von Refraktionswinkeln*. Dissertation TU Wien.
- Wunderlich, Th. (1986):** *Geometrische Methoden der Refraktionsbestimmung*. VPM Heft 11/1986, S. 583-588.

## 10 Anhang 1

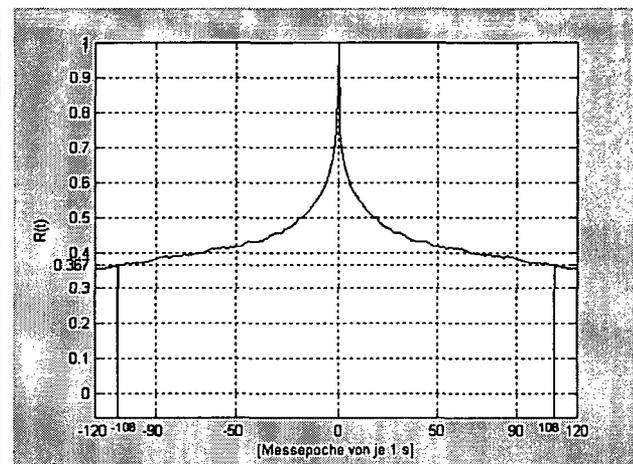
Anhang 1 enthält die statistische Analyse der Höhenunterschiede des gesamte Zeitraums (12:30-12:30).

Die Autokorrelationsfunktionen für die Messreihen der Abb. 7-34 bis 7-38 (s. S. 54-55) sind in den Abb. 1 bis 6 dargestellt und lassen sich folgendermaßen interpretieren:

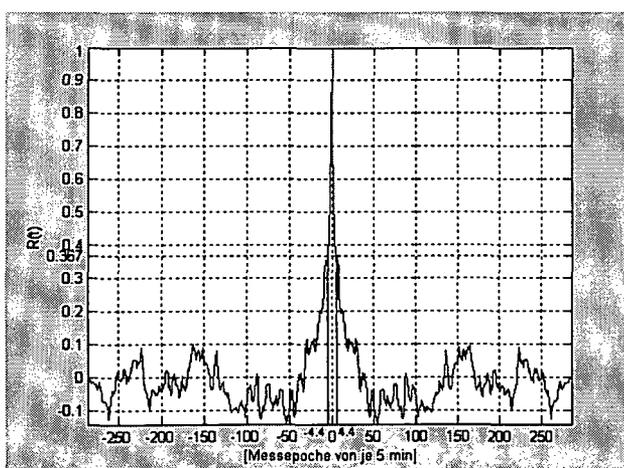
Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten 108 s. (vgl. Abb. 6-40). Mit Zunahme der Epochenlänge (5 min, 15 min, 30 min und 60 min) geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 1 bis 5). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger 55 min (vgl. Abb. 2) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden (vgl. Abb. 6). Es treten folglich praktisch keine systematischen Effekte mehr auf, d.h. alle trenderzeugenden Modellfehler konnten durch die Filterungsprozesse weitgehend eliminiert werden.



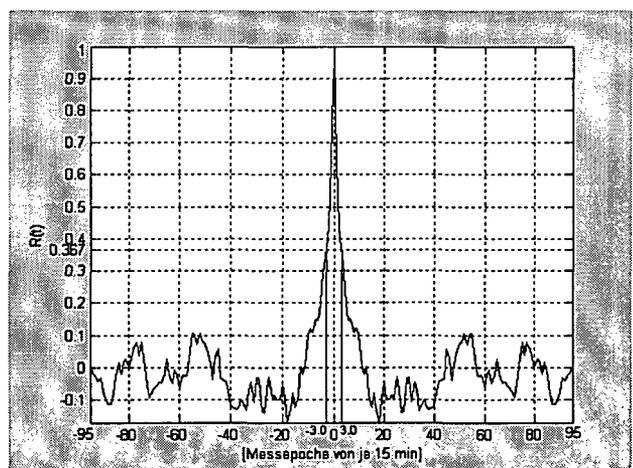
**Abb. 1:** Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]



**Abb. 2:** Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte



**Abb. 3:** Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 5 min-Epochen



**Abb. 4:** Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 min-Epochen

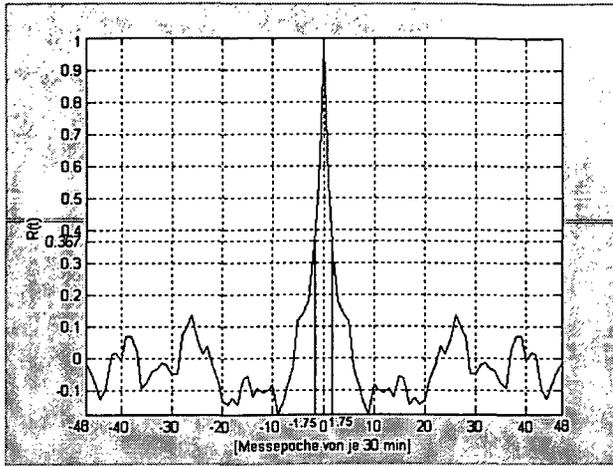


Abb. 5: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30 min-Epochen

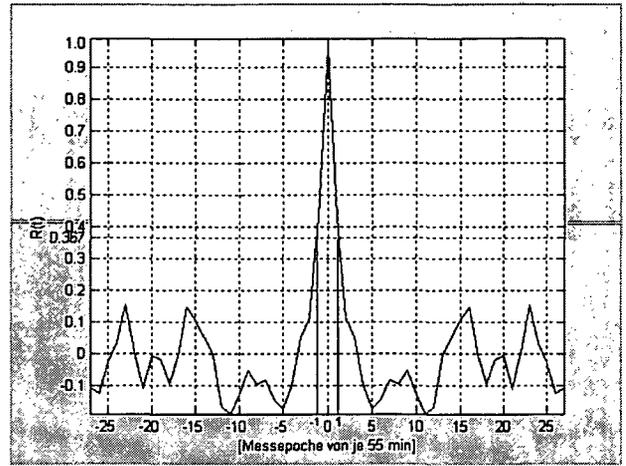


Abb. 6: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 55 min-Epochen

## 11 Anhang 2

Anhang 2 enthält die Höhenunterschiede getrennt nach Tag (6:30-20:30) und Nacht (20:30-06:30), sowie die getrennte statistische Analyse.

Die Abb. 7 bis 10 zeigen den geglätteten Höhenunterschied in der Nacht, während die Abb. 11 bis 15 die geglätteten Höhenunterschiede am Tag zeigen.

Beobachtungsintervall	max. Schwankungen		Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Höhenunterschiede der Originaldaten und der Epochen	
	Nacht	Tag	Nacht (20:30-06:30)	Tag (06:30-20:30)
1 s (Originaldaten)	12.0 mm	19.0 mm	1.46 mm	2.59 mm
5 min (gemittelt)	4.3 mm	4.7 mm	0.64 mm	1.15 mm
15 min (gemittelt)	2.3 mm	4.2 mm	0.45 mm	0.97 mm
30 min (gemittelt)	1.3 mm	3.8 mm	0.38 mm	0.81 mm
60 min (gemittelt)	1.0 mm	2.7 mm	0.30 mm	0.77 mm

Tab. 1: Genauigkeit des Höhenunterschieds in Abhängigkeit von der Epochenlänge (Nacht/Tag)

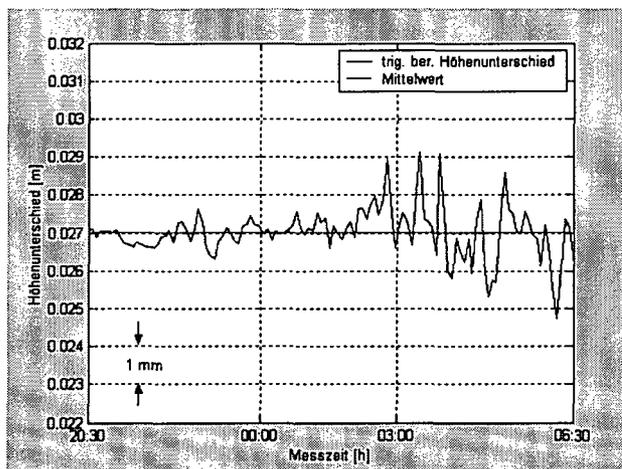


Abb. 7: Höhenunterschiede der 5 min-Epochen

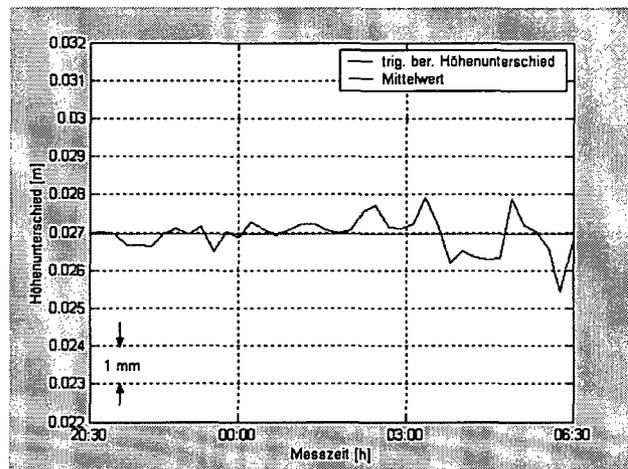


Abb. 8: Höhenunterschiede der 15 min-Epochen

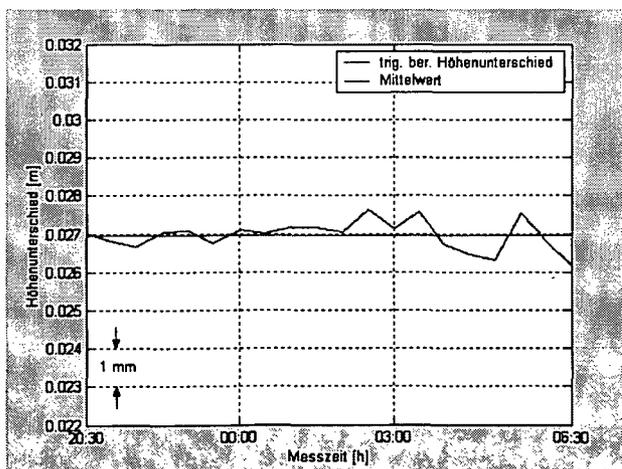


Abb. 9: Höhenunterschied der 30 min-Epochen

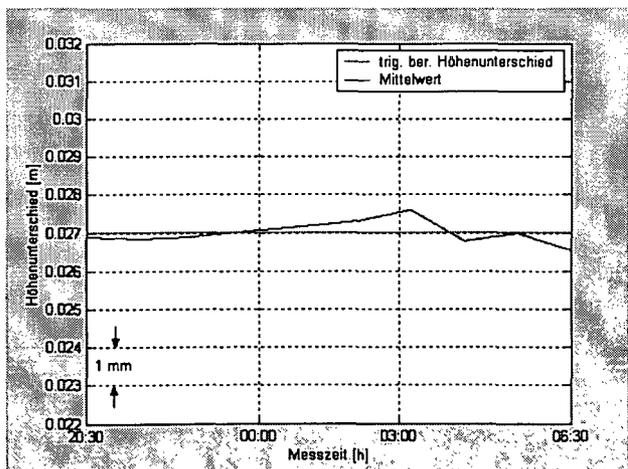


Abb. 10: Höhenunterschied der 60 min-Epochen

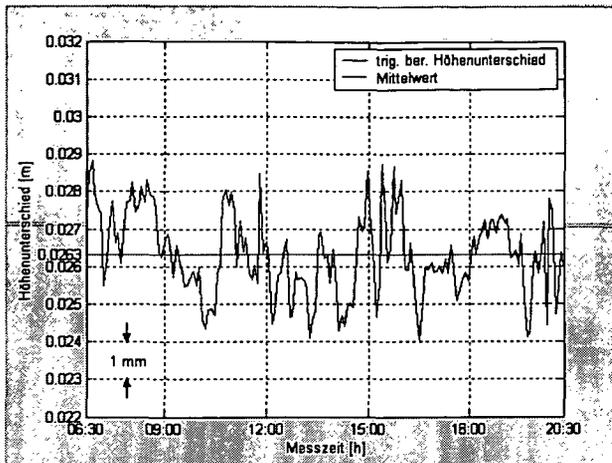


Abb. 11: Höhenunterschied der 5 min-Epochen

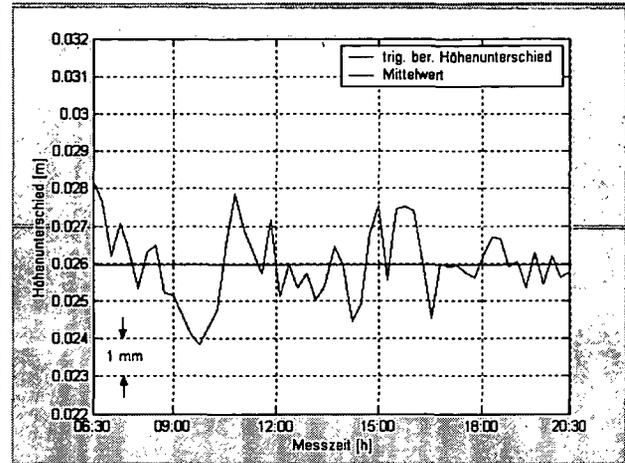


Abb. 12: Höhenunterschied der 15 min-Epochen

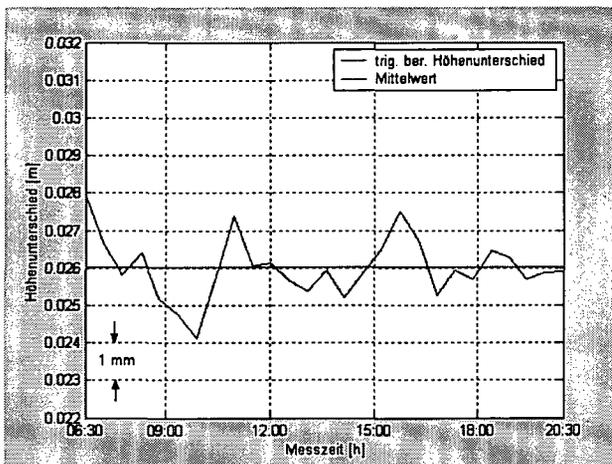


Abb. 13: Höhenunterschied der 30 min-Epochen

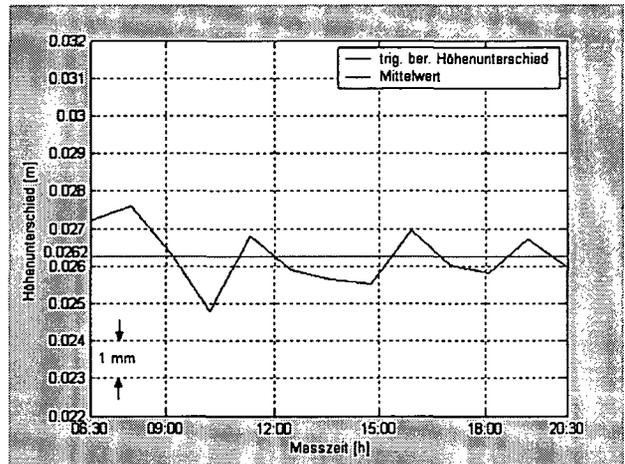
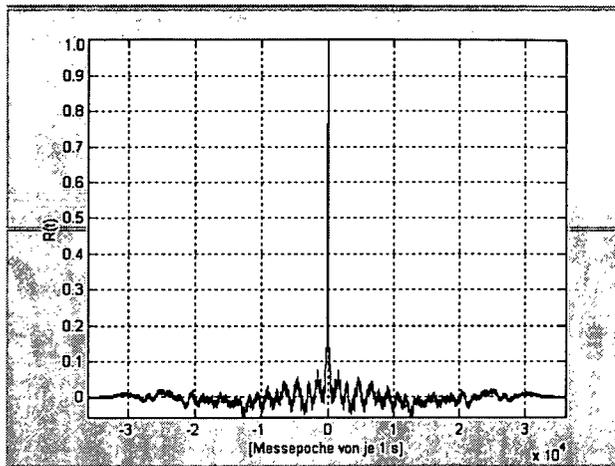


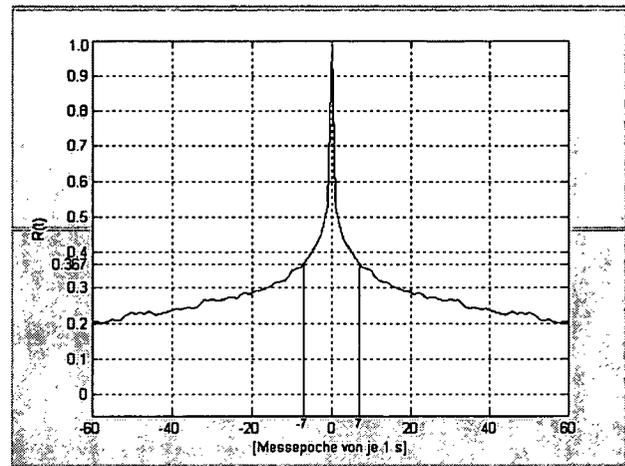
Abb. 14: Höhenunterschied der 60 min-Epochen

### 1 Statistische Analyse der Höhenunterschiede (Nacht)

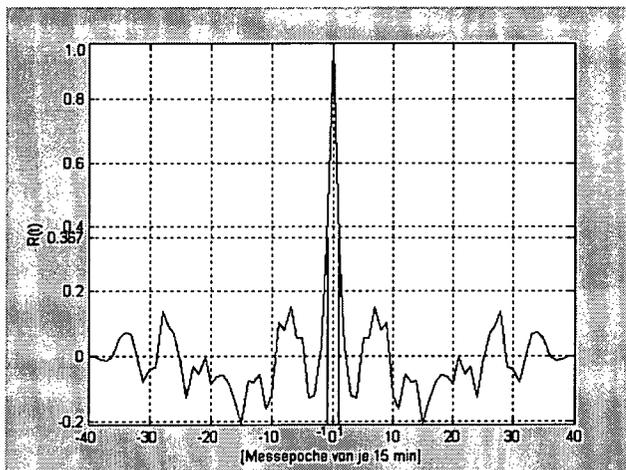
Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten der Messungen in der Nacht 7 s (vgl. Abb. 16). Mit Zunahme der Epochenlänge geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 17). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger 15 min (vgl. Abb. 17) berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Tabelle 7-6 zeigt die Maximalwerte und Standardabweichungen für die Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Sie sind deutlich geringer als die der Originaldaten und verringern sich nahezu um den Faktor 4 bis 5, wenn die Epochenlänge von 5 min auf 60 min ausgedehnt wird.



**Abb. 15:** Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]



**Abb. 16:** Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 60 Werte



**Abb. 17:** Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 15 m-Epochen

## 2 Statistische Analyse der Höhenunterschiede (Tag)

Die nach Gl. (6.6) berechnete Korrelationszeit beträgt bei den Originaldaten der Messungen am Tag 75 s (vgl. Abb. 19). Mit Zunahme der Epochenlänge geht die Anzahl der Höhenunterschiede pro Korrelationszeit zurück (vgl. Abb. 20). Die Höhenunterschiede, welche aus Messepochen gleich oder länger 30 min berechnet wurden, können praktisch als unkorreliert betrachtet werden. Tab. 7-6 zeigt die Maximalwerte und Standardabweichungen für die Zeitreihen verschiedener Epochenlängen. Sie sind deutlich geringer als die der Originaldaten und verringern sich nahezu um den Faktor 5, wenn die Epochenlänge von 4 min auf 60 min ausgedehnt wird.

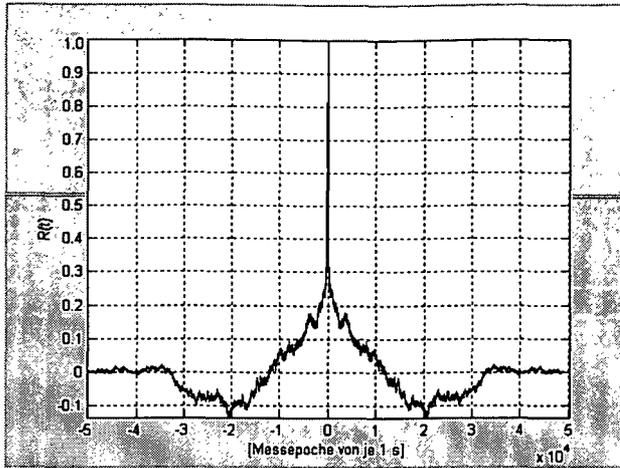


Abb. 18: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus Originaldaten [ME von je 1 s]

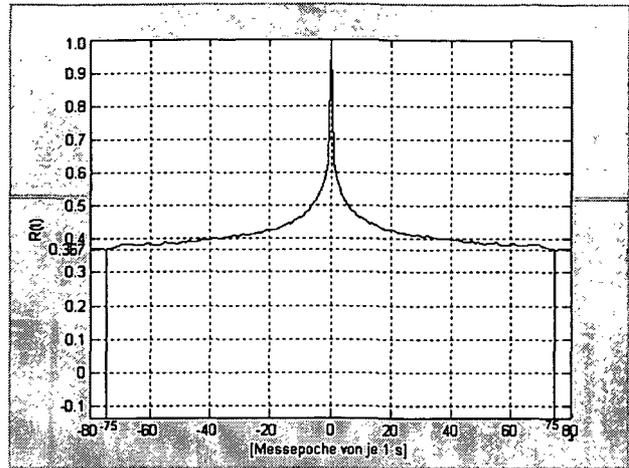


Abb. 19: Entsprechende Autokorrelationsfunktion der ersten 80 Werte

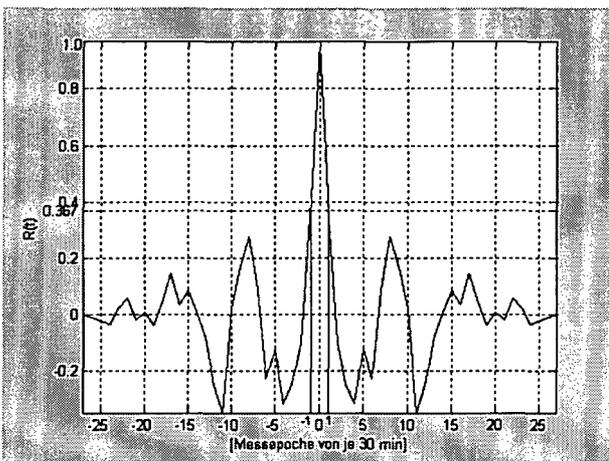


Abb. 20: Autokorrelationsfunktion der Höhenunterschiede aus 30 min-Epochen

## Lebenslauf

Geboren am: 08.08.1964 in Gurrakoc (Kosova) als drittes Kind von sechs Kindern des Landwirts Metë und seiner Ehefrau Hatmane Kabashi  
Familienstand: verheiratet mit Miradije Berishaj  
Kind: Fiona Kabashi geboren am 05.04.2000

Schulbildung: 09/1971-06/1979 Grundschule in Gurrakoc  
09/1979-06/1983 Technische Mittelschule in Prishtina (Richtung Vermessungstechnik)

Bundesheer: 10/1983-12/1984 in Mostar (Bosnien)

Studium: 10/1986-2/1992 Fakultät für Bauwesen, Studienrichtung Vermessungswesen in Sarajevo, Abschluss: Dipl.-Ing. für Vermessungswesen, Diplomprüfung mit Auszeichnung

Berufstätigkeit: 01/1985-10/1986 Angestellter im Katastralamt in Istog  
06/1991-04/1992 Praktikant im staatlichem Vermessungsamt in Sarajevo  
09/1992-08/1995 Lehrer an der technischen Mittelschule in Gurrakoc  
09/1987-12/1991 Nachhilfeunterricht in Mathematik und Vermessungswesen neben dem Studium  
10/1997-12/2002 Nachhilfeunterricht in Mathematik neben dem Doktoratstudium

Doktoratstudium: 09/1996 Matrikulation an der TUWien  
10/1996-07/1997 Besuch des Vorstudienlehrganges (Deutsche Sprache) in Wien mit Abschluss  
10/1997-04/1998 Besuch der Kurse an BFI in Wien für EDV, AutoCAD und Corel Draw mit Abschluss  
05/1998-derzeit Forschungsmitarbeiter am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung für Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie der TU Wien, Vorstand: Prof. Heribert KAHMEN