

**Matthias Fuchs**

# **Untersuchung des zyklischen Fehlers eines Leica TCA 1800 im Messlabor und im Feld**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



**Technische Universität Graz**

Betreuer

DI Dr. techn. Helmut Woschitz

Begutachter:

Univ.- Prof. DI Dr. techn. Werner Lienhart  
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, April 2013

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

## **Danksagung**

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie bedanken, von denen ich während meines Studiums immer Unterstützung erhalten habe und die auch in schwierigen Zeiten immer an mich geglaubt haben.

Meine Freundin Anja war immer verständnisvoll, wenn die Arbeit an der Masterarbeit die Freizeit einschränkte und hat mich auch bei den Messungen unterstützt.

Ing. Rudolf Lummerstorfer und DI (FH) Robert Presl haben mich bei den Messungen tatkräftig unterstützt und das sehr umfangreiche Instrumentarium vorbereitet. Ihre Erfahrungen haben den Messbetrieb oft wesentlich erleichtert. Dank auch an alle anderen MitarbeiterInnen des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, fast jeder/jede hatte zumindest einmal die Ehre den Feldkomparator mit mir gemeinsam auf das Dach zu tragen.

Ein großes Dankeschön gebührt auch allen Freunden und Kollegen, die mir beim Transport und Aufbau des Feldkomparators geholfen haben: Matthias Ehrhart, Michael Schauer, Herbert Margreiter und Ingo Hennig.

Mein Betreuer Dr. Helmut Woschitz hatte immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen. Viele Anregungen und Ideen zu dieser Arbeit kamen von seiner Seite. Die Messungen am Horizontalkomparator des Instituts wurden von ihm zur Verfügung gestellt.

Die Firma Heidenhain (Dr. Andreas Eberherr) hat den Glasmaßstab für den Feldkomparator kostenlos zur Verfügung gestellt.

## Kurzfassung

Das Auftreten eines zyklischen Fehlers bei Messungen mit EDM Geräten, die nach dem Prinzip der Phasenmessung arbeiten, ist seit langem bekannt. Auch bei modernen Geräten ist dieser Fehler, in geringerer Größenordnung, oftmals vorhanden. Die Bestimmung des zyklischen Fehlers ist Teil der Kalibrierung von elektronischen Distanzmessgeräten. Durch die Einschränkung von interferometrischen Methoden und insbesondere wegen der Länge des jeweiligen Messlabors wird der zyklische Fehler aber oft nur bis zu einer maximalen Distanz von 50 m bestimmt. Für die Bestimmung bei längeren Distanzen stehen bisher nur weniger genaue Methoden zur Bestimmung der Vergleichsstrecken zur Verfügung.

Am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz wurde ein mobiler Feldkomparator entwickelt, mit dem die Bestimmung des zyklischen Fehlers von EDM Geräten bei beliebigen Distanzen mit hoher Genauigkeit möglich ist.

In dieser Arbeit wurden Messungen mit dem Feldkomparator und einem Leica TCA 1800 bei 10 verschiedenen Distanzen bis ca. 220 m durchgeführt. Die meteorologischen Einflüsse, die sich wesentlich auf die Genauigkeit der Distanzmessung auswirken und einen kleinen zyklischen Fehler überdecken würden, wurden über die simultane Messung einer fixen Referenzstrecke bestimmt und korrigiert. Zusätzlich wurden Messungen am Horizontalkomparator des IGMS bei verlängerter Distanz durchgeführt, um auch langwelligere periodische Einflüsse auf die gemessenen Strecken untersuchen zu können. Aus diesen Daten wurden Korrekturmodelle für den zyklischen Fehler für den Distanzbereich bis 65 m für drei verschiedene Prismen (Leica Standardprisma, Miniprismen der Firmen Geodäsie Austria und Goecke) berechnet.

Die Messungen am Horizontalkomparator ergaben zyklische Fehler von bis zu  $\pm 0,8$  mm. Die Ergebnisse der Messungen mit dem Feldkomparator zeigen, dass zyklische Effekte in den Distanzmessungen mit dem Leica TCA 1800 bei größeren Entfernungen vorhanden sind, deren Amplituden aber kleiner als 0,1 mm und damit von geringer praktischer Bedeutung sind. Für kurze Distanzen bis ca. 65 m erlauben die berechneten Modelle eine Korrektur der EDM Strecken mit Restabweichungen von zumeist unter  $\pm 0,1$  mm.

## **Abstract**

Cyclic errors in EDM measurements based on phase measurements are well known. These errors also exist in modern EDM instruments, though they are much smaller nowadays. The determination of cyclic errors is part of the calibration process of EDM instruments. Due to the limitation of interferometric methods and the length of the calibration facility, the determination of the cyclic error is mostly carried out to a maximum distance of 50 m only. At longer distances the determination of cyclic errors is generally less accurate.

At the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems (EGMS) of the Graz University of Technology, a mobile field calibration device (FC 2009) was developed. It allows the determination of cyclic errors at arbitrary distances with high accuracy.

Within this thesis the cyclic error of a Leica TCA 1800 in combination with three different reflectors was determined at 10 different distances up to 220 m. Atmospheric disturbances which limit the accuracy of EDM measurements were determined using a constant reference distance and the FC 2009 measurements were corrected correspondingly. Additional measurements to identify periodic influences on the EDM distances were carried out at the horizontal comparator in the measurement laboratory of EGMS. From this data mathematical correction models were derived for EDM measurements up to 65 m. These models were computed for three different reflectors, one Leica standard reflector and two different mini reflectors manufactured by Geodäsie Austria and Goecke.

The measurements at the horizontal comparator showed cyclic errors with amplitudes of up to  $\pm 0,8$  mm. The results of the field measurements show that the cyclic errors of the Leica TCA 1800 are smaller than a tenth of a millimetre at longer distances. For short range distance measurements up to 65 m the correction using the mathematical models derived from the laboratory measurements yields to residuals which are smaller than  $\pm 0,1$  mm.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	2
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Vorangegangene Arbeiten</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Elektronische Distanzmessung</b> .....	<b>6</b>
3.1	Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens .....	6
3.2	Instrumentelle Fehlerquellen .....	8
<b>4</b>	<b>Zyklischer Phasenfehler</b> .....	<b>9</b>
4.1	Ursachen des zyklischen Phasenfehlers .....	9
4.1.1	<i>Resolverfehler</i> .....	9
4.1.2	<i>Elektrische Signalüberlagerung</i> .....	9
4.1.3	<i>Optische Signalüberlagerung</i> .....	10
4.2	Bestimmung des zyklischen Fehlers .....	10
<b>5</b>	<b>Der Feldkomparator FC 2009</b> .....	<b>12</b>
5.1	Aufbau und Funktionsweise .....	12
5.2	Für diese Arbeit durchgeführte Modifikationen am Feldkomparator .....	13
<b>6</b>	<b>Atmosphärische Einflüsse bei EDM - Messungen</b> .....	<b>15</b>
6.1	Erste Geschwindigkeitskorrektur .....	15
6.2	Meteorologische Korrektur über Messung einer Referenzstrecke .....	17
6.3	Messung mit zwei baugleichen Instrumenten .....	18
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zur meteorologischen Korrektur</b> .....	<b>20</b>
7.1	Verwendete Instrumente .....	20
7.2	Ablauf der Untersuchungen .....	22
7.3	Auswertung und Ergebnisse .....	22
7.4	Schlussfolgerungen für die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers und weitere Überlegungen .....	24

<b>8</b>	<b>Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers mit dem Feldkomparator.....</b>	<b>25</b>
8.1	Allgemeines.....	25
8.2	Auswahl der Messstrecken.....	26
8.3	Auswahl des Instrumentariums.....	28
8.4	Messkonfiguration.....	30
8.4.1	<i>Zeitsynchronisation.....</i>	<i>31</i>
8.4.2	<i>Ansteuerung der Totalstationen.....</i>	<i>32</i>
8.4.3	<i>Feldkomparator.....</i>	<i>33</i>
8.4.4	<i>Temperaturaufzeichnung.....</i>	<i>33</i>
8.5	Aufbau.....	34
8.6	Ablauf der Messungen.....	36
8.7	Auswertung.....	39
8.7.1	<i>Glasmaßstabmessungen.....</i>	<i>39</i>
8.7.2	<i>EDM Messungen Referenzstrecke.....</i>	<i>40</i>
8.7.3	<i>EDM Messungen Komparatorstrecke.....</i>	<i>41</i>
<b>9</b>	<b>Ergebnisse der Feldkomparatormessungen.....</b>	<b>43</b>
9.1	Analyse der Abweichungen.....	43
9.2	Ausgewählte Messreihen.....	48
9.3	Überlappende Messreihen.....	57
9.4	Untersuchungen zur Streuung der Einzelmessungen.....	59
9.4.1	<i>Mögliche Reflexionen am Feldkomparator und Verdrehung der Prismen.....</i>	<i>59</i>
9.4.2	<i>Einfluss von Streulicht.....</i>	<i>62</i>
9.4.3	<i>Weitere mögliche Ursachen.....</i>	<i>64</i>
<b>10</b>	<b>Bestimmung des zyklischen Fehlers im Messlabor.....</b>	<b>65</b>
10.1	Auswertung und Ergebnisse.....	66
10.2	Vergleich von Feld- und Labormessungen.....	68

<b>11</b>	<b>Modellierung des zyklischen Fehlers aus Labormessungen.....</b>	<b>70</b>
11.1	Berechnung der Modelle am Beispiel des Miniprismas Geodäsie Austria .....	71
11.2	Modell aus Laborwerten für das Leica Standardprisma.....	76
11.3	Modell aus Laborwerten für das Miniprisma Goecke.....	78
11.4	Korrektur von Feldmessungen .....	80
<b>12</b>	<b>Resümee und Zusammenfassung.....</b>	<b>81</b>
	<b>Referenzen .....</b>	<b>84</b>
	<b>Anhang A: Ergebnisse der weiteren Feldkomparatormessungen .....</b>	<b>87</b>
	<b>Anhang B: Witterung während der Feldmessungen .....</b>	<b>119</b>
	<b>Anhang C: Bestimmung von Absolutwerten für die Feldmessungen ...</b>	<b>125</b>
	<b>Anhang D: Kalibrierung der Temperatursensoren .....</b>	<b>134</b>
	<b>Anhang E: Anpassung des Satzmessprogramms CALMS.....</b>	<b>141</b>
	<b>Anhang F: Untersuchung der Reflektivität der Prismen.....</b>	<b>143</b>
	<b>Anhang G: Aushang zur Diplomarbeit.....</b>	<b>146</b>

# 1 Einleitung

Der mobile Feldkomparator FC 2009 wurde für die Masterarbeit Paulitsch (2010) gefertigt und von diesem auf seine Eignung zur Bestimmung des zyklischen Fehlers von EDM Geräten untersucht.

Die vorliegende Arbeit baut auf den Ergebnissen der Arbeit von Paulitsch (2010) auf, weshalb einige Aspekte, die in Paulitsch (2010) abgehandelt wurden, hier nur kurz erläutert werden.

Bei elektronischen Distanzmessgeräten, die nach dem Prinzip des Phasenvergleichs arbeiten, ist die Existenz von zyklischen Fehlern seit der Entwicklung der ersten Geräte bekannt (Rüeger, 1996, S. 41). Trotz der Entwicklung immer genauerer Messsysteme ist dieser Fehler - wenn auch in geringerer Größenordnung – auch bei manchen modernen Instrumenten vorhanden.

Bei Präzisionsmessungen mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen kann der Einfluss des zyklischen Fehlers auf das Messergebnis oft nicht vernachlässigt werden. Eine Möglichkeit, die Genauigkeit von Distanzmessungen zu steigern, besteht darin, den zyklischen Fehlereinfluss zu modellieren und die gemessenen Distanzen zu korrigieren. Dafür ist eine Kalibrierung notwendig. Diese findet in einem Messlabor statt, welches aber meist nur eine begrenzte Länge von zum Beispiel 30 m aufweist. Da der zyklische Fehler distanzabhängige Anteile enthalten kann, erscheint eine Bestimmung über einen größeren Teil des Messbereichs des EDM Gerätes sinnvoll.

## **1.1 Motivation**

Das zyklische Fehlerverhalten von EDM Geräten wie sie in modernen Totalstationen eingesetzt werden, ist weitgehend nur im Rahmen von Labormessungen untersucht worden. Durch die Einschränkung interferometrischer Messmethoden auf die Länge des jeweiligen Messlabors war die Bestimmung des zyklischen Fehlers im Feld nur durch Vergleichsmessungen mit Maßbändern oder Messbahnen und geringerer Genauigkeit möglich. Nach den Überlegungen von Kahmen (1977, S. 297) ist nicht nur das Auftreten, sondern auch die Amplitude und die Phase des zyklischen Fehlers distanzabhängig, was eine Untersuchung bei längeren Distanzen noch interessanter erscheinen lässt. Mit dem mobilen Feldkomparator FC 2009 ist die Bestimmung des zyklischen Fehlers, mit einer maximalen Wellenlänge von drei Metern, mit hoher Genauigkeit bei beliebigen Distanzen möglich.

## **1.2 Zielsetzung**

In dieser Arbeit soll das Verhalten des zyklischen Phasenfehlers der EDM Einheit des Leica TCA 1800 bei längeren Distanzen bestimmt werden. Hierfür werden Messungen im Feld mit dem mobilen Feldkomparator FC 2009 durchgeführt. Besonderes Augenmerk wird auf die Korrektur der atmosphärischen Einflüsse auf die Streckenmessung gelegt, da aus den Untersuchungen von Paulitsch (2010) bekannt ist, dass der Einfluss des zyklischen Fehlers klein ist und in etwa dieselbe Größenordnung hat. Aus den Messergebnissen soll – sofern möglich - ein Korrekturmodell für den zyklischen Fehlereinfluss abgeleitet werden, um die Genauigkeit zukünftiger EDM Messungen steigern zu können.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 2 wird ein kurzer Überblick über vorhandene Arbeiten gegeben und die Ergebnisse von Paulitsch (2010) werden kurz skizziert. Die Kapitel 3 und 4 behandeln überblicksmäßig das Prinzip der Streckenmessung mit EDM und den dabei auftretenden zyklischen Fehler. In Kapitel 5 wird der mobile Feldkomparator vorgestellt. Die Einflüsse der Meteorologie und ein Ansatz zur Korrektur dieser Einflüsse über die Messung einer Referenzstrecke werden in Kapitel 6 behandelt, die Untersuchungen zu diesem Korrekturansatz sind Gegenstand von Kapitel 7. Die Durchführung der Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers und die Ergebnisse werden in Kapitel 8 und 9 behandelt. In Kapitel 10 und 11 werden die Messungen im Labor und die Modellierung der Ergebnisse beschrieben. In Kapitel 12 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

In Anhang A sind die Ergebnisse aller Messreihen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers mit dem Feldkomparator dargestellt. Anhang B enthält die Protokolle über die Witterung während der Feldmessungen in tabellarischer Form. In Anhang C wird ein Versuch zur Bestimmung von Absolutwerten für die Messungen mit dem Feldkomparator beschrieben. Anhang D beschreibt die Kalibrierung der zusätzlichen Temperatursensoren mit denen das Messsystem erweitert wurde. In Anhang E sind die Änderungen die am Satzmessprogramm CALMS, mit dem der TCA 1800 angesteuert wurde, dokumentiert. In Anhang F werden Untersuchungen zur Reflektivität der verwendeten Prismen beschrieben. Anhang G enthält den Aushang zur Diplomarbeit.

## 2 Vorangegangene Arbeiten

Paulitsch (2010) gibt in seiner Arbeit eine ausführliche Zusammenfassung von bestehenden Theorien und Untersuchungen zum zyklischen Fehlverhalten von EDM Geräten an. Auch die hier angeführten Quellen werden in seiner Arbeit diskutiert und sind nur der Vollständigkeit halber angeführt.

Schwarz (1981) beschreibt die Bestimmung des zyklischen Fehlers im Feld mit einer transportablen Messbahn, sowie die Auswertung der Messungen.

Kahmen (1978) beweist theoretisch, dass die Amplitude des zyklischen Phasenfehlers mit der gemessenen Distanz zunimmt. Rüeger und Covell (1980) erweitern das Modell für den zyklischen Fehler um Einflüsse höherer Ordnung, die durch Mehrwegsignale verursacht werden. Fleckl (2007) stellte bei Untersuchungen im Rahmen seiner Masterarbeit an der TU Graz einen zyklischen Fehler des Leica TCA 1800 fest. Zusätzlich fand er heraus, dass der zyklische Fehler bei Verwendung verschiedener Prismen signifikant unterschiedlich sein kann.

### **Ergebnisse der Arbeit Paulitsch (2010)**

Die Untersuchungen, die von Paulitsch (2010) durchgeführt wurden, bestätigen die Eignung des mobilen Feldkomparators zur Bestimmung des zyklischen Fehlers. Die Funktionalität wurde durch Vergleich der Ergebnisse mit der Horizontalkomparatorstrecke im Messlabor des IGMS bestätigt (Paulitsch, 2010, Kap. 7).

In einem Feldtest wurde ein Verfahren zur Korrektur der atmosphärischen Einflüsse durch die Messung einer konstanten Referenzstrecke getestet und für geeignet befunden (Paulitsch, 2010, Kap. 11).

Es wurde eine Bestimmung des zyklischen Fehlers im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der zyklische Fehler auch von der Wahl des verwendeten Prismas abhängt (Paulitsch, 2010, Abschn. 8.3). Auf Grundlage der Messergebnisse im Labor wurden verschiedene Modelle für den zyklischen Fehler des TCA 1800 erstellt.

Eine Testmessung mit dem Feldkomparator bei einer Distanz von 95 m zeigte dass ein Modell mit variierender Amplitude und Phasenwechseln den Verlauf des zyklischen Fehlers auf Grundlage der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Daten plausibel erklärt (Paulitsch, 2010, Abschn. 11.4). Auf der Basis dieses Modells wurden die zu untersuchenden Distanzen in der vorliegenden Arbeit ausgewählt.

Paulitsch (2010, Abschn. 12.2) hebt auch einige kritische Faktoren für die Messungen mit dem Feldkomparator FC2009 hervor:

- Einfluss der Meteorologie auf EDM Messungen
- Einfluss der temperaturbedingten Ausdehnung der Messeinrichtung
- möglicher Einfluss von Reflexionen des Messstrahls an Oberflächen der Messeinrichtung

Hauptaugenmerk der Arbeit Paulitsch (2010) war die Untersuchung des Feldkomparators. Eine Untersuchung mit mehreren Prismen bei verschiedenen Distanzen wurde jedoch nicht durchgeführt. Das soll durch die vorliegende Arbeit ergänzt werden.

### 3 Elektronische Distanzmessung

In diesem Kapitel wird ein kurzer Einblick in das Phasenvergleichsverfahren gegeben. Dieses wird bei vielen geodätischen EDM Geräten verwendet (Rüeger, 1996, S. 14). Für eine detaillierte Beschreibung, inklusive weiterer Verfahren, sei hier auf Rüeger (1996, Abschn. 3.2) und Joeckel et al. (2008, Kap. 4) verwiesen.

#### 3.1 Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens

Bei der Streckenmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren wird einer kontinuierlich ausgestrahlten Trägerwelle ein sinusförmiges Signal aufmoduliert. Die aufmodulierte Welle dient als Maßeinheit für die Streckenmessung. Die modulierte Messwelle wird vom Sender abgestrahlt und vom Zielreflektor zum Empfänger reflektiert. Die empfangene Welle weist gegenüber der ausgesandten eine Phasenverschiebung auf.

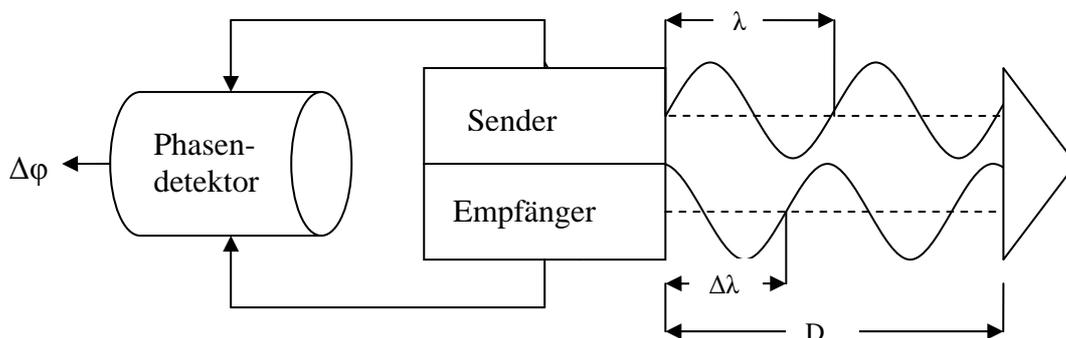


Abbildung 3-1: Distanzmessung mittels Phasenvergleich (nach Joeckel et al., 2008, S. 37)

Die Phasenverschiebung  $\Delta\varphi$  der empfangenen Messwelle wird mit einem Phasenmesser bestimmt. Die Messtrecke  $D$  ergibt sich aus dem Vielfachen  $N$  der Modulationswellenlänge  $\lambda$  und dem aus der Phasenverschiebung  $\Delta\varphi$  abgeleiteten Wellenreststück  $\Delta\lambda$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \tag{3-1}$$

$$2D = N \cdot \lambda + \Delta\lambda \quad \text{bzw.} \quad D = N \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\lambda}{2} \quad (3-2)$$

Jedoch ist das Ergebnis der Streckenmessung ohne die Bestimmung der Anzahl  $N$  der ganzen Wellenlängen bzw. Phasendurchläufe nicht eindeutig. Dies wäre nur dann der Fall, wenn die Modulationswellenlänge größer als die doppelt durchlaufene Maximaldistanz wäre. Die Auflösung bei der Phasenmessung ist mit 1/5000 bis 1/10000 der Modulationswellenlänge möglich (Joeckel et al., 2008, S. 39), was aber für längere Distanzen zu ungenauen Ergebnissen führen würde. Um ein eindeutiges und genaues Ergebnis zu erhalten, sind mindestens zwei verschiedene Maßstäbe, d.h. Modulationswellenlängen, erforderlich. Die Messung besteht aus einer Grob- und Feinmessung, wobei der Grobmaßstab dazu verwendet wird, die Anzahl ganzer Wellenlängen zu bestimmen

$$2D = N \cdot \lambda_1 + \Delta\lambda_1 \quad \text{und} \quad 2D \approx \Delta\lambda_2 \quad (3-3)$$

damit folgt

$$N = \frac{\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1}{\lambda_1} \quad (3-4)$$

Somit kann die Distanz mittels Grobmaßstab eindeutig bestimmt werden und es kann ein kurzwelliger Feinmaßstab gewählt werden, um eine ausreichende Genauigkeit zu erlangen (nach Joeckel et al., 2008, S. 37 - 40).

### 3.2 Instrumentelle Fehlerquellen

Die bei der elektrooptischen Distanzmessung auftretenden Fehler und ihre Ursachen werden sowohl in der Literatur als auch in Paulitsch (2010) ausführlich behandelt. Deswegen wird in Tabelle 3.1 nur ein kurzer Überblick gegeben.

**Tabelle 3-1 Fehlereinflüsse bei EDM Geräten**

Fehlerquelle	Auswirkung	Quelle
Abweichung der Modulationsfrequenz	Entfernungsabhängiger Streckenfehler	Joeckel et al., 2008, S. 95 – 138
Phaseninhomogenität	Entfernungsabhängiger Streckenfehler	
Fehler bei der Festlegung des Gerätenullpunktes	Konstante Abweichung der gemessenen Distanz	
Auflösevermögen	Rundungsfehler	
Zyklischer Phasenfehler	Entfernungsabhängiger Streckenfehler mit Periode des Feinmaßstabs	
Atmosphärische Einflüsse	Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Variation des Brechungsindex	

In dieser Arbeit wird nur der zyklische Fehler näher untersucht, dieser wird in Kapitel 4 behandelt.

## **4 Zyklischer Phasenfehler**

Der zyklische Phasenfehler zeigt sich als periodische Abweichung der Streckenmessung mit einer Spannweite bis zu mehreren Millimetern (Rüeger, 1996, S. 175). In Abschnitt 4.1 wird kurz auf die Ursachen für das Auftreten des zyklischen Fehlers eingegangen, Abschnitt 4.2 beschreibt die Bestimmung des zyklischen Fehlers in Grundzügen.

### **4.1 Ursachen des zyklischen Phasenfehlers**

Der zyklische Phasenfehler hat mehrere Ursachen. Diese können alle gemeinsam auftreten, und so ist der sichtbare zyklische Fehler eine Überlagerung von Signalen aus allen nachfolgend genannten Fehlerquellen.

#### **4.1.1 Resolverfehler**

Bei älteren Phasenmessgeräten wird die Phasenverschiebung mit einem Resolver bestimmt. Resolver werden in heutigen Instrumenten jedoch nicht mehr verwendet (Joeckel et al. 2008, S. 128), daher wird dieser Einfluss hier nicht näher behandelt.

#### **4.1.2 Elektrische Signalüberlagerung**

Aufgrund der kompakten Bauweise von EDM Geräten mit Sender und Empfänger im selben Gehäuse kommt es zur elektrischen Überlagerung von Teilen des Sende- bzw. Referenzsignals auf das Streckensignal. Aufgrund von gemeinsam genutzten Bauteilen und gemeinsamer Stromversorgung lässt sich dieser Effekt trotz Abschirmung nicht völlig vermeiden. Dieses Verhalten wird auch elektrisches Übersprechen genannt (Joeckel et al., 2008, S. 129).

### 4.1.3 Optische Signalüberlagerung

#### Optisches Übersprechen

Dieser Fehler entsteht durch streuende Infrarot – Strahlung, die direkt vom Sender zum Empfänger gelangt und sich mit dem Streckensignal überlagert. Beim Durchlaufen gemeinsamer optischer Bauteile ist der Weg des Störsignals sehr kurz, wodurch nur ein geringer Phasenfehler hervorgerufen wird (Rüeger, 1996, S. 175).

#### Mehrwegsignale

Signale, welche durch Reflexionen an Linsen, Sende- und Empfangsdioden die Messstrecke mehrmals zurücklegen, rufen ebenfalls zyklische Fehler hervor. Die Fehler treten mit Perioden höherer Ordnung auf, welche sich durch die Division des Feinmaßstabes durch ganze Zahlen ergeben. Die Amplituden der Störsignale werden immer kleiner, je öfter das Signal die Messstrecke durchläuft (Rüeger, 1996, S. 178).

## 4.2 Bestimmung des zyklischen Fehlers

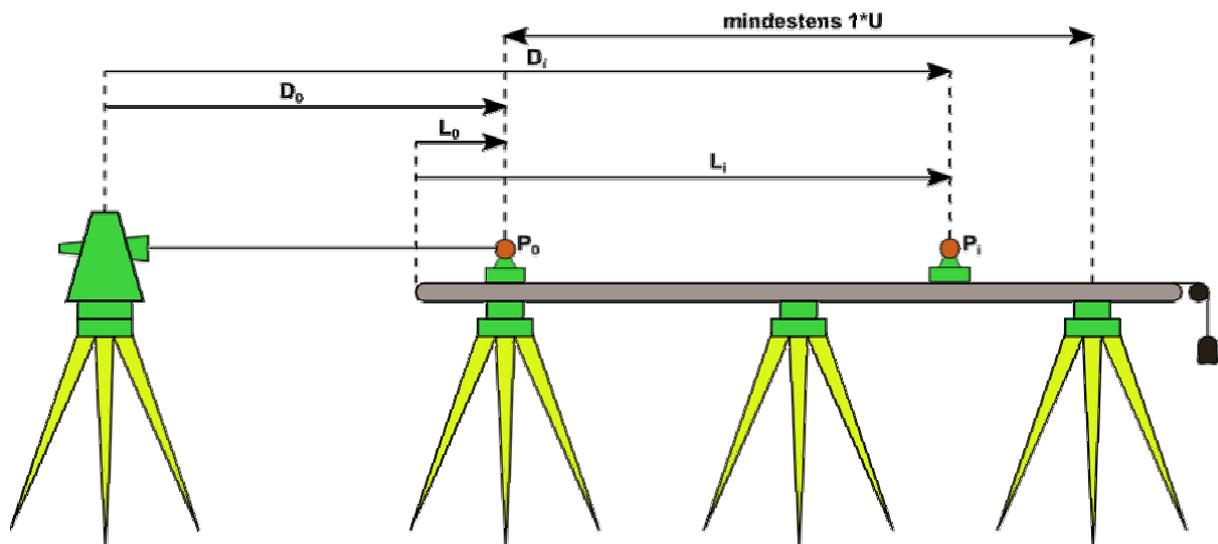


Abbildung 4-1: Messanordnung zur Bestimmung des zyklischen Fehlers  
(nach Joeckel et al., 2008, S. 162)

Die Bestimmung des zyklischen Fehlers erfolgt durch Vergleichsmessungen auf einer Komparatorbank, siehe Abbildung 4-1. Diese sollte mindestens die Länge des Feinmaßstabes des zu untersuchenden EDM Gerätes aufweisen. Die Komparatorstrecken müssen mit übergeordneter Genauigkeit bestimmbar sein. Der zyklische Fehler ergibt sich als

$$Kz_i = (L_i - L_0) - (D_i - D_0) \quad (4-1)$$

wobei die erste EDM Distanz  $D_0$  ist,  $D_i$  die weiteren EDM Distanzen,  $L_0$  ist die erste Ablesung am Komparator,  $L_i$  die weiteren Komparatorabstände.

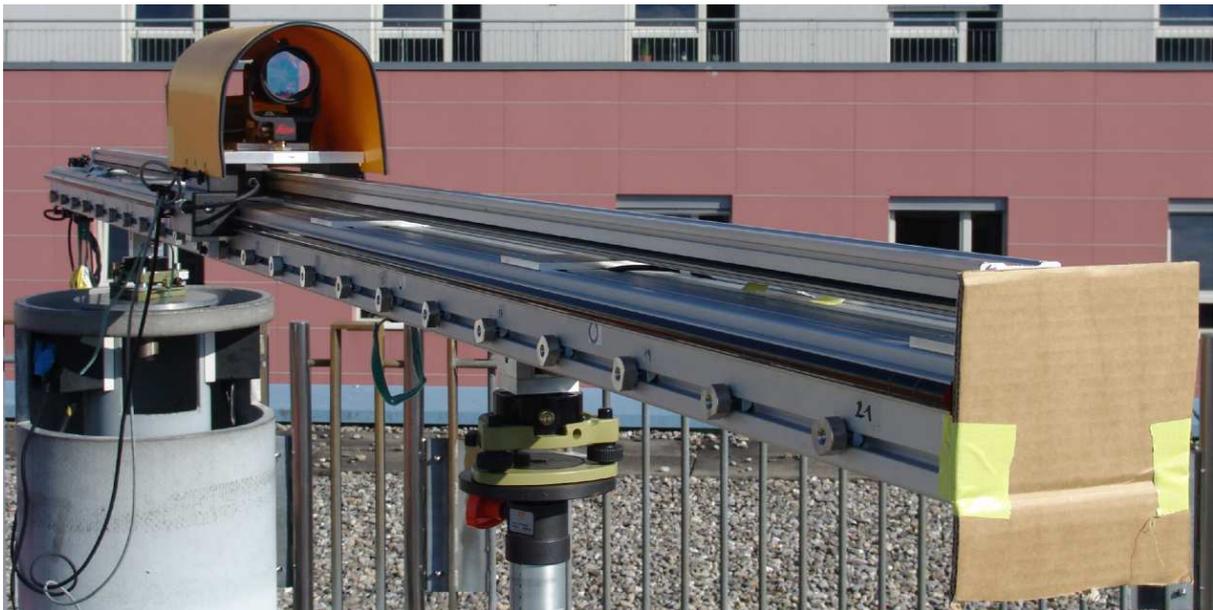
Der Reflektor wird auf der Komparatorbank um fixe Beträge verschoben, die Länge der Komparatorabschnitte  $\Delta L$  richtet sich nach dem Feinmaßstab des zu untersuchenden EDM Gerätes. Für die Bestimmung einer einfachen Sinusschwingung wählt man  $\Delta L = U/20$ , wobei  $U$  die Länge des Feinmaßstabes ist (Joeckel et al., 2008, S. 162). Die Differenzen aus Komparatorstrecke und EDM Strecke nach Formel (4-1) ergeben die Restabweichungen, aus denen der zyklische Fehler modelliert werden kann (Joeckel et al. 2008: S. 161-162). Durch die Wahl des Abstandes zwischen Komparatorbank und EDM Gerät kann die Bestimmung des zyklischen Fehlers bei beliebigen Distanzen erfolgen.

## 5 Der Feldkomparator FC 2009

Der mobile Feldkomparator FC 2009 wurde am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz für die Diplomarbeit Paulitsch (2010) gebaut. Hier erfolgt eine kurze Vorstellung des Systems und der Änderungen seit dem Bau.

### 5.1 Aufbau und Funktionsweise

Das Kernstück des FC 2009 bildet der Glasmaßstab LS688 C der Firma Heidenhain. Die Genauigkeit der gemessenen Strecken wird vom Hersteller mit einer „Genauigkeitsklasse von 10  $\mu\text{m}$ “ angegeben. Untersuchungen von Paulitsch (2010, S. 41) ergaben eine Präzision von 0,03  $\mu\text{m}$  für die Messungen mit dem Glasmaßstab. Dieser Glasmaßstab ist auf einen Aluminiumträger montiert, auf dem sich ein beweglicher Messschlitten befindet, siehe Abbildung 5-1.



**Abbildung 5-1: Mobiler Feldkomparator FC 2009 am Dach des Geodäsiegebäudes aufgebaut, die Kartonabdeckung dient zur Vermeidung von möglichen Reflexionen des EDM Signals**

An der Seite des Aluminiumträgers befinden sich Pfannen, deren Positionen variabel sind. An den Pfannen kann der Messschlitten mittels Klemmschraube fixiert werden. Durch die Variabilität der Pfannen kann das Abtastintervall an das zu untersuchende Gerät angepasst werden.

Zusätzlich ist am Messwagen ein Neigungssensor angebracht, um die Verkipfung des Messwagens, die infolge einer Verwindung des Trägerbalkens entsteht (siehe Grurl, 2010, Kap. 8), aufzuzeichnen und korrigieren zu können.

## 5.2 Für diese Arbeit durchgeführte Modifikationen am Feldkomparator

Durch die exzentrische Befestigung des Glasmaßstabs auf dem Trägerbalken kann sich der Nullpunkt des Glasmaßstabs durch temperaturbedingte Längenänderungen des überstehenden Balkenstückes verschieben. Um den Einfluss dieser Nullpunktverschiebung des Messsystems rechnerisch korrigieren zu können musste die Temperaturerfassung beider Komponenten verbessert werden (vgl. Paulitsch, 2010, S. 115). Dies wurde durch Aufkleben von vier Stück Pt100 Temperatursensoren erreicht (siehe Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3, sowie für eine Ansicht der Sensoren vor dem Einbau Abbildung D-1). Die Sensoren wurden an beiden Enden des Trägerbalkens befestigt um eine eventuelle ungleichmäßige Temperaturverteilung feststellen zu können, aus demselben Grund wurde einer der Sensoren an der Unterseite des Trägers montiert. Die verwendeten Sensoren wurden zuvor für den zu erwartenden Temperaturbereich kalibriert und überprüft, siehe Anhang D. In Abschnitt D.3 sind die Überlegungen zur temperaturbedingten Ausdehnung nochmals genauer dargestellt und erläutert.

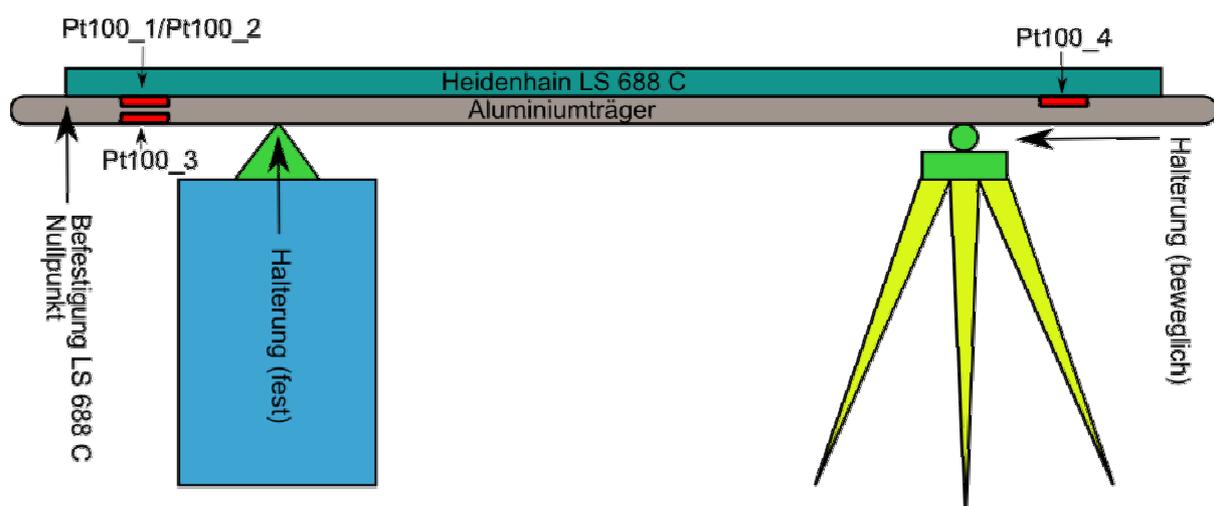
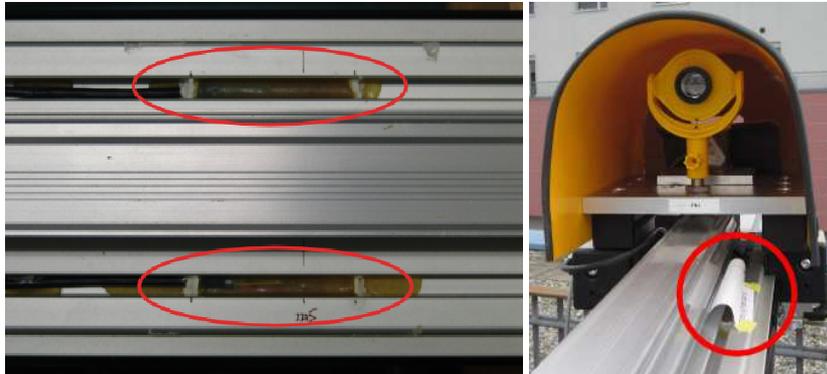


Abbildung 5-2: Positionen der am Feldkomparator montierten Temperatursensoren

Die Temperatursensoren wurden während der Messungen durch aufkleben von gewölbten Papierstreifen abgeschattet (siehe Abbildung 5-3 rechts) um eine Erwärmung durch direkte Sonneneinstrahlung zu verhindern.



**Abbildung 5-3: Aufgeklebte Temperatursensoren (links), Abschattung der Sensoren (rechts)**

Um mögliche Driften in den Messwerten des Neigungssensors durch Aufheizeffekte zu minimieren wurde ein Sonnenschutz über dem Messwagen angebracht. Zur Vermeidung von möglichen Reflexionen des Messsignals an glatten Oberflächen und Kanten wurde der Sonnenschutz für den Neigungssensor mit einer schwarzen Kantenblende versehen, siehe Abbildung 5-4.



**Abbildung 5-4: Abdeckung Messwagen**

In Abbildung 5-4 ist auch die Kartonabdeckung der Stirnseite des Messwagens zu sehen. Diese wurde angebracht, um mögliche Reflexionen des Messsignals an blanken Metallteilen zu verhindern, zusätzlich wurde der Stirnbereich des Komparators mit Karton abgedeckt (siehe Abbildung 5-1). Ansonsten war das System gleich wie in Paulitsch (2010, Kap. 9) beschrieben.

## 6 Atmosphärische Einflüsse bei EDM - Messungen

Die Atmosphäre beeinflusst die elektronische Distanzmessung in zweierlei Hinsicht (Joeckel et al., 2008, Abschn. 5.1):

- Einfluss des Brechungsindex  $n$  auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Messwellenlänge
- Einfluss der Refraktion auf die geometrische Form der Bahnkurve

Diese Einflüsse werden nach der Streckenmessung durch Anbringen der ersten und zweiten Geschwindigkeitskorrektur, sowie der Reduktion wegen Bahnkrümmung des Messstrahls korrigiert.

Der Einfluss der zweiten Geschwindigkeitskorrektur überschreitet erst ab ca. 50 km den Wert 0,05 mm (Joeckel et al., 2008, S. 209). Die Größenordnung der Bahnkrümmungsreduktion beträgt bei einer Distanz von 100 km nur 17 mm (Joeckel et al., 2008, S. 211). Da alle in dieser Arbeit untersuchten Distanzen kleiner als 250 m sind, können diese Einflüsse hier vernachlässigt werden. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 6.1 nur die erste Geschwindigkeitskorrektur näher behandelt. In Abschnitt 6.2 wird ein alternatives Verfahren zur meteorologischen Korrektur über die Messung einer Referenzstrecke vorgestellt, in Abschnitt 6.3 eine Erweiterung dieses Ansatzes.

### 6.1 Erste Geschwindigkeitskorrektur

Die erste Geschwindigkeitskorrektur ist notwendig, da sich die Messwerte eines EDM Gerätes auf einen definierten Bezugsbrechungsindex der Atmosphäre beziehen, die Messungen in der Regel jedoch bei abweichenden Bedingungen durchgeführt werden. Um die gemessenen Werte korrigieren zu können, werden die atmosphärischen Parameter Temperatur, Druck und Partialdruck des Wasserdampfes während der Messung erfasst und die Strecken nach Formel (6-1) korrigiert.

$$K_n = D_a \cdot (n_0 - n) \quad (6-1)$$

Dabei ist  $D_a$  ist die rohe Messstrecke,  $n_0$  der Bezugsbrechungsindex des EDM Gerätes und  $n$  der aktuelle Brechungsindex.

Die korrigierte Entfernung  $D$  ergibt sich als

$$D = D_a + K_n \quad (6-2)$$

mit dem Korrekturwert  $K_n$  aus Gleichung (6-1).

Da sich das bei elektrooptischer Entfernungsmessung verwendete Licht wie ein schmales Frequenzband von Wellen unterschiedlicher Wellenlängen verhält (Joeckel et al., 2008, S. 96), ist für das Ausbreitungsverhalten der Gruppenbrechungsindex der effektiven Trägerwellenlänge maßgeblich. Für die Berechnung des Gruppenbrechungsindex gelten seit 1999 neue Empfehlungen der IUGG (Internationale Union für Geodäsie und Geophysik) und IAG (Internationale Assoziation für Geodäsie), (Joeckel et al. 2008: S. 96-102., IUGG 1999, Resolution 3). Dieser berechnet sich als

$$N_{Gr} = (n_{Gr} - 1) \cdot 10^6 = 287,6155 + \frac{4,88660}{\lambda_T^2} + \frac{0,06800}{\lambda_T^4} \quad (6-3)$$

$\lambda_T$  ist die effektive Trägerwellenlänge der Wellengruppe in  $\mu\text{m}$ , die vom Instrumentenhersteller bestimmt wird.

Diese Formel bezieht sich auf die folgende Normalatmosphäre:

- $t = 0 \text{ °C}$  ( $T = 273,15 \text{ K}$ )
- $p = 1013,25 \text{ hPa}$
- $e = 0,0 \text{ hPa}$
- $\text{CO}_2$  – Gehalt = 375 ppm.

$t$  ist die Temperatur in Grad Celsius,  $p$  der Luftdruck in Hektopascal und  $e$  der Partialdruck des Wasserdampfs in Hektopascal.

Zur Reduktion von der Normalatmosphäre auf die aktuellen atmosphärischen Verhältnisse ist die Beziehung

$$N_L = (n_L - 1) \cdot 10^6 = N_{Gr} \cdot \frac{273,15}{1013,25} \cdot \frac{p}{T} - \frac{11,27}{T \cdot e} \quad (6-4)$$

zu verwenden.  $n_L$  ist der Gruppenbrechungsindex bei aktuellen meteorologischen Verhältnissen ( $t, p, e$ ),  $N_{Gr}$  die Gruppenbrechungszahl bei Normalatmosphäre nach Formel (6-3),  $t$  die Trockentemperatur in °C ( $T = t + 273,15$ ),  $p$  der Luftdruck in Hektopascal und  $e$  der Partialdruck des Wasserdampfes in Hektopascal.

Nach Rüeger (1996, S. 55 - 56) sowie Deumlich und Staiger (2002, Tab. 5-9) ergeben sich folgende Einflüsse bei Abweichungen in den Atmosphärischen Parametern:

- $\Delta t$  von 1°C ... Distanzfehler von 1 ppm
- $\Delta p$  von 1 hPa ... Distanzfehler von 0,3 ppm
- $\Delta e$  von 1 hPa ... Distanzfehler von 0,04 ppm

Da die Messung der atmosphärischen Parameter meist nur im Stand- und Zielpunkt durchgeführt wird, bzw. möglich ist, sind diese nicht zwingend repräsentativ für den Verlauf des Messstrahls. Insbesondere das Temperaturfeld ist sehr heterogen und ändert sich in Bodennähe häufig (Deumlich und Staiger 2002: S. 162 - 163). Aufgrund der Nichtrepräsentativität der meteorologischen Daten ist auch bei sorgfältiger Bestimmung derselben mit einem verbleibenden Fehler in der Streckenmessung von etwa 1 ppm zu rechnen (Rüeger 1996: S. 56).

Dieser verbleibende Fehler liegt für Strecken über 100 m an der Grenze der Messauflösung des untersuchten EDM Gerätes. Im Messgebiet auf den Dächern der TU Graz im städtischen Bereich war mit einer noch größeren Inhomogenität des Temperaturfeldes aufgrund der Wärmeabstrahlung von Gebäuden und Straßen zu rechnen. Deswegen sollte die meteorologische Korrektur über die Messung einer Referenzstrecke erfolgen.

## 6.2 Meteorologische Korrektur über Messung einer Referenzstrecke

Die genaue Erfassung der atmosphärischen Parameter über den gesamten Weg des Messstrahls ist, wie im vorigen Abschnitt erwähnt, sehr aufwendig und für lange Strecken praktisch nicht durchführbar. Daher wurde bei den Messungen von Paulitsch (2010, Kap. 9) der Ansatz einer meteorologischen Korrektur über die Messung einer Referenzstrecke verwendet. Hierbei wurde zusätzlich zur eigentlichen Messung die Distanz zu einem als stabil angenommenen Referenzziel beobachtet. Die Veränderungen der gemessenen Entfernungen zu diesem Ziel

wurden als Änderungen der atmosphärischen Einflüsse interpretiert und als Korrekturwerte an die zu bestimmenden Distanzen zum Komparator angebracht (Paulitsch, 2010: S. 88).

Da bei dem von Paulitsch angewandten Verfahren die Messungen zum Feldkomparator und zum Referenzziel mit demselben EDM Gerät durchgeführt wurden, sind die so bestimmten Korrekturwerte zeitlich um ca. zwei Minuten versetzt (Paulitsch, 2010, S. 106). Schnell wechselnde atmosphärische Bedingungen die während diesem Zeitraum auftreten können werden bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt. Die Verlängerung der Gesamtmesszeit durch das Anzielen und Messen des zweiten Zieles ist ebenso zu beachten. Eine kürzere Gesamtmesszeit bedeutet im Allgemeinen auch eine geringere Veränderung der atmosphärischen Bedingungen.

### 6.3 Messung mit zwei baugleichen Instrumenten

Der in Abschnitt 6.2 vorgestellte Ansatz lässt sich verbessern, indem die Messung zum Referenzziel zeitgleich mit einem zweiten EDM Gerät stattfindet. Dadurch können auch kurzfristige Veränderungen der Atmosphäre erfasst werden und die Messzeit wird verringert. Der Weg der Messstrahlen sollte möglichst nahe aneinander liegen, damit beide Strahlen dieselben Luftschichten durchlaufen. Bei einer Messanordnung wie in Abbildung 6-1 dargestellt, ist aber zu beachten dass sich die EDM Strahlen der Instrumente nicht überschneiden, da überlagerte Signalanteile die Funktion der Geräte stören können. Dieser Effekt ist besonders bei der Messung von längeren Distanzen zu beachten, da sich das Sichtfeld der Optik bei gleichem Öffnungswinkel mit der Distanz vergrößert.

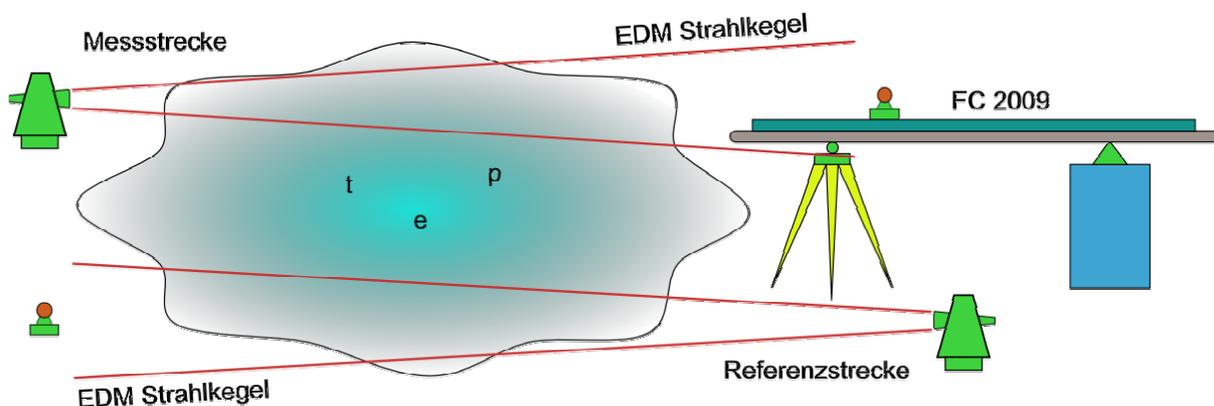


Abbildung 6-1: Messung mit zwei Instrumenten

Die Instrumente sollten gleiche Trägerwellenlängen besitzen, um unterschiedliche Einflüsse des Brechungsindex auszuschließen. Die Verwendung von baugleichen EDM Geräten hat den Vorteil, dass auch sonst keine zusätzlichen Korrekturen notwendig sind.

Die konstante Referenzstrecke wird während der Messung zum eigentlichen Ziel kontinuierlich beobachtet. Sieht man den ersten Messwert  $D_{ref_1}$  der Referenzstrecke als unverfälscht an und reduziert die nachfolgenden Strecken um diesen, so erhält man die atmosphärische Korrektur  $\delta_{i_{ATM}}$  für alle nachfolgenden Messzeitpunkte  $i$ .

$$\delta_{i_{ATM}} = D_{ref_i} - D_{ref_1} \quad (6-5)$$

$$D_{i_{korr}} = D_i + \delta_{i_{ATM}} \quad (6-6)$$

Da beide Messstrahlen annähernd die gleichen Luftmassen durchlaufen und dieselbe Trägerwellenlänge aufweisen, werden beide Messungen in etwa auf dieselbe Art verfälscht. Somit kann der aus der Veränderung der Referenzstrecke gewonnene Korrekturwert  $\delta_{i_{ATM}}$  nach Formel (6-6) an die eigentlichen Messstrecken angebracht werden.

## 7 Untersuchungen zur meteorologischen Korrektur

Um den in Abschnitt 6.3 vorgestellten Ansatz auf seine Anwendbarkeit hin zu prüfen wurden mehrere Voruntersuchungen durchgeführt. Es wurden die konstanten Entfernungen zwischen zwei verschiedenen Messpfeilern und Reflektoren gleichzeitig mit zwei EDM Geräten beobachtet. Der Verlauf der Messstrahlen sowie die Länge der gemessenen Strecken waren annähernd gleich, somit sollten auch die Veränderungen der gemessenen Strecken aufgrund der meteorologischen Einflüsse annähernd gleich sein. Bildet man die Differenzen der Distanzänderungen sollten diese nur normalverteiltes Messrauschen aufweisen wenn das Verfahren funktioniert.

### 7.1 Verwendete Instrumente

Da das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme keine zwei baugleichen automatisierten Totalstationen besitzt, musste eine Totalstation ausgeliehen werden. Ein zweiter Leica TCA 1800 (Spezifikationen siehe Tabelle 7-1) konnte vom Institut für Navigation und Satellitengeodäsie (INAS) der TU Graz ausgeborgt werden. Die Seriennummern und weitere Daten der Totalstationen sind in Tabelle 7-2 angeführt.

**Tabelle 7-1: Spezifikationen der EDM Einheit des Leica TCA 1800 (Herstellerangaben)**



Wellenlänge	850 nm
Hauptmodulationsfrequenz*	50 MHz
Feinmaßstab $U$	3 m
Genauigkeit (ISO 17123-4)	$\pm 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$
Anzeigauflösung	0,1 mm
Reichweite (Standard Rundprisma)	2500 m
Reichweite (Miniprisma)	900 m

\*temperaturabhängig

Leider war die zweite Totalstation nicht immer verfügbar, dadurch ergaben sich zum Teil erhebliche Verzögerungen bei den praktischen Arbeiten. Weitere Einschränkungen ergaben sich durch die nicht immer optimalen (zu schönen) Wetterbedingungen während der Untersuchungen.

**Tabelle 7-2: Daten der verwendeten Totalstationen**

Totalstation	Seriennummer	Software Version	Frequenz [Hz]*
Leica TCA 1800 „IGMS“	413701	2.28a	49999963
Leica TCA 1800 „INAS“	422281	2.28a	49999954

\* bei ca. 20°C im Labor

Als Ziele dienten zwei baugleiche Leica Standardprismen (siehe Tabelle 8-2, Leica Geosystems). Eines davon ist fix am Dach des Gebäudes Kopernikusgasse 24 montiert (siehe Abbildung 7-1) und Teil des Prüffeldes „Dach Steyrergasse 30“. Ein zweites neuwertiges Prisma wurde am Messpfeiler 4 auf dem Dach des Geodäsiegebäudes aufgestellt (siehe Abbildung 8-2). Die Strecke Kopernikusgasse – Steyrergasse wird im Folgenden als Messstrecke bezeichnet, die entgegengesetzte Richtung als Referenzstrecke. Eine Übersicht des Messgebietes ist in Abbildung 8-2 dargestellt.



**Abbildung 7-1: Prisma Kopernikusgasse, fix montiert**

## 7.2 Ablauf der Untersuchungen

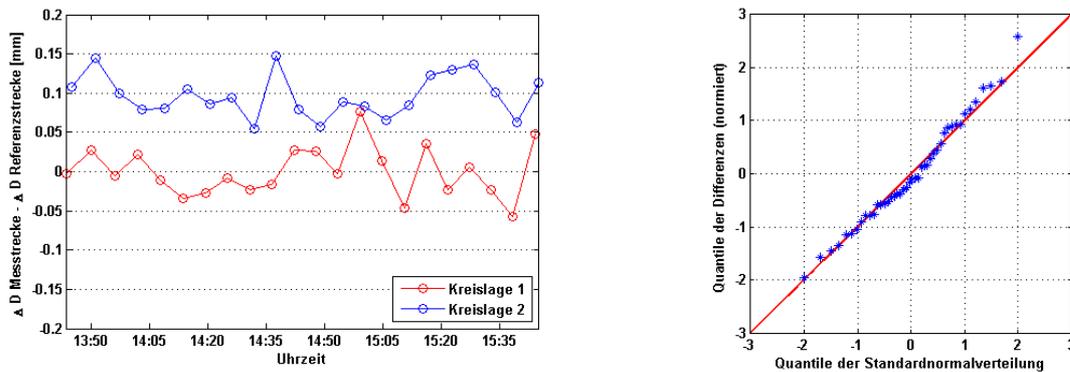
Für die Voruntersuchungen wurde das Satzmessprogramm CALMS (Lesjak, 2007), welches schon von Paulitsch (2010, S. 84) benutzt wurde, verwendet und nochmals adaptiert. Die Änderungen sind in Anhang E dokumentiert. Beide Totalstationen waren mit Laptops verbunden und wurden über die CALMS Software gesteuert. Eine Totalstation wurde auf dem Messpfeiler am Dach des Gebäudes Kopernikusgasse 24 (NTW) aufgestellt, die andere am Messpfeiler 3 am Dach des Geodäsiegebäudes (siehe Abbildung 8-2). Die Entfernung zwischen den Reflektoren und den Totalstationen betrug ca. 220 m. Die Einstellungen der CALMS Software wurden so gewählt, dass beide Totalstationen gleichzeitig alle 5 Minuten eine vollständige Satzmessung mit 10 Wiederholungsmessungen durchführten.

Die Distanzen wurden über einen Zeitraum von 1,5 Stunden beobachtet. Dies ist die Zeit die Paulitsch (2010, S. 90) für eine Messung über den gesamten Komparatorbereich angibt. Während der Messungen stellte sich heraus, dass die Uhren der Laptops trotz Synchronisation vor Beginn der Messung um bis zu 1 Minute voneinander abwichen. Dies hatte zur Folge, dass die berechneten Distanzänderungen der Referenzstrecke nicht die zum Zeitpunkt der Messung der Messstrecke herrschenden meteorologischen Bedingungen repräsentierten, wodurch Streuungen in den Differenzen der Messreihen auftraten. Bei den weiteren Untersuchungen wurden die Rechneruhren während der Messungen kontinuierlich über GPS synchronisiert, was eine deutliche Reduktion der Streuungen bewirkte.

## 7.3 Auswertung und Ergebnisse

Die Messungen aus erster und zweiter Kreislage wurden jeweils getrennt gemittelt und die so erhaltenen Distanzen von Mess- und Referenzstrecke um den ersten Wert reduziert. Dies deshalb, da vermutet wurde, dass die Nullpunktkorrekturen der Totalstationen kreislagenabhängige Fehler aufweisen. Die so erhaltenen Werte entsprechen den atmosphärischen Korrekturen  $\delta_{i_{ATM}}$  nach Formel (6-5). Dann wurden die Differenzen aus Mess- und Referenzstrecke gebildet. Diese wiesen wider Erwarten starke Streuungen von bis zu  $\pm 1$  mm auf. Diese waren einerseits auf die nicht idealen meteorologischen Bedingungen während der Messung (wechselnde Sonneneinstrahlung, Temperaturschwankungen) zurückzuführen, großteils aber auf die nicht gleichzeitige Messung der Strecken.

Erst nach der im vorigen Abschnitt beschriebenen kontinuierlichen Synchronisation der Uhren konnten bessere Ergebnisse erzielt werden. In Abbildung 7-2 wird eine Zeitreihe, die mit synchronen Rechnerzeiten und bei guten atmosphärischen Bedingungen (bewölkter Himmel, kein Wind) gemessen wurde, gezeigt.



**Abbildung 7-2: Differenzen aus Mess- und Referenzstrecke, Mittelwerte (links), QQ-Plot der Differenzen, Einzelmessungen (rechts)**

Abbildung 7-2 (links) zeigt die Ergebnisse einer Messung bei guten Wetterbedingungen. Der Offset zwischen den Messungen in Kreislage eins und zwei ist deutlich zu erkennen, was die Vermutung der unterschiedlichen Nullpunktskorrektur bestätigt. Abbildung 7-2 (rechts) zeigt einen QQ-Plot der Daten zur Überprüfung auf Normalverteilung. Dieser wurde nach Hartung (2005, S. 847 – 849) durchgeführt. Es sind einzelne Ausreißer im QQ-Plot erkennbar, für den Rest der Daten kann jedoch Normalverteilung angenommen werden. Somit kann die in Abschnitt 6.3 beschriebene Methode der meteorologischen Korrektur von EDM Strecken über die Messung einer Referenzstrecke mit einem zweiten EDM Gerät für die hier untersuchten Distanzen von bis zu 220 m angewandt werden.

## **7.4 Schlussfolgerungen für die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers und weitere Überlegungen**

Aus den Erfahrungen der Voruntersuchungen ergaben sich folgende Vorgehensweisen für die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers:

### **Synchronisierung der PC - Uhren**

In den Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Uhren der zur Steuerung der Totalstationen verwendeten Laptops innerhalb der Messzeit um mehrere Minuten auseinanderdriften. Dieser Umstand macht es notwendig, die Rechnerzeiten während der Messungen kontinuierlich zu aktualisieren, siehe Abschnitt 7.3.

### **Messung in einer Kreislage**

Der Einfluss des Nullpunktsfehlers der EDM Einheit ist möglicherweise nicht in beiden Fernrohrlagen gleich. Er wirkt sich als konstante Größe nicht auf den zyklischen Fehler aus. Um eine Reduktion der Streuungen zu erreichen wurde beschlossen, bei den Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers nur in einer Kreislage zu messen.

### **Messung bei möglichst stabilen meteorologischen Bedingungen**

Bei der Auswertung der Voruntersuchungen zeigte es sich, dass Messungen, die bei wechselnden Wetterbedingungen stattfanden, schlechtere Ergebnisse lieferten. Insbesondere starker Wind und wechselnde Sonneneinstrahlung sind dafür verantwortlich. Bessere Messbedingungen wären bei bedecktem Himmel und konstanter Lufttemperatur zu erwarten.

### **Messungen zur Bestimmung der Drift der EDM Einheit**

Um den Einfluss einer möglichen Drift der zu untersuchenden Totalstation zu bestimmen, werden vor und nach der Messung auf den mobilen Feldkomparator jeweils 100 Wiederholungsmessungen zu einem stabil montierten Prisma durchgeführt. Die eventuelle Veränderung dieser, a priori als konstant anzusehenden Distanz, lässt die Berechnung einer linearen Korrekturfunktion für die Drift zu.

## 8 Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers mit dem Feldkomparator

### 8.1 Allgemeines

Die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers fanden zwischen dem 28. 3. 2012 und 3. 6. 2012 auf den Dächern der TU Graz statt. Das Messgebiet ist in Abbildung 8-2 dargestellt. Auf dem Dach des Geodäsiegebäudes und den umliegenden Dächern befindet sich ein Prüffeld mit betonierten Messpfeilern, welche zum stabilen Aufbau des Feldkomparators sehr gut geeignet sind.



Abbildung 8-1: TCA 1800 mit Klemmstativ auf Säule montiert

Zusätzlich befinden sich am Dach des alten Chemiegebäudes der TU Graz (Stremayrgasse 16) insgesamt 13 Betonsäulen, auf denen die Totalstation mit Hilfe eines Klemmstativs montiert werden kann (siehe Abbildung 8-1). Das umfangreiche Zusatzinstrumentarium wurde zwischen den einzelnen Messungen im Dachgeschoß des Gebäudes Steyrergasse 30 gelagert.

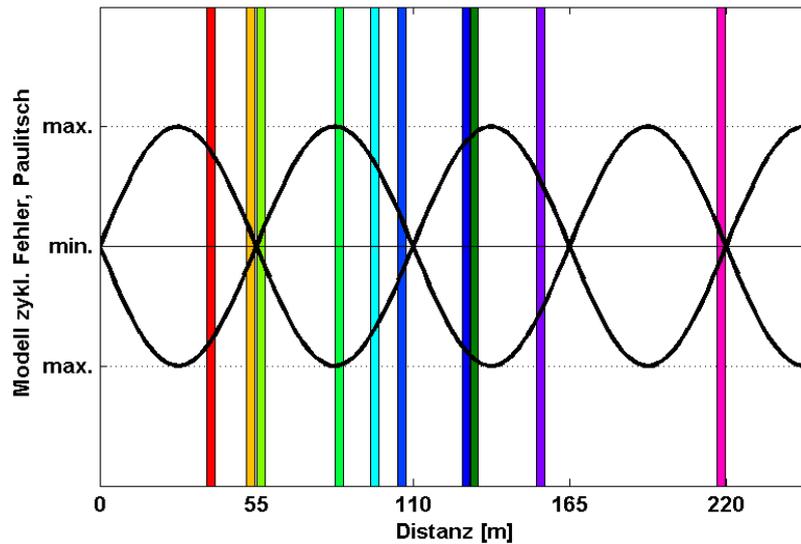


Abbildung 8-2: Messgebiet (Orthofoto: Land Steiermark, 2012)

## 8.2 Auswahl der Messstrecken

Die zu untersuchenden Distanzbereiche wurden auf der Basis der Modellierung des zyklischen Fehlers von Paulitsch (2010, S. 73 - 82) ausgewählt. Es wurde das beschriebene Modell C (Paulitsch, 2010, S. 76 - 77) mit einer überlagerten langperiodischen Sinusschwingung von 110 m als Grundlage gewählt, da dieses Modell mit den weiteren Messungen von Paulitsch (2010, S. 110 - 111) übereinstimmt. Die Messungen wurden, soweit es möglich war, bei Minimal- bzw. Maximalwerten des Modells durchgeführt, Einschränkungen ergaben sich aber durch die fixen Distanzen zwischen den Messfeilern und Säulen.

In Abbildung 8-3 sind die gewählten Entfernungen für die Bestimmung des zyklischen Fehlers und die Umhüllende des Modells C dargestellt.



**Abbildung 8-3: Gewählte Entfernungen (bunte Balken) und Modell C von Paulitsch (2010, S 76 - 77) in schwarz**

Es wurde versucht die Strecken im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten so zu verteilen, dass ein möglichst komplettes Abbild des zyklischen Fehlerverhaltens gewonnen werden kann. Es ergaben sich insgesamt 10 verschiedene sinnvolle Aufstellungen. Die sich durch diese Konfiguration ergebenden Distanzbereiche sind in Tabelle 8-1 angeführt.

**Tabelle 8-1: Untersuchte Distanzbereiche**

Distanz [m]	Von (Standpunkt EDM)	Nach (Standpunkt FC 2009)	Zweck
37,3– 40,3	Steyrergasse 30	Pf 6	Pf 3 Vergleich Labormessung
51,4 – 54,4	altes Chemiegebäude	S 7	Pf 6 Nahe Nulldurchgang,
55,0 – 58,0		S 5	Pf 6 Vergleich Labormessung bei verlängerter Distanz
82,4 – 85,4		S 4	Pf 6 nahe Maximum
94,9 – 97,9		S 5	Pf 3 zwischen Minimum und Maximum
104,7 – 107,7		S 13	Pf 3 nahe Nulldurchgang
127,4 – 130,4		S 2	Pf 2 überlappende Messreihen,
129,9 – 132,9		S 1	Pf 2 nahe Maximum
153,0– 156,0		Neue Technik	NTO
216,6 – 219,6	Neue Technik	NTW	Pf 3 maximal mögliche Distanz

Im Distanzbereich zwischen 160 m und 200 m konnten keine Messungen durchgeführt werden, da im Messgebiet keine Möglichkeit einer ausreichend stabilen Aufstellung der Totalstation vorhanden ist.

Ursprünglich war geplant, mehrere überlappende Messreihen durchzuführen, um langwellige Anteile des zyklischen Fehlers besser aufdecken zu können. Dazu sollte der Komparator am selben Messpfeiler um 180° verdreht montiert werden. Dies konnte aus Sicherheitsgründen aber nicht realisiert werden, da der Komparator über das Dachgeländer hinausgeragt hätte und der Beobachter den Komparator außerhalb des gesicherten Bereiches bedienen hätte müssen. Durch diese Einschränkung konnte lediglich ein Distanzbereich (127,4 m bis 132,9 m) überlappend gemessen werden.

### 8.3 Auswahl des Instrumentariums

Um an die Arbeiten von Paulitsch anschließen zu können und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde dasselbe Instrumentarium benutzt. Die untersuchten Reflektoren sind in Tabelle 8-2 angeführt.

**Tabelle 8-2: Untersuchte Reflektoren, Herstellerangaben**

			
Hersteller	Leica Geosystems	Geodäsie Austria	Goecke
Seriennummer	5058431	gek. 03/10	gek. 03/10
Distanzbereich	bis 3500 m	keine Angabe	bis 600 m
Durchmesser Prismenkörper	62,5 mm	25 mm	25 mm
Kippachshöhe	86 mm	86 mm	86 mm
Offset	0 mm	- 17 mm	2 mm
Material	Glasprisma	Miniprisma Glas	Miniprisma Glas

Auf die Untersuchung von Reflexfolien wurde in dieser Arbeit verzichtet da diese nicht mit der ATR Funktion des TCA 1800 gemessen werden können und eine fehlerlose Messung wegen des horizontal aufgebauten Feldkomparators nur durch den Einsatz eines zweiten Beobachters möglich gewesen wäre. Die Wahl des Leica TCA 1800 als zu untersuchende Totalstation ergab sich aus denselben Gründen, und, wie in Kapitel 7 erwähnt, der Verfügbarkeit eines baugleichen Gerätes am Institut für Navigation und Satellitengeodäsie. Die technischen Daten der Totalstationen sind in Abschnitt 7.1 angeführt.

Zur Aufzeichnung der Materialtemperaturen des Glasmaßstabs und des Trägerbalkens des Feldkomparators wurden Platin Widerstandssensoren (Pt100) am Feldkomparator montiert, siehe Abschnitt 5.2. Die Aufzeichnung der Werte der Temperatursensoren am Feldkomparator erfolgte mit dem Datenlogger „e.reader“ der Firma Gantner Instruments (Technische Daten siehe Tabelle 8-3).

**Tabelle 8-3: Technische Daten Gantner e.reader**



Analoge Eingänge	8
Auflösung der A/D – Umsetzung	19 bit
Digitale Ein/Ausgänge	6
Abtastzeiten	1 Sekunde bis 24 Stunden
Datenspeicher	Flash: 128 Mbyte RAM 16 Mbyte
Schnittstellen	RS485: 3 RS232: 1 Ethernet: 1
Versorgungsspannung	10 bis 30 Volt Gleichspannung
Betriebstemperatur	-20°C bis +60°C
Seriennummer	640345

Zusätzlich wurde eine Thommen Meteostation HM 30 zur Aufzeichnung der Meteorologie verwendet, um eine grobe meteorologische Korrektur durchführen zu können. Diese zeichnete die Lufttemperatur, den Luftdruck und die relative Feuchte der Luft auf. Die Spezifikationen sind in Tabelle 8-4 aufgelistet.

**Tabelle 8-4: Technische Daten Thommen HM 30**



Speicherintervall	1 Sekunde bis 24 Stunden
SpeichergroÙe	Max. 908 Messungen
Schnittstelle	RS232
Stromversorgung	9 V Blockbatterie Netzgerät mit max. 12 V
Kalibrierter Temperaturbereich	-20°C bis +60°C
Seriennummer	799436

## 8.4 Messkonfiguration

Durch die gleichzeitige Messung der Referenzstrecke und die verbesserte Erfassung der Temperatur des Feldkomparators ergaben sich Änderungen gegenüber dem Messaufbau von Paulitsch (2010, Abschn. 9.1). Es mussten die zusätzlichen Temperatursensoren mit Stromversorgung und Datenerfassung aufgebaut werden, ebenso das Ziel für die Driftbestimmung und die Totalstation für die kontinuierliche Messung der Referenzstrecke.

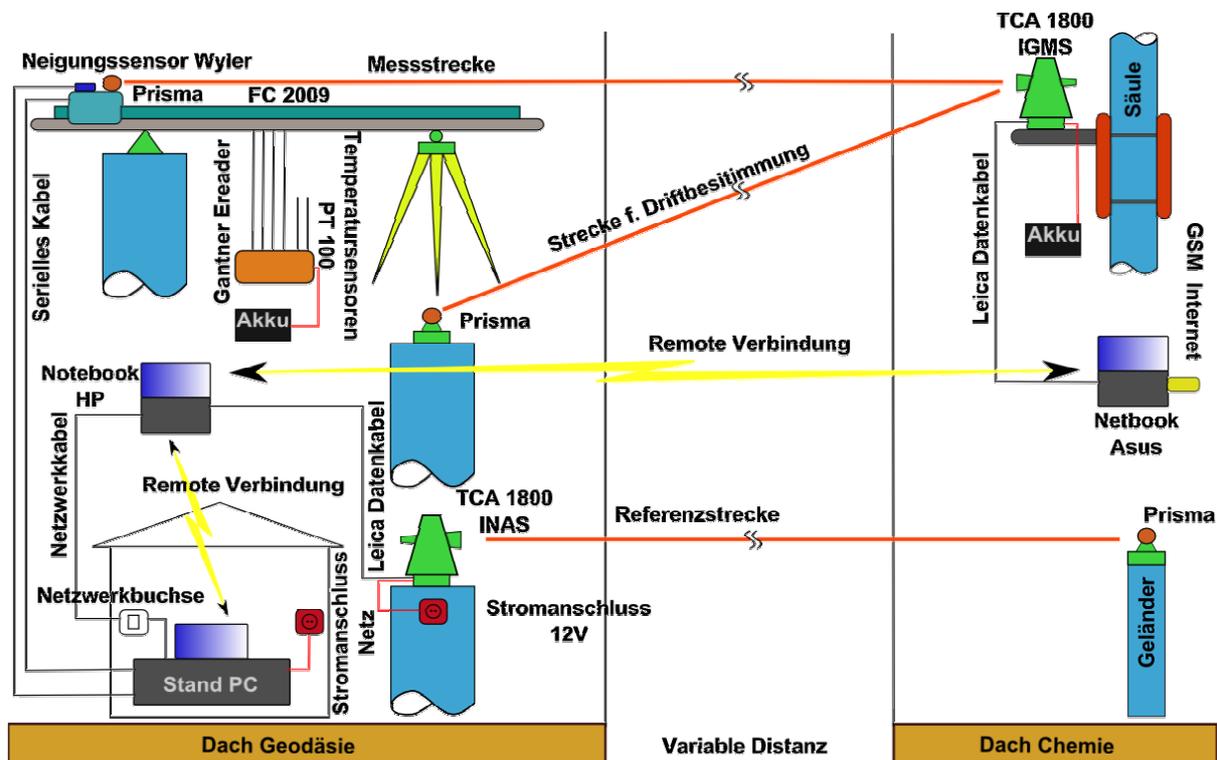


Abbildung 8-4: Systemskizze

Die einzelnen Komponenten sind in Abbildung 8-4 übersichtsmäßig dargestellt. Das System musste wetterfest aufgebaut werden, da der sicherheitsbedingte Abbau im Fall eines aufziehenden Gewitters einige Zeit in Anspruch nimmt. Aus diesem Grund wurden alle elektronischen Geräte mit Akkustrom betrieben, einzig der Standrechner wurde mit Netzstrom betrieben und unter Dach aufgestellt. Deshalb waren zwei 30 m lange serielle Kabel notwendig, um den Neigungssensor und den Feldkomparator mit dem Standrechner zu verbinden.

#### 8.4.1 Zeitsynchronisation

Um die mit verschiedenen PCs erfassten Messungen zeitlich in Bezug zueinander zu bringen, sind in allen Protokollfiles der Messungen Zeitstempel vorhanden. Um diese nutzen zu können, mussten die Uhren der aller Komponenten synchronisiert werden. Hierzu wurden beide Laptops zur Steuerung der Totalstationen und der Standrechner mit dem Programm „NMEA – Time“ mit dem Internet Zeitserver [time-a.nist.gov](http://time-a.nist.gov) synchronisiert. Dieser wurde gewählt, da er die stabilste Verbindung besaß. Das Programm war auf allen Rechnern im Hintergrund aktiv und erneuerte die Rechnerzeit jede Minute.

Der Datenlogger zur Aufzeichnung der Materialtemperatur des Feldkomparators wurde vor Beginn der Messungen manuell über die Software „test.commander“ mit der zuvor aktualisierten Rechnerzeit synchronisiert. Die Vergleiche der Uhrzeit nach den Messungen ergaben eine durchschnittliche Abweichung der Uhrzeit am „e.reader“ von ca. 0,3 Sekunden, was für die Aufgabe ausreichend war.

Die Uhrzeit des Thommen HM 30 wurde ebenfalls vor Beginn der Messung manuell abgeglichen, die Kontrollen nach den Messungen ergaben hier eine tolerierbare Abweichung von durchschnittlich 0,5 Sekunden.

#### **8.4.2 Ansteuerung der Totalstationen**

##### **Feldkomparatorstrecke FC 2009**

Die Messungen mit dem zu untersuchenden TCA 1800 erfolgten halbautomatisch. Die Totalstation wurde mit dem dafür adaptierten Satzmessprogramm CALMS (Lesjak, 2007) angesteuert. Die für diese Arbeit notwendigen Änderungen am Programm sind in Anhang C dokumentiert. Die Totalstation war über ein Datenkabel mit einem Laptop verbunden, der über eine UMTS Verbindung Anschluss an das Internet hatte. Über das Programm „Remotedesktop“ konnte der bis zu 200 m entfernte Laptop von einem weiteren Rechner aus über die Internetverbindung ferngesteuert werden und damit Messungen alleine ohne weiteres Hilfspersonal durchgeführt werden. Die Benutzereingaben während der Messung beschränkten sich auf das Auslösen der Messungen auf das Ziel am Komparator sowie das Starten der Messungen zur Bestimmung der Drift.

##### **Referenzstrecke**

Die Messung der Referenzstrecke wurde kontinuierlich während der gesamten Messzeit durchgeführt. Der zweite TCA 1800 („INAS“, siehe Tabelle 7-2) wurde ebenfalls mit dem Satzmessprogramm CALMS (Lesjak, 2007) gesteuert, jedoch wurde das Programm dafür separat modifiziert, siehe Anhang C. Während der Messungen war hier keine Benutzereingabe notwendig, das Programm lief im Hintergrund auf einem weiteren Laptop am Standort des Operators neben dem Feldkomparator. Dieser Laptop diente als Schaltzentrale für die übrigen Rechner und war über ein Netzkabel ans Internet angeschlossen.

### 8.4.3 Feldkomparator

#### Glasmaßstabsmessungen

Zum Auslesen der Messwerte des Heidenhain Glasmaßstabes wird eine eigene Schnittstelle benötigt. Diese PCI Karte ist in einem Stand PC eingebaut, der auf das Dach gebracht werden musste. Aus Sicherheitsgründen wurde der Standrechner unter Dach aufgestellt. Um nicht für jedes Auslösen einer Messung vom Komparator zum 30 m entfernten PC gehen zu müssen, wurde auch dieser über eine Internetverbindung mittels „Remotedesktop“ ferngesteuert.

#### Neigungsmessung

Die Aufzeichnung der Messwerte des am Messwagen des Komparators befestigten Wyler Neigungssensors zur Bestimmung des Durchhanges des Trägerbalkens (siehe Grurl, 2010, Kap. 8) erfolgte kontinuierlich. Die dafür benötigte Schnittstelle und die Software waren ebenfalls am Stand PC installiert. Diese Messung wurde nach den Aufbauarbeiten gestartet und erst nach der letzten Messung beendet.

### 8.4.4 Temperaturoaufzeichnung

Die Aufzeichnung der Messwerte der Temperatursensoren erfolgte mit dem A/D Wandler „e.reader“ der Firma Gantner Electronics (siehe Tabelle 8-3). Zusätzlich zu den vier fest am Feldkomparator montierten Pt100 Sensoren wurden noch zwei weitere Pt100 Sensoren angeschlossen. Der erste wurde mit Materialkontakt im inneren des Aluträgers des Feldkomparators befestigt. Der zweite wurde ohne Strahlungsschutz oberhalb des Dachgeländers angebracht, um Zeitpunkte direkter Sonneneinstrahlung bei wechselnden Witterungsbedingungen erkennen zu können (siehe Abbildung 8-5).



Abbildung 8-5: Befestigung des Temperatursensors (blau markiert) im Träger: (links) Sensor (blau markiert) am Geländer (rechts)

Die näherungsweise Umgebungstemperatur sowie der Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit wurden mit einer Thommen Meteostation HM 30 (siehe Tabelle 8-4) während der gesamten Messzeit alle 5 Minuten gespeichert. Der Temperaturfühler wurde unter einem Sonnenschirm aufgebaut, um direkte Einflüsse der Sonneneinstrahlung zu vermeiden (siehe Abbildung 8-8).

## 8.5 Aufbau

Vor dem Aufbau des Feldkomparators wurde die Totalstation auf dem Messpfeiler bzw. dem Säulenstativ aufgebaut (siehe Abbildung 8-1 und Abbildung 8-6). Danach wurde der Feldkomparator auf dem Messpfeiler und einem schweren Industriestativ (siehe Abbildung 8-8) aufgestellt. Der Feldkomparator wurde mit einer Setzlibelle, die in der Mitte des Feldkomparators aufgelegt wurde, horizontiert. Danach wurde er in die Vertikalebene der Visur ausgerichtet. Dazu wurde der Messwagen über die Zentrierung am Messpfeiler (Drehpunkt des Feldkomparators) verschoben und das Prisma in dieser Position mit dem TCA 1800 anvisiert. Dann wurde der Messwagen über die Zentrierung am Industriestativ bewegt und der Komparator mit dem Stativ so lange quer verschoben, bis die Prismenmitte mit der Richtung der vorherigen Anzielung zusammenfiel. Durch nochmaliges Verschieben des Messwagens über den Pfeiler und das Stativ wurde die Ausrichtung kontrolliert. Für diese anfänglichen Arbeiten war eine zweite Person notwendig.



Abbildung 8-6: Totalstation (rot) und Prisma Referenzstrecke (blau) auf Chemiegebäude montiert

Um nicht unnötig oft von einem Dach zum anderen laufen zu müssen, wurde hier auch der CALMS - Lernsatz für die Messungen zum Komparator und zur Driftbestimmung abgespeichert. Die Remotedesktopverbindung am Laptop wurde gestartet und der Laptop und die Akkus wetterfest verstaut. Das Prisma zur Messung der Referenzstrecke wurde montiert und bei den Messungen auf dem Chemiegebäude rund um die Geräte abgesperrt, um Störungen des Messbetriebs zu verhindern. In Abbildung 8-6 ist die mit Säulenstativ montierte Totalstation und das Ziel zur Messung der Referenzstrecke abgebildet. Das Prisma wurde bei diesen Messungen auf einem Item Profil, welches mit zwei Spanngurten an einer Säule befestigt war, montiert (siehe Abbildung 8-7).



**Abbildung 8-7: Prisma für Referenzstrecke mit Item Profil und Spanngurten montiert**

Dann wurde auf den Beobachterplatz am Dach des Geodäsiegebäudes gewechselt. Die Temperatursensoren wurden an den „e.reader“ angeschlossen und die Temperaturlaufzeichnung gestartet. Die zweite Totalstation wurde aufgebaut, an den Laptop angeschlossen und die Messung der Referenzstrecke gestartet. Anschließend wurden der Feldkomparator und der Neigungssensor an den Standrechner angeschlossen. Sämtliche Steckerverbindungen, Akkus und elektronischen Geräte wurden wetterfest in Plastikboxen verstaut. Um den Komparator vor ungleichmäßiger Erwärmung durch Sonneneinstrahlung zu schützen, wurden drei Sonnenschirme aufgebaut.

Die Aufbauarbeiten nahmen trotz zunehmender Übung jedes mal an die 3 Stunden in Anspruch.



**Abbildung 8-8: Aufgebauter Feldkomparator**

In Abbildung 8-8 ist der vollständig aufgebaute und angeschlossene Feldkomparator zu sehen. Rechts im Bild ist der Schirm zum Schutz der Thommen HM 30 Meteostation zu sehen. Der Messwagen mit dem Prisma am Komparator ist während der Driftmessungen abgedeckt, um Reflexionen am nahen Prisma zu vermeiden. Während der Messungen zum Feldkomparator wurde die Abdeckung über dem Prisma zur Bestimmung der Drift angebracht, welches rechts im Bild auf dem Pfeiler zu sehen ist.

## 8.6 Ablauf der Messungen

Die Messung der Referenzstrecke wurde ca. eine halbe Stunde vor Beginn der restlichen Arbeiten gestartet und erfolgte ohne weiteren Benutzereingriff. Die Temperaturerfassung am Komparator (jede 10 Sekunden) und die Aufzeichnung der Lufttemperatur (jede 5 Minuten) wurden ebenfalls automatisch ausgeführt. Die Neigungsmessung (jede 10 Sekunden) wurde kurz vor Beginn der EDM Messungen gestartet und gleichfalls automatisiert durchgeführt.

Vor der Messung auf das am Komparator montierte Prisma wurde die Strecke zur Bestimmung der Drift gemessen. Es wurden 102 Messungen durchgeführt, wobei Messung Nummer 51 und Nummer 102 in zweiter Kreislage erfolgten, um die Stabilität des Instrumentenstandpunktes anhand der Kompensatoraufzeichnungen beurteilen zu können. Anschließend erfolgte die Messung der 21 Positionen am Feldkomparator. Der Messwagen wurde händisch an die jeweilige Position verschoben und mittels Klemmschraube fixiert. Es wurden wie bei den Untersuchungen zur meteorologischen Korrektur (Abschnitt 7.2) pro Prismenposition 10 Wiederholungsmessungen mit dem TCA 1800 ausgeführt. Der Start der 10 Messungen musste nach Positionierung des Messwagens manuell am PC ausgelöst werden. Während der EDM Messungen wurden auch die Messungen der Wagenposition mit dem Glasmaßstab durchgeführt. Hier musste jede einzelne Messung durch Mausklick initiiert werden. Es wurden 20 Wiederholungen durchgeführt, diese Anzahl ergab sich aus der zur Verfügung stehenden Zeit während der EDM Messung. Nach Abschluss der EDM Messungen wurde der Messwagen auf die nächste Position gebracht und die beschriebenen Schritte wiederholt. Um etwaige Drifteffekte aufdecken zu können wurden die Positionen am Feldkomparator nicht der Reihe nach angefahren, sondern die Pfannen mit ungeraden Nummern wurden im „Hinweg“ gemessen, die mit geraden Nummern im „Rückweg“. Nach dem Abschluss der Messungen zum Komparator wurden nochmals die Messungen zur Driftbestimmung wie oben beschrieben durchgeführt.

Dieser Ablauf wurde für alle drei zu untersuchenden Prismen durchgeführt. Die Messzeit für ein Prisma betrug mit den Driftmessungen etwas über eine Stunde, was im Vergleich zu den Messungen von Paulitsch (2010, S. 90) einer Zeitersparnis von einer knappen halben Stunde entspricht. Es wurden an 10 verschiedenen Distanzbereichen insgesamt 35 Messreihen beobachtet, da auch einige Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden.

Diese fünf Wiederholungsmessungen ergaben sich aus praktischen Gründen. Da besonders an den ersten Messtagen der Umgang mit dem Messsystem noch erlernt werden musste, konnten aus Zeitgründen teilweise nicht alle drei Prismen am selben Tag gemessen werden. Da der Komparator am nächsten Messtag wieder an derselben Position aufgebaut werden musste und die Messung selbst im Vergleich zum Aufbau wenig Zeit beansprucht, wurde auch das schon untersuchte Prisma

noch einmal gemessen. Die Messungen von NTO nach Pfeiler 3 wurden zudem mit allen Prismen wiederholt.

Eine Übersicht der durchgeführten Messungen ist in Anhang A angeführt. Die Protokolle zur Witterung während der Messungen sind in Anhang B angeführt.

### **Probleme während der Messungen**

Bei den Messungen, die vom Dach des Chemiegebäudes aus durchgeführt wurden traten am 4. 4. 2012 Probleme bei der Messung der Distanzen auf (CALMS Fehlermeldung: „Fehlercode 1284: Fehler beim Auslesen der Distanz“). Es stellte sich heraus, dass die Distanzmessung wegen instabilem Instrumentenstandpunkt nicht möglich war.

Die Instabilität wurde durch Schwingungen der Säulen verursacht, die auch visuell durch das vibrierende Fernrohr der auf der Säule montierten Totalstation erkennbar waren. Der Grund dafür waren die Schwingungen der Motoren der Lüftungsanlage des Chemiegebäudes, die in den Räumen des Dachgeschoßes, ca. 10 m von den Säulen entfernt, untergebracht sind (siehe Abbildung 8-9, rechts). Diese Schwingungen übertragen sich auf die Säulen auf der Dachterrasse und waren auch bei Berührung mit der Hand spürbar.



**Abbildung 8-9: TCA 1800 auf Säule 4 (links), Lüftungsmotoren im Raum dahinter (rechts)**

Ein Abschalten der Lüftungsanlage für die Dauer der Messungen war nicht möglich, da die Arbeitsplätze in den Chemielabors permanent entlüftet werden müssen.

Bei Testmessungen die an einem Samstag durchgeführt wurden, stellte sich heraus dass die Gebäudeschwingungen nicht so stark waren wie während der Arbeitszeit und auch die EDM Messungen wieder möglich waren. Es wurde daher beschlossen,

die fehlenden Messungen unter diversen vorgeschriebenen Sicherheitsauflagen an Wochenenden durchzuführen. Eine zunächst geplante messtechnische Untersuchung der Gebäudeschwingungen wurde wegen der kaum möglichen Vorhersehbarkeit des Auftretens der Schwingungen (ca. 40 Turbinen die jeweils einzeln ein- und ausgeschaltet werden können) nicht durchgeführt.

Leider konnte im Hinblick auf die eingeschränkte Verfügbarkeit der zweiten Totalstation und die steigenden Temperaturen im Frühjahr nicht immer auf ideale Wetterverhältnisse gewartet werden, weswegen teilweise auch an windigen und wechselhaften Tagen Messungen durchgeführt werden mussten

## 8.7 Auswertung

Die Auswertung der Messungen erfolgte zur Gänze mit dem Softwarepaket MATLAB 7.1. Alle Messwerte wurden über den Zeitstempel der EDM Messungen des zu prüfenden TCA 1800, zueinander in Beziehung gesetzt.

### 8.7.1 Glasmaßstabsmessungen

Mit Hilfe der mit den Pt100 Temperatursensoren aufgezeichneten Materialtemperaturen wurde die Korrektur aufgrund der temperaturbedingten Ausdehnung des Glasmaßstabes angebracht. Der Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha_{hh}$  der Maßverkörperung des LS 688 C beträgt laut Heidenhain (2012) ca.  $(8 \pm 1) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

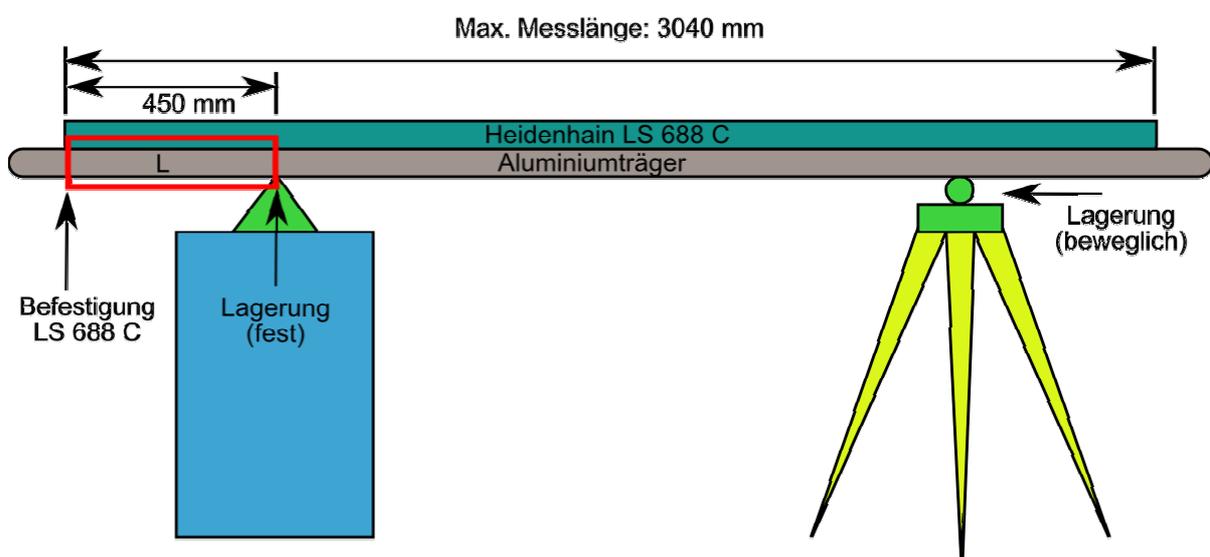


Abbildung 8-10: Befestigung Glasmaßstab

Der Glasmaßstab ist auf dem Aluminiumträger nur einseitig befestigt um eine temperaturbedingte Längenänderung nicht zu behindern, siehe Abbildung 8-10. Die Befestigung des Glasmaßstabes befindet sich ca. 0,45 m hinter dem festen Lagerpunkt des Trägers. Bei einer Ausdehnung des Trägerbalkens wird der Glasmaßstab um den Betrag der Längenänderung des in Abbildung 8-10 rot hervorgehobenen Teilstückes des Aluminiumträgers verschoben (siehe auch Anhang D). Aus diesem Grund muss die Ausdehnung dieses Teilstückes als Korrektur berücksichtigt werden. Der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_{alu}$  für Aluminium beträgt ca.  $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Fischer et al., 2008, S: 116). Die korrigierte Strecke  $D_{korr}$  ergibt sich als

$$D_{korr} = D_{gem} \cdot (1 + \Delta_t \cdot \alpha_{hh}) - L \cdot \Delta_t \cdot \alpha_{alu} \quad (8-1)$$

mit  $D_{gem}$  als rohem Messwert,  $\Delta t$  als Differenz zwischen gemessener Temperatur und der Bezugstemperatur von  $20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{hh}$  als Ausdehnungskoeffizient des Glasmaßstabes,  $L$  als Abstand des Nullpunktes des Glasmaßstabes von der Befestigung des Trägerbalkens (siehe Abbildung 8-10) und  $\alpha_{alu}$  als Ausdehnungskoeffizient des Trägerbalkens.

Die korrigierten Glasmaßstabmessungen wurden schließlich auf die erste Pfannenposition reduziert, siehe Formel (8-2).

$$D_{red_i} = D_{korr_1} - D_{korr_i} \quad (8-2)$$

mit  $D_{red_i}$  als auf die erste Position reduzierte Messwerte,  $D_{korr_1}$  als Messwert an der ersten Wagenposition und  $D_{korr_i}$  als Messwerte an den Positionen eins bis 21.

### 8.7.2 EDM Messungen Referenzstrecke

Die Messwerte der kontinuierlich gemessenen Referenzstrecke wurden über den Zeitstempel der EDM Messungen zum Komparator auf die jeweilige Position des Messwagens bezogen. Die Messwerte innerhalb des Zeitraumes einer Messung zum Komparator wurden gemittelt. Anschließend wurden die Werte um den ersten Messwert reduziert, um die meteorologische Korrektur nach Formel (6-5) zu erhalten. In Abbildung 8-11 ist die Zeitreihe der meteorologischen Korrektur einer Messung vom 12.04.2012 dargestellt.

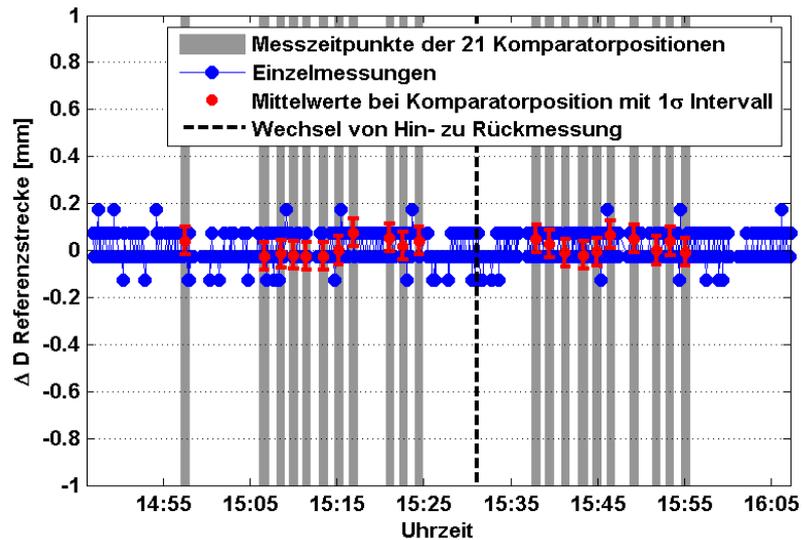


Abbildung 8-11: Meteorologische Korrektur einer ca. 100 m Strecke

### 8.7.3 EDM Messungen Komparatorstrecke

Die Messungen der zu untersuchenden Totalstation wurden nach Formel ((6-1) um die zu Beginn der Messung herrschenden atmosphärischen Bedingungen korrigiert. Dann wurde die aus den Referenzstrecken berechnete meteorologische Korrektur nach Formel (6-6) angebracht. Aus den Messungen zur Driftbestimmung wurde eine lineare Korrekturfunktion berechnet, die Drift betrug -1 bis +2 ppm pro Stunde. In Abbildung 8-12 sind die Ergebnisse der Driftbestimmung der zuvor erwähnten Messungen dargestellt.

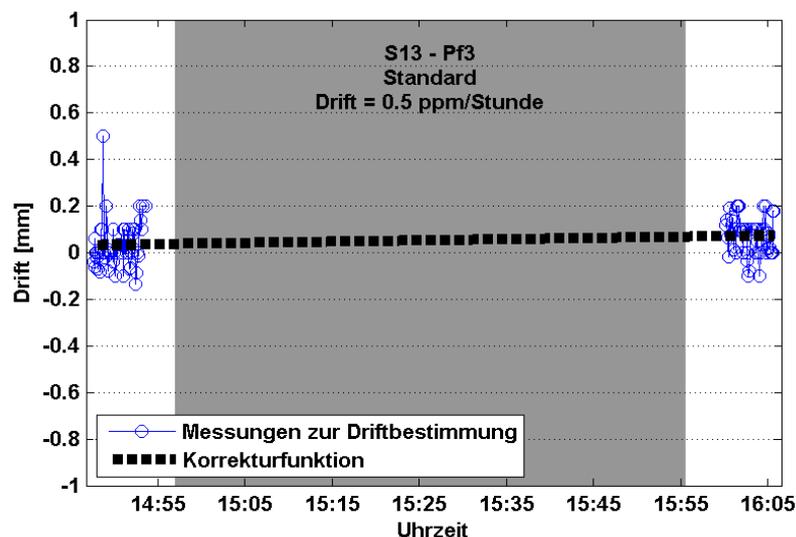


Abbildung 8-12: Messungen Drift und berechnete Korrekturfunktion, die Messungen zum Komparator wurden im grau hinterlegten Bereich durchgeführt

Die meteorologisch korrigierten Distanzen zum Feldkomparator wurden mit der Korrekturfunktion um die instrumentelle Drift bereinigt.

Als nächstes wurden die Strecken in Horizontalabständen umgerechnet und die Korrektur aufgrund der Exzentrizität und Verkippung des Prismas angebracht. Diese ist notwendig, da wegen des Durchhangs des Trägers des Feldkomparators die Position des Prismas am Messwagen nicht mit der Ablesung des Glasmaßstabs zusammenfällt, siehe Paulitsch (2010, S. 50 - 51). Die Korrektur wurde nach folgender Formel (Paulitsch, 2010, S. 51) durchgeführt

$$D_K = d \cdot \sin(\beta) \qquad (8-3)$$

mit  $D_K$  als Korrekturwert für die EDM Distanz,  $d$  als Abstand des Prismenmittelpunktes zum Glasmaßstab,  $\beta$  als gemessener Neigung des Messwagens an der jeweiligen Position.

Zuletzt wurden die Wiederholungsmessungen gemittelt und auf die erste gemessene Distanz reduziert. Die Differenz aus den korrigierten Glasmaßstabsmessungen und den bereinigten EDM Messungen nach Formel (4-1) ergibt die Abweichungen, die dann auf einen zyklischen Fehler hin untersucht werden können. Für die graphische Darstellung wurden die Abweichungen noch um den Mittelwert reduziert.

## 9 Ergebnisse der Feldkomparatormessungen

Die Messungen mit den drei verschiedenen Prismen ergaben inklusive der fünf Wiederholungsmessungen insgesamt 35 Datensätze. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden hier nur einige ausgewählte Messreihen genauer behandelt. Die weiteren Messergebnisse sind in Anhang A angeführt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Abweichungen zwischen Feldkomparator und EDM auf zyklische Anteile untersucht und Ergebnisse von einzelnen Messreihen bei verschiedenen Entfernungen gezeigt und diskutiert. Weiters werden die Folgeuntersuchungen zu auffälligen Abweichungen in den Messungen behandelt.

### 9.1 Analyse der Abweichungen

Eine erste visuelle Analyse der Abweichungen zwischen EDM und Feldkomparatormessungen zeigt, dass nur bei kurzen Distanzen eindeutig erkennbares zyklisches Verhalten vorliegt (siehe Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-7). Die größten erkennbaren zyklischen Effekte haben Amplituden von ca. 0,2 mm (Abbildung 9-1), bei einer Wellenlänge von ca. 3 m, welche dem Feinmaßstab des TCA 1800 entspricht. In den Abweichungen können jedoch nicht nur zyklische Anteile mit der Periode des Feinmaßstabs ( $U = 3 \text{ m}$ ) auftreten, sondern auch zyklische Fehler höherer Ordnung. Das sind überlagerte Schwingungen mit Vielfachen und Bruchteilen dieser Periode (Rüeger, 1996, S. 175). Aus Messungen am Horizontalkomparator im Messlabor des IGMS ist bekannt, dass im Amplitudenspektrum der Abweichungen bis 65 m, zusätzlich zur Hauptschwingung mit ca. 0,33 Hz (entspricht einer Wellenlänge von ca. 3 m), auch kleinere Maxima bei 0,66 Hz und 1,33 Hz (entsprechend Wellenlängen von ca. 1,5 m und 0,75 m) vorhanden sind (siehe später Abbildung 11-1). Diese Wellenlängen entsprechen  $U/2$  und  $U/4$ , was auf zyklische Fehler höherer Ordnung schließen lässt.

Um die visuell schwer erfassbaren zyklischen Anteile in den Abweichungen detektieren zu können wurden die Messreihen durch Sinusschwingungen modelliert. Es wurde versucht Schwingungen mit den aus Labormessungen bekannten Wellenlängen als wesentliche zyklische Einflüsse zu bestätigen, da diese auch mit den Angaben in der Literatur (z.B.: Rüeger, 1986) übereinstimmen.

Eine erste Modellierung durch nur eine Sinusschwingung mit einer konstanten Wellenlänge von 3 m brachte für die Messreihen bei Distanzen größer 90 m keine zufrieden stellende Näherung. Deshalb wurde das Modell um eine zweite Schwingung mit der aus den Labormessungen bekannten Wellenlänge von 0,75 m erweitert. Da auch dieses erweiterte Modell nicht für alle Messreihen ausreichend war, wurde eine weitere Modellierung mit Schwingungen mit den Wellenlängen  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m und  $\lambda_3 = 1,5$  m berechnet. Die Modelle wurden nach Formel (9-1)

$$y = \sum_j A_j \cdot \sin\left(D \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_j} + \varphi_j\right) \quad (9-1)$$

mit  $A_j$  als Amplitude,  $D$  als Distanz,  $\lambda_j$  als Wellenlänge und  $\varphi_j$  als Phasenverschiebung der Sinusschwingung, sowie  $j = 1$  bis 3, berechnet. Die Berechnung der Modelle erfolgte mit den Mittelwerten der jeweiligen 10 Messwerte pro Komparatorposition. Für die überlappenden Messreihen bei 127 m bis 133 m wurden andere Parameter verwendet, diese werden in Abschnitt 9.3 behandelt.

Zur Beurteilung der zyklischen Anteile wurden die Amplituden der ausgeglichenen Modellfunktionen mittels t-Test bei einem Signifikanzniveau von 99% auf Signifikanz überprüft (Niemeier 2008, S. 398). Es stellte sich heraus, dass die signifikanten Schwingungen der Modelle 1 und 2 jeweils auch im dritten Modell signifikant sind. Eine Ausnahme stellt die Messreihe 7 mit dem Miniprisma Goecke dar; hier sind die Schwingungen mit  $\lambda_1 = 3$  m und  $\lambda_2 = 0,75$  m erst im dritten Modell signifikant.

Um die Übersichtlichkeit zu wahren sind in Tabelle 9-1, Tabelle 9-2 und Tabelle 9-3 nur die Parameter und Ergebnisse der Signifikanztests von Modell 3 (drei Schwingungen mit  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m und  $\lambda_3 = 1,5$  m) dargestellt. In den Abbildungen der in Abschnitt 9.2 behandelten Messreihen und den weiteren Messreihen in Anhang A sind alle berechneten Modelle und ihre Parameter angegeben.

Die Abweichungen der Messreihen mit dem Miniprisma Goecke (Tabelle 9-1) zeigen signifikante zyklische Effekte bis zu einer Distanz von 82 m. Die signifikanten Schwingungen zeigen bei einer Distanz von 37 m Amplituden von bis zu 0,12 mm. Bei größeren Distanzen sind die signifikanten Amplituden geringer, sie erreichen bei 82 m nur mehr etwa 0,05 mm.

**Tabelle 9-1: Miniprisma Goecke, Parameter Modell 3  
und Ergebnisse der Signifikanztests**

Messreihe #	Distanz [m]	$\lambda$ [m]	Amplitude [mm]	Phase [deg]	signifikant
1	37	3,000	0,123	83,7	✓
		0,750	0,049	72,7	✓
		1,500	0,025	12,9	✓
4	51	3,000	0,061	50,3	✗
		0,750	0,054	84,0	✗
		1,500	0,040	80,2	✗
7	55	3,000	0,038	49,1	✓
		0,750	0,037	67,2	✓
		1,500	0,027	3,2	✗
10	82	3,000	0,055	84,5	✓
		0,750	0,027	48,1	✗
		1,500	0,020	46,0	✗
13	94	3,000	0,060	60,1	✗
		0,750	0,024	11,2	✗
		1,500	0,026	3,9	✗
17	104	3,000	0,006	17,6	✗
		0,750	0,034	33,0	✗
		1,500	0,010	21,4	✗
20 (*1)	153	3,000	0,040	48,5	✗
		0,750	0,060	83,8	✗
		1,500	0,031	30,3	✗
21 (*Wh)	153	3,000	0,041	46,0	✗
		0,750	0,036	33,3	✗
		1,500	0,007	87,3	✗
27	216	3,000	0,023	81,4	✗
		0,750	0,053	73,5	✗
		1,500	0,039	28,8	✗

(\*1) Messung unbrauchbar, (\*Wh) Wiederholungsmessung

Die Übersicht der Messungen mit dem Miniprisma Geodäsie Austria in Tabelle 9-2 zeigt zyklische Anteile in den Abweichungen bis zum größten gemessenen Distanzbereich bei 216 m. Die Abweichungen bei 37 m weisen von allen untersuchten Prismen die größten Amplituden von bis zu 0,23 mm auf. Hier sind auch bei einer Distanz von 51 m noch signifikante Schwingungen mit Amplituden größer 0,1 mm vorhanden. Die Amplituden der signifikanten Schwingungen nehmen zwar mit der Distanz ab, sind bei 216 m Entfernung mit ca. 0,06 mm jedoch wieder etwas größer. Die Messungen mit diesem Prisma weisen die meisten signifikanten zyklischen Anteile auf.

**Tabelle 9-2: Miniprisma Geodäsie Austria, Parameter Modell 3  
und Ergebnisse der Signifikanztests**

Messreihe #	Distanz [m]	$\lambda$ [m]	Amplitude [mm]	Phase [deg]	signifikant
2	37	3,000	0,231	71,5	✓
		0,750	0,048	2,5	✗
		1,500	0,032	72,5	✗
5	51	3,000	0,116	83,2	✓
		0,750	0,054	5,5	✗
		1,500	0,015	21,0	✗
8	55	3,000	0,084	7,4	✓
		0,750	0,036	89,3	✓
		1,500	0,046	43,8	✓
11	82	3,000	0,037	88,1	✓
		0,750	0,033	11,6	✓
		1,500	0,022	28,8	✗
14	94	3,000	0,033	75,4	✓
		0,750	0,036	66,7	✓
		1,500	0,044	6,3	✓
15 (*Wh)	94	3,000	0,007	80,6	✗
		0,750	0,041	38,6	✓
		1,500	0,030	39,8	✓
18	104	3,000	0,026	62,4	✗
		0,750	0,049	37,8	✗
		1,500	0,034	88,4	✗
22	153	3,000	0,035	81,2	✗
		0,750	0,034	14,8	✗
		1,500	0,018	18,8	✗
23 (*Wh)	153	3,000	0,020	79,8	✗
		0,750	0,052	83,4	✓
		1,500	0,034	62,8	✗
28	216	3,000	0,066	36,1	✓
		0,750	0,057	63,8	✓
		1,500	0,021	32,0	✓

(\*Wh) Wiederholungsmessung

Die signifikanten Schwingungen der Messreihen mit dem Leica Standardprisma (Tabelle 9-3) weisen die geringsten Amplituden der drei untersuchten Prismen auf. Es sind bei allen gemessenen Distanzbereichen signifikante zyklische Effekte vorhanden. Die maximale Amplitude der Schwingungen tritt bei der Distanz von 94 m auf, sie beträgt 0,11 mm.

**Tabelle 9-3: Leica Standardprisma, Parameter Modell 3  
und Ergebnisse der Signifikanztests**

Messreihe #	Distanz [m]	$\lambda$ [m]	Amplitude [mm]	Phase [deg]	signifikant
3	37	3,000	0,061	66,7	✓
		0,750	0,046	52,9	✓
		1,500	0,032	20,3	✗
6	51	3,000	0,023	67,9	✗
		0,750	0,059	48,9	✓
		1,500	0,035	75,4	✗
9	55	3,000	0,015	28,0	✗
		0,750	0,074	56,5	✗
		1,500	0,010	77,5	✗
12	82	3,000	0,054	68,7	✓
		0,750	0,021	28,6	✗
		1,500	0,026	66,7	✗
16	94	3,000	0,117	10,5	✓
		0,750	0,028	65,8	✗
		1,500	0,022	16,2	✗
19	104	3,000	0,012	19,9	✗
		0,750	0,045	80,5	✓
		1,500	0,017	20,5	✗
24	153	3,000	0,026	48,0	✗
		0,750	0,040	3,8	✗
		1,500	0,061	15,0	✓
25 (*Wh)	153	3,000	0,020	57,5	✗
		0,750	0,017	22,1	✗
		1,500	0,044	36,4	✓
26 (*Wh)	153	3,000	0,012	82,5	✗
		0,750	0,033	63,3	✗
		1,500	0,028	33,3	✗
29	216	3,000	0,058	69,4	✗
		0,750	0,091	20,4	✓
		1,500	0,045	50,3	✗

(\*Wh) Wiederholungsmessungen

Die zyklischen Effekte bei Distanzen größer 100 m weisen bei allen drei untersuchten Prismen sehr kleine Amplituden auf und können nur aufgrund der meteorologischen Korrektur mittels Messung einer Referenzstrecke (siehe Abschnitt 6.3) aufgedeckt werden. Der Einfluss der Atmosphäre bei der konventionellen meteorologischen Korrektur limitiert die Genauigkeit der Streckenmessung auf 1 ppm (Rüeger 1996: S. 56). Die hier aufgedeckten zyklischen Effekte, deren Amplituden bei Distanzen über 100 m alle kleiner 0,1 mm sind würden dadurch verwischt.

## 9.2 Ausgewählte Messreihen

In den folgenden Abbildungen der Messreihen sind die Einzelwerte der Abweichungen durch graue Kreise dargestellt. Ausreißer in den Einzelmessungen, die Werte kleiner als  $-0,5$  mm haben, werden durch einen roten Pfeil an der unteren Grenze der Grafik und die Angabe der Anzahl dieser Werte angezeigt. Oftmals liegen die Werte der Einzelmessungen dicht aneinander, was zu Schwierigkeiten in der Interpretation der Grafik führen kann, da diese Werte visuell kaum trennbar sind. Die Abbildungen sind in drei Teile gegliedert, wobei jeweils die Abweichungen mit dem berechneten Modell überlagert dargestellt werden. Rechts neben den Messreihen sind die geschätzten Amplituden und Phasen der für die Modelle verwendeten Schwingungen sowie die Ergebnisse des Signifikanztests angeführt. Im unteren Bereich der graphischen Darstellungen der Messreihen sind die Residuen abgebildet.

In Abbildung 9-1 ist die Messreihe des Miniprismas Geodäsie Austria bei 37 m Entfernung dargestellt. Die Abweichungen zeigen ein deutliches zyklisches Verhalten mit der Periode des Feinmaßstabs, was durch das Modell 1 (Abbildung 9-1a) und das Ergebnis des Signifikanztests bestätigt wird. In dieser Messreihe sind keine zyklischen Fehler höherer Ordnung nachweisbar.

In Abbildung 9-2 und Abbildung 9-3 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Miniprisma Geodäsie Austria bei der Distanz von 94 m und die der Wiederholungsmessung zu sehen. Die Einzelwerte der Wiederholungsmessung (Abbildung 9-3) weisen im Vergleich zu denen der ersten Messreihe (Abbildung 9-2) starke Streuungen auf. Dieser Unterschied ist möglicherweise durch die Messung bei verschiedenen Witterungsbedingungen bedingt. Durch die Modellierung können bei Messreihe 14 (Abbildung 9-2) signifikante Schwingungen mit allen drei Wellenlängen nachgewiesen werden. In den Daten der Wiederholungsmessung werden nur zwei Schwingungen mit Wellenlängen von 1,5 m und 0,75 m als signifikant erkannt.

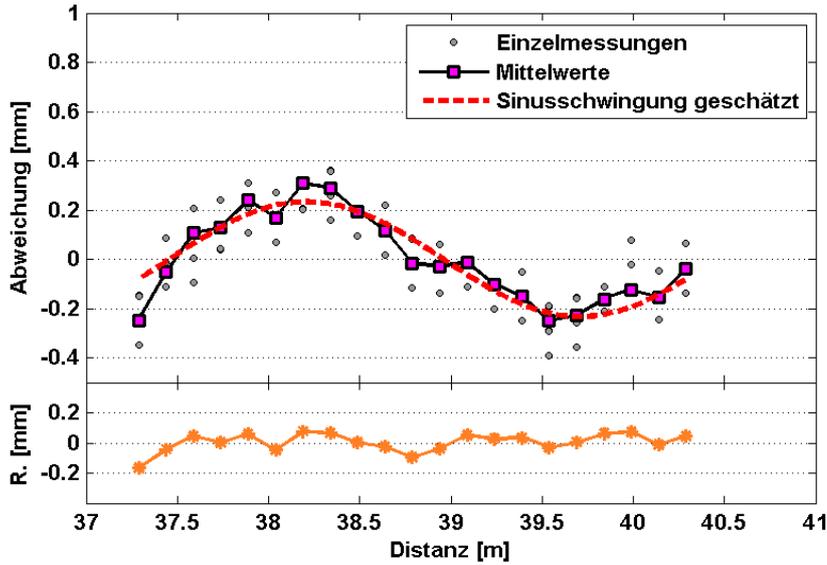
Abbildung 9-4 bis Abbildung 9-6 zeigt die Messreihen mit dem Leica Standardprisma bei 153 m Distanz. Es wurden drei Messungen an verschiedenen Tagen durchgeführt (siehe Tabelle A-1). Die Ergebnisse der Modellierung der ersten beiden Messreihen (Abbildung 9-4 und Abbildung 9-5) zeigen einen zyklischen Anteil mit der Wellenlänge von 1,5 m in den Abweichungen. Die zweite

Wiederholungsmessung (Abbildung 9-6) zeigt keine zyklischen Effekte mit den vermuteten Wellenlängen. Gegen Ende der Messreihe ist ein sägezahnartiger Verlauf zu erkennen der bei den ersten beiden Messungen nicht auftritt. Zur Diskussion dieses Verhaltens siehe den Text zu Abbildung A-17.

Die in Abbildung 9-7 dargestellten Messreihe 28 zeigt die Abweichungen des Miniprismas Geodäsie Austria bei der längsten gemessenen Distanz von 216 m. Es sind signifikante zyklische Effekte mit Wellenlängen von 3 m, 0,75 m und 1,5 m vorhanden, die ohne die Modellierung kaum zu detektieren gewesen wären. Die Amplituden der Schwingungen erreichen bis zu ca. 0,06 mm.

Die in den Grafiken durch rote Pfeile angedeuteten Ausreißer in den Einzelmessungen traten bei mehreren Messreihen auf. Die Ursachen dieser unerwartet großen Streuungen werden in Abschnitt 9.4 behandelt.

(a)

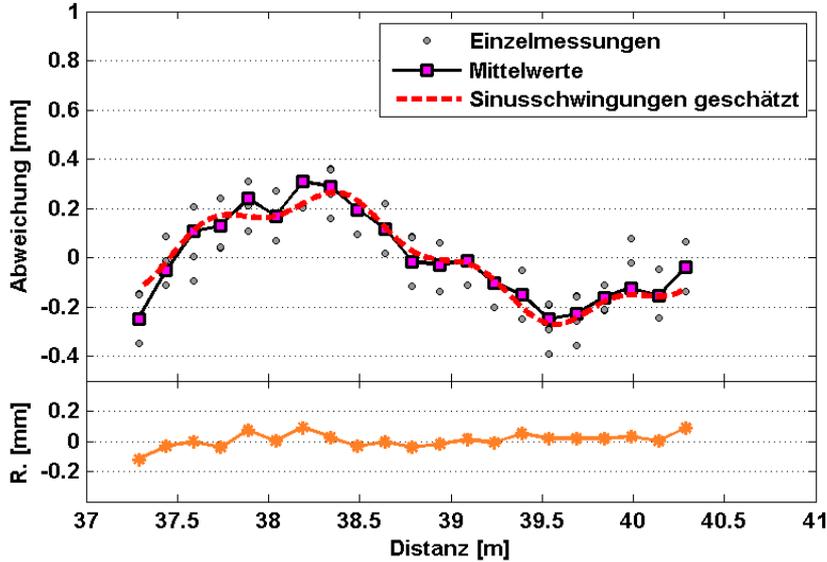


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,233	69,8	✓

(b)

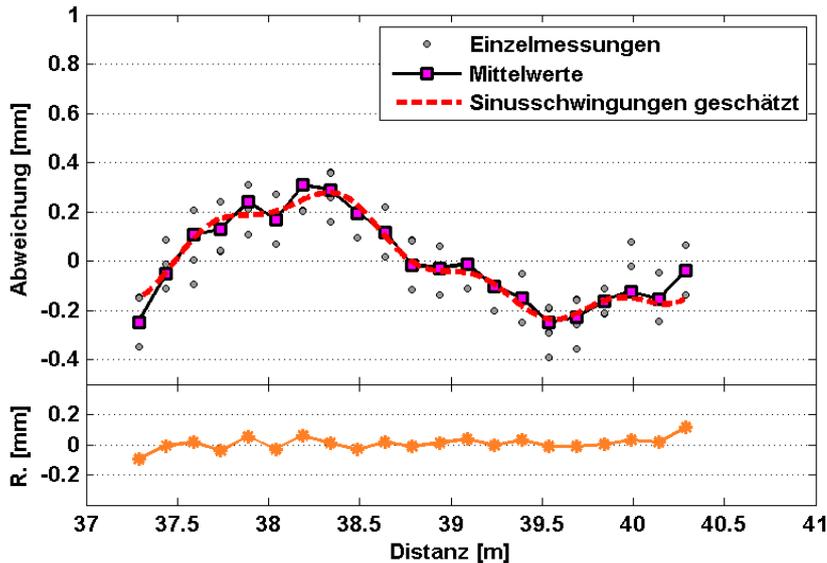


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,232	70,9	✓
0,750	0,050	2,4	✗

(c)



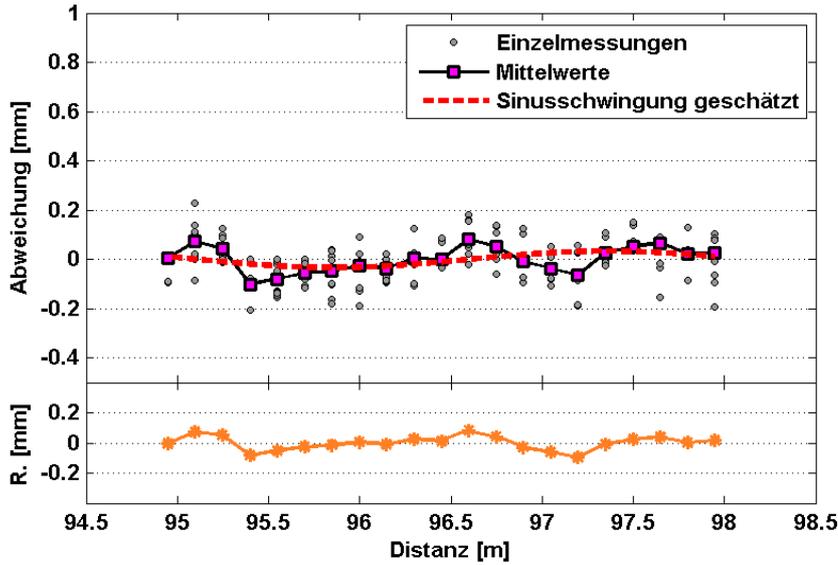
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,231	71,5	✓
0,750	0,048	2,5	✗
1,500	0,032	72,5	✗

Abbildung 9-1: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 37 m (MR #2)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

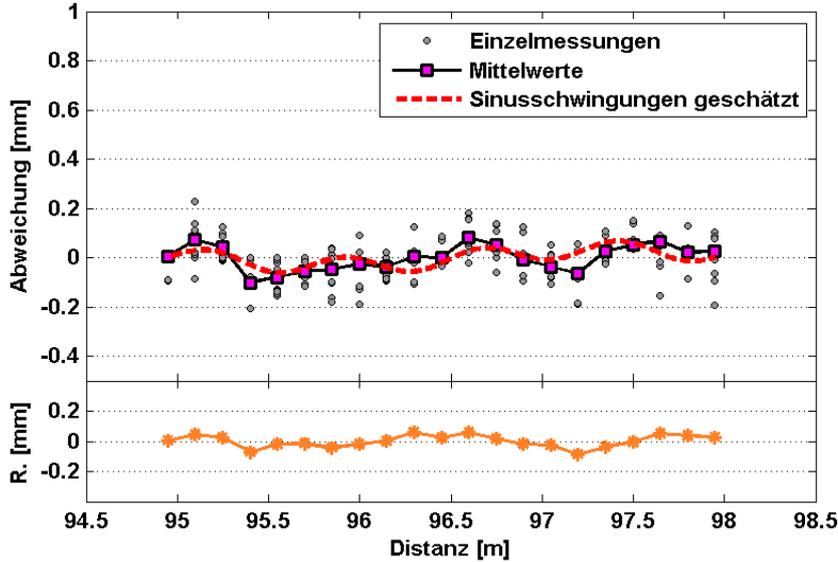


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,033	70,9	✗

(b)

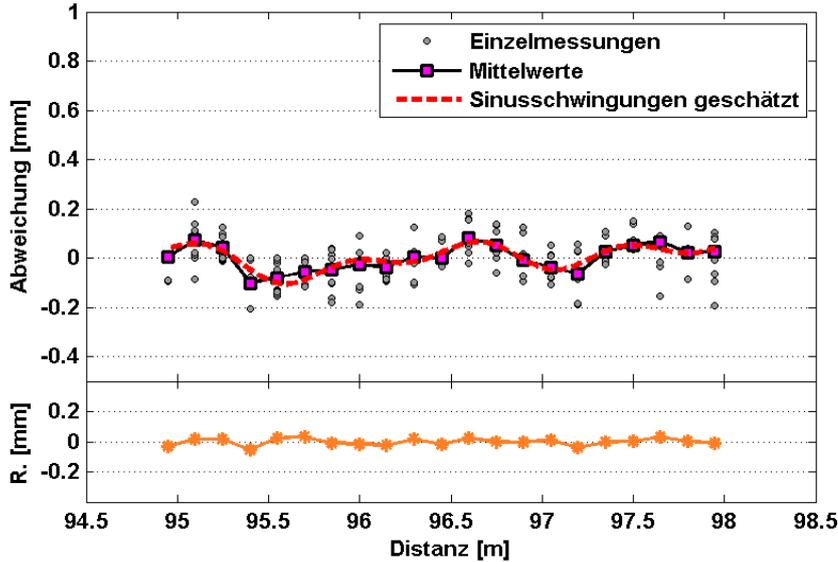


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,034	69,4	✗
0,750	0,035	72,2	✓

(c)



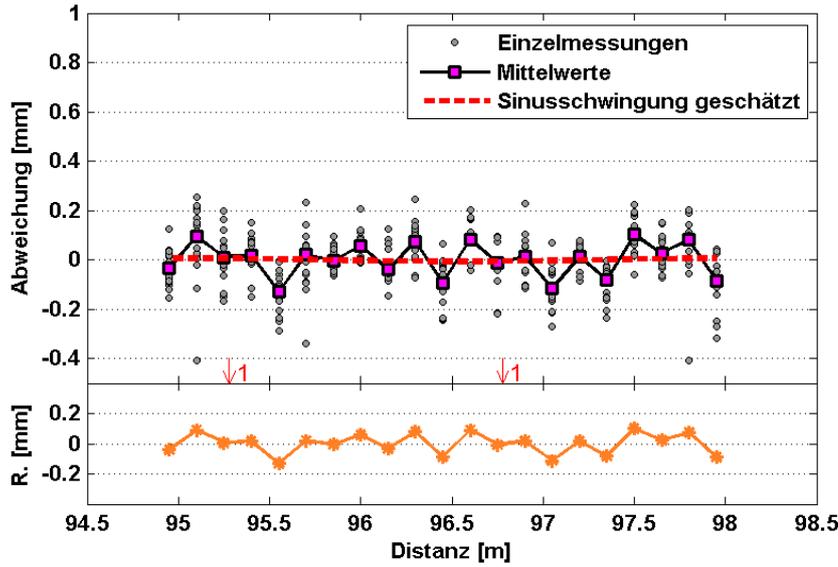
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,033	75,4	✓
0,750	0,036	66,7	✓
1,500	0,044	6,3	✓

Abbildung 9-2: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 94 m (MR #14)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

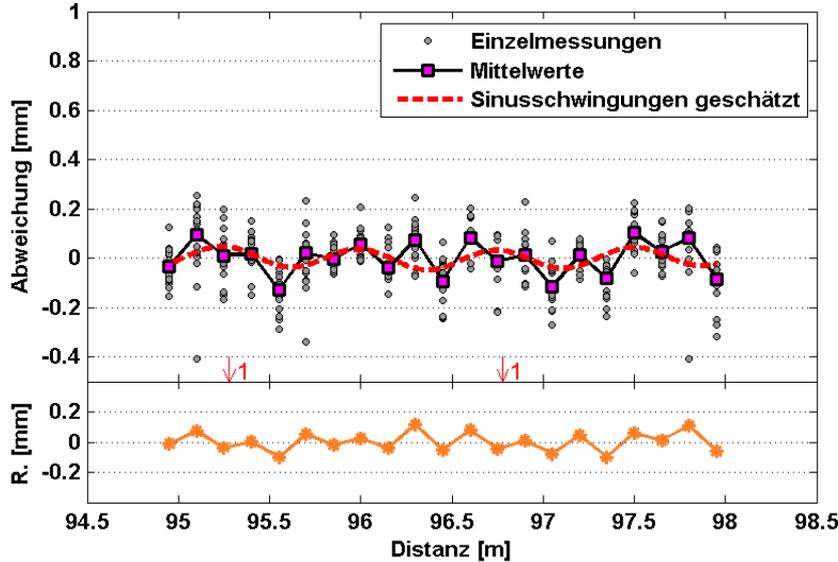


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,006	79,5	✗

(b)

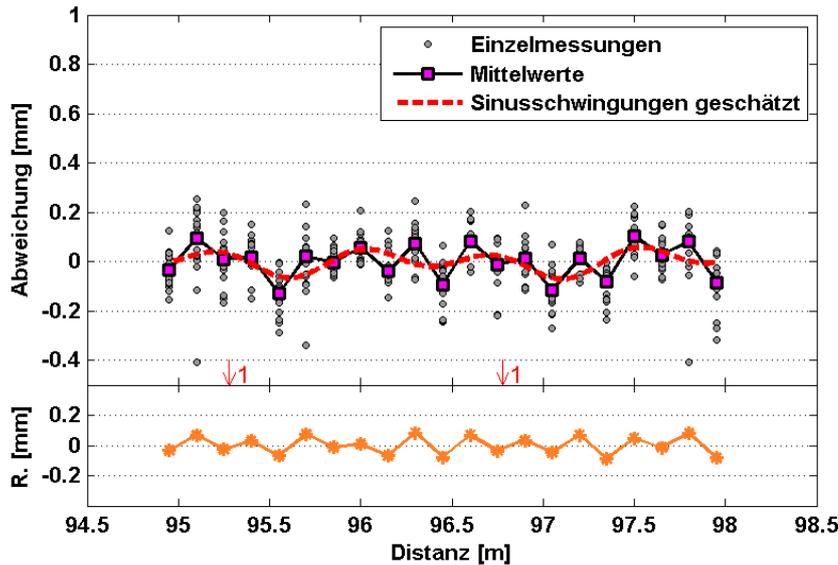


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,009	82,6	✗
0,750	0,039	40,3	✓

(c)



Modell 3

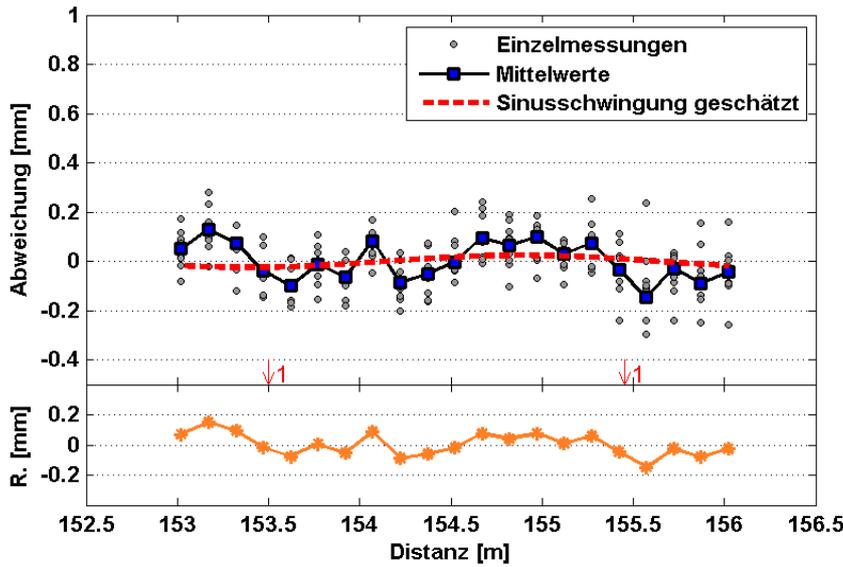
Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,007	80,6	✗
0,750	0,041	38,6	✓
1,500	0,030	39,8	✓

Abbildung 9-3: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 94 m (Wiederholung, MR #15)  
Abweichungen, Modelle und Residuen

(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

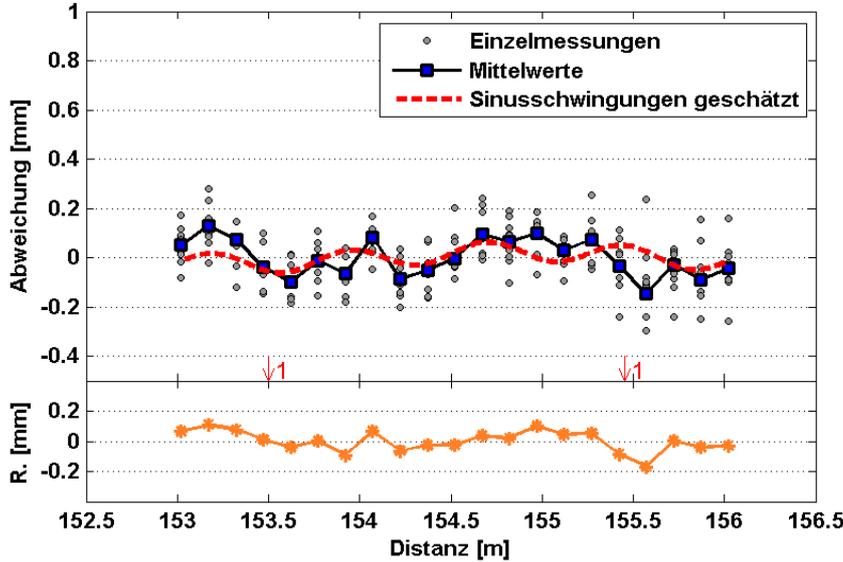


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,024	45,4	✗

(b)

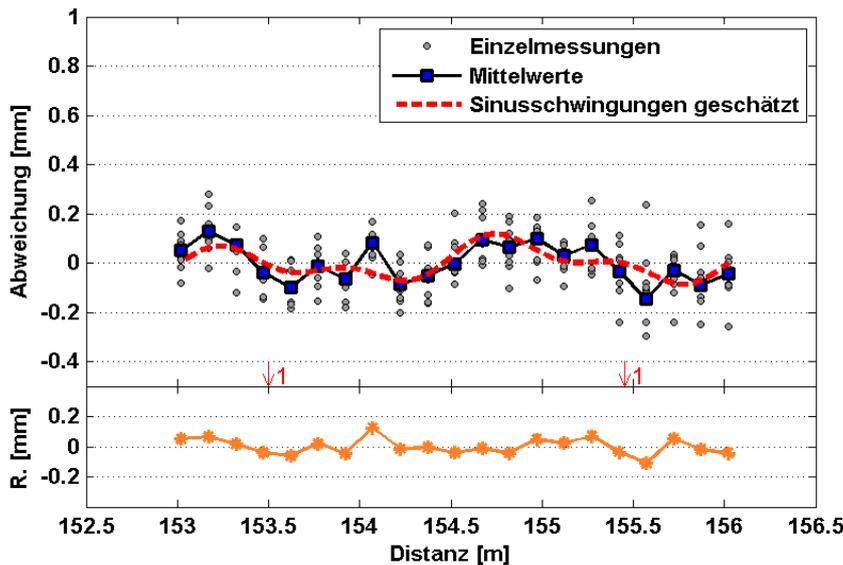


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,025	46,0	✗
0,750	0,040	5,7	✗

(c)



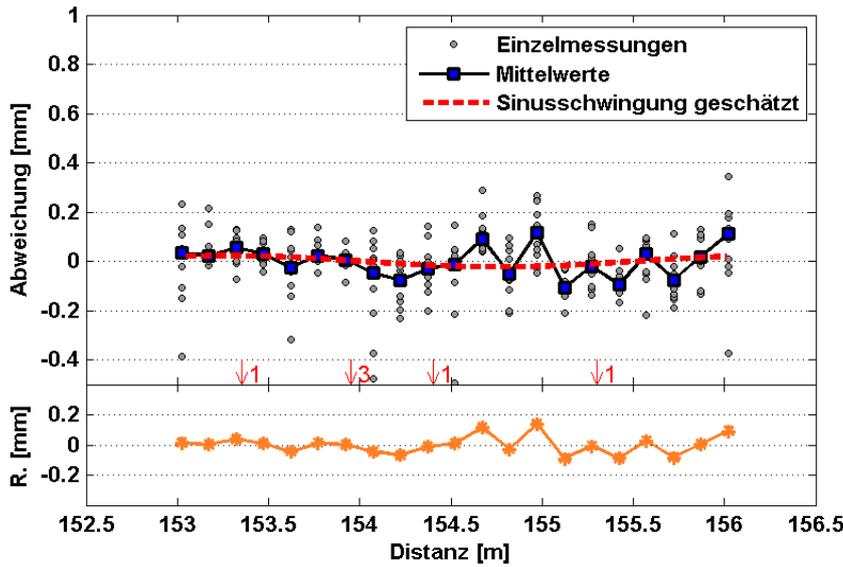
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,026	48,0	✗
0,750	0,040	3,8	✗
1,500	0,061	15,0	✓

Abbildung 9-4: Leica Standardprisma, Distanz 153 m (MR #24)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

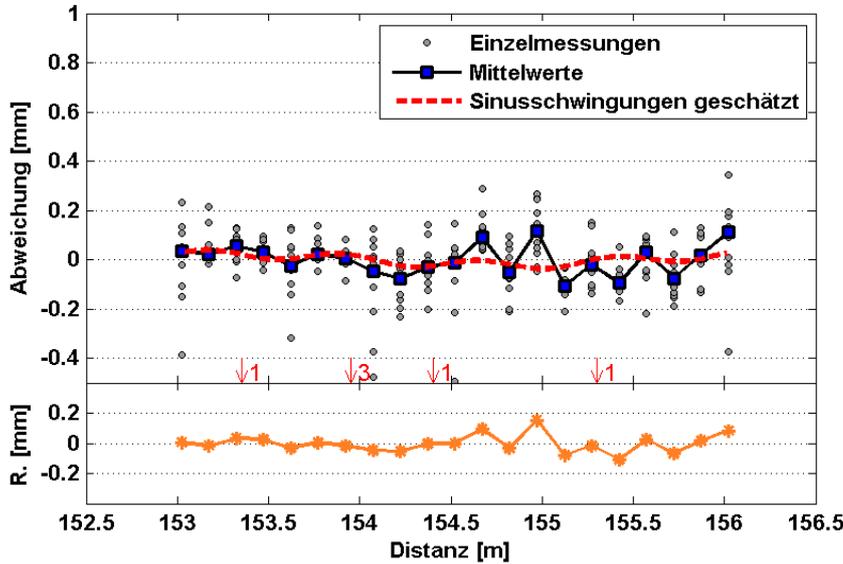


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,023	61,5	✗

(b)

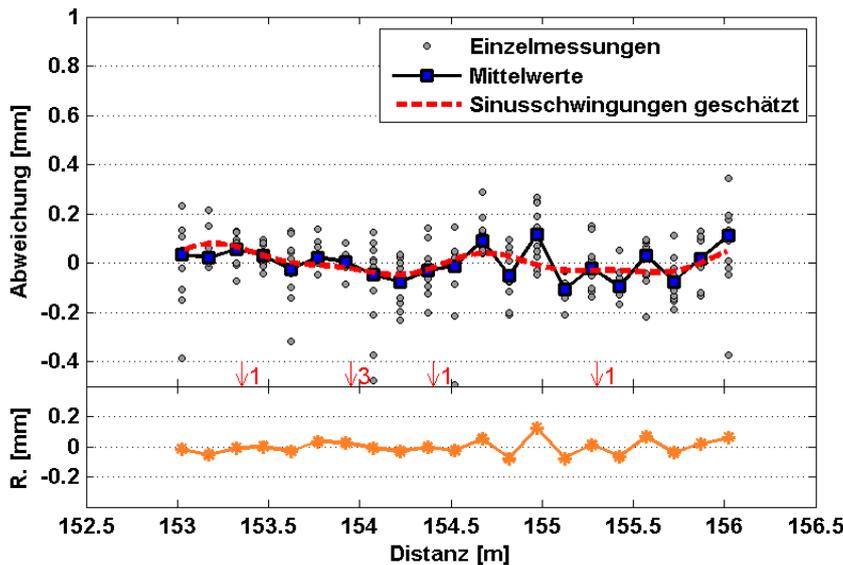


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,022	60,5	✗
0,750	0,018	28,5	✗

(c)



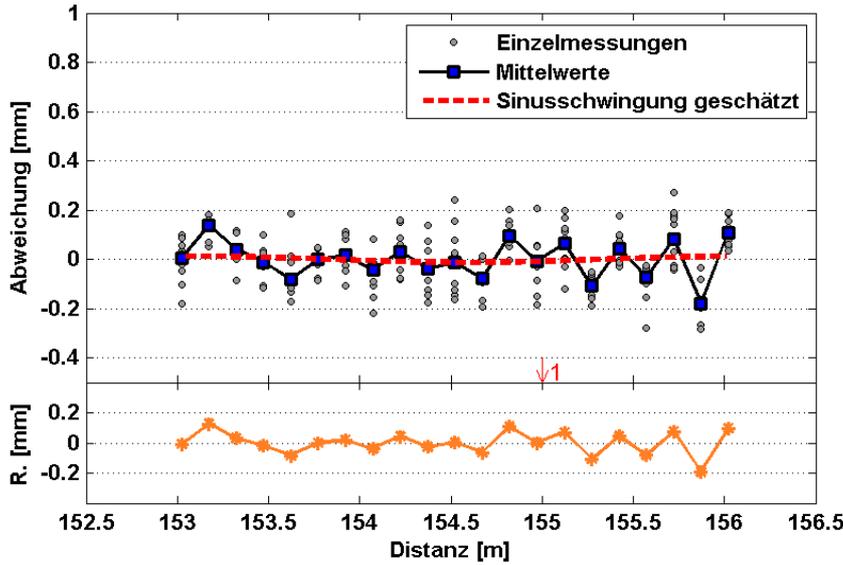
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,020	57,5	✗
0,750	0,017	22,1	✗
1,500	0,044	36,4	✓

Abbildung 9-5: Leica Standardprisma, Distanz 153 m (Wiederholung 1, MR #25)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

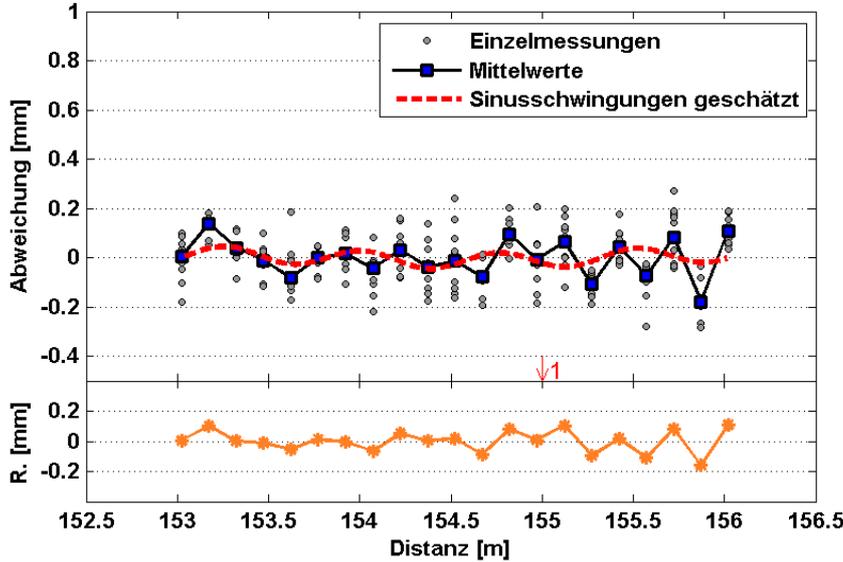


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,012	82,6	✗

(b)

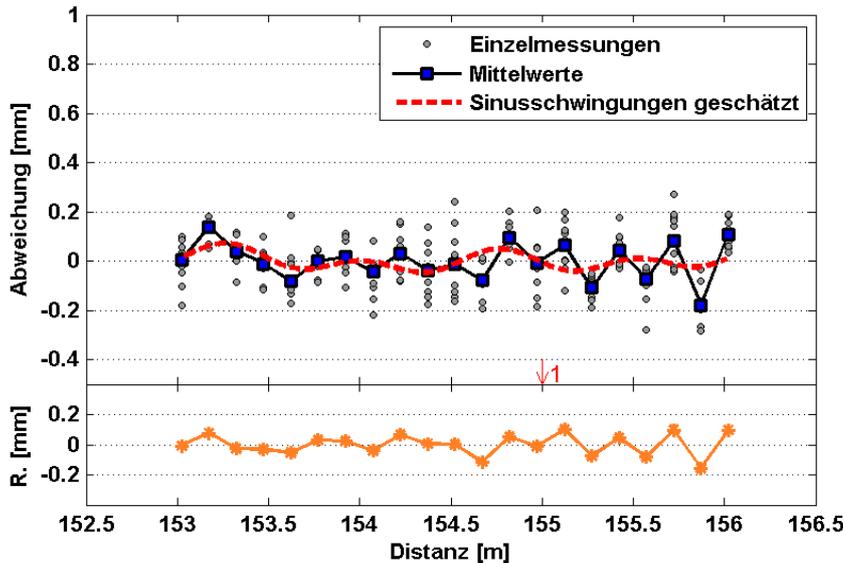


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,014	83,2	✗
0,750	0,033	65,3	✗

(c)



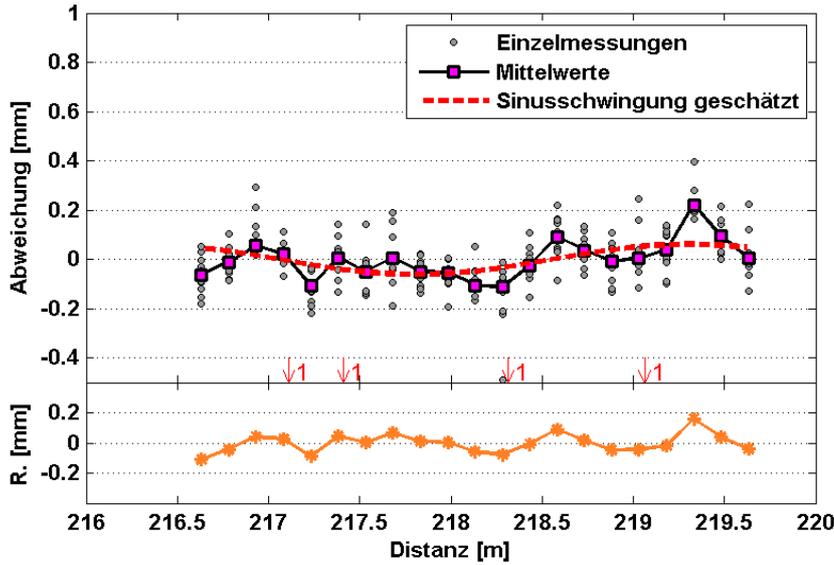
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,012	82,5	✗
0,750	0,033	63,3	✗
1,500	0,028	33,3	✗

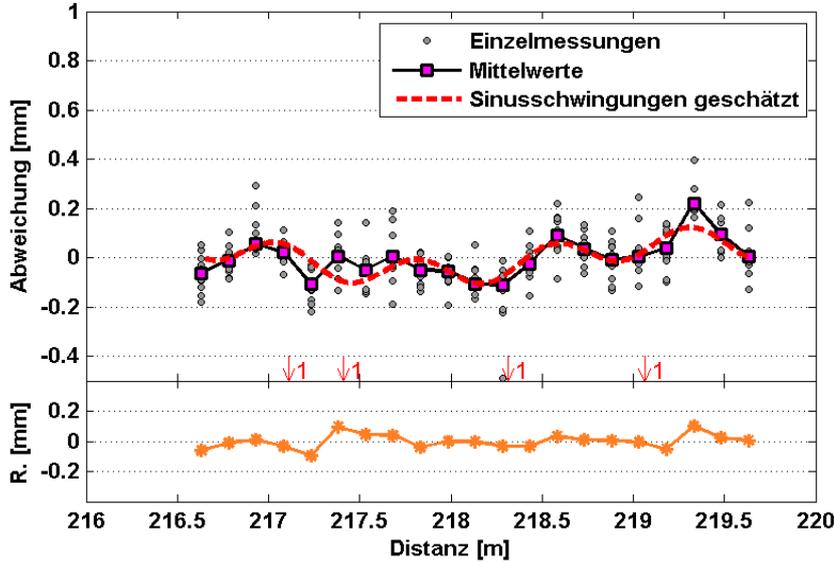
Abbildung 9-6: Leica Standardprisma, Distanz 153 m (Wiederholung 2, MR #26)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)



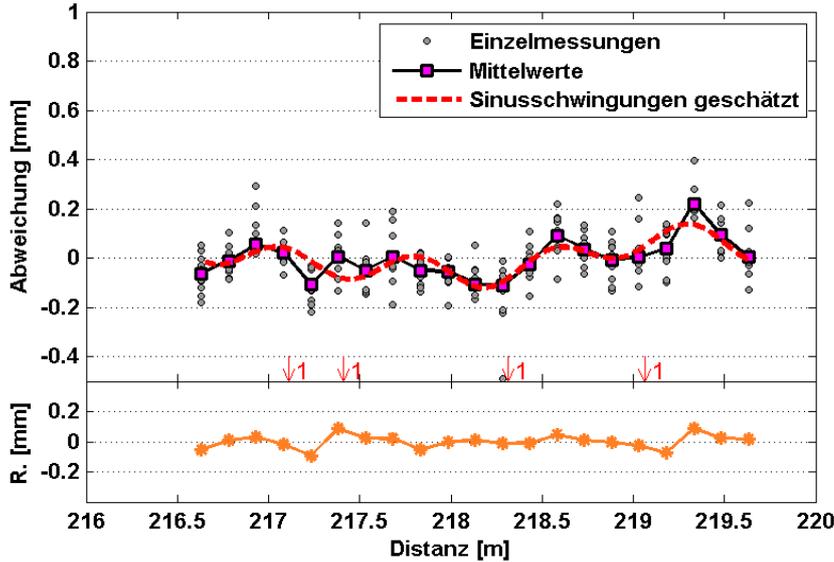
Modell 1			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,061	39,2	✓

(b)



Modell 2			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,065	36,5	✓
0,750	0,058	64,2	✓

(c)



Modell 3			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,066	36,1	✓
0,750	0,057	63,8	✓
1,500	0,021	32,0	✓

Abbildung 9-7: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 216 m (MR #28)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

### 9.3 Überlappende Messreihen

Wie in Abschnitt 8.2 erwähnt, wurden zwei Messreihen in überlappenden Distanzbereichen durchgeführt. Diese sollten Schlüsse auf mögliche langwelligere Effekte in den gemessenen Distanzen ermöglichen. Um die Messreihen besser beurteilen zu können, wurden die Daten um den im Überlappungsbereich auftretenden Offset korrigiert und in Abbildung 9-8 bis Abbildung 9-10 gemeinsam dargestellt. Für die Modellierung der Abweichungen wurde eine Summe von zwei Sinusschwingungen nach Formel (9-1) mit  $\lambda_1 = 3 \text{ m}$  und  $\lambda_2 = 6 \text{ m}$  verwendet. Die zweite Schwingung dient der Modellierung des langwelligeren Trends in den kombinierten Messreihen. Da keine zusammenhängenden Daten über einen längeren Distanzbereich vorliegen kann der langwellige Einfluss nicht zuverlässig abgeschätzt werden. Die Modellierung zeigt eine gute Näherung mit den verwendeten Parametern.

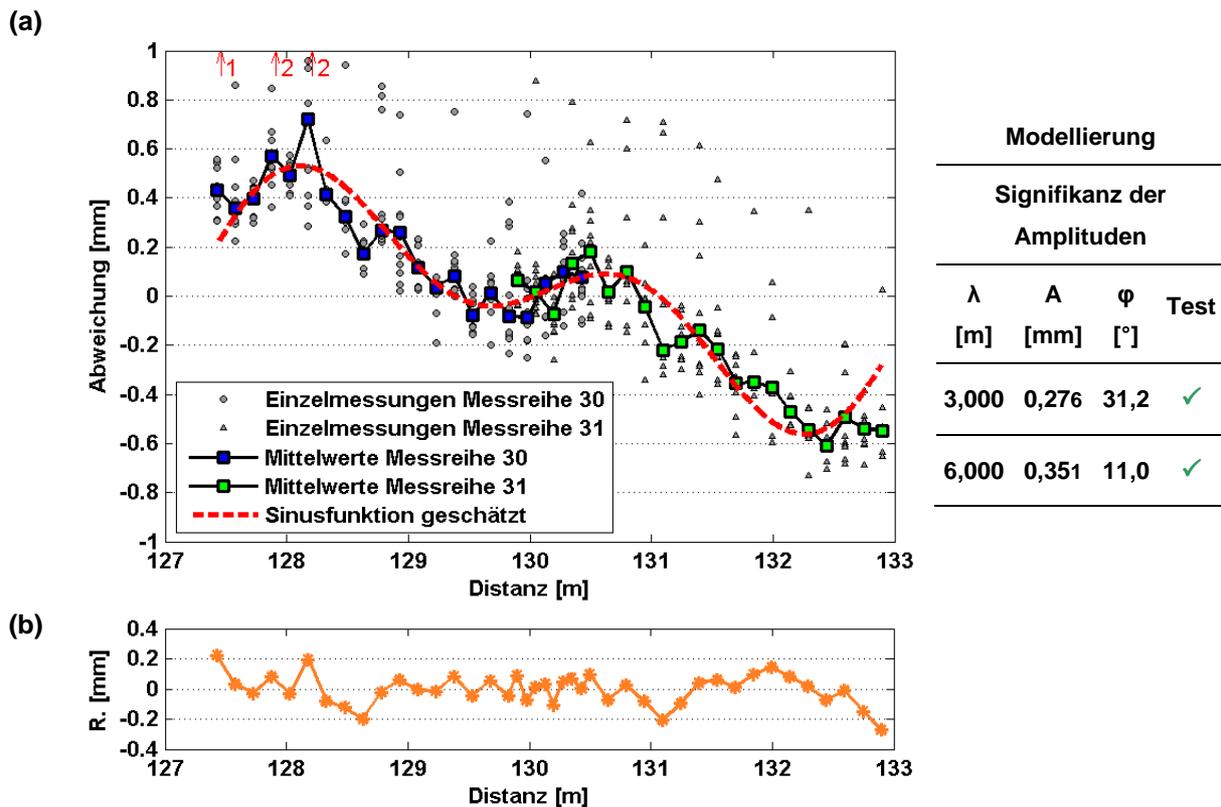


Abbildung 9-8: Überlappende Messreihen, Miniprisma Goecke

(a) Modell mit  $\lambda_1 = 3 \text{ m}$ ,  $\lambda_2 = 6 \text{ m}$  und Ergebnisse des Signifikanztests (b) Residuen

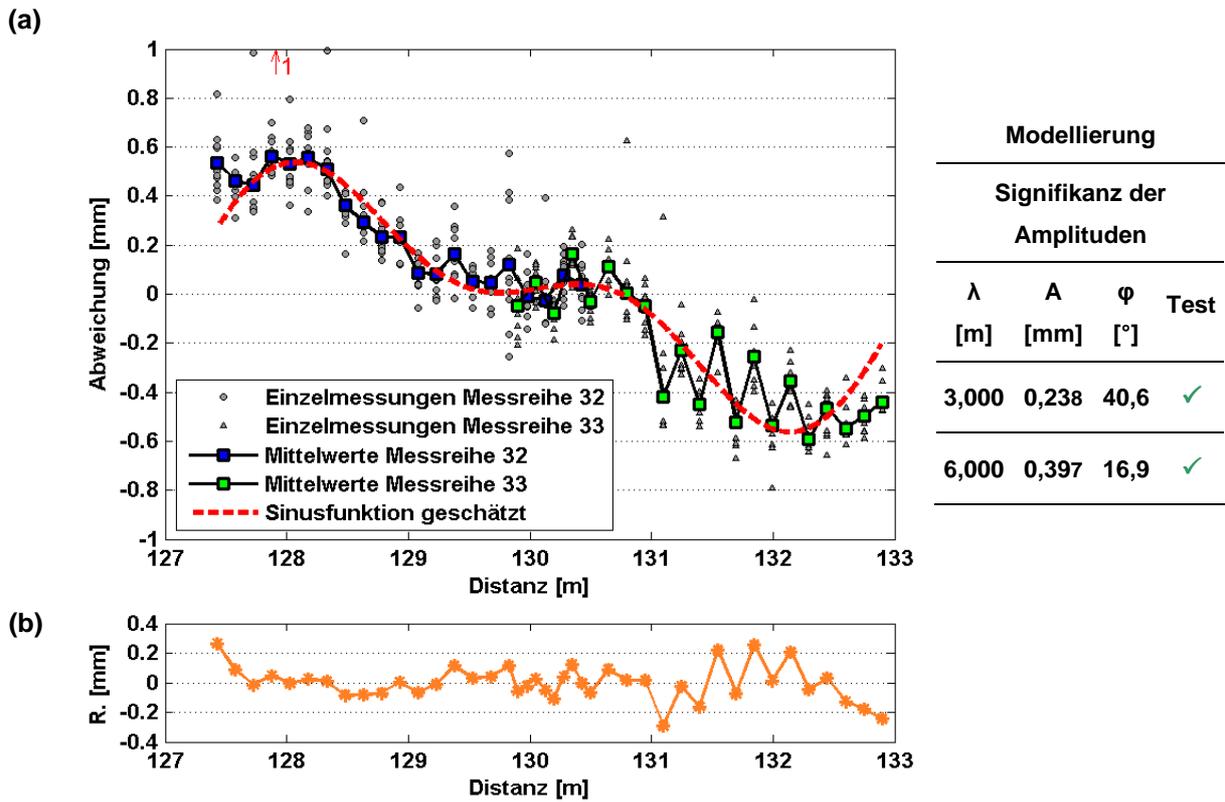


Abbildung 9-9: Überlappende Messreihen Miniprisma Geodäsie Austria

(a) Modell mit  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 6$  m und Ergebnisse des Signifikanztests (b) Residuen

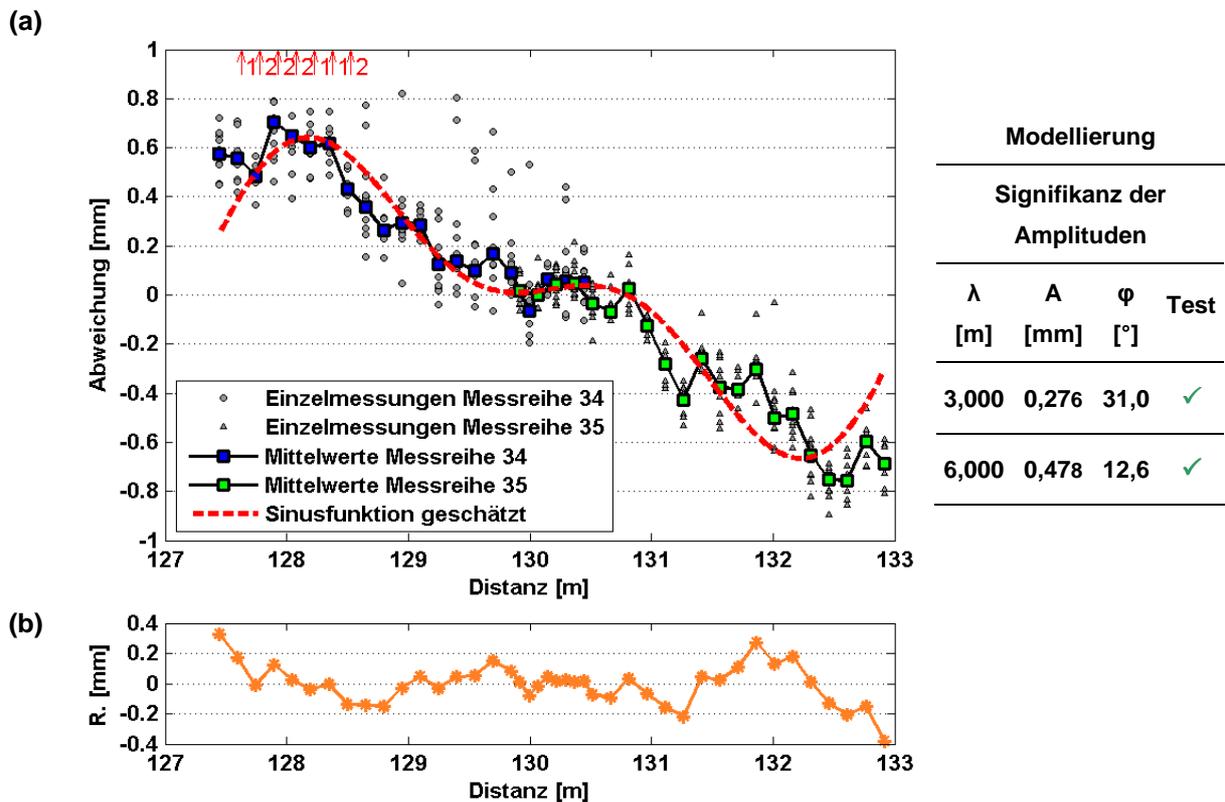


Abbildung 9-10: Überlappende Messreihen Leica Standardprisma

(a) Modell mit  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 6$  m und Ergebnisse des Signifikanztests (b) Residuen

Die Messreihen aller drei Prismen im Distanzbereich von 127 m bis 133 m weisen größere Spannweiten der Abweichungen auf als die Messungen in den anderen Distanzbereichen. Durch das Aneinanderhängen der beiden überlappenden Distanzbereiche entsteht eine Spannweite der kombinierten Messreihen von mehr als 1,2 mm. Der Verlauf der Datenreihen und die berechneten Modelle deuten auf eine mögliche langwellige Überlagerung hin, deren Wellenlänge kann aber aus den vorliegenden Daten nicht verlässlich abgeleitet werden. Dazu wären weitere anschließende Messreihen notwendig, wobei die Möglichkeit in diesem Distanzbereich weitere Messungen durchzuführen im Messgebiet aus den in Abschnitt 8.2 erwähnten Sicherheitsgründen jedoch nicht besteht. Die in Abbildung 9-9 dargestellte Messreihe bei 129 m weist einen sägezahnartigen Verlauf der Abweichungen auf, zur Diskussion dieses Effekts siehe den Text zu Abbildung A-17 im Anhang A.

## **9.4 Untersuchungen zur Streuung der Einzelmessungen**

Die berechneten Abweichungen zeigen zum Teil unerwartet große Streuungen (Abweichungen bis zum fünffachen der Standardabweichung der Einzelmessungen) der Einzelwerte (siehe zum Beispiel Abbildung 9-5 und Abbildung 9-10), was der Grund für zusätzliche Untersuchungen war. Diese Streuungen treten ab einer Distanz von ca. 80 m unabhängig vom Instrumentenstandpunkt und vom Standpunkt des Komparators auf. Sie sind bei Messungen bei bedecktem Himmel ebenso vorhanden wie bei Sonnenschein.

### **9.4.1 Mögliche Reflexionen am Feldkomparator und Verdrehung der Prismen**

Eine Möglichkeit die die auffällige Streuung der EDM Messungen erklären könnte wären Reflexionen des Messsignals an blanken Metallteilen des Feldkomparators. Eine weitere in Betracht gezogene Möglichkeit wäre, dass die Streuungen durch nicht exakt orthogonale Ausrichtung des Prismas relativ zum Messstrahl zustande kamen.

Um diese Annahmen zu überprüfen, wurde zusätzlich zur Kartonblende an der Stirnseite des Aluminiumträgers der gesamte Messwagen am Komparator mit schwarzem Stoff abgedeckt (siehe Abbildung 9-11). Der Messwagen wurde an einer Position am Feldkomparator fixiert. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten war der Ablauf der Messungen und Berechnungen bis auf die fixe Position des Prismas

gleich wie bei den Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers in Abschnitt 8.6.

Die Messung erfolgte über eine Distanz von ca. 155 m. Bei dieser Distanz waren bei allen Prismen Messreihen mit verhältnismäßig großer Streuung aufgetreten.



**Abbildung 9-11: Messwagen ohne Abdeckung (links), Messwagen abgedeckt (rechts)**

Alle Messungen fanden am selben Nachmittag bei nahezu gleicher Witterung statt (siehe Tabelle B-12). Es wurden mehrere Messreihen mit abgedecktem und nicht abgedecktem Messwagen (siehe Abbildung 9-11) durchgeführt. Zusätzlich wurde das Prisma einmal um ca. 4 Grad und danach um ca. 8 Grad verdreht, um eine vergleichsweise starke unzureichende Ausrichtung des Prismas in die Visurlinie nachzustellen. Der erste Wert ergab sich durch eine Verschiebung der äußeren Kante des Prismas um 2 mm, hierbei war die Verdrehung nur bei sorgfältiger Betrachtung erkennbar. Der zweite Wert ergab sich durch Verschiebung der Kante um 4 mm, hier war die Verdrehung auf den ersten Blick zu erkennen und wäre auch bei den Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers aufgefallen. Diese Messung diente als zusätzlicher Test. Die Zeitreihen der Messungen sind in Abbildung 9-12 bis Abbildung 9-14 dargestellt.

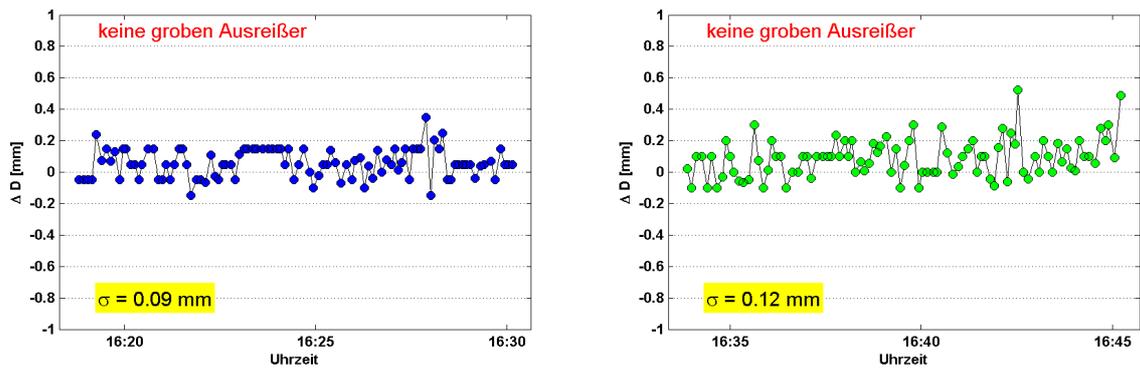


Abbildung 9-12: Prisma orthogonal, ohne Abdeckung (links), mit Abdeckung (rechts)

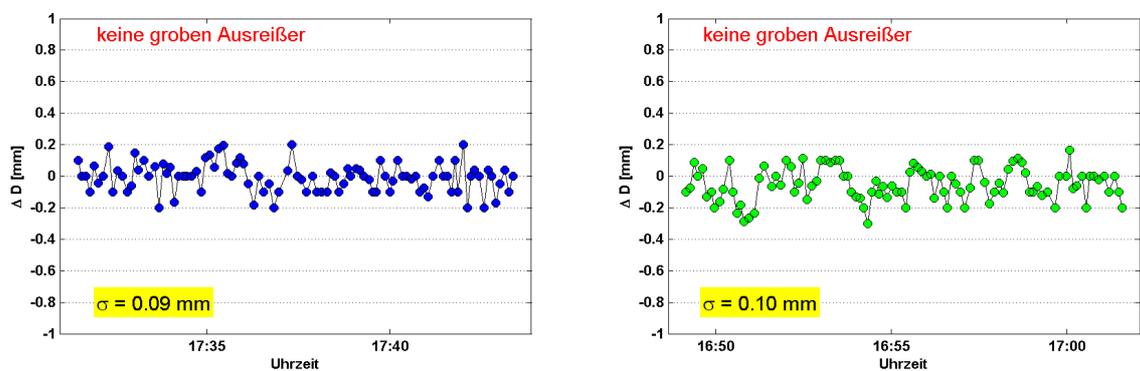


Abbildung 9-13: Prisma ca. 4° verdreht, ohne Abdeckung (links), mit Abdeckung (rechts)

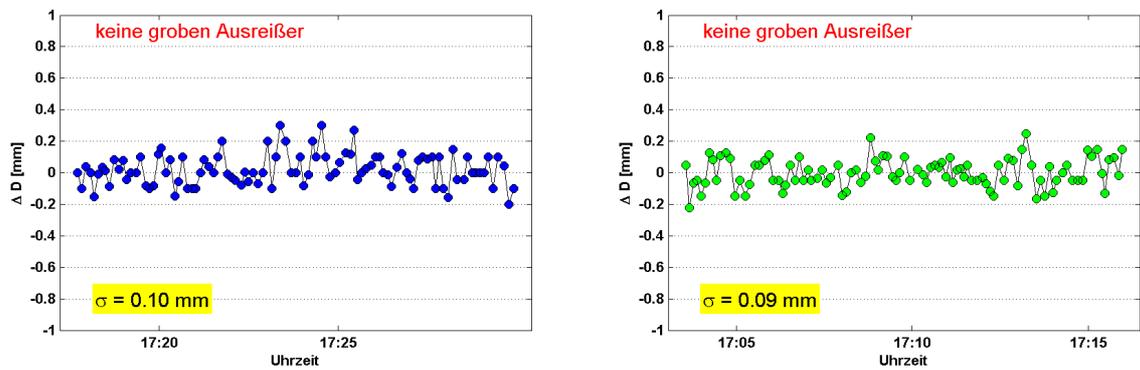


Abbildung 9-14: Prisma ca. 8° verdreht, ohne Abdeckung (links), mit Abdeckung (rechts)

Bei Betrachtung der Zeitreihen ist zu erkennen, dass die Verdrehung des Prismas keinen Einfluss auf die Streuung der Datenreihen hat, wie auch die Standardabweichungen der Zeitreihen in Tabelle 9-4 zeigen.

Zusätzlich wurden die Standardabweichungen der Zeitreihen statistisch gegeneinander getestet. Die Tests wurden nach Niemeier (2008, S.110 - 111)

durchgeführt. Allen Tests liegt ein Signifikanzniveau von 99 % zugrunde. Die Ergebnisse der Tests in Tabelle 9-4 bestätigen den visuellen Eindruck der Zeitreihendarstellungen. Lediglich die Streuung der Messungen bei abgedeckten Messwagen und orthogonalen Prisma (Abbildung 9-12 rechts) unterscheidet sich signifikant von der der Messungen zum orthogonal ausgerichteten Prisma bei nicht abgedeckten Messwagen (Abbildung 9-12 links).

Tabelle 9-4: Ergebnisse der statistischen Tests

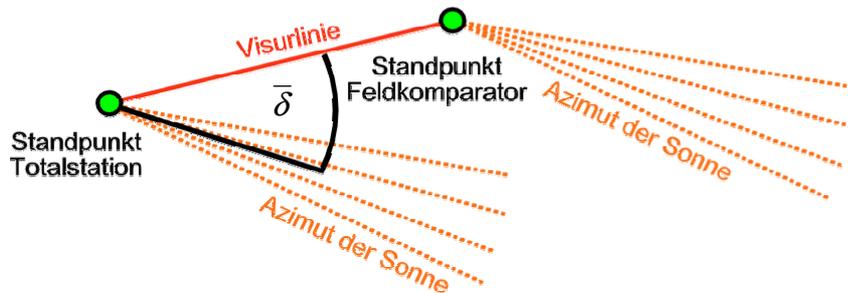
Zeitreihe 1	$\sigma_{ZR1}$ [mm]	Zeitreihe 2	$\sigma_{ZRi}$ [mm]	H0	HA	H0 angenommen?
Prisma orthogonal, keine Abdeckung	0,09	Prisma orthogonal, mit Abdeckung	0,12	$\sigma_{ZR_1}^2 = \sigma_{ZR_i}^2$	$\sigma_{ZR_1}^2 \neq \sigma_{ZR_i}^2$	✗
		Prisma ca. 4° verdreht	0,10			✓
		Prisma ca. 8° verdreht	0,09			✓
		Prisma ca. 4° verdreht, mit Abdeckung	0,10			✓
		Prisma ca. 8° verdreht, mit Abdeckung	0,09			✓

Aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchung kann die Reflexion von Signalen am Komparator oder eine Verdrehung des Prismas als Ursache der erhöhten Streuungen mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

#### 9.4.2 Einfluss von Streulicht

Als weitere mögliche Ursache für die teilweise auffallend starken Streuungen, wie sie zum Beispiel in Abbildung 9-9 zu sehen sind, wurde der Einfluss von Störlicht angenommen. Es wurde vermutet, dass es abhängig vom Sonnenstand, zu direktem Einfall von Sonnenlicht in das Objektiv der Totalstation kommen könnte, was möglicherweise die EDM Messung oder die Anzielung des Prismas mittels ATR beeinflussen könnte. Um diesen möglichen Zusammenhang zu untersuchen, wurde der Sonnenstand zu den Messzeiten mit der jeweiligen Visur verglichen. Die Bahndaten der Sonne wurden von der Homepage des Projekts *HORIZONS* der NASA online (NASA, 2012) abgefragt. Es wurde der eingeschlossene räumliche Winkel  $\delta$  zwischen dem Visurstrahl und dem Sonnenstand während der Messungen

berechnet. Vermutet wurde, dass es bei eingeschlossenen Winkeln kleiner 1,72 gon (Sehfeld des Fernrohrs des TCA 1800) zu Messfehlern kommen könnte. Auch bei Winkeln um ca. 200 gon könnte es durch die direkte Sonneneinstrahlung am Prisma zu Problemen kommen. In Abbildung 9-15 sind  $\bar{\delta}$ , die Projektion von  $\delta$  in die Ebene, und die Projektion der Sonnenstrahlen in die Ebene dargestellt.



**Abbildung 9-15: Skizze zur Sonneneinstrahlung während der Feldkomparatormessungen (Projektion)**

Für das Miniprisma der Firma Goecke, bei dem die größten Streuungen auftraten, ist eine Übersicht mit den mittleren Winkeln zwischen der Visurlinie und dem Azimut der Sonne in Tabelle 9-5 dargestellt. Wie in Tabelle 9-5 ersichtlich, treten bei den Messungen mit Ausreißern keine Winkel nahe den vermuteten kritischen Werten auf. Es kann auch sonst kein direkter Zusammenhang zwischen den variierenden Einfallswinkeln des Sonnenlichts und den Ausreißern in den Messungen hergestellt werden.

**Tabelle 9-5: Messreihen mit großer Streuung, Prisma Goecke**

Datum der Messung	Uhrzeit	Strecke	Entfernung [m]	Anzahl der Ausreißer	Mittlerer räumlicher Winkel $\delta$ [gon]
02. 06. 2012	15:50 - 16:20	S4 – Pf6	82,4 – 85,4	2	94
02. 04. 2012	15:20 – 16:15	S5 – Pf3	94,9 – 97,9	> 10	102
16. 04. 2012	13:00 – 13:33	S2 – Pf2	127,4 – 130,4	> 10	23
13. 04. 2012	15:38 – 16:10	S1 – Pf2	129,9 – 132,9	> 10	80
12. 04. 2012	17:09 – 17:45	S13 – Pf3	104,7 – 107,7	9	141
23. 04. 2012	14:00 – 14:40	NT0 – PF3	153 – 156	8	96
10. 04. 2012	11:20 – 12:15	NT0 – Pf3	153 – 156	> 10	27
10. 04. 2012	17:40 – 18:20	NTW – Pf3	216,6 – 219,6	> 10	160

Auch bei den stark streuenden Messreihen der beiden anderen Prismen konnte keine Abhängigkeit vom Stand der Sonne festgestellt werden.

### 9.4.3 Weitere mögliche Ursachen

Die Gemeinsamkeit aller stark streuenden Messreihen ist im Fall der Miniprismen ihr Auftreten ab einer Distanz von ca. 80 m. Bei den Messungen mit dem Leica Standardprisma treten die starken Streuungen erst ab einer Entfernung von ca. 127 m auf.

Eine mögliche Erklärung für das Auftreten der Streuungen könnte die Abnahme der Intensität des vom jeweiligen Prisma reflektierten EDM Signals mit der Distanz sein. In Abbildung 9-16 sind die Standardabweichungen von Dauermessungen mit dem Leica Standardprisma bei verschiedenen Wetterlagen gegenüber der Distanz dargestellt. Als Grundlage dienten die Daten der Driftmessungen, welche vor und nach den Messungen zum Feldkomparator gemessen wurden, siehe Abschnitt 8.6.

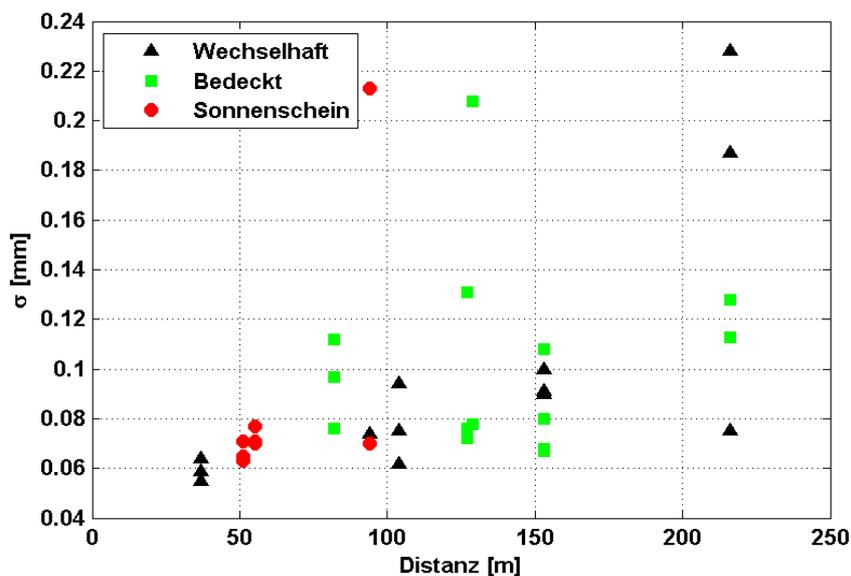


Abbildung 9-16: Standardabweichungen bei unterschiedlichen Distanzen

Die Standardabweichungen steigen unabhängig von der Witterung ab einer Distanz von ca. 80 m an. Es ist eine recht große Spannweite der Werte zu erkennen. Die Standardabweichung bei einer Distanz von 220 m bei ähnlicher Witterung beträgt einmal ca. 0,07 mm, einmal aber ca. 0,23 mm. Eine weitere Untersuchung zum Absorptionsverhalten der Prismen, welches mit den beschriebenen Ausreißern in Zusammenhang stehen könnte, ist in Anhang F beschrieben.

## 10 Bestimmung des zyklischen Fehlers im Messlabor

Um Informationen über die langwelligen Anteile des zyklischen Fehlerverhaltens des TCA 1800 zu erhalten, wurden zusätzliche Messungen am Horizontalkomparator des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme durchgeführt.

Die im Messlabor des Instituts vorhandene Komparatorbank besitzt eine Länge von 30 m. Messungen über diese Distanz standen auch für die Arbeit von Paulitsch (2010, Kap. 8) zur Verfügung. Es stellte sich jedoch heraus, dass mit diesen Daten eine zuverlässige Modellierung des zyklischen Fehlers aufgrund langwelliger Anteile nicht möglich war (Paulitsch, 2010, S. 78 - 82). Um Messwerte über einen größeren Distanzbereich zu erhalten wurde ein bekannter Ansatz (z.B.: Schwarz, 1981) aufgegriffen, um den Messstrahl der Totalstation wie in Abbildung 10-1 dargestellt zu verlängern.

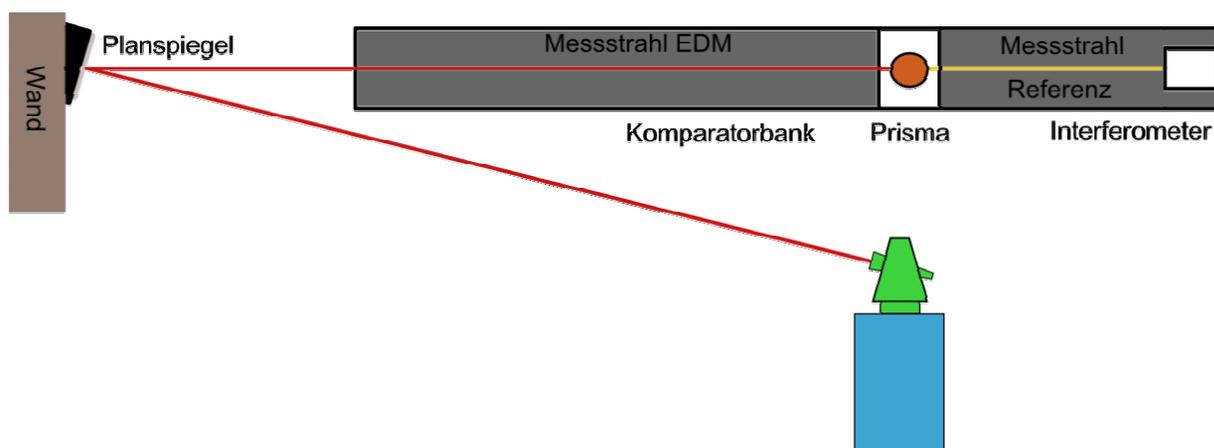


Abbildung 10-1: Verlängerung der Distanz mit Umlenkspiegel

Mit Hilfe eines Planspiegels *Ultima U 400-AC* der Firma Newport wurde der Messstrahl umgelenkt. Dieser Spiegel besitzt für Licht der Wellenlänge 850 nm (Trägerwellenlänge des TCA 1800, siehe Tabelle 7-1) eine Reflektivität von 98,5 % (Newport, 2013, a). Mit drei Instrumentenstandpunkten konnten so drei überlappende Messreihen über einen Distanzbereich von ca. 1,6 m bis ca. 65 m gemessen werden.

## 10.1 Auswertung und Ergebnisse

Die Messwerte der Totalstation wurden mit den im Labor aufgezeichneten Luftdruck und Lufttemperaturwerten nach Formel (6-1) reduziert. Zusätzlich wurden die Messwerte wegen der bekannten Intensitätsverluste von 1,5 % am Planspiegel (Newport, 2013, a) skaliert. Wegen der zweimaligen Reflexion der Messwelle im Hin- und Rückweg ergab sich ein Gesamtverlust von 2,98 %. Durch den Neustart der Interferometermessungen bei jeder Instrumentenaufstellung entstand der in Abbildung 10-2 dargestellte Versatz der Messreihen.

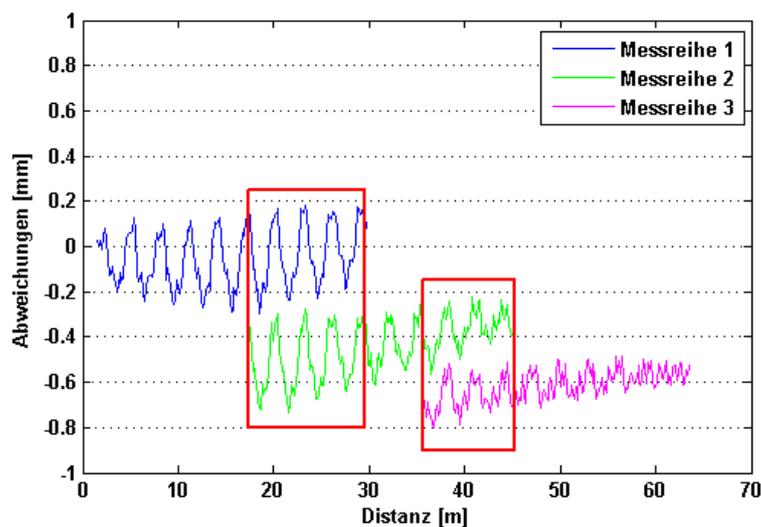


Abbildung 10-2: Überlappende Messreihen (rot eingerahmt) und Offsets, Leica Standardprisma

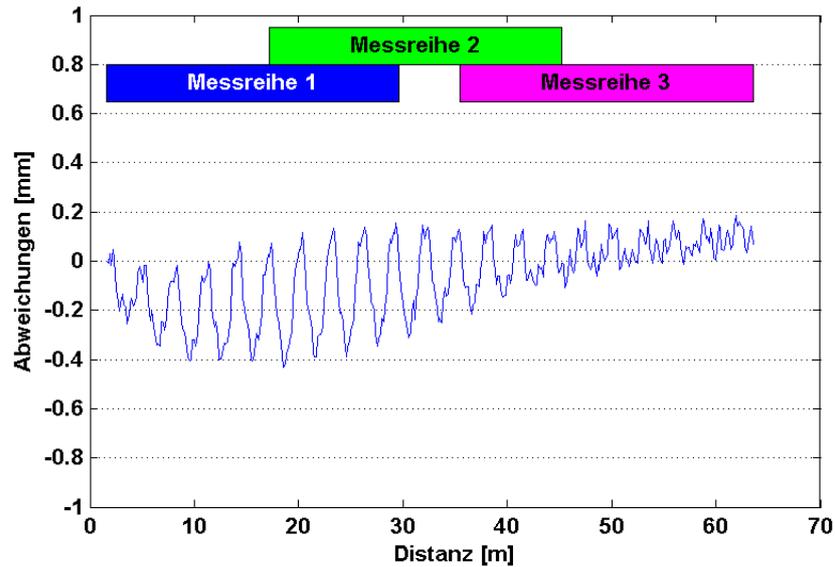
Dieser Offset wurde mittels Ausgleich nach kleinsten Quadraten bestimmt und an die zweite und dritte Messreihe angebracht. Die Werte der Offsets und ihre Standardabweichungen sind in Tabelle 10-1 angeführt.

Tabelle 10-1: Offsets der Messreihen am Horizontalkomparator

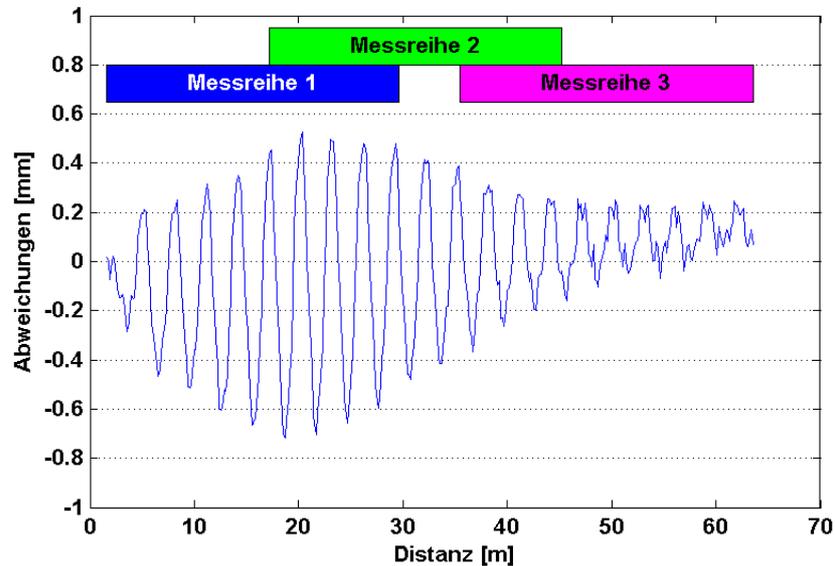
Prisma	Messreihe 1- 2 Offset [mm]	$\sigma_{\text{Offset}_{1-2}}$ [mm]	Messreihe 2-3 Offset [mm]	$\sigma_{\text{Offset}_{2-3}}$ [mm]
Geodäsie Austria	0,78	0,004	0,05	0,005
Goecke	0,29	0,003	0,31	0,003
Leica Standard	0,47	0,006	0,28	0,006

Die zusammengesetzten Abweichungen der drei Prismen sind in Abbildung 10-3 dargestellt.

(a)



(b)



(c)

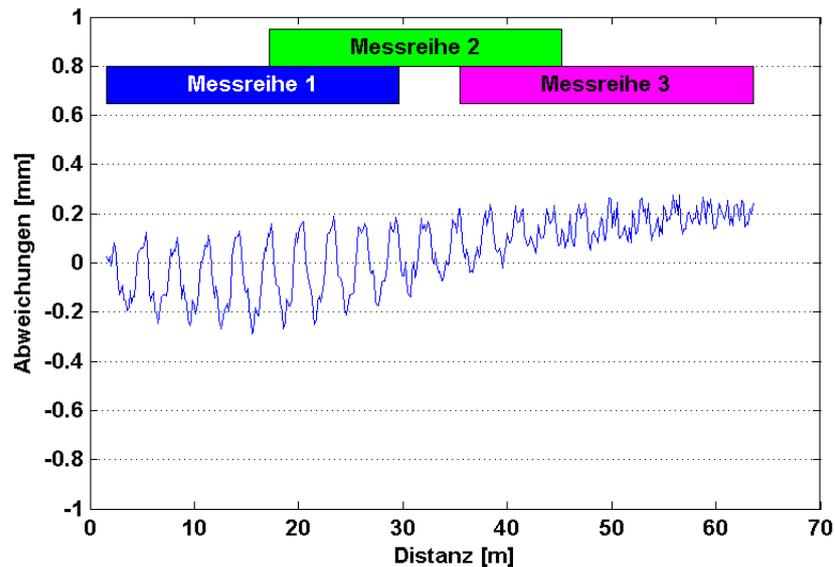


Abbildung 10-3: Abweichungen aus Labormessungen  
(a) Miniprisma Goecke, (b) Miniprisma Geodäsie Austria, (c) Leica Standardprisma

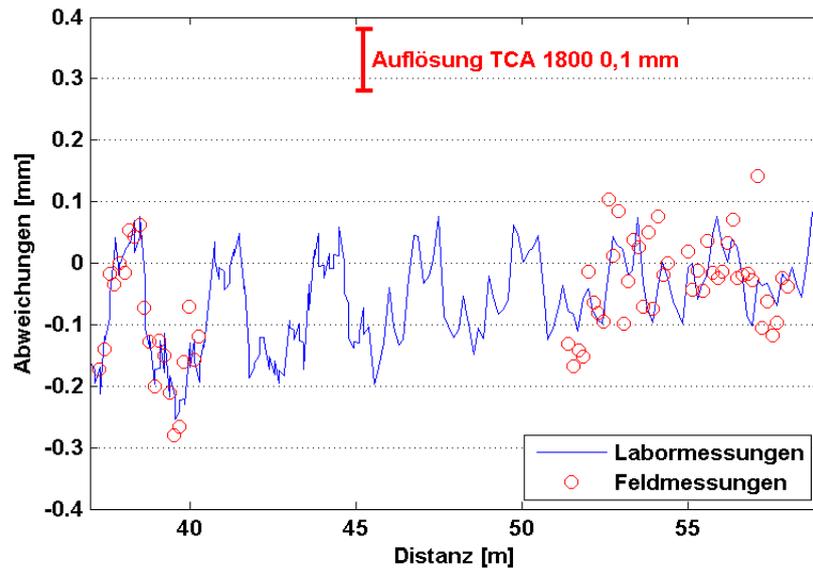
Alle Messreihen weisen einen deutlichen linearen Trend von ca. 5 ppm auf, welcher auch bei den Messungen von Paulitsch (2010, S. 72) vorhanden war. Dieser wird, wie in Paulitsch (2010, S. 72) erwähnt, möglicherweise durch einen Maßstabsfehler der 17 Jahre alten Totalstation, welcher durch eine Alterung des Schwingquarzes verursacht wird, hervorgerufen (Joeckel et al., 2008: S. 127). Der Trend könnte aber auch durch die Überlagerung mit einem langwelligen zyklischen Fehler entstehen.

Die Messungen bei verlängerter Komparatorabstand zeigen ab einer Entfernung von ca. 45 m eine starke Verringerung der Amplitude. Auch die im Bereich davor klar zu erkennende Periode wird mit zunehmender Entfernung sichtlich verwaschen. Die zyklischen Abweichungen des Miniprismas Geodäsie Austria (Abbildung 10-3b) weisen wie die Messungen mit dem Feldkomparator bei 37 m (Abbildung 9-1) eine wesentlich größere Amplitude auf als die der beiden anderen Prismen. Als Ursache dafür wurde eine geringere Reflektivität des Miniprismas Geodäsie Austria vermutet, was jedoch nach weiteren Untersuchungen (siehe Anhang F) nicht bestätigt werden konnte.

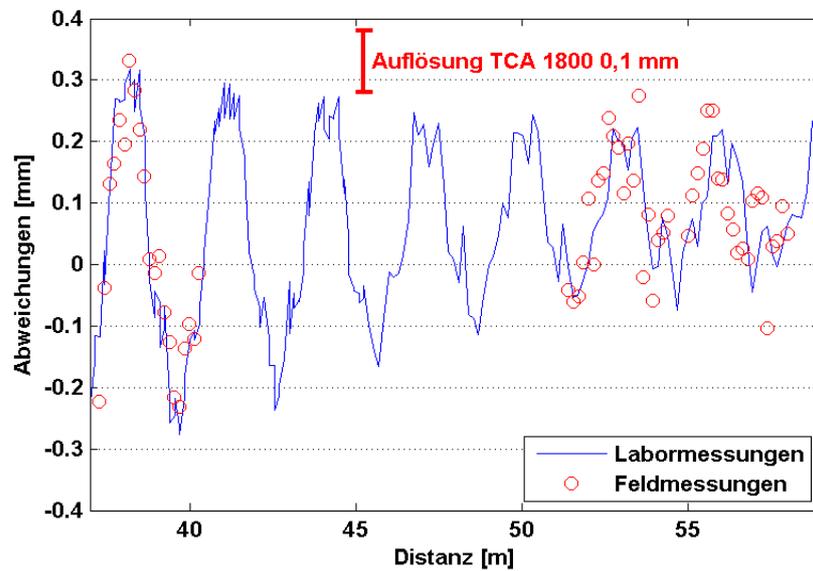
## 10.2 Vergleich von Feld- und Labormessungen

In Abbildung 10-4 sind die Labormessungen überlagert mit den Feldmessungen bei 37 m, 51 m und 54 m dargestellt. Die Messergebnisse mit dem Feldkomparator zwischen 37 m und 40 m stimmen bei allen drei Prismen sehr gut mit den Laborwerten überein. Die Feldmessungen zwischen 51 m und 54 m sind bei den Messungen mit dem Miniprisma Goecke (Abbildung 10-4a) und dem Leica Standardprisma (Abbildung 10-4c) im Vergleich zu den Messungen am Horizontalkomparator verwaschen. Die ersten Werte der Messreihen passen gut zu den Laborwerten aber ab ca. 53 m weichen die Messwerte stärker voneinander ab. Lediglich die Messungen mit dem Miniprisma Geodäsie Austria (Abbildung 10-4b) stimmen gut mit den Laborwerten überein. Auch die Feldmessungen bei 55 m bis 58 m lassen bei diesem Prisma eine Übereinstimmung erkennen, es sind jedoch größere Abweichungen als beim vorherigen Distanzbereich vorhanden. Die Messreihe des Miniprismas Goecke mit dem Feldkomparator weist bei einer Distanz von ca. 57 m Ausreißer gegenüber der Horizontalkomparatormessung auf, ebenso die Feldkomparatormessung mit dem Leica Standardprisma. Die auftretenden Abweichungen zwischen Feld- und Labormessungen haben etwa die Größenordnung der Auflösung des TCA 1800 von 0,1 mm.

(a)



(b)



(c)

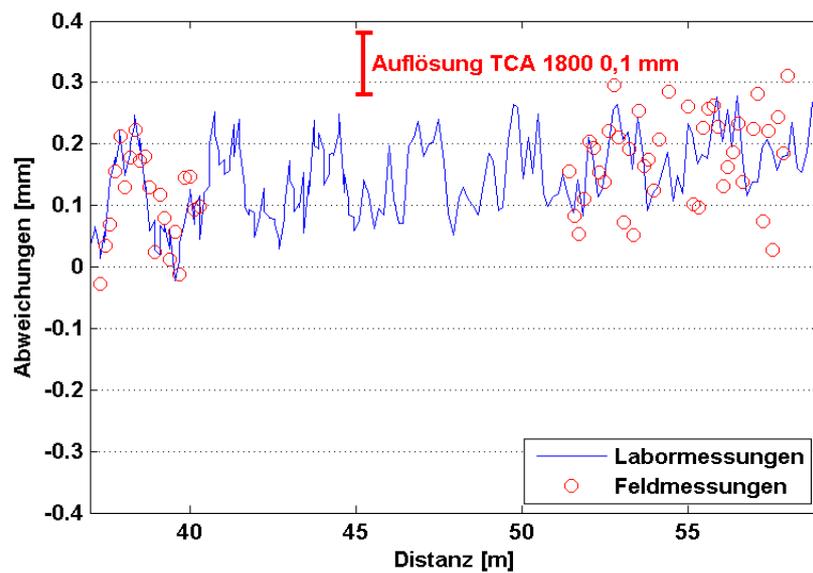


Abbildung 10-4: Feld- und Labormessungen überlagert  
(a) Miniprisma Goecke, (b) Miniprisma Geodäsie Austria, (c) Leica Standardprisma

# 11 Modellierung des zyklischen Fehlers aus Labormessungen

Um eine Korrekturfunktion für den Einfluss des zyklischen Phasenfehlers eines EDM Gerätes zu finden, muss dieser als Funktion der gemessenen Distanz modelliert werden. Für den zyklischen Fehler erster Ordnung, welcher sich mit der Periode des Feinmaßstabs wiederholt, werden in der Literatur Modelle mit einer einfachen Sinusschwingung angegeben (Rüeger, 1996, S. 212; Joeckel et al., 2008, S. 164)

$$K_{\text{zykl}_i} = A \cdot \sin\left(D_i \cdot \frac{2\pi}{U} + \varphi\right) \tag{11-1}$$

wobei  $A$  die Amplitude,  $D$  die Distanz,  $U$  der Feinmaßstab des EDM Geräts bzw. die Wellenlänge und  $\varphi$  die Phasenlage der Schwingung ist.

Die Hauptschwingung und etwaige Oberschwingungen mit Perioden, die Bruchteilen des Feinmaßstabs entsprechen, können durch Fourieranalyse der Abweichungen detektiert werden. Diese Einflüsse lassen sich durch Erweiterung des Modells in eine Summe von Sinusschwingungen darstellen (Joeckel et al. 2008, S. 167)

$$K_{\text{zykl}_i} = \sum_j A_j \cdot \sin\left(D_i \cdot \frac{2\pi}{U_j} + \varphi_j\right) \tag{11-2}$$

mit entsprechenden Parametern wie in Formel (11-1) und  $j$  als Index der Schwingung.

Paulitsch erweiterte das Modell der einfachen Sinusschwingung mit einer überlagerten langwelligen Sinusschwingung, da die Amplitude der von ihm untersuchten Abweichungen nicht konstant war und in den Abweichungen einer exemplarischen Feldmessung ein Phasensprung erkennbar war (Paulitsch, 2010, S. 76)

$$K_{\text{zykl}_i} = \left[ A_1 \cdot \sin\left(D_i \cdot \frac{2\pi}{U_1} + \varphi_1\right) \right] \cdot \left[ A_2 \cdot \sin\left(D_i \cdot \frac{2\pi}{U_2} + \varphi_2\right) \right] \tag{11-3}$$

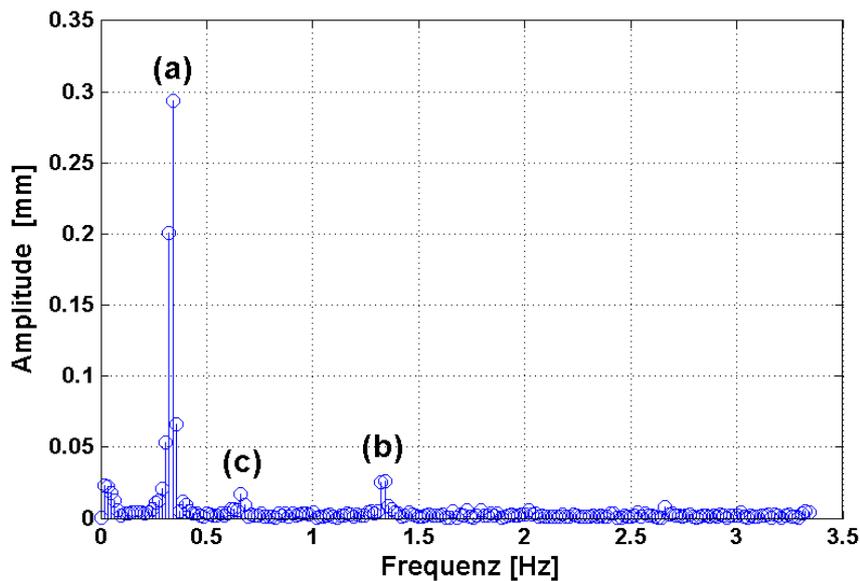
wobei  $A_2$  die Amplitude,  $U_2$  die Wellenlänge und  $\varphi_2$  die Phasenlage der langwelligen Schwingung ist.

Die aus Labormessungen bei verlängerter Distanz bestimmten Restabweichungen weisen ebenfalls eine variable Amplitude auf (siehe Abbildung 10-3). Eine Bestimmung des langwelligen Anteils über den im Labor gemessenen Bereich hinaus ist jedoch nicht möglich, da die Messungen mit dem Feldkomparator keinen absoluten Bezug haben. Die aus den Feldkomparatormessungen berechneten Abweichungen geben nur den relativen Verlauf innerhalb des 3 m Intervalls an. Auch für eine Modellierung des zyklischen Fehlers sind Absolutwerte notwendig. Es wurde zwar versucht Absolutwerte für die Feldkomparatormessungen zu bestimmen (siehe Anhang C), diese konnten aber auf Grund des gewählten Messverfahrens nicht mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt werden. Daher wurde der zyklische Fehler aus den Labormessungen im Bereich bis ca. 65 m separat modelliert.

## **11.1 Berechnung der Modelle am Beispiel des Miniprismas**

### **Geodäsie Austria**

Die Abweichungen aus den Labormessungen wurden zunächst mittels Fourieranalyse auf periodische Anteile hin untersucht. Zuvor mussten die, aufgrund der Messung der Abweichungen in drei Teilbereichen (siehe Abbildung 10-2), entstandenen doppelten Messwerte gemittelt werden. Der dadurch entstehende Fehler von maximal 0,1 mm in den Amplituden ist vernachlässigbar, da die Ergebnisse der Fouriertransformation in der weiteren Berechnung als Näherungswerte in eine Ausgleichung einfließen. Das Amplitudenspektrum der Abweichungen des Miniprismas Geodäsie Austria (Abbildung 10-3b) ist in Abbildung 11-1 dargestellt.



**Abbildung 11-1: Amplitudenspektrum der Abweichungen aus Labormessungen  
Miniprisma Geodäsie Austria  
(a) 3 m Schwingung, (b) 0,75 m Schwingung, (c) 1,5 m Schwingung**

Im Amplitudenspektrum ist bei Position a deutlich die Hauptschwingung mit einer Frequenz von ca. 0,3 Hz zu erkennen, diese entspricht einer Periode mit der Länge des Feinmaßstabs von 3 m. Das nächst kleinere Maximum an der Stelle b weist auf eine Schwingung mit 1,3 Hz (entspricht ca. 0,75 m Wellenlänge) hin. An Position c ist ein Peak bei ca. 0,6 Hz zu erkennen, der einer Schwingung mit einer Wellenlänge von ca. 1,5 m entspricht. Die ursprüngliche Datenreihe (Abbildung 10-3b) weist jedoch noch mehrere überlagerte Schwingungen auf die auch im Spektrum nur schwer zu erkennen sind.

Für die Modellierung der Abweichungen wurde der Ansatz nach Formel (11-2) um einen linearen Anteil, der den Trend in der Messreihe nachbildet erweitert,

$$K_{\text{zykl}_i} = (k \cdot D_i + d) + \sum_j A_j \cdot \sin\left(D_i \cdot \frac{2\pi}{\lambda_j} + \varphi_j\right) \quad (11-4)$$

wobei  $k$  und  $d$  die zusätzlichen Parameter für die Steigung und den Offset des Trends sind. Die Periode des Feinmaßstabs  $U$  wurde durch  $\lambda$  für die Wellenlänge der einzelnen Schwingungen ersetzt.

Die Auswahl der für die Modellierung verwendeten Schwingungen erfolgt über die Größe der Amplitude aus dem Amplitudenspektrum. Es wird ein Grenzwert definiert und alle Schwingungen deren Amplituden darüber liegen fließen in die Berechnung

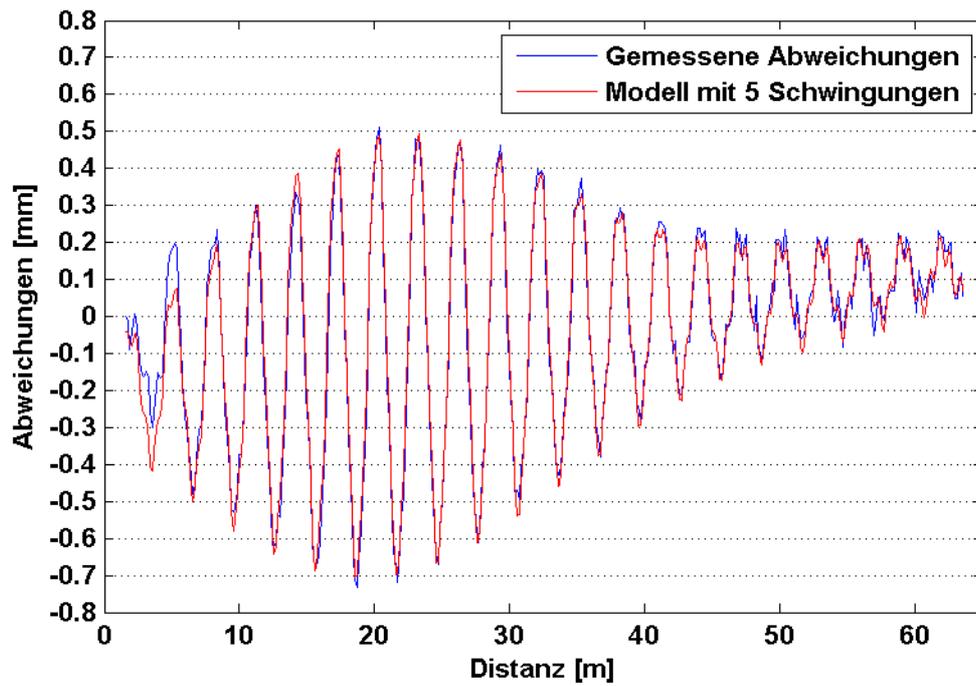
ein. Der nächste Schritt in der Berechnung ist eine Ausgleichung des Modells nach kleinsten Quadraten, wobei diese iterativ durchgeführt wird (Niemeier, 2008, S. 170 – 171). Die so bestimmten Parameter  $A_j$  und  $\lambda_j$  der Schwingungen werden nach der Ausgleichung mittels t – Test auf einem Signifikanzniveau von 99 % auf Signifikanz geprüft (Niemeier 2008, S. 398). Falls einer der Parameter nicht signifikant von Null verschieden ist, wird die dazugehörige Schwingung aus dem Modell entfernt und erneut eine iterative Ausgleichung der Modellfunktion ohne diese durchgeführt. Dieser Vorgang wird wiederholt bis ein Ergebnis erreicht ist, in dem nur mehr signifikante Schwingungen vorhanden sind.

Als Grenzwert für die Auswahl der Schwingungen wurde zunächst die aus Wiederholungsmessungen unter Laborbedingungen bestimmte Standardabweichung des TCA 1800 von 0,06 mm gewählt, damit flossen jedoch zu wenige Schwingungen in das Modell ein, um die Datenreihe ausreichend gut anzunähern. Es stellte sich heraus, dass bei einem Grenzwert von 0,02 mm eine zur Modellierung ausreichende Anzahl an Schwingungen in die Berechnung einbezogen werden. Eine Überprüfung der Signifikanz der Phase der verwendeten Schwingungen erfolgte nicht, da auch eine Schwingung mit  $\varphi$  nahe Null wesentlich zum Gesamtmodell beiträgt, wenn die Amplitude entsprechend groß ist. Diese Art der Berechnung konnte für die Modellierung der Abweichungen aller drei untersuchten Prismen angewandt werden.

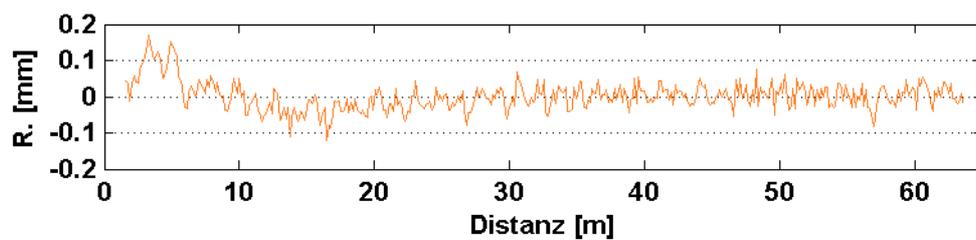
Die so berechneten Modelle sind rein mathematische Korrekturmodelle. Die geschätzten Schwingungen haben keine erklärbare physikalische Bedeutung. Zudem ist eine Extrapolation über den Distanzbereich der Messungen hinaus mit diesen Modellen nicht sinnvoll, da sich die im Nahbereich bestimmten Abweichungen aufgrund der aus Fourierkoeffizienten berechneten Schwingungen bei größeren Distanzen wiederholen. Das dies nicht der Fall ist durch die Messungen mit dem Feldkomparator (siehe Kapitel 9) belegt.

Das berechnete Modell für das Miniprisma Geodäsie Austria ist in Abbildung 11-2a gemeinsam mit den Abweichungen dargestellt. Für die Modellierung wurden fünf signifikante Schwingungen verwendet. Die Parameter des Modells und ihre Standardabweichungen sind in Tabelle 11-1 angeführt.

(a)



(b)



**Abbildung 11-2: Miniprisma Geodäsie Austria  
(a) Modell des zyklischen Fehlers, (b) Residuen**

Es soll hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass die geschätzten Schwingungen (vier Schwingungen mit  $\lambda \approx 3$  m) zwar für die mathematische Modellierung geeignet sind, jedoch keine sinnvollen physikalischen Zusammenhänge darstellen.

Tabelle 11-1: Parameter des Modells für das Miniprisma Geodäsie Austria

Schwingungen	Amplitude $A$ [mm]	$\sigma_A$ [mm]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	$\sigma_\lambda$ [m]	Phase $\varphi$ [deg]	$\sigma_\varphi$ [deg]
Schwingung 1	0,081	0,001	3,183	0,001	117,16	16,58
Schwingung 2	0,238	0,001	3,077	0,001	100,09	11,05
Schwingung 3	0,246	0,001	2,941	0,001	323,69	9,73
Schwingung 4	0,061	0,001	2,817	0,001	280,83	12,69
Schwingung 5	0,040	0,001	0,753	0,001	86,46	8,05
Trend						
Steigung $k$ [nm/m]	5,0	$\sigma_k$ [nm/m]	0,01			
Offset $d$ [mm]	-0,19	$\sigma_d$ [mm]	0,004			

Zur Beurteilung des Modells wurden die Differenzen zwischen der Modellfunktion und der ursprünglichen Datenreihe gebildet. Die Residuen in Abbildung 11-2b lassen eine unzureichende Anpassung des Modells im Bereich bis ca. 7 m erkennen. Hier können bei der EDM Messung Nahbereichseffekte auftreten, die keinen zyklischen Verlauf aufweisen (Rüeger, 1996, S. 181). Der QQ – Plot der Residuen (Hartung, 2005, S. 847 – 849) in Abbildung 11-3 zeigt Normalverteilung für den Großteil der Residuen, die schlechte Anpassung im Nahbereich ist aber auch an den Rändern des QQ – Plots erkennbar.

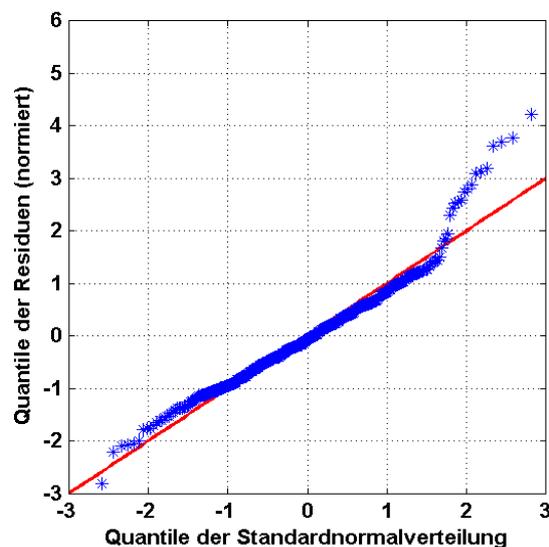


Abbildung 11-3: QQ - Plot der Residuen, Miniprisma Geodäsie Austria

## 11.2 Modell aus Laborwerten für das Leica Standardprisma

Die im Labor bestimmten Abweichungen und deren Modellierung für das Leica Standardprisma sind in Abbildung 11-4a dargestellt. Die Berechnung des Modells ergab ebenfalls fünf signifikante Schwingungen mit denen die Messreihe modelliert werden kann.

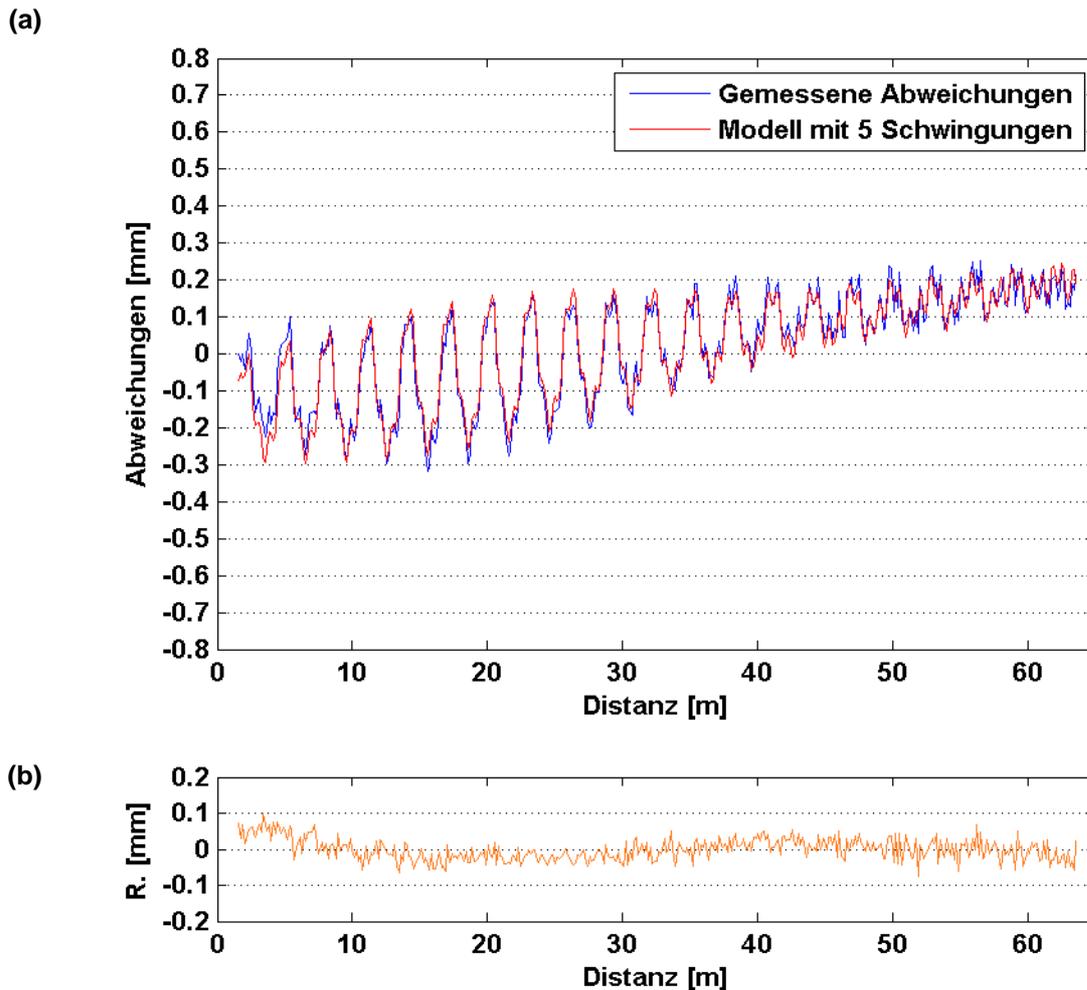


Abbildung 11-4: Leica Standardprisma  
(a) Modell des zyklischen Fehlers, (b) Residuen

Die Parameter des Modells sind in Tabelle 11-2 angegeben. Für diese Berechnung wurde der Grenzwert für die Amplituden zur Auswahl der am Modell beteiligten Schwingungen von 0,02 mm auf 0,015 mm verringert, um eine genügende Anzahl von signifikanten Schwingungen in das Modell aufzunehmen.

Tabelle 11-2: Parameter des Modells für das Leica Standardprisma

Schwingungen	Amplitude $A$ [mm]	$\sigma_A$ [mm]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	$\sigma_\lambda$ [m]	Phase $\varphi$ [deg]	$\sigma_\varphi$ [deg]
Schwingung 1	0,028	0,005	3,167	0,002	117,80	22,08
Schwingung 2	0,089	0,005	3,034	0,001	50,53	7,00
Schwingung 3	0,066	0,008	2,923	0,001	328,46	11,38
Schwingung 4	0,018	0,002	1,052	0,001	323,48	14,08
Schwingung 5	0,039	0,002	0,752	0,001	80,91	6,40
Trend						
Steigung $k$ [nm/m]	5,0	$\sigma_k$ [nm/m]	0,3			
Offset $d$ [mm]	-0,16	$\sigma_d$ [mm]	0,001			

Die Messreihe ist im Bereich ab ca. 50 m zunehmend verrauscht (siehe Abbildung 11-4a) was sich negativ auf die Güte der Modellierung auswirkt. Das zunehmende Rauschen in den Abweichungen ist auch in den Residuen zu erkennen (Abbildung 11-4b). Auch bei diesem Prisma sind Nahbereichseffekte vorhanden die im Modell nicht vollständig erfasst werden.

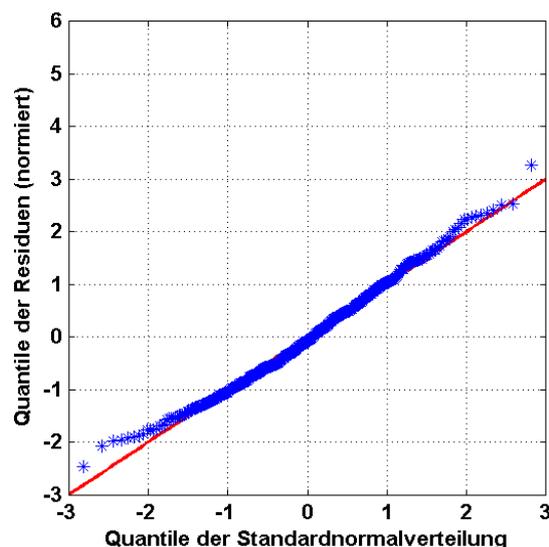


Abbildung 11-5: QQ - Plot der Residuen, Leica Standardprisma

Der QQ – Plot der Residuen (Abbildung 11-5) zeigt normalverteilte Daten mit einzelnen Ausreißern.

### 11.3 Modell aus Laborwerten für das Miniprisma Goecke

In Abbildung 11-6a ist das berechnete Modell und die Abweichungen des Miniprismas der Firma Goecke dargestellt. Bei der Berechnung des Modells ergaben sich sechs signifikanten Schwingungen.

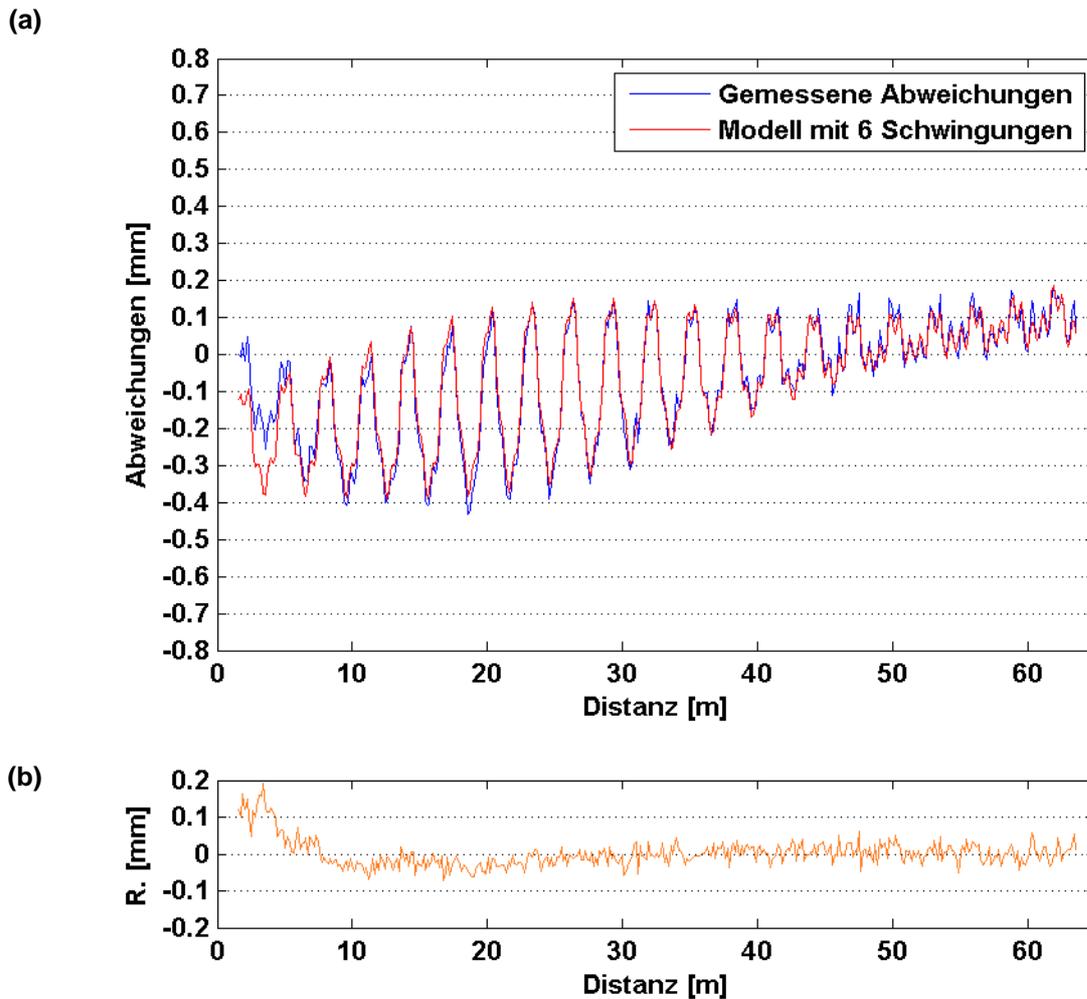


Abbildung 11-6: Miniprisma Goecke  
(a) Modell des zyklischen Fehlers, (b) Residuen

Die Parameter des Modells sind in Tabelle 11-3 angegeben. Hier wurde wieder die Schranke von 0,02 mm zur Auswahl der im ersten Iterationsschritt an der Modellberechnung beteiligten Schwingungen verwendet.

Tabelle 11-3: Parameter des Modells für das Miniprisma Goecke

Schwingungen	Amplitude $A$ [mm]	$\sigma_A$ [mm]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	$\sigma_\lambda$ [m]	Phase $\varphi$ [deg]	$\sigma_\varphi$ [deg]
Schwingung 1	0,004	0,002	0,086	0,006	155,36	76,26
Schwingung 2	0,019	0,002	1,500	0,001	321,48	16,34
Schwingung 3	0,064	0,005	3,114	0,001	99,67	7,96
Schwingung 4	0,135	0,003	2,994	0,001	26,81	6,61
Schwingung 5	0,041	0,005	2,847	0,001	231,83	16,55
Schwingung 6	0,039	0,002	0,752	0,001	82,24	7,71
Trend						
Steigung $k$ [nm/m]	6,0	$\sigma_k$ [nm/m]	0,01			
Offset $d$ [mm]	-0,24	$\sigma_d$ [mm]	0,003			

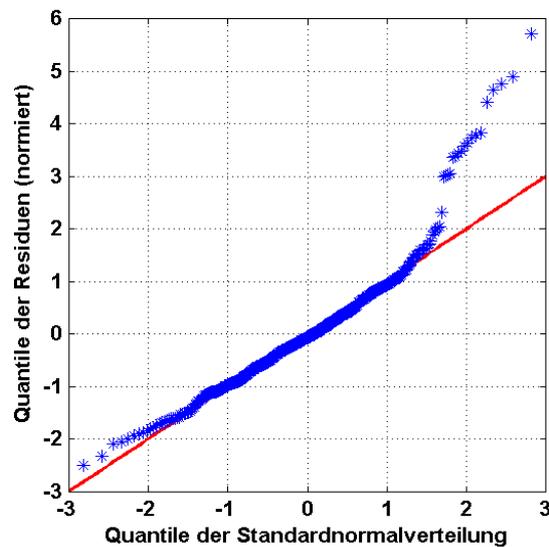


Abbildung 11-7: QQ - Plot der Residuen, Miniprisma Goecke

Die Residuen in Abbildung 11-6b spiegeln auch hier die problematische Modellierung der Messreihe im Nahbereich wieder. Auch im QQ – Plot (Abbildung 11-7) sind die großen Differenzen zwischen Modell und Messreihe in Nahbereich als Ausreißer klar zu erkennen, während für den übrigen Teil der Daten Normalverteilung angenommen werden könnte.

## 11.4 Korrektur von Feldmessungen

Die aus den Labormessungen abgeleiteten Modelle können zur Korrektur von Messungen mit dem TCA 1800 im Feld verwendet werden. Zum Beispiel für ein Präzisionsnetz im Nahbereich kann durch die Anwendung der Korrekturmodelle eine sinnvolle Genauigkeitssteigerung erreicht werden.

Bei der Verwendung der Korrekturmodelle ist jedoch Folgendes zu beachten:

- Die Korrekturmodelle dürfen nur für Distanzen kleiner 65 m eingesetzt werden, da die Labormessungen aus denen sie abgeleitet wurden nur bis zu dieser Distanz vorliegen (siehe Abschnitt 11.1).
- Zusätzlich ist zu beachten, dass bei Distanzen kleiner 10 m Nahbereichseffekte auftreten die nicht durch das Modell kompensiert werden. Hier ist mit Abweichungen von bis zu ca. 0,2 mm zu rechnen.
- 

Die Parameter der Modelle für die einzelnen Prismen sind in Tabelle 11-1 bis Tabelle 11-3 angeführt. Die Korrekturmodelle sind für orthogonal zur Visur ausgerichtete Prismen gültig.

## 12 Resümee und Zusammenfassung

Die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers von EDM Geräten wird oft mit interferometrischen Methoden auf Komparatorstrecken in Messlaboren durchgeführt. Um Kenntnisse über das Verhalten des zyklischen Fehlers bei längeren Distanzen zu erlangen, musste bisher oft auf weniger genaue Methoden zurückgegriffen werden.

Mit dem mobilen Feldkomparator FC 2009, welcher am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz entwickelt wurde, ist eine Bestimmung von Streckendifferenzen mit einer Präzision von 0,01 mm in einem Intervall von 3 m im Feld möglich. Der Feldkomparator wurde in der Masterarbeit von Paulitsch (2010) eingehend untersucht und getestet.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit bestand in der Durchführung der Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers mit dem Feldkomparator bei Distanzen bis zu 220 m. Die Bestimmung der meteorologische Korrektur für die EDM Messungen erfolgte zeitgleich über die Messung einer nahe gelegenen Referenzstrecke konstanter Länge.

Als zu untersuchendes EDM Gerät wurde ein TCA 1800 der Firma Leica Geosystems ausgewählt, da mit diesem aus der Arbeit Paulitsch (2010) schon Erfahrungswerte vorlagen und aus Untersuchungen am Horizontalkomparator des IGMS bekannt war, dass es zumindest im Bereich bis 65 m ein zyklisches Fehlerverhalten aufweist.

Da bei der von Paulitsch (2010) exemplarisch durchgeführten Feldmessung Probleme durch die temperaturbedingte Ausdehnung des Feldkomparators aufgetreten sein könnten, wurde das Messsystem für diese Arbeit erweitert und vier Pt100 Temperatursensoren am Feldkomparator angebracht. Diese Sensoren wurden im Zuge dieser Arbeit im Messlabor des IGMS mit Hilfe von Absolutthermometern kalibriert (siehe Anhang D). Bei den Messungen von Paulitsch (2010) war der Feldkomparator mittels Höhenadapter schräg Richtung Visur ausgerichtet, um die Messungen ohne ATR Anzielung durchführen zu können da auch Reflexfolien untersucht wurden. In dieser Arbeit wurden nur Prismen untersucht, durch Adaption des verwendeten Satzmessprogramms konnte der Komparator horizontal aufgestellt werden und die ATR Funktion genutzt werden.

Zusätzlich war dadurch war eine stabile und materialschonende Aufstellung des FC 2009 gewährleistet.

Die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers wurden auf den Dächern der TU Graz durchgeführt. Dort befindet sich ein Prüffeld mit stabilen Messpfeilern aus Beton, auf denen der Feldkomparator geeignet aufgebaut werden konnte. Die untersuchte Totalstation konnte mittels Säulenstativ auf den Säulen eines benachbarten Gebäudes aufgestellt werden (Kapitel 8). Die Messungen wurden bei 10 Distanzbereichen zwischen ca. 38 m und ca. 220 m Entfernung durchgeführt (siehe Tabelle 8-1). Die Untersuchung wurde mit drei verschiedenen Prismen (siehe Tabelle 8-2) durchgeführt, da vorhergehende Untersuchungen eine Abhängigkeit des zyklischen Fehlers vom verwendeten Prismentyp zeigten.

Die Auswertung der Feldkomparatormessungen bei Distanzen größer 80 m zeigt zwar signifikante zyklische Effekte, die jedoch kleiner (mehrere hundertstel Millimeter) als erwartet ausfallen. Diese treten mit der Periode des Feinmaßstabs des TCA 1800 von 3 m, und Teilen (0,75 m und 1,5 m) davon auf. Lediglich in einem überlappend gemessenen Distanzbereich (127,4 m bis 132,9 m) wurden größere Abweichungen zwischen den EDM und Feldkomparatormessungen von bis zu 1,2 mm festgestellt, was auf langwellige Einflüsse auf die EDM Messung hindeutet.

Zusätzlich zu den Feldkomparatormessungen wurden im Messlabor des IGMS Messungen am Horizontalkomparator durchgeführt, wobei die 30 m Komparatordistanz durch Umlenkung des Messstrahls mit einem Planspiegel auf 65 m verlängert wurde. In den Messergebnissen ist ein zyklischer Fehlereinfluss von ca. 0,2 mm (Leica Standardprisma) bis ca. 0,7 mm (Miniprisma Geodäsie Austria) vorhanden. Aus diesen Messungen wurde für jedes Prisma ein mathematisches Korrekturmodell für den zyklischen Fehler berechnet. Die Korrekturmodelle können für Distanzen von ca. 10 m bis 65 m verwendet werden (Kapitel 11).

Eine Erweiterung der Modelle auf längere Distanzen mit den Daten aus den Feldkomparatormessungen ist aufgrund der nicht vorhandenen, und auch nicht leicht ableitbaren, Absolutwerte für die Feldmessungen nicht sinnvoll, insbesondere da zumeist nur kleine zyklische Effekte auftreten.

Um langwellige Fehlereinflüsse mit Perioden von Vielfachen des Feinmaßstabs aufdecken zu können, müssten Messungen mit mehreren überlappenden Komparatorstrecken durchgeführt werden. Dies ist im Messgebiet auf den Dächern der TU Graz jedoch nicht möglich.

Moderne EDM Geräte wie auch der TCA 1800 besitzen eine geräteinterne Korrektur für den zyklischen Fehler (Leica, 2008, S. 9). Somit sind bei Untersuchungen wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurden nur mehr Resteffekte feststellbar. Eine Modellierung dieser mit physikalisch interpretierbaren Parametern ist schwierig zu bewerkstelligen. Die großen Abweichungen der überlappenden Messreihen bei 127,4 m bis 132,9 m deuten auf eine mögliche Schwäche der geräteinternen Korrektur bei diesen Distanzen hin, wobei aber auch diese Werte unter der Genauigkeitsangabe des Herstellers von  $\pm 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$  liegen.

Für die Aufstellung des mobilen Feldkomparators ist ein stabiler Messpfeiler von Vorteil, ebenso muss das zu untersuchende EDM Gerät entsprechend stabil aufgebaut sein. Eine EDM Prüfstrecke wäre ideal für die Durchführung zukünftiger Messungen mit dem Feldkomparator. Bei mit übergeordneter Genauigkeit bekannten Distanzen zwischen den Messpfeilern einer Prüfstrecke wäre auch das Problem der Absolutwerte für die gemessenen Komparatorstrecken einfach zu lösen. Eine Überprüfung mit dem FC 2009 kann aber auch so nur Stichprobenartig bei einigen Distanzen erfolgen. Um gezielte Untersuchungen in bestimmten Distanzbereichen durchführen zu können, wären Informationen über die geräteinterne Korrektur des zyklischen Fehlers von Vorteil.

## Referenzen

Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Wichmann, Heidelberg, 426 Seiten

Fischer U. et al. (2008) Tabellenbuch Metall. Verlag Europa Lehrmittel, Haan - Gruiten, 432 Seiten

Fleckl, J. (2007): Präzisionsbestimmung des Prüffeldes „Dach Steyrergasse 30“ zur Überprüfung von geodätischen Instrumenten. Unpublizierte Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 122 Seiten

Grurl, F. (2010): Geometrische Überprüfung des Feldkomparators FC 2009 zur Bestimmung von zyklischen Fehlern bei EDM – Geräten. Unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 109 Seiten

Hartung, J. (2005): Statistik, Lehr und Handbuch der angewandten Statistik. 14 Auflage, Oldenbourg, München, 795 Seiten

Heidenhain (2012) [online] Positionsanzeigen, Längenmessgeräte für handbediente Werkzeugmaschinen

[http://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/208864-1D\\_Positionsanzeigen\\_LMG\\_fuer\\_handb\\_WM\\_07-2012\\_de.pdf/](http://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/208864-1D_Positionsanzeigen_LMG_fuer_handb_WM_07-2012_de.pdf/)

Zugriff im November 2012

IUGG (1999) [online] XXII General Assembly, Birmingham

<http://www.iugg.org/assemblies/1999birmingham/1999crendus.pdf>

Zugriff im März 2012

---

Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage, Wichmann, Heidelberg, 526 Seiten

Kahmen, H. (1977): Elektronische Messverfahren in der Geodäsie, Wichmann, Karlsruhe, 406 Seiten

Land Steiermark (2012) [online] Geografisches Informationssystem Steiermark

<http://www.gis.steiermark.at/>

Zugriff im Februar 2012

Leica (2008) [online] Leica Reporter 58

[http://www.leica-geosystems.at/at/de/Reporter\\_58\\_741803\\_de.pdf](http://www.leica-geosystems.at/at/de/Reporter_58_741803_de.pdf)

Zugriff im November 2012

Lesjak, R. (2007): Entwicklung einer Datenerfassungssoftware für den LEICA TCA 1800 als Vorbereitung für ein automatisches Deformationsmesssystem. Unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 51 Seiten

NASA [online] JPL HORIZONS *on-line* solar system data and ephemeris computation service

<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

Zugriff im Juli 2012

Newport (2013, a) [online] Broadband Metallic Mirrors Specifications

[http://www.newport.com/Broadband-MetallicMirrors/141088/1033/info.aspx#tab\\_Specifications](http://www.newport.com/Broadband-MetallicMirrors/141088/1033/info.aspx#tab_Specifications)

Zugriff im Februar 2013

---

Newport (2013, b) [online] Optical Power and Energy Meter Selection Guide

<http://www.newport.com/Low-Power-Sensors-Selection-Guide/139601/1033/content.aspx>

Zugriff im Februar 2013

Newport (2013, c) [online] Low-Cost Calibrated Photodiode Sensors

<http://www.newport.com/818-L-Series-Low-Cost-Calibrated-Photodiode-Senso/825082/1033/info.aspx>

Zugriff im Februar 2013

Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. 2. Auflage, de Gruyter, Berlin, 493 Seiten

Paulitsch, J. (2010): Untersuchung des mobilen Feldkomparators FC 2009 für die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers von EDM Geräten. Unpublizierte Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 134 Seiten

Rüeger, J. M. (1996): Electronic Distance Measurement: An Introduction. Fourth Edition, Springer, Berlin, 276 Seiten

Rüeger, J. M., Covell, P. C. (1980): Zur Konstanz und Vielfältigkeit zyklischer Fehler in elektrooptischen Distanzmessern. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 78, S. 261 - 267.

Schmidt, H. (2004): [online ] Berechnung von Kalibrier- und Korrektionsfunktionen

<http://www.gia.rwth-aachen.de/Forschung/AngwStatistik/kalibrierung/node3.html>

Zugriff im Mai 2011

Schwarz, W (1981): Kalibrierung elektrooptischer Distanzmesser. Vermessungswesen und Raumordnung, 43, Heft 2, S. 77 - 85

## Anhang A: Ergebnisse der weiteren Feldkomparatormessungen

In Abbildung A-1 bis Abbildung A-30 sind die Ergebnisse aller Messungen, bis auf die in Abschnitt 9.3 behandelten überlappenden Messreihen, dargestellt. Die Messreihen sind nach ansteigenden Distanzen geordnet. Gezeigt werden die Einzelmessungen pro Komparatorposition und die daraus berechneten robusten Mittelwerte. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind alle Messreihen in gleicher Skalierung dargestellt. Bei manchen Messreihen treten Ausreißer auf die außerhalb des Plotbereichs liegen, diese sind durch einen roten Pfeil an der Komparatorposition markiert, rechts daneben ist die Anzahl der Ausreißer angegeben.

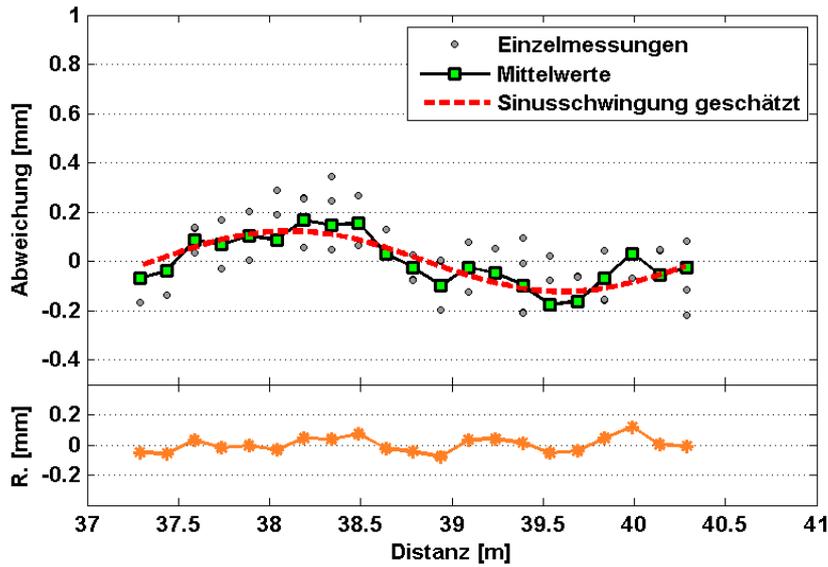
Zusätzlich sind die, in Abschnitt 9.1 beschriebenen, aus den Mittelwerten berechneten Modelle abgebildet. In Teil a der Abbildungen ist jeweils das Modell 1 mit einer geschätzten Sinusfunktion mit einer konstanten Wellenlänge  $\lambda = 3,000$  m dargestellt. Teil b zeigt Modell 2, dieses besteht aus der Überlagerung von zwei Sinusschwingungen mit den fixen Wellenlängen  $\lambda_1 = 3,000$  m und  $\lambda_2 = 0,750$  m. In Teil c der Abbildungen ist das Modell 3, welches aus drei Sinusschwingungen mit den Wellenlängen  $\lambda_1 = 3,00$  m,  $\lambda_2 = 0,750$  m und  $\lambda_3 = 1,500$  m zusammengesetzt ist, dargestellt. Die Amplituden und Phasen der geschätzten Modellfunktionen sind jeweils rechts in Tabellenform angegeben.

Tabelle A-1 gibt eine Übersicht der Messungen mit dem Feldkomparator. Wie in Abschnitt 8.6 erwähnt, ergab sich die Wiederholungsmessung mit dem Miniprisma Geodäsie Austria bei 94 m und die zweite Wiederholung mit dem Leica Standardprisma bei 153 m aus praktischen Gründen. Der Aufbau des Feldkomparators ist aufwändiger als die Messung selbst, deshalb wurden diese Prismen nochmals gemessen wenn der Komparator an verschiedenen Tagen auf derselben Messstrecke wie schon zuvor aufgebaut wurde. Die Messungen bei 153 m wurden mit allen Prismen mehrmals durchgeführt.

Tabelle A-1: Übersicht der Messungen

MR #	Distanz [m]	Datum der Messung	Prisma	Bemerkung
1	37	17. 04. 2012	Goecke	
2	37	17. 04. 2012	Geodäsie Austria	
3	37	17. 04. 2012	Leica	
4	51	03. 06. 2012	Goecke	
5	51	03. 06. 2012	Geodäsie Austria	
6	51	03. 06. 2012	Leica	
7	55	03. 06. 2012	Goecke	
8	55	03. 06. 2012	Geodäsie Austria	
9	55	03. 06. 2012	Leica	
10	82	02. 06. 2012	Goecke	
11	82	02. 06. 2012	Geodäsie Austria	
12	82	02. 06. 2012	Leica	
13	94	02. 04 2012	Goecke	
14	94	28. 03. 2012	Geodäsie Austria	
15	94	02. 04 2012	Geodäsie Austria	Wiederholung MR #14
16	94	12. 04. 2012	Leica	
17	104	12. 04. 2012	Goecke	
18	104	12. 04. 2012	Geodäsie Austria	
19	104	12. 04. 2012	Leica	
20	153	10. 04. 2012	Goecke	unbrauchbare Messung
21	153	23. 04. 2012	Goecke	Wiederholung MR #20
22	153	10. 04. 2012	Geodäsie Austria	
23	153	23. 04. 2012	Geodäsie Austria	Wiederholung MR #22
24	153	05. 04. 2012	Leica	
25	153	10. 04. 2012	Leica	1. Wiederholung MR #24
26	153	23. 04. 2012	Leica	2. Wiederholung MR #24
27	216	10. 04. 2012	Goecke	
28	216	10. 04. 2012	Geodäsie Austria	
29	216	10. 04. 2012	Leica	
30	127	16. 04. 2012	Goecke	überlappend
31	129	13. 04. 2012	Goecke	überlappend
32	127	16. 04. 2012	Geodäsie Austria	überlappend
33	129	13. 04. 2012	Geodäsie Austria	überlappend
34	127	16. 04. 2012	Leica	überlappend
35	129	13. 04. 2012	Leica	überlappend

(a)

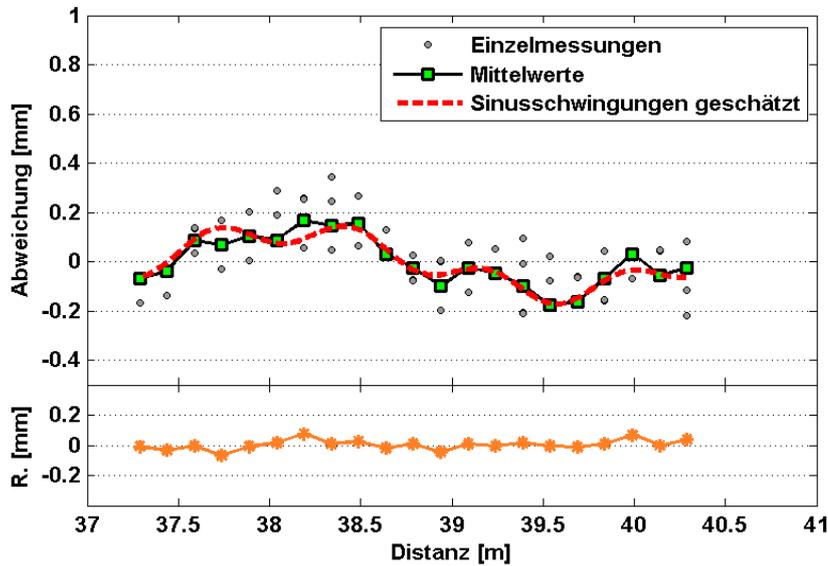


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,123	81,5	✓

(b)

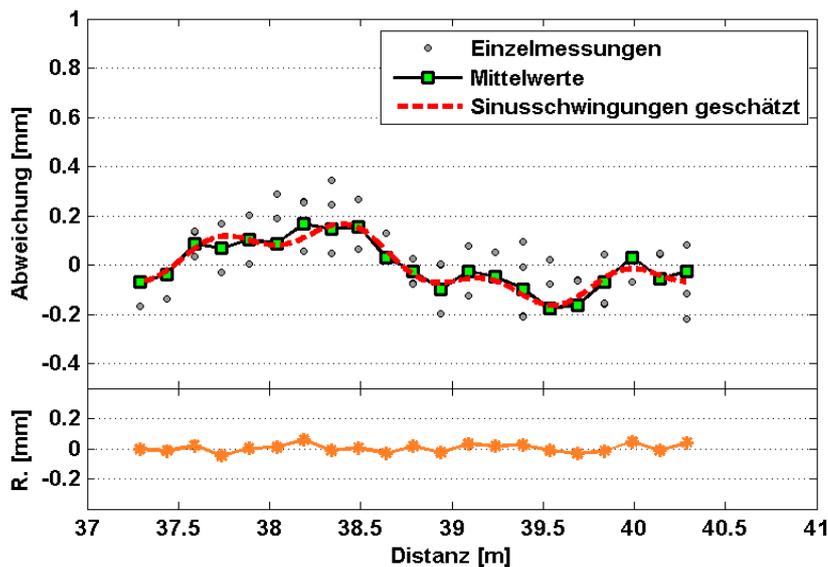


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,123	81,5	✓
0,750	0,050	72,9	✓

(c)



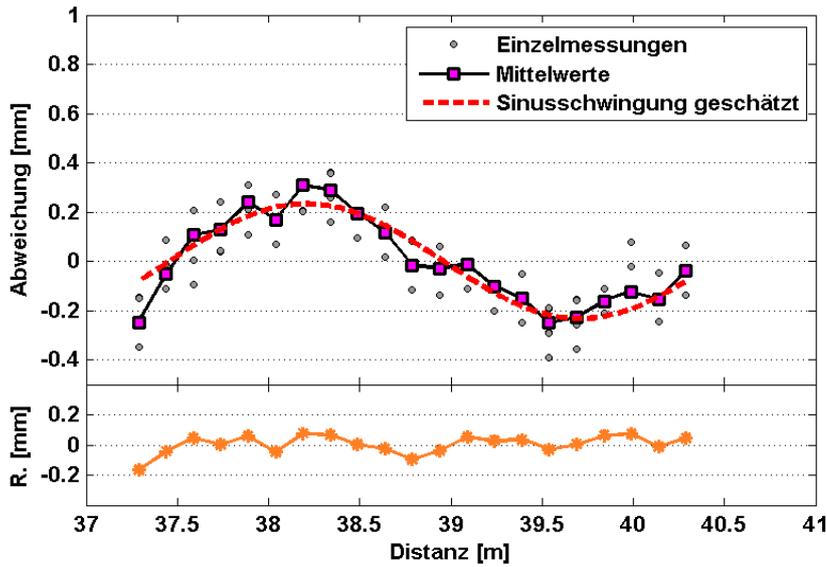
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,123	81,5	✓
0,750	0,050	72,9	✓
1,500	0,025	12,9	✓

Abbildung A-1: Miniprisma Goecke, Distanz 37 m (MR #1)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

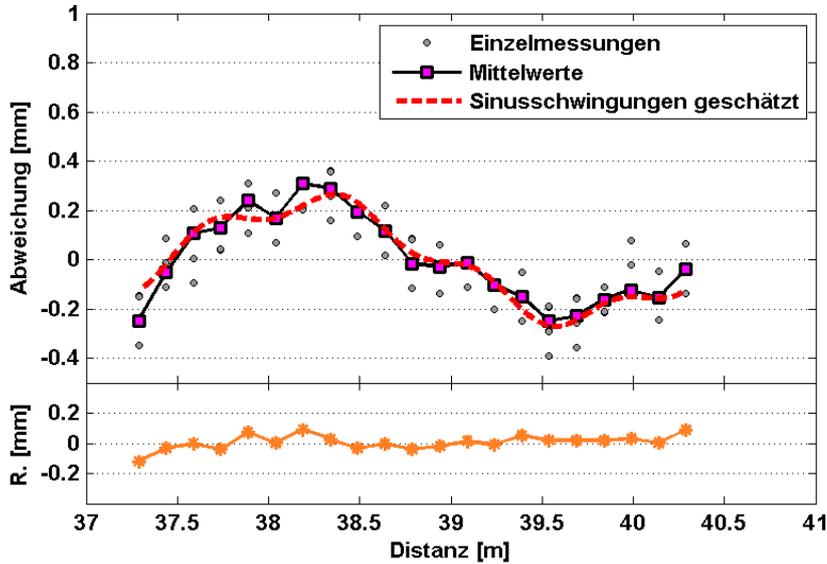


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,233	69,8	✓

(b)

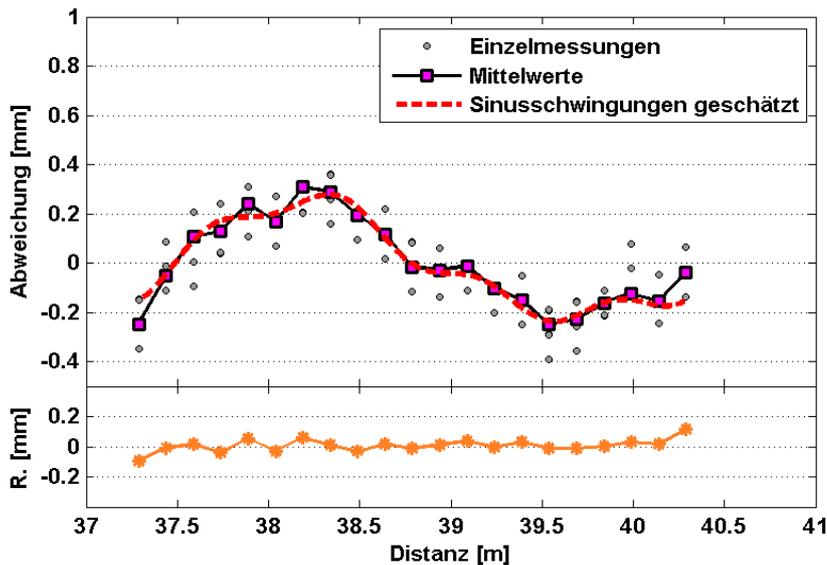


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,232	70,9	✓
0,750	0,050	2,4	✗

(c)



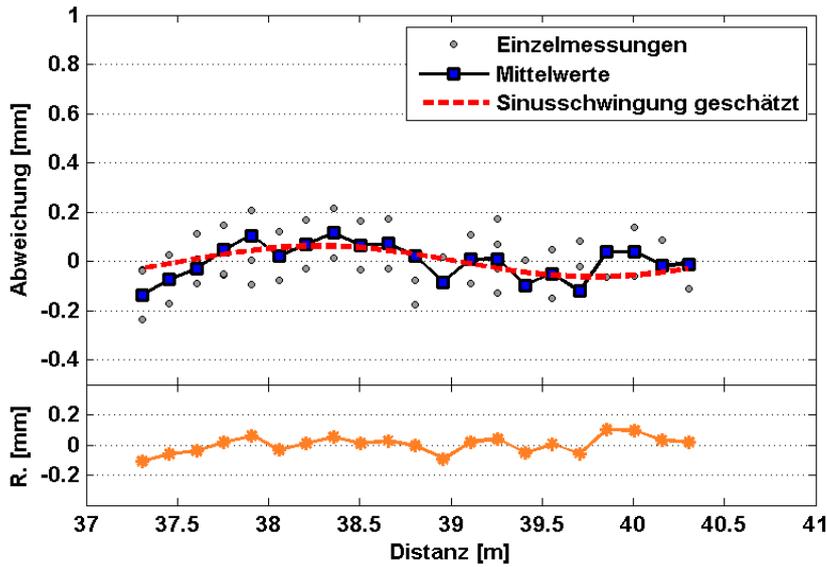
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,231	71,5	✓
0,750	0,048	2,5	✗
1,500	0,032	72,5	✗

Abbildung A-2: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 37 m (MR #2)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

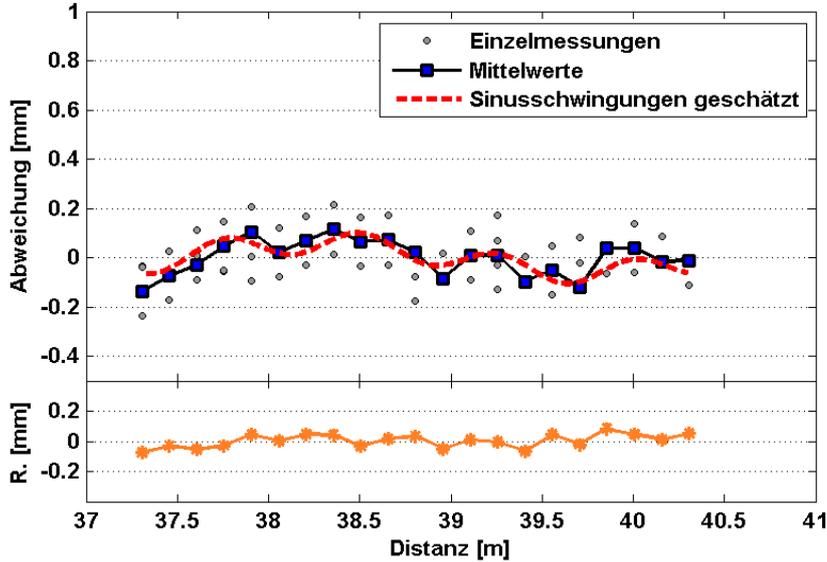


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,063	63,1	✗

(b)

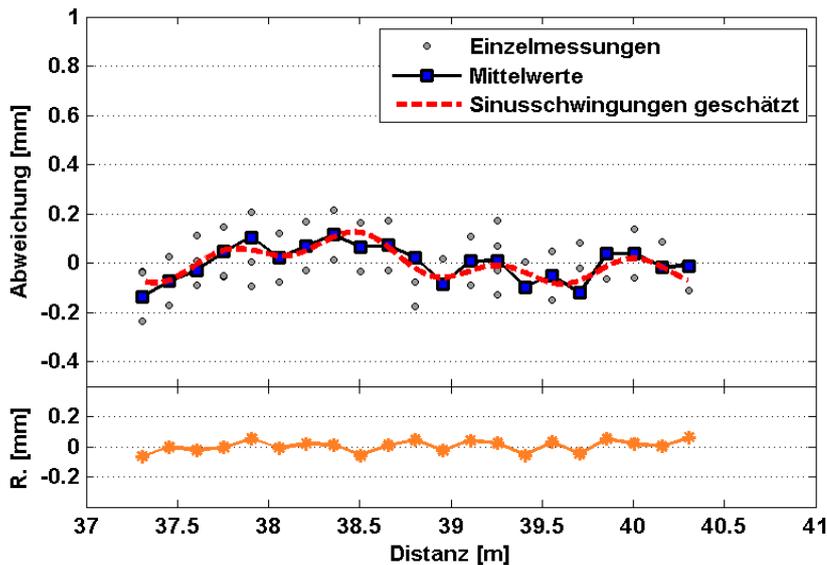


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,061	65,9	✓
0,750	0,046	3,6	✗

(c)



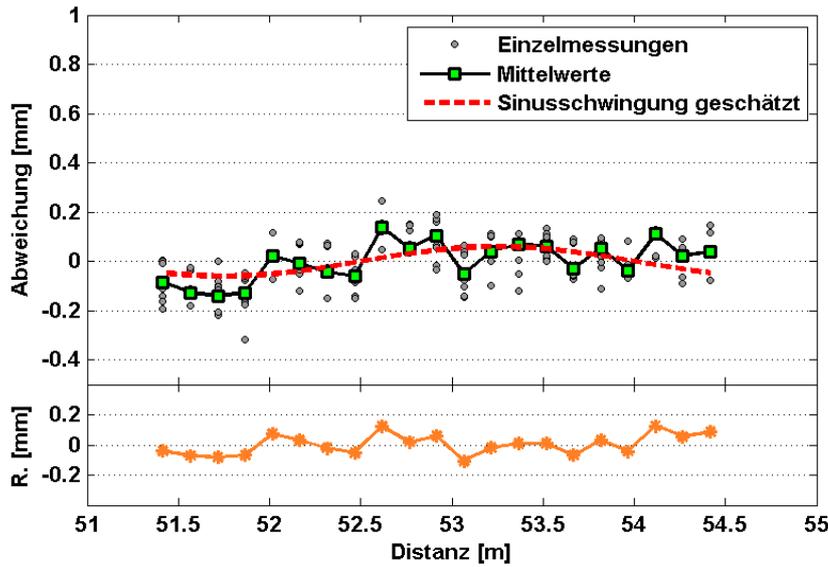
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,061	66,7	✓
0,750	0,046	52,9	✓
1,500	0,032	20,3	✗

Abbildung A-3: Leica Standardprisma, Distanz 37 m (MR #3)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

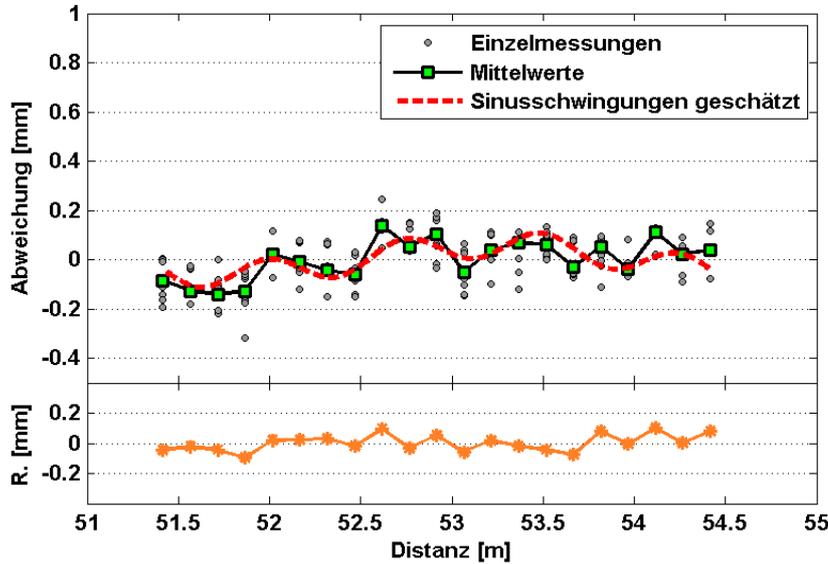


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,060	49,6	✗

(b)

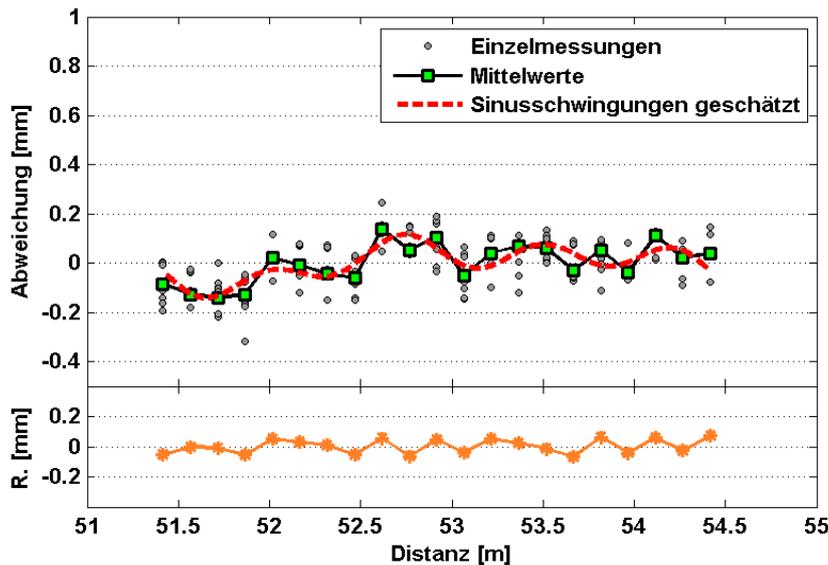


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,060	50,0	✗
0,750	0,054	83,4	✗

(c)



Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,060	50,3	✗
0,750	0,054	84,0	✗
1,500	0,040	80,2	✗

Abbildung A-4: Miniprisma Goecke, Distanz 51 m (MR #4)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

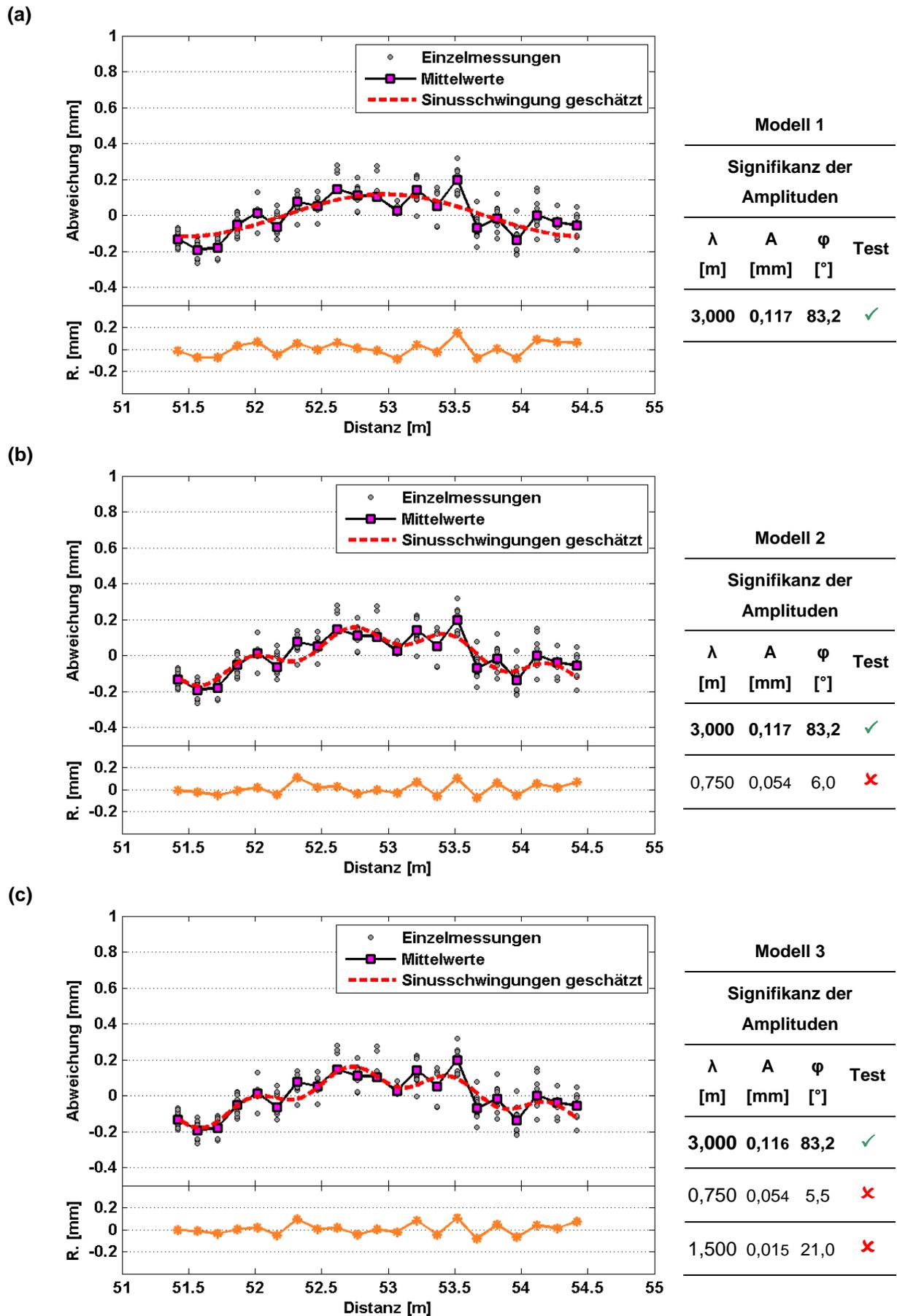
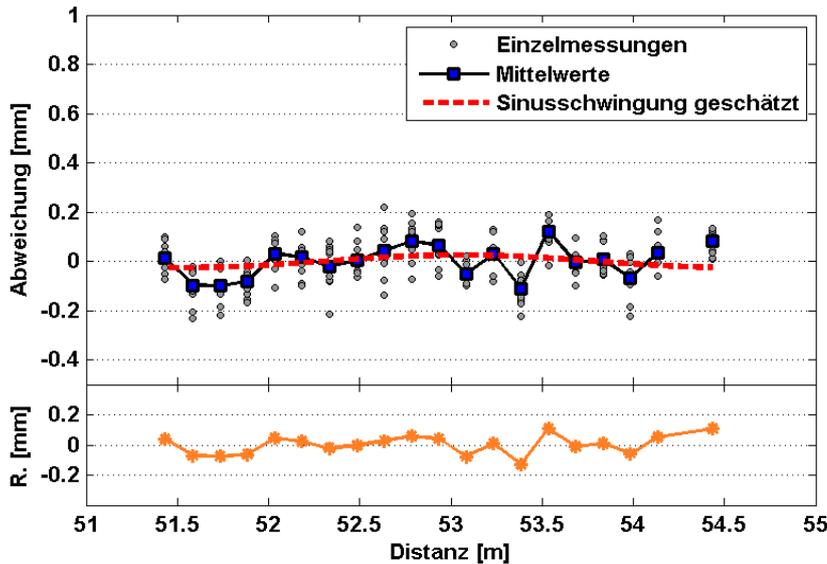


Abbildung A-5: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 51 m (MR #5)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

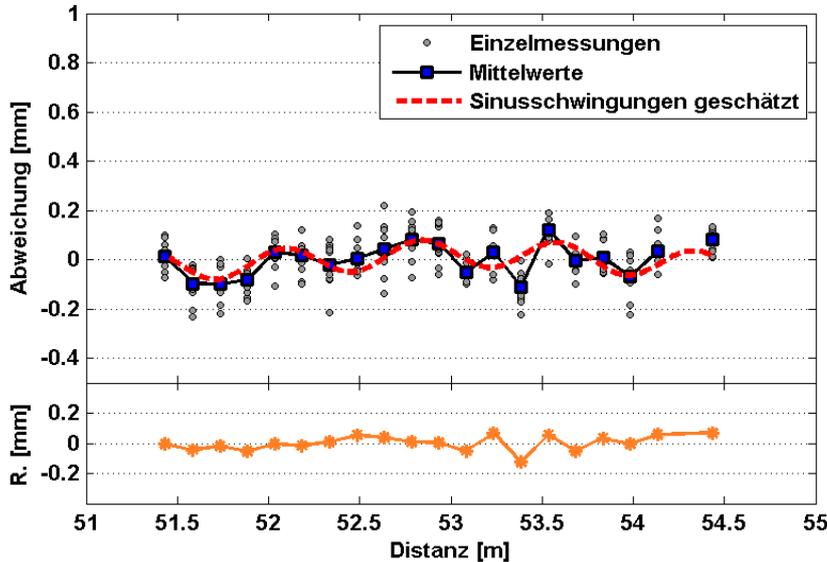


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,025	76,0	✗

(b)

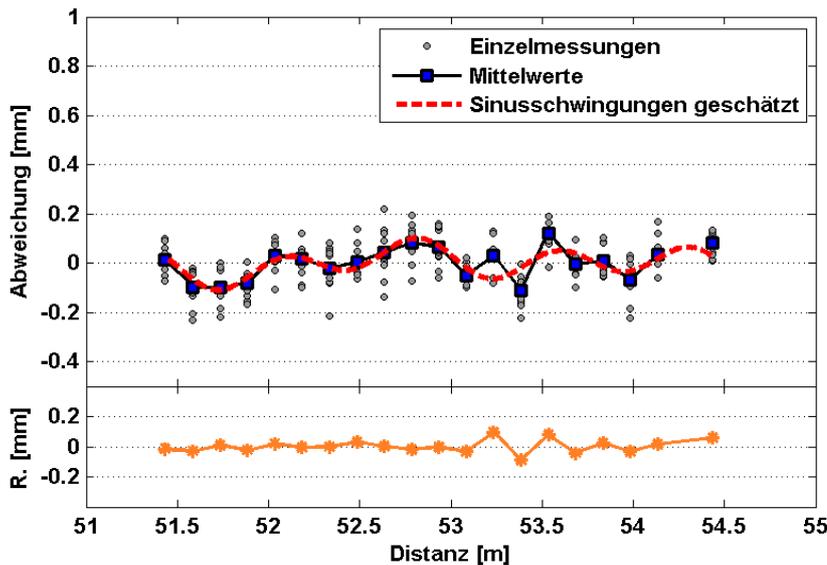


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,025	71,7	✗
0,750	0,057	46,8	✗

(c)



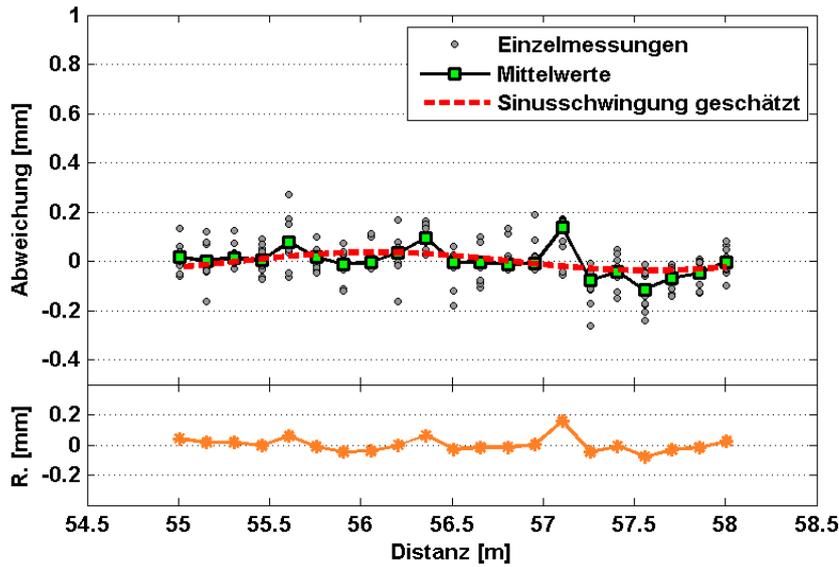
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,023	67,9	✗
0,750	0,059	48,9	✓
1,500	0,035	75,4	✗

Abbildung A-6: Leica Standardprisma, Distanz 51 m (MR #6)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

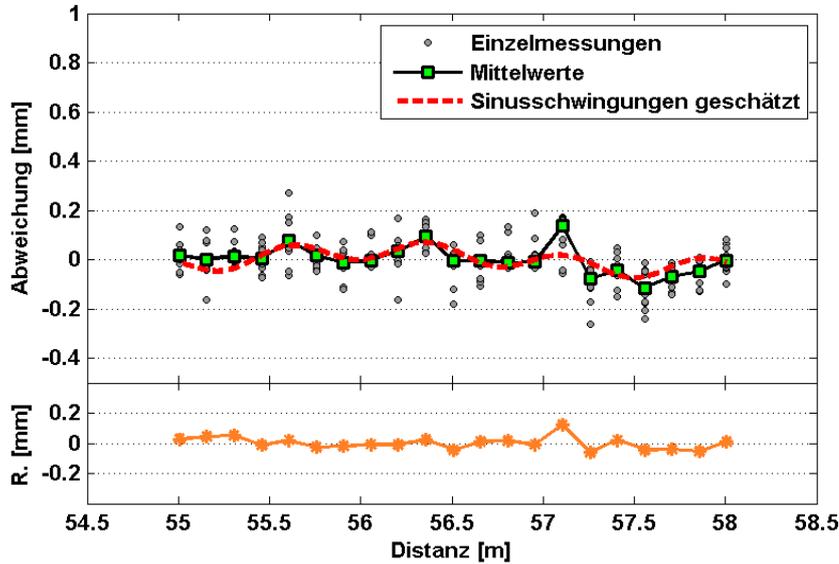


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,037	50,9	✗

(b)

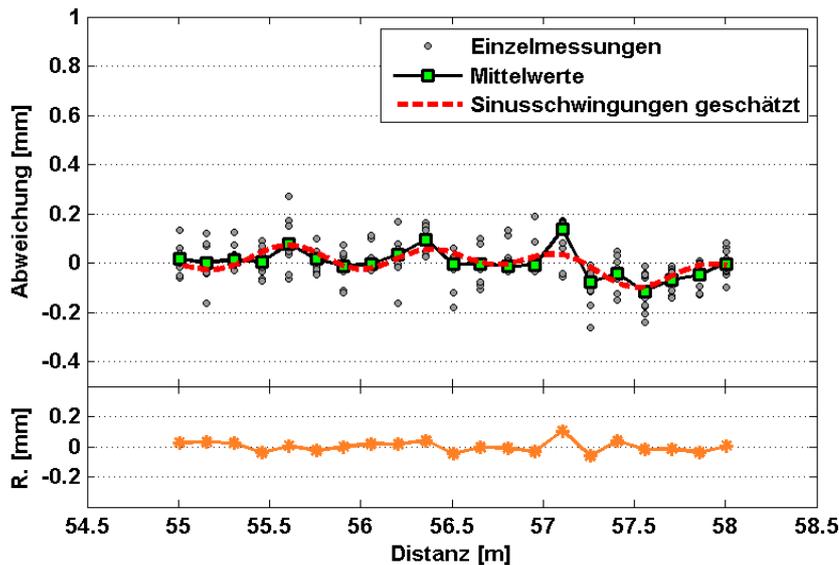


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,038	49,3	✗
0,750	0,038	67,0	✗

(c)



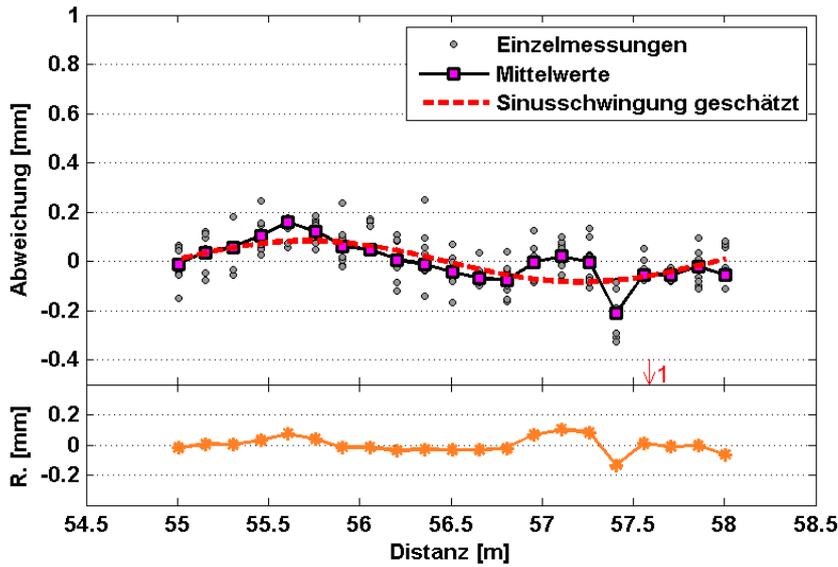
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,038	49,1	✓
0,750	0,037	67,2	✓
1,500	0,027	3,2	✗

Abbildung A-7: Miniprisma Goecke, Distanz 55 m (MR #7)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

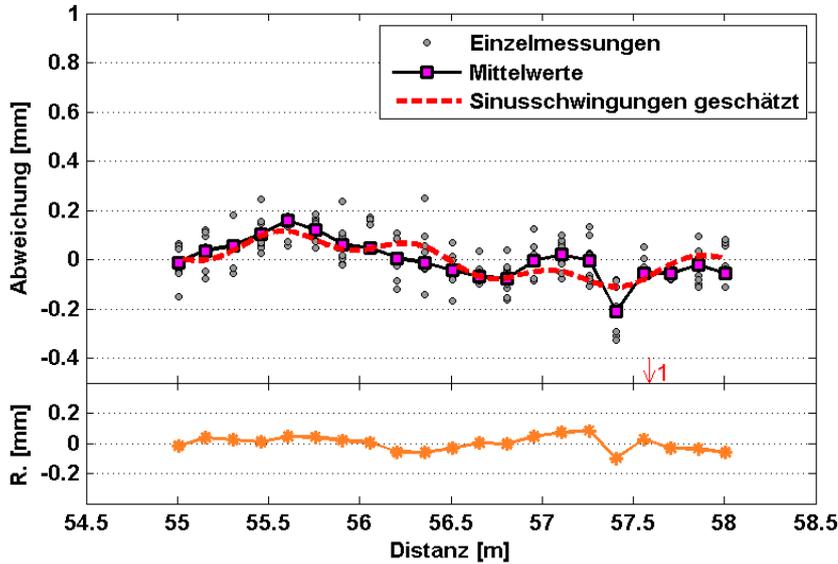


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,084	5,4	✓

(b)

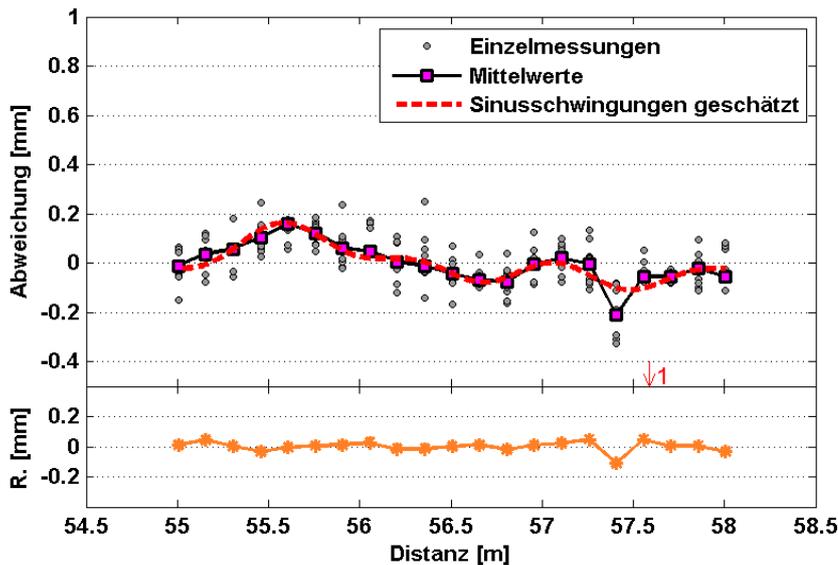


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,084	5,5	✓
0,750	0,036	3,8	✗

(c)



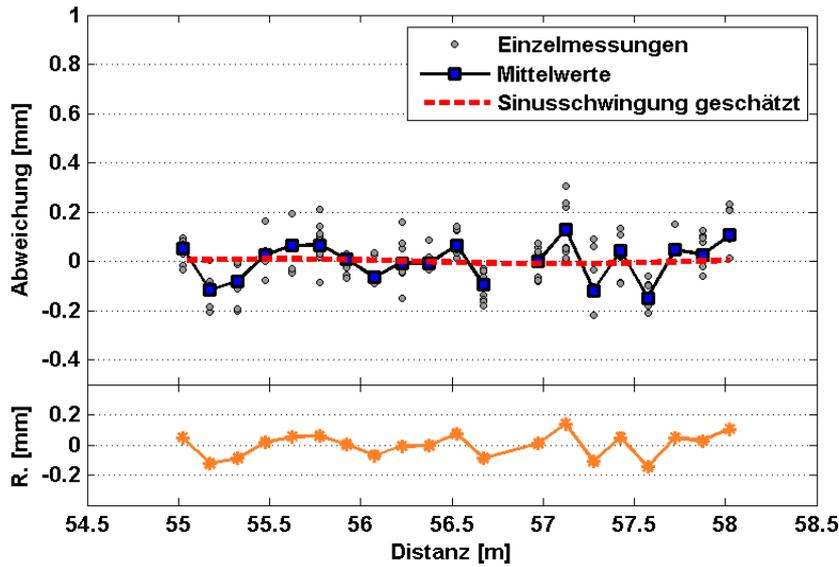
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,084	7,4	✓
0,750	0,036	89,3	✓
1,500	0,046	43,8	✓

Abbildung A-8: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 55 m (MR #8)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

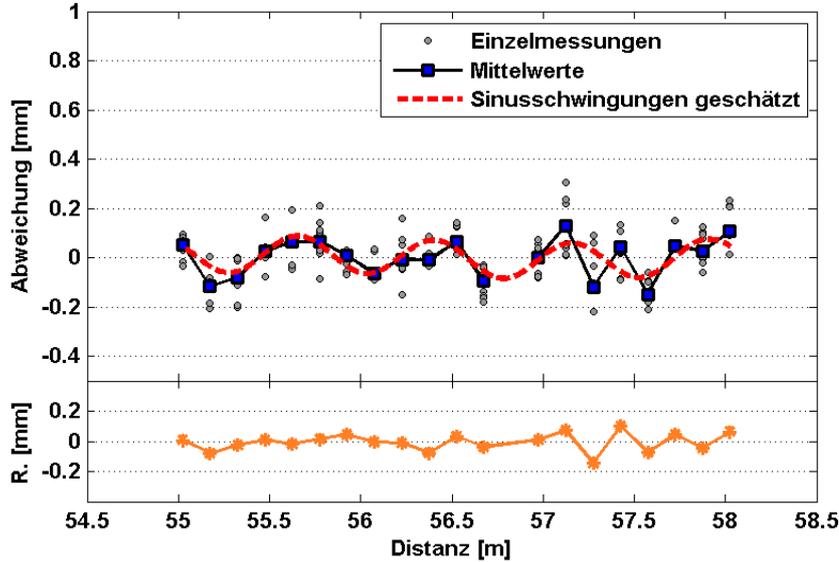


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,010	25,3	✗

(b)

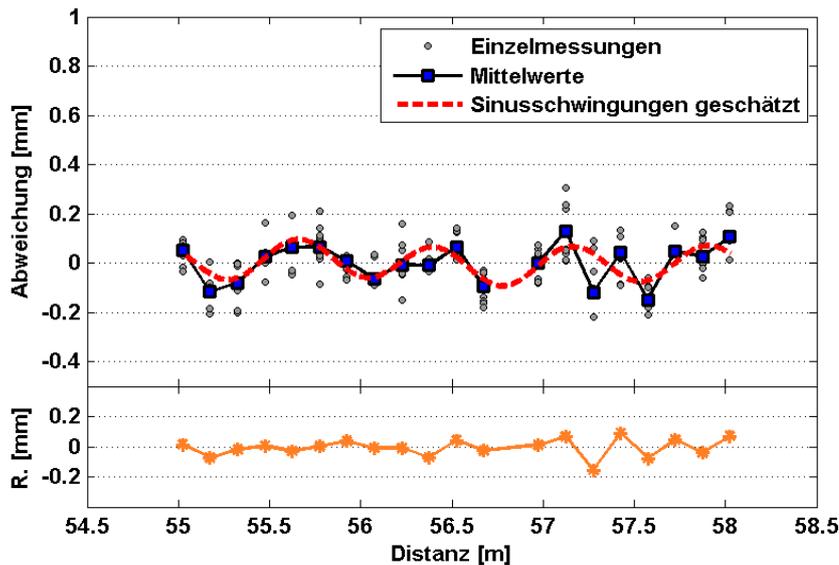


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,014	24,2	✗
0,750	0,073	57,2	✗

(c)



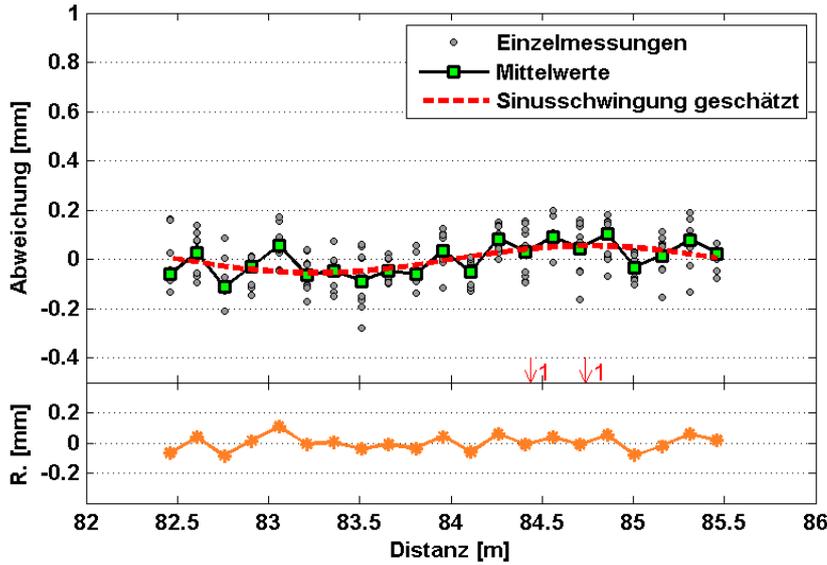
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,015	28,0	✗
0,750	0,074	56,5	✗
1,500	0,010	77,5	✗

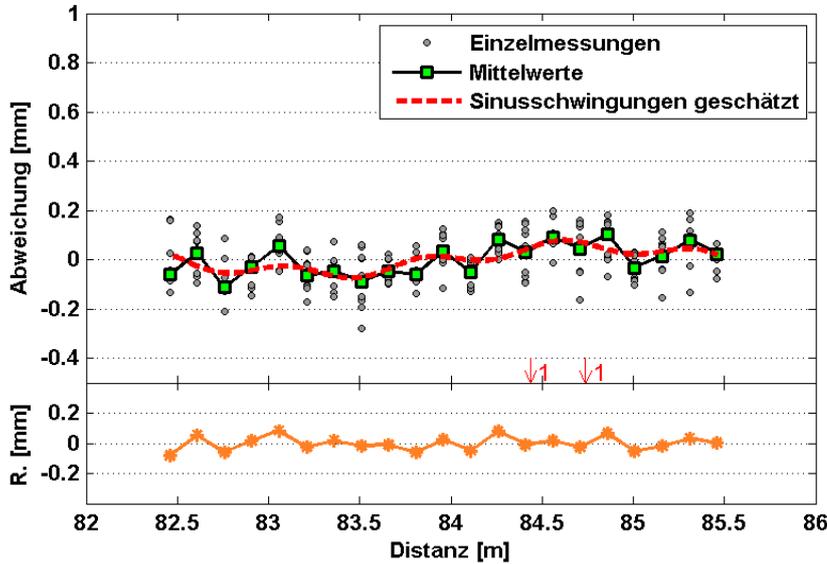
Abbildung A-9: Leica Standardprisma, Distanz 55 m (MR #9)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)



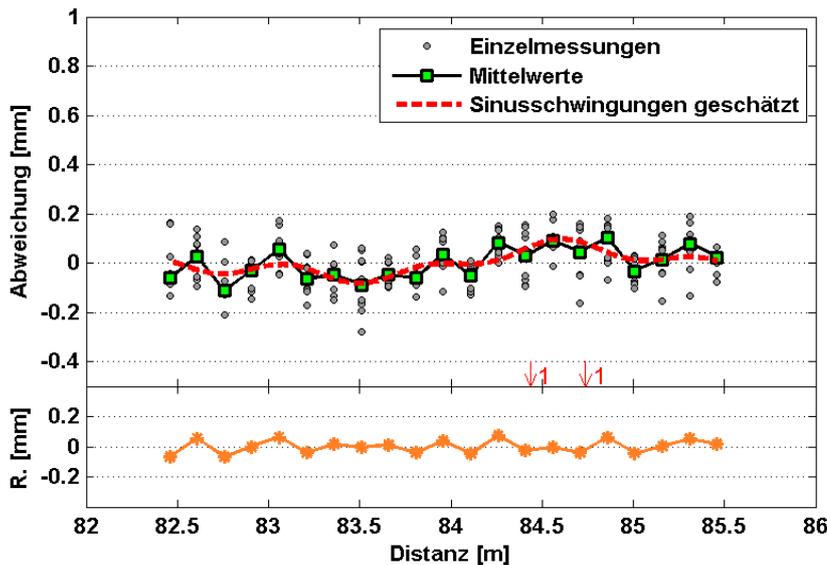
Modell 1			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,055	84,2	✓

(b)



Modell 2			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,055	85,7	✓
0,750	0,026	50,1	✗

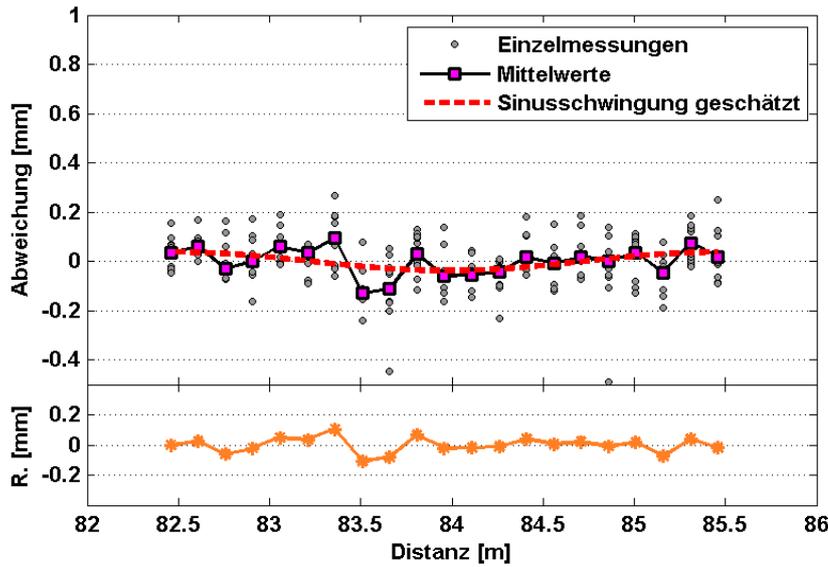
(c)



Modell 3			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,055	84,5	✓
0,750	0,027	48,1	✗
1,500	0,020	46,0	✗

Abbildung A-10: Miniprisma Goecke, Distanz 82 m (MR #10)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

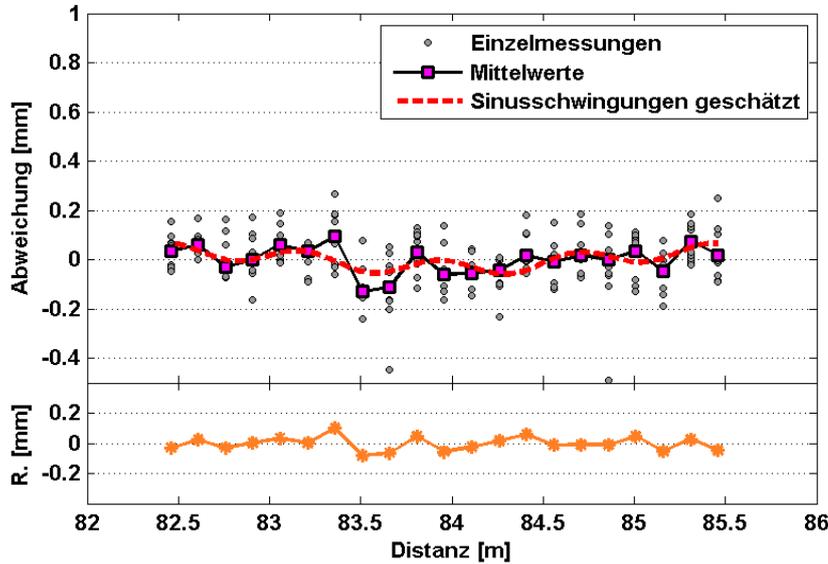


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,038	88,1	✓

(b)

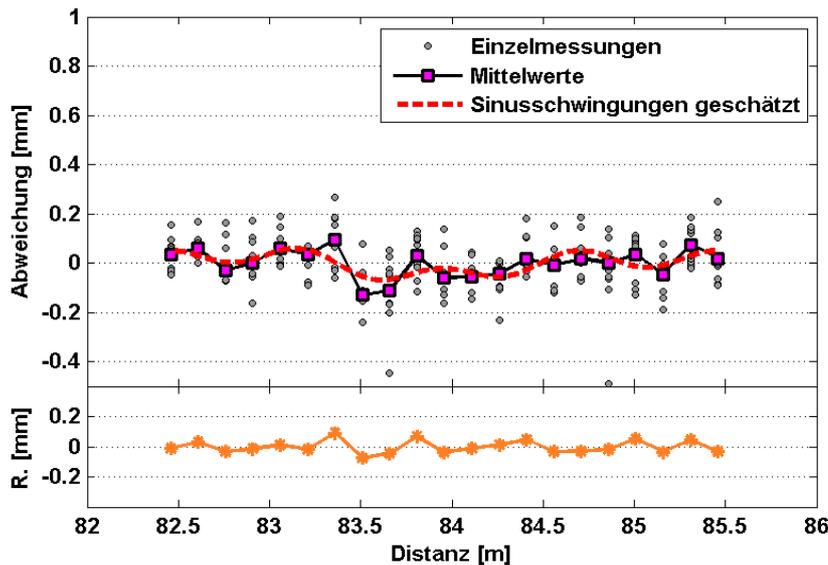


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,035	88,0	✓
0,750	0,032	12,2	✓

(c)



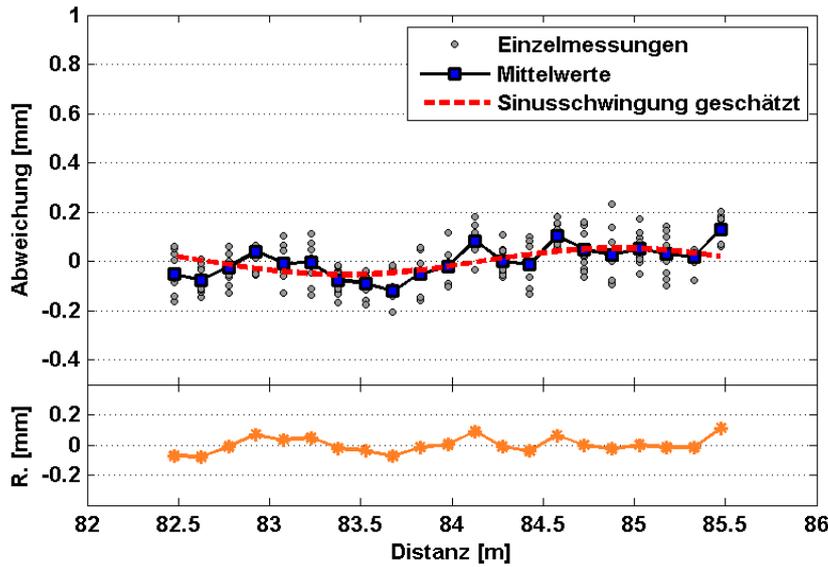
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,037	88,1	✓
0,750	0,033	11,6	✓
1,500	0,022	28,8	✗

Abbildung A-11: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 82 m (MR #11)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

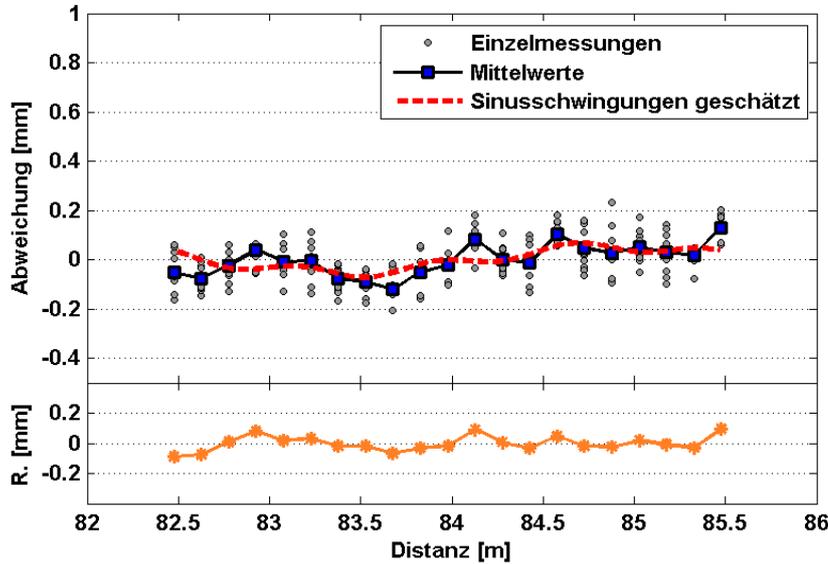


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,053	68,0	✓

(b)

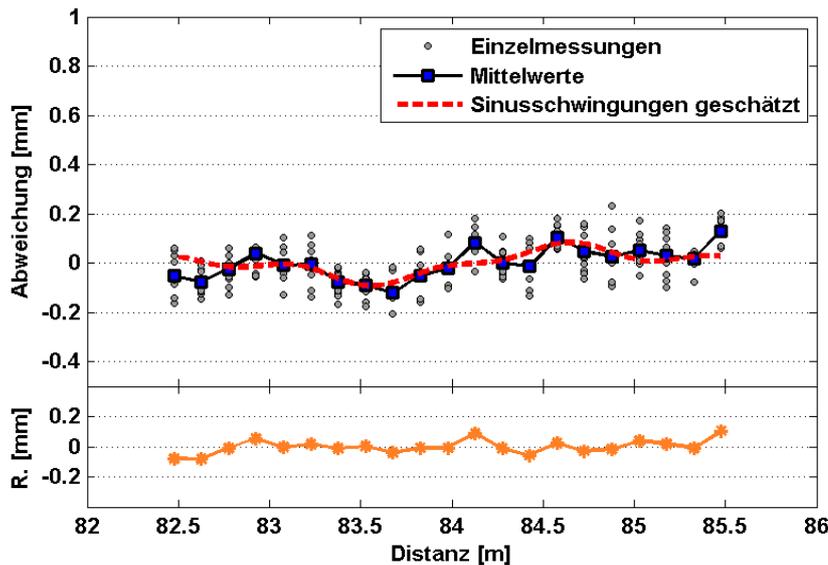


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,053	69,6	✓
0,750	0,020	29,8	✗

(c)



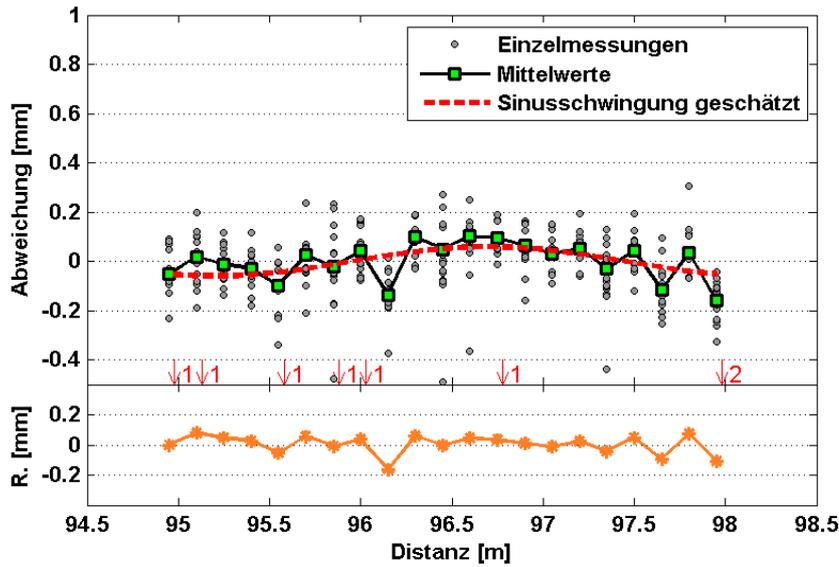
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,054	68,7	✓
0,750	0,021	28,6	✗
1,500	0,026	66,7	✗

Abbildung A-12: Leica Standardprisma, Distanz 82 m (MR #12)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

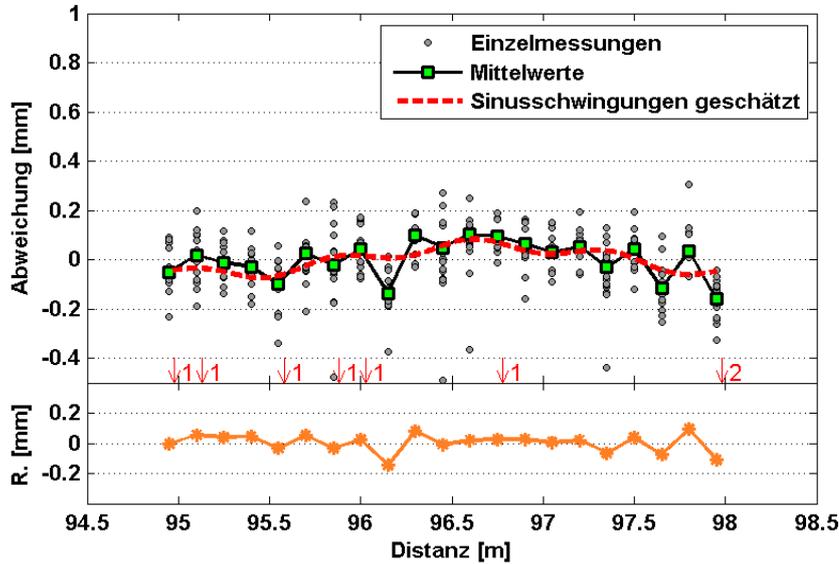


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,059	59,8	✗

(b)

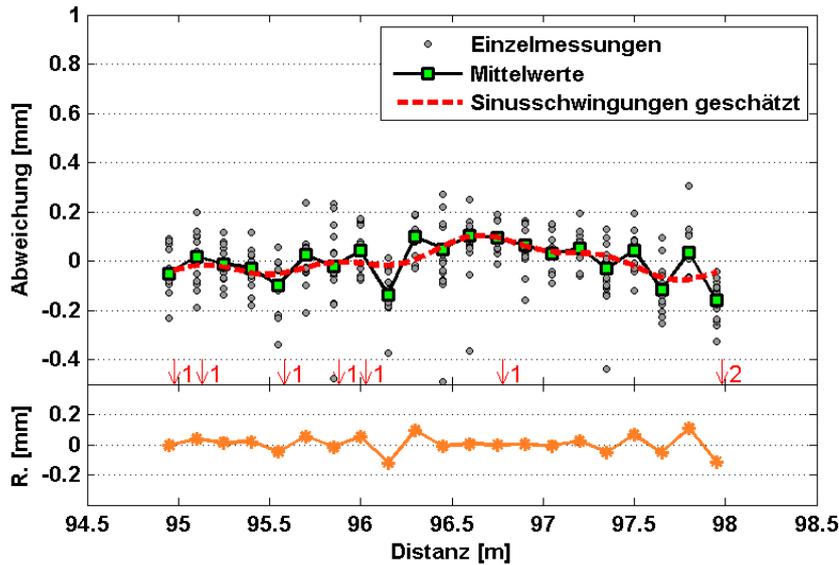


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,060	60,0	✗
0,750	0,024	11,5	✗

(c)



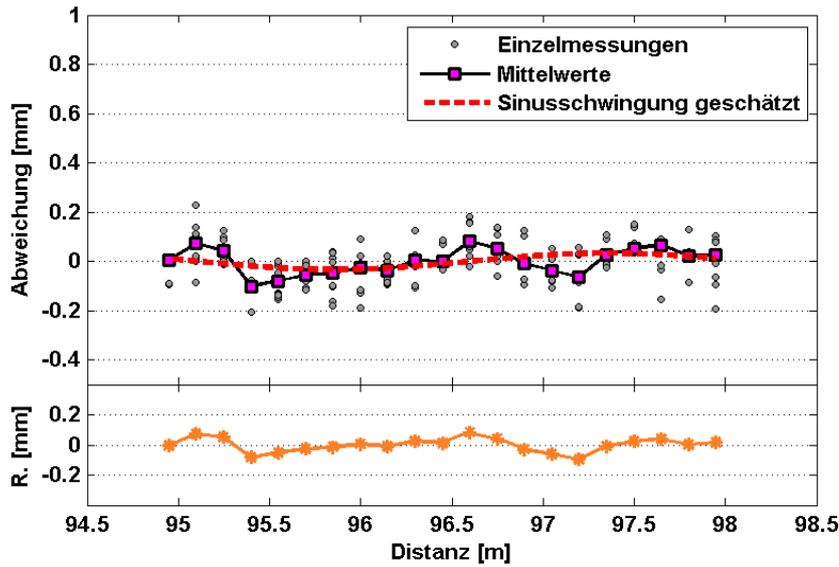
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,060	60,1	✗
0,750	0,024	11,2	✗
1,500	0,026	3,9	✗

Abbildung A-13: Miniprisma Goecke, Distanz 94 m (MR #13)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

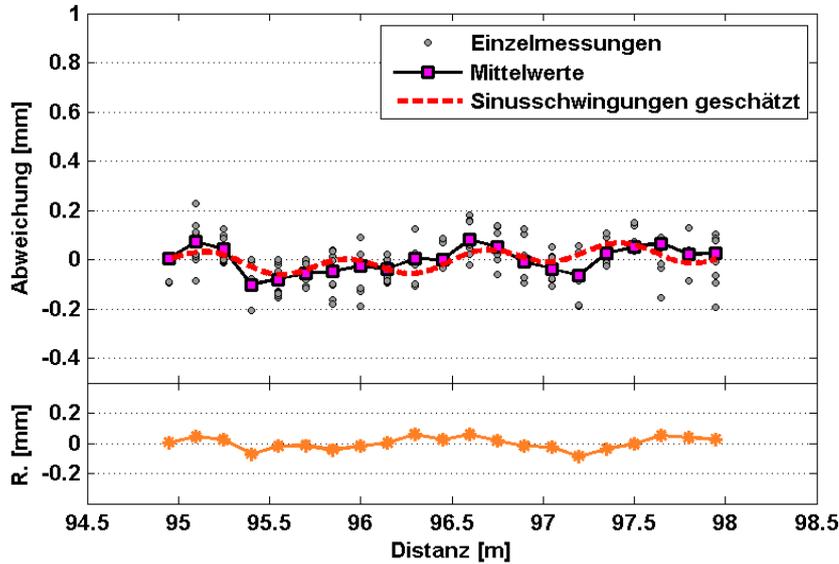


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,033	70,9	✗

(b)

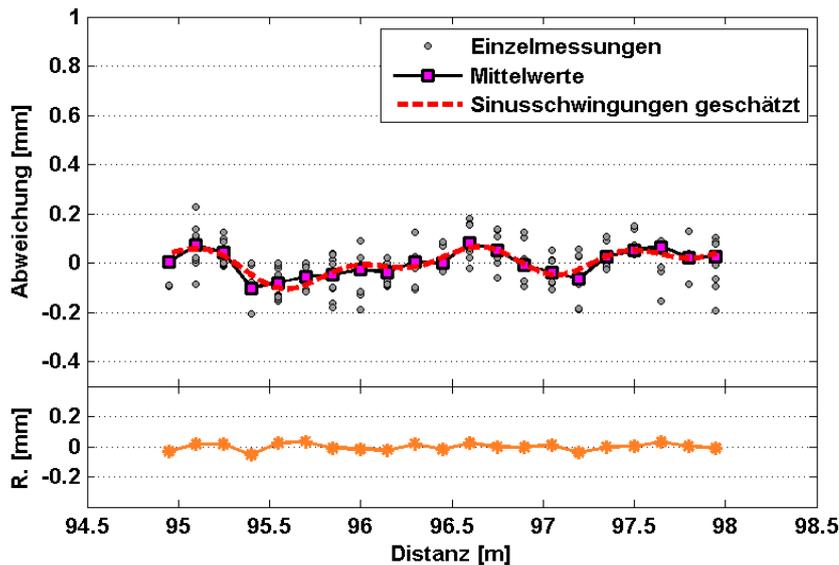


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,034	69,4	✗
0,750	0,035	72,2	✓

(c)



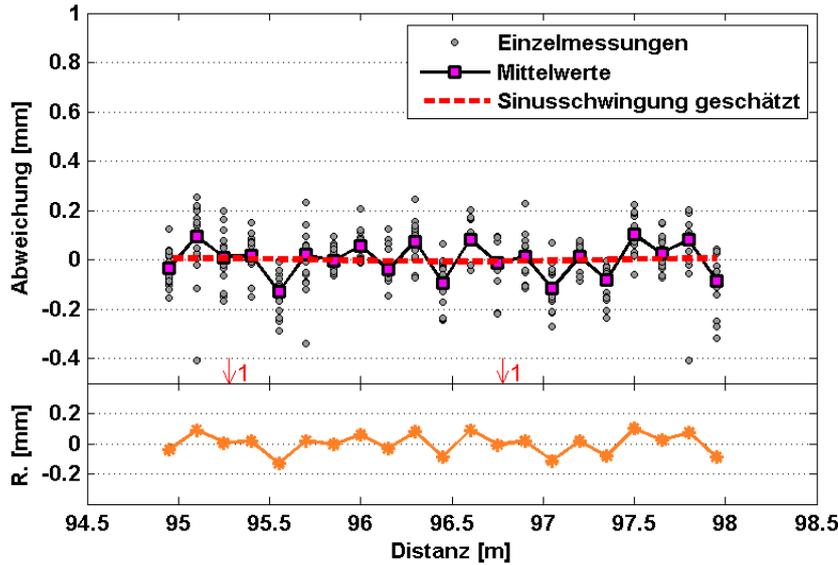
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,033	75,4	✓
0,750	0,036	66,7	✓
1,500	0,044	6,3	✓

Abbildung A-14: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 94 m (MR #14)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

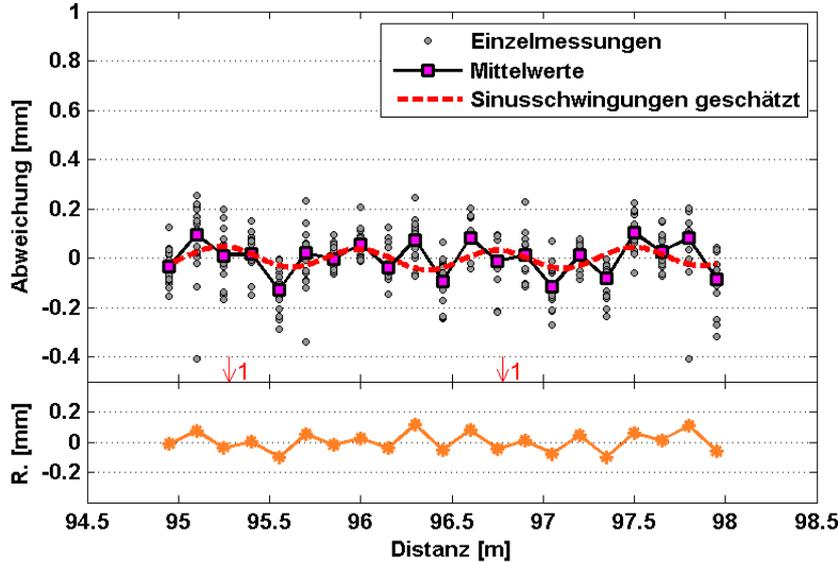


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,006	79,5	✗

(b)

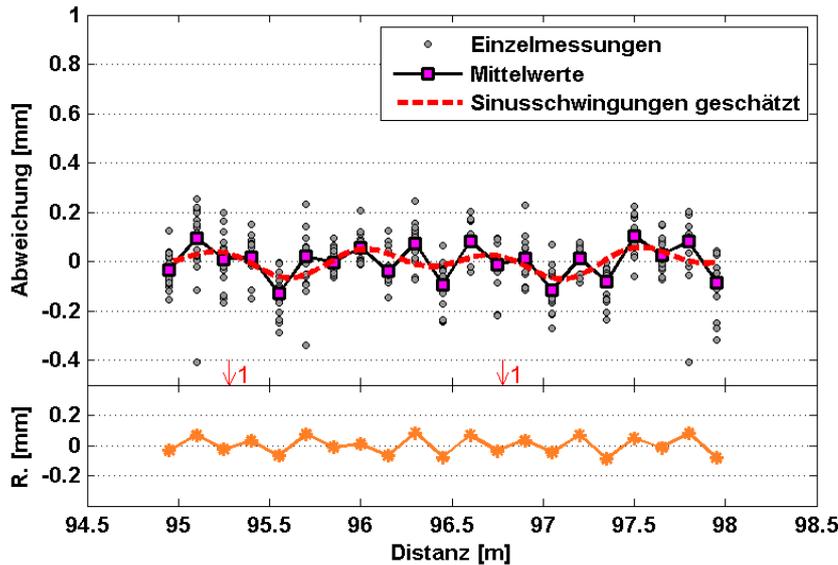


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,009	82,6	✗
0,750	0,039	40,3	✓

(c)



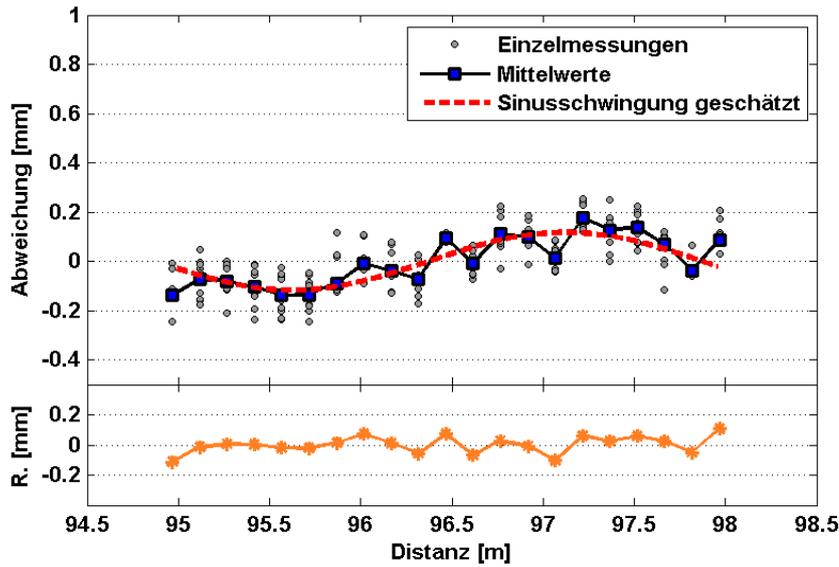
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,007	80,6	✗
0,750	0,041	38,6	✓
1,500	0,030	39,8	✓

Abbildung A-15: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 94 m (Wiederholung, MR #15)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

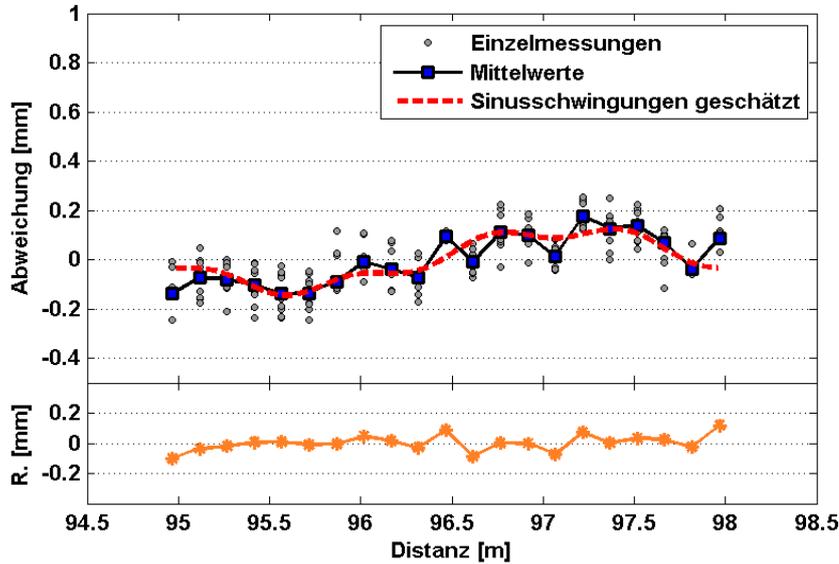


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,117	11,3	✓

(b)

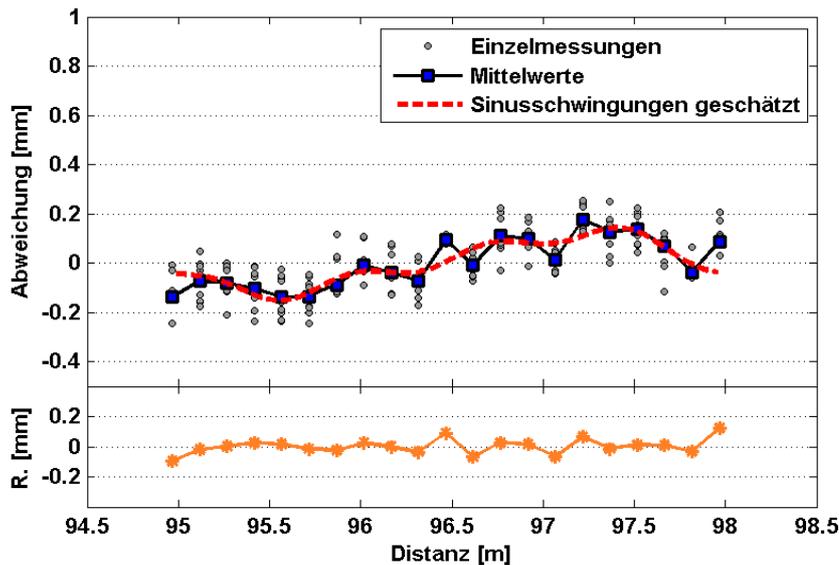


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,117	10,7	✓
0,750	0,029	64,9	✗

(c)



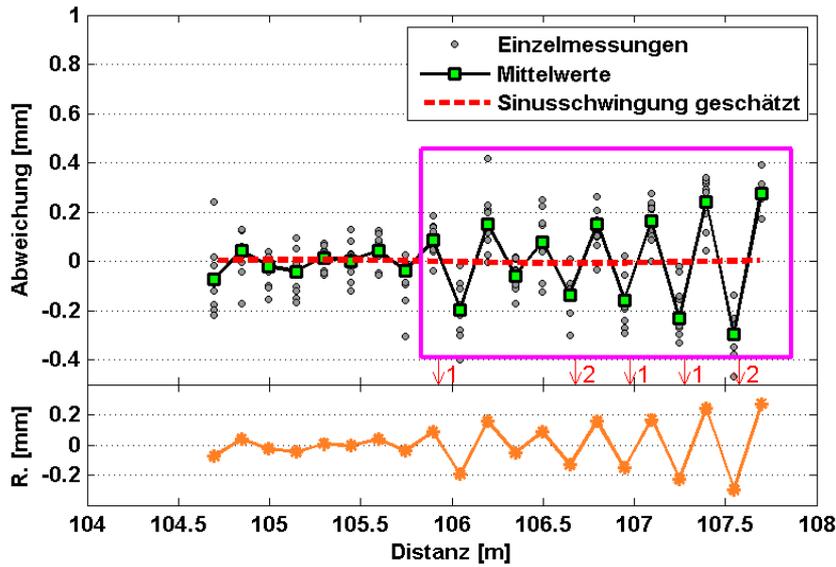
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,117	10,5	✓
0,750	0,028	65,8	✗
1,500	0,022	16,2	✗

Abbildung A-16: Leica Standardprisma, Distanz 94 m (MR #16)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

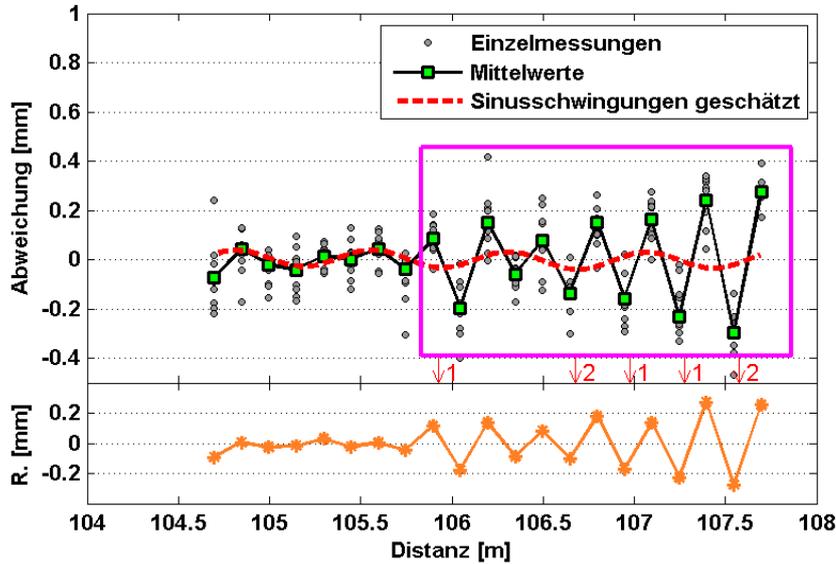


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,007	33,2	✗

(b)

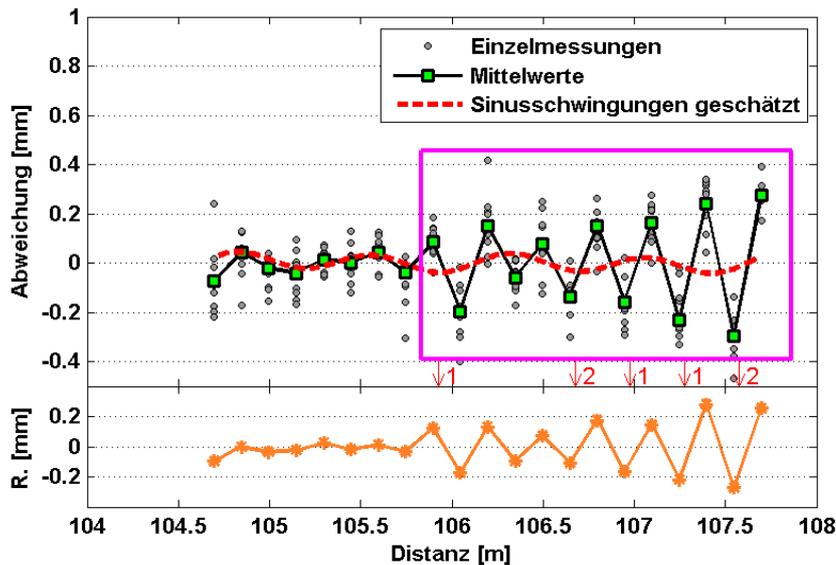


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,006	20,1	✗
0,750	0,034	33,4	✗

(c)



Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,006	17,6	✗
0,750	0,034	33,08	✗
1,500	0,010	21,4	✗

Abbildung A-17: Miniprisma Goecke, Distanz 104 m (MR #17)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m  
 Diskussion des markierten Bereichs siehe Text auf nächster Seite

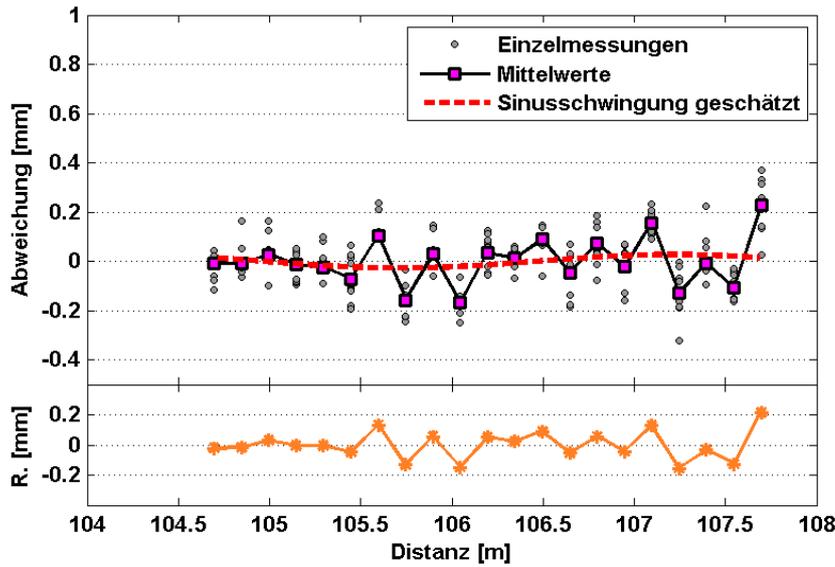
Die Abweichungen der Messung mit dem Miniprisma Goecke bei 104 m in Abbildung A-17 zeigen einen sägezahnartigen Verlauf der Werte ab der Hälfte der Messreihe. Ein ähnlicher Effekt trat bei Tests des Messsystems unter Laborbedingungen mit dem Miniprisma Geodäsie Austria auf, der charakteristische Verlauf lässt sich möglicherweise durch das Anfahren der Komparatorpositionen im Hin- und Rückweg erklären. Nähere Untersuchungen des Geodäsie Austria Prismas während der Testmessungen im Labor zeigten, dass die Passung zur Aufnahme des Zentrierzapfens ausgeschlagen oder ungenau gefertigt war und das Prisma nicht fest am Zapfen saß. Daraufhin wurde eine Kunststoffschraube zur zusätzlichen Fixierung an der Rückseite des Prismas angebracht, siehe Abbildung A-18 links. Bei Kontrollmessungen im Labor konnte dieses Verhalten nicht mehr beobachtet werden, es trat jedoch bei den Feldmessungen bei Messreihe 33 und 26 wieder auf.



**Abbildung A-18: zusätzliche Klemmschraube Miniprisma Geodäsie Austria (links), im Vergleich die serienmäßige Schraubverriegelung am Miniprisma Goecke (rechts)**

Da die Verriegelung des Goecke Prismas nicht wie bei den anderen beiden Prismen durch einen gefederten Zapfen einrastet, sondern durch eine Handschraube erfolgt (Abbildung A-18 rechts), könnte der Effekt auf eine unzureichende Fixierung des Prismas am Zapfen zurückzuführen sein. Eine Verifizierung ist im Nachhinein leider nicht möglich. Eine Wiederholung der Messung wurde aufgrund der in Abschnitt 8.6 erwähnten Probleme durch die Vibrationen am Chemiegebäude nicht durchgeführt.

(a)

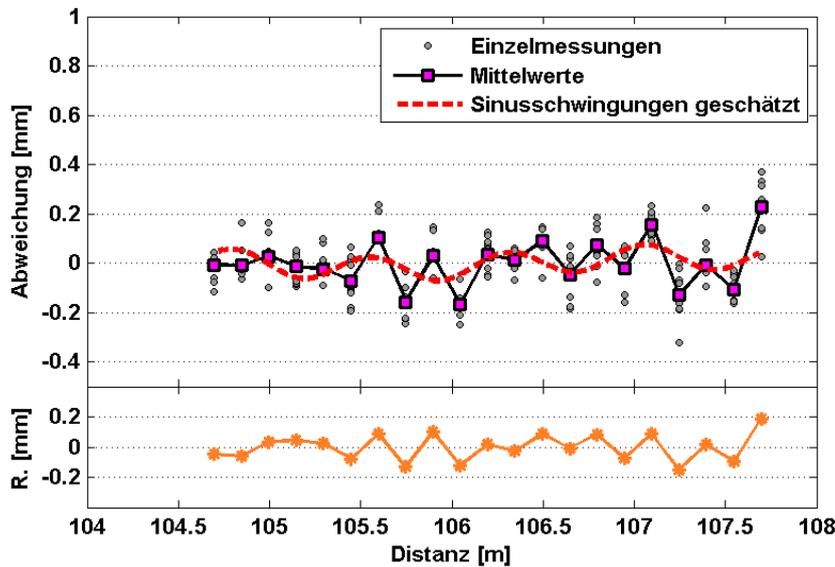


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,027	0,027	✗

(b)

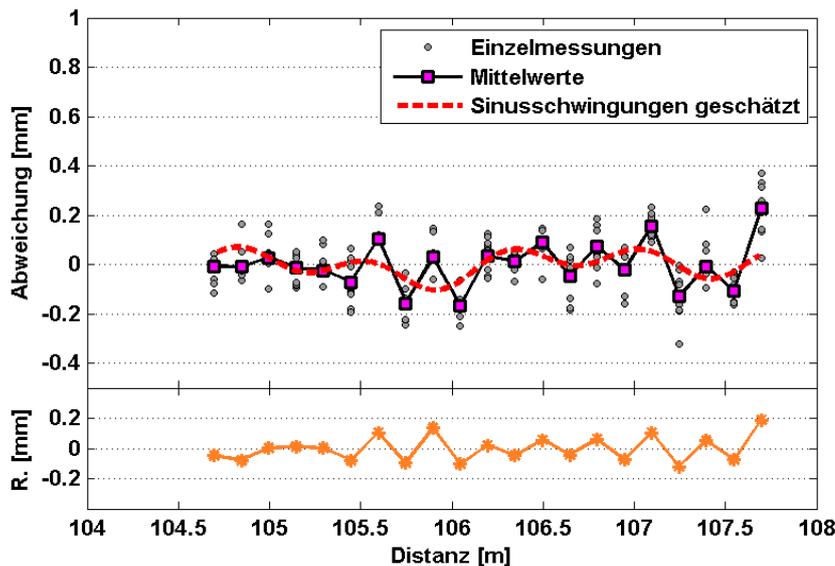


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,026	62,5	✗
0,750	0,049	37,8	✗

(c)



Modell 3

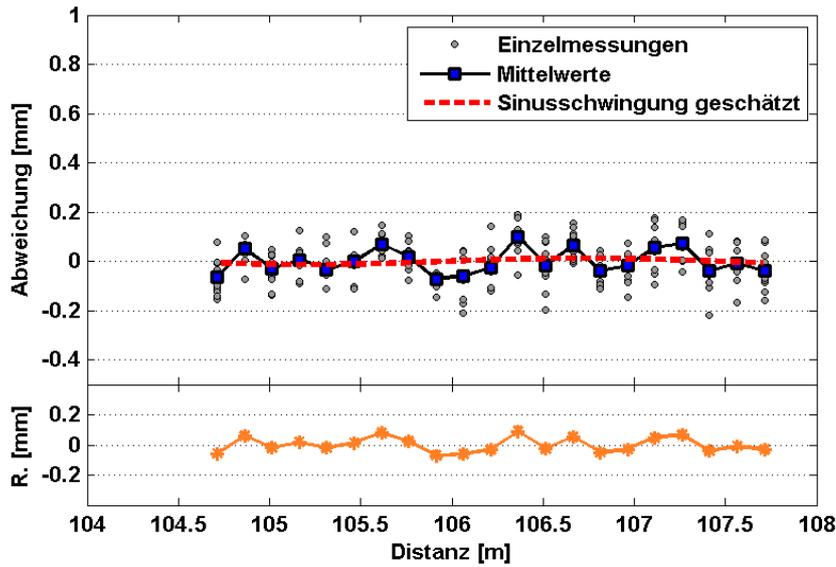
Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,026	62,4	✗
0,750	0,049	37,8	✗
1,500	0,034	88,4	✗

Abbildung A-19: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 104 m (MR #18)  
Abweichungen, Modelle und Residuen

(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

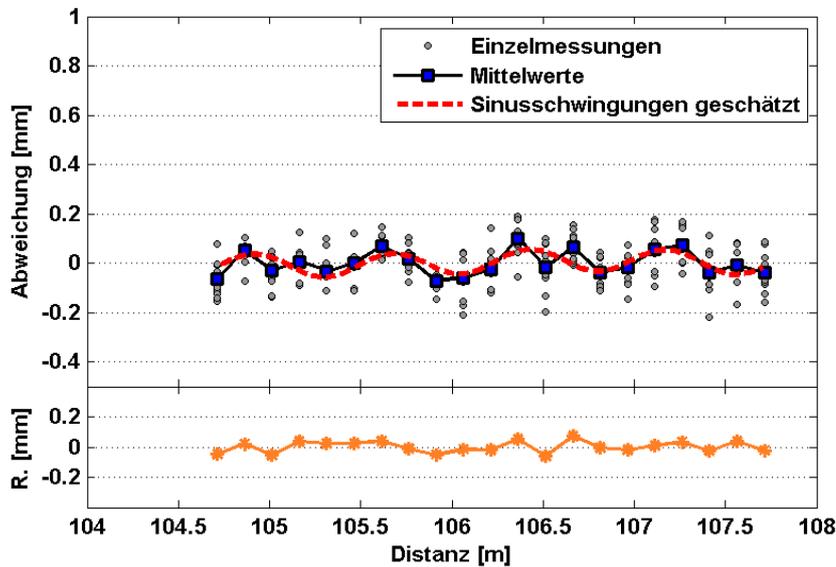


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,013	28,8	✗

(b)

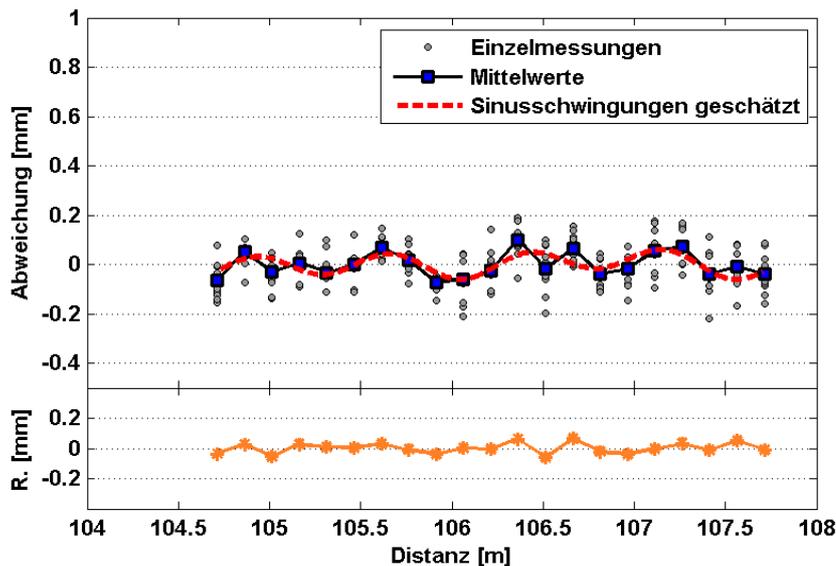


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,013	25,6	✗
0,750	0,045	78,9	✓

(c)



Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,012	19,9	✗
0,750	0,045	80,5	✓
1,500	0,017	20,5	✗

Abbildung A-20: Leica Standardprisma, Distanz 104 m (MR #19)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

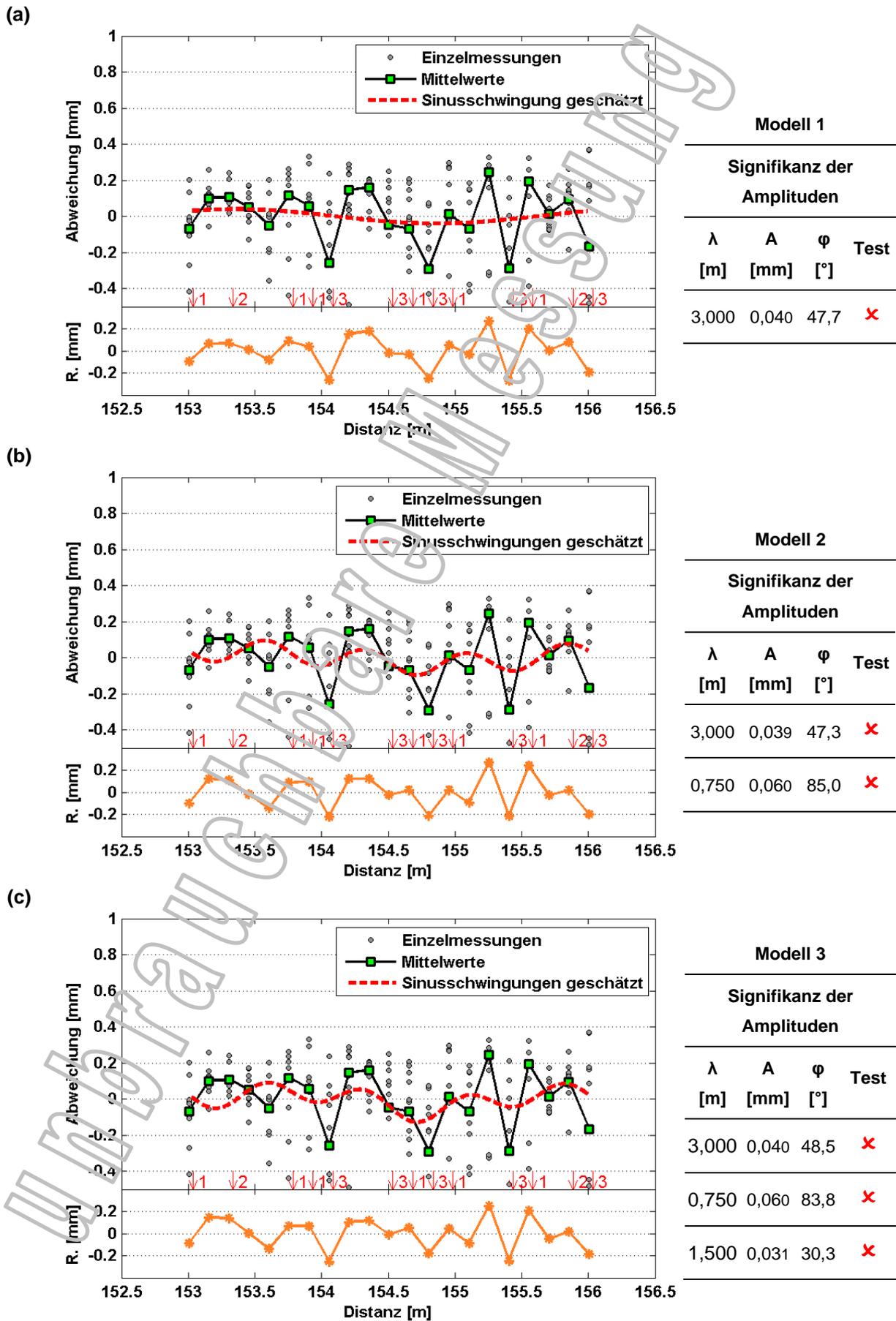
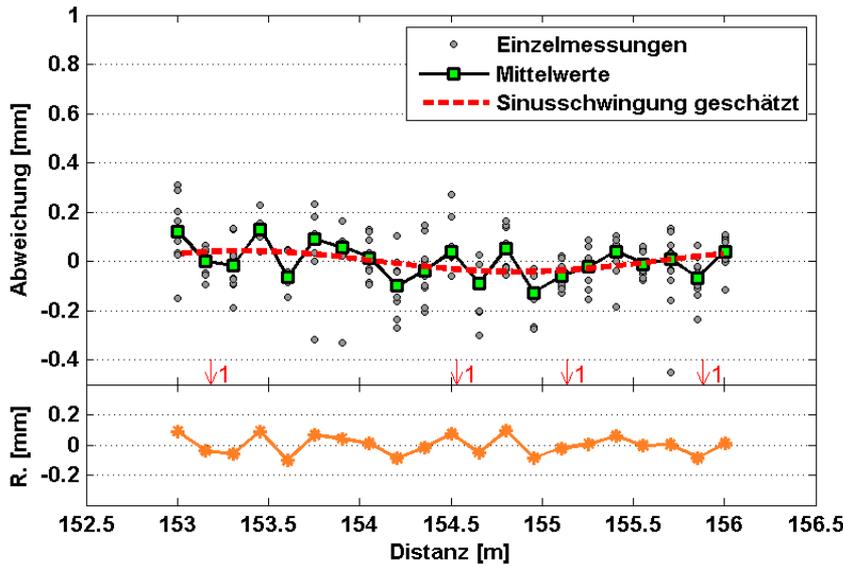


Abbildung A-21: Miniprisma Goecke, Distanz 153 m (MR #20)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

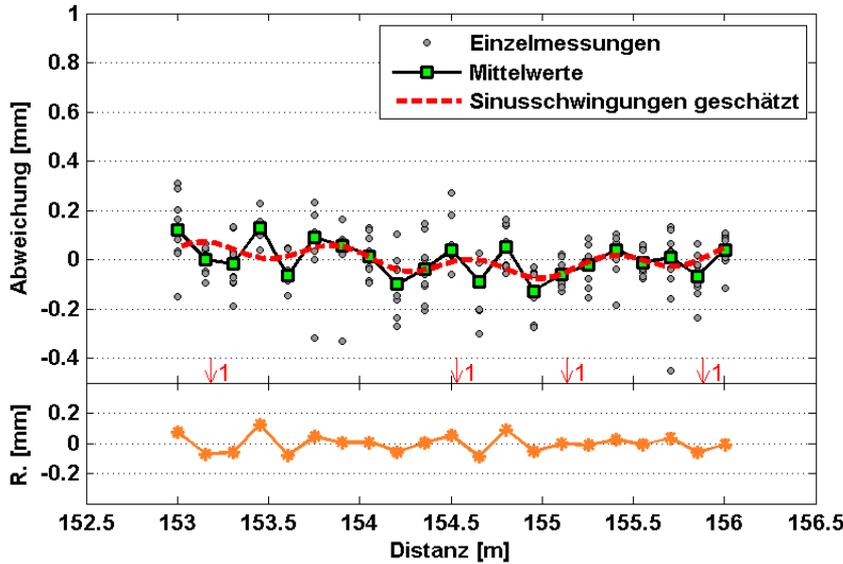


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,042	47,2	✗

(b)

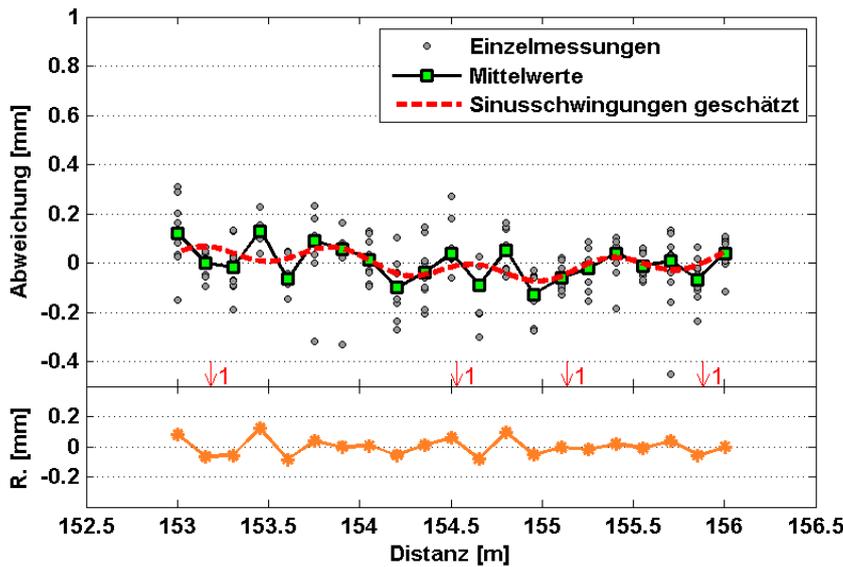


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,041	45,5	✗
0,750	0,036	32,5	✗

(c)



Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,041	46,0	✗
0,750	0,036	33,3	✗
1,500	0,007	87,3	✗

Abbildung A-22: Miniprisma Goecke, Distanz 153 m (Wiederholung, MR #21)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

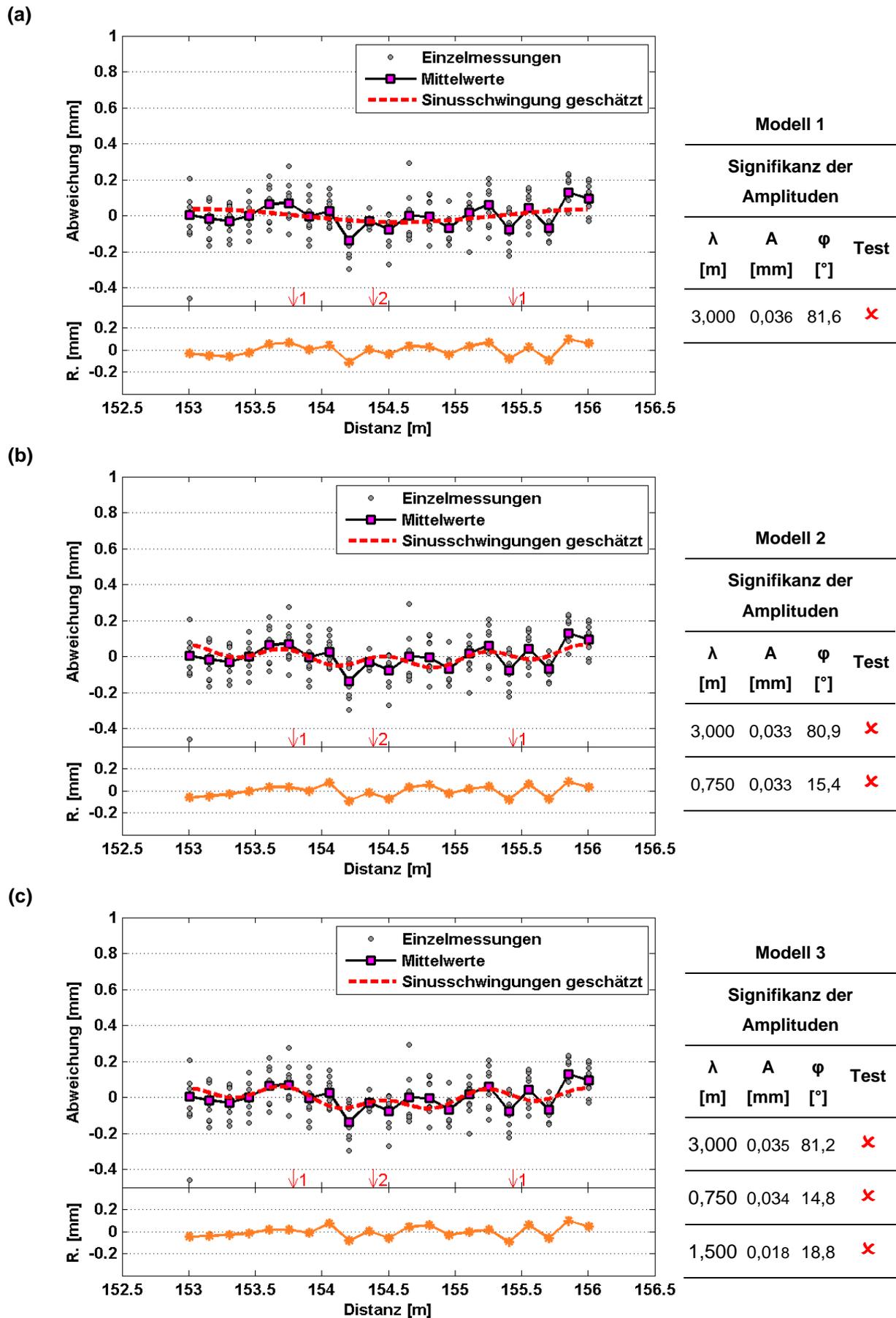


Abbildung A-23: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 153 m (MR #22)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

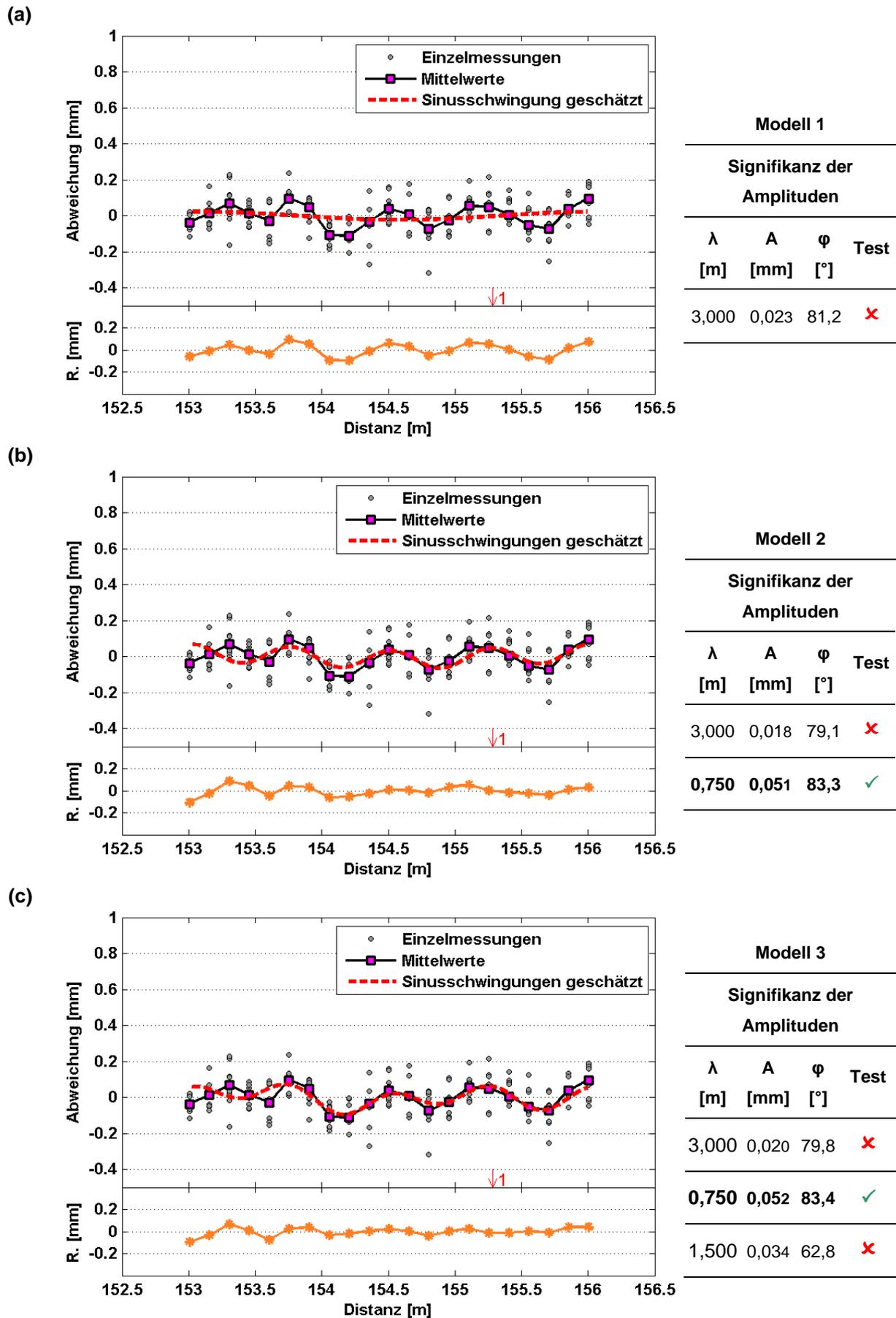
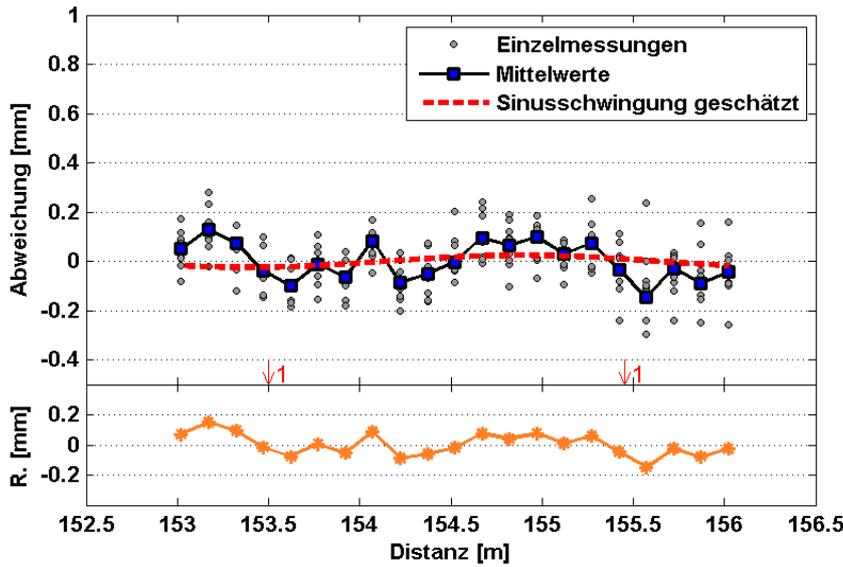


Abbildung A-24: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 153 m (Wiederholung, MR #23)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

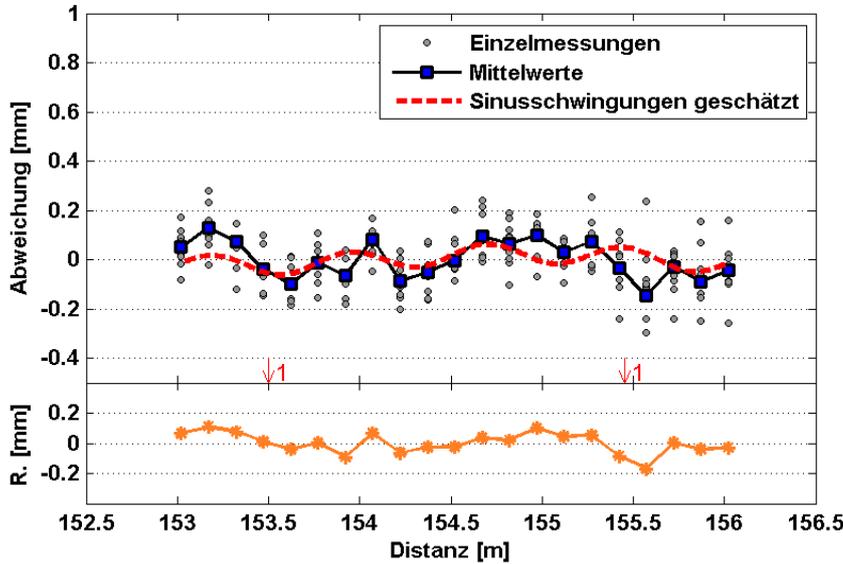


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,024	45,4	✗

(b)

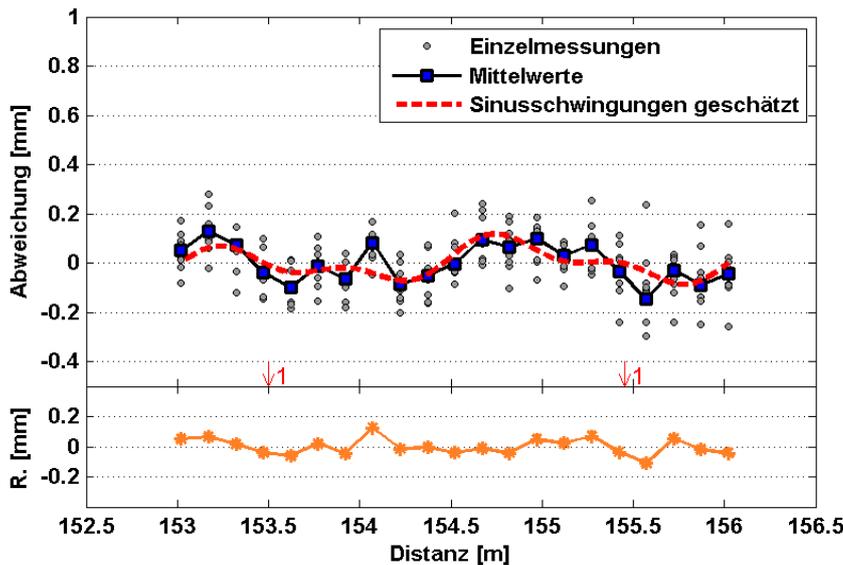


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,025	46,0	✗
0,750	0,040	5,7	✗

(c)



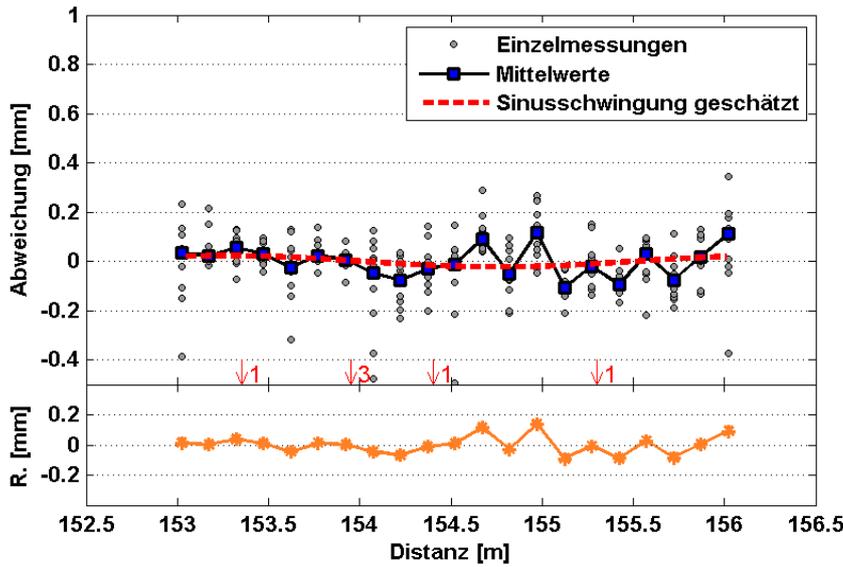
Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,026	48,0	✗
0,750	0,040	3,8	✗
1,500	0,061	15,0	✓

Abbildung A-25: Leica Standardprisma, Distanz 153 m (MR #24)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

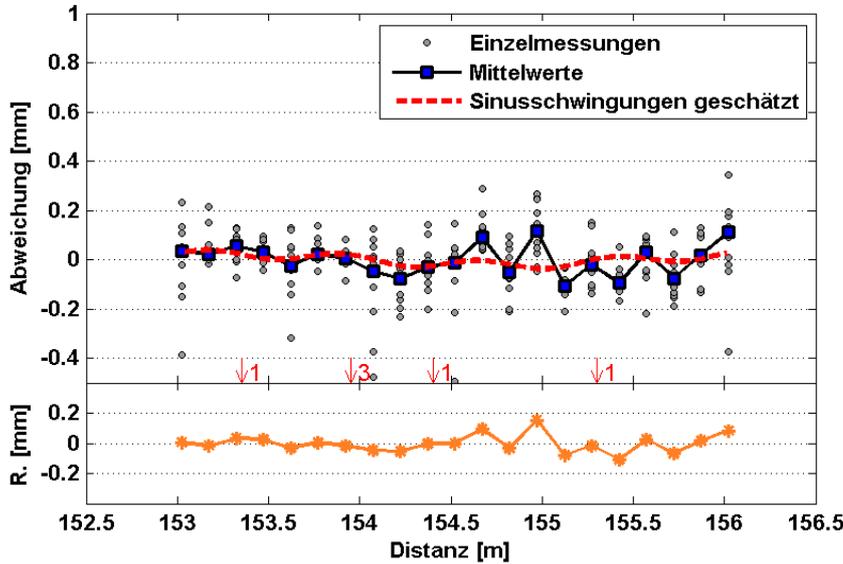


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,023	61,5	✗

(b)

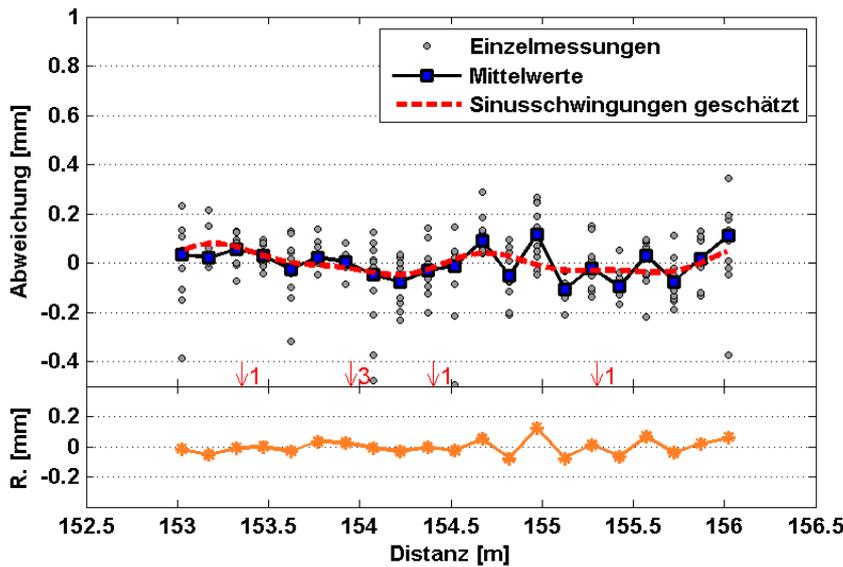


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,022	60,5	✗
0,750	0,018	28,5	✗

(c)



Modell 3

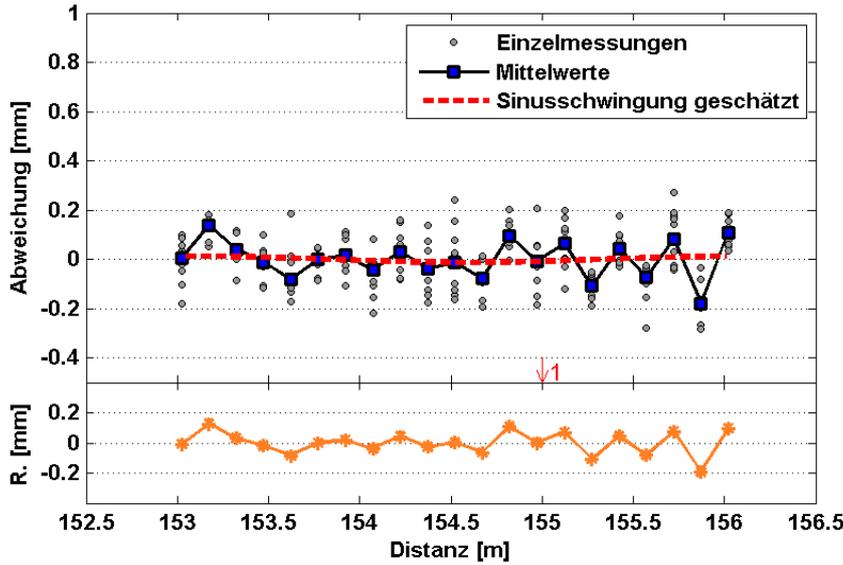
Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,020	57,5	✗
0,750	0,017	22,1	✗
1,500	0,044	36,4	✓

Abbildung A-26: Leica Standardprisma, Distanz 153 m (Wiederholung 1, MR #25)  
Abweichungen, Modelle und Residuen

(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

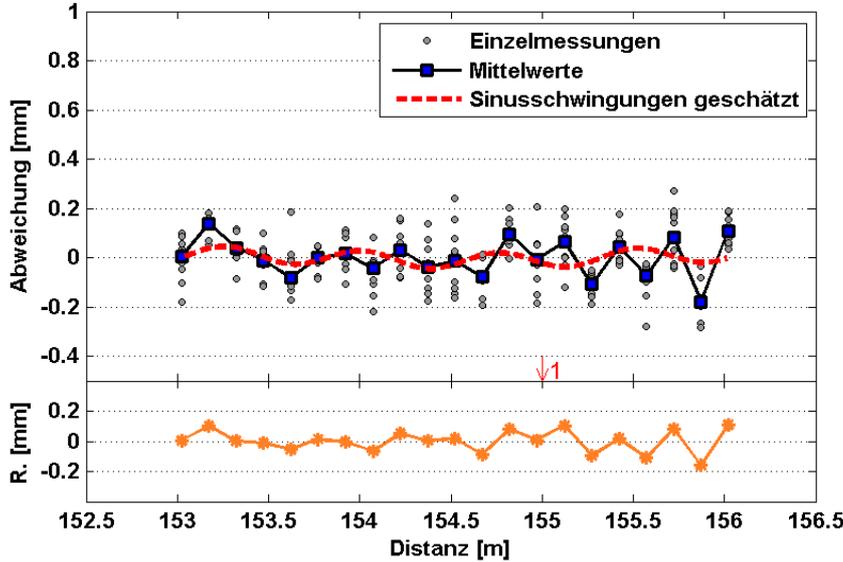


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,012	82,6	✗

(b)

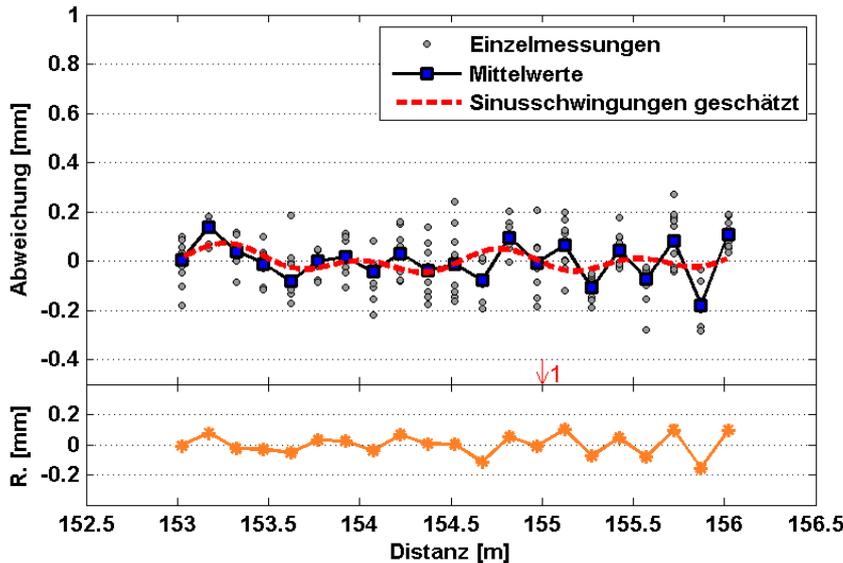


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,014	83,2	✗
0,750	0,033	65,3	✗

(c)



Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,012	82,5	✗
0,750	0,033	63,3	✗
1,500	0,028	33,3	✗

Abbildung A-27: Leica Standardprisma, Distanz 153 m (Wiederholung 2, MR #26)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

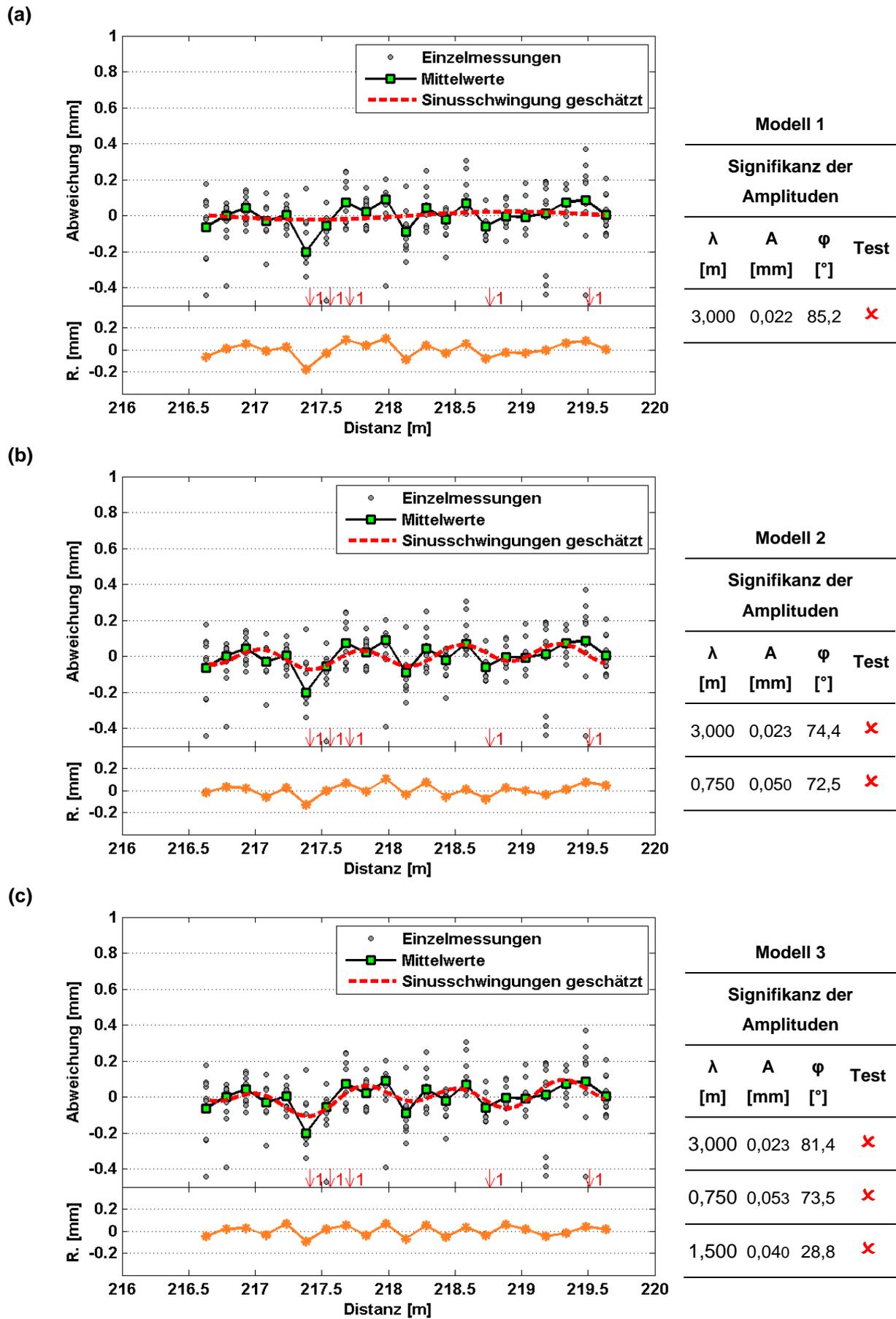
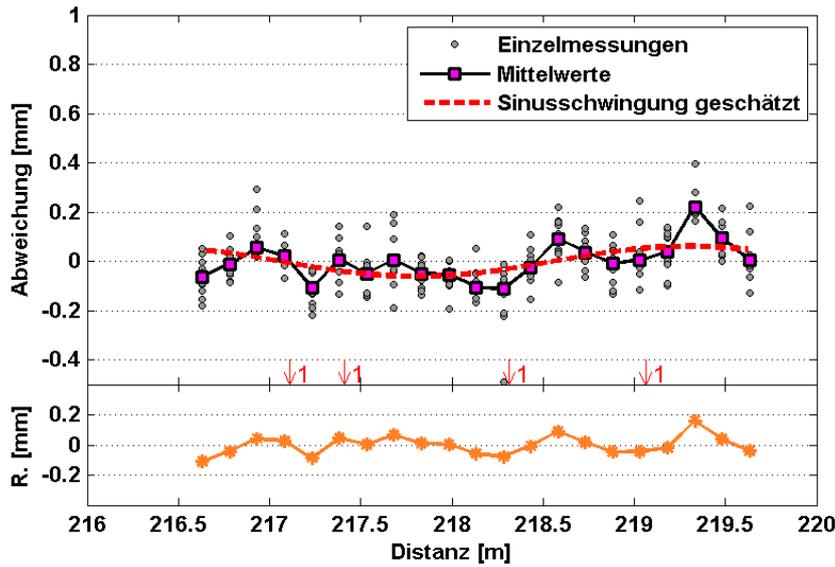


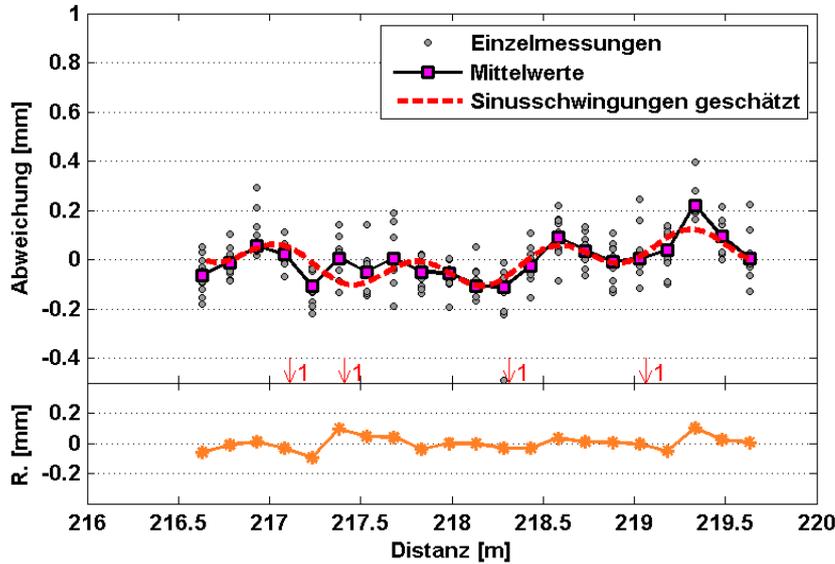
Abbildung A-28: Miniprisma Goecke, Distanz 216 m (MR #27)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)



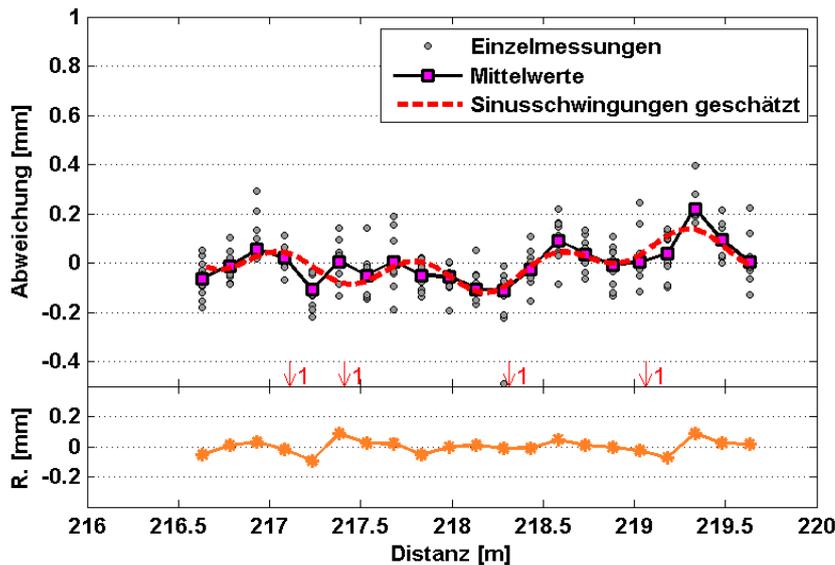
Modell 1			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,061	39,2	✓

(b)



Modell 2			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,065	36,5	✓
0,750	0,058	64,2	✓

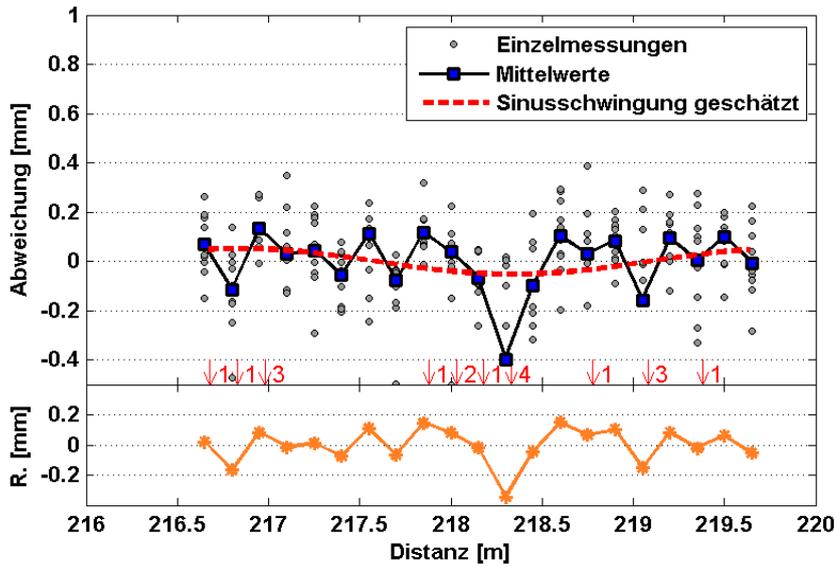
(c)



Modell 3			
Signifikanz der Amplituden			
$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,066	36,1	✓
0,750	0,057	63,8	✓
1,500	0,021	32,0	✓

Abbildung A-29: Miniprisma Geodäsie Austria, Distanz 216 m (MR #28)  
 Abweichungen, Modelle und Residuen  
 (a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

(a)

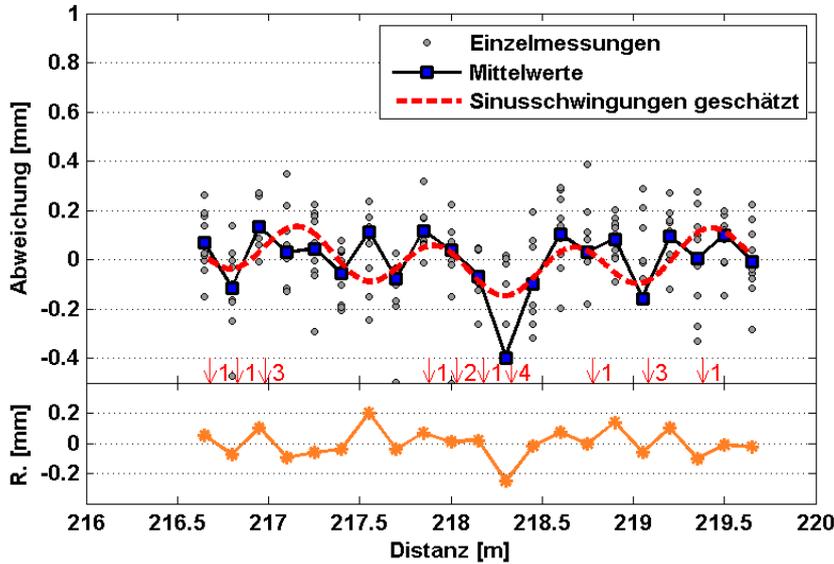


Modell 1

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,052	67,1	✗

(b)

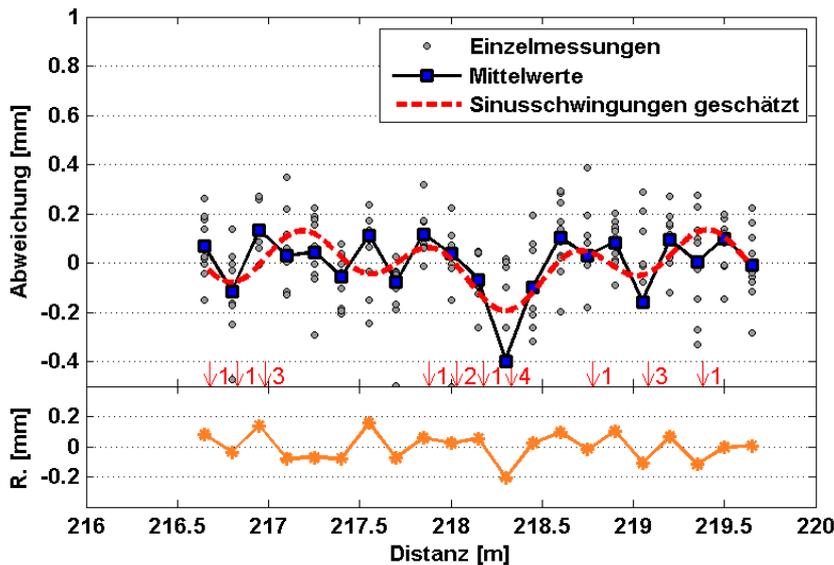


Modell 2

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,055	68,4	✗
0,750	0,092	22,1	✓

(c)



Modell 3

Signifikanz der Amplituden

$\lambda$ [m]	A [mm]	$\varphi$ [°]	Test
3,000	0,058	69,4	✗
0,750	0,091	20,4	✓
1,500	0,045	50,3	✗

Abbildung A-30: Leica Standardprisma, Distanz 216 m (MR #29)  
Abweichungen, Modelle und Residuen  
(a)  $\lambda_1 = 3$  m, (b)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m, (c)  $\lambda_1 = 3$  m,  $\lambda_2 = 0,75$  m,  $\lambda_3 = 1,5$  m

## Anhang B: Witterung während der Feldmessungen

In Tabelle B-1 bis Tabelle B-12 sind die Witterungsverhältnisse an den einzelnen Messtage angeführt. Die Nummerierung der Messreihen erfolgt nach Distanzen, deshalb sind die Tabellen nicht zeitlicher Reihenfolge angeführt. Die Aufzeichnung erfolgte händisch während der Messungen mit dem Feldkomparator. Es konnte kein fixes Aufzeichnungsintervall eingehalten werden da die Arbeiten mit dem Feldkomparator oft die volle Aufmerksamkeit des Beobachters erforderten. Aus diesem Grund sind während der ersten drei Messtage (Tabelle B-4, Tabelle B-5 und Tabelle B-9) nur Werte für die gesamte Messzeit vorhanden.

**Tabelle B-1: MR #1, MR #2, MR #3 (17.04.2012)**

Bemerkung		-		
Messstrecke/(Distanz)		Pfeiler 6 nach Pfeiler 3 (37 m)		
Untersuchte Prismen		Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke		
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
11:45	5/8		Böig aus N	Keine Schirme verwendet (Wind!)
12:30	5/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Böig aus N	
12:40	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus NO	
13:10	5/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Böig aus O	
14:07	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Böig aus O	
15:02	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Böig aus O	
15:07	4/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung		

Tabelle B-2: MR #4, MR #5, MR #6, MR #7, MR #8, MR #9 (03.06.2012)

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	Säule 5 nach Pfeiler 6 (55 m) Säule 7 nach Pfeiler 6 (51 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
10:48	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	Schirme verwendet
11:17	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus SO	
11:35	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus SW	
11:53	3/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus SO	
12:17	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus SO	
12:38	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Stark aus SW	
13:00	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Stark aus W	
13:20	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Stark aus W	
15:47	2/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Stark aus W	
16:13	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Direkte Sonneneinstrahlung	
17:00	1/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Stark, böig aus W	

**Tabelle B-3: MR #10, MR #11, MR #12, (02.06.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	Säule 4 nach Pfeiler 6 (82 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
13:06	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Windstill	Keine Schirme verwendet
13:20	7/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	
13:27	7/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Windstill	
13:47	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	
14:50	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus O	
15:44	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	
16:10	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus O	
16:30	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Windstill	

**Tabelle B-4: MR #13, MR #15 (02.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	Säule 5 nach Pfeiler 3 (94m, )			
Untersuchte Prismen	Miniprisma Goecke, Geodäsie Austria			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
ca. 09:00 bis 18:00	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Windstill	Keine Schirme verwendet

**Tabelle B-5: MR #14, (28.03.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	Säule 5 nach Pfeiler 3 (94 m)			
Untersuchte Prismen	Miniprisma Geodäsie Austria			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
ca. 09:00 bis 17:00	2/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	Keine Schirme verwendet

**Tabelle B-6: MR # 16, MR #17, MR #18, MR #19 (12.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	Säule 5 nach Pfeiler 3 (94 m) Säule 13 nach Pfeiler 3 ( 104 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
15:05	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung		Schirme verwendet
15:07	4/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung		
16:44	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung		
17:10	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung		

**Tabelle B-7: MR #20, MR #22, MR #25, MR #27, MR #28, MR #29 (10.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	NTO nach Pfeiler 3 (53 m) NTW nach Pfeiler 3 (216 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
10:16	7/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Windstill	Schirme verwendet
11:18	5/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	
11:25	6/8	wechselnd	Leicht aus O	
11:38	6/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	
12:30	4/8	wechselnd		
16:04	4/8	Direkte Sonneneinstrahlung		
16:10	4/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung		
16:54	6/8	Direkte Sonneneinstrahlung		
17:16	7/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	
17:50	6/8	Direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus O	
18:02	6/8	Direkte Sonneneinstrahlung		Ab 18:10 Sonne am Komparator

**Tabelle B-8: MR #21, MR #23, MR #26 (23.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	NTO nach Pfeiler 3 (153 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
11:28	7/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Leicht aus O	Schirme verwendet
11:47	6/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus O	
12:13	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus O	
12:37	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung		
14:00				Leichter Regen
14:31	8/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung		
15:08	8/8			
15:18	7/8		Mäßig aus O	
15:29	7/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung	Mäßig aus O	

**Tabelle B-9: MR #24, (05.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	NTO nach Pfeiler 3 (153 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
ca. 09:00 bis 17:00	4/8	wechselnd	Leicht aus O	Schirme verwendet

**Tabelle B-10: MR #31, MR #33, MR #35 (13.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/(Distanz)	Säule 1 nach Pfeiler 2 (127 m)			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
11:05	7/8	Keine direkte Sonneneinstrahlung		Schirme verwendet
13:20	8/8		Stark aus SO	

**Tabelle B-11: MR #30, MR #32, MR #34 (16.04.2012)**

Bemerkung	-			
Messstrecke/Distanz	Säule 2 nach Pfeiler 2, 129 m			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma Miniprisma Geodäsie Austria Miniprisma Goecke			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
10:10	8/8		Böig aus SW	Keine Schirme verwendet (Wind!)
10:47	8/8		Böig aus SW	
13:14	8/8		Böig aus SW	
13:40	8/8		Böig aus NW	

**Tabelle B-12: Witterung am 27.06.2012**

Bemerkung	Messung zur Untersuchung der Streuungen			
Messstrecke/Distanz	NTO nach Pfeiler 3			
Untersuchte Prismen	Leica Standardprisma			
Wetterbedingungen				
Uhrzeit	Bewölkung	Sonneneinstrahlung	Wind	Anmerkung
15:00	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung		Keine Schirme verwendet
17:30	3/8	Direkte Sonneneinstrahlung		

## Anhang C: Bestimmung von Absolutwerten für die Feldmessungen

Für die Analyse von langwelligen Einflüssen wären Absolutwerte für die Abweichungen zwischen EDM und Feldkomparator sinnvoll. Durch die Bestimmung der Abweichungen aus Differenzen, siehe Formel (4-1), liegen jedoch immer nur relative Werte innerhalb des 3 m Intervalls des Feldkomparators vor.

Um Werte für den Offset der mit dem Feldkomparator bestimmten Abweichungen zu erhalten, wurde versucht, für die mit dem Komparator gemessenen Distanzbereiche absolute Entfernungen ohne zyklischen Fehlereinfluss zu bestimmen. Hiefür wurden die zu bestimmenden Distanzen in Teilstrecken unterteilt, deren Messwerte mit den im Labor bestimmten Werten für den zyklischen Fehler korrigiert werden können. Die genaue Vorgehensweise ist hier beispielhaft für die längste Strecke von 220 m anhand von Abbildung C-1 gezeigt.

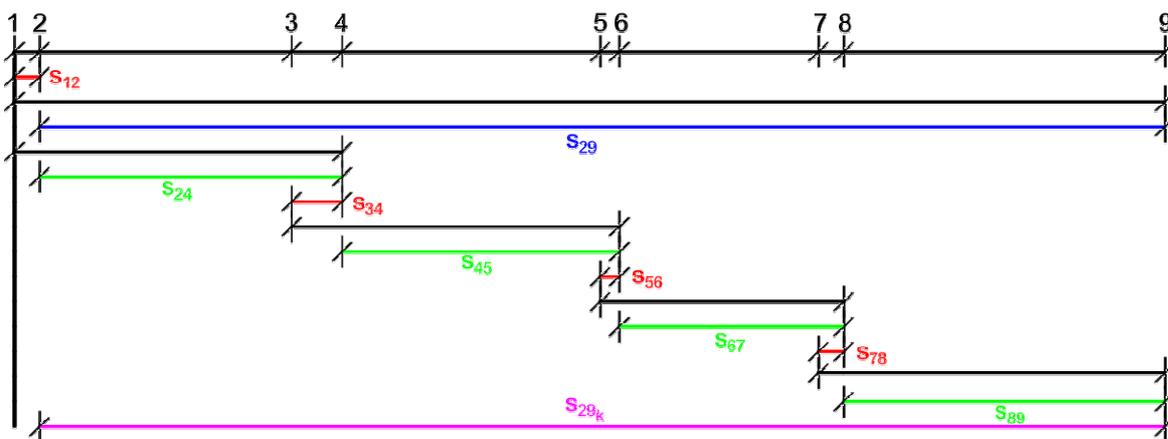


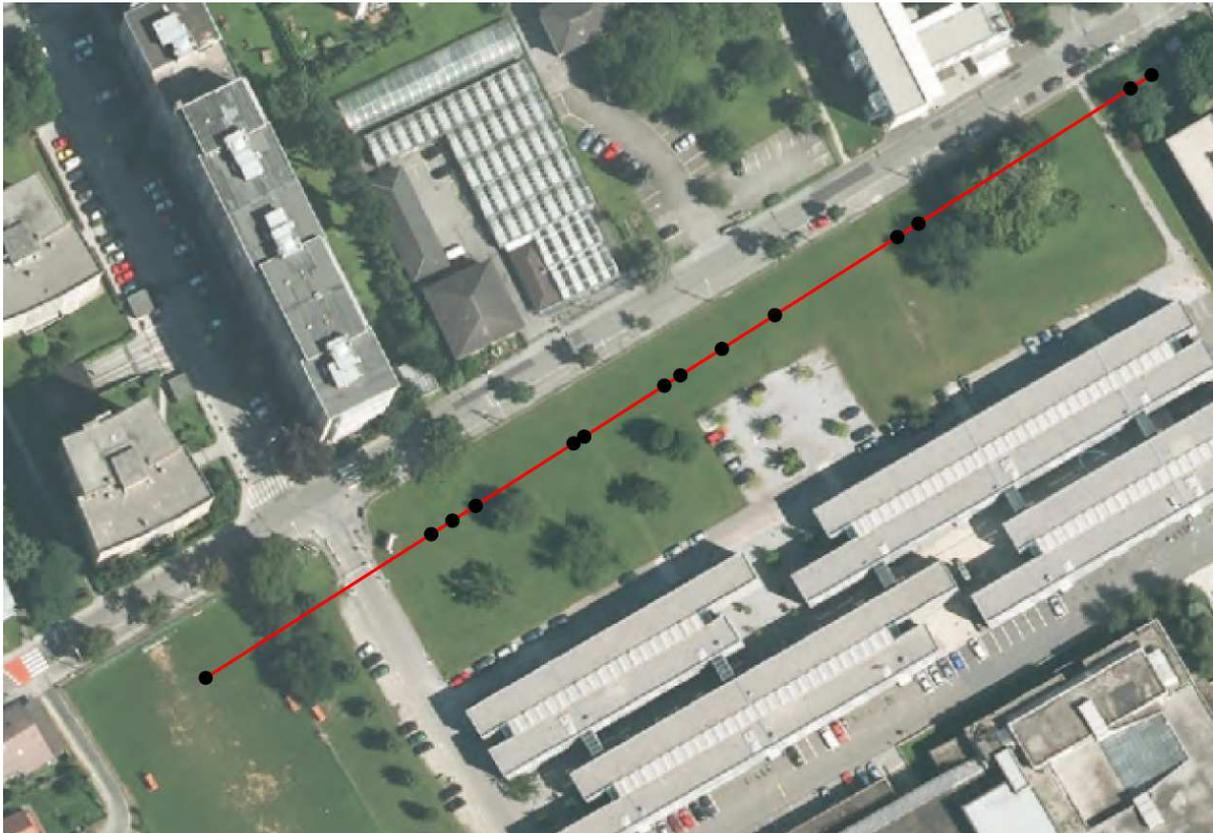
Abbildung C-1: Schema der Messung von Teilstrecken

Die Strecke  $s_{29}$  wird aus der Differenz der Strecken  $s_{19}$  und  $s_{12}$  bestimmt, dadurch fällt die Additionskonstante weg, der Einfluss des zyklischen Fehlers bleibt jedoch bestehen. Ebenso werden die Teilstrecken  $s_{23}$ ,  $s_{45}$ ,  $s_{67}$  und  $s_{69}$  aus Differenzen bestimmt, diese liegen alle unter 65 m und können mit den aus den Labormessungen bestimmten Korrekturmodellen (siehe Kapitel 11) korrigiert werden. Die Summe der so bestimmten Teilstrecken ergibt die um die Additionskonstante und systematische Fehlereinflüsse bereinigte Distanz  $s_{29k}$ .

Die Differenz aus  $s_{29}$  und  $s_{29_k}$  ergibt schließlich den gesuchten Offset  $o_{29}$  für die Feldkomparatormessungen.

## C.1 Messungen zur Bestimmung der Absolutwerte

Die Messungen zur Bestimmung der Absolutwerte wurden am 18. 9. 2012 am TU Gelände Inffeldgasse (siehe Abbildung C-2) durchgeführt.



**Abbildung C-2: Messgebiet Inffeldgasse, die Stative wurden an den Punkten entlang der roten Linie aufgestellt**

Um die Offsets für alle mit dem Feldkomparator gemessenen Distanzen zu bestimmen wurden 14 Stative benötigt, die in Lage und Höhe ausgerichtet werden mussten. Die Aufstellungen für die Stative wurden vor der eigentlichen Ausrichtung auf  $\pm 1$  mm abgesteckt. Es wurde jeweils die Distanz zu einer bei den Messungen mit dem Feldkomparator beobachteten Messwagenposition verwendet. Die Genauigkeitsanforderung für die Stativausrichtung wurde durch eine Fehlerabschätzung festgestellt. Es wurde ein maximaler Fehler von 0,01 mm von der Sollstrecke bei einer Teilstreckenlänge von ca. 55 m als akzeptabel angenommen.

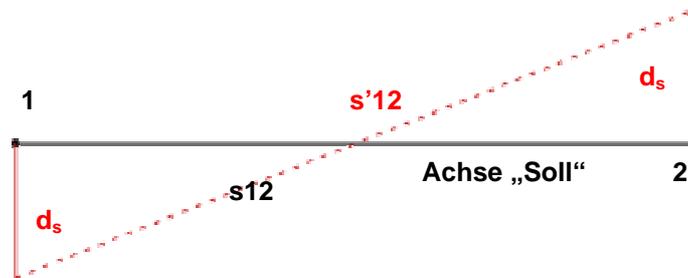


Abbildung C-3: Fehlerabschätzung Stativausrichtung

Aus der Entfernungsdifferenz

$$\Delta s = s'12 - s12 \quad (\text{C-1})$$

ergibt sich nach Auflösung der Dreiecke in Abbildung C-3 die Abweichung von der Visurlinie mit

$$d_s = \frac{\sqrt{(s12 + \Delta s)^2 - s12^2}}{2} \quad (\text{C-2})$$

Mit den oben angeführten Werten erhält man den Wert  $d_s = 16$  mm. Die Abweichung der räumlichen Schrägstrecke setzt sich aus Quer- und Höhenabweichung zusammen.

$$d_r = \sqrt{d_q + d_h} \quad (\text{C-3})$$

Somit ergibt sich für die zulässige Quer und Höhenabweichung  $d_r$  ein Wert von 11 mm. Dieser konnte bei der Einrichtung der Stative eingehalten werden.



Abbildung C-4: Ausgerichtete Stative

Die Messungen wurden wieder mit Hilfe des Satzmessprogramms CALMS durchgeführt. Dafür musste das Programm neuerlich adaptiert werden, die Änderungen sind in Anhang E dokumentiert. Die Messungen erfolgten analog zu den Messungen mit dem Feldkomparator in erster Kreislage.

Die zum Abschluss geplante Messung zur Überprüfung der Stabilität der Stative musste leider entfallen, da mehrere Stative auf einem als Fußballplatz genutzten Teil des Areals aufgestellt waren und dieser am Nachmittag bespielt wurde.

Durch die Bestimmung der Absolutwerte aus Teilstrecken ergeben sich für die Offsetwerte aber recht große Standardabweichungen. Diese resultieren aus der Summation der aus Differenzen gebildeten Teilstrecken.

Der funktionelle Zusammenhang für das eingangs erwähnte Beispiel lautet:

$$o_{29} = (s_{23} + s_{45} + s_{67} + s_{89}) - s_{29} \quad (\text{C-4})$$

mit:

$$\begin{aligned} s_{23} &= s_{13} - s_{12} - K_1 & s_{45} &= s_{35} - s_{34} - K_2 & s_{67} &= s_{57} - s_{56} - K_3 \\ s_{89} &= s_{79} - s_{78} - K_4 & s_{27} &= s_{17} - s_{12} \end{aligned} \quad (\text{C-5})$$

Unter der Annahme gleicher Standardabweichungen für die zyklischen Korrekturen ergibt sich die Standardabweichung des Offsetwertes als:

$$\sigma_{o_{29}} = \sqrt{10 \cdot \sigma_s^2 + 4 \cdot \sigma_K^2} \quad (\text{C-6})$$

Die Offsets wurden nach Rüeger (1996, S. 215) auf einem Signifikanzniveau von 99% auf Differenz von Null getestet. Die berechneten Offsets, ihre Standardabweichungen und die Testergebnisse sind in Tabelle C-1 angeführt. Die Nullhypothese besagt dass der Offset signifikant von Null verschieden ist. Ein ✓ in der Spalte Test bedeutet die Annahme der Nullhypothese, ein ✗ die Ablehnung derselben.

Tabelle C-1: Offsets der Feldkomparatormessungen

Standardprisma				Miniprisma Rot				Miniprisma Gelb			
Distanz [m]	Offset [mm]	$\sigma$ [mm]	Test	Distanz [m]	Offset [mm]	$\sigma$ [mm]	Test	Distanz [m]	Offset [mm]	$\sigma$ [mm]	Test
218,150	1,2	0,38	✓	218,133	0,3	0,31	✗	218,132	0,3	0,26	✗
154,526	0,6	0,34	✗	154,508	0,2	0,28	✗	154,508	0,2	0,24	✗
131,402	0,1	0,34	✗	131,385	-0,6	0,28	✗	131,384	-0,1	0,24	✗
128,935	0,4	0,34	✗	128,918	-0,2	0,28	✗	128,917	-0,1	0,24	✗
106,206	0,4	0,29	✗	106,188	-0,1	0,24	✗	106,188	0,1	0,20	✗
96,449	0,2	0,29	✗	96,432	0,0	0,24	✗	96,431	0,1	0,20	✗
83,970	0,1	0,29	✗	83,953	-0,2	0,24	✗	83,952	-0,2	0,20	✗

Der statistische Test zeigt nur für den Offset des Standardprismas bei der längsten Distanz einen signifikanten Unterschied von Null an. Die restlichen bestimmten Offsets sind nicht signifikant und können nur bedingt zur Beurteilung langweiliger systematischer Einflüsse herangezogen werden.

Was jedoch aus den Ergebnissen dieser Absolutwertbestimmung hervorgeht, ist, dass der zyklische Fehler des TCA 1800 an den untersuchten Distanzen nicht über die Größenordnung von ca. 1 mm hinausgeht.

## C.2 Kombination von Feld- und Laborwerten

Ein möglicher sinusförmiger Verlauf der Absolutwerte würde trotz der nicht vorhandenen Signifikanz der einzelnen Werte auf langwellige Überlagerung hindeuten. In Abbildung C-5 bis Abbildung C-7 sind die Abweichungen aus den Labor- und Feldmessungen gemeinsam abgebildet, die Feldmessungen sind mit den bestimmten Offsets dargestellt. Die überlappenden Messreihen bei 127 bis 133 m Entfernung sind, wie in Abbildung 9-8, gemeinsam dargestellt. Zusätzlich ist der Bereich der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit des TCA 1800 von  $\pm 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$  grau hinterlegt. Aus der Kombination der im Labor bestimmten Abweichungen mit den um den bestimmten Offset korrigierten Messreihen aus den Feldkomparatormessungen lässt sich bei keinem der drei Prismen ein größerer langwelliger zyklischer Einfluss ableiten. Auffällig ist die große Spannweite der Abweichungen bei den überlappenden Messreihen bei 127 m bis 132 m die bei allen Prismen größer als die am Horizontalkomparator, allerdings bei kürzeren Distanzen, bestimmten Werte sind. Zur Diskussion dieses Sachverhalts siehe Abschnitt 9.3. Alle festgestellten Abweichungen bleiben innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit. Die in Abbildung C-7 dargestellten Werte des Leica Standardprismas lassen eine Fortsetzung des in den Laborwerten erkennbaren Trends bei größerer Distanz vermuten.

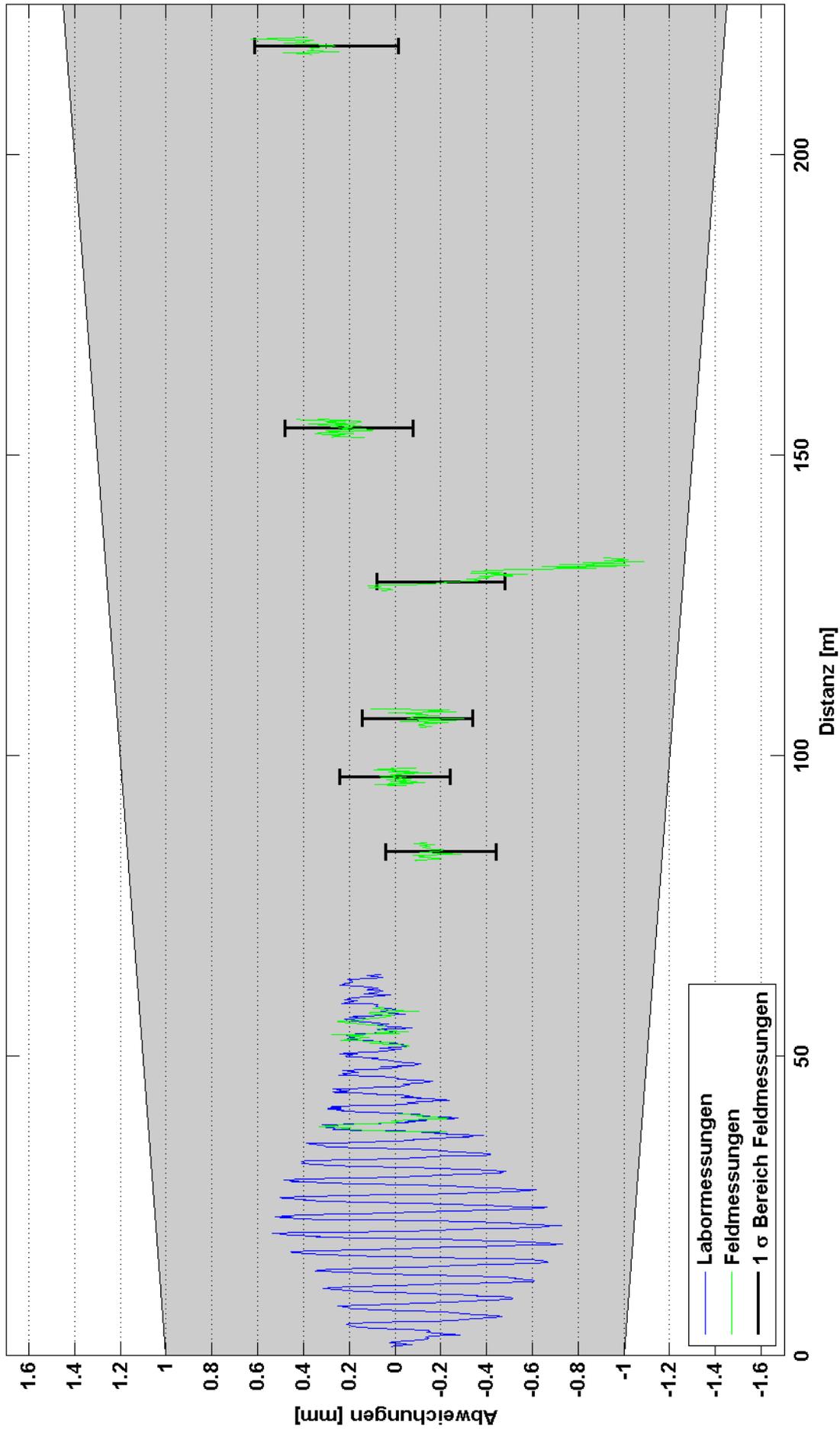


Abbildung C-5: Miniprisma Geodäsie Austria, Abweichungen aus Labor- und Feldmessungen  
Genauigkeitsbereich des Leica TCA 1800 laut Herstellerangabe ( $\pm 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ ) grau hinterlegt

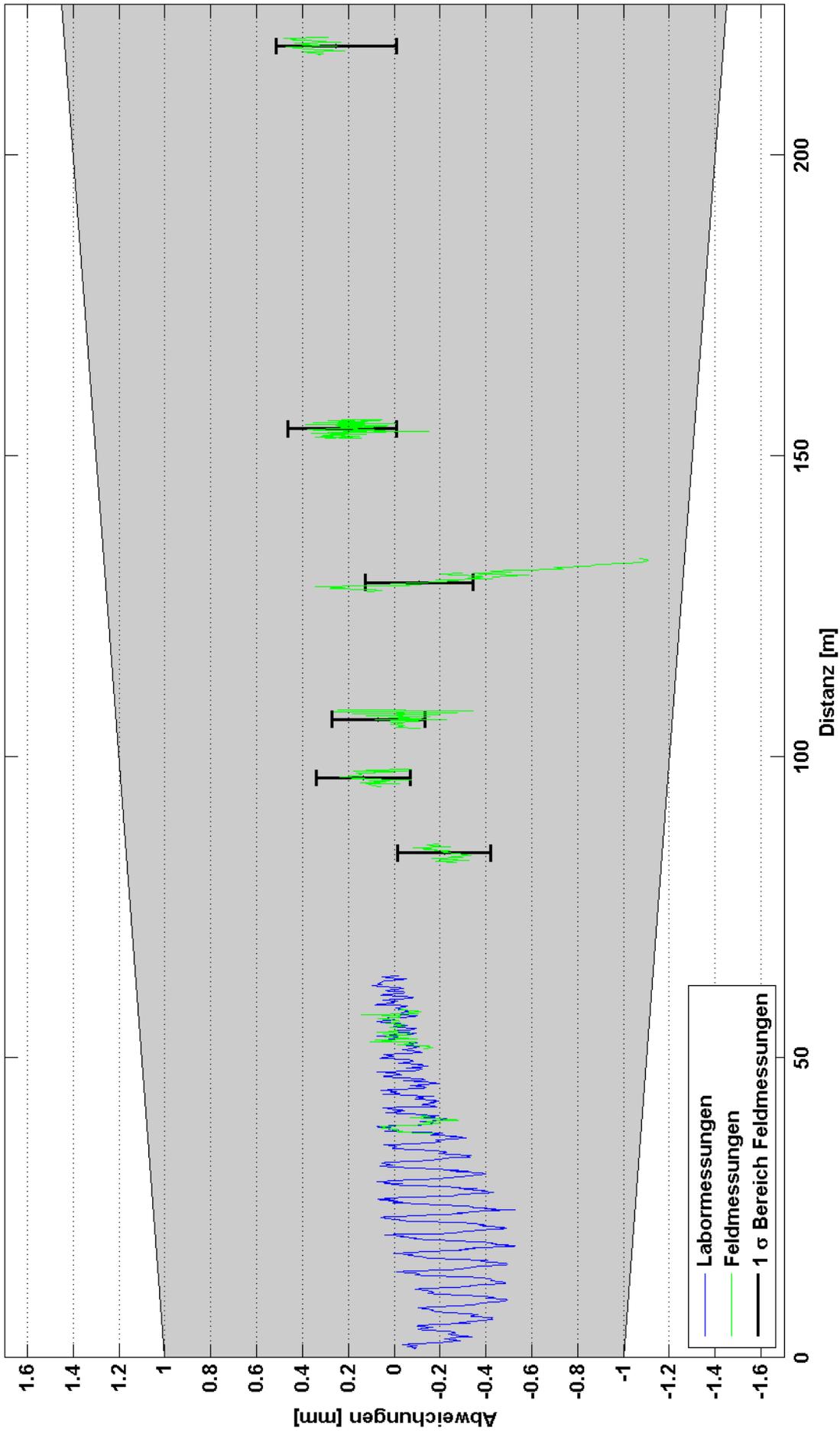


Abbildung C-6: Miniprisma Goecke, Abweichungen aus Labor- und Feldmessungen  
Genauigkeitsbereich des Leica TCA 1800 laut Herstellerangabe ( $\pm 1\text{mm} + 2\text{ppm}$ ) grau hinterlegt

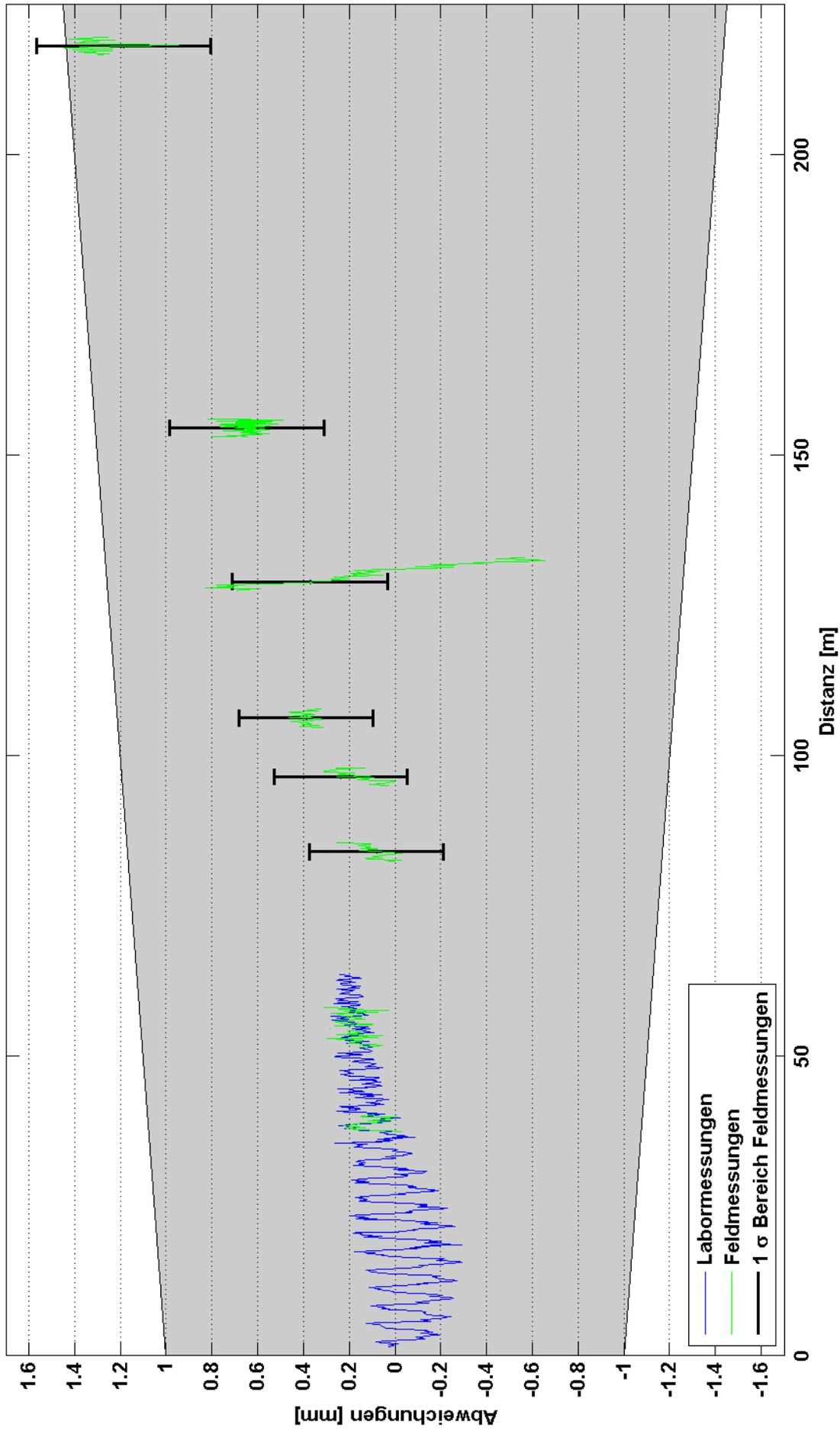


Abbildung C-7: Leica Standardprisma, Abweichungen aus Labor- und Feldmessungen  
Genauigkeitsbereich des Leica TCA 1800 laut Herstellerangabe ( $\pm 1\text{mm}+2\text{ppm}$ ) grau hinterlegt

## Anhang D: Kalibrierung der Temperatursensoren

Paulitsch (2010, S. 29) gibt die erforderliche Genauigkeit der Prüfeinrichtung für die Bestimmung des zyklischen Fehlers des TCA 1800 mit 0,01 mm an. Um eine temperaturbedingte Ausdehnung des Glasmaßstabs und des Trägerbalkens in dieser Größenordnung korrigieren zu können, ist es erforderlich, die Materialtemperatur auf etwa 0,3°C genau zu bestimmen. Die zur Aufzeichnung der Materialtemperatur am Feldkomparator angebrachten Pt100 Temperatursensoren mussten vor dem Messeinsatz kalibriert werden. Aufgrund der offenen Bauweise der Sensoren (siehe Abbildung D-1) konnte keine Fixpunktkalibrierung durchgeführt werden, da das Eintauchen der Sensoren in Wasser oder andere Flüssigkeiten diese zerstört hätte. Aus diesem Grund wurde eine Kalibrierung bei verschiedenen Referenztemperaturen durchgeführt, welche mittels Quecksilberthermometer bestimmt wurden.

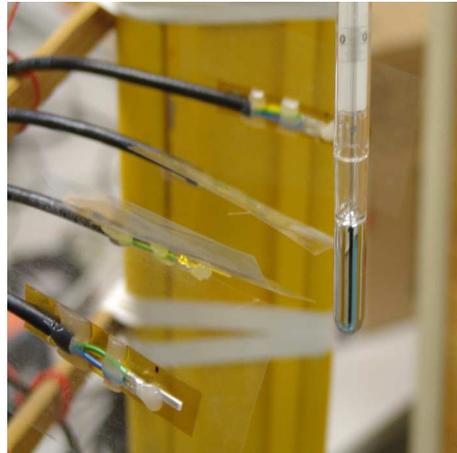
Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme besitzt mehrere Quecksilberthermometer der Firma Thermo Schneider mit einer Ablesegenauigkeit von 0,02°C. Die zur Kalibrierung verwendeten Thermometer sind in Tabelle D-1 aufgelistet.

**Tabelle D-1: Verwendete Hauptnormalthermometer**

Hersteller	Seriennummer	Bauart	Graduierung	Messbereich
Thermo Schneider	7932/98	Quecksilber, ganz eintauchend	0,01°C	20 bis 25°C
Thermo Schneider	957004	Quecksilber, ganz eintauchend	0,01°C	-1 bis 5°C

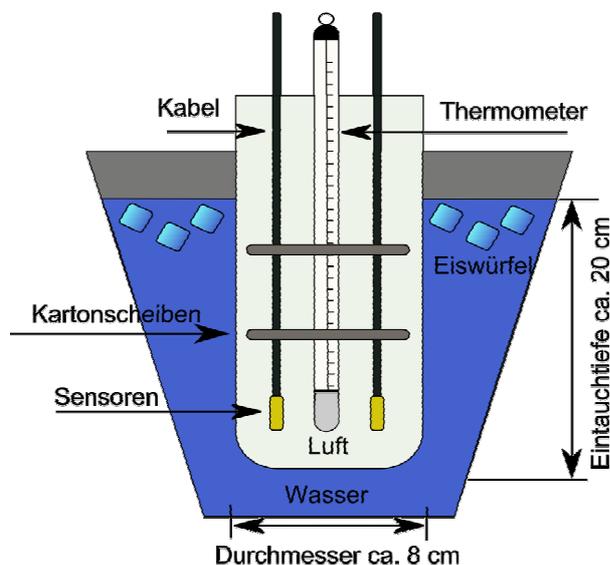
Die Kalibrierung der Temperatursensoren wurde in der Klimaschleuse des Messlabors des Institutes für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme durchgeführt. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit dem A/D Wandler „e.reader“ der Firma Gantner Electronics (technische Daten siehe Tabelle 8-3), welcher auch bei den Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers verwendet wurde.

Bei der Kalibrierung bei 20°C waren die Sensoren und das Thermometer frei hängend, auf gleicher Höhe und nebeneinander an einem Stativ befestigt, siehe Abbildung D-1. Die Temperaturen am Quecksilberthermometer wurden im Abstand von ca. 3-5 Minuten abgelesen und mit der Uhrzeit notiert.



**Abbildung D-1: Kalibrierung der Temperatursensoren (links im Bild) bei 20° C mit Hauptnormal Quecksilber Thermometer (rechts im Bild)**

Für die Kalibrierung bei 3°C musste die Referenztemperatur über ein Wasserbad hergestellt werden. Es wurde ein Behälter in das Wasserbad getaucht, in den die Sensoren und das Quecksilberthermometer abgesenkt wurden, siehe Abbildung D-2. Um nicht an der Behälterwand anzuliegen, wurden die Sensoren und das Referenzthermometer mit Hilfe von Kartonscheiben in Position gehalten, siehe Abbildung D-3.



**Abbildung D-2: Skizze des Aufbaus im Wasserbad (links), Foto des Aufbaus (rechts)**

Nach einer Akklimatisationszeit von ca. 40 Minuten wurde mit der Aufzeichnung der Referenztemperaturen begonnen. Da die zur Messung der Referenztemperatur verwendeten Quecksilberthermometer ganz eintauchend justierte Thermometer sind, wurde die mittlere Fadentemperatur miterfasst, um die Fadenkorrektur nach Formel (D-1) durchführen zu können. Die Messung der Fadentemperatur erfolgte mit einem Vaisala HM 34 C mit der Seriennummer C02.50032.

$$T_{\text{korr}} = t + \frac{n \cdot (t - t')}{6000} \quad (\text{D-1})$$

$t$  ist die am Thermometer abgelesene Temperatur,  $t'$  die mittlere Fadentemperatur und  $n$  die Anzahl der aus dem Medium herausragenden Grade. Der Wert 6000 im Nenner ist der reziproke Durchschnittswert für den relativen Ausdehnungskoeffizienten von Quecksilber in Glas.

Die Fadenkorrektur betrug bei der Kalibrierung bei 3°C durchschnittlich 0,012°C, bei der Kalibrierung bei 20°C betrug sie 0,003°C, und ist somit für die geforderte Genauigkeit der Kalibrierung nicht relevant.



**Abbildung D-3: Positionierung der Sensoren und des Thermometers mit Kartonscheiben**

## D.1 Auswertung und Ergebnisse der Kalibrierung

Die Temperaturzeitreihen der Kalibrierung der Sensoren sind in Abbildung D-4 und Abbildung D-5 dargestellt.

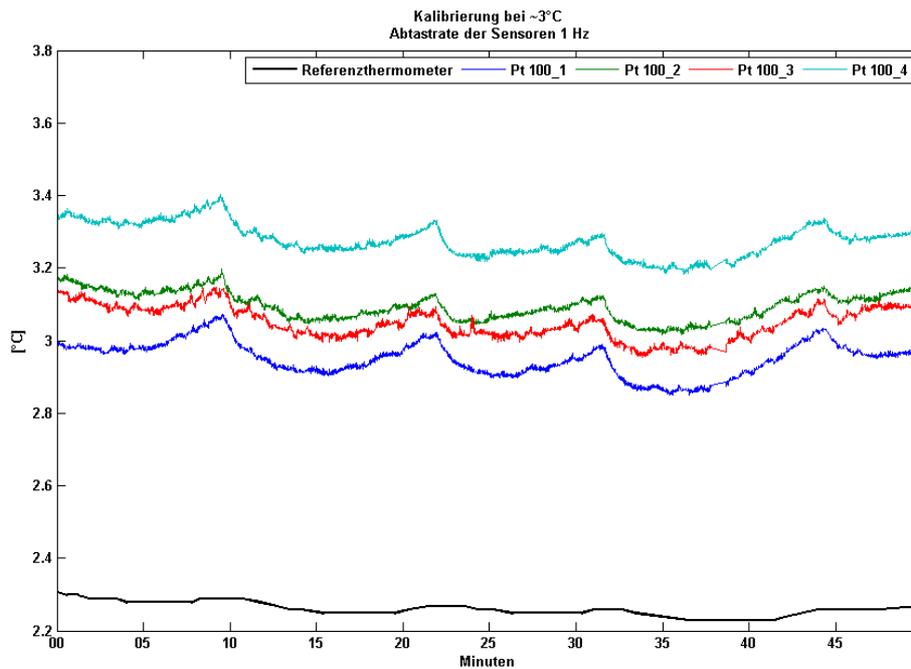


Abbildung D-4: Kalibrierung bei  $\sim 4^{\circ}\text{C}$  (mit Behälter im Wasserbad)

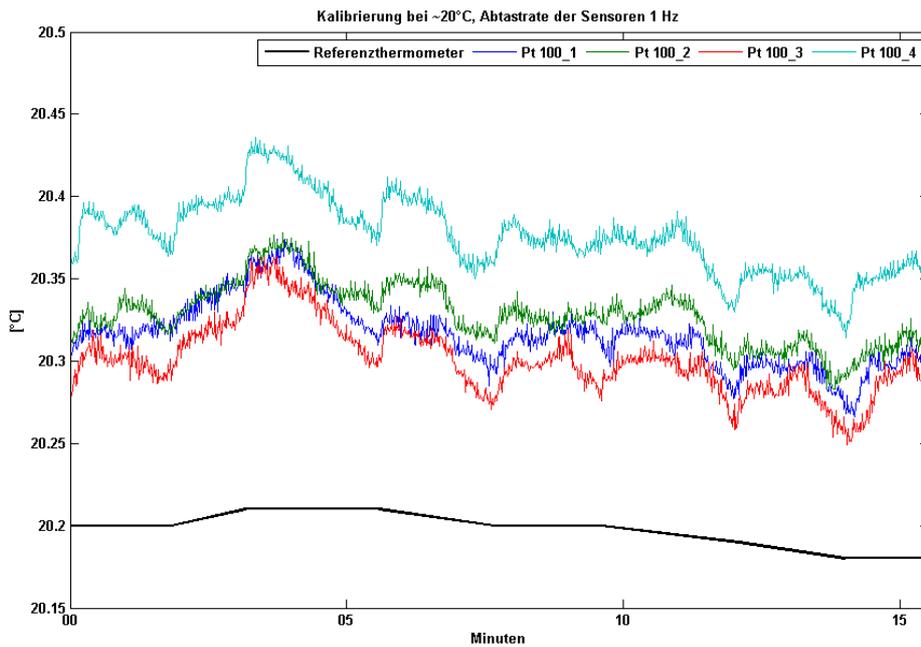


Abbildung D-5: Kalibrierung bei  $\sim 20^{\circ}\text{C}$  (Thermometer frei in der Luft hängend)

In Abbildung D-4 und Abbildung D-5 ist deutlich sichtbar, dass die Messwerte der Sensoren einen Offset zu den mit dem Referenzthermometer bestimmten Temperaturen aufweisen. Die Schwankungen in Abbildung D-4 resultieren aus dem Nachfüllen von Eis in das Wasserbad, mit dem die Temperatur niedrig gehalten wurde. Die Unregelmäßigkeiten in Abbildung D-5 kamen durch die Annäherung und die Wärmeabstrahlung beim Ablesen des Quecksilberthermometers zustande.

Um eine Korrektur der gemessenen Temperatur in einem beliebigen Messbereich durchführen zu können wurde für jeden Sensor eine lineare Kalibrierfunktion der Form

$$T_k = a_0 + a_1 \cdot T_{gem} \quad (\text{D-2})$$

mit  $T_k$  als korrigiertem Temperaturwert,  $a_0$  als Offset  $a_1$  als Steigung der Geraden und  $T_{gem}$  als gemessenem Temperaturwert berechnet. Dies erfolgte über einen Ausgleich nach Parametern. Die Koeffizienten der geschätzten Regressionsgeraden sind in Tabelle D-2 aufgelistet

**Tabelle D-2: Koeffizienten der geschätzten Kalibrierfunktionen der Temperatursensoren**

Koeffizient	Pt100_1	Pt100_2	Pt100_3	Pt100_4
$a_0$ [°C]	0,65	0,88	0,75	0,95
$a_1$ [ ]	0,968	0,960	0,961	0,953
$\sigma_{a_0}$ [°C]	0,005	0,004	0,005	0,004
$\sigma_{a_1}$ [ ]	0,0006	0,0005	0,0006	0,0006

## D.2 Überprüfung bei 4°C, 20° C und 24°C

Um die berechneten Korrekturfunktionen auf ihre Gültigkeit zu testen, wurden weitere Messungen bei ungefähr 4°C und ca. 24°C durchgeführt. Der Versuchsaufbau war gleich wie bei der Kalibrierung bei 3°C. Zusätzlich wurden die Sensoren nach der Montage am Feldkomparator bei ca. 20°C überprüft.

Die von den Sensoren aufgezeichneten Temperaturzeitreihen wurden mit den Parametern aus Tabelle D-2 korrigiert und mit den Ablesungen des Referenzthermometers verglichen. Die maximalen Abweichungen der Sensoren sind in Tabelle D-3 angegeben.

**Tabelle D-3: Größte Abweichungen der Sensoren**

$\Delta t$ bei	Pt100_1 [°C]	Pt100_2 [°C]	Pt100_3 [°C]	Pt100_4 [°C]
ca. 4°C	0,12	0,09	0,19	0,19
ca. 24°C	0,03	0,06	0,23	0,13
ca. 20°C *	-0,25	-0,25	-0,22	-0,17

\*nach Aufkleben der Temperatursensoren auf den Feldkomparator

Die Überprüfung der Sensoren nach dem Aufkleben auf den Feldkomparator zeigt, dass dadurch ein Offset in den Messwerten entstanden ist. Dieser liegt jedoch unter der geforderten Genauigkeit von 0,3°C und kann somit vernachlässigt werden.

### D.3 Abschätzung der Genauigkeit

Wie in Abbildung D-6 ersichtlich, besteht zwischen der Halterung des Trägerbalkens des FC 2009 und der Befestigung des Heidenhain Glasmaßstabs ein Abstand von ca. 0,45 m. Bei einer temperaturbedingten Ausdehnung des Trägerbalkens wird der Nullpunkt des Glasmaßstabes um den Betrag der Längenänderung dieses Teilstückes (in Abbildung D-6 rot hervorgehoben) verschoben.

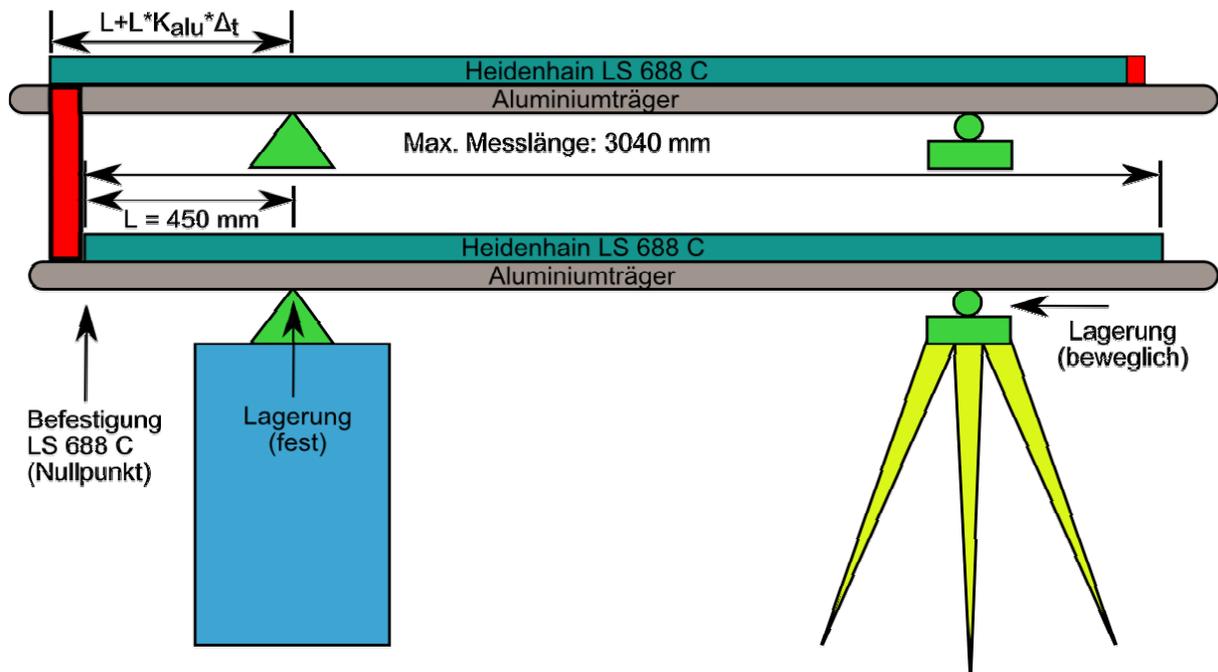


Abbildung D-6: Nullpunkt FC 2009

Da die Maßverkörperung des 3,19 m langen LS 688 C einen Längenausdehnungskoeffizienten von ca.  $(8 \pm 1) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  aufweist (Heidenhain 2012), ist bei einer um maximal  $0,25^\circ\text{C}$  verfälschten Temperaturerfassung am FC 2009 ein Fehler in der Längenänderung von ca.  $7 \mu\text{m}$  zu erwarten.

Der Trägerbalken ist aus Aluminium, welches einen Ausdehnungskoeffizienten von ca.  $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Fischer et al., 2008, S: 116) besitzt. Der durch den möglichen Fehler von  $0,25^\circ\text{C}$  bei der Temperaturerfassung bedingte Fehler in der Längenänderung des Balkenstücks beträgt ca.  $3 \mu\text{m}$ .

Die dadurch bedingte Verschiebung des Nullpunkts des FC 2009 liegt unter der Genauigkeitsanforderung von  $0,01 \text{ mm}$  für die Bestimmung des zyklischen Fehlers des TCA 1800 (Paulitsch, 2010, S. 29). Somit ist eine ausreichende Korrektur der Temperatureffekte mit den Messwerten der kalibrierten Temperatursensoren möglich.

## Anhang E: Anpassung des Satzmessprogramms CALMS

Wie schon bei den Untersuchungen von Paulitsch (2010, S. 84) wurde der Einfachheit halber auch in dieser Arbeit das von R. Lesjak im Zuge seiner Bakkalaureatsarbeit am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme erstellte Satzmessprogramm CALMS verwendet (Lesjak, 2007). In seiner ursprünglichen Funktionalität war das Programm als Satzmessprogramm für automatisierte Monitoringaufgaben konzipiert. Im Programm werden mit Hilfe eines Lernsatzes Ziele definiert, die dann zu bestimmten Zeitpunkten oder in definierten Intervallen gemessen werden.

Die Untersuchungen zur meteorologischen Korrektur in Kapitel 7 wurden mit dem von Paulitsch (2010, Anhang C) editierten Programm durchgeführt. Zusätzlich zu diesen Änderungen war es im Zuge der Arbeit notwendig weitere Anpassungen vorzunehmen.

Bei Versuchen im Messlabor stellte sich heraus, dass bei jeder Wiederholungsmessung die ursprüngliche Lernsatzposition angefahren wurde, auch wenn der Reflektor inzwischen verschoben worden war. Dies hatte zur Folge, dass zwar die erste Messung jeder Position ins Zentrum des Prismas erfolgte, die neun Wiederholungen jedoch exzentrisch getätigt wurden. Um dem vorzubeugen wird der Lernsatz nach jeder Messung mit der aktuellen Prismenposition überschrieben.

Die standardmäßige Messung in 2 Kreislagen wurde für die Messungen zum Komparator unterbunden und eine Benutzerauswahl hinzugefügt, die es erlaubt zu wählen, ob vor bzw. nach der Messung zum Komparator eine Messung zur Bestimmung der Drift stattfinden soll.

Der Programmablauf wurde so verändert, dass nach jeder vollständigen Messung auf einen Input des Users gewartet wird, bevor die nächste Messung ausgelöst wird. Dadurch wird vermieden, dass die EDM Messungen bei eventuellen Komplikationen am Komparator durchgeführt werden, bevor der Messwagen verschoben wurde.

Für die Messungen zur Absolutwertbestimmung wurde das Programm weiter abgeändert, so dass nach 10 Messungen in einer Kreislage ein Userinput abgewartet wird, um Zeit zum Montieren des nächsten Prismas zu haben. Nach Messung der drei Prismen wird eine manuelle Messung zu einer Referenzrichtung (Hz 0) durchgeführt.

Die durchgeführten Änderungen am Programmcode sind in Tabelle E-1 bis Tabelle E-4 protokolliert.

**Tabelle E-1: Änderungen im m –file „fig\_Calms.m“ (Messstrecke)**

Codezeile	Änderung
1028	„anzWhDrift“ gibt Anzahl Wiederholungsmessungen für Driftbestimmung an
1092 – 1214	Abfrage ob und wann (vor oder nach Messung z. Komparator) Driftbestimmung durchgeführt werden soll und entsprechend Start derselben
1160	Anpassung der Wiederholungen in der for-Schleife an Anzahl der Ziele
1187	Anpassung der Zielnummer wegen Driftmessung
1239	Abfrage der Kreislage, Kreislagenwechsel nur bei Driftbestimmung
1291	Geänderte Funktion „doMeasAutPau_FUCHS“ aufrufen
1294 – 1313	Lernsatz nach jeder Messung neu abspeichern
1368 – 1382	Lernsatz nach jeder Messung neu abspeichern (bei manueller Anzielung)
1549	Unterbrechen des Programms bis Eingabetaste gedrückt wird
1578	Sleepmodus wird nie aktiviert da Probleme mit Verbindungsverlust
1625 – 1629	Durchführung der Driftbestimmung nach Messung z. Komparator (nach Abfrage)

**Tabelle E-2: Änderungen im m-file „fig\_Calms.m“ (Referenzstrecke)**

Codezeile	Änderung
1129	Anpassen der Wiederholungen in der for –Schleife an Anzahl der Ziele
1208 – 1210	Abfrage der Kreislage
1262 – 1277	Lernsatz nach jeder Messung neu abspeichern
1332 – 1346	Lernsatz nach jeder Messung neu abspeichern (bei manueller Anzielung)
1458 – 1460	Beginn eines neuen Satzes nach erster Messung in zweiter Kreislage

**Tabelle E-3: Änderungen im m –file „doMeasAutPau\_FUCHS.m“  
(ursprünglich „doMeasAutPau“)**

Codezeile	Änderung
57 – 59	Anpassung der Abfrage zur Aktivierung der ATR Feinsuche an Anzahl der Ziele und Driftbestimmung

**Tabelle E-4: Änderungen im M – file „fig\_CALMS.m“ (Absolutwerte)**

Codezeile	Änderung
1229 ,1302	Automatische Messung bis jedes Prisma 10 mal gemessen, dann 1x manuelle Messung
1484 - 1489	Anhalten des Programms um nächstes Prisma zu montieren

## Anhang F: Untersuchung der Reflektivität der Prismen

Die am Horizontalkomparator bestimmten Abweichungen des EDM zeigen je nach verwendetem Prisma unterschiedliche Amplituden (siehe Abbildung 10-3). Die Messungen mit den Miniprismen ergaben größere Abweichungen als die mit dem Leica Standardprisma. Es wurde vermutet, dass das Leica Standardprisma einen höheren Anteil des EDM Messsignals reflektiert und die größeren Abweichungen der Miniprismen durch Signalverluste zustande kommen. Um dies zu überprüfen wurde eine Untersuchung der reflektierten Intensitäten der einzelnen Prismen durchgeführt. Die Untersuchung wurde am 22. 01. 2013 im Messlabor des IGMS durchgeführt. Die Intensität des rückgestrahlten Signals wurde mit einem *Power Meter 1815 C* und dem dazugehörigen Sensor *Photodetector 818-SL* der Firma Newport gemessen. Die technischen Daten der Instrumente sind in Tabelle F-1 und Tabelle F-2 angegeben.

**Tabelle F-1: Technische Daten Newport Photodetector 818-SL  
(Newport 2013, c)**



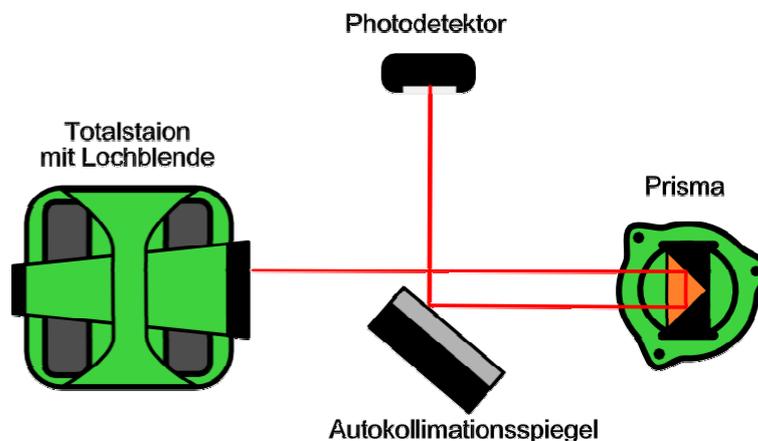
Spektralbereich	400 bis 1100 nm
Maximal messbare Leistung	2 W
Durchmesser Sensorelement	1,13 cm
Fläche Detektor	1 cm <sup>2</sup>
Messunsicherheit	400-940 nm: 1% 941-1100 nm: 4 %
Seriennummer	8605

**Tabelle F-2: Technische Daten Newport Optical Power Meter 1815 C  
(Newport 2013, b)**



Stromversorgung	6 x 1.5 V AA Batterien
Schnittstellen	1 x Input BNC 1 x Output BNC
Abtastfrequenz	2.5 Hz
Betriebstemperatur	18°C – 28°C
Seriennummer	3397

Der Versuchsaufbau und der Strahlengang sind in Abbildung F-1 dargestellt. Die Apertur des TCA 1800 wurde mit einer Lochblende mit ca. 5 mm Durchmesser abgedeckt. Das EDM Signal wurde in den linken Randbereich des zu untersuchenden Prismas gesendet und das parallel dazu auf der rechten Seite reflektierte Signal wurde mit Hilfe eines Autokollimationsspiegels auf den Photodetektor umgelenkt.



**Abbildung F-1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Intensitäten**

Da die Wellenlänge des EDM Messstrahls außerhalb des sichtbaren Bereiches liegt wurde der Aufbau mit Hilfe einer Photokamera mit Infrarot Sensor durchgeführt, um Strahlbeschneidungen zu vermeiden. Das Messlabor wurde komplett abgedunkelt um Ungenauigkeiten in den Messungen durch Streulicht zu vermeiden.

**Tabelle F-3: Gemessene Intensitäten**

Prisma	Rückgestrahlte Intensität [*]
Leica Standardprisma	9,44
Miniprisma Geodäsie Austria	9,96
Miniprisma Goecke	4,87

\*Einheiten laut Gerät [ $\mu\text{W}\cdot 20$ ], keine Kalibrierung vorhanden

Die Leistungen der reflektierten Messsignale sind in Tabelle F-3 angeführt. Die Intensitäten des reflektierten Signals des Leica Standardprismas und des Miniprismas der Firma Geodäsie Austria sind ähnlich groß, die Intensität des Goecke Miniprismas ist jedoch nur halb so groß. Dies spricht gegen die Vermutung von unterschiedlichem Absorptionsverhalten der Prismen als Ursache für die verschieden großen Amplituden der Abweichungen, da das Standardprisma und das Miniprisma Geodäsie Austria bei annähernd gleich großer Intensität des reflektierten Signals die größten (Geodäsie Austria, siehe Abbildung 10-3a) und kleinsten (Leica Standardprisma, Abbildung 10-3c) Amplituden in den Horizontalkomparator-messungen zeigen. Somit bleibt die Ursache der verschieden großen Amplituden weiterhin unklar.

# Anhang G: Aushang zur Diplomarbeit

**Thema:** Untersuchung des zyklischen Fehlers von EDM Geräten bei größeren Distanzen mit dem mobilen Feldkomparator FC2009

Das Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme verfügt über einen 30 m langen Horizontalkomparator zur Überprüfung von EDM Geräten. Bei der Untersuchung des zyklischen Fehlers diverser Instrumente wurden distanzabhängige Amplituden festgestellt.

Um die zyklischen Fehler auch bei größeren Distanzen bestimmen zu können, wurde ein 3 m langer portabler Komparator entwickelt, der auch im Feld eingesetzt werden kann.

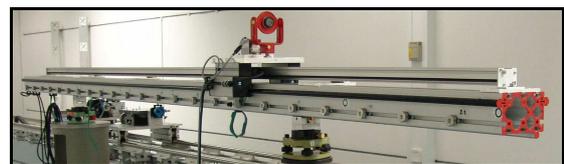
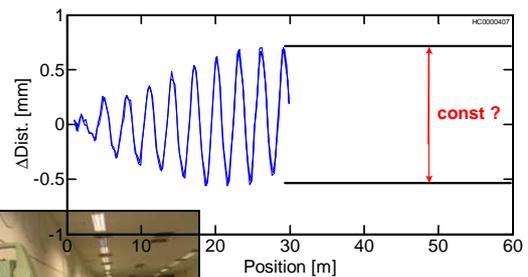
Dieser Komparator wurde bereits in einer Masterarbeit (DI J. Paulitsch) untersucht und erste Messungen mit höchst interessanten Resultaten erzielt.

Im Zuge einer weiteren Masterarbeit soll nun das Hauptaugenmerk auf die Untersuchung der zyklischen Fehler einiger moderner Totalstationen in Kombination mit heute gebräuchlichen Reflektoren untersucht werden. Der Einsatz des Feldkomparators soll auf einer max. etwa 1000 m langen Teststrecke erfolgen, bei der die heute in der Praxis relevanten Entfernungen realisiert werden können.

Für die Masterarbeit relevante Themen sind

**Aufgaben:**

- Einarbeitung in die Thematik, Literatur
- Planung der Messungen und Möglichkeiten der atmosphärischen Korrekturen
- Auswahl der Instrumente und Reflektoren
- Testmessungen
- Durchführung der Untersuchungen im Labor (Horizontalkomparator) und im Feld (Feldkomparator FC2009)
- Modellierung der zyklischen Fehler, Analysen



Die Untersuchungen können im Messlabor des Instituts und am Dach des Institutsgebäudes durchgeführt werden. Folgendes Instrumentarium steht zur Verfügung: vollautomatisierter Horizontalkomparator, semiautomatisierter 3 m Feldkomparator FC2009, moderne Totalstationen

**Betreuer:** Dr. Helmut WOSCHITZ

**Bearbeiter:** gesucht