

**Johannes Paulitsch**

**Untersuchung des  
mobilen Feldkomparators FC 2009  
für die Bestimmung des  
zyklischen Phasenfehlers von  
EDM-Geräten**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



**Technische Universität Graz**

Betreuer  
DI Dr. techn. Helmut Woschitz

Begutachter:  
o. Univ.- Prof. DI Dr. techn. Fritz K. Brunner  
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, September 2010

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 entnommene 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**

Ganz besonders und an erster Stelle möchte ich meinen Eltern Christine und Norbert Paulitsch danken, die mir mit ihrer finanziellen Unterstützung meine Ausbildung überhaupt erst ermöglicht haben. Sie haben auch meine „Ausflüge“ in den Spitzensport mit den vielen Trainingseinheiten und Meisterschaftsspielen im Volleyball interessiert verfolgt und über die sich daraus resultierenden Verzögerungen im Studium verständnisvoll hinweggesehen.

Weiters möchte ich meine Freundin Lara erwähnen, die äußerst verständnisvoll für meine Arbeit war und auf viel gemeinsame Zeit verzichten musste. Sie motivierte mich immer wieder neu und trug mit stundenlangem Korrekturlesen einen wichtigen Beitrag zum Gelingen meiner Arbeit bei.

Meine Studienkollegen und Freunde Martin Gabriel und Christian Stangl haben mich bei den Messeinsätzen tatkräftig unterstützt und stets ein offenes Ohr für Diskussionen gehabt.

Mein Betreuer Dr. Helmut Woschitz hatte die Idee für den Feldkomparator und die vorliegende Arbeit und hielt mich auch während der Arbeit mit vielen Ideen auf Trab. Er nahm sich immer für meine Anliegen Zeit und half mir stets bei Problemen weiter.

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme unter der Leitung von Prof. Dr. Fritz K. Brunner stellte mir alle nötigen Instrumente und Kalibriereinrichtungen zur Durchführung der Arbeit und einen Arbeitsplatz am Institut zur Verfügung.

DI (FH) Robert Presl hat den mobilen Feldkomparator im Detail geplant und mit äußerster Sorgfalt angefertigt. Sonderanfertigungen, die während der Arbeit notwendig wurden, hat er in kürzester Zeit konstruiert und realisiert. Die TCA 1800 Konsole wurde von Ing. Rudolf Lummerstorfer gebaut, der mir auch allzeit das benötigte Instrumentarium bereitstellte und stets für die Sicherheit aller sorgte.

Die TU Graz (Studiendekan Prof. Dr. Norbert Bartelme) hat mir ein Förderungsstipendium zur Verfügung gestellt. Ohne dieses wäre die Realisierung des Feldkomparators für meine Arbeit nicht möglich gewesen. Die Firma Heidenhain (Dr. Andreas Eberherr) hat den Glasmaßstab kostenlos zur Verfügung gestellt. Dies war von zentraler Bedeutung für meine Arbeit.

Vielen Dank an alle beteiligten Personen und Institutionen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

## **Kurzfassung**

Die Existenz von zyklischen Fehlern bei elektrooptischen Distanzmessern ist seit vielen Jahren bekannt. Durch die rasante Entwicklung von leistungsfähigen und hochgenauen Messinstrumenten in den vergangenen Jahren ist die Bedeutung des zyklischen Fehlers jedoch zurückgegangen und wird heute oft ignoriert. Bei Präzisionsmessungen spielt dieser Fehler aber nach wie vor eine wichtige Rolle und die Bestimmung des zyklischen Fehlers ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Kalibrierung von elektronischen Distanzmessgeräten. Für eine Modellierung werden Informationen über das Verhalten des zyklischen Fehlers über den gesamten Messbereich des EDM-Geräts benötigt. Daher ist eine Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers auf einer EDM-Prüfanlage in einem Labor mit in der Regel eher kurzen Kalibrierstrecken (oft unter 50 m) nicht ohne Annahmen möglich.

Am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz wurde daher als Ergänzung des bestehenden 30 m langen Horizontalkomparators ein mobiler Feldkomparator gebaut, der zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers bei beliebigen, im Messbereich des jeweiligen Gerätes liegenden, Distanzen verwendet werden kann. Dieser mobile Feldkomparator, mit einem 3 m langen Heidenhain Glasmaßstab als Längenreferenz, wird im Zuge dieser Masterarbeit erstmals untersucht und eingesetzt. Neben der Untersuchung der Eigenschaften des mobilen Feldkomparators wurden ein prinzipieller Funktionstest, und Tests zur Beurteilung der Feldtauglichkeit durchgeführt sowie Korrekturen erarbeitet, ohne die die geforderte Genauigkeit nicht erreicht werden kann. Weiters wird ein geeigneter Messablauf beschrieben, der die Möglichkeit einer semiautomatischen Messung aufzeigt. Dieser wurde anhand einer exemplarischen Bestimmung des zyklischen Fehlers bei einem Distanzbereich außerhalb des Labors getestet und damit ein experimenteller Eignungstest des mobilen Feldkomparators durchgeführt.

Die Arbeit liefert damit alle nötigen Grundlagen um die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers mit dem neu entwickelten mobilen Feldkomparator durchführen zu können und ermöglicht damit künftig Detailuntersuchungen individueller Geräte.

## **Abstract**

Cyclic errors of EDM-instruments are well known as an error source in electronic distance measurements. Due to the development of new capable instruments, the influence and therefore the importance of the cyclic error diminished. Nevertheless, cyclic errors are still apparent for specific EDM-instruments and affect at least the results of high precision measurements. This is why the determination of cyclic errors is still relevant for the calibration of EDM-instruments.

One critical aspect for modelling cyclic errors is an increase of the cyclic errors amplitude with distance for some instruments. Then, the behaviour of the error has to be known over the whole distance range of the EDM in order to derive a valid model. But calibration testlines in most of the laboratories are too short and do not cover the whole operating range of the EDM. Thus, at the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems of the Graz University of Technology a mobile calibration facility was developed. A 3 m long Heidenhain glass scale yields as a reference.

This thesis describes the characteristics of this mobile facility for the first time. A performance check is done and the field application is accomplished. All corrections needed for a useful handling of the mobile calibration facility are elaborated. Finally, as a first example the determination of the cyclic error for a long distance (95 m) is presented.

# 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>Bestehende Arbeiten.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Messprinzip der elektronischen Streckenmessung.....</b>	<b>9</b>
3.1	Impulsverfahren.....	10
3.2	Phasenvergleichsverfahren.....	10
<b>4</b>	<b>Fehlerquellen der elektrooptischen Entfernungsmessung.....</b>	<b>13</b>
4.1	Einfluss der Atmosphäre .....	13
4.2	Abweichungen der Modulationsfrequenz.....	16
4.3	Fehler bei der Festlegung des Gerätenullpunktes .....	16
4.4	Messabweichungen bei der Phasenmessung .....	17
4.4.1	<i>Auflösevermögen</i> .....	17
4.4.2	<i>Phaseninhomogenitäten</i> .....	18
4.4.3	<i>Zyklischer Phasenfehler</i> .....	19
<b>5</b>	<b>Zyklischer Phasenfehler .....</b>	<b>20</b>
5.1	Ursachen für das Auftreten des zyklischen Phasenfehlers .....	20
5.1.1	<i>Elektrische Signalüberlagerung</i> .....	20
5.1.2	<i>Optische Signalüberlagerung</i> .....	21
5.1.3	<i>Mehrwegsignale</i> .....	21
5.2	Zusammenwirken der einzelnen Fehlerkomponenten .....	22
5.3	Zyklische Phasenfehler mit Periode des Grobmaßstabes .....	22
5.4	Maßnahmen zur Reduktion des zyklischen Fehlers .....	22
5.5	Möglichkeiten zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers .....	23
5.6	Auswertung und Modellierung des zyklischen Phasenfehlers.....	26
5.6.1	<i>Graphische Ausgleichung einer einfachen Sinusschwingung</i> .....	27
5.6.2	<i>Ausgleichung einer einfachen Sinusschwingung</i> .....	27
5.6.3	<i>Fourieranalyse</i> .....	27
<b>6</b>	<b>Der mobile Feldkomparator FC 2009 .....</b>	<b>29</b>
6.1	Anforderungen.....	29
6.1.1	<i>Genauigkeit der Referenzmessungen</i> .....	29
6.1.2	<i>Abmessungen des mobilen Feldkomparators</i> .....	30
6.1.3	<i>Flexibilität der Prismenpositionen</i> .....	31
6.2	Aufbau und Funktionsweise des mobilen Feldkomparators .....	31
6.3	Heidenhain Glasmaßstab LS 688C.....	34

<b>7</b>	<b>Untersuchung des mobilen Feldkomparators im Messlabor .....</b>	<b>36</b>
7.1	Allgemeines .....	36
7.2	Aufbau am Horizontalkomparator .....	36
7.2.1	<i>Versuchsreihe am Horizontalkomparator .....</i>	<i>36</i>
7.2.2	<i>Messungen mit dem Laserinterferometer .....</i>	<i>38</i>
7.3	Vorversuch .....	40
7.3.1	<i>Präzision des Glasmaßstabs der Firma Heidenhain .....</i>	<i>41</i>
7.3.2	<i>Vergleich der Messungen in Hin- und Rückweg .....</i>	<i>42</i>
7.3.3	<i>Vergleich Glasmaßstab LS 688C - Interferometer .....</i>	<i>42</i>
7.4	Reproduzierbarkeit der durch die Pfannen vordefinierten Positionen .....	44
7.5	Einfluss der Geometrie des Trägerbalkens .....	47
7.5.1	<i>Präzisionsnivellment .....</i>	<i>47</i>
7.5.2	<i>Erfassung der Neigung im Feld .....</i>	<i>49</i>
7.6	Änderung der Balkengeometrie durch Variation des Durchhangs .....	53
7.7	Initialisierungstest .....	55
7.8	Resümee der Untersuchungen des mobilen Feldkomparators im Messlabor .....	56
<b>8</b>	<b>Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers im Labor für den Leica TCA 1800 .....</b>	<b>58</b>
8.1	Messungen am Horizontalkomparator .....	59
8.1.1	<i>Aufbau .....</i>	<i>59</i>
8.1.2	<i>Auswahl des Instrumentariums .....</i>	<i>60</i>
8.1.3	<i>Durchführung der Messungen .....</i>	<i>62</i>
8.2	Auswertung .....	64
8.3	Ergebnisse .....	66
8.3.1	<i>Reflektoren orthogonal zum EDM-Gerät .....</i>	<i>66</i>
8.3.2	<i>Gegenüber dem EDM -Messstrahl verdrehte Reflektoren .....</i>	<i>69</i>
8.4	Analyse der Untersuchungen am Horizontalkomparator .....	71
8.5	Modellierung des zyklischen Fehlers .....	72
8.5.1	<i>Trendelimination vor der Modellierung .....</i>	<i>72</i>
8.5.2	<i>Verschiedene Modelle .....</i>	<i>73</i>
8.5.3	<i>Statistische Tests .....</i>	<i>79</i>
8.6	Resümee der Modellierung der Restabweichungen der Labormessungen .....	81
<b>9</b>	<b>Aufbau des mobilen Feldkomparators im Feld und Messablauf .....</b>	<b>83</b>
9.1	Messkonfiguration .....	83
9.1.1	<i>EDM-Messung .....</i>	<i>84</i>
9.1.2	<i>Glasmaßstabsmessung .....</i>	<i>85</i>
9.1.3	<i>Neigungsmessung .....</i>	<i>86</i>
9.1.4	<i>Messung der Meteorologie .....</i>	<i>86</i>
9.2	Ablauf der Messungen mit dem mobilen Feldkomparator .....	87
9.2.1	<i>Referenzziel .....</i>	<i>88</i>
9.2.2	<i>Ziel am mobilen Feldkomparator .....</i>	<i>88</i>
9.2.3	<i>Manuelles Ziel .....</i>	<i>89</i>
9.2.4	<i>Fernsteuerung des TCA 1800 .....</i>	<i>90</i>
9.2.5	<i>Dauer der Messung .....</i>	<i>90</i>

<b>10</b>	<b>Überprüfung der Funktionalität sowie der Feldtauglichkeit des mobilen Feldkomparators</b> .....	<b>91</b>
10.1	Vergleichsmessung zwischen Horizontalkomparator und mobilen Feldkomparator unter Laborbedingungen .....	91
10.1.1	<i>Auswertung der Vergleichsmessungen im Labor</i> .....	92
10.1.2	<i>Bestimmung der Restabweichungen</i> .....	94
10.2	Vergleichsmessung zwischen Horizontalkomparator und dem mobilen Feldkomparator unter Feldbedingungen .....	95
10.2.1	<i>Auswertung der Vergleichsmessungen im Feld</i> .....	96
10.3	Vergleichsmessung zwischen Horizontalkomparator und schiefstehenden mobilen Feldkomparator .....	98
10.3.1	<i>Ergebnis der Untersuchung mit Schrägstellung des Balkens</i> .....	99
<b>11</b>	<b>Exemplarische Bestimmung des zyklischen Fehlers im Feld bei einer Entfernung von ca. 95 m</b> .....	<b>102</b>
11.1	Messkonfiguration für die Untersuchungen am Dach .....	102
11.2	Auswertung der Feldmessungen .....	105
11.3	Erkenntnisse aus dem Praxistest.....	109
11.4	Integration der Ergebnisse im Feld in ein Modell aus Labormessungen .....	109
<b>12</b>	<b>Resümee</b> .....	<b>113</b>
12.1	Zusammenfassung.....	113
12.2	Empfehlungen für Folgeuntersuchungen.....	115
	<b>Referenzen</b> .....	<b>117</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Längenmessgerät Heidenhain LS 688C</b> .....	<b>121</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Reproduzierbarkeit der Pfannenpositionen</b> .....	<b>127</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Adaption des Satzmessprogramms CALMS</b> .....	<b>129</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Testmessung zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit des TCA 1800 im Feld</b> .....	<b>131</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Erstellte Matlab Routinen</b> .....	<b>133</b>

# 1 Einleitung

Die Existenz von zyklischen Fehlern bei elektrooptischen Distanzmessern ist seit vielen Jahren bekannt. Durch die rasante Entwicklung von leistungsfähigen und hochgenauen Messinstrumenten und Systemen von verschiedenen Instrumenten- und Systemherstellern in den vergangenen Jahren konnte die Messgenauigkeit vor allem bei den EDM-Geräten gesteigert werden (Gottwald et al. 1998: S. 50). Die Bedeutung des zyklischen Fehlers ist durch diese Weiterentwicklungen zurückgegangen.

Für viele Aufgabenbereiche kann dieser Fehler vernachlässigt werden, nicht jedoch für Präzisionsmessungen (Witte und Schmidt 2000: S. 370). Sind die Genauigkeitsanforderungen sehr hoch, muss entweder mit teurem Spezialinstrumentarium gearbeitet werden oder aber die verwendeten Instrumente werden bezüglich ihrer Messabweichungen untersucht und die Messungen entsprechend korrigiert. Dadurch wird es oft möglich für Präzisionsmessungen kostengünstigere Geräte zu verwenden, die a priori eine geringere Genauigkeit aufweisen.

Zyklische Phasenfehler können auch bei Laserscannermessungen (Ingesand 2006 bzw. Langer et al. 2000) sowie allen anderen reflektorlosmessenden Distanzmessern auftreten, sofern die Distanzmesseinheit auf dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens beruht. Somit bleibt die Bestimmung des zyklischen Fehlers ein wichtiger Bestandteil bei der Kalibrierung von elektronischen Distanzmessgeräten. Diese ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die zyklischen Korrekturen über den gesamten Messbereich bestimmt werden, da entfernungsabhängige Änderungen von zum Beispiel der Amplitude zu vermuten sind. Eine Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers wird aber zumeist unter Laborbedingungen auf einer Horizontalkomparatorbank vorgenommen. Dabei wirkt die Länge des jeweiligen Messlabors limitierend auf den realisierbaren Distanzbereich. Für die Bestimmung des zyklischen Fehlers für den gesamten Messbereich eines EDM-Gerätes wird daher ein mobiler Feldkomparator benötigt, der Messungen zur vollständigen Modellierung des zyklischen Phasenfehlers ermöglicht.

## 1.1 Motivation

Untersuchungen mit dem Horizontalkomparator zur Kalibrierung von EDM-Instrumenten im geodätischen Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der Technischen Universität Graz zeigten, dass auch moderne Messgeräte zyklische Fehler in der Distanzmessung aufweisen, die über der Messauflösung der Instrumente liegen (z.B. Fleckl 2007).

Zur Bestimmung des zyklischen Fehlers kommt meist eine Komparatorbank zum Einsatz, die sich in einem Messlabor befindet, wodurch sich aufgrund der Länge des Labors eine Einschränkung des zu untersuchenden Distanzbereichs ergibt. Da sich die Amplitude des periodischen Anteils in den Restabweichungen mit der Distanz ändern kann, ist eine Extrapolation des abgeleiteten Korrekturmodells auf den gesamten Messbereich des EDM-Geräts problematisch. Dazu kommt, dass der zyklische Fehler in Abhängigkeit des Reflektortyps durchaus variieren kann, siehe z.B. Rüeger (1976) oder Gottwald et al. (1998).

Für die Erstellung zuverlässiger Modelle des zyklischen Phasenfehlers werden daher zusätzlich zu den Laboruntersuchungen Messungen bei größeren Entfernungen benötigt. Diese könnten mit Hilfe eines mobilen Feldkomparators realisiert werden. Beispiele dafür wurden in Schwarz (1981) oder Rüeger (1996) gezeigt.

## 1.2 Zielsetzung

2009 wurde vom Betreuer dieser Arbeit ein mobiler Feldkomparator geplant und realisiert (Presl 2009). Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung dieses mobilen Feldkomparators zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers bei elektrooptischen Distanzmessgeräten (EDM). Im Rahmen der Masterarbeit soll die Funktionalität sowie die Handhabung und speziell die Feldtauglichkeit des mobilen Feldkomparators untersucht und experimentell verifiziert werden. Zudem soll die Möglichkeit einer semiautomatischen Messung aufgezeigt werden, wodurch der gesamte Messablauf von einem einzigen Beobachter durchgeführt werden kann

(automatische Messung mit EDM). Weiters gilt es exemplarisch zu zeigen, ob grundsätzlich die Bestimmung und Modellierung des zyklischen Fehlers unter Verwendung des mobilen Feldkomparators bei mittleren und langen Distanzen möglich ist, die Kenntnis der anzubringenden Korrekturen vorausgesetzt. Diese sollen ebenfalls im Zuge dieser Masterarbeit erarbeitet und anhand experimenteller Daten getestet werden. Das zentrale Element stellt aber die Untersuchung des mobilen Feldkomparators (im Folgenden auch mobile Testeinrichtung genannt) dar.

Die Untersuchungen dieser Arbeit sollen die Einsatzmöglichkeit der mobilen Testeinrichtung im Feld aufzeigen und damit den Weg zur künftigen Bestimmung des zyklischen Fehlers bei mittleren und langen Distanzen für verschiedene EDM-Geräte ebnen.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 2 wird ein Überblick über bestehende Arbeiten gegeben. Beispiele für vergleichbare Untersuchungen werden diskutiert und die Entwicklung der unterschiedlichen Analysemethoden des zyklischen Fehlers reflektiert. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Messprinzipien von EDM-Geräten. Die wichtigsten Verfahren werden kurz erläutert und die verschiedenen Fehlerquellen aufgezeigt. Diese werden in Kapitel 4 genauer behandelt und die wichtigsten Messabweichungen für elektrooptische Distanzmessgeräte, die nach dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens arbeiten, diskutiert. Anders arbeitende Distanzmessgeräte weisen eventuell weitere Fehlerquellen auf, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit sind. Der zyklische Fehler wird in Kapitel 5 gesondert beschrieben. Die Ursachen für das Auftreten sowie die Zusammensetzung des zyklischen Fehlers werden erklärt und Maßnahmen zur Reduktion des Fehlers genannt. Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Bestimmung des zyklischen Fehlers und die Auswertung der dafür notwendigen Messungen beschließen diesen Abschnitt. In Kapitel 6 folgt die Beschreibung des mobilen Feldkomparators FC 2009 mit dem Heidenhain Messsystem für die Referenzmessungen.

Die ersten Messungen mit dem Glasmaßstab sowie die Untersuchungen der Eigenschaften des mobilen Feldkomparators werden in Kapitel 7 erklärt. Im Anschluss daran wird die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers auf der Horizontalkomparatorbank im geodätischen Messlabor des IGMS in Kapitel 8 gezeigt. Die Überprüfung der Feldtauglichkeit des FC 2009 (Kapitel 10) liefert die entscheidenden Ergebnisse für die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers im Feld (Kapitel 11). In diesen beiden Kapiteln wird auch exemplarisch gezeigt, wie eine mögliche Modellierung des zyklischen Fehlers aussehen könnte. Die Modellierung des zyklischen Phasenfehlers und die Durchführung der dafür notwendigen Messungen war allerdings nicht Aufgabe dieser Masterarbeit. In Kapitel 12 werden die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Ein Ausblick über die sich aus den Ergebnissen der Arbeit ergebenden Möglichkeiten für fortführende Untersuchungen beschließt die Arbeit.

## 2 Bestehende Arbeiten

Untersuchungen von EDM-Geräten bezüglich zyklischer Fehler wurden bereits in den 1970er und 1980er Jahren durchgeführt. So wurden periodische Fehler bereits bei Schwendener (1971) im Zusammenhang mit dem Wild DI 10 besprochen. Robinson (1974) zeigte experimentell die Änderung der Amplitude des zyklischen Phasenfehlers mit der Distanz. Der theoretische Beweis hierfür wurde in Kahmen (1977) gegeben und von Covell (1979) auf durch Mehrwegsignale verursachte Fehler höherer Ordnung erweitert (Rüeger und Covell 1980).

Das Verfahren und Einrichtungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers werden in Schwarz (1981) beschrieben. Die Bestimmung wird dort sowohl im Labor auf einer Komparatorbank mit einem Interferometer als auch im Feld mit Hilfe einer 12 m langen transportablen Messbahn (Abb. 2.1) mitsamt der zugehörigen Auswertung beschrieben. Diese transportable Messbahn besteht aus sechs Holzkästen, die mit Hilfe von Halterungen und Stellelementen verbunden sind. In diese Holzkästen werden in einer Nut sechs Rechtecksstäbe zu je 2 m Länge aus kohlefaserverstärktem Kunststoff eingesetzt, die alle 10 cm über eine Bohrung zur Aufnahme einer Zentrierkugel verfügen. Die Bohrungen wurden zuvor im Labor auf der Laserinterferometer-Messbahn ausgemessen.

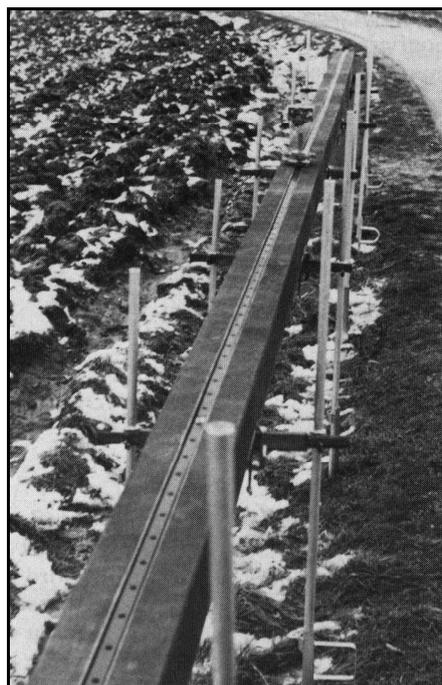


Abb. 2.1: 12 m lange transportable Messbahn, Schwarz (1981)

Rüeger und Covell (1982) diskutierten das mathematische Modell für kurzperiodische und langperiodische Fehler erster und höherer Ordnung und brachten weitere Beispiele für deren experimentelle Bestimmung. Sie schlussfolgerten, dass die damaligen elektrooptischen Distanzmesser mehr als einen zyklischen Fehler aufweisen, jedoch die Amplituden der unterschiedlichen Fehler 5 mm nicht überschreiten.

Rüeger (1996) berichtet von der Bestimmung des zyklischen Fehlers sowohl auf Prüf Strecken verschiedenen Designs als auch mit Hilfe einer statischen Testeinrichtung im Feld. Diese besteht aus einer fixen Mauer auf der ein Stahlmessband als Referenz befestigt wird (siehe Abb. 2.2). Ein Reflektor mit Untersatz kann entlang der Mauer bewegt werden. Durch Integration der Mauer in eine Prüf Strecke ist es möglich die Streckenlängen zu variieren und somit mögliche Entfernungsabhängigkeiten des zyklischen Fehlers zu untersuchen. Die Genauigkeit der Positionierung des Untersatzes des Reflektors auf das Stahlmessband ( $\pm 0,2$  mm) sowie die Genauigkeit der Stahlbandmessungen ( $0,2$  mm + 100 ppm) wirken bei diesem Versuchsaufbau jedoch limitierend auf die erzielbare Genauigkeit bei der Erfassung des zyklischen Fehlers.

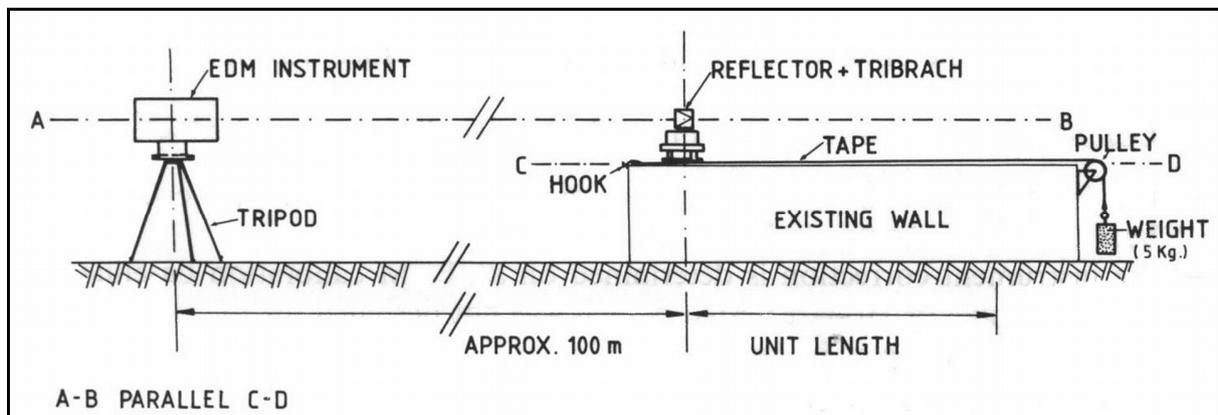


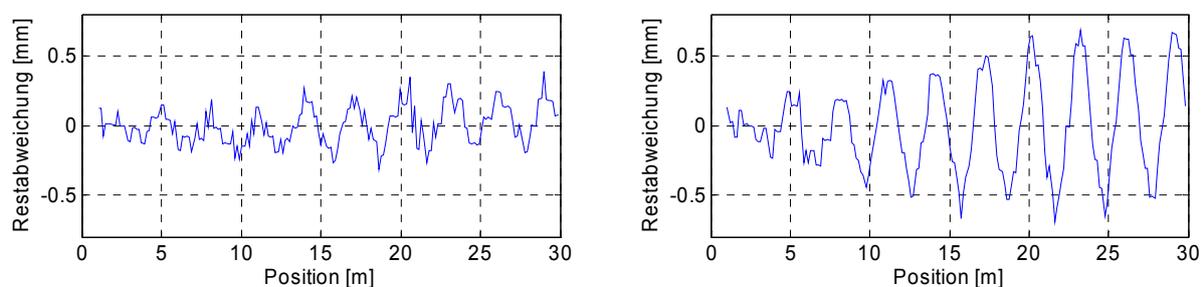
Abb. 2.2: Testeinrichtung zur Bestimmung des zyklischen Fehlers (Rüeger 2007: S.210).

Gottwald et al. (1998) stellten bei Untersuchungen zweier TDA 5000 und eines TDM 5000 von Leica im Labor der Fachhochschule beider Basler bei allen Instrumenten ein signifikantes zyklisches Verhalten fest (maximale Abweichungen von 0,35 mm bei GPR1 Prisma von Leica). Bei manchen Prismen stellten sie eine Abnahme der Amplitude mit der Distanz fest: z.B. von 6 mm bei der 1. Schwingungsperiode bis 1,6 mm bei der 3. Schwingungsperiode. Ein anderes

Prisma (0,5" Tooling Ball Reflektor) zeigte bei den Messungen mit dem TDA 5000 ein klar erkennbares zyklisches Verhalten auf, wobei die Messungen mit dem TDM 5000 kein signifikantes zyklisches Muster erkennen ließen. Als mögliche Ursache für dieses Verhalten wurde eine mögliche Reflexion des EDM-Signals an der ATR-Optik des TDA 5000 genannt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass diese Untersuchungen größtenteils in einem Labor erfolgten. Aussagen über das Verhalten des zyklischen Fehlers, die über die Länge des Messlabors (15 m) hinausgehen, können somit nicht getätigt werden.

Schwarz (2007) behandelt die Kalibrierung von Instrumenten unter Verwendung von Laserinterferometrie. Aufgrund der eingesetzten Messmethode sind diese Untersuchungen jedoch alle auf die Länge des Labors (ca. 30 m) beschränkt. Auf einer Komparatorbank wurden ein TDM 5000 sowie ein TCA 1800 überprüft. Beide Geräte weisen einen zyklischen Phasenfehler mit einer Amplitude von 0,2 mm auf. Über eine mögliche Entfernungsabhängigkeit der Amplitude kann keine Auskunft gegeben werden.

Fleckl (2007) untersuchte den TCA 1800 von Leica sowie das S10 von Zeiss am Horizontalkomparator im geodätischen Messlabor am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass der TCA 1800 auf der untersuchten Strecke von ca. 30 m (entspricht der Länge der Komparatorbank) einen zyklischen Fehler mit anwachsender Amplitude aufwies. Die Spannweite dieses periodischen Anteils betrug für ein Omniprisma mehr als 1 mm (Abb. 2.3, rechts) und für ein Leica Standardprisma ca. 0,6 mm (Abb. 2.3, links).



**Abb. 2.3: Restabweichungen des TCA 1800 für (links) Standardprisma und (rechts) Omniprisma (Fleckl, 2007).**

Fleckl (2007) stellte weiters einen signifikanten Unterschied des zyklischen Fehlers je nach verwendetem Prisma fest. Untersucht wurden ein Omniprisma, sowie ein Standardprisma der Firma Leica.

Die im IGMS-Labor erzielten Ergebnisse bei der Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers waren Anstoß für die Entwicklung des mobilen Feldkomparators (Presl 2009) und zur Durchführung der vorliegenden Arbeit.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es in den vergangenen Jahren viele Untersuchungen von EDM-Instrumenten gegeben hat. Auffällig ist, dass die meisten Untersuchungen in Laboren stattfanden und somit nur für jenen Messbereich, der durch die Länge des Labors abgedeckt wird, gültig sind. Untersuchungen im Feld weisen meist nicht vergleichbare Genauigkeiten auf, da keine Messungen mit übergeordneter Genauigkeit (z.B. interferometrische Messungen) zur Verfügung standen und die entworfenen Systeme somit nicht entsprechende Ergebnisse liefern konnten. Dies soll mit dem für diese Arbeit entwickelten mobilen Feldkomparator möglich werden, was wiederum Voraussetzung dafür ist, dass die Präzision der untersuchten Instrumente mit Hilfe einer geeigneten Kalibrierfunktion gesteigert werden kann.

### **3 Messprinzip der elektronischen Streckenmessung**

Hier soll zum besseren Verständnis dieser Arbeit ein kurzer Überblick über die Grundlagen der elektronischen Streckenmessung gegeben werden. Die elektronische Streckenmessung wird z.B. in Deumlich und Staiger (2002), Rüeger (1996) oder Joeckel et al. (2008) detailliert beschrieben.

Die meisten Messprinzipien der elektronischen Streckenmessung beruhen auf einer sich mit konstanter Geschwindigkeit fortpflanzenden elektromagnetischen Welle bzw. Wellengruppe, die von einem Sender am Anfangspunkt der Strecke ausgesendet, am Zielpunkt reflektiert, und wieder am Anfangspunkt empfangen und ausgewertet wird (Joeckel et al. 2008: S. 17).

Elektronische Streckenmessgeräte werden aufgrund unterschiedlicher Wellenbereiche der verwendeten Trägerwelle klassifiziert. Instrumente, die mit Strahlungen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots arbeiten, werden elektrooptische Distanzmessgeräte genannt. Instrumente, die Radiowellen verwenden, heißen Mikrowellengeräte (Rüeger 1996: S. 31). Letztere wurden früher zur Messung großer Strecken (3 bis 100 km) in Grundlagennetzen verwendet und sind durch den Einsatz von Satellitenverfahren ersetzt worden (Deumlich und Staiger 2002). Somit kommen Mikrowellengeräte heutzutage kaum mehr zum Einsatz und werden aus diesem Grund hier nicht näher behandelt.

Bei vielen modernen EDM-Instrumenten wird das Phasenvergleichsverfahren verwendet, nur einige wenige nutzen das Impulsmessverfahren (Matthews 1997: S. 11). Diese beiden Prinzipien werden kurz in dieser Arbeit beschrieben, da sie auch in Kombination eingesetzt werden. Weitere Messverfahren wie z.B. Entfernungsmessung mittels Dopplereffekt oder durch Lasertriangulation sind z.B. in Rüeger (1996) oder Joeckel et al. (2008) zu finden.

### 3.1 Impulsverfahren

Durch eine Laserdiode wird vom Sender ein Impuls erzeugt, der entlang der Messstrecke zum Zielpunkt und wieder zurück zum Empfänger läuft (Abb. 3.1). Die Zeit, die der Impuls für das Durchlaufen der doppelten Strecke benötigt, wird gemessen. Dies erfolgt mit Hilfe eines elektronischen Zählers. Aus der mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang des Signalwegs lässt sich die Entfernung zwischen Sensor und Zielpunkt ermitteln.

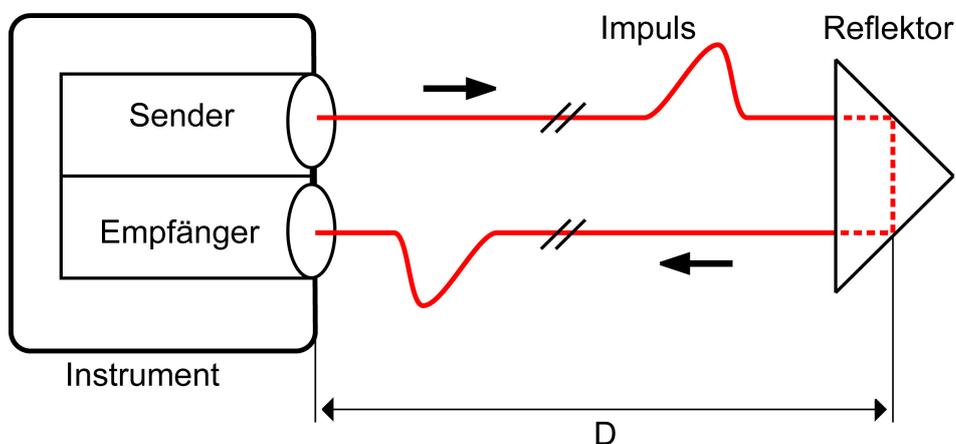


Abb. 3.1: Prinzip der Distanzmessung mit dem Impulsmessverfahren (nach Rieger 1996).

Bei diesem Verfahren treten keine zyklischen Fehler auf. Somit wird auf dieses Verfahren hier nicht näher eingegangen. Eine detaillierte Beschreibung des Impulsverfahren ist z.B. in Rieger (1996), Joeckel et al. (2008), Witte und Schmidt (2000) oder Deumlich und Staiger (2002) zu finden.

### 3.2 Phasenvergleichsverfahren

Dieses Verfahren wird derzeit bei EDM-Geräten am häufigsten eingesetzt (Joeckel et al. 2008: S. 18). Zur Messung der Distanz wird einer kontinuierlich ausgestrahlten Trägerwelle ein sinusförmiges Signal mit Wellenlängen im Bereich von einigen Dezimetern bis zu einigen Kilometern Länge aufmoduliert, das zur Messung mit dem Phasenvergleichsverfahren verwendet wird. Lange Wellen haben ungünstige

Ausbreitungseigenschaften und werden daher kurzwelligen Trägerwellen aufmoduliert. Die Modulation erfolgt bei der elektrooptischen Distanzmessung zumeist durch Amplitudenmodulation (Joeckel et al. 2008: S. 162).

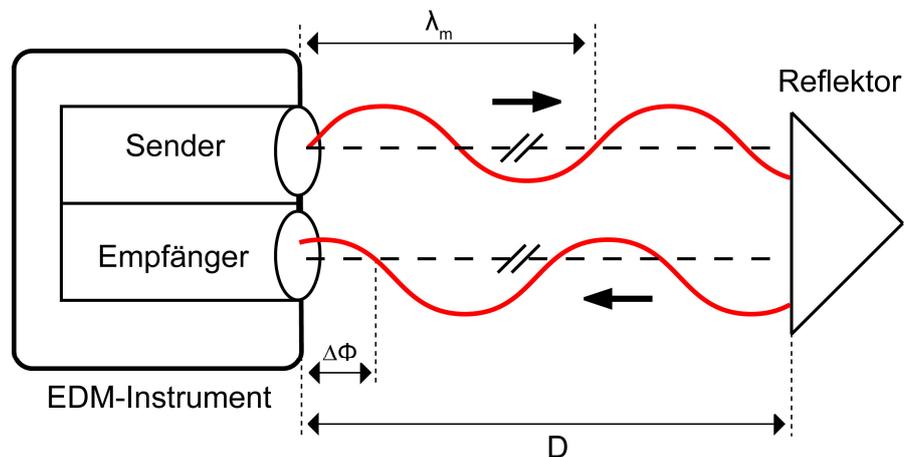


Abb. 3.2: Prinzip der Distanzmessung mit dem Phasenvergleichsverfahren (nach Rieger 1996)

Als Maßeinheit für die Streckenmessung dient die aufmodulierte Welle. Diese wird vom Sender abgestrahlt, durchläuft die zu messende Strecke, wird am Zielpunkt reflektiert, durchläuft die Messstrecke erneut, um schlussendlich wieder am Anfangspunkt empfangen zu werden. Die empfangene Welle trifft gegenüber der ausgesandten Welle mit einer Phasenverschiebung ( $\Delta\phi$ ) ein (Abb. 3.2).

Die Verschiebung der Phase kann mit einem Phasenmesser bestimmt werden. Die zu messende Strecke ( $D$ ) ergibt sich aus der Grundgleichung des Phasenvergleichsverfahrens:

$$2D = N\lambda_m + \Delta\phi \quad \text{bzw.} \quad D = N\frac{\lambda_m}{2} + \frac{\Delta\phi}{2} \quad (3.1)$$

wobei  $N$  die Anzahl der Maßstabswellenlängen,  $\Delta\lambda$  das Wellenreststück und  $\lambda$  die Wellenlänge sind.

Die Anzahl der Maßstabswellenlängen ( $N$ ) kann nicht direkt bestimmt werden, was zu einer Mehrdeutigkeit der Strecke ( $D$ ) führt. Diese Mehrdeutigkeit wird durch die Verwendung von mehr als einer Maßstabswellenlänge gelöst. Mindestens ein Maßstab muss größer sein als das Doppelte der zu messenden Strecke ( $D$ ). Das gemessene Phasenreststück entspricht dann dem Doppelten der gesuchten Strecke

(2D). Nach Joeckel et al. (2008: S. 39) ist die Auflösung der Phasenmessung auf etwa  $1/5000$  bis  $1/10000$  der Periode beschränkt. Zur genauen Bestimmung von  $D$  werden daher mehrere (mindestens zwei) Maßstabswellenlängen benötigt.

Die für die Genauigkeit des Distanzmessgeräts wesentliche Maßstabswelle ist die kleinste, der sogenannte Feinmaßstab ( $U$ ). Er ist für die Feinmessung der Distanz verantwortlich. Die anderen Maßstäbe werden als Grobmaßstäbe bezeichnet, da sie nur Grobwerte für die Distanz liefern.

Hersteller von EDM-Instrumenten verwenden zur Auflösung der Mehrdeutigkeit mehrere Techniken, die z.B. in Rüeger (1996), Joeckel et al. (2008) oder in Witte und Schmidt (2000) beschrieben sind. Daher werden diese hier nicht näher erläutert. Das Ergebnis der Streckenmessung erhält man schließlich durch Zusammenfassung der verschiedenen Grobmaßstäbe mit dem Feinmaßstab. Dies geschieht geräteintern durch einen Mikroprozessor.

Neben der Auflösung der Mehrdeutigkeit stellt die Messung der Phasenverschiebung ein zentrales Problem beim Phasenvergleichsverfahren dar. Das Signal, das die zu messende Strecke durchlaufen hat, wird dabei mit einem Referenzsignal verglichen. Wie bereits oben angesprochen werden für die Feinmessung kleine Maßstäbe, d.h. hohe Oszillatorfrequenzen (15 MHz und mehr), verwendet (Joeckel et al. 2008: S. 69). Bei derart hohen Frequenzen ist die Phasenmessung äußerst schwierig, weshalb die Signale durch Frequenzteilung und Frequenzmischung in phasengleiche Signale niedrigerer Frequenz umgewandelt werden. Die Phasenmessung selbst kann auf unterschiedlichen Techniken basieren (Joeckel et al. 2008):

- Analoge Phasenmessung
- Digitale Phasenmessung
- Phasenmessung aus Intensitätsmessungen

Die einzelnen Verfahren werden z.B. in Joeckel et al. (2008) oder bei Rüeger (1996) näher beschrieben und werden hier nicht weiter behandelt.

Die bei der Phasenmessung auftretenden Messabweichungen begrenzen aber die Genauigkeit der Streckenmessung, siehe nachstehendes Kapitel.

## 4 Fehlerquellen der elektrooptischen Entfernungsmessung

Folgende Größen sind die wichtigsten Einflussfaktoren bei EDM-Messungen:

- Einfluss der Atmosphäre
- Fehler bei der Festlegung des Gerätenullpunktes
- Abweichung der Modulationsfrequenz
- Abweichungen bei der Phasenmessung

Damit wird die Distanzmessung neben der Atmosphäre vor allem durch instrumentell bedingte Messabweichungen beeinflusst (Joeckel et al. 2008: S. 95–138). Die Bestimmung der einzelnen Messabweichungen sollte möglichst unabhängig voneinander erfolgen (Deumlich und Staiger 2002: S. 164). Die genannten Abweichungen werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben, sind aber zumeist nicht Thema dieser Arbeit. Nähere Informationen können z.B. Rüeger (1996), Deumlich und Staiger (2002), oder Joeckel et al. (2008) entnommen werden.

### 4.1 Einfluss der Atmosphäre

Da die Messungen nicht im Vakuum, sondern in dem jeweils vorliegenden Zustand der Atmosphäre durchgeführt werden, beeinflusst die Atmosphäre die Streckenmessung in zweierlei Hinsicht (Deumlich und Staiger 2002: S. 162):

- die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle wird verringert, damit vergrößert sich die Ausbreitungszeit und somit auch die Phasenverschiebung, und
- die geometrische Form der Bahnkurve ändert sich aufgrund von Refraktionsinflüssen, wodurch die gemessene Strecke zu lang ist.

Das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im jeweiligen Medium zur Lichtgeschwindigkeit wird durch den Brechungsindex ausgedrückt. Der Brechungsindex ist sowohl von der Trägerwellenlänge als auch von den meteorologischen Parametern (Lufttemperatur, Druck, Partialdruck des Wasserdampfes, ...) abhängig.

Zur Reduktion der oben genannten Einflüsse werden die gemessenen Strecken meteorologisch korrigiert. Dies erfordert die Bestimmung der meteorologischen Parameter Lufttemperatur ( $t$ ), Luftdruck ( $p$ ) und Partialdruck des Wasserdampfes ( $e$ ). Um den Einfluss fehlerhafter meteorologischer Daten auf den Brechungsindex und somit auf die Streckenmessung abschätzen zu können, wird der Einfluss der jeweiligen Parameter differentiell eingeführt. Für eine angenommene Temperatur von  $t = 15^\circ\text{C}$ , einen Luftdruck von  $p = 1007 \text{ hPa}$  und einen Partialdruck des Wasserdampfes von  $e = 13 \text{ hPa}$  liefert das für die heute verwendeten Trägerwellen folgende Einflüsse (Rüeger 1996: S. 55–56):

- bei einer Abweichung von  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  → Distanzfehler von 1 ppm
- bei einer Abweichung von  $\Delta p = 1 \text{ hPa}$  → Distanzfehler von 0,3 ppm
- bei einer Abweichung von  $\Delta e = 1 \text{ hPa}$  → Distanzfehler von 0,04 ppm

Die oben angeführten Einflüsse lassen erkennen, dass sich eine fehlerhafte Bestimmung der Temperatur sehr kritisch in Bezug auf den Brechungsindex auswirkt. Auch der Einfluss des Luftdrucks ist signifikant. Der Einfluss des Partialdrucks des Wasserdampfes ist bei den heutigen Geräten hingegen sehr gering und kann durch einen mittleren konstanten Betrag ersetzt bzw. für bestimmte Anwendungen vernachlässigt werden.

Es gibt zwei Ursachen für Fehler in den meteorologischen Parametern (Joeckel et al. 2008: S. 122):

1. Ungenaue Messungen der Parameter ( $t$ ,  $p$ ,  $e$ )
2. Repräsentativität der Messung ist für die Verhältnisse entlang der Bahnkurve nicht gegeben

Die unter 1. angeführten Ursachen können durch sorgfältige Messungen (z.B. Vermeidung der Messung in lokalen Temperaturfeldern) und durch Anbringen der Eichkorrekturen (Nullpunkts- und Teilungskorrekturen) der Instrumente reduziert werden (Joeckel et al. 2008: S. 122).

Die Repräsentativität für die meteorologischen Daten ist schwer in den Griff zu bekommen. Zwar ist der gemessene Wert für den Luftdruck als gutes Mittel entlang der Bahnkurve zu sehen, da das Luftfeld der Atmosphäre als zeitlich stabil anzunehmen ist und die Isobarenflächen als horizontal anzusehen sind, jedoch gilt dies für die Lufttemperatur nicht. Im bodennahen Bereich (bis ca. 500 m über der Erdoberfläche) wird das Temperaturfeld von Wärmeleitungs- und Wärmestrahlungseffekten auf die bodennächsten Schichten, die durch die Erwärmung und Abkühlung des Bodens hervorgerufen werden, beeinflusst. Das Temperaturfeld ist auch bei guter Durchmischung durch Wind in Bodennähe wenig homogen und ändert sich ständig (Deumlich und Staiger 2002: S. 162–163). Um die Repräsentativität zu verbessern kann eine Messung der Temperatur sowohl im Stand- als auch im Zielpunkt durchgeführt werden.

Unter Berücksichtigung all dieser Maßnahmen zur Erhebung der meteorologischen Daten ist mit einem verbleibenden Fehler der Streckenmessung aufgrund nicht repräsentativer meteorologischer Daten von 1 ppm zu rechnen (Rüeger 1996: S. 56).

Bei den Messungen mit dem mobilen Feldkomparator ist dies daher eine limitierende Größe, da die daraus resultierenden Abweichungen möglicherweise über der Messauflösung liegen. Daher wurde bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen mit Hilfe von Referenzmessungen zu einem stabilen Ziel, das sich in unmittelbarer Nähe des mobilen Feldkomparators befand, zusätzlich versucht, den Einfluss der Variabilität der Atmosphäre während der Messungen zu bestimmen. Näheres dazu ist in Abschnitt 9.2 zu finden.

## 4.2 Abweichungen der Modulationsfrequenz

Die Modulationsfrequenz der Feinmessung legt bei Distanzmessgeräten den Maßstab fest. Verfälschungen verursachen eine streckenproportionale Entfernungsabweichung. Ursachen für eine Abweichung der Modulationsfrequenz sind nach Joeckel et al. (2008: S. 126–127):

- Alterung des Schwingquarzes
- Temperaturabhängigkeit des Schwingquarzes
- Änderungen der Betriebsspannung

Zur Überprüfung der Frequenz dient ein Frequenzzähler, der die tatsächliche Modulationsfrequenz misst. Aus der Differenz zur Sollfrequenz lässt sich eine Maßstabskorrektur rechnen.

Viele moderne Distanzmessgeräte arbeiten nicht mehr mit einer konstanten Bezugsfrequenz. Aus einer im Instrument abgespeicherten Frequenz-Temperatur-Ganglinie wird in Abhängigkeit von der Quarztemperatur die momentane Bezugsfrequenz interpoliert. In diesen Fällen sollte keine Korrektur wegen abweichender Frequenz erforderlich sein (Joeckel et al. 2008: S. 154-155). Mit dem mobilen Feldkomparator ist es nicht möglich auftretende Maßstabsänderungen zu erfassen. Aus diesem Grund wird die Modulationsfrequenz des EDM-Geräts nicht näher untersucht.

## 4.3 Fehler bei der Festlegung des Gerätenullpunktes

Aufgrund des Unterschieds zwischen dem elektrischen und dem mechanischen Nullpunkt des EDM-Geräts sowie durch die Exzentrizität des Prismenzentrums und durch eine Verzögerung der Laufzeit im Glas entsteht eine Abweichung. Diese wird durch die so genannte Nullpunktkorrektur (auch Additionskorrektur) berücksichtigt (Witte und Schmidt 2000: S. 370-371).

Die Nullpunktkorrektur wird mit Hilfe von Streckenmessungen in allen Kombinationen bestimmt und ist jeweils nur für eine bestimmte Geräte-Prismen-Kombination gültig. Die Bestimmungsgenauigkeit der Nullpunktkorrektur ist wesentlich für die resultierende Streckenmessgenauigkeit, da sie alle Modellabweichungen wie z.B. Atmosphäre, Frequenz, zyklischen Fehler, sowie Bahnkrümmung auffangen muss (Joeckel et al. 2008: S. 136-138). Details zur Bestimmung der Nullpunktkorrektur sind beispielsweise in Joeckel et al. (2008: S. 175-188) zu finden.

#### **4.4 Messabweichungen bei der Phasenmessung**

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, besteht die Aufgabe der Phasenmessung darin, das Wellenreststück der jeweiligen Maßstabsmessungen zu bestimmen. Somit wird die Genauigkeit der Streckenmessung durch die Bestimmung des Reststücks bei der Feinmessung begrenzt (Joeckel et al. 2008: S. 128), da davon ausgegangen wird, dass die Grobmessung, d.h. die Bestimmung der Anzahl von Wellenzügen, fehlerfrei erfolgt.

Messabweichungen können hier folgende Ursachen haben, die nachstehend beschrieben werden:

- Auflösungsvermögen
- Phaseninhomogenitäten
- Zyklischer Phasenfehler

##### **4.4.1 Auflösungsvermögen**

Unter Auflösungsvermögen wird die Fähigkeit eines Instruments verstanden zwei eng beieinander liegende Messwerte als verschieden erkennen zu können. Sie hängt nicht allein vom Phasenmesssystem ab, da Beeinflussungen aufgrund von

Signalabschwächungen und Verzerrungen beim Durchgang durch die Atmosphäre vorliegen. Unter optimalen Voraussetzungen kann bei EDM-Instrumenten eine Auflösungsgenauigkeit in der Größenordnung von  $10^{-4} \cdot U$  bis  $10^{-5} \cdot U$  (mit  $U$  dem Feinmaßstab) erwartet werden (Joeckel et al. 2008: S. 128).

Die Bestimmung der Auflösungsgenauigkeit erfolgt durch Streckenmessungen zu einem mikrometrisch verschiebbaren Zielpunkt. Eine lineare Abhängigkeit zwischen Mikrometer- und EDM-Strecken sollte innerhalb des Reflektorverschiebeweges zu finden sein. Die Abweichungen zu einer ausgleichenden Geraden geben einen Einblick in das Genauigkeitsverhältnis zwischen Phasenmessung und Anzeige (Joeckel et al. 2008: S. 160–161).

#### **4.4.2 Phaseninhomogenitäten**

Haben nicht alle modulierten Strahlen des gesamten Strahlenkegels zur gleichen Zeit dieselbe Phasenlage, spricht man von Phaseninhomogenitäten. Es gibt unterschiedliche Ursachen hierfür. So sind die Sendedioden nicht fehlerfrei herstellbar, wodurch es zu einer unterschiedlichen Modulation des emittierten Lichtstrahls kommt. Weiters wird je nach Entfernung zum Zielpunkt ein anderer Ausschnitt aus dem Strahlenbüschel zur Empfangsdiode zurückgesandt, d.h. zur Messung genutzt. Somit entsteht ein entfernungsabhängiger Streckenfehler, der als Veränderung der Nullpunktkorrektur aufgefasst werden kann (Joeckel et al. 2008: S. 134-135).

Die Bestimmung der Phaseninhomogenitäten kann im Feld erfolgen. Das Ergebnis kann jedoch nicht für eine direkte Korrektur verwendet werden, gibt aber einen Einblick in die Güte, den Alterungszustand und die Justierung des Instruments (Joeckel et al. 2008: S. 175).

Moderne Instrumente weisen eine geringe Phaseninhomogenität auf, die vor allem in den Randbereichen des Messkegels, d.h. bei grober Fehlzielung bzw. starker Dejustierung, signifikant bemerkbar ist (Deumlich und Staiger 2002: S. 164). Durch Verwendung desselben Ausschnitts aus dem Strahlenbüschel, d.h. durch exaktes Anzielen des Reflektors, wird versucht den Effekt der Phaseninhomogenität zu

verringern. Dies wird bei den Untersuchungen im Zuge dieser Masterarbeit durch Messen mit ATR (Automatic Target Recognition) im Wesentlichen gewährleistet. Eine Überprüfung der Phasenhomogenitäten wurde im Zuge der vorliegenden Masterarbeit nicht vorgenommen.

#### 4.4.3 Zyklischer Phasenfehler

Der zyklische Phasenfehler ist ein periodischer Fehler, der bei EDM-Instrumenten, die auf dem Phasenvergleichsverfahren basieren, entsteht. Er wiederholt sich mit der Wellenlänge des Feinmaßstabes  $U$  (Fehler erster Ordnung). Neben diesen Fehlern mit der Periode  $U$  können auch Fehler höherer Ordnung auftreten, die Perioden von  $U/2$ ,  $U/3$  usw. aufweisen (Rüeger 1996: S.175). Der Phasenfehler variiert für Phasenwinkel  $0 < \Phi < 2\pi$  ebenfalls um eine volle Periode. Diese Eigenschaft verleiht dem zyklischen Fehler seinen Namen.

Die Amplitude (und Phase) des zyklischen Fehlers ist nicht konstant, sondern kann sich aufgrund folgender Einflüsse ändern (Rüeger 1996: S. 178):

- Distanz
- Änderung der Signalstärke
- Zeit
- Wartungs- und Reparaturarbeiten

Aus diesem Grund ist es wichtig, bei Instrumenten, die für Präzisionsmessungen verwendet werden, den zyklischen Fehler in regelmäßigen Abständen zu bestimmen und wenn nötig entsprechende Korrekturen an den Messergebnissen anzubringen.

Der zyklische Phasenfehler ist jene instrumentell bedingte Abweichung, die mit Hilfe des im Zuge dieser Arbeit untersuchten mobilen Feldkomparators genauer zu bestimmen ist. Aus diesem Grund wird dieser Fehler im nächsten Kapitel genauer beschrieben.

## 5 Zyklischer Phasenfehler

Um den zyklischen Phasenfehler genauer untersuchen zu können, müssen zunächst die Ursachen für einen derartigen Fehler betrachtet werden. Anschließend wird das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten durchleuchtet und Möglichkeiten der experimentellen Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers diskutiert.

### 5.1 Ursachen für das Auftreten des zyklischen Phasenfehlers

Das Auftreten eines zyklischen Phasenfehlers kann bei der elektrooptischen Entfernungsmessung verschiedene Ursachen haben (Joeckel et al. 2002: S. 129-132).

- Elektrische Signalüberlagerung
- Optische Signalüberlagerung
- Mehrwegsignale

Manche Ursachen erzeugen einen zyklischen Fehler erster Ordnung, andere auch zyklische Fehler höherer Ordnung (Covell und Schwarz 1982). Die unterschiedlichen Fehlerquellen und die daraus resultierenden zyklischen Phasenfehler werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

#### 5.1.1 Elektrische Signalüberlagerung

Die elektrische Signalüberlagerung (auch elektrisches Übersprechen genannt) entsteht aufgrund der Tatsache, dass Sender und Empfänger im selben Gehäuse

nahe beieinander liegen. Somit kommt es zu einer elektrischen Überlagerung von Teilen des Sende- bzw. Referenzsignals auf das empfangene Streckensignal.

Der zyklische Fehler, der durch elektrische Signalüberlagerung entsteht, besitzt eine Amplitude, die mit zunehmender Streckenlänge wächst. Der Phasenfehler wiederholt sich mit einem ganzzahligen Vielfachen des Feinmaßstabes. Ist die gemessene Strecke ein ganzzahliges Vielfaches des Feinmaßstabes, so wird der zyklische Phasenfehler in der Regel nicht gleich Null (Joeckel et al. 2008: S. 129-132).

### **5.1.2 Optische Signalüberlagerung**

Elektrooptische Entfernungsmesser verwenden elektromagnetische Strahlung aus dem Bereich des sichtbaren Lichtes oder der kurzwelligen Infrarotstrahlung. Durch streuende Infrarotstrahlung entsteht ein Fehler, der optische Signalüberlagerung (oder optisches Übersprechen) genannt wird. Hierbei überlagert sich im Empfänger moduliertes Licht, das direkt vom Sender kommt, mit dem Streckensignal (Joeckel et al. 2008: S. 131).

Der so entstehende zyklische Fehler besitzt dieselben Eigenschaften wie der zyklische Fehler aufgrund von elektrischem Übersprechen. Die beiden Fehler unterscheiden sich lediglich in Amplitude und Phase (Joeckel et al. 2008: S. 131).

### **5.1.3 Mehrwegsignale**

Signale, die die zu messende Strecke aufgrund von Reflexionen an Linsen, Sende- und Empfangsdioden mehrmals (öfter als zweimal) durchlaufen, verursachen weitere Fehlerkomponenten des zyklischen Phasenfehlers. Jeder weitere Durchlauf erzeugt eine neue Phasenverschiebung. Die von Mehrwegsignalen verursachten zyklischen Fehler lassen sich in Perioden zerlegen, die sich durch Division des Feinmaßstabes mit ganzen Zahlen ergeben (Joeckel et al. 2008: S. 132). Es entstehen sogenannte zyklische Fehler höherer Ordnung. Die Amplituden solcher zyklischer Fehler sind für

gewöhnlich klein und die Amplitude wird mit zunehmendem Lichtweg immer kleiner (Rüeger 1996: S. 178).

## **5.2 Zusammenwirken der einzelnen Fehlerkomponenten**

Die einzelnen Fehlerkomponenten des zyklischen Fehlers weisen je nach Ursache (siehe Abschnitt 5.1) verschiedene Phasen, Amplituden, sowie Periodenlängen auf und überlagern sich zu einem Gesamtfehler, den es zu korrigieren gilt. Dieser resultierende zyklische Phasenfehler wird meist mit Hilfe einer Fourierreihe beschrieben, wodurch auch Schwingungen höherer Ordnung ausgewertet werden können (Joeckel et al. 2008: S. 132).

## **5.3 Zyklische Phasenfehler mit Periode des Grobmaßstabes**

Die Modulationsfrequenz des Grobmaßstabes liegt bei vielen Geräten an einigen Bauteilen ständig vor, was durch elektrisches Übersprechen während der Feinmessung einen zyklischen Phasenfehler mit der Periode des Grobmaßstabes erzeugen kann. Der so entstandene langwellige zyklische Fehler ist sehr gering und verwischt sich meist zu einer entfernungsabhängigen Änderung der Nullpunktskorrektur (Joeckel et al. 2008: S. 133) und wird daher vernachlässigt.

## **5.4 Maßnahmen zur Reduktion des zyklischen Fehlers**

Von Seiten der Hersteller wird versucht den Einfluss des zyklischen Fehlers möglichst klein zu halten. Folgende Maßnahmen sollen dies ermöglichen (Joeckel et al. 2008: S. 133 oder Rüeger 1996: S. 179):

- Elektrisches Abschirmen von Sender und Empfänger
- Trennung von Sende- und Empfangsoptik
- Werkseitige numerische Bestimmung des zyklischen Fehlers und geräteinterne Korrektur

Die elektrische Abschirmung von Sender und Empfänger vermindert das elektrische Übersprechen. Durch Trennung der Sende- und Empfangsoptik wird die optische Signalüberlagerung verringert. Bei der Korrektur des zyklischen Fehlers mittels numerischer Bestimmung wird üblicherweise angenommen, dass sich Phase und Amplitude des zyklischen Fehlers nicht mit der Distanz ändern (Rüeger 1996: S. 179). Wie in Abschnitt 4.4.3 beschrieben können sich Phase und Amplitude des zyklischen Fehlers jedoch ändern (z.B. mit der Zeit) und eine Kalibrierung des zyklischen Fehlers alle paar Jahre ist somit empfehlenswert.

## **5.5 Möglichkeiten zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers**

Der zyklische Fehler kann durch Vergleich der EDM-Messungen mit Messungen übergeordneter Genauigkeit (z.B. interferometrische Messungen) bestimmt werden. Details zu dessen Bestimmung können Joeckel et al. (2008), Rüeger (1996) oder Deumlich und Staiger (2002) entnommen werden.

Der zyklische Phasenfehler zeigt sich (falls vorhanden) als periodischer Anteil in den Restabweichungen aus Referenzmessungen der Komparatorstrecke minus der EDM-Strecke. Die Komparatorstrecke muss mit übergeordneter Genauigkeit messbar oder bekannt sein.

Es gibt verschiedene Methoden den zyklischen Phasenfehler experimentell zu bestimmen. Ein Verfahren versucht den zyklischen Fehler auf Prüfstrecken zu ermitteln, welche z. B. nach dem SCHWENDENER-Verfahren angelegt sind (Schwendener 1971). Bei dieser Methode wird der zyklische Phasenfehler gemeinsam mit der Nullpunktkorrektur bestimmt. Die Strecken, die zur Bestimmung der oben genannten Fehler verwendet werden, weisen verschiedene Längen und

somit, aufgrund verschiedener Einflüsse wie z.B. der Atmosphäre, Signalstärkenunterschiede oder Phaseninhomogenitäten, unterschiedliche Genauigkeiten auf. Zudem besteht bei den Ausgleichungsergebnissen von Nullpunktkorrektur und zyklischem Fehler eine starke Korrelation (Joeckel et al. 2008: S. 163), wodurch dieses Verfahren nicht empfohlen werden kann.

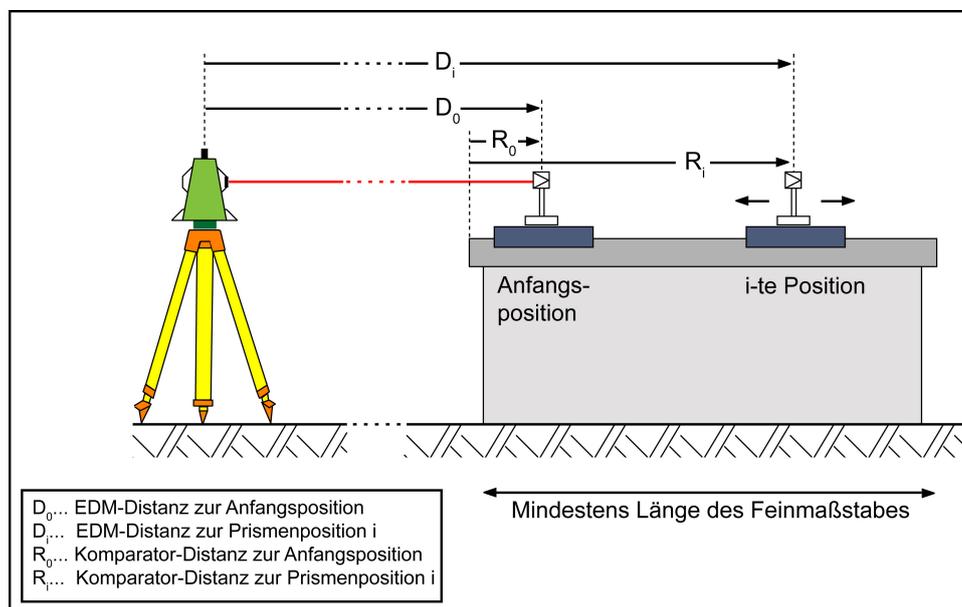
Die Messresultate auf Prüfstrecken liefern zwar einen recht guten Überblick über die erreichbare Gesamtgenauigkeit des zu prüfenden EDM-Geräts, soll jedoch die Genauigkeit des EDM-Instruments mit Hilfe einer zyklischen Korrektur verbessert werden, muss diese gesondert bestimmt werden (Schwarz 1981). Aus diesem Grund werden Verfahren, die auf der Verwendung von Prüfstrecken basieren, in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt. Näheres zur experimentellen Bestimmung des zyklischen Fehlers auf Vergleichsstrecken ist z.B. in Rüeger (1996) oder Schwendener (1971) zu finden.

Eine weitere Möglichkeit zur experimentellen Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers ist die Verwendung einer Komparatorbank, die mindestens die Länge des Feinmaßstabes des zu untersuchenden Gerätes haben sollte (Joeckel et al. 2008: S. 161-162). Die Komparatorstrecken sind dabei fest vorgegeben oder mit übergeordneter Genauigkeit (z. B. interferometrisch) messbar. Die Messungen können entweder in einem Labor auf einer fix installierten Komparatorbank oder aber mit Hilfe einer mobilen Komparatorbank im Feld bei beliebigen Distanzen erfolgen. Der Vorteil der Labormessungen ist, dass zum einen die Referenzmessungen interferometrisch messbar sind und zum anderen äußere Fehlereinflüsse (z.B. meteorologische Einflüsse) konstant und daher besser kontrollierbar sind. Ein großer Nachteil der Untersuchungen im Labor ist die Beschränkung des Distanzbereichs auf die Länge des jeweiligen Labors, was die Untersuchung von möglichen entfernungsabhängigen Fehlern stark limitiert. Aus diesem Grund wurde am IGMS der TU Graz ein mobiler Feldkomparator entwickelt, den es im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit zu untersuchen gilt.

Der zyklische Fehler wird aus der Differenz der Vergleichsstrecke mit der EDM-Strecke bestimmt. Die Messungen des EDM-Geräts sollten dabei vorzugsweise horizontal erfolgen, jedenfalls aber kollinear zur Achse der Vergleichsstrecke, um z.B. gemessene Schrägdistanzen nicht in Horizontalstrecken umrechnen zu müssen. Gemessen werden die EDM-Strecken ( $D_i$ ) zu Prismenpositionen, die jeweils um

bekannte Komparatorstrecken verschoben werden. Die Differenz der ersten Prismenposition ( $D_0$ ) mit den verschiedenen, um zumeist konstante Strecken ( $\Delta L$ ) verschobene, Positionen ( $D_i$ ) bilden die jeweiligen Streckendifferenzen, die es mit den Komparatorstrecken zu vergleichen gilt (Abb. 5.1). Die Komparatorstrecken ( $R_i$ ) sind entweder bekannt oder werden während den EDM-Messungen mit übergeordneter Genauigkeit gemessen und ebenfalls auf die Anfangsposition ( $R_0$ ) reduziert. Der Messablauf und die Berechnung der Restabweichungen gliedern sich wie folgt:

- EDM-Messung ( $D_0$ ) und Referenzmessung ( $R_0$ ) zur Anfangsposition
- Verschiebung des Prismas um Komparatorstrecken ( $\Delta L$ ) und Messung der EDM-Strecken ( $D_i$ ) sowie der Referenzstrecken ( $R_i$ )
- Reduktion der jeweiligen Messungen auf die Anfangsposition ( $D_{i,0} = D_0 - D_i$  bzw.  $R_{i,0} = R_0 - R_i$ )
- Berechnung der Abweichungen ( $Kz_i = R_{i,0} - D_{i,0}$ )



**Abb. 5.1:** Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers.

Wie schon in den vorhergehenden Kapiteln erwähnt, sind Messungen über den gesamten zu kalibrierenden Messbereich erforderlich, um auf eine mögliche Entfernungsabhängigkeit schließen zu können. Da eine fixe lange Messbahn wirtschaftlich wohl kaum realisierbar ist, wird eine mobile Komparatorbank benötigt,

um die experimentelle Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers bei beliebigen Distanzen vornehmen zu können.

Aus diesen Differenzen der Komparatormessungen minus EDM-Messungen soll eine mathematische Funktion gefunden werden, deren Verlauf sich mit der Periode des Feinmaßstabes wiederholt (Schwarz 1984). Je nach gewählter Auswertemethode (siehe Abschnitt 5.6) wird der zyklische Phasenfehler üblicherweise als Modell einer einfachen Sinusschwingung mittels Ausgleichung oder durch Fourieranalyse modelliert.

## 5.6 Auswertung und Modellierung des zyklischen Phasenfehlers

Die Auswertung des zyklischen Phasenfehlers richtet sich nach der gewünschten Genauigkeit bzw. Ordnung, mit der der genannte Fehler bestimmt werden soll, und kann auf unterschiedliche Weise erfolgen (Joeckel et al. 2008: S. 163-168):

- Graphische Ausgleichung einer einfachen Sinusschwingung
- Ausgleichung einer einfachen Sinusschwingung
- Fourieranalyse

Die Wahl der Auswertemethode sollte bereits vor der Durchführung der Messungen bekannt sein, da unter Umständen die Auswertemethode besondere Ansprüche an den Messablauf stellt. So richtet sich die Strecke  $\Delta L$ , um die das Ziel jeweils verschoben wird, unter anderem nach der Auswertemethode. Joeckel et al. (2008: S. 161-163) geben an, dass bei der Auswertung des zyklischen Fehlers als einfache Sinusschwingung mit der Periode des Feinmaßstabes  $U$  eine Verschiebung  $\Delta L = U / 20$  genügt. Sollen jedoch bei der Auswertung höhere Sinusschwingungen bis zur  $m$ -ten Ordnung berücksichtigt werden, so geben Joeckel et al. (ohne Angabe von Gründen) eine Verschiebung von  $\Delta L = U / (m \cdot 10)$  an.

### 5.6.1 Graphische Ausgleichung einer einfachen Sinusschwingung

Joeckel et al. (2008: S. 163-164) gibt als erste Möglichkeit die graphische Bestimmung des zyklischen Fehlers an. Dabei werden die Differenzen Komparatorstrecken (Ist) – EDM-Strecken (Soll) durch das Modell einer einfachen Sinusschwingung mit der Periode des Feinmaßstabes  $U$  angenähert, wobei die Unbekannten der Sinusschwingung durch graphische Ausgleichung bestimmt werden. Dieses Verfahren scheint aber heute kaum mehr angewandt zu werden.

### 5.6.2 Ausgleichung einer einfachen Sinusschwingung

Die Beobachtungsgleichung für den zyklischen Fehler ( $Kz_i$ ) kann in folgender Form angesetzt werden:

$$Kz_i = A \cdot \sin\left(D_i \cdot \frac{2\pi}{U} + \phi\right) + o \quad (5.1)$$

mit der Amplitude  $A$ , den Distanzen  $D_i$  zu den  $i$ -ten Prismenpositionen, der Phase  $\phi$  und dem Offset  $o$ .

Die Differenzen Komparatorstrecken – EDM-Strecken werden als Beobachtungen eingeführt. Nach erfolgter Linearisierung erhält man durch Ausgleichung nach kleinsten Quadraten die unbekannt Parameter ( $A$ ,  $\phi$ ,  $o$ ), die für die Modellierung des zyklischen Fehlers benötigt werden. Das Modell aus Formel 5.1 kann beliebig um weitere Parameter erweitert werden. Nähere Informationen zur Schätzung des zyklischen Phasenfehlers werden in Abschnitt 8.5 gegeben.

### 5.6.3 Fourieranalyse

Die Fourieranalyse kann für eine detaillierte Analyse vor allem für bei Vorhandensein höherer Frequenzen herangezogen werden. Sie ermöglicht eine Modellierung von

zyklischen Fehlern, die aus Überlagerung mehrerer einzelner Schwingungen mit zunehmend kleinerer Periode zusammengesetzt sind, was vor allem bei älteren Geräten oftmals der Fall war. Beispiele hierfür sind in Joeckel et al. (2008: S. 171) zu finden.

Bei der Fourieranalyse wird die Funktion durch eine Summe einzelner Sinusschwingungen mit zunehmend kleiner werdenden Perioden zusammengesetzt. Details zur Bestimmung des zyklischen Fehlers mittels Fourieranalyse sind in Rüeger (1996: S. 213–216) oder Joeckel et al. (2008: S. 167) zu finden.

Im Zuge der vorliegenden Masterarbeit wird der periodische Anteil der Restabweichungen mit einfachen Modellen bestimmt und die Parameter mit Hilfe der Ausgleichsrechnung geschätzt. Aus vorangegangenen Untersuchungen war bekannt, dass bei dem Leica TCA 1800 der zyklische Fehler mit der Periode des Feinmaßstabes (keine höheren Ordnungen) modelliert werden kann. Dies wurde vor der Schätzung durch eine Fouriertransformation überprüft.

Die in Fleckl (2007) gezeigten Restabweichungen (Abb. 2.3) lassen die Vermutung zu, dass sich die Amplitude mit der Distanz ändert, wodurch eine Modellierung mittels Fourieranalyse unter Umständen nicht sinnvoll erscheint. Außerdem können bei einer Ausgleichung auch die Genauigkeitsinformationen der Parameter mitgeschätzt werden, die später für die Durchführung von statistischen Tests benötigt werden (Abschnitt 8.5.3). Weiters können durch Erweiterung der Spalten in der Designmatrix auch jederzeit Schwingungen höherer Ordnung mitgeschätzt werden.

## **6 Der mobile Feldkomparator FC 2009**

Die Untersuchung von EDM-Instrumenten auf mögliche zyklische Fehler erfolgt zumeist in einem Messlabor auf einer Komparatorbank, obwohl sie eigentlich über den gesamten Messbereich des zu untersuchenden EDM-Instruments erfolgen sollte. Daher stellt eine mobile Testeinrichtung die beste Lösung dar, um den gesamten Messbereich abdecken zu können.

In diesem Kapitel werden die Anforderungen beschrieben, die an eine solche Testeinrichtung gestellt werden und Angaben zum Aufbau und der Funktionsweise des realisierten Feldkomparators gemacht. Weiters wird das für die Durchführung der Referenzmessungen verwendete Messsystem erklärt und die experimentellen Tests des mobilen Feldkomparators eingeleitet.

### **6.1 Anforderungen**

Bei der Entwicklung und dem Bau (Presl 2009) waren neben genauigkeitsrelevanten Aspekten auch praktische Aspekte (Länge, Mobilität, Transportfähigkeit und Flexibilität der Prismenpositionen) zu berücksichtigen, die hier beschrieben werden.

#### **6.1.1 Genauigkeit der Referenzmessungen**

Zur experimentellen Bestimmung müssen die Komparatorstrecken entweder (a) mit übergeordneter Genauigkeit messbar oder (b) fest vorgegeben und mit übergeordneter Genauigkeit bekannt sein (Deumlich und Staiger 2002: S. 165). Üblicherweise wird bei Kalibrierungen die Komparatorstrecke mit zehnfach höherer Genauigkeit bestimmt. Da die Auflösung des TCA 1800 bei 0,1 mm liegt (Tabelle 6.1), ergibt sich daraus eine erforderliche Genauigkeit der Komparatorstrecke von 0,01 mm. Bei Untersuchungen im Labor erfolgen die Referenzmessungen meist

durch interferometrische Messungen, die im Feld aber nur mit erhöhtem Aufwand durchzuführen sind.

Werden die Komparatorstrecken vorab ausgemessen, ergibt sich neben Stabilitätsaspekten (Temperatur) der Nachteil, dass die Testeinrichtung nur für bestimmte Instrumente mit entsprechendem Feinmaßstab verwendbar ist, da sich die Komparatorabschnitte aus dem Feinmaßstab berechnen (siehe Abschnitt 5.5).

Aus diesem Grund wurde versucht ein System zu finden, das flexible Komparatorabschnitte ermöglicht und somit die Testeinrichtung für möglichst viele EDM-Instrumente verwendbar macht. Realisiert wurde dieser Plan mit Hilfe eines Glasmaßstabes der Firma Heidenhain, der eine kontinuierliche Messung über den gesamten Messbereich des 3 m langen Glasmaßstabes ermöglicht (Abschnitt 6.3) und die oben geforderten Genauigkeiten erreicht. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist die hohe Reproduzierbarkeit, die durch die Verwendung des Glasmaßstabes gewährleistet ist.

### **6.1.2 Abmessungen des mobilen Feldkomparators**

Die Länge des mobilen Feldkomparators sollte mindestens die Länge des Feinmaßstabes des zu untersuchenden Geräts haben (Joeckel et al. 2008: S. 161-162). Für die Untersuchung des mobilen Feldkomparators wurde entschieden ein Leica TCA 1800 zu verwenden, da aus vorangegangenen Untersuchungen (z.B. Fleckl 2007) bekannt war, dass dieses Gerät einen messbaren zyklischen Fehler aufweist. Der Feinmaßstab dieses Geräts beträgt 3 m (Rüeger 1996: S. 236). Eine Länge von 3 m ermöglicht einerseits die Untersuchung der meisten modernen EDM-Instrumente (Feinmaßstab max. 3 m, siehe Tabelle 6.1), andererseits bietet sie die Möglichkeit, die Testeinrichtung in einem Stück zu transportieren, ohne sie zerlegen zu müssen. Eine Testeinrichtung aus mehreren Teilen sollte vermieden werden, da es an den Stoßstellen zu systematischen Fehlern kommen kann, ähnlich wie bei Steckplatten beim Nivellement. Dazu kommt, dass der Feinmaßstab bei neuen Geräten immer kleiner wird, wodurch der mobile Feldkomparator auch in Zukunft noch einsetzbar sein sollte.

**Tabelle 6.1: Auswahl an aktuellen EDM-Geräten.**

Hersteller	Typ	STD Distanz	STD Hz, V [mgon]	U = $\lambda/2$ [m]	Quelle*
Leica	TCA 1800	1 mm+2 ppm	0,3	3	1
	TC 1800	1 mm+2 ppm	0,3	3	2
	TPS 1201	2 mm+2 ppm	0,3	1,5	1
	TM 30	0,6 mm+2 ppm	0,15	1,5	2
	TS 30	0,6 mm+2 ppm	0,15	1,5	2
Zeiss	Elta S10	1 mm+2 ppm	0,3	3	1
Topcon	GPT 7001	2 mm+2 ppm	0,3	10	1
	GPT 9000A	2 mm+2 ppm	0,3	10	1
Trimble	S6 High Precision	2 mm+2 ppm	0,5	0,37	1
	S8	1 mm+1 ppm	0,3	3	2
Sokkia	Set2 30R3	2 mm+2 ppm	0,6	2	1
	SRX1	2 mm+2 ppm	0,3	0,8	2
	SetX	2 mm+2 ppm	0,3	0,9	1

\* 1) Joeckel et al. (2008)

2) Datenblatt der Hersteller im www

### 6.1.3 Flexibilität der Prismenpositionen

Die Anzahl und der Abstand der Prismenpositionen richten sich nach dem jeweils vom EDM-Gerät verwendeten Feinmaßstab (Tabelle 6.1). Die mobile Testeinrichtung sollte dahingehend möglichst flexibel sein. Ein Ausmessen der Prismenpositionen im Vorfeld der Untersuchungen würde dies nicht gewährleisten - weshalb dieser Ansatz nicht gewählt wurde. Vielmehr wurde nach einem System gesucht, bei dem die Prismenpositionen frei wählbar sind.

Die Kosten, die durch den Neubau einer solchen mobilen Testeinrichtung entstehen, stellten eine wesentliche Nebenbedingung dar und begründeten bestimmte Komponenten. Durch finanzielle und materielle Unterstützungen konnte der FC 2009 jedoch in der hier beschriebenen Form realisiert werden.

## 6.2 Aufbau und Funktionsweise des mobilen Feldkomparators

Als Grundträger des mobilen Feldkomparators dient ein 3,5 m langes Strangpressprofil aus eloxiertem Aluminium der Firma ITEM. Die Oberfläche des

Trägers ist dadurch dauerhaft kratzfest und korrosionsgeschützt. Der Profilträger ist mit Nuten versehen, die die Montage weiterer Elemente erleichtern. Bei einer Höhe von 120 mm weist der Träger eine Breite von 80 mm auf. Somit bietet er eine sehr stabile Grundlage für den weiteren Aufbau der Testeinrichtung.

Der Glasmaßstab der Firma Heidenhain (Abschnitt 6.3) ist fest mit dem Träger verschraubt. Auf beiden Seiten des Trägers ist eine Schiene montiert, auf denen mit Hilfe einer Doppellagereinheit der Firma ITEM ein Schlitten stufenlos bewegt werden kann. Der Schlitten besteht aus zwei Profilen 40 x 40 mm, die mit einer Aluminiumplatte verbunden sind. Im Zentrum der Aluminiumplatte befindet sich ein Steckzapfen, der die Montage eines Prismas ermöglicht (Abb. 6.1). Somit können verschiedene Reflektortypen und etwaige andere Ziele problemlos auf dem Schlitten montiert werden.



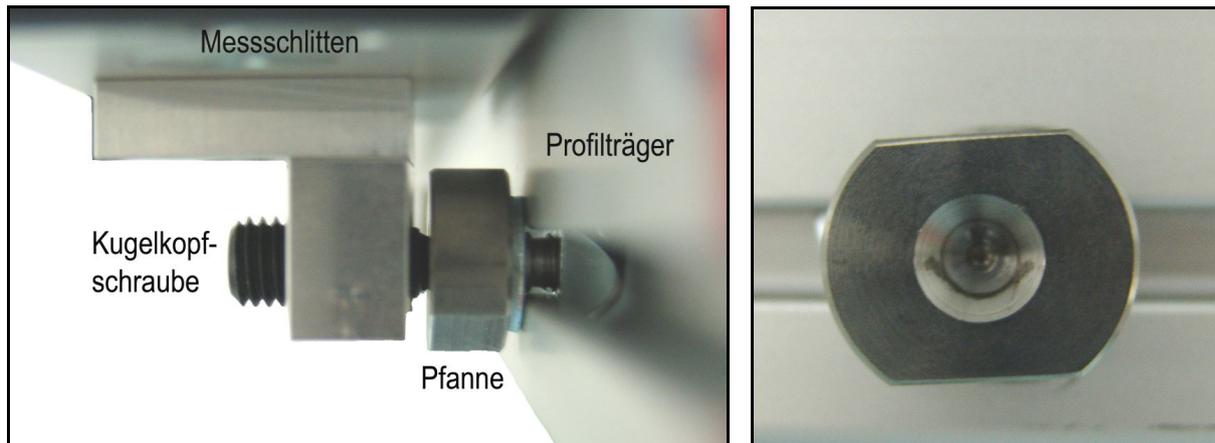
Abb. 6.1: Auf Industriestativ und Messpfeiler aufgebauter mobiler Feldkomparator (links) mit verschiebbarem Messschlitten (rechts).

Der Messschlitten ist mit der Abtasteinheit des Glasmaßstabes verbunden, der sich unterhalb des Schlittens befindet (Abb. 6.1, rechts). Somit kann die Verschiebung des Schlittens auf dem Profilträger entlang der gesamten Länge des Glasmaßstabes gemessen werden.

Auf beiden Seiten des Trägers verhindern Endanschläge, dass der Schlitten über die Länge des Glasmaßstabes hinaus bewegt werden kann, um Schäden am Glasmaßstab zu vermeiden.

Mit Hilfe von Nutensteinen, die seitlich am Profilträger in einer Nut befestigt werden, jedoch beliebig verstellbar sind, kann der Schlitten bei bestimmten Positionen mit

Hilfe von Kugeldruckschrauben aus Stahl, die am Messschlitten befestigt sind und in einer Pfanne greifen, fixiert werden (Abb. 6.2). So kann die Stabilität der Schlittenposition sowie die Wiederherstellung einer bestimmten Position (ca. 0,04 mm, siehe Abschnitt 7.4) realisiert werden. Entlang des Trägers befinden sich 21 Pfannen in einem Abstand von 15 cm, die so 21 Prismenpositionen ermöglichen (siehe Abb. 7.6).



**Abb. 6.2:** Klemmsystem zum Fixieren der Prismenposition mit M 8 Kugeldruckschraube und Pfanne (links), sowie Ansicht einer Pfanne von vorne (rechts).

An der Unterseite des mobilen Feldkomparators sind zwei Spezialvorrichtungen befestigt, die eine Montage auf zwei Dreifußadaptern für Steckzapfen und einen zwangsfreien Ausgleich der Länge ( $t^\circ$ ) ermöglichen. Dadurch kann der mobile Feldkomparator auf zwei Stativen aufgestellt und mit Hilfe einer Setzlibelle horizontalisiert werden. Um mögliche Einflüsse aufgrund von Stativbewegungen zu minimieren, wurden bei allen Untersuchungen ein betonierter Pfeiler und nur ein Stativ verwendet.

Details über den Bau des mobilen Feldkomparators können Presl (2009) entnommen werden.

### 6.3 Heidenhain Glasmaßstab LS 688C

Die Referenzmessungen auf der mobilen Testeinrichtung erfolgen mit Hilfe des großprofiligen Längenmessgeräts LS 688 C der Firma Heidenhain. Dieses System ermöglicht zum einen eine recht unkomplizierte Fertigung der Testeinrichtung und zum anderen kann es die geforderten Genauigkeiten, die an die Referenzmessung gestellt werden (siehe Abschnitt 6.1), liefern. Details zum Aufbau und dem Messverfahren des LS 688C sind in Anhang A gegeben. Hier wird nur ein kurzer Überblick über die Funktionsweise und die wesentlichen Spezifikationen des Glasmaßstabs LS 688C gegeben.

Das zentrale Element des LS 688C stellt ein DIADUR-Maßstab dar, der die Genauigkeit und die Funktion des Längenmessgeräts bestimmt (Abb. 6.3). Dieser Maßstab besitzt eine Teilung von 20  $\mu\text{m}$ . Mit Hilfe der Einfeldabtastung (siehe Anhang A) werden daraus Abstandsinformationen gewonnen. Die Genauigkeit der so erhaltenen Strecken wird vom Hersteller mit einer „Genauigkeitsklasse von 10  $\mu\text{m}$ “ angegeben.

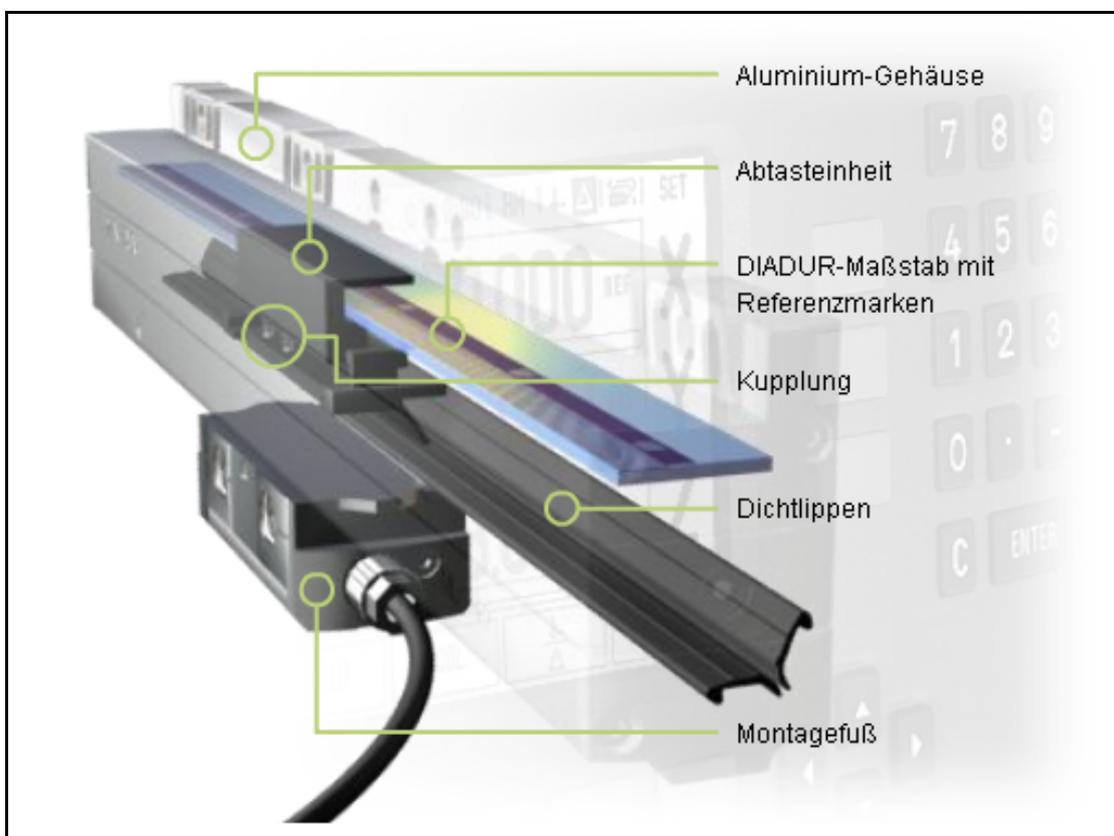


Abb. 6.3: Aufbau des Heidenhain Glasmaßstabes LS 688C (aus Heidenhain 2010)

Für die Untersuchungen im Feld spielt der thermische Ausdehnungskoeffizient der Maßverkörperung eine entscheidende Rolle, um die Messungen mit dem LS 688C korrigieren zu können, da dieser für eine Bezugstemperatur von 20°C ausgelegt wurde. Die Arbeitstemperatur des LS 688C reicht aber von 0°C bis 50°C. Für den LS 688C wird der Ausdehnungskoeffizient vom Hersteller mit  $(8\pm 1) \cdot 10^{-6} K^{-1}$  angegeben. Weitere technische Daten sind in Anhang A zu finden.

Die Messungen mit dem Glasmaßstab LS 688C wurden mit Hilfe des an der TU Graz erstellten Ausleseprogramms IFT (EXE-Datei vom 04.01.2008) unter Verwendung der Heidenhain-Zählkarte IK 220 durchgeführt.

Bei jedem Neustart des Programms muss die Initialisierung neu erfolgen, da diese nicht abgespeichert werden kann. Zum Speichern der Messwerte wurde für die gesamten Untersuchungen während dieser Masterarbeit ausschließlich die Triggeroption „Latch@Button“ verwendet. Bei dieser Funktion wird bei jedem Tastendruck ein Messwert abgespeichert. Sämtliche Sonderfunktionalitäten, die das Programm noch aufweist, wurden für die durchgeführten Arbeiten nicht verwendet und werden daher nicht näher beschrieben.

## **7 Untersuchung des mobilen Feldkomparators im Messlabor**

### **7.1 Allgemeines**

Der mobile Feldkomparator wurde speziell für die Durchführung der vorliegenden Arbeit entwickelt und gebaut. Es lagen daher weder Erfahrungsberichte vor, noch existierten Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen.

Um erste Erfahrungswerte über die Eigenschaften des mobilen Feldkomparators zu sammeln wurde eine Versuchsreihe im geodätischen Messlabor des IGMS der TU Graz durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten die Entscheidungsgrundlage für die Messkonfiguration der späteren Versuchsreihen zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers. Zudem wurde mit deren Hilfe gezeigt, dass die mobile Testeinrichtung die geforderten Genauigkeitsvorgaben (ca. 0,01 mm) erfüllt und somit für spätere Untersuchungen geeignet ist.

Insbesondere war aber zu untersuchen inwieweit sich die gegenüber dem LS 688C exzentrische Lagerung des Prismas auf die Messgenauigkeit auswirkt und gegebenenfalls eine geeignete Korrektur für eine rechnerische Beseitigung dieses Einflusses zu erarbeiten.

### **7.2 Aufbau am Horizontalkomparator**

#### **7.2.1 Versuchsreihe am Horizontalkomparator**

Zur Evaluierung eines Messsystems empfiehlt es sich, dieses mit einem anderen Messsystem übergeordneter Genauigkeit zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurde die mobile Testeinrichtung auf die 30 m lange Komparatorbank im klimatisierten Messlabor (Woschitz 2003: S.95-96) am Horizontalkomparator montiert (Abb. 7.1) und Vergleichsmessungen mit dem Laserinterferometer durchgeführt.



Abb. 7.1: Aufbau zum Test des mobilen Feldkomparators am Horizontalkomparator gegenüber dem Interferometer im geodätischen Messlabor des IGMS der TU Graz.

Die Lagerung des mobilen Feldkomparators am Horizontalkomparator erfolgte auf den gleichen Lagerpunkten wie später bei der Montage auf Stativ und Pfeiler. Bei den Lagerungspunkten handelt es sich um Besselpunkte, die bei der Konstruktion des mobilen Feldkomparators berechnet wurden (Presl 2009). Lagerpunkte A ist dabei fest, Lagerpunkt B geführt um temperaturbedingte Längenänderungen zwangsfrei zu ermöglichen. Abb. 7.2 zeigt eine Prinzipskizze der Lagerung des mobilen Feldkomparators.

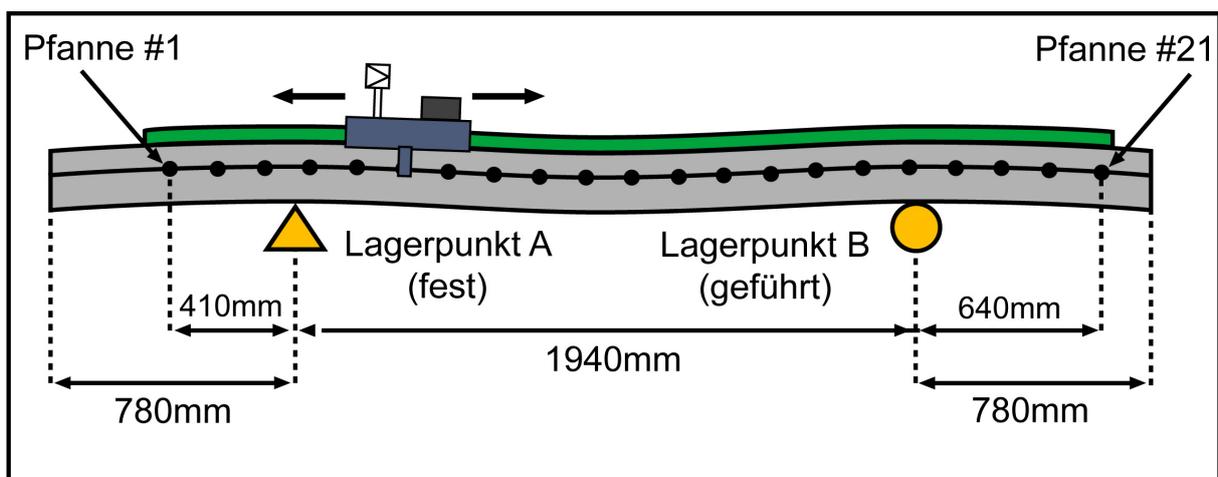


Abb. 7.2: Skizze der Lagerung des mobilen Feldkomparators FC 2009 auf den Lagerpunkten A und B.

Ein Vorversuch lieferte erste Erfahrungswerte mit dem neuen Messsystem (Abschnitt 7.3). Die daraus gewonnenen Erkenntnisse waren Anstoß für folgende Untersuchungen:

- Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Pfannenpositionen (Abschnitt 7.4)
- Bestimmung der Geometrie des Trägerbalkens (Abschnitt 7.5)
- Analyse der Änderung des Durchhangeffekts (Abschnitt 7.6)
- Initialisierungstest des LS 688C (Abschnitt 7.7)

### 7.2.2 Messungen mit dem Laserinterferometer

Die Messungen mit dem Laserinterferometer (Abb. 7.5, rechts) erfolgten mit Hilfe eines vorhandenen LabView Programms, das eine kontinuierliche Messung der Prismenposition vom Start der Interferometermessung bis zum manuellen Stopp ermöglicht. Neben der Entfernungsinformation speichert das Programm mit ca. 50 Hz die Uhrzeit, die meteorologischen Parameter Luftdruck, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit, sowie den TCN Wert (Kehrwert des Brechungsindex), mit ab.

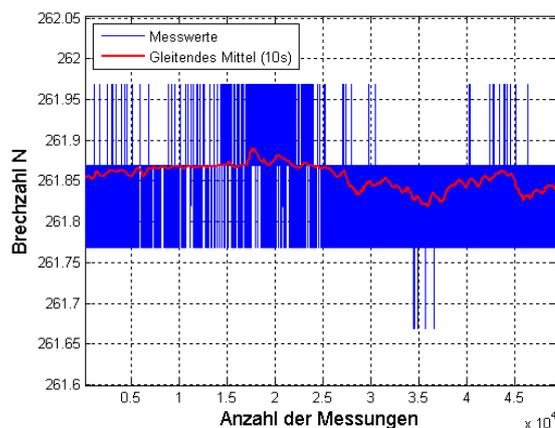
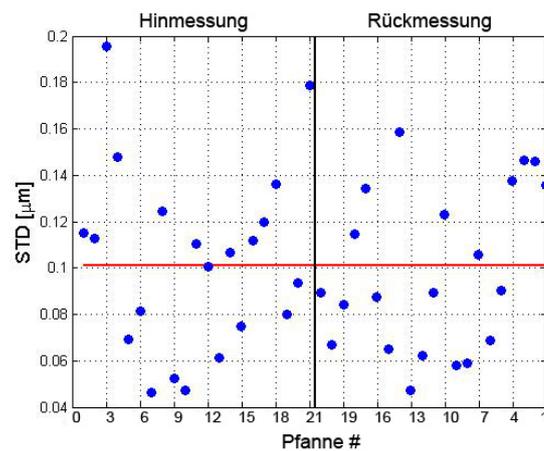


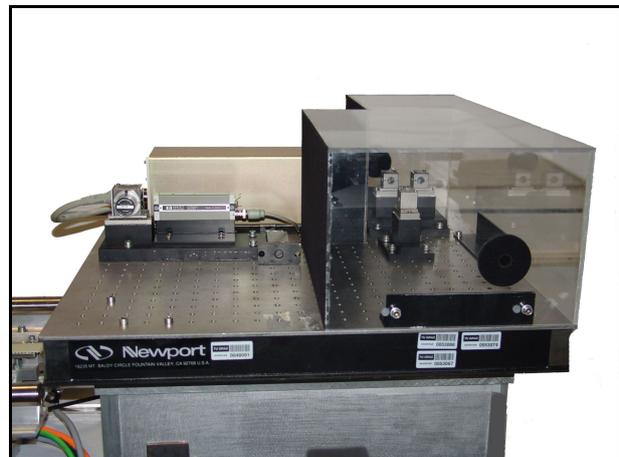
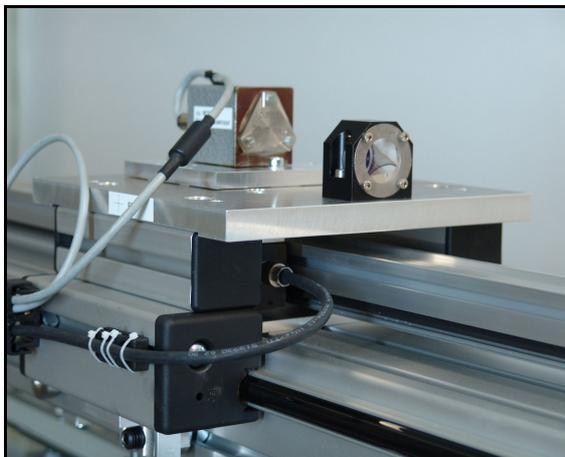
Abb. 7.3: Erfasste und geglättete Werte für die Brechzahl.

Diese Werte zur Temperaturkompensation wurden mit Hilfe eines gleitenden Mittelwertes über 500 Werte ( $\approx 10$  sec.) geglättet, um den Einfluss des Rauschens der Meteo-Sensoren zu reduzieren, Abb. 7.3. Mit Hilfe der geglätteten TCN-Werte wurden sämtliche Interferometerdaten meteorologisch korrigiert, wodurch im Schnitt eine Standardabweichung von  $0,1 \mu\text{m}$  für die Messungen mit dem Interferometer an den einzelnen Prismenpositionen erreicht wurde (Abb. 7.4).



**Abb. 7.4: Standardabweichung der einzelnen Pfannenpositionen des Interferometers von Hin- und Rückmessung.**

Für die Distanzmessung mit dem Laserinterferometer wurde auf dem Messschlitten des mobilen Feldkomparators der Retroreflektor des Interferometersystems montiert (Abb. 7.5, links).



**Abb. 7.5: Messschlitten des mobilen Feldkomparators mit Präzisionsprisma und Wyler (links), Laserinterferometer HP10889B im Messlabor (rechts).**

Der Versuchsaufbau auf der Komparatorbank ist in Abb. 7.6 schematisch dargestellt. Abgebildet sind auch die Nullpunkte der beiden Messsysteme (Glasmaßstab und Interferometer), um die Messrichtungen der einzelnen Systeme zu dokumentieren.

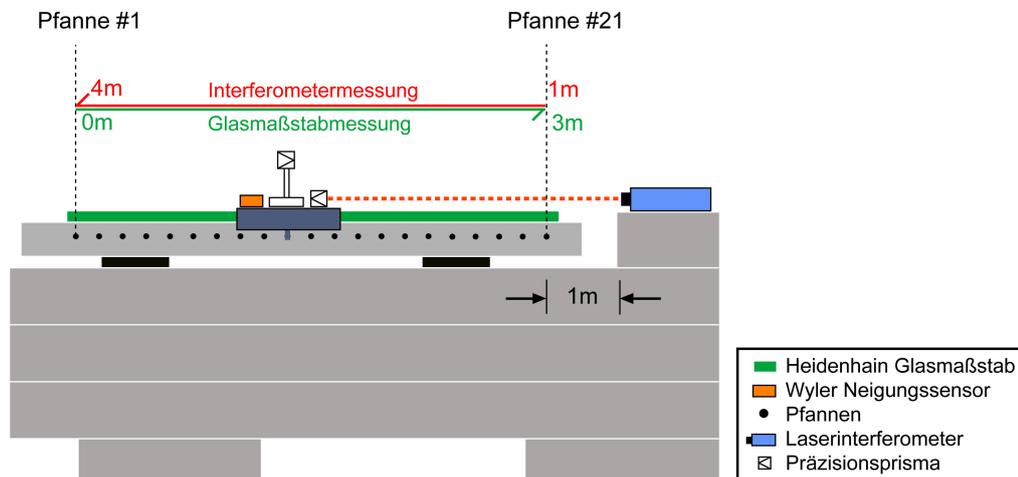


Abb. 7.6: Schematische Darstellung des Messaufbaus für die Untersuchungen am Horizontalkomparator im geodätischen Messlabor.

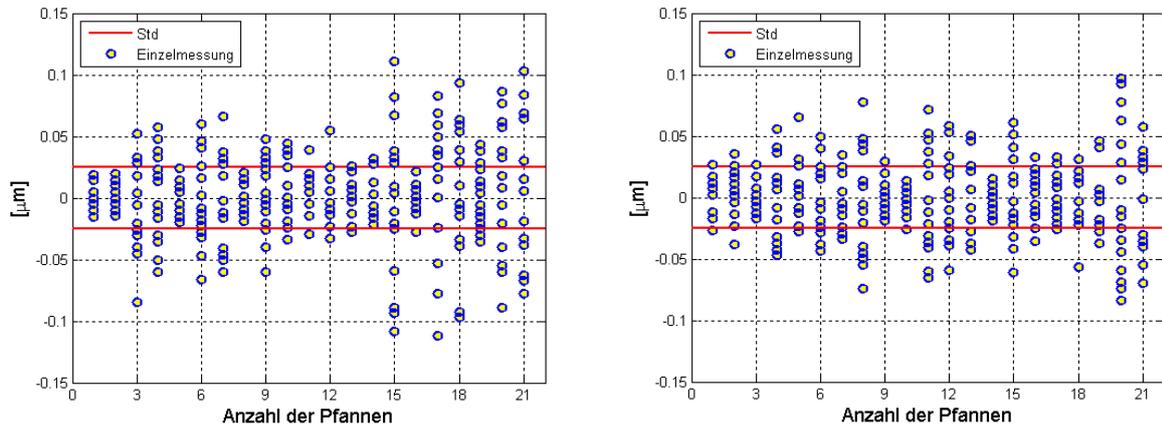
### 7.3 Vorversuch

Da keinerlei Erfahrungswerte mit dem mobilen Feldkomparator vorlagen, erfolgte ein erster Vorversuch um einerseits den Umgang mit dem neuen Messgerät zu erlernen und andererseits um erste Informationen über die Eigenschaften des neuen Messsystems zu gewinnen. Dabei wurde jede Position des Messschlittens, definiert durch die Pfannen seitlich am Trägerbalken, siehe Abschnitt 6.2, in Hin- und Rückweg angefahren und gemessen. Anschließend wurden pro Position 16 Einzelmessungen mit dem LS 688C getätigt. Die Distanz zu dem auf dem Messschlitten montierten Präzisionsprisma und damit zum Wagen wurde während der gesamten Dauer der Untersuchung kontinuierlich mit dem Interferometer erfasst.

### 7.3.1 Präzision des Glasmaßstabes der Firma Heidenhain

Die erste Frage, die mit Hilfe des Vorversuchs beantwortet werden sollte, war die Präzision der Wiederholungsmessungen des Glasmaßstabes der Firma Heidenhain. Diese Information ist ausschlaggebend für die später benötigte Anzahl an Wiederholungsmessungen pro Schlittenposition bei den Untersuchungen des zyklischen Fehlers.

Da keinerlei Informationen über die Präzision vorlagen, erfolgten 16 aufeinanderfolgende Wiederholungsmessungen pro Schlittenposition in Hin- und Rückweg (Abb. 7.7), wobei jeweils ca. 10 s Messzeit veranschlagt wurden.



**Abb. 7.7: Präzision Glasmaßstab, 16 Wiederholungsmessungen pro Pfanne im Hinweg (links), und im Rückweg (rechts).**

Mit einer Standardabweichung für Wiederholungsmessungen von unter  $0,03 \mu\text{m}$  verfügt der Glasmaßstab der Firma Heidenhain über eine ausgezeichnete Präzision.

Damit hätte für die spätere Untersuchung zur Bestimmung des zyklischen Fehlers eine Messungen gereicht da jedoch bei diesen Untersuchungen auf die Messung des Leica TCA 1800 gewartet werden musste, war genügend Zeit vorhanden um vier Wiederholungsmessungen pro Punkt durchzuführen (Abschnitt 9.1).

### 7.3.2 Vergleich der Messungen in Hin- und Rückweg

Im nächsten Schritt wurden die Messungen des Glasmaßstabes ebenso wie die des Interferometers von Hin- und Rückweg miteinander verglichen. Die in Abb. 7.8 dargestellten Differenzen aus Hin- und Rückweg zeigen bei beiden Messsystemen Abweichungen von über 0,03 mm. Dies liegt weit über der Messgenauigkeit beider Systeme. Da jedoch beide Systeme nahezu dieselben Abweichungen zwischen Hin- und Rückweg aufwiesen, lag der Verdacht nahe, dass die festgestellten Abweichungen von einer limitierten Reproduzierbarkeit der durch die Pfannen vordefinierten Positionen des Messschlittens stammen.

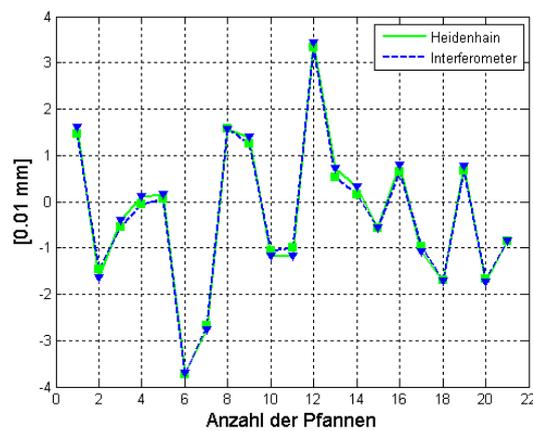


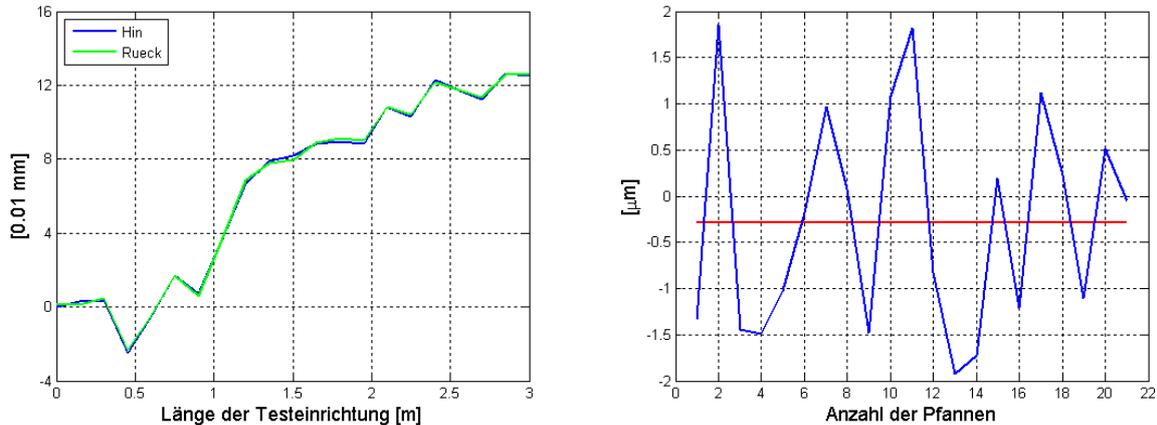
Abb. 7.8: Differenz der Pfannenpositionen der Hin- und Rückmessung.

Um diese Annahme zu untermauern wurden Versuche zur Bestimmung der Genauigkeit der Reproduzierbarkeit der durch Pfannen vordefinierten Messschlittenposition vorgenommen (Kap. 7.4).

### 7.3.3 Vergleich Glasmaßstab LS 688C - Interferometer

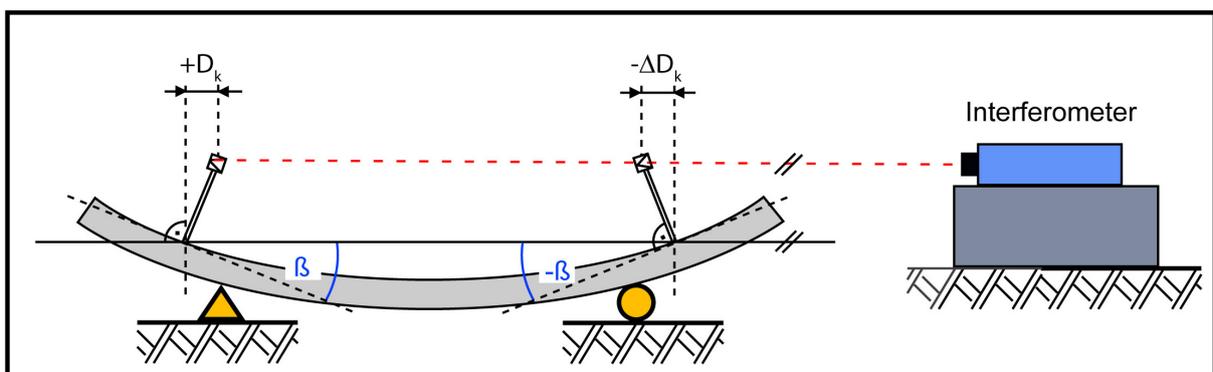
Ein Vergleich der Messungen des Glasmaßstabes LS 688C mit den Interferometermessungen sollte die Genauigkeit der Messungen mit dem am Trägerbalken montierten Glasmaßstab verdeutlichen. Abb. 7.9 zeigt, dass zwischen den beiden Systemen Abweichungen von bis zu 0,12 mm bestehen (Messungen mit LS 688C länger als Interferometermessungen). Dies ist weit über der Messgenauigkeit der

Messsysteme, sodass vermutet wurde, dass die großen Abweichungen auf die Geometrie des Trägerbalkens (Durchhang), auf dem der Glasmaßstab montiert wurde, zurückzuführen sind.



**Abb. 7.9:** Differenz von Heidenhain - Interferometer in Hin- und Rückmessung (links); Differenz Glasmaßstab - Interferometer der Hin- und Rückmessung (rechts).

Bei einem Durchhang des Trägers würde das im Bezug zur Glasmastabstrecke exzentrisch gelagerte Prisma, das auf dem Messschlitten montiert ist, leicht geneigt sein, wodurch das Laserinterferometer je nach Neigung zu kurze beziehungsweise zu lange Entfernungen messen würde (Abb. 7.10). Andererseits würde ein möglicher Durchhang dazu führen, dass der Glasmaßstab entlang einer gekrümmten Linie misst und somit zu lange Entfernungen liefert.



**Abb. 7.10:** Schematische Darstellung der Auswirkung eines Durchhangs des mobilen Feldkomparators bei exzentrischem Reflektor.

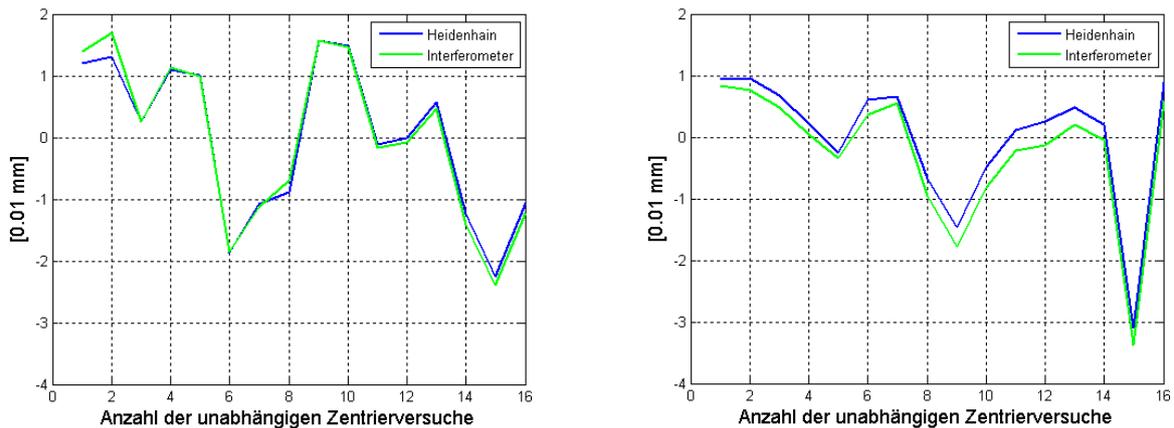
Da diese Vermutung eines Durchhangs auch von Untersuchungen im Zuge der Bakkalaureatsarbeit von Grurl (2010) bestätigt worden war, wurden verschiedene

Untersuchungen zur Bestimmung der Geometrie des Trägerbalkens durchgeführt, die in Abschnitt 7.5 näher beschrieben werden.

#### **7.4 Reproduzierbarkeit der durch die Pfannen vordefinierten Positionen**

Bei den Untersuchungen zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers sollten die Positionen des Messschlittens möglichst gleichmäßig über die Länge der mobilen Testeinrichtung verteilt sein (Rüeger et al. 2008: S.162). Daher sind diese Positionen auf der mobilen Testeinrichtung in Form von 21 Pfannen in einem Abstand von circa 150 mm fix vorgegeben (Abschnitt 6.2), wobei diese bei Bedarf beliebig entlang der mobilen Testeinrichtung verschoben werden könnten. In diese Pfannen greift eine Kugelkopfschraube, die mit dem Messschlitten verbunden ist (Abb. 6.2). Durch Anziehen der Kugelkopfschraube wird die Messschlittenposition durch Klemmung in die jeweilige Pfanne realisiert, wobei vermutet wurde, dass die Pfannenposition in Abhängigkeit des Anziehdrehmoments variiert.

Ein erster Test (Abschnitt 7.3) zeigte, dass Messungen zu Messschlittenpositionen bei ein und derselben Pfanne Abweichungen von über 0,03 mm in Hin- und Rückweg aufwiesen (Abb. 7.8). Aus diesem Grund und um zu entscheiden ob der LS 688C immer notwendig ist (vs. Kalibrierung), wurde die Reproduzierbarkeit der Messschlittenposition unter Verwendung der vorgegebenen Pfannenpositionen genauer untersucht. Dabei wurde der Messschlitten sechzehn Mal zwischen zwei Pfannenpositionen hin und her bewegt und geklemmt und an jeder Position sechzehn Mal gemessen. Das Interferometer maß während der gesamten Dauer der Untersuchung kontinuierlich die Entfernung zu dem auf dem Messschlitten montierten Präzisionsprisma.

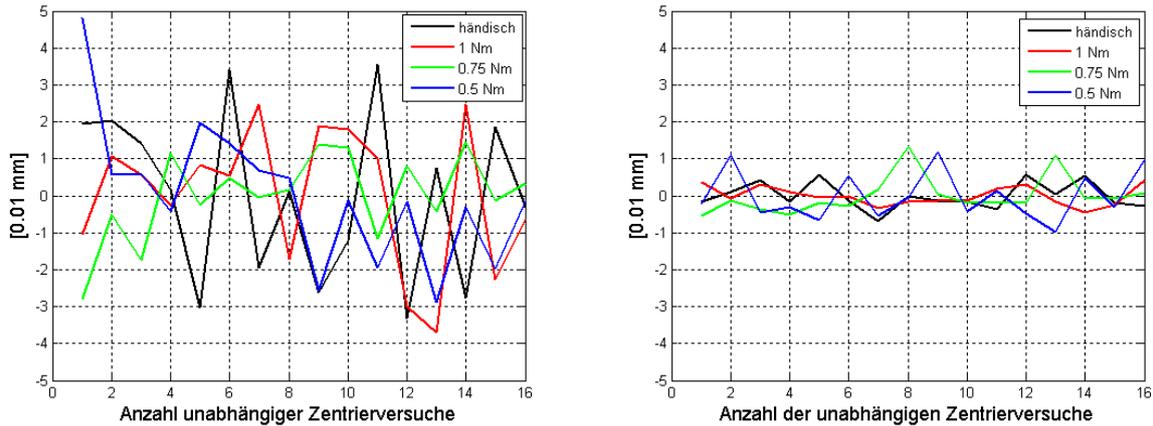


**Abb. 7.11: Reproduziergenauigkeit der Pfanne 2 (links) und Pfanne 3 (rechts) bei Anziehung der Kugelkopfschraube mit einem Imbusschlüssel.**

Die Untersuchung zeigte, dass die Reproduzierbarkeit der Pfannenposition variiert und bis zu etwa 0,03 mm beträgt (Abb. 7.11).

Während der Durchführung der Untersuchung wurde beobachtet, dass durch das Anziehen der Kugelkopfschraube der Messschlitten verzogen wurde, je nachdem wie fest das Anziehen der Kugelkopfschraube erfolgte. Um eine mögliche Auswirkung des Kräfteinsatzes beim Fixieren des Messschlittens auf die Position zu untersuchen, wurde der oben genannte Versuch mit unterschiedlichen Fixierungsmethoden wiederholt: Die Fixierung erfolgte dabei unter Verwendung eines Drehmomentschlüssels mit (a) 1 Nm, (b) 0,75 Nm, (c) 0,5 Nm sowie (d) händisch mit einem gewöhnlichen Imbusschlüssel (ca. 0,4 – 0,7 Nm, wie es sich aus einem Vergleich mit einem Drehmomentschlüssels bei einigen Anziehversuchen zeigte).

Der Unterschied bei den Ergebnissen lag sowohl für Heidenhain- als auch für Interferometermessungen bei maximal 4  $\mu\text{m}$ , im Schnitt bei 0,5  $\mu\text{m}$ . Daher werden in den folgenden Abbildungen aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Resultate der Messungen mit dem LS 688C dargestellt (Abb. 7.12). Die Ergebnisse für die Interferometermessungen sowie Untersuchungen weiterer Pfannen sind in Anhang B zu finden.



**Abb. 7.12: Reproduzierbarkeit der Pfannenposition bei  $s$  unabhängigen Zentrierversuchen bei Pfanne # 2 (links) und Pfanne # 9 (rechts) bei Messung mit dem Glasmaßstab.**

Die Erkenntnisse, die aus diesen Untersuchungen gewonnen werden können, sind, dass die Reproduzierbarkeit der Messschlittenposition von der Anziehmethode nur bedingt abhängt (Abb. 7.12) und die Genauigkeit der Reproduzierbarkeit von Pfanne zu Pfanne stark variiert. Geling beispielsweise die Reproduzierbarkeit bei Pfanne # 9 mit einer Genauigkeit von etwa 0,01 mm, so war sie bei Pfanne # 2 lediglich mit etwa 0,04 mm möglich. Die Anziehmethode beeinflusste dabei die Genauigkeit nicht signifikant, da bei allen Versuchen (a) bis (d) in etwa dieselbe Streuung auftritt.

Die aufgezeigten Unterschiede sind wahrscheinlich auf die Beschaffenheit der Kugelkopfschraube und die Fertigungsgenauigkeit der Pfannen zurückzuführen. Die Reproduziergenauigkeit war für die späteren Untersuchungen jedoch nicht entscheidend, da die jeweilige Entfernung des Messschlittens bei jeder neuen Position mit dem Glasmaßstab gemessen wurde und somit Absolutpositionen vorlagen. Auch die Fixiermethode war nicht für den Erfolg der späteren Untersuchungen maßgeblich und es wurde daher entschieden, dass die Fixierung des Messschlittens an den vorgegebenen Pfannenpositionen mit einem Imbusschlüssel (schnellste und einfachste Methode) erfolgen sollte.

Die schlechte Reproduzierbarkeit bekräftigte die im Vorfeld getroffene Entscheidung, dass der Einsatz eines Glasmaßstabes für die Durchführung der geplanten Untersuchungen notwendig war. Durch Einmessen der Pfannenpositionen hätte man lediglich eine Genauigkeit innerhalb der Reproduzierbarkeit der Pfannenposition als Referenzmessung erreicht, was für die geplanten Untersuchungen bezüglich zyklischen Phasenfehlers zu wenig gewesen wäre.

## 7.5 Einfluss der Geometrie des Trägerbalkens

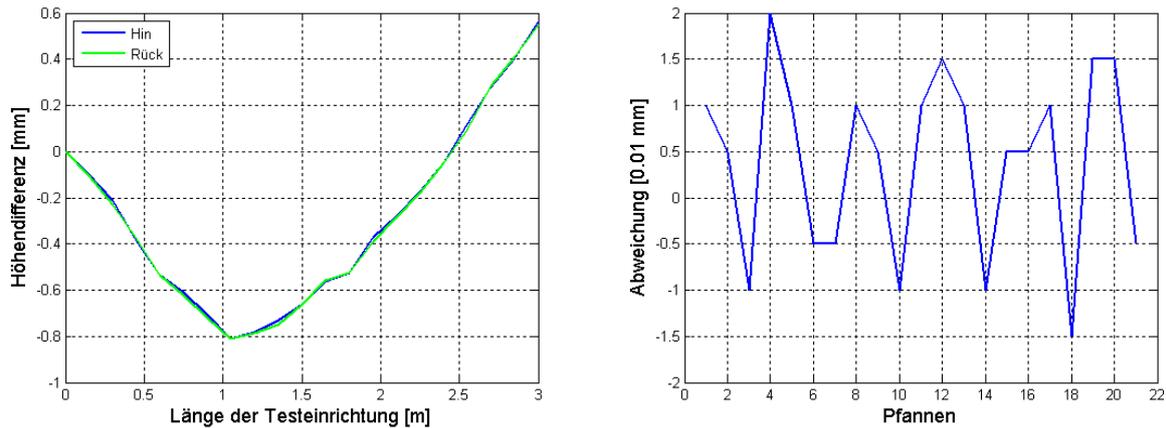
### 7.5.1 Präzisionsnivellement

Wie in Abschnitt 7.3 beschrieben, wurde aufgrund der Abweichungen der Glasmaßstabsmessungen zu den Interferometermessungen (Abb. 7.9) ein Durchhang des Trägerbalkens vermutet. Um diesen Verdacht bestätigen zu können, wurden die Höhenunterschiede der einzelnen Messschlittenpositionen, die durch die Pfannen vorgegeben waren, nivellistisch bestimmt. Für das Nivellement wurde ein Wild NA2 mit Planplatte verwendet (Abb. 7.13).



Abb. 7.13: Wild Na2 mit Planplatte auf einem Industriestativ (links) und im Detail (rechts).

Das Nivellier wurde in einem Abstand von etwa 4 m (längst mögliche Entfernung) mittig neben dem mobilen Feldkomparator auf einem Industriestativ montiert. Der Einfluss des Ziellinienfehlers wurde mit dem bei Grurl (2010) festgestellten Ziellinienfehler von 25'' rechnerisch an die Nivellementergebnisse angebracht.



**Abb. 7.14: Durchhang der Trägerbalkens aus Nivellementdaten (links), Differenz von Hin- und Rücknivellement (rechts).**

Mit Hilfe des Industriestativs wurde das Nivellier höhenmäßig auf die erste Messschlittenposition ausgerichtet. Als Ziel diente eine aufklebbare Zielmarke, die auf dem Messschlitten angebracht wurde. Zusätzlich war eine weitere Zielmarke auf dem Pfeiler hinter der mobilen Testeinrichtung als Referenz angebracht worden, um die Stabilität des Nivellierstandpunktes während den Messungen überprüfen zu können. Nach jeder dritten Schlittenposition wurde die Referenz gemessen (insgesamt achtmal). Die Abweichungen der Referenzmessungen lagen während des gesamten Beobachtungszeitraums (90 min) bei  $\pm 0,01$  mm (was der Messauflösung des Nivelliers entspricht), wodurch die Stabilität des Standpunktes bestätigt werden konnte.

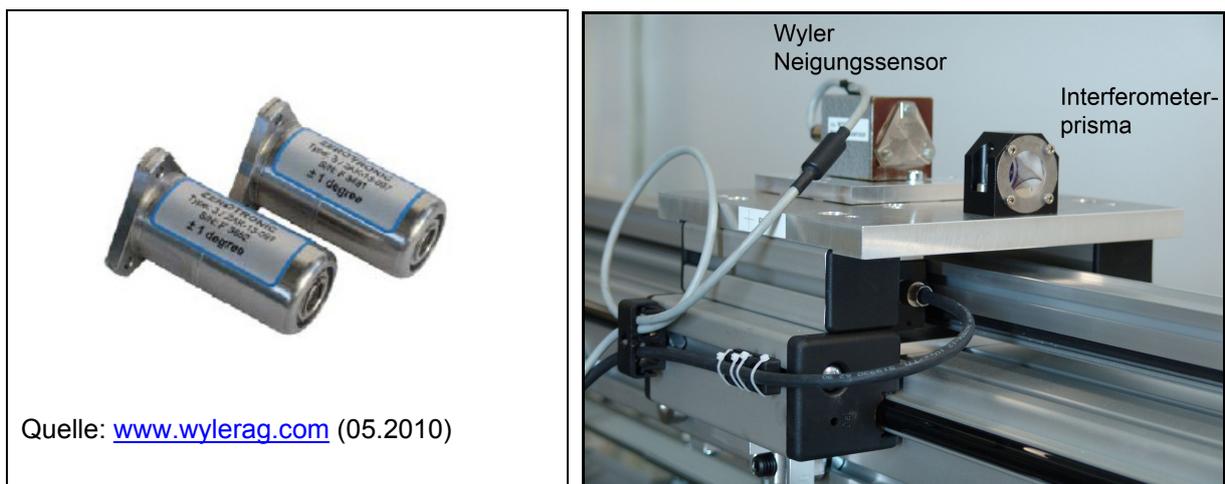
Jede Messschlittenposition wurde im Hin- und Rückweg gemessen und so die Höhendifferenzen im Bezug zur ersten Position bestimmt. Das Ergebnis des Präzisionsnivellements (Abb. 7.14, links) zeigt, dass der Trägerbalken eine Krümmung aufweist, die größer als der Durchhang ist. Zudem war der Trägerbalken nicht horizontal am Komparator montiert. Die Komparatorbank selbst weist ebenfalls eine geringe Neigung auf (Oberzaucher 2003), womit die festgestellte Schiefstellung wohl das Resultat aus Neigung der Komparatorbank und der Geometrie des Trägerbalkens war.

Da sich die Geometrie des Trägerbalkens auf die Messungen zu dem im Bezug zur Referenzmessung exzentrischen Zieles auswirkt, musste eine Möglichkeit gefunden werden um die Fehler, die sich aufgrund der Geometrie des Trägerbalkens bei Messungen zu dem exzentrischen Ziel ergeben, rechnerisch kompensieren zu

können. Dabei muss vor allem die Bestimmung der Neigung im Feldeinsatz möglich sein.

### 7.5.2 Erfassung der Neigung im Feld

Um den Einfluss eines möglichen Durchhangs auf die Messungen zu einem exzentrisch gelagertem Ziel rechnerisch kompensieren zu können wurde ein Neigungssensor der Firma Zerotronic Wyler Typ 3-10 auf dem Messschlitten montiert (Abb. 7.15, links). Für die Montage des Neigungssensors wurde eine spezielle Platte gefertigt, die eine Dreipunktlagerung des Sensors ermöglicht (Abb. 7.15, rechts).



**Abb. 7.15: Wyler Neigungssensor (links), Montage des Wyler mit Gehäuse und Spezialplatte zur Dreipunktlagerung auf Messschlitten (rechts).**

Auf eine hochgenaue Ausrichtung des Neigungssensors in Längsachse des mobilen Feldkomparators wurde verzichtet, da dies wegen unbekannter Sensorachse nicht möglich war. Eine Abschätzung des möglichen Fehlers bei einer Schiefstellung des Neigungssensors um maximal  $1^\circ$  ergab, dass die größten gemessenen Neigungen um maximal  $2 \cdot 10^{-5}^\circ$  verfälscht werden und damit keinerlei Auswirkung auf die mit Formel 7.1 berechneten Korrekturen der gemessenen Distanzen wegen einer Schiefstellung des Prismas haben.

Der Neigungssensor erfasst kontinuierlich (10 Hz) die Neigungen des Messschlittens während des gesamten Beobachtungszeitraums (Abb. 7.16).

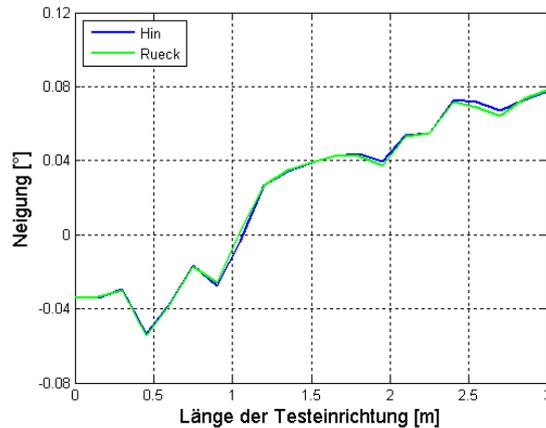


Abb. 7.16: Ergebnis der Neigungsmessung.

Vor der Montage wurde der Nullpunkt des Wyler Neigungssensors bestimmt, da später ein Umsetzen des Neigungssensors um 180° nicht mehr möglich war und alle Messungen nur in einer Lage durchgeführt werden konnten (allerdings im Labor bei konstanten Bedingungen).

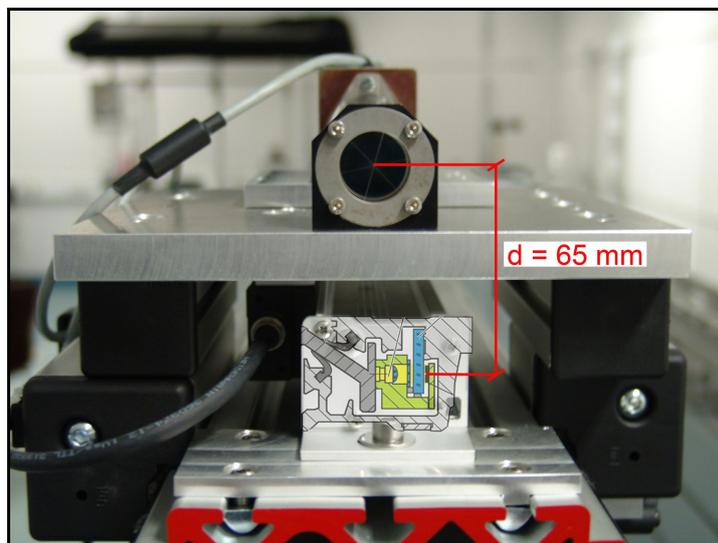
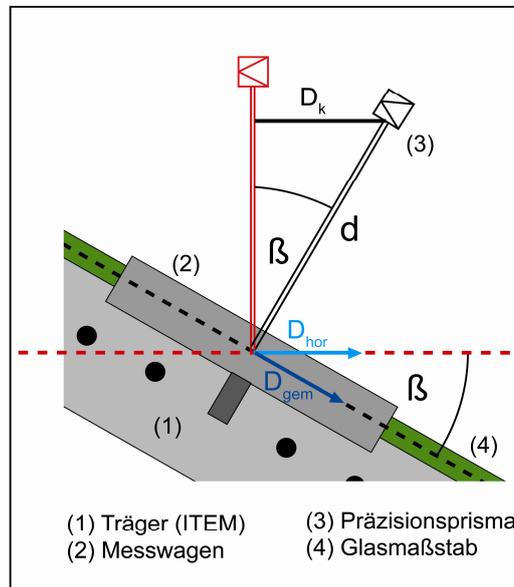


Abb. 7.17: Abstand des Prismenmittelpunktes zum Glasmaßstab.

Aus dem Abstand Prismenmittelpunkt - Glasmaßstab ( $d$ ) (Abb. 7.17) und den gemessenen Neigungen ( $\beta$ ) folgt die Korrektur ( $D_k$ ) aufgrund der Neigung des

Prismas (Abb. 7.18) für die Interferometermessungen bzw. für die späteren EDM-Messungen aufgrund der Exzentrizität des Zieles zu

$$D_k = d \cdot \sin(\beta) \quad (7.1)$$

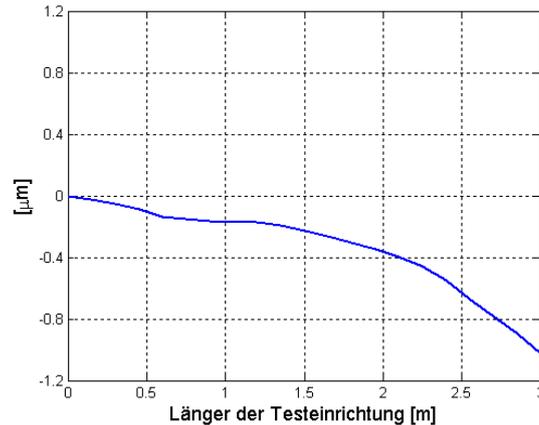


**Abb. 7.18: Korrektur der gemessenen Entfernungen wegen Exzentrizität des Prismas im Bezug zum Glasmaßstab.**

Die Glasmaßstabmessungen, die bei einem Durchhang des FC 2009 zu lang sind, müssten in einem ersten Schritt vom „Bogen“ (Durchhang) auf die Sehne reduziert werden. Aufgrund des geringen Durchhangs (siehe Abb. 7.14) können die daraus resultierenden Korrekturen (von Bogen auf Sehne) vernachlässigt werden. Im Falle der Schrägstellung des FC 2009 sind die Distanzen mit Hilfe der gemessenen Neigungen  $\beta$  auf Horizontalabstände umzurechnen (Abb. 7.18):

$$D_{hor} = D_{gem} \cdot \cos(\beta) \quad (7.2)$$

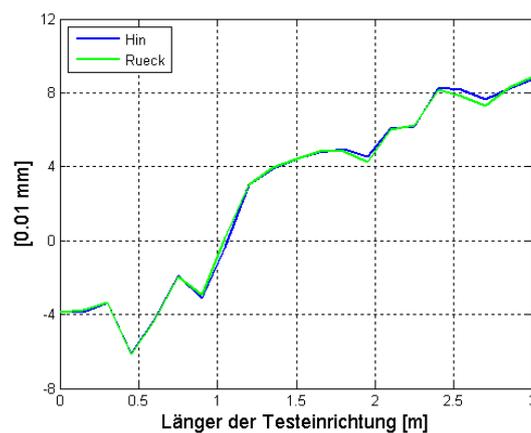
mit  $D_{gem}$  als gemessene, wegen Schiefstellung nicht horizontale, Strecke und  $D_{hor}$  als horizontale Strecke.



**Abb. 7.19: Korrektur aufgrund der Neigung: Differenz Horizontaldistanz - Schrägdistanz für Glasmaßstab LS 688C.**

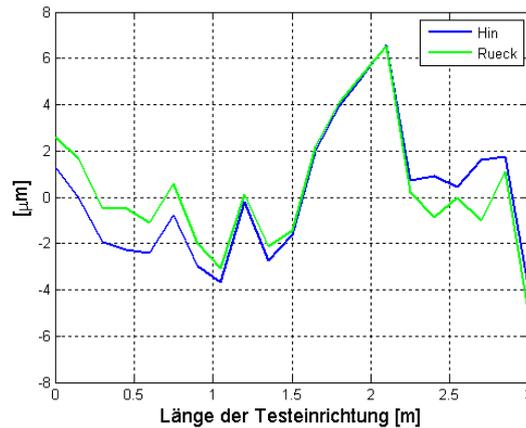
Die Verbesserungen der Glasmaßstabsmessungen in Abb. 7.19 betragen maximal 1 μm und konnten damit für diesen Versuch (horizontale Ausrichtung des FC 2009) vernachlässigt werden (Auflösung derzeitiger EDM-Geräte: 0,1 mm). Die Verbesserungen für die Interferometermessungen aufgrund einer Schrägstellung des Prismas betragen hingegen mehrere Hundertstel Millimeter (Abb. 7.20) und wurden an die Interferometermessungen laut Formel 7.3 angebracht.

$$D_{Inter\_korr} = D_{Inter\_gem} - D_k \quad (7.3)$$



**Abb. 7.20: Korrektur der Interferometermessungen aufgrund der Schrägstellung des exzentrisch gelagerten Retroreflektors**

Nachdem die Messungen mit Hilfe der gemessenen Neigungen verbessert worden waren, blieben maximale Abweichungen zwischen Interferometer und Glasmaßstab im Bereich von ± 7 μm (Abb. 7.21) übrig.



**Abb. 7.21: Differenz LS 688C - Interferometer nach Anbringen der Verbesserungen aufgrund der Neigung.**

Die anfangs geforderte Genauigkeit der Referenzmessung von ca. 0,01 mm konnte somit erreicht werden.

## 7.6 Änderung der Balkengeometrie durch Variation des Durchhangs

Zur Elimination der in Abschnitt 7.3 festgestellten Differenzen zwischen Interferometer- und Glasmaßstabmessungen wurde ein Versuch unternommen, den in Abschnitt 7.5 festgestellten Durchhang durch Variation der Geometrie des Trägerbalkens zu beseitigen. Dadurch wurde untersucht, ob eine Neuordnung der beiden Lagerungspunkte des mobilen Feldkomparators (siehe Abb. 7.2) eine Beseitigung des Durchhangs ermöglicht.

Bei dieser Untersuchung wurde der Trägerbalken am tiefsten Punkt (Pfanne # 8, in Abb. 7.16 bei 1,2 m) so lange mit Hilfe eines höhenverstellbaren Stempels (Abb. 7.22) angehoben, bis sich der mobile Feldkomparator gerade noch nicht aus einem seiner Lagerpunkt (Abb. 7.2) zu heben begann. Nach dieser Anhebung entsprach die neue Höhe des ursprünglich tiefsten Punktes noch nicht der Referenzhöhe der ersten Messschlittenposition. Ein weiteres Anheben hätte jedoch dazu geführt, dass der Balken aus seinem Lagerpunkt gehoben worden wäre. Damit war gezeigt, dass die Geometrie des Trägerbalkens nicht soweit verändert werden kann, um die Differenzen zu eliminieren.



Abb. 7.22: Höhenverstellbarer Stempel zur Anhebung des Trägerbalkens.

Alle Pfannenpositionen wurden in Hin- und Rückweg analog zu den Untersuchungen in Abschnitt 7.3 bestimmt. Das Ergebnis dieser Messungen (Abb. 7.23) zeigt, dass die Differenzen zwischen Interferometer und Glasmaßstab zwar um etwa 0,04 mm kleiner geworden waren, die gesamte Differenz aber nicht eliminiert werden kann.

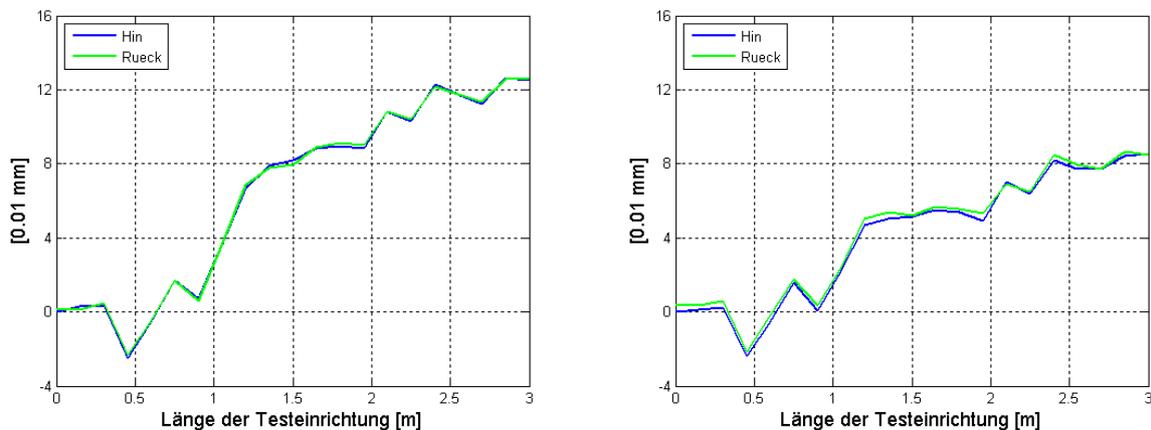
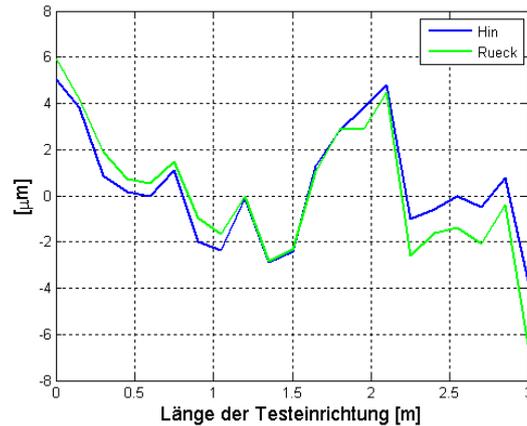


Abb. 7.23: Vergleich Differenz Heidenhain - Interferometer in Hin- und Rückweg bei normaler Lagerung (links) und bei Versuch der Eliminierung des Durchhangs durch Anheben (rechts).

Mit Hilfe des Neigungssensors kann dieser Einfluss jedoch gemessen und anschließend rechnerisch korrigiert werden (Abb. 7.24). Dieser Versuch zeigt weiters, dass die Korrektur der Neigung auch bei einer Veränderung der Geometrie des Trägerbalkens gut funktioniert.



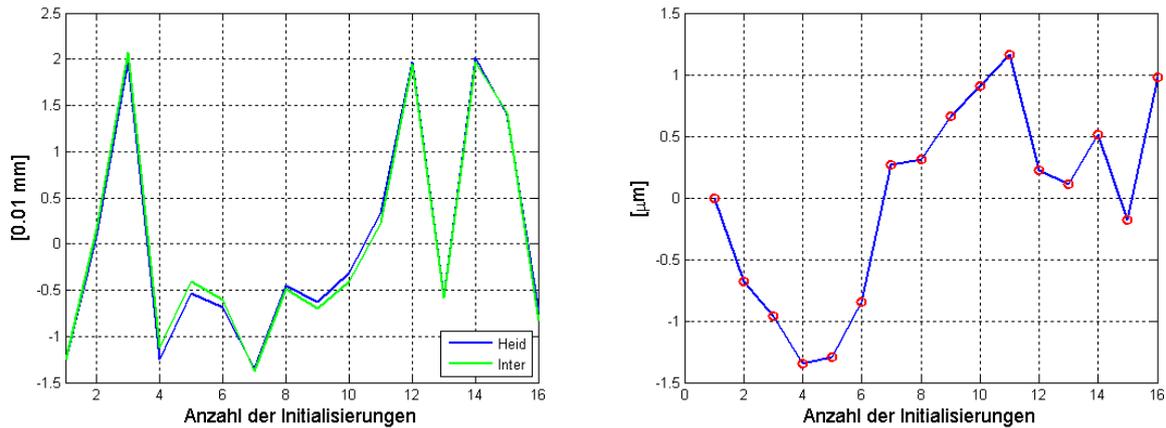
**Abb. 7.24:** Differenz LS 688C - Interferometer nach Anbringen der Neigungskorrektur bei angehobenem Trägerbalken in Hin- und Rückweg.

Somit war sichergestellt, dass auch nach dem Transport der mobilen Testeinrichtung, wodurch möglicherweise eine Veränderung der Geometrie des Trägerbalkens hervorgerufen werden könnte, durch Messung der Neigung der Einfluss auf die Distanzmessung aufgrund des exzentrisch gelagerten Zielpunktes rechnerisch kompensiert und eine Genauigkeit  $< 0,01$  mm erreicht werden kann.

## 7.7 Initialisierungstest

Wie in Anhang A beschrieben verfügt der Glasmaßstab LS 688C über keinen absoluten Längenbezug. Somit muss vor jedem Neustart eine Initialisierung des Messsystems erfolgen, bei dem der Nullpunkt festgelegt und durch Überfahren der nächstgelegenen Referenzmarke vom System „gefunden“ werden muss. Mit Hilfe eines Initialisierungstest sollte untersucht werden, ob die Initialisierung eine Auswirkung auf die Messergebnisse hat.

Bei dem Test wurde nach jeweils neuer Initialisierung des LS 688C 16-mal die Pfanne # 1 gemessen. Das Interferometer wurde nur zu Beginn der Messungen initialisiert und lieferte kontinuierlich die Entfernung zum Messschlitten während des gesamten Beobachtungszeitraums. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 7.25 dargestellt.



**Abb. 7.25: 16 Initialisierungen mit anschließender Messung von Pfanne # 1 (links), Differenz Heidenhain – Interferometer, d.h. Auswirkung der Initialisierung auf Messergebnis (rechts).**

Die Ergebnisse des Initialisierungstests zeigen, dass die Abweichungen der wiederholt angefahrenen Pfannenpositionen in etwa in der Größenordnung der festgestellten Pfannenreproduzierbarkeit (Abschnitt 7.4) liegen (Abb. 7.25, links). Die Differenzen LS 688C – Interferometer liegen im Bereich von  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  (Abb. 7.25, rechts) und stammen eventuell von der Fixierung des Messschlittens mit unterschiedlichem Drehmoment. Da aber nur die Messungen des LS 688C möglicherweise von der Initialisierung abhängen und diese Abhängigkeit in den Differenzen nicht erkennbar ist, dürften diese im  $\mu\text{m}$ - Bereich liegen und wirken sich somit nicht auf die späteren Untersuchungen aus, da sie weit unter der Messauflösung liegen.

## 7.8 Resümee der Untersuchungen des mobilen Feldkomparators im Messlabor

Die Untersuchungen des mobilen Feldkomparators im Messlabor auf der Komparatorbank zeigen, dass der LS 688C über eine sehr kleine Standardabweichung für Wiederholungsmessungen ( $>0,03 \mu\text{m}$ ) verfügt, wodurch die Anzahl an Wiederholungsmessungen bei den späteren Untersuchungen auf ein Minimum reduziert werden kann.

Die Untersuchungen zeigen weiter, dass die Reproduzierbarkeit der Pfannenposition variiert und bis zu etwa  $0,03 \text{ mm}$  beträgt. Dadurch wird die Notwendigkeit des

Glasmaßstabes verdeutlicht um die Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen. Zudem kann die Fixierung des Messschlittens an den vorgegebenen Pfannenpositionen händisch mit Hilfe eines Imbusschlüssels erfolgen, da unterschiedliche Drehmomente beim Anziehen der Kugelkopfschraube keine signifikante Verbesserung der Reproduzierbarkeit bewirkten.

Eine weitere Untersuchung zeigte, dass durch die Geometrie des Trägerbalkens infolge des zur Glasmaßstabsstrecke exzentrisch gelagerten Prismas die Distanzmessungen um bis zu 0,12 mm falsch sind. Durch Messung der Neigung kann die Schiefstellung des Prismas korrigiert werden, wodurch die geforderte Genauigkeit der Referenzmessung von 0,01 mm erreicht werden kann. Eine Änderung der Lagerung des Balkens kann die Geometrie des Balkens nicht entscheidend verändern um die Neigung des Prismas zu verhindern.

Ein möglicher Einfluss der Initialisierung auf die Messungen mit dem LS 688C konnte nicht festgestellt werden, da dieser (falls er existiert) im  $\mu\text{m}$ - Bereich liegt und sich damit nicht auf die späteren Untersuchungen auswirkt.

## 8 Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers im Labor für den Leica TCA 1800

Das geodätische Messlabor des Institutes für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz verfügt über eine 30 m lange Komparatorbank für die Überprüfung von EDM-Geräten. Um Vergleichswerte für die experimentelle Überprüfung der Funktionalität der mobilen Testeinrichtung zu erhalten wurde der zyklische Phasenfehler in diesem Distanzbereich für den Leica TCA 1800 bei Verwendung einiger unterschiedlicher Reflektortypen (Tabelle 8.1) bestimmt. Die Informationen über das Verhalten des zyklischen Fehlers in diesem Distanzbereich bildeten die Grundlagen für die Folgeuntersuchungen, z.B. die Wahl des Prismas beim Feldtest der mobilen Testeinrichtung.

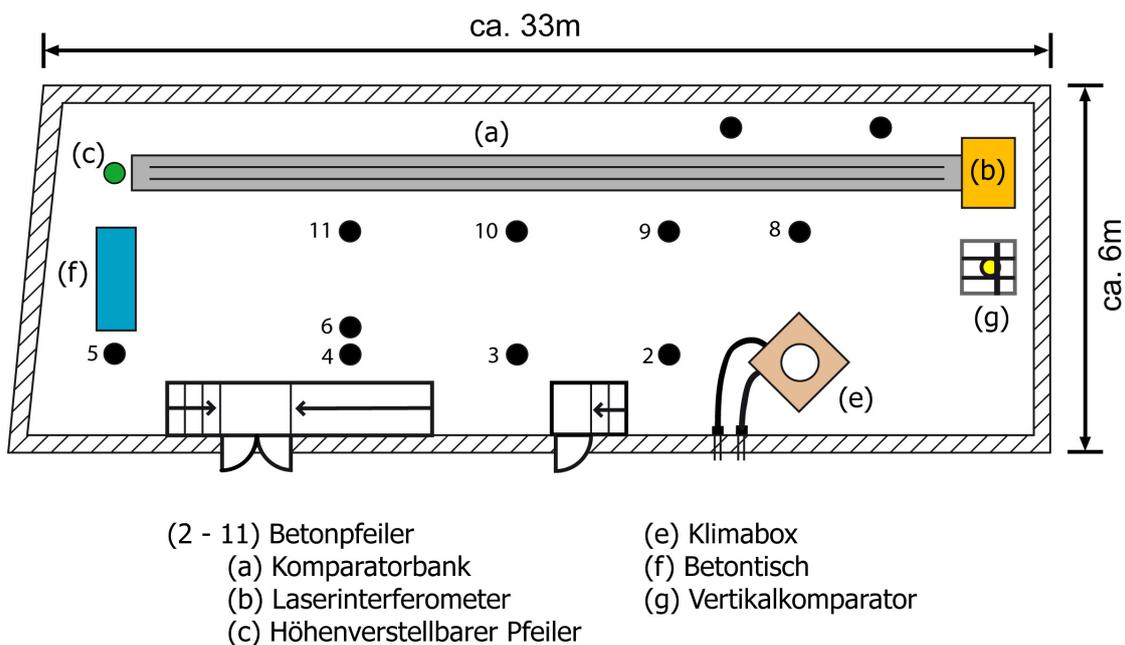


Abb. 8.1: Skizze des Messlabors des IGMS der TU Graz.

## 8.1 Messungen am Horizontalkomparator

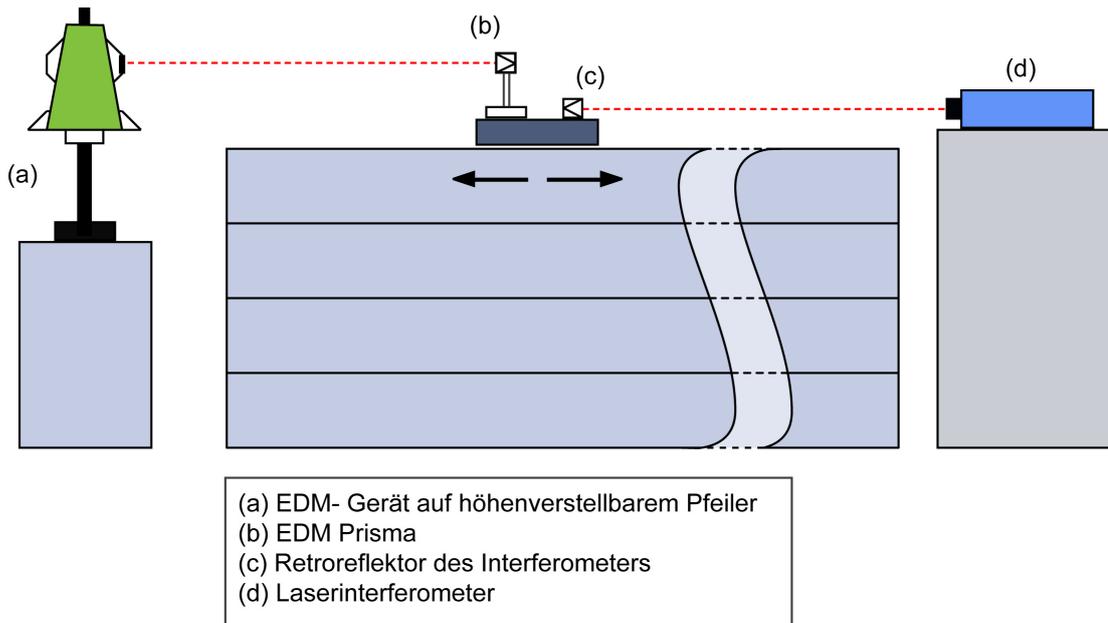
### 8.1.1 Aufbau

Die Lage des Horizontalkomparators im geodätischen Messlabor des IGMS der TU Graz ist Abb. 8.1 zu entnehmen. An einem Ende der Komparatorbank ist ein Laserinterferometer, am anderen Ende ein mit Kurbel höhenverstellbarer Pfeiler, auf dem das zu prüfende EDM-Gerät montiert wird (Abb. 8.2).



**Abb. 8.2:** 30 m lange Komparatorbank im Messlabor des Institutes für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (links), Leica TCA 1800 auf höhenverstellbarem Pfeiler (rechts).

Ein motorisierter Messwagen ermöglicht ein vollautomatisches Verfahren entlang der Komparatorbank. Auf dem Messwagen können mit Hilfe eines Steckzapfens die zu untersuchenden Prismen für die EDM-Messung aufgesteckt werden. Für die Referenzmessungen mit dem Laserinterferometer befindet sich ein Reflektor auf dem Messwagen (Abb. 8.3).



**Abb. 8.3:** Schematische Darstellung der Messkonfiguration zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers am Horizontalkomparator.

### 8.1.2 Auswahl des Instrumentariums

Die Wahl des Tachymeters fiel auf den Leica TCA 1800 (S. Nr. 413701) des IGMS (Abb. 8.4). Von diesem Gerät war aus vorangegangenen Arbeiten (z.B. Fleckl 2007 oder Schwarz 2007) bekannt, dass ein zyklischer Fehler bei einem Distanzbereich bis 30 m vorhanden ist.



**Abb. 8.4:** Leica TCA 1800.

Da das Verhalten des zyklischen Fehlers nicht nur gerätespezifisch sondern auch von der Wahl des Zieles abhängt, wurden unterschiedliche Reflektoren (Tabelle 8.1)

und Reflexfolien (Tabelle 8.2) untersucht. Die Wahl der Prismen wurde auf die heutzutage oft auf Baustellen, im Tunnelbau oder bei Standardvermessungen verwendeten Typen eingeschränkt. Dabei sollten auch baugleiche Reflektoren unterschiedlicher Hersteller miteinander verglichen werden.

**Tabelle 8.1: Auswahl der zu untersuchenden Reflektoren.**



Hersteller	Leica Geosystems	Geodäsie AUSTRIA	Goecke
Seriennummer	5058431	gek. 03/10	gek. 03/10
Distanzbereich*	bis 3500 m	N/A	bis 600 m
Maße (Durchmesser)*	62,5 mm	25 mm	25 mm / 60 mm
Kippachshöhe*	86 mm	86 mm	86 mm
Offset*	0 mm	-17 mm	2 mm
Material	Glasprisma	Miniprisma Glas	Miniprisma Glas
ATR*	möglich	möglich	möglich

\*Angabe des Herstellers

**Tabelle 8.2: Auswahl der zu untersuchenden Reflexfolien**



Hersteller	Geodäsie AUSTRIA	Goecke
Seriennummer	N/A	N/A
Distanzbereich*	mehrere hundert Meter	bis 150 m
Maße (Durchmesser)*	60 mm	60 mm
Kippachshöhe*	86 mm	86 mm
Offset*	2 mm	2 mm
Material	Reflexfolie	Bireflex-Reflexfolie
ATR*	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen

\*Angabe des Herstellers

Ein erster visueller Vergleich der zu untersuchenden Prismen zeigte, dass sowohl die Miniprismen als auch die Reflektoren beider Hersteller (Goecke und Geodäsie Austria) sich deutlich voneinander unterscheiden: Bei den Miniprismen wurden jeweils zwei unterschiedliche Glasprismen verwendet, bei den Reflexfolien war ein Unterschied von der Struktur der Reflexfolien zu erkennen. Um diesen Verdacht zu bestätigen, wurden die Folien der beiden Reflektoren unter dem Mikroskop betrachtet (Abb. 8.5).

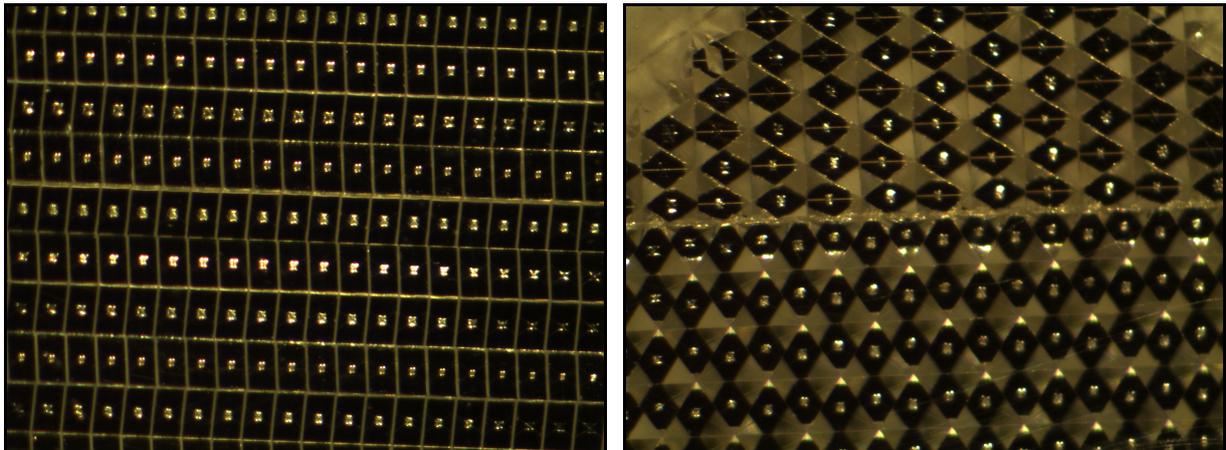


Abb. 8.5: Betrachtung der Reflexfolien unter dem Mikroskop (Sichtfeld ca. 2 mm x 1,5 mm), Reflexfolie „Gelb“ (links), Reflexfolie „rot“ (rechts).

Unter dem Mikroskop sieht man sehr gut, dass die beiden Firmen unterschiedliche Folien verwenden.

### 8.1.3 Durchführung der Messungen

Für die Messungen am Horizontalkomparator im geodätischen Messlabor mussten das Interferometer und der TCA 1800 vorab in Lage und Höhe ausgerichtet werden (mit Hilfe des höhenverstellbaren Pfeilers), sodass die vom Tachymeter ausgesandten Strahlen parallel zu den Laserstrahlen des Interferometers der Komparatorbank waren. Die Restabweichungen zur Komparatorachse betragen unter 1 mm.

Die vollautomatische Messung wird durch ein LABVIEW Programm gesteuert. Das Messintervall betrug 30 cm für die Hin- und Rückmessung, wobei die Wagenpositionen der Rückmessung um 15 cm versetzt waren. Um systematische Fehler aufgrund der Messauflösung des Tachymeters zu vermeiden, wurde der Wagen zwischen den acht Messungen (entspricht vier vollständigen Sätzen) um jeweils 0,03 mm verschoben.

Für die Untersuchungen am Horizontalkomparator wurden folgende Einstellungen am TCA 1800 getätigt:

- Die automatische Zielerfassung (ATR) wurde ausgeschaltet, da einerseits bekannt war, dass diese im Nahbereich (< 5 m) problematisch ist, und andererseits die Funktionsfähigkeit des ATR bei der Verwendung von Reflexfolien nicht unbedingt gegeben ist
- Nullpunktkorrektur wurde auf Null gesetzt
- Meteorologische Korrektur wurde auf Null gesetzt
- Messmodus wurde auf Präzisionsmessung gestellt
- Als Prismentyp wurde bei allen Prismen die Einstellung „Leica Standard + 0,00 mm“, bei allen Reflexfolien „Leica Folie + 34,0 mm“ verwendet (sofern später nicht anders angegeben)

Siebzehn Messreihen wurden im geodätischen Messlabor im Zeitraum vom 18.05.2010 bis 02.06.2010 durchgeführt (Tabelle 8.3).

**Tabelle 8.3: Durchgeführte Messungen am Horizontalkomparator im geodätischen Messlabor.**

Reflektor <sup>1)</sup>	File- Bezeichnung <sup>2)</sup>	Anmerkung
Miniprisma „Gelb“	HC679	Laserbeaminterruption bei 28,9 m Neuausrichtung des Lasers
— II —	HC681	Laserbeaminterruption bei Rückmessung bei 10,1 m
— II —	HC682	Drehung <sup>3)</sup> des Prismas um 15°
— II —	HC683	Laserbeaminterruption bei Rückmessung bei 9,8 m
— II —	HC694	Drehung <sup>3)</sup> des Prismas um 7,5°
Reflexfolie „Gelb“	HC684	Laserbeaminterruption bei Rückmessung bei 10,0 m; Neuausrichtung des Interferometerkopfes
— II —	HC688	
— II —	HC689	Drehung <sup>3)</sup> des Reflektors um 15°
— II —	HC690	Drehung <sup>3)</sup> des Reflektors um 15°
— II —	HC691	Wiederholungsmessung zu HC 688
— II —	HC693	Andere Seite der Reflexfolie untersucht
— II —	HC695	Ziel wurde bei TCA auf „Standard Prisma“ gestellt
— II —	HC697	Reflektor wurde mit angezogener Schraube auf Steckzapfen gesteckt um Prismenmittelpunkt nach oben zu verlagern
Rundprisma Leica	HC692	
Miniprisma „Rot“	HC696	
— II —	HC699	
Reflexfolie „Rot“	HC698	Neuausrichtung des TCA 1800

<sup>1)</sup> Typ „Gelb“: Hersteller: Goecke; Typ „Rot“: Hersteller: Geodäsie Austria

<sup>2)</sup> Intern vergebene fortlaufende Nummer aller Kalibrierungen am Komparator

<sup>3)</sup> Gegen den Uhrzeigersinn, von oben betrachtet

Die Messungen zu den Glasprismen erfolgte bei einem Distanzbereich von 1,6 m – 28,9 m, die auf Reflexfolien bei einem Bereich von 3,1 m – 28,9 m, da die Entfernungsmessung bei Reflexfolien bei kürzeren Distanzen nicht möglich war.

## 8.2 Auswertung

Die Auswertung der Untersuchungen im Labor erfolgte mit einer in MATLAB erstellten Auswerteroutine. Die gemessenen Entfernungen des TCA 1800 wurden nach Formel 8.1 (Rüeger 1996: S. 232) meteorologisch korrigiert.

$$K' = \left( C - \frac{Dp}{(273.15 + t)} + \frac{11.27e}{(273.15 + t)} \right) \cdot 10^{-6} D_{EDM} \quad (8.1)$$

mit Druck  $p$  in [hPa], Temperatur  $t$  in [°C] und Partialdruck des Wasserdampfes  $e$  in [hPa].

Die Parameter  $C = 281,8$  und  $D = 79,39$  wurden Rüeger (1996: S. 236) entnommen. Der Partialdruck des Wasserdampfes ( $e$ ) wurde nach Rüeger (1996: S. 65) berechnet:

$$e = \frac{Eh}{100} \quad (8.2)$$

mit partiellem Wasserdampfdruck  $e$ , Sättigungsdampfdruck  $E$  in [hPa] und der relativen Luftfeuchtigkeit  $h$  in [%].

Der Wert für den Sättigungsdampfdruck  $E = 23,518$  wurde der Tabelle in Rüeger (1996: S. 226) für eine mittlere Temperatur  $t = 20,01^\circ\text{C}$  während den Messungen entnommen.

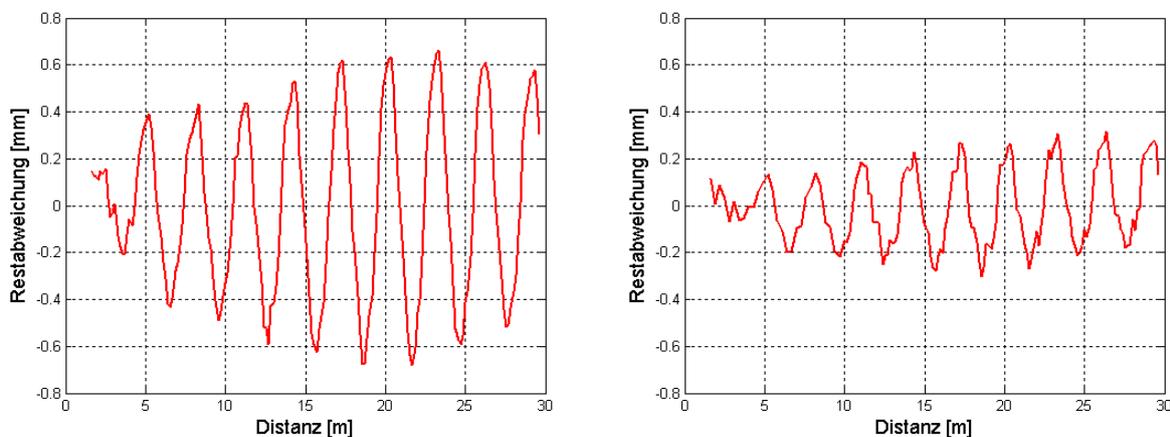
Die Messungen des Interferometers liegen bereits meteorologisch korrigiert vor. Nach Reduktion der Entfernungen auf den Anfangspunkt konnten aus der Differenz der gemessenen Entfernungen des Interferometers und des TCA 1800 die Restabweichungen berechnet werden. Da die Messungen mit dem Interferometer keinen Absolutbezug aufweisen, wurden die einzelnen Restabweichungen um das Mittel reduziert um die Ergebnisse besser darstellen und miteinander vergleichen zu können.

## 8.3 Ergebnisse

Sämtliche Reflektoren aus Tabelle 8.1 wurden auf der 30 m langen Komparatorbank im Messlabor auf einem Distanzbereich von 1,6 m - 28,9 m untersucht (Tabelle 8.3). Die daraus berechneten Restabweichungen zwischen den Messungen mit dem Interferometer und denen mit dem TCA 1800 sind in den folgenden Abbildungen dargestellt und werden später (Abschnitt 8.4) analysiert.

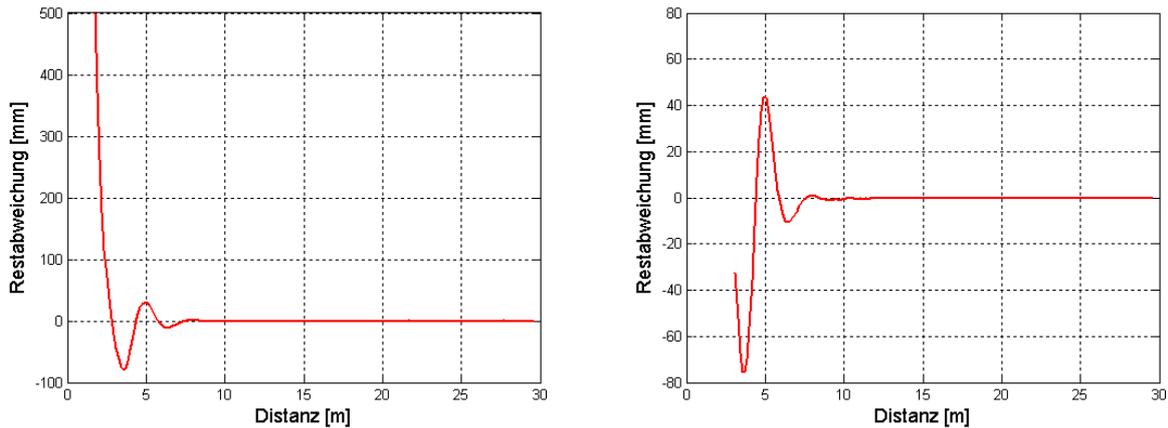
### 8.3.1 Reflektoren orthogonal zum EDM-Gerät

Die Reflektoren wurden zunächst orthogonal zum EDM-Gerät ausgerichtet und in dieser Stellung untersucht. Später wurde die Auswirkung einer Drehung des Zieles auf das Verhalten der Restabweichungen getestet (siehe Abschnitt 8.3.2).



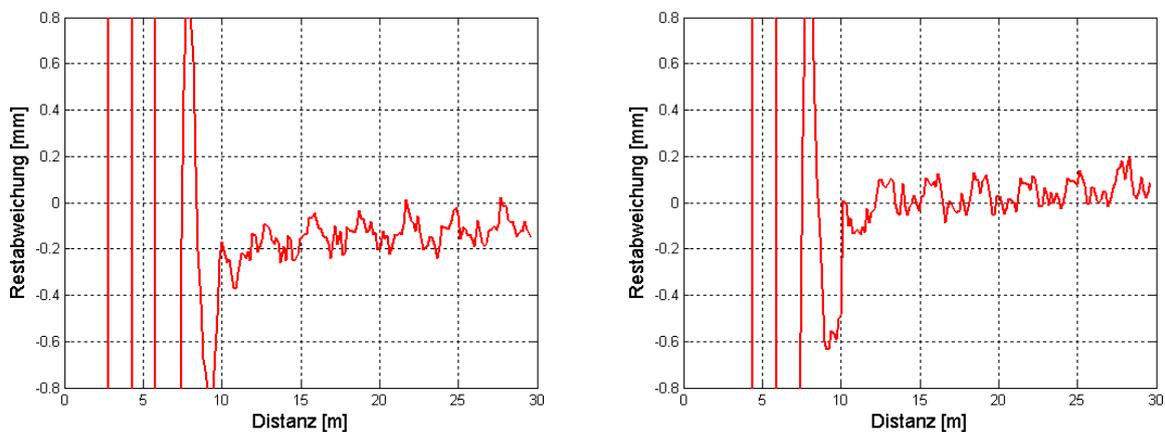
**Abb. 8.6: Restabweichungen der orthogonal ausgerichteten Miniprismen: (links) Miniprisma „Rot“, (rechts) Miniprisma „Gelb“.**

Der Vergleich der beiden Miniprismen in Abb. 8.6 zeigt bei beiden einen periodischen Anteil, wobei die Amplitude des Miniprismas „Rot“ (Firma Geodäsie Austria, Messreihe HC 696) deutlich größer ist als beim Miniprisma „Gelb“ (Firma Goecke, Messreihe HC 683). Weiters ist ersichtlich, dass die Amplitude mit der Distanz zuzunehmen scheint, wobei die Amplitude beim Miniprisma „Rot“ nach etwa 23 m wieder zum Abnehmen tendiert.



**Abb. 8.7: Restabweichungen der orthogonal ausgerichteten Reflexfolien: Reflexfolie „Rot“ (links), Reflexfolie „Gelb“ (rechts).**

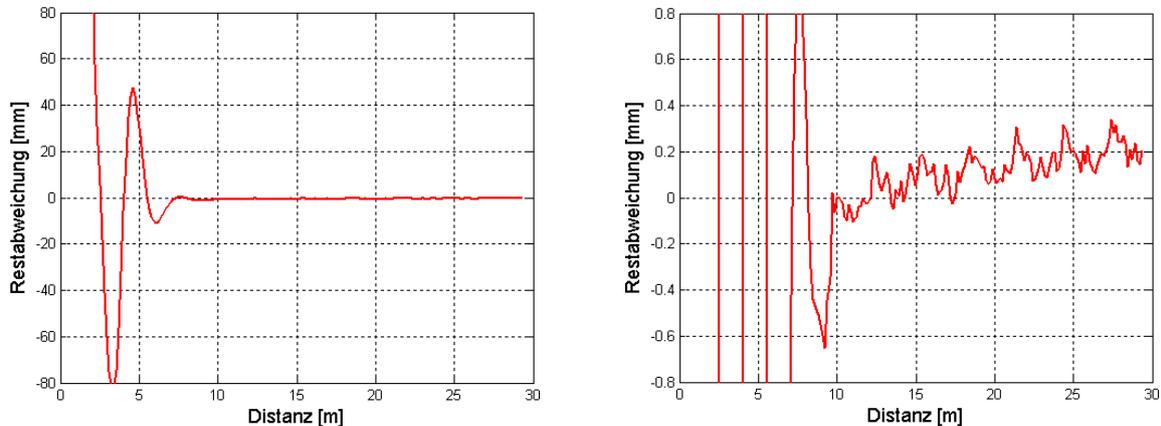
Die Reflexfolien (Messreihen HC 699 und HC 691) zeigen im Vergleich zu den übrigen Prismen ein stark abweichendes Verhalten. Im Nahbereich bis etwa 10 m treten extreme Abweichungen zum Beispiel bei der Reflexfolie „Rot“ von bis zu 50 cm auf, was zeigt, dass die Reflexfolien im Nahbereich (bis etwa 8 m) nicht verwendet werden sollten.



**Abb. 8.8: Zoom von Abb. 8.7: (links) Reflexfolie „Rot“, (rechts) Reflexfolie „Gelb“.**

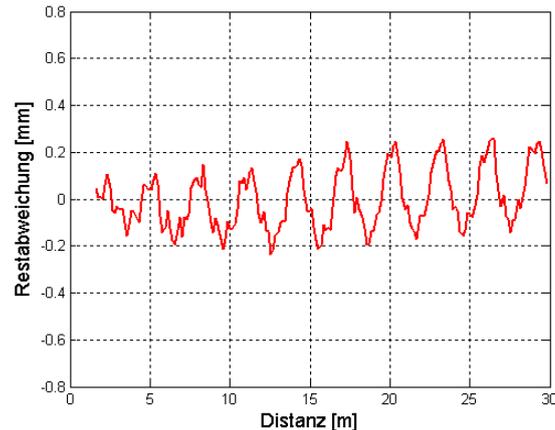
Im Bereich von 10 m bis 30 m (Abb. 8.8) ist wie auch bei den anderen Prismen ein periodischer Anteil erkennbar. Dieser verfügt über eine konstante Amplitude, jedoch sieht es so aus als würde ein Trend über den Restabweichungen liegen. Die Abweichungen ab etwa 10 m zeigen nicht mehr die großen Amplituden wie im

Nahbereich und fallen mit etwa 0,2 mm im Vergleich zu den übrigen Reflektoren eher gering aus.



**Abb. 8.9:** Restabweichungen der orthogonal ausgerichteten, um ca. 13 mm angehobenen Reflexfolie „Gelb“ (links), Zoom der linken Abbildung (rechts).

Es wurde vermutet, dass die extremen Abweichungen im Nahbereich (bis zu 50 cm, Abb. 8.7, links) auf eine Beschneidung des Messstrahls durch das Loch in der Mitte der Reflexfolie zurückzuführen sind. Aus diesem Grund wurde ein Versuch unternommen, bei dem die Reflexfolie um ca. 13 mm angehoben wurde, um den Zielpunkt vom Zentrum, und somit vom Loch weg, auf die Reflexfolie zu leiten. Die Restabweichungen in Abb. 8.9 zeigen, dass die berechneten Abweichungen nicht vom Loch in der Mitte des Reflektors kommen, da auch bei angehobenem Reflektor die extremen Abweichungen im Nahbereich zu beobachten sind. Einziger Unterschied bestand darin, dass bei angehobenem Reflektor Messungen ab 1,6 m möglich waren, hingegen bei den Untersuchungen ohne Anhebung erst ab 3 m Distanzmessungen möglich waren. Dies wurde aber nicht näher untersucht, da es nicht Aufgabe dieser Masterarbeit war.



**Abb. 8.10: Restabweichungen Leica Standardprisma.**

Die Restabweichungen des Leica Standardprismas (HC 692) in Abb. 8.10 zeigen ebenfalls einen periodischen Anteil. Allerdings ist die Amplitude im Vergleich zu den anderen Prismen am kleinsten. Die Amplitude des periodischen Anteils wird mit zunehmender Distanz größer. Die vorliegenden Daten lassen auch eine lange Welle, die über den Daten liegt, vermuten. Eine genauere Analyse der Restabweichungen wird in Abschnitt 8.4 gegeben.

### 8.3.2 Gegenüber dem EDM-Messstrahl verdrehte Reflektoren

Nach der Untersuchung der orthogonal ausgerichteten Reflektoren wurden diese horizontal gedreht um die Auswirkung eines nicht-orthogonal ausgerichteten Reflektors auf die Restabweichungen zu untersuchen.

Aus zeitlichen Gründen wurden nur die gelben Reflektoren der Firma Goecke in gedrehtem Zustand untersucht, da der Focus der vorliegenden Arbeit auf der Untersuchung der mobilen Testeinrichtung gelegt war. Die roten Prismen der Firma Geodäsie Austria müssten ebenfalls in gedrehtem Zustand untersucht werden um einen möglichen Zusammenhang der Drehung mit der Amplitude zu bestimmen.

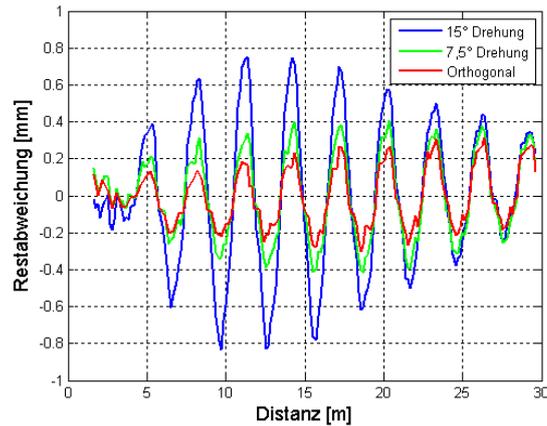


Abb. 8.11: Restabweichung bei orthogonaler und gedrehter Ausrichtung des Miniprismas „Gelb“ gegenüber dem EDM-Messtrahl.

Der Vergleich der Restabweichungen bei Orthogonalstellung und horizontaler Drehung des Miniprisma „Gelb“ (Abb. 8.11) zeigt, dass eine Drehung eine Zunahme der Amplitude in den Restabweichungen hervorruft. Die Periode und die Änderung der Amplitude mit der Distanz bleiben hingegen trotz Drehung gleich.

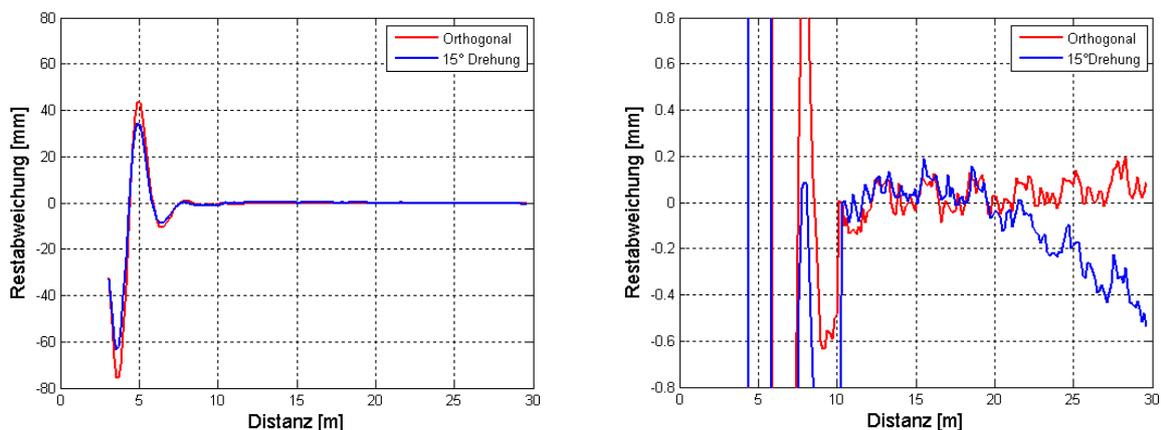
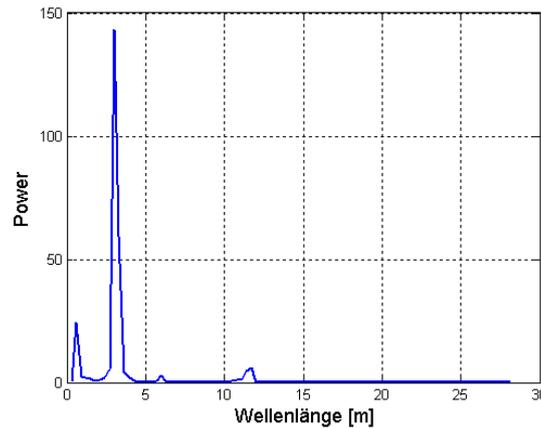


Abb. 8.12: Vergleich Reflexfolie „Gelb“ in Orthogonalstellung und um 15° gedreht (links), und ein Zoom davon (rechts).

Die Reflexfolie „Gelb“ (Firma Goecke) weist hingegen bei Verdrehung um 15° im Nahbereich kleinere Abweichungen auf als bei einer orthogonalen Stellung zum EDM-Gerät (Abb. 8.12, links). Im Distanzbereich von 10 m - 30 m ist der periodische Anteil nicht unmittelbar zu erkennen, jedoch könnte eine langperiodische Welle über den Restabweichungen liegen (Abb. 8.12, rechts), die aber auf der 30 m Komparatorstrecke nicht eindeutig aufgelöst werden kann.

## 8.4 Analyse der Untersuchungen am Horizontalkomparator

Um zu untersuchen ob weitere Schwingungsanteile in den Restabweichungen zu finden sind wurde eine Frequenzanalyse durchgeführt. Abb. 8.13 zeigt das Powerspektrum der in Abb. 8.10 dargestellten Daten.



**Abb. 8.13: Powerspektrum der Restabweichungen der Messreihe HC 692 des Standardprismas**

Das Maximum im Powerspektrum liegt bei 3 m. Dies entspricht dem Feinmaßstab des TCA 1800 (siehe Tabelle 6.1), und stellt damit den wesentlichen Einfluss dar. Weiters sind Schwingungen mit ca. 1 m, 6 m und 12 m Wellenlänge im Powerspektrum ersichtlich, die in Abb. 8.10 aber nicht bzw. kaum zu erkennen sind. Daher wird für die Modellierung des zyklischen Phasenfehlers zunächst ein Ansatz mit einer einfachen Sinusschwingung mit einer Wellenlänge von 3 m gewählt. Die Schwingungen mit  $\lambda = 1$  m kann in Abb. 8.10 zwar erahnt werden, jedoch fallen die Anteile gegenüber den Residuen bei den späteren Schätzungen nicht auf.

Zusätzlich ist zu beachten, dass mit den Messdaten aus dem Labor maximal Wellenlängen bis etwa 30 m detektiert werden können. Falls nun eine langwellige Schwingung (z.B. 120 m) über den Restabweichungen liegt, kann diese mit den vorliegenden Daten nicht erkannt werden. Um solche langperiodische Anteile detektieren und in weiterer Folge bei der Modellierung des zyklischen Fehlers berücksichtigen zu können, werden Messungen über einen größeren Messbereich benötigt.

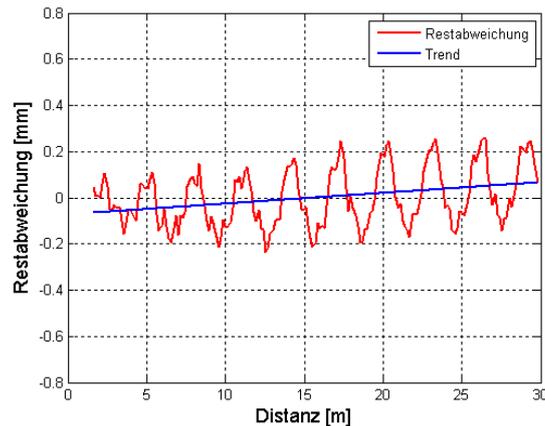
## 8.5 Modellierung des zyklischen Fehlers

Um die gemessene Distanz korrigieren zu können muss der zyklische Fehler aus einem Modell einer Sinusschwingung als deterministischer Anteil der Distanzmessung bestimmt werden. Eine Modellierung des periodischen Anteils der Restabweichungen ist mit den Daten aus Abschnitt 8.3 und den Ergebnissen aus Abschnitt 8.4 für den Distanzbereich bis 30 m möglich. Eine Extrapolation über die 30 m hinaus ist jedoch problematisch, da nur mit den Horizontalkomparator-messungen keine Informationen über das Verhalten des zyklischen Fehlers über diesen Bereich hinaus vorlagen. Aus diesem Grund wurde der mobile Feldkomparator gebaut.

Die Problematik einer Extrapolation wird nachstehend verdeutlicht und damit die Wichtigkeit des mobilen Feldkomparators unterstrichen, indem unter Verwendung der im Labor gewonnenen Daten verschiedene Modelle berechnet wurden. Da für eine aussagekräftige Modellierung über den gesamten Messbereich zu wenige Daten vorlagen und die Modellierung des zyklischen Fehlers nicht Aufgabe dieser Masterarbeit war, erheben die unten aufgezeigten Modelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern sollen nur einige Möglichkeiten aufzeigen. Für die Korrektur der Distanzmessung des TCA 1800 sind sie noch nicht zu empfehlen.

### 8.5.1 Trendelimination vor der Modellierung

Der lineare Trend (ca. 4 ppm), der in den Restabweichungen zu erkennen ist (Abb. 8.14), könnte auf einen möglichen Maßstabsfehler zurückgeführt werden (15 Jahre altes EDM-Instrument). Grund für diese Annahme war unter anderem auch, dass der Trend bei allen Prismen in etwa in der gleichen Größenordnung zu beobachten war.



**Abb. 8.14: Trend in den Restabweichungen des TCA 1800 bei Verwendung eines Standardprismas.**

Der Trend wurde für die Modellierung bei den Modellen A-C vorab eliminiert (Matlab: „*detrend*“), wobei auch der Offset beseitigt wurde. Der Offset entsteht, da die Interferometermessungen über keinen Absolutbezug verfügen.

Bei Modell D hingegen (siehe Abschnitt 8.5.2) wurde der Trend und somit auch der Offset mitmodelliert, falls die obige Vermutung eines Maßstabsfehlers nicht zutreffen sollte.

### 8.5.2 Verschiedene Modelle

Für die Modellierung des zyklischen Fehlers wurde wie in Abschnitt 5.6 erwähnt zunächst der Ansatz mit einer einfachen Sinusschwingung gewählt (Joeckel et al. 2008: S. 164-166).

Die am Horizontalkomparator über 30 m bestimmten Restabweichungen können mit unterschiedlichen Modellen modelliert werden, wobei sich diese für jedes Prisma unterscheiden können. Für ein über den gesamten Einsatzbereich des EDM-Geräts eindeutiges Modell werden zusätzliche Messungen benötigt. Hier werden verschiedene Modelle vorgestellt um einerseits die Notwendigkeit weiterer über den gesamten Messbereich verteilter Messungen zu verdeutlichen und andererseits die Problematik einer Modellierung des zyklischen Phasenfehlers zu beschreiben.

Für die Modellierung des zyklischen Fehlers wurde folgende Grundformel verwendet:

$$Kz_i = A \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{U} + \varphi\right) \quad (8.3)$$

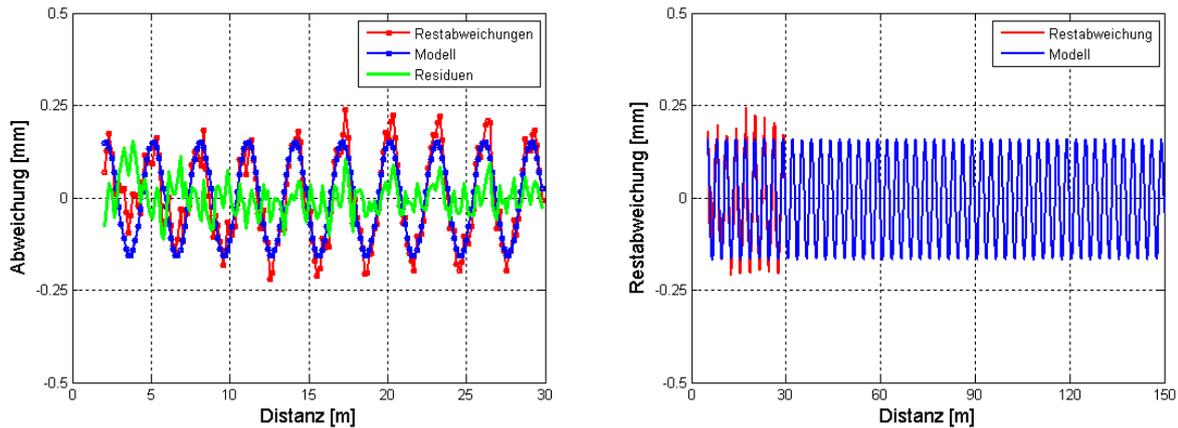
wobei  $A$  die Amplitude,  $U$  der Feinmaßstab und  $\varphi$  die Phasenlage ist.

Dieses Modell wurde je nach Struktur der vorliegenden Restabweichungen um einzelne Parameter erweitert oder reduziert. Der jeweilige Ansatz wurde basierend auf der Struktur der Restabweichungen gewählt. Mit den Daten der kurzen Komparatorstrecke (30 m) waren unterschiedlichste Modellansätze möglich, wobei die unten angeführten Modelle keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Für die Modellierung des periodischen Anteils im Distanzbereich bis 30 m ergaben sich aufgrund der unterschiedlichen Modellierungen aber keine großen Unterschiede, wie anhand der Residuen später gezeigt wird (Tabelle 8.4). Jedoch war der Modellansatz maßgeblich für das Verhalten des periodischen Anteils jenseits dieser 30 m verantwortlich. Im Folgenden werden exemplarisch für das Leica Standprisma die berechneten Modelle näher beschrieben. Für die restlichen Reflektoren sind ebenso mehrere Modelle möglich. Diese werden hier aber nicht gezeigt, da für diese Modelle auch zu wenige Daten vorliegen.

### Modell A

Eine erste Modellierung der Restabweichungen mit einer einfachen Sinusschwingung erfolgte laut Formel 8.4 und ist in Abb. 8.15 dargestellt. Dieser Ansatz für die Modellierung ist auch bei Schwarz (2007) für einen Leica TCA 1800 zu finden.

$$Kz_i = A \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{U} + \varphi\right) \quad (8.4)$$



**Abb. 8.15:** Leica TCA 1800 Messungen im Labor bei Verwendung des Leica Standardprismas; (links) gemessene Restabweichungen gegenüber Modell A und auftretende Residuen; (rechts) Extrapolation des Modells A auf einen Distanzbereich bis 150 m.

Die Residuen (Restabweichungen - Modell) zeigen eine gute Übereinstimmung des Modells mit den Restabweichungen (Abb. 8.15, links). Auffällig ist jedoch, dass im Bereich unter ca. 7 m eine geringere Übereinstimmung auftritt. Handelt es sich dabei nicht um Nahbereichseffekte (z.B. starke Änderung der Nullpunktkorrektur), so ist ein Modell sinnvoll, bei dem die Amplitude mit der Distanz ansteigt (siehe Modell B).

Die Residuen sollten normalverteilt und stochastisch sein. Dies wurde mit Hilfe eines Q-Q-Plots überprüft (Abb. 8.19) und mittels statistischer Tests auf Signifikanz getestet (siehe Tabelle 8.5).

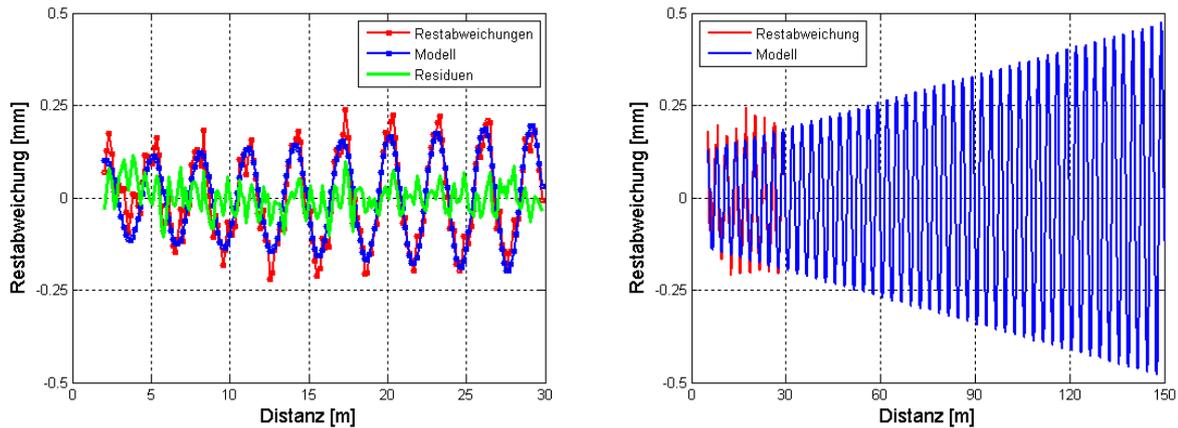
### Modell B

Dieses Modell stützt sich auf den gleichen Ansatz wie Modell A, wobei zusätzlich ein Parameter ( $a$ ) eingeführt wird, der die Amplitude mit der Distanz anwachsen lässt:

$$Kz_i = (A + a \cdot D_i) \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{U} + \varphi\right) \quad (8.5)$$

mit  $a$  als linear anwachsender Term der Amplitude.

Das Resultat dieses Ansatzes ist gemeinsam mit den Restabweichungen und den Residuen in Abb. 8.16 dargestellt.



**Abb. 8.16:** Leica TCA 1800 Messungen im Labor bei Verwendung des Leica Standardprismas; (links) gemessene Restabweichungen gegenüber Modell B und auftretende Residuen; (rechts) Extrapolation des Modells B auf einen Distanzbereich bis 150 m.

Die Residuen in Abb. 8.16, links, zeigen, wie gut das Modell die gemessenen Restabweichungen (Interferometer - EDM-Messung) annähert. Ein Vergleich der Residuen der einzelnen Modelle bringt jedoch keine Klarheit über die Güte der einzelnen Modelle (Tabelle 8.4). Die statistischen Tests lassen ebenfalls keine qualitative Aussage über Güte der Modellansätze erkennen (siehe Tabelle 8.5).

Modelliert man mit diesem Ansatz den zyklischen Fehler für einen Distanzbereich bis 150 m (Abb. 8.16, rechts), wird die Problematik der Extrapolation jedoch deutlich (Abb. 8.16 rechts). Aus den Angaben des Herstellers bezüglich der erreichbaren Genauigkeit der Distanzmessung (1mm + 2 ppm, siehe Tabelle 6.1) kann das Modell mit linear ansteigendem Term der Amplitude wohl nicht für den gesamten Messbereich des EDM-Geräts gelten, da die Abweichungen bei 150 m bereits eine Spannweite von 1 mm hätte. Dieses Modell kann jedoch nur mit Messungen, die jenseits des 30 m Distanzbereichs im Labor liegen, verifiziert werden.

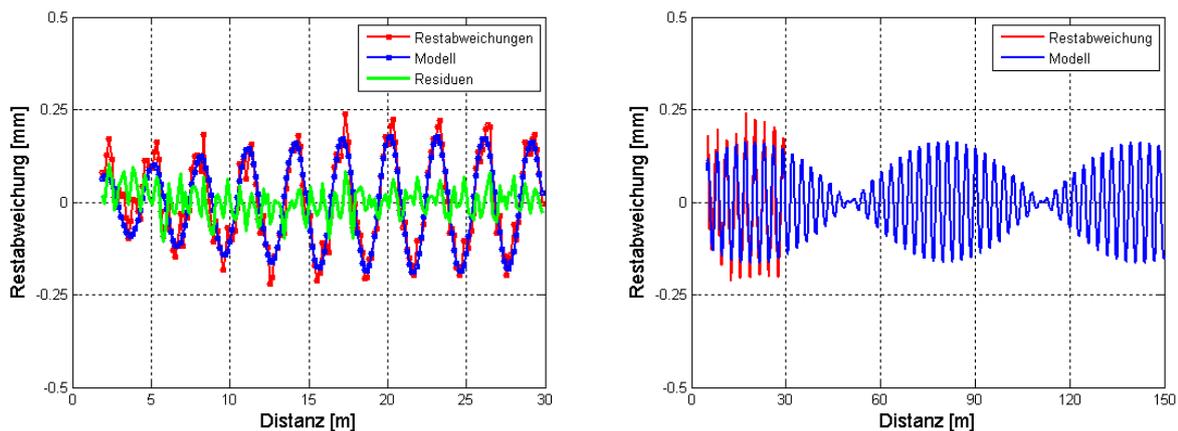
### Modell C

Ein weiteres Modell, bei dem sich die Amplitude mit der Distanz ändert, nun aber nicht nur größer, sondern auch kleiner wird, ist in Abb. 8.17 zu sehen. Hier wurde der ursprüngliche Ansatz laut Formel 8.3 mit einer zweiten, langperiodischen Sinusschwingung multipliziert:

$$K_{z_i} = \left[ A \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{U} + \varphi\right) \right] \cdot \left[ A_{lang} \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{U_{lang}} + \varphi_{lang}\right) \right] \quad (8.6)$$

wobei  $A_{lang}$  die Amplitude,  $U_{lang}$  die Wellenlänge und  $\varphi_{lang}$  die Phasenlage der langperiodischen Schwingung ist.

Das Resultat dieser Überlagerung zeigt im Nahbereich (bis 30 m) ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Restabweichungen, siehe Residuen in Abb. 8.17, links. Inwiefern eine Multiplikation des einfachen Sinusmodells mit einer weiteren Sinusschwingung gerechtfertigt ist, muss durch weitere Messungen gezeigt werden. Mit den vorliegenden Daten lässt sich solch ein Ansatz weder bestätigen noch widerlegen, es wird sich aber später (Abschnitt 11.4) zeigen, dass dieser berechtigt erscheint. Ein Näherungswert für die Wellenlänge der langwelligen Sinusschwingung kann aber aus den Labordaten (30 m Beschränkung) nicht sinnvoll geschätzt werden und wurde hier mit 90 m (visuell aus Restabweichungen bestimmt) vorgegeben und bei der Ausgleichung (lieferte 110 m) mitgeschätzt.



**Abb. 8.17: Leica TCA 1800 Messungen im Labor bei Verwendung des Leica Standardprismas; (links) gemessene Restabweichungen gegenüber Modell C und auftretende Residuen; (rechts) Extrapolation des Modells C auf einen Distanzbereich bis 150 m.**

Den Vorteil des Ansatzes zeigt Abb. 8.17, rechts, bei der Extrapolation, wo die Amplitude nicht wie in Abb. 8.16 kontinuierlich anwächst, sondern zwischen ca. +0,18 mm und -0,18 mm variiert.

## Modell D

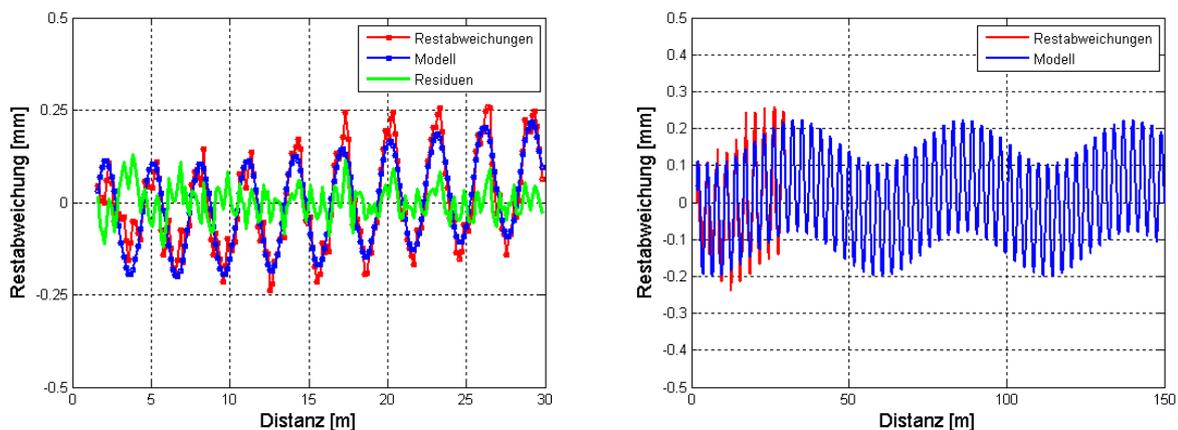
Bisher wurde angenommen, dass der Trend durch einen Maßstab des EDM-Geräts verursacht wird. Für den Fall, dass diese Vermutung falsch sein sollte, wurde ein

weiteres Modell erstellt, bei dem der Trend durch eine überlagerte langperiodische Sinusschwingung modelliert wird (Abb. 8.18). Diese langwellige Schwingung wurde zum ursprünglichen Modell A (Formel 8.4) addiert:

$$Kz_i = \left[ A \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{U} + \varphi\right) + o \right] + \left[ A_{lang} \cdot \sin\left(D_i \frac{2\pi}{\lambda_{lang}} + \varphi_{lang}\right) \right] \quad (8.7)$$

wobei auch hier  $A_{lang}$  die Amplitude,  $\lambda_{lang}$  die Wellenlänge und  $\varphi_{lang}$  die Phasenlage der langperiodischen Schwingung ist und  $o$  der Offset.

Ein Näherungswert für die Wellenlänge der langwelligen Sinusschwingung wurde hier mit 60 m (visuell aus Restabweichungen bestimmt) vorgegeben und bei der Ausgleichung mitgeschätzt (54 m), da aus den Labordaten (30 m) keine Näherungswerte geschätzt werden können (vgl. Modell C).



**Abb. 8.18:** Leica TCA 1800 Messungen im Labor bei Verwendung des Leica Standardprismas; (links) gemessene Restabweichungen gegenüber Modell D und auftretende Residuen; (rechts) Extrapolation des Modells D auf einen Distanzbereich bis 150 m.

### Entscheidung für ein Modell

Die Zusammenstellung der Standardabweichungen der Residuen (Tabelle 8.4), die nach Abzug des modellierten periodischen Anteils von den im Labor bestimmten Restabweichungen resultieren, zeigen keine signifikanten Unterschiede der einzelnen Modelle. Daher kann anhand der Labordaten keine Entscheidung für die Wahl eines Modells getroffen werden. Jedoch veranschaulichen die einzelnen

Modelle sehr deutlich die Problematik, die sich aufgrund des eingeschränkten Distanzbereichs im Labor ergibt.

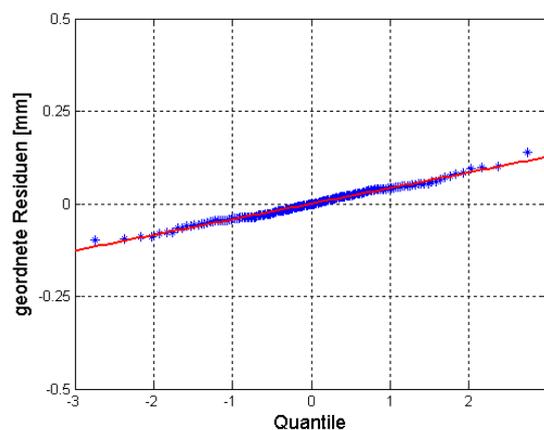
Die Bestätigung eines Modells ist wohl auch nur mit Hilfe weiterer Messungen, die über die 30 m hinausgehen möglich da die statistischen Tests alle vorgestellten Modelle bestätigen (Abschnitt 8.5.3).

**Tabelle 8.4: Standardabweichungen (s) der Residuen der einzelnen Modelle**

Modell	Beschreibung	s [mm]
A	Sinus	0,042
B	Sinus mit linear anwachsender Amplitude	0,040
C	Multiplikation zweier Sinuse	0,043
D	Addition zweier Sinuse	0,046

### 8.5.3 Statistische Tests

Die Residuen nach Anwendung der zuvor gezeigten Modelle A-D wurden statistischen Tests unterzogen. Diese werden exemplarisch für Modell A, das auf die Restabweichungen des Leica Standardprismas angewandt wurde, beschrieben. Zunächst wurde anhand eines Quantil-Quantil-Plots (Q-Q-Plot) untersucht, ob die vorliegenden Residuen normalverteilt sind (siehe Abb. 8.19). Der Q-Q-Plot wurde nach Hartung (1998, S.847-849) durchgeführt.



**Abb. 8.19: Q-Q-Plot der Residuen nach Anwendung des Modells A.**

Um neben der visuellen Bestätigung in den Abb. 8.15 bis Abb. 8.18 einen rechnerischen Beleg für die Richtigkeit der angesetzten Modelle zu erhalten wurden folgende statistische Tests durchgeführt:

Test (a): Globaler Modelltest zur Überprüfung des Modellansatzes nach Niemeier (2008, S. 167-170)

Test (b): Test der empirischen Standardabweichung der gemessenen Restabweichungen mit jenen der Residuen nach Abzug des deterministischen zyklischen Fehlers auf Gleichheit, siehe Sachs (1993, S. 74).

Test (c): Wenn Test (b) anschlägt, Test ob die Standardabweichung der Residuen signifikant kleiner ist als jene der Restabweichungen, siehe Sachs (1993, S. 73-74).

Test (d): Wenn Test (c) anschlägt, Test der Parameter des Modells auf Signifikanz, Rüeger (1996, S. 215-216)

Das Ergebnis dieser Tests ist in Tabelle 8.5 zusammengefasst, wobei ein „✓“ Annahme, „x“ Ablehnung und ein „-“ ein in diesem Modell nicht geschätzter Parameter des jeweiligen Tests bedeutet.

**Tabelle 8.5: Zusammenstellung der Ergebnisse der statistischen Tests (a-d).**

	Test (a)	Test (b)	Test (c)	Test (d)							
				A	$\lambda^1$	$\varphi$	a	o	A lang	$\varphi$ lang	$\lambda$ lang
Modell A	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-
Modell B	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-
Modell C*	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	x	✓	x
Modell D*	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	x

\*Diskussion zu Test (d) siehe Text

<sup>1)</sup> nicht geschätzt, als 3 m fest angenommen (Feinmaßstab TCA 1800, Rüeger 1996: S. 236)

Die Zusammenstellung der Resultate der statistischen Tests (a-d) in Tabelle 8.5 zeigt, dass der globale Modelltest bei allen Modellen keine signifikante Abweichung anzeigt (Test a). Der zyklische Fehler in den Restabweichungen ist signifikant (Test b). Weiters bringt die Modellierung der Restabweichungen bei allen Modellen A-D eine signifikante Verbesserung mit sich (Test c). Die Signifikanz der einzelnen Parameter für den Distanzbereich bis 30 m (Test d) ist nicht bei allen Parametern gegeben, insbesondere bei jenen Modellen, bei denen ein zweiter, langwelliger Sinus mitmodelliert wird. Das Problem bei diesen Modellen war, dass zu wenige geometrisch gut verteilte Daten (Distanzbereich im Labor  $< 30$  m) für die eindeutige Bestimmung der Parameter der langen Schwingung ( $\lambda > 50$  m) zur Verfügung standen (nur geringe Unterschiede zwischen den Modellen in dem kurzen Distanzbereich 0 m – 30 m). Die Schätzung der Parameter der langwelligigen Schwingung ist daher mit den Labordaten nicht sinnvoll. Weitere Versuche (erste Tests der Erweiterung des Distanzmessbereichs im Labor durch Verwendung eines Planspiegels, die jedoch in dieser Arbeit nicht gezeigt werden, da der verwendete Spiegel dafür nicht optimal geeignet war) zeigten, dass eine solche höchstwahrscheinlich vorliegt, was der Grund für die Erstellung der Modelle C und D war.

Die beschriebenen Modelle A-D sind derzeit nicht für die Korrektur der Distanzmessung zu verwenden. Sie dienen lediglich zur Veranschaulichung der bestehenden Problematik und zur Wahl des Modells, bzw. wird ein neues Modell erst mit weiteren Daten, die mit dem mobilen Feldkomparator bei mehreren Distanzen gemacht werden sollen, möglich werden. Bei der Planung der Feldversuche lieferten die Modelle jedoch wertvolle Informationen.

## **8.6 Resümee der Modellierung der Restabweichungen der Labormessungen**

Die oben erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit den vorliegenden Daten für den periodischen Anteil in den Restabweichungen Modelle für den Messbereich bis 30 m erstellt werden können. Unterschiede aufgrund des Ansatzes des Modells wirken sich in diesem Bereich nicht aus, werden aber bei einer Extrapolation sehr deutlich.

Um aussagekräftige Modelle über das Verhalten des zyklischen Fehlers bei langen Distanzen erstellen zu können, werden mehr Messdaten, vor allem bei größeren Entfernungen, benötigt.

Diese Informationen können mit Hilfe des mobilen Feldkomparators gewonnen werden und ermöglichen es so präzisere Aussagen über ein mögliches Modell des zyklischen Phasenfehlers zu tätigen. Die Feldtauglichkeit des mobilen Feldkomparators musste jedoch erst noch gezeigt werden. Für den Einsatz des FC 2009 im Feld waren daher noch einige Voruntersuchungen nötig, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

Der Versuch der Modellierung des zyklischen Fehlers spielt aber auch für die Vorplanung der Messungen mit dem mobilen Feldkomparator im Feld eine Rolle. So kann anhand dieser Überlegungen z.B. die Einsatzdistanz des mobilen Feldkomparators gewählt werden (minimale oder maximale Amplitude).

## **9 Aufbau des mobilen Feldkomparators im Feld und Messablauf**

Für die Untersuchungen des FC 2009 im Feld wurde das Dach des Geodäsiegebäudes Steyrergasse 30 gewählt, da sich auf diesem Dach ein Prüffeld von betonierten Messpfeilern und verschiedenen Reflektoren zur Überprüfung von Tachymetern befindet. Dadurch kann zum einen der mobile Feldkomparator auf einem betonierten Pfeiler und einem Industriestativ aufgebaut werden, was die Stabilität erhöht, und zum anderen sind die Transportwege des Instrumentariums kurz.

### **9.1 Messkonfiguration**

Für die Bestimmung des zyklischen Fehlers mit Hilfe des mobilen Feldkomparators wird, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, ein EDM-Gerät in einer bestimmten Entfernung zu der mobilen Testeinrichtung aufgebaut (Abb. 9.1) und in den Visurstrahl des EDM-Geräts ausgerichtet.

Um bei Verwendung von Stativen den Einfluss einer möglichen Bewegung der Stative auf die Messungen möglichst zu verhindern, wurde darauf geachtet, dass die mobile Testeinrichtung immer auf einem betonierten Pfeiler sowie auf einem schweren Industriestativ montiert wurde. Die Verwendung des Industriestativs war außerdem nötig, da nicht immer horizontale Visuren realisiert werden konnten und somit der mobile Feldkomparator geneigt werden kann, um in Richtung des EDM-Geräts ausgerichtet werden zu können (Details siehe Abschnitt 10.3.1).

Neben den EDM-Messungen und den Glasmaßstabsmessungen wurden an jeder Messposition auch Neigungsmessungen durchgeführt. Für eine erste atmosphärische Korrektur wurde jeweils eine meteorologische Messstation im Stand- und Zielpunkt aufgebaut. Zudem wurde mit einem Temperaturfühler die Temperatur der mobilen Testeinrichtung erfasst.

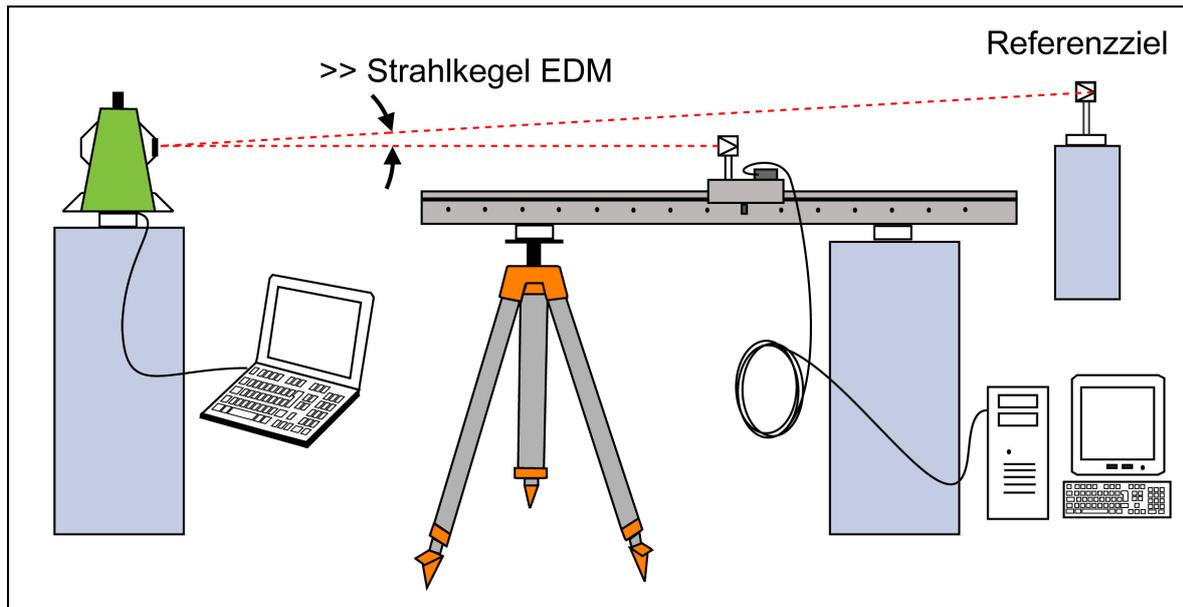


Abb. 9.1: Messkonfiguration bei Verwendung der mobilen Testeinrichtung zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers.

Das Verschieben des Messwagens zwischen den einzelnen Messpositionen erfolgte manuell. Da sämtliche Messungen nahezu zur gleichen Zeit von nur einem Beobachter durchgeführt werden, erfordert das einen hohen Automatisierungsgrad, da zwischen EDM-Gerät und mobilem Feldkomparator eine Distanz von mehreren hundert Metern sein kann.

### 9.1.1 EDM-Messung

Die Messung mit dem TCA 1800 wurde computergesteuert durchgeführt, um mögliche Bewegungen am Gerät durch einen Beobachter ausschließen und eine gleich bleibende und reproduzierbare Anzielung der jeweiligen Ziele gewährleisten zu können. Dafür wurde das Satzmessprogramm CALMS (Lesjak 2007) verwendet, das für die bevorstehenden Untersuchungen allerdings adaptiert wurde (siehe Anhang F).

Pro Pfannenposition erfolgte eine Satzmessung mit vier Wiederholungsmessungen pro Punkt (Abschnitt 9.2). Zusätzlich zum Ziel am mobilen Feldkomparator wurde die Entfernung zu einem Referenzziel in unmittelbarer Nähe des Feldkomparators, aber außerhalb des Strahlkegels des EDM-Geräts, gemessen. Dieses Referenzziel war

auf einem betonierten Pfeiler montiert und wurde als stabil angesehen. Die Messungen zu diesem Ziel wurden dazu verwendet um anhand geänderter Distanzmesswerte Änderungen der atmosphärischen Verhältnisse während des Beobachtungszeitraumes zu erfassen und geeignete Korrekturen an die Distanzmessung zum Ziel am mobilen Feldkomparator anzubringen. Abb. 9.2 zeigt den Aufbau für die Messungen mit dem mobilen Feldkomparator.



**Abb. 9.2:** Steuerung des TCA 1800 mit CALMS über einen Laptop (links); mobiler Feldkomparator auf Industriestativ und Messpfeiler mit Standcomputer (Mitte); Referenzziel auf betonierte Messpfeiler (rechts).

### 9.1.2 Glasmaßstabsmessung

Die Messungen mit dem Glasmaßstab der Firma Heidenhain erfolgten ebenfalls computerunterstützt mit einer eigenen Software, wobei dafür eine Heidenhain PCI-Auslesekarte im Standcomputer notwendig war. Eine Messung mit dem Heidenhain Glasmaßstab wird interaktiv per Mausklick ausgelöst. Wie in Abschnitt 7.3 erwähnt, wurden auf diese Weise pro Pfannenposition jeweils 4 Einzelmessungen mit dem Glasmaßstab vorgenommen.

### 9.1.3 Neigungsmessung

Für die Aufzeichnung der Neigungen wurde wie in Abschnitt 7.5 beschrieben ein Wyler Neigungssensor der Firma Zerotronic am Messschlitten der mobilen Testeinrichtung montiert. Die Neigungen während des gesamten Beobachtungszeitraums wurden mit einer Dauermessung, d.h. die Neigungen werden vollautomatisch gemessen und gespeichert, erfasst. Die Neigungen des Messschlittens bei den einzelnen Pfannenpositionen wurden anschließend bei der Auswertung der Daten aus den Dauermessungen herausgefiltert.

### 9.1.4 Messung der Meteorologie

Die Meteorologie wurde mit Hilfe eines THOMMEN HM30, der einen internen Datenspeicher aufweist, im Instrumentenstandpunkt erfasst. Zusätzlich wurden mit einem Vaisala HM 34 die Temperatur sowie die relative Feuchte im Zielpunkt (beim mobilen Feldkomparator) gemessen.

Eine weitere Vaisala mit dem Temperaturfühler im Inneren des Trägerbalkens (9.3, rechts) erfasste die Temperatur, die für die spätere Korrektur der thermischen Ausdehnung des Glasmaßstabs verwendet wurde. Andere Temperaturfühler und sowie ein geeigneter A/D Wandler standen für diesen Zweck nicht zur Verfügung. Anmerkungen dazu siehe Abschnitt 12.2.



9.3: Thommen HM 30 (links); Vaisala HM 34 (Mitte); mobile Testeinrichtung mit HM 34 (rechts).

## 9.2 Ablauf der Messungen mit dem mobilen Feldkomparator

Der Beobachter befindet sich am Computer neben der mobilen Testeinrichtung (Abb. 9.1). Der Messablauf selbst wird durch das für diese Untersuchungen adaptierte Satzmessprogramm CALMS vorgegeben. Es wurden 21 Sätze (je 1 Satz pro Pfannenposition am Feldkomparator) gemessen, wobei bei jedem Ziel 4 Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden. Die Anzahl an Wiederholungsmessungen ergab sich einerseits aus der Tatsache, dass aus vorangegangenen Testmessungen keine direkte Aussage über die nötige Anzahl an Wiederholungsmessungen getroffen werden konnte (siehe Anhang G), und andererseits aus einer praktischen Argumentation heraus:

Eine Erhöhung der Anzahl an Wiederholungsmessungen hätte den zeitlichen Abstand zwischen Referenzmessung und Messung zum Ziel am mobilen Feldkomparator erheblich vergrößert, was sich negativ auf die Repräsentativität der atmosphärischen Korrekturen, die aus den Referenzmessungen abgeleitet wurden, ausgewirkt hätte. Außerdem entsprechen 8 Messungen pro Ziel 4 vollständigen Sätzen, was in der Praxis eine durchaus übliche Anzahl an Satzmessungen darstellt.

Ein Satz bestand aus den in Tabelle 9.1 angeführten und im Folgenden näher beschriebenen Zielen:

**Tabelle 9.1: Ablauf der Satzmessung**

Zielpunkt	Kreislage	Anzahl der Wiederholungssessungen des EDM-Geräts
Referenzziel	KL I	4
Manuelles Ziel	KL I	1
Feldkomparator	KL I	4
Feldkomparator	KL II	4
Manuelles Ziel	KL II	1
Referenzziel	KL II	4

### 9.2.1 Referenzziel

Um die Veränderung der Atmosphäre zu überprüfen und um die Messungen zum Ziel am mobilen Feldkomparator entsprechend korrigieren zu können (Abschnitt 9.1.), wurden Messungen zu einem Referenzpunkt in der unmittelbaren Umgebung (Abstand von der Visur von einigen Metern) der mobilen Testeinrichtung durchgeführt. Als Referenzpunkt diente jeweils ein Pfeiler (siehe Abb. 9.4), der sich nahe neben dem Pfeiler befindet, auf dem die mobile Testeinrichtung aufgebaut worden war (Abb. 9.4). Als Ziel wurde ein Leica Standardprisma GPR121 verwendet (Tabelle 8.1). Das Referenzziel konnte als stabil angenommen werden, wodurch sämtliche Änderungen der gemessenen Entfernungen zu diesem Ziel als Änderungen der atmosphärischen Einflüsse interpretiert werden konnten.



Abb. 9.4: Referenzziel Leica Standardprisma und FC 2009 am Dach des Geodäsiegebäudes.

### 9.2.2 Ziel am mobilen Feldkomparator

Auf dem Messwagen des mobilen Feldkomparators wurde das zu untersuchende Prisma montiert (Abb. 9.5). Danach wurden die einzelnen Pfannenpositionen nach erfolgter Messung (KL I und KL II) in einer bestimmten Messreihenfolge abgefahren. Um lineare Veränderungen in der Atmosphäre und der Ausdehnung des Trägerbalkens kompensieren zu können, wurde eine Messreihenfolge gewählt, bei der jeder zweite Punkt von 1-21 im Hinweg (1, 3, 5, ..., 21) und jeder zweite Punkt

von 20-2 im Rückweg (20, 18, 16, ..., 2) gemessen wurde. Die Klemmung des Messwagens erfolgte dabei wie in Abschnitt 7.4 erwähnt mit Hilfe eines Imbusschlüssels.



Abb. 9.5: Ziel am FC 2009, im Bild Miniprisma „Rot“ der Firma Geodäsie Austria.

### 9.2.3 Manuelles Ziel

Das Messergebnis des manuellen Ziels hatte für die Bestimmung des zyklischen Fehlers keinerlei Bedeutung. Die Einführung dieses Ziels war jedoch erforderlich, da nach der Messung des Ziels des mobilen Feldkomparators der Messwagen manuell auf die nächste Pfannenposition verfahren werden musste. Um die dafür notwendige Zeit zu erhalten wurde dieses „manuelle Ziel“ in die Satzmessung aufgenommen.

Bei einem manuellen Ziel wird der User vom Satzmessprogramm CALMS aufgefordert das Ziel manuell anzuzielen. Das Messprogramm wird dabei solange angehalten, bis der User die Anzielung bestätigt. Somit hätte auch bei etwaigen, unvorhersehbaren Problemen das Messprogramm angehalten und nach Behebung des Problems fortgesetzt werden können.

#### 9.2.4 Fernsteuerung des TCA 1800

Damit all die oben genannten Messungen von einem Beobachter durchgeführt werden konnten, wurde der Laptop, der die Messungen des TCA 1800 steuerte, über den Stand-PC, der die Messungen der mobilen Testeinrichtung ermöglichte, ferngesteuert. Dazu war eine Internetverbindung für den Laptop beim TCA 1800 sowie für den Standcomputer bei der mobilen Testeinrichtung nötig. Dem Laptop wurde mittels mobilen Internets der Internetzugang ermöglicht, der Standcomputer konnte mit einem 50 m langen Internetkabel an das Netz angeschlossen werden. Dadurch konnte der Laptop mit Hilfe der für nicht-kommerzielle Zwecke freien Software TeamViewer (2010) von dem Standcomputer aus ferngesteuert werden. Nähere Informationen über die Funktionsweise und die Bedienung dieser kostenlosen Software sind im Internet unter <http://www.TeamViewer.com> zu finden. Dort kann die Software auch kostenlos heruntergeladen werden.

#### 9.2.5 Dauer der Messung

Neben dem hohen instrumentellen Aufwand ist die zeitliche Komponente bei der Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers mit dem mobilen Feldkomparator zu beachten. Der Aufbau des gesamten Instrumentariums dauert in etwa 90 min (bei geübtem Operator). Wie bereits in Abschnitt 9.1.1 erwähnt wurde, wird versucht die Messdauer möglichst kurz zu halten, dennoch benötigt die oben beschriebene Messabfolge für die Untersuchung eines Prismas ca. 90 min (je nach Prismentyp und Entfernung). Der Abbau des FC 2009 und des benötigten Zusatzinstrumentariums beansprucht in etwa 40 min. Daraus resultiert eine Nettozeit von über dreieinhalb Stunden für die Untersuchung eines Prismas bei einer Distanz.

## **10 Überprüfung der Funktionalität sowie der Feldtauglichkeit des mobilen Feldkomparators**

Nach der Untersuchung des mobilen Feldkomparators im Messlabor (Kapitel 7), wurde ein Systemtest durchgeführt, indem der zyklische Fehler des TCA 1800 zunächst im Labor, dann im Feld bei einer Entfernung bestimmt wurde, bei der er auch mit dem Horizontalkomparator bestimmt wurde.

Zunächst wurde unter konstanten meteorologischen Verhältnissen die prinzipielle Funktionalität der mobilen Testeinrichtung im Messlabor getestet (Abschnitt 10.1). Danach erfolgte ein Feldversuch um den Einfluss der Meteorologie auf die Messungen sowie die Gültigkeit aller anzubringenden Korrekturen zu überprüfen (Kapitel 10).

Für den experimentellen Nachweis der Funktionalität wurde im geodätischen Messlabor ein Distanzbereich (ca. 16 - 19 m) gewählt, der sowohl von der Horizontalkomparatorbank im Messlabor abgedeckt war (Pfeiler 9 zu Pfeiler 11, Abb. 8.1), als auch mit den Pfeilern am Dach des Geodäsiegebäudes Steyrergasse 30 realisiert werden konnte (Pfeiler 5 - Pfeiler 3, Abb. 10.4). Somit bestand die Möglichkeit die Messungen des Feldkomparators im Labor mit denen im Feld sowie mit Messungen am Horizontalkomparator im Messlabor (Kapitel 8) zu vergleichen.

### **10.1 Vergleichsmessung zwischen Horizontalkomparator und mobilen Feldkomparator unter Laborbedingungen**

Für den in Kapitel 10 beschriebenen Vergleich der Messungen zur Überprüfung der Feldtauglichkeit der mobilen Testeinrichtung wurde zunächst eine Vergleichsmessung im geodätischen Messlabor durchgeführt. Der mobile Feldkomparator wurde auf Pfeiler 11 und auf einem Industriestativ (in Richtung Laserinterferometer) aufgebaut und horizontalisiert (Abb. 10.1, links). Als Ziel wurde am mobilen Feldkomparator das Miniprisma (rot) der Firma Geodäsie Austria (siehe Tabelle 8.1) auf dem Messwagen der mobilen Testeinrichtung montiert. Als Referenz diente ein Standardprisma der Firma Leica, das auf Pfeiler 6 montiert worden war.

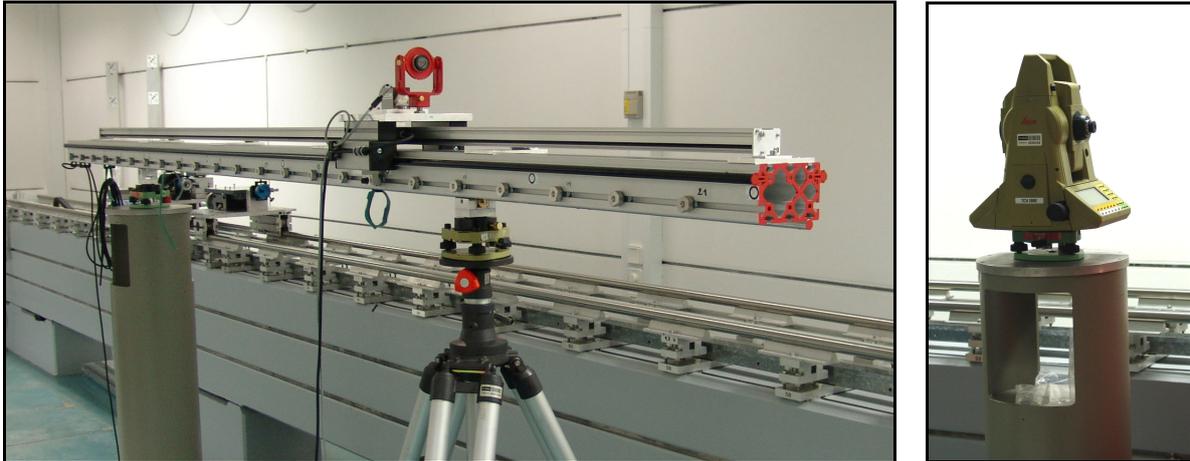


Abb. 10.1: Vergleichsmessung mit dem FC 2009 bei Verwendung des TCA 1800 im Labor; (links) Mobiler Feldkomparator mit Miniprisma „Rot“ auf Pfeiler 11 und Industriestativ (rechts) TCA 1800 auf Messpfeiler 9 im Messlabor des IGMS.

Der TCA 1800 wurde auf Pfeiler 9 aufgebaut (Abb. 10.1, rechts) und die Testeinrichtung in dessen Visurlinie ausgerichtet. Somit ergab sich für die Vergleichsmessung ein Distanzbereich von ca. 16,20 m - 19,20 m.

### 10.1.1 Auswertung der Vergleichsmessungen im Labor

Die Auswertung der Messungen zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers erfolgte in MATLAB 7.6.0 (siehe Anhang E). Bevor mit der Auswertung der Messdaten begonnen werden konnte, wurden zunächst sämtliche Messdaten in das Programm importiert.

#### **Glasmaßstabsmessung**

Die Messungen wurden zunächst temperaturkorrigiert (8 ppm/K, siehe Tabelle A-1 Anhang A). Nach Mittelung der Wiederholungsmessungen wurden die Glasmaßstabsmessungen auf die Anfangsposition reduziert und nach Pfannenpositionen (1-21) geordnet

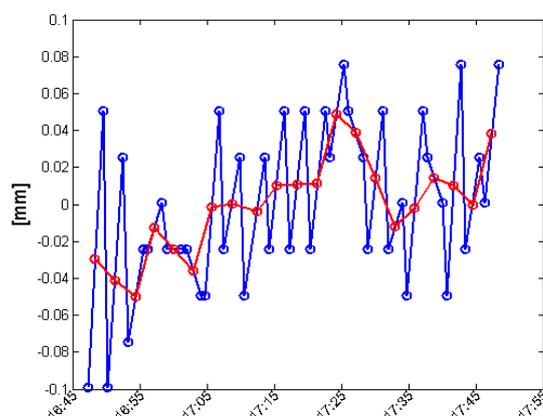
#### **Neigungsmessung**

Der Neigungssensor erfasste kontinuierlich die Neigungen, weshalb die jeweiligen Neigungen des Messschlittens bei den einzelnen Pfannenpositionen herausgefiltert

werden mussten. Danach wurden die Neigungen mit dem festmontierten Sensor, die nur in einer Lage bestimmt worden waren, um den Nullpunktsfehler korrigiert und nach Pfannenpositionen geordnet (1- 21).

### EDM-Messung

Die EDM-Messungen wurden mit den in Abschnitt 8.2 beschriebenen Formeln um die zu Beginn der Messung vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen (Mittelwert der Stand- und Zielpunktmessung) korrigiert. Aus den gemittelten Kreislagen der Messungen zum Referenzziel wurde dann nach Abzug des Mittelwertes durch Interpolation zu den Messzeitpunkten der Messungen zum mobilen Feldkomparator eine zweite meteorologische Korrektur berechnet, die ebenfalls an die Messungen zum Ziel am mobilen Feldkomparator angebracht wurden. Diese Korrektur fiel im Labor aufgrund der nahezu konstanten klimatischen Bedingungen vergleichsweise klein aus, Abb. 10.2.



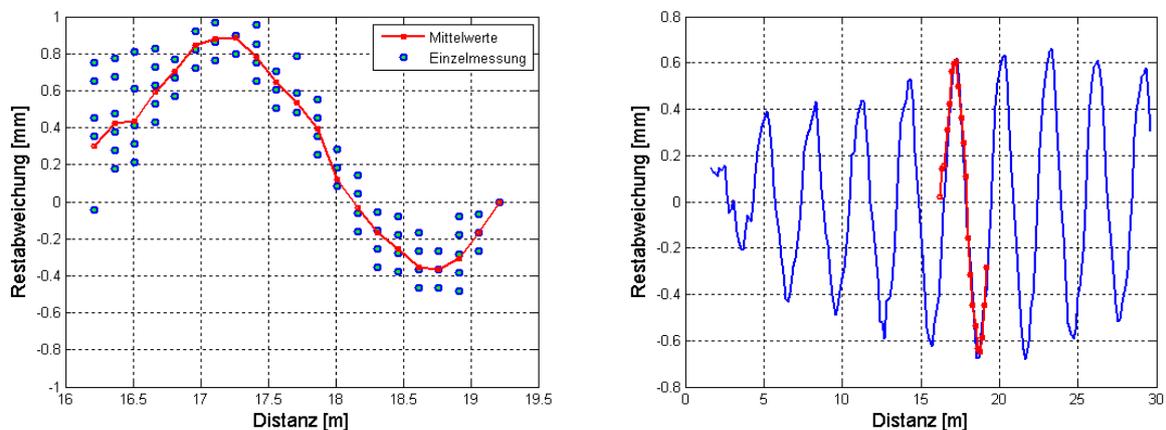
**Abb. 10.2:** Atmosphärische Korrektur aus den Änderungen der Referenzmessung aufgrund Änderungen der Atmosphäre. Kreislagenmittel der Referenzmessung in blau dargestellt; interpolierte Korrekturen der Messungen zum Ziel am mobilen Feldkomparator zum Zeitpunkt der Feldkomparatormessungen in rot.

Anschließend wurden die meteorologisch korrigierten Entfernungen bezüglich der Schrägstellung des Prismas aufgrund des Durchhangs des Trägerbalkens korrigiert (Korrekturen bis zu 0,12 mm) (Abschnitt 7.5). Folgend wurden aus diesen korrigierten Schrägdistanzen mit Hilfe der aus zwei gemessenen Kreislagen gemittelten Zenitdistanzen Horizontalstrecken (Schrägstellung des mobilen Feldkomparators) gerechnet, die anschließend gemittelt wurden (8 Messungen pro

Position). Diese wurden wie die Glasmaßstabsmessungen auf den Anfangspunkt (1. Pfanne am mobilen Feldkomparator) reduziert und nach Pfannenpositionen geordnet (1-21).

### 10.1.2 Bestimmung der Restabweichungen

Aus den korrigierten und gemittelten Messungen konnten aus der Differenz Glasmaßstabsmessung – EDM-Messung die Restabweichungen bestimmt werden, die einen möglichen zyklischen Fehler aufzeigen (Abb. 10.3, links). Auffällig ist die vergleichsweise große Streuung der Messungen zwischen 16,2 m und etwa 16,6 m (Pfannenpositionen 18-21). Den Grund für diese etwas größere Streuung konnte nicht eruiert werden, müsste jedoch bei wiederholtem Auftreten näher untersucht werden, da diese sowohl im Hin- und Rückweg aufgetreten sind.



**Abb. 10.3: Test des mobilen Feldkomparators: (links) Differenz Glasmaßstab – EDM; (rechts) Vergleich der Restabweichungen (rot) mit dem Ergebnis am Horizontalkomparator (blau).**

Die Restabweichungen aus den Messungen mit dem mobilen Feldkomparator wurden mit jenen aus den Messungen am Horizontalkomparator (Interferometer - EDM) verglichen (Abb. 10.3, rechts). Der Vergleich der Abweichungen zeigt, dass die mit Hilfe der mobilen Testeinrichtung im Labor bestimmten Restabweichungen mit denen am Horizontalkomparator im Schnitt in etwa 0,1 mm voneinander abweichen (Abb. 10.7, rechts).

Damit waren die Funktionalität des mobilen Feldkomparators und die Richtigkeit der nachfolgenden Korrekturen unter denselben meteorologischen Bedingungen wie sie bei den Horizontalkomparatormessungen vorherrschten (Laborbedingungen) gezeigt.

## 10.2 Vergleichsmessung zwischen Horizontalkomparator und dem mobilen Feldkomparator unter Feldbedingungen

Die zuvor beschriebene Bestimmung des zyklischen Fehlers erfolgte im geodätischen Messlabor unter kontrollierten äußeren Bedingungen. Durch einen weiteren Test unter Feldbedingungen und einen Vergleich mit den Ergebnissen am Horizontalkomparator soll nun die Feldtauglichkeit der mobilen Testeinrichtung nachgewiesen werden.

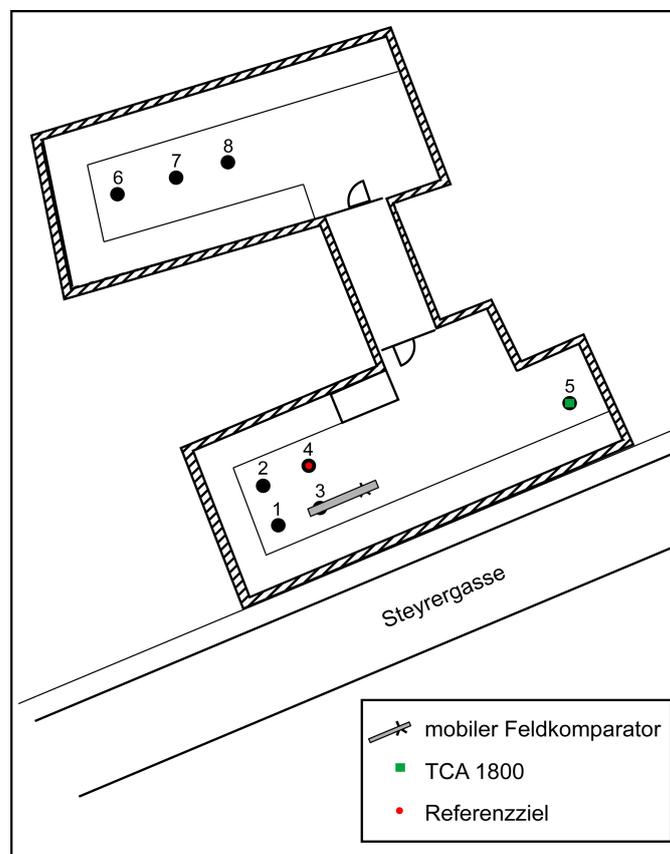
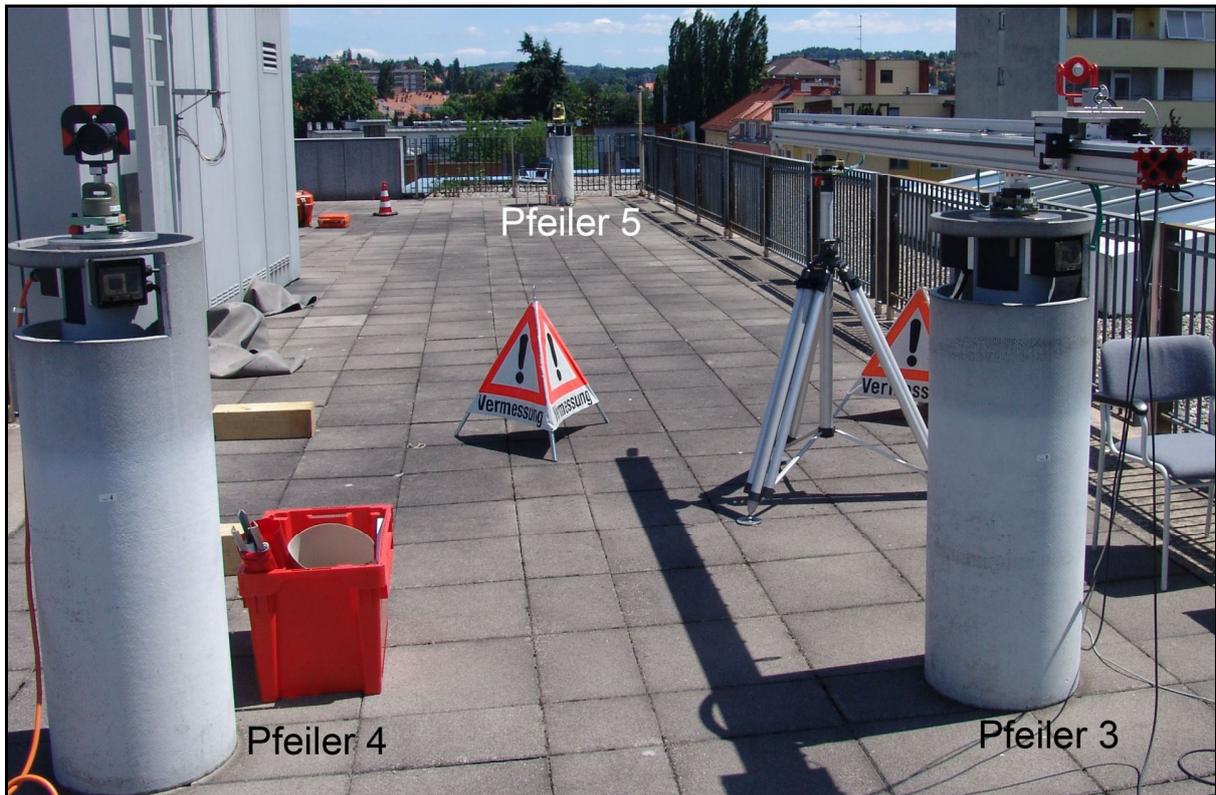


Abb. 10.4: Skizze der Lage der Messpeiler am Dach des Geodäsiegebäudes

Dafür wurde am Dach des Geodäsiegebäudes Steyrergasse 30 auf Pfeiler 3 und auf einem Industriestativ die mobile Testeinrichtung aufgebaut. Der TCA 1800 wurde auf Pfeiler 5 und ein Leica Standardprisma als Referenzziel auf Pfeiler 4 aufgebaut. Abb. 10.4 zeigt einen Überblick über die Lage der einzelnen Pfeiler und in Abb. 10.5 ist der Messaufbau zu sehen.



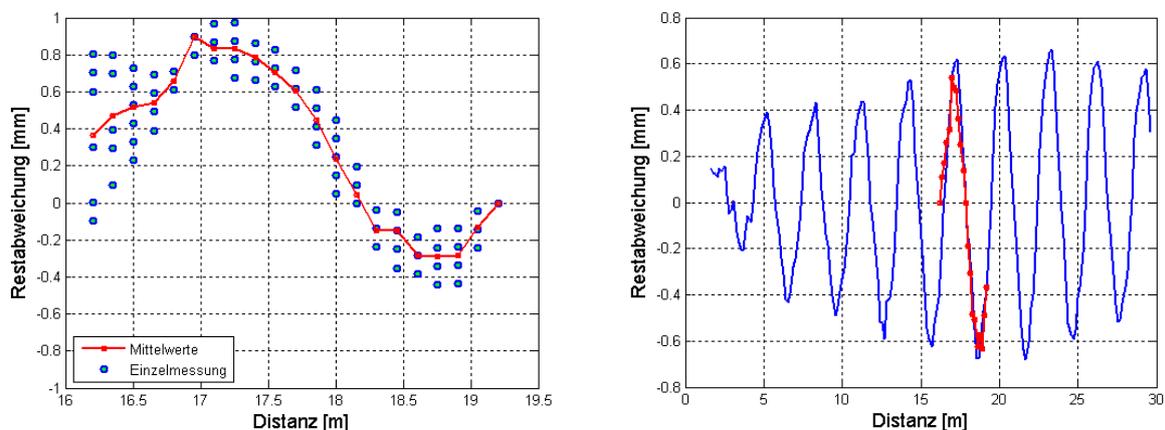
**Abb. 10.5: Test des mobilen Feldkomparators unter realen Bedingungen**

Mit dieser Messkonfiguration wurden mit dem in Abschnitt 8.1 aufgelisteten Instrumentarium und dem in Abschnitt 9.2 beschriebenen Messablauf die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers vorgenommen.

### 10.2.1 Auswertung der Vergleichsmessungen im Feld

Die Auswertung der Vergleichsmessung am Dach erfolgte analog zu jener im Labor (Abschnitt 10.1.1). Die aus dem Test resultierenden Restabweichungen wurden den

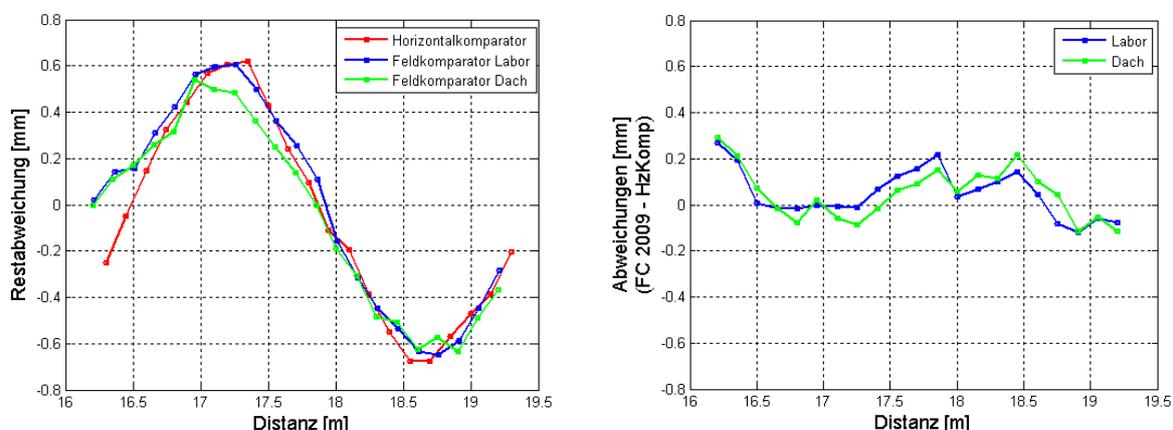
im Labor bestimmten Restabweichungen sowie den am Horizontalkomparator erzielten Ergebnissen gegenübergestellt, siehe Abb. 10.6 und Abb. 10.7.



**Abb. 10.6:** Test des mobilen Feldkomparators im Feld: (links) Differenz Glasmaßstab – EDM; (rechts) Vergleich der Restabweichungen (rot) mit dem Ergebnis am Horizontalkomparator (blau).

Die Restabweichungen in Abb. 10.6, links, zeigen bei Betrachtung der Einzelmessungen ebenso wie jene bei dem Test des mobilen Feldkomparators im Labor bei den ersten 3 Pfannen eine größere Streuung in den Entfernungsmessungen als bei den übrigen Pfannen. Der Vergleich mit den Ergebnissen am Horizontalkomparator (Abb. 10.6, rechts) zeigt auch hier eine recht gute Übereinstimmung.

Dies wurde auch beim Vergleich der Ergebnisse mit dem Feldkomparator im Labor und im Feld mit den Ergebnissen am Horizontalkomparator (Abb. 10.7, links) ersichtlich.



**Abb. 10.7:** Test des mobilen Feldkomparators im Labor und im Feld: (links) Vergleich der am Horizontalkomparator bestimmten Restabweichungen mit den Restabweichungen des FC 2009, im Labor und im Feld bestimmt. (rechts) Differenz der Restabweichungen vom FC 2009 zu denen am Horizontalkomparator.

Die Abweichungen der am Horizontalkomparator bestimmten Restabweichungen zu den mit dem mobilen Feldkomparator bestimmten Restabweichungen liegen im Schnitt um 0,1 mm auseinander (Abb. 10.7, rechts). Auffällig sind jedoch die etwas größeren Abweichungen der durch den mobilen Feldkomparator bestimmten Restabweichungen zu den am Horizontalkomparator bestimmten Abweichungen bei den ersten Pfannenpositionen, siehe Abb. 10.7, links. Dies war schon zuvor auffallend, da die Werte in diesem Bereich eine größere Streuung aufweisen (Abb. 10.5, links). Die genaue Ursache dafür müsste aber durch weitere Messungen näher untersucht werden, könnte aber mit Quantisierungseffekten des EDM in Zusammenhang stehen.

Werden an den gezeigten Daten jedoch die Parameter einer Sinusschwingung modelliert, so weichen die geschätzten Amplituden um maximal 0,05 mm voneinander ab, was unter der Auflösung des EDM-Geräts liegt. Damit ist die Funktionalität des FC 2009 für praktische Untersuchungen gezeigt.

### **10.3 Vergleichsmessung zwischen Horizontalkomparator und schiefstehenden mobilen Feldkomparator**

Um einen möglichen Einfluss der Schrägstellung des mobilen Feldkomparators auf die Messergebnisse feststellen zu können, wurde im Messlabor die Messsituation nachgestellt, die später (siehe Kapitel 11) am Dach bei den Messungen bei einer langen Distanz (ca. 95 m) vorherrschte. Aufgrund unterschiedlicher Höhen im Stand- und Zielpunkt war hierfür ein schräger Aufbau des mobilen Feldkomparators notwendig, sodass im Zenitwinkel ca.  $104^{\circ}$  (Absenkung auf Dach) vorherrschten. Bei horizontaler Aufstellung des FC 2009 hätte sich das Prisma beim Verfahren des Wagens aus dem Suchkegel des ATR bewegt und die automatisierte Messung mit dem EDM-Gerät wäre nicht mehr möglich gewesen. Mit Hilfe des Industriestativs wurde der FC 2009 schräggestellt um die Messungen des EDM-Geräts auf die Ziele am mobilen Feldkomparator zu ermöglichen.

Für den Test des schräggestellten mobilen Feldkomparators im Labor wurde die gleiche Schrägstellung des Balkens wie bei den Untersuchungen am Dach realisiert und so der zyklische Phasenfehler bei einem Distanzbereich von 6-9 m bestimmt um

das resultierende Ergebnis mit dem der Untersuchungen auf der Horizontalkomparatorbank vergleichen zu können.



**Abb. 10.8:** Erhöhung des Instrumentenstandpunkts mit Hilfe eines Höhenadapters auf Pfeiler 3 (links); Aufbau der mobilen Testeinrichtung mit einer Schrägstellung um ca. 3° (rechts).

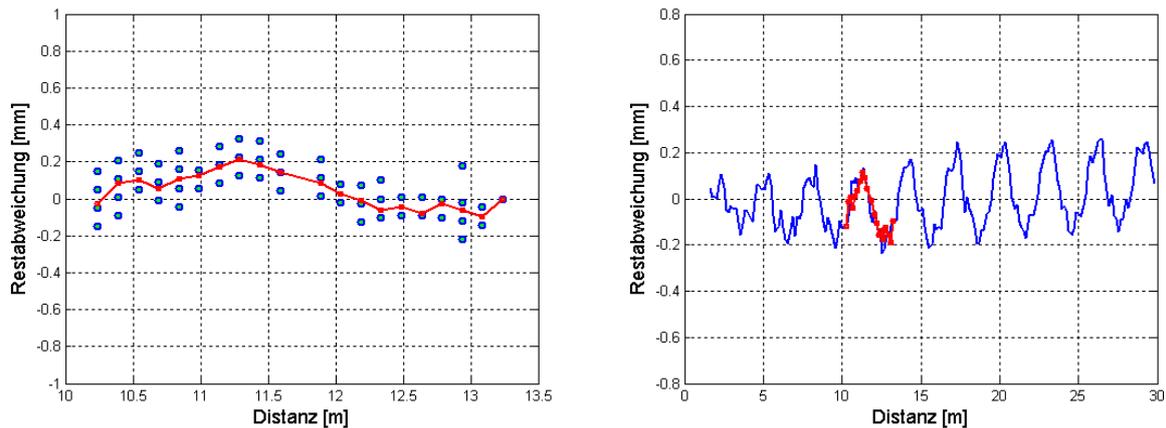
Um annähernd die gleiche Neigung des Balkens zu erreichen musste die mobile Testeinrichtung auf einer Konsole, die seitlich am Betontisch (siehe Abb. 8.1) montiert wurde, und einem Industriestativ aufgebaut werden (Abb. 10.8, rechts). Die Standpunkthöhe wurde mit Hilfe eines Höhenadapters vergrößert um einen Höhenunterschied zwischen Stand- und Zielpunkt zu erzeugen, der die Situation am Dach wiedergibt (Abb. 10.8, links). Aufgrund der Schrägstellung des mobilen Feldkomparators und um den TCA 1800 nicht noch höher aufbauen zu müssen wurde dieser Test bei einer kürzeren Distanz (ca. 10 m-13 m) durchgeführt. Als Ziel wurde sowohl für das Referenzziel als auch für das Ziel am FC 2009 ein Leica Standardprisma (siehe Tabelle 8.1) verwendet.

### 10.3.1 Ergebnis der Untersuchung mit Schrägstellung des Balkens

Die Auswertung erfolgte wiederum wie zuvor beschrieben, siehe Abschnitt 10.1.1.

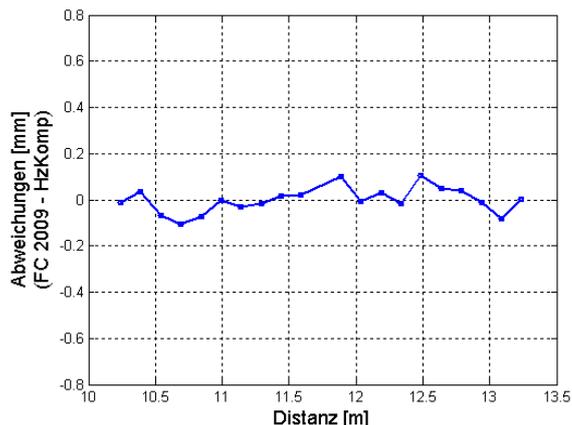
Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt, dass die Schrägstellung des Balkens keinen Einfluss auf die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers hat (Abb. 10.9). Die erkennbaren Abweichungen zwischen den Restabweichungen des

schräggestellten mobilen Feldkomparators und denen des Horizontalkomparators liegen im Bereich der Messauflösung und können weiters auf Überlagerungen verschiedener Instrumentenfehler im Nahbereich zurückgeführt werden. Außerdem ist zu beachten, dass bei kürzeren Distanzen auch kleinere Amplituden beim zyklischen Fehler auftreten.



**Abb. 10.9:** Test des schräggestellten mobilen Feldkomparators im Labor: (links) Differenz Glasmaßstab – EDM; (rechts) Vergleich der Restabweichungen des FC 2009 (rot) mit dem Ergebnis am Horizontalkomparator (blau).

Sicher wäre dieselbe Entfernung wie zuvor für diese Untersuchung von Vorteil gewesen, ließ sich jedoch mit der vorgegebenen Schrägstellung des mobilen Feldkomparators im Labor nicht realisieren. Die Untersuchung zeigt aber auch so, dass eine Schrägstellung des mobilen Feldkomparators keinen Einfluss auf die Messresultate hat (Abb. 10.9, rechts). Lediglich die gemessenen Neigungen mussten vor der Berechnung der Korrektur der Schiefstellung des Prismas (Abschnitt 7.5) um die Schrägstellung reduziert werden. Dies geschah mit Hilfe der Labormessungen, die gezeigt hatten, dass bei Pfanne Nr. 8 die Neigung Null betrug (Abb. 7.16). Mit diesen reduzierten Neigungswerten wurde dann die Schiefstellung des Prismas aufgrund des Durchhangs des Balkens korrigiert.



**Abb. 10.10: Differenz der Restabweichungen des schräggestellten mobilen Feldkomparators mit den Ergebnissen am Horizontalkomparator.**

Die Differenz der Restabweichungen des schräggestellten mobilen Feldkomparators mit den Ergebnissen am Horizontalkomparator in Abb. 10.10 zeigt, dass maximale Abweichungen von 0,1 mm auftreten, was belegt, dass die angebrachten Korrekturen auch bei Schrägstellung des mobilen Feldkomparators gültig bleiben. Somit kann die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers auch bei schräggestelltem mobilem Feldkomparator erfolgen.

## 11 Exemplarische Bestimmung des zyklischen Fehlers im Feld bei einer Entfernung von ca. 95 m

Die Systemtests der mobilen Testeinrichtung, Kapitel 10, zeigten die Funktionalität des mobilen Feldkomparators. Exemplarisch für eine spätere Untersuchung des zyklischen Fehlers entlang des gesamten Messbereichs eines EDM-Geräts wurde auch noch eine größere Entfernung im Feld gewählt und der Test durchgeführt. Dieser Test sollte zum einen die Machbarkeit der Messungen mit der mobilen Testeinrichtung mit nur einer Person zeigen, sowie einen ersten Eindruck über den zyklischen Fehler bei größeren Entfernungen liefern.

### 11.1 Messkonfiguration für die Untersuchungen am Dach

Am Dach des Geodäsiegebäudes Steyrgasse 30 ließen sich in Verbindung mit einer Konsole am Dach des Chemiegebäudes Stremayergasse 16 eine Distanz von etwa 95 m realisieren, siehe Abb. 11.1.

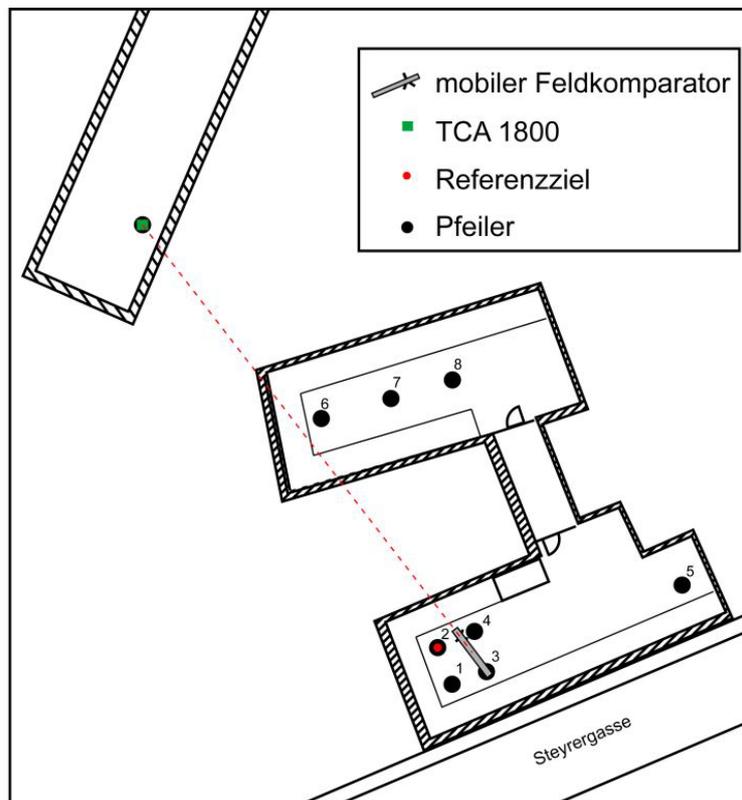


Abb. 11.1: Messkonfiguration bei der Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers im Feld.

Der mobile Feldkomparator wurde am Dach des Geodäsiegebäudes Steyrergasse 30 auf Pfeiler P3 (Abb. 11.2) und dem Industriestativ aufgebaut. Der Standcomputer mit eingebauter Steckkarte für die Glasmaßstabsmessungen befand sich unmittelbar neben dem mobilen Feldkomparator und wurde zur Messung der Neigungen, der Längenmessung mit dem Glasmaßstab sowie zur Fernsteuerung des Laptops (Steuerung des TCA 1800) verwendet.



Abb. 11.2: Aufbau des mobilen Feldkomparators auf Pfeiler 3 und einem Industriestativ am Dach des Geodäsiegebäudes Steyrergasse 30.

Der TCA 1800 wurde am Dach des Chemiegebäudes Stremayergasse 16 auf einer Konsole aufgebaut und über einen Laptop gesteuert (Abb. 11.3).

Die Messungen erfolgten wie in Abschnitt 9.2 beschrieben. Einziger Unterschied bestand darin, dass die mobile Testeinrichtung aufgrund des Höhenunterschiedes von Ziel- und Standpunkt mit Hilfe des Industriestativs schräg gestellt werden musste (Abb. 11.3), da aufgrund des Höhenunterschiedes von Ziel- und Standpunkt bei horizontaler Aufstellung des mobilen Feldkomparators beim Verfahren des Messschlittens - und somit des Prismas - das ATR die neue Position des Ziels nicht mehr finden konnte, da es sich aus dem Suchkegel des ATR bewegt hatte.



Abb. 11.3: Aufstellung des TCA 1800 mit Hilfe einer Konsole am Dach des Chemiegebäudes Stremayergasse 16 (links), Lage der Konsole am Dach des Chemiegebäudes (rechts).

Die Auswirkung der Schrägstellung des mobilen Feldkomparators auf die anzubringenden Korrekturen bzw. auf die Messergebnisse wurde vorab in einem eigenen Test im Labor untersucht, siehe Abschnitt 10.3.

Bei der Feldmessung bei der 95 m Distanz wurden folgende Ziele untersucht, wobei in Analogie zu den Horizontalkomparatormessungen auch welche verdreht wurden:

**Tabelle 11.1: Bei einer Entfernung von 95 m untersuchte Reflektoren und Prismen.**

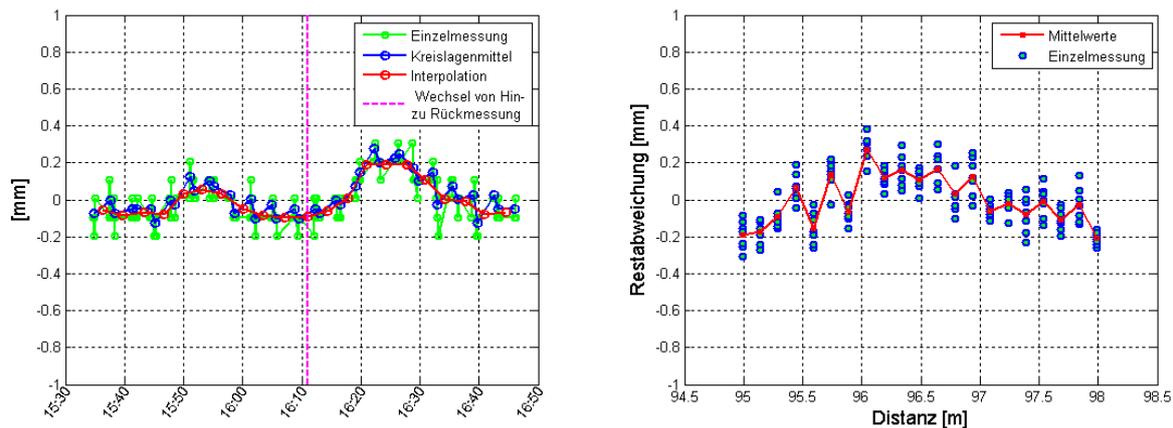
Ziel	Ausrichtung	Messbedingungen		
		Sonne	Wind	Temp. [°C]
Standardprisma Leica	orthogonal	vereinzelte Wolken	leicht	34
Miniprisma gelb Goecke	orthogonal	wolkenlos	mäßig	26
Miniprisma gelb Goecke	+15° gedreht*	wolkenlos	nein	29
Reflexfolie gelb Goecke	orthogonal	vereinzelte Wolken,	mäßig	28
Reflexfolie gelb Goecke	+15° gedreht*	vereinzelte Wolken	leicht	33

\* von oben betrachtet gegen den Uhrzeigersinn

Die Messungen erfolgten in der in Abschnitt 9.2 beschriebenen alternierenden Reihenfolge in Hin- und Rückmessung. Die Dauer einer Messreihe betrug ca. 90 min, siehe Abschnitt 9.2.5.

## 11.2 Auswertung der Feldmessungen

Die Auswertung der im Feld erfassten Daten erfolgte wie zuvor, siehe Abschnitt 10.1.1. Als Ergebnis wurden die Restabweichungen (Glasmaßstab – EDM-Messung) der einzelnen Reflektoren dargestellt.

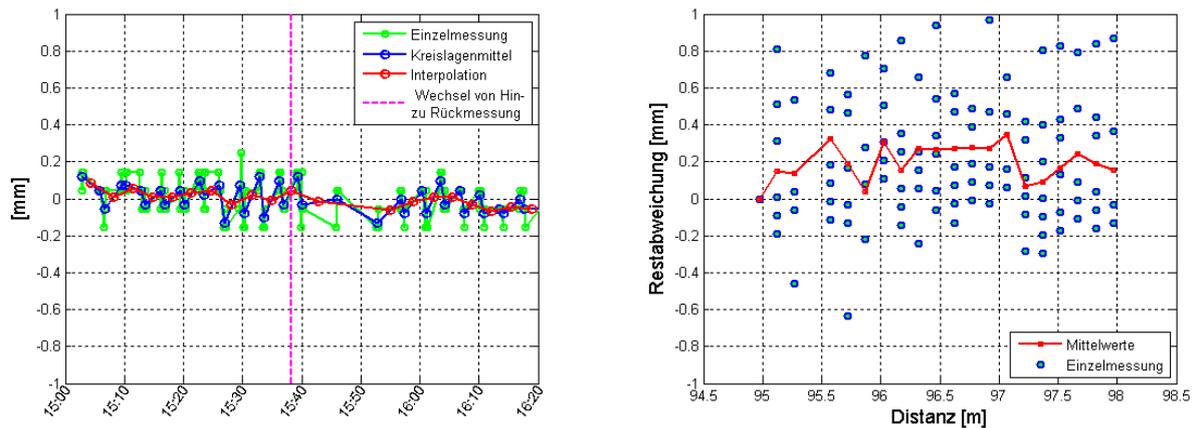


**Abb. 11.4: Feldtest bei einer Entfernung von 95 m mit einem Leica Standardprisma: (links) Referenzmessung für atmosphärische Korrektur; (rechts) Differenz Glasmaßstab – EDM.**

Die in Abb. 11.4, links, dargestellten Korrekturen aus den Referenzmessungen fallen im Feld im Vergleich zu den Korrekturen im Labor (siehe Abb. 9.4) wie erwartet weit größer aus und lassen auf Veränderungen des Brechungsindex um ca. 3 ppm schließen.

Die berechneten Restabweichungen des Leica Standardprismas (Abb. 11.4, rechts) zeigen keinen eindeutigen zyklischen Fehler. Daher muss der Verdacht eines möglichen periodischen Anteils in den Restabweichungen erst näher untersucht werden (Abschnitt 11.4). Zunächst aber werden die Restabweichungen der anderen Reflektoren gezeigt.

Die Restabweichungen der Untersuchungen mit dem gelben Miniprisma der Firma Goecke (Abb. 10.5, rechts) zeigen im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem Leica Standardprisma (Abb. 11.4, rechts) eine deutlich größere Streuung der Restabweichungen aus den Einzelmessungen. Die daraus gemittelten Restabweichungen lassen visuell keinen periodischen Anteil erkennen.

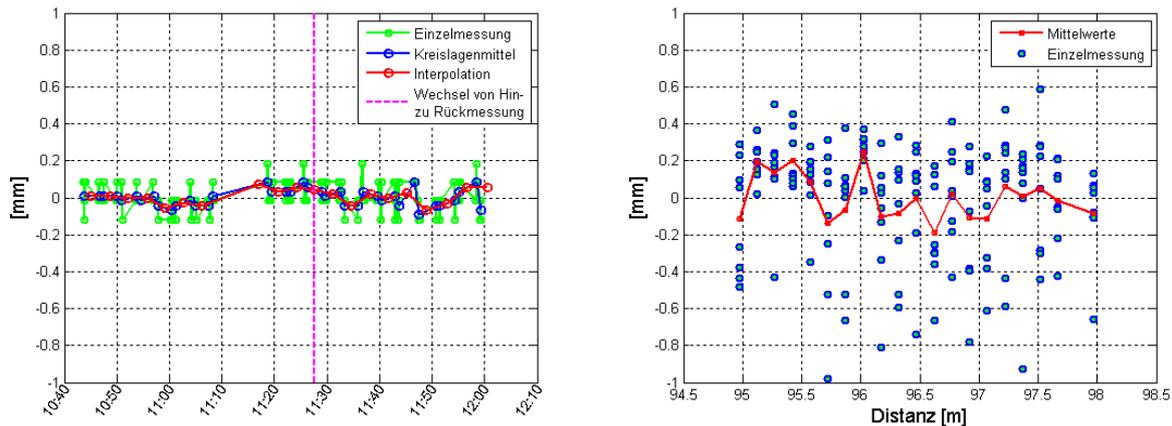


**Abb. 11.5: Feldtest bei einer Entfernung von 95 m mit einem Miniprisma der Firma Goecke: (links) Referenzmessung für atmosphärische Korrektur; (rechts) Differenz Glasmaßstab – EDM.**

Die Referenzmessungen in Abb. 11.5, links, zeigen eine geringere Schwankung ( $\pm 0,15$  mm im Schnitt) auf als jene bei der Untersuchung des Standardprismas (Abb. 11.4, links). Dies kann auf konstantere atmosphärische Bedingungen zurückgeführt werden (Tabelle 11.1).

Die Lücke zwischen 16:42 Uhr und 16:55 Uhr kommt aus einer kurzen Messunterbrechung, da die Batterien des TCA 1800 gewechselt werden mussten.

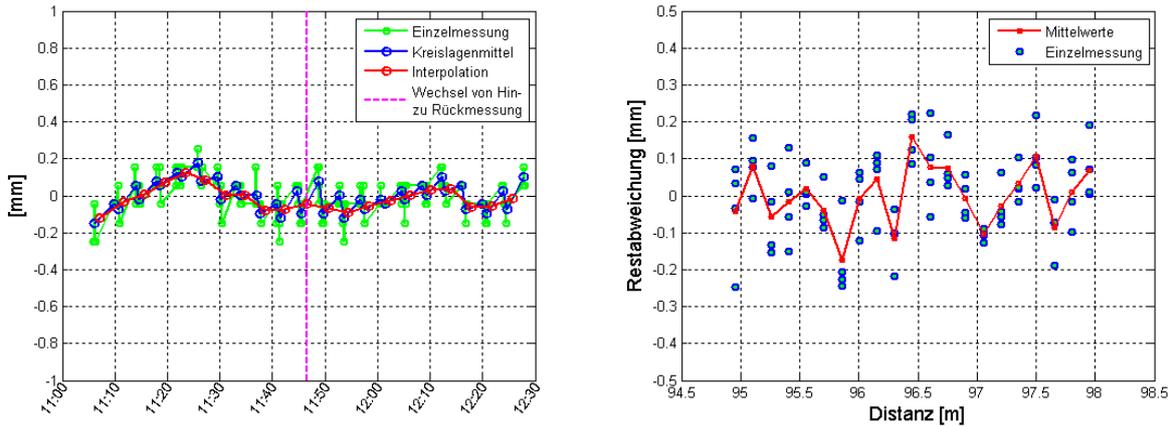
Ein ähnliches Bild liefert das Resultat der Untersuchungen bei gedrehtem Prisma (Abb. 11.6, rechts), wobei die Streuung kleiner zu sein scheint, dafür aber asymmetrisch verteilt. Ein Grund dafür könnten schnell wechselnde atmosphärische Veränderungen sein, die dann infolge der Messzeit des TCA 1800 durch die Korrektur aus den Referenzmessungen nicht erfasst wurden, da diese Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (ca. 2 min versetzt zur Messung zum Reflektor am FC 2009) stattfanden.



**Abb. 11.6:** Feldtest bei einer Entfernung von 95 m mit einem Miniprismas der Firma Goecke um 15° gedreht (von oben betrachtet): (links) Referenzmessung für atmosphärische Korrektur; (rechts) Differenz Glasmaßstab – EDM.

Die Messungen zum Referenzziel (Abb. 11.6, links) zeigen ein ähnliches Bild wie die in Abb. 11.5, links. Die Messlücke zwischen 11:08 Uhr und 11:18 Uhr ist auf eine fehlende Messung zu einer Pfannenposition zurückzuführen. Der Grund dafür liegt bei einem Problem des adaptierten Satzmessprogramms CALMS.

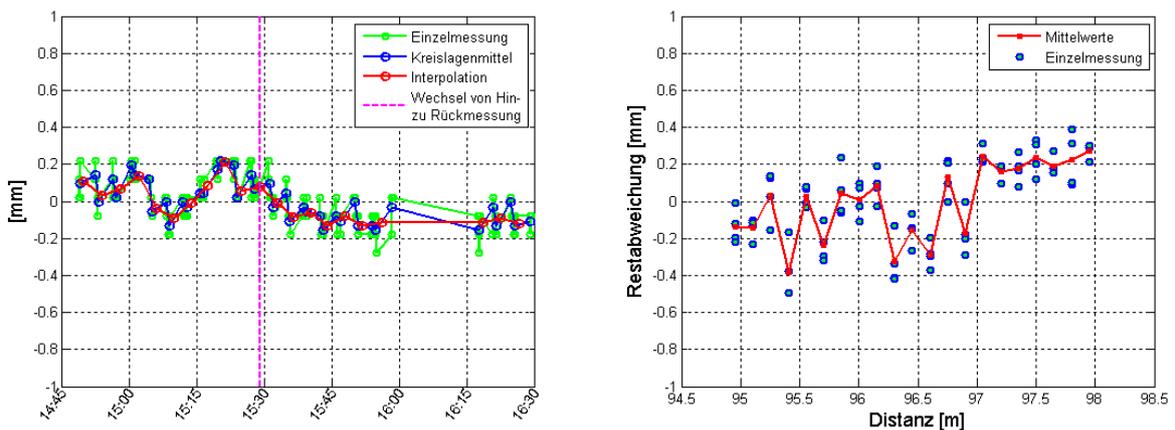
Die Restabweichungen der Reflexfolie (Abb. 11.7, rechts) verzeichnen erstaunlicherweise die geringste Spannweite. Anzumerken ist hier jedoch, dass die Messungen zu der Reflexfolie ohne Verwendung des ATR erfolgen mussten, da diese bei der 95 m Entfernung in Verwendung mit der Reflexfolie nicht funktionierte (daher auch Schrägstellung des mobilen Feldkomparators). Die Messung der Reflexfolie erfolgte im Satzmessprogramm CALMS als „manuelles Ziel“. Das bedeutet, dass die Reflexfolie in Pfannenposition 1 manuell angezielt wurde und die daraus erhaltenen Horizontal- und Vertikalwinkel als Position für die Reflexfolie gespeichert und alle weiteren Pfannenpositionen mit diesen Winkleinstellungen gemessen wurden. Aufgrund dieses Messverfahrens kann es aber zu signifikanten Unterschieden in den Messungen der beiden Kreislagen kommen, da der Ziellinienfehler im Satzmessprogramm beim Anfahren nicht berücksichtigt wird und so insbesondere bei verdrehtem Reflektor die Messungen zu unterschiedlichen Positionen erfolgen. Daher wurden nur die Messungen der Kreislage I für die Berechnung der Restabweichungen verwendet, da in dieser Kreislage die Ausrichtung des mobilen Feldkomparators erfolgt war, indem das erste Ziel und letzte Ziel (Pfannenposition #1 und #21) angezielt wurden. Deshalb sind in Abb. 11.7, rechts, nur jeweils vier Punkte pro Pfannenposition zu sehen, die die aus den Einzelmessungen berechneten Restabweichungen darstellen.



**Abb. 11.7:** Feldtest bei einer Entfernung von 95 m mit einer Reflexfolie der Firma Goecke: (links) Referenzmessung für atmosphärische Korrektur; (rechts) Differenz Glasmaßstab – EDM.

Die Referenzmessungen in Abb. 10.7 zeigen etwas größere Schwankungen als jene bei den Untersuchungen des gelben Miniprismas. Grund dafür waren durchziehende Wolken (siehe Tabelle 11.1), die die atmosphärischen Bedingungen veränderten.

Die Restabweichungen bei gedrehter Reflexfolie (Abb. 11.8, rechts) variieren etwas stärker als die bei orthogonaler Ausrichtung. Wie zuvor ist kein zyklischer Fehler mit der Wellenlänge des Feinmaßstabes ( $U = 3$  m) erkennbar.



**Abb. 11.8:** Feldtest bei einer Entfernung von 95 m mit einer um 15° gedrehten (von oben betrachtet) Reflexfolie der Firma Goecke: (links) Referenzmessung für atmosphärische Korrektur; (rechts) Differenz Glasmaßstab – EDM.

Die Referenzmessungen (Abb. 11.8, links) zeigen wie schon bei der Untersuchung der Reflexfolie bei orthogonaler Stellung Schwankungen, die wahrscheinlich auf vorbeiziehende Wolken zurückzuführen sind.

### **11.3 Erkenntnisse aus dem Praxistest**

Die exemplarische Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers bei einer Distanz von etwa 95 m ergab, dass der zyklische Phasenfehler nicht mehr unmittelbar erkennbar ist, da die Restabweichungen zumeist nicht die erwartete Systematik aufwiesen. Es zeigte sich, dass die atmosphärischen Bedingungen den stärksten limitierenden Faktor darstellen. So sind die Streuungen bei sonniger Witterung erheblich größer (0,2 mm Spannweite) im Vergleich zu 0,1 mm Spannweite, die bei einem ersten Test bei bedecktem Himmel und ca. 5°C erzielt wurden (Anhang D), was der Auflösung des TCA 1800 entspricht.

Das könnte der Grund sein warum visuell keine zyklischen Fehler in den Restabweichungen erkennbar sind, wobei dies erst durch weitere Untersuchungen verifiziert werden kann. Es wird jedoch empfohlen die Messungen zur Bestimmung des zyklischen Fehlers bei langen Distanzen bei idealen atmosphärischen Bedingungen (bewölktem Himmel und Windstille) durchzuführen. Es war zuvor geplant, die vorliegenden Untersuchungen bei solch idealen Bedingungen durchzuführen, doch leider war während dem Testzeitraum (Mitte Juni bis Anfang Juli) nur schönes Wetter und ein Abwarten auf bewölkten Himmel hätte die Durchführung der Masterarbeit erheblich verzögert.

### **11.4 Integration der Ergebnisse im Feld in ein Modell aus Labormessungen**

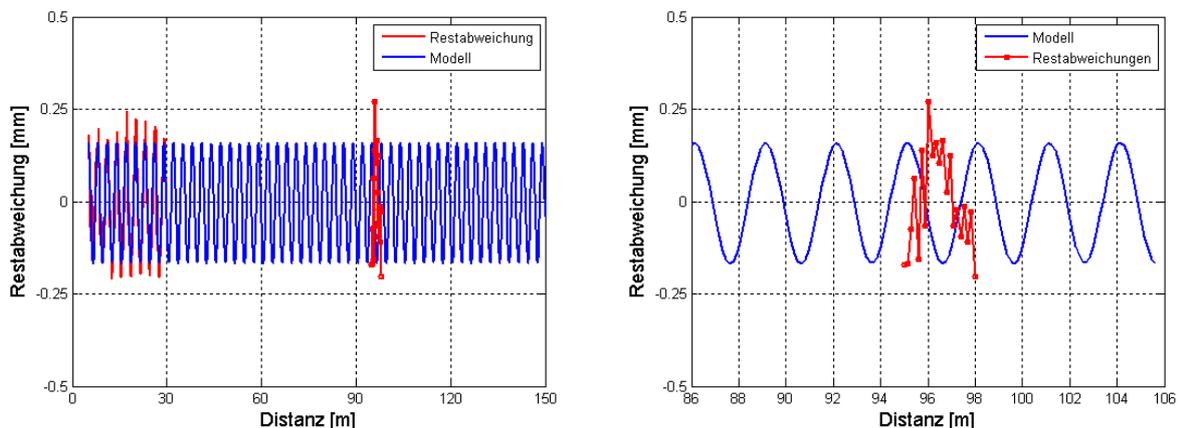
Zunächst wurde vermutet, dass die Resultate durch Schrägstellung des mobilen Feldkomparators beeinflusst sein könnten und daher kein zyklischer Fehler visuell sichtbar wäre. Daher wurde in Abschnitt 10.3.1 verifiziert, dass die Schrägstellung keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Daher werden die Ergebnisse der Messungen im Feld (Abschnitt 11.2) den Ergebnissen der Modelle (Abschnitt 8.5) gegenübergestellt. Dadurch wird mangels weiterer Informationen rein visuell überprüft, ob einer der gezeigten Modellansätze

gültig sein kann und die ermittelten Restabweichungen grundsätzlich einen verbleibenden periodischen Anteil aufweisen.

Da lediglich die Restabweichungen der Untersuchungen mit dem Leica Standardprisma einen verbleibenden periodischen Anteil vermuten lassen, wird nur dieser verwendet. Die Restabweichungen der anderen Prismen wurden ebenso durch verschiedene Modelle modelliert, machten aber keinen Einfluss sichtbar, weswegen diese hier nicht gezeigt werden.

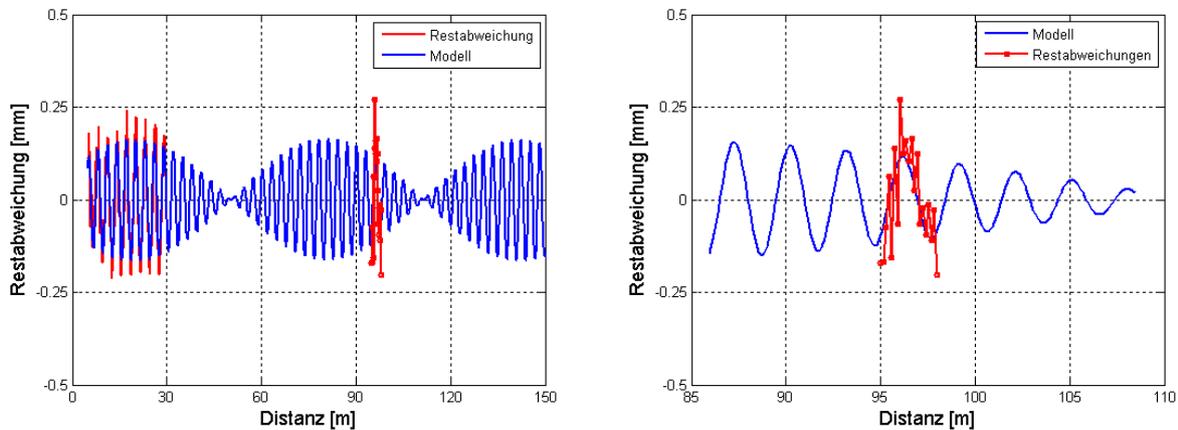
Unter der Annahme, dass das Modell B mit linear anwachsendem Anteil der Amplitude aufgrund der Ergebnisse der Extrapolation nicht stimmen kann, da dieses Modell bei 95 m eine Amplitude von ca. 0,4 mm aufweist, was in etwa dem Doppelten der mit dem mobilen Feldkomparator festgestellten Amplitude entspricht. Daher wurde zunächst die Integration in das Modell A (einfache Sinusschwingung) versucht, siehe Abb. 11.9.



**Abb. 11.9: Modell B aus Restabweichungen am Horizontalkomparator geschätzt, mit Restabweichungen aus Feldeinsatz des FC 2009 (links), Zoom der Restabweichungen des FC 2009 bei einer Distanz von ca. 95 m (rechts).**

Die Einbindung der Restabweichungen aus den Messungen des mobilen Feldkomparators in das Modell einer einfachen Sinusschwingung nach Formel 8.3 zeigt, dass prinzipiell ein periodischer Anteil in den eher kleinen Restabweichungen zu erkennen ist. Jedoch hat es den Anschein, dass die mit dem Feldkomparator bestimmten Restabweichungen im Vergleich zu Modell B um 180° phasenverschoben sind. Das bedeutet, dass von den in Abschnitt 8.5 entwickelten Modellen lediglich Modell C zu den Restabweichungen der Feldkomparatormessungen passen

kann, da es durch Multiplikation der beiden Sinuse dort zu Phasensprüngen kommt. (Abb. 11.10).



**Abb. 11.10: Modell C aus Restabweichungen am Horizontalkomparator geschätzt, mit Restabweichungen aus Feldeinsatz des FC 2009 (links), Zoom der Restabweichungen des FC 2009 bei einer Distanz von ca. 95 m (rechts).**

Tatsächlich passen die Restabweichungen der Messungen des mobilen Feldkomparators visuell zu Modell C. Wie schon in Abschnitt 8.5 beschrieben, sind die Parameter der langen Schwingung aber nicht aus den Messungen im Labor bestimmbar, da diese einen zu kleinen Distanzbereich abdecken um die Schätzung einer beispielsweise 110 m langen Sinuswelle zu ermöglichen. Aus diesem Grund passt das in Abb. 11.10 dargestellte Modell auch nur bedingt zu den Restabweichungen aus den mobilen Feldkomparatormessungen, da bei Modell C wegen fehlenden Messungen in anderen Distanzbereichen de facto willkürlich ein  $\lambda_{lang}$  von 110 m als Näherung angenommen wurde. Insbesondere bei jenen Distanzbereichen, bei denen das Modell eine maximale bzw. minimale Amplitude aufweist, müssten Messungen mit dem mobilen Feldkomparator durchgeführt werden. Eine gemeinsame Schätzung der Modellparameter aus den Horizontalkomparatormessungen und den Messungen mit dem Feldkomparator wurde in Matlab realisiert, konnte aber mit den vorliegenden Daten (nur eine Distanz außerhalb des Labors) keine Verbesserung bringen, da die festgestellten Amplituden, wenn vorhanden, klein sind und wird daher hier nicht näher behandelt.

Diese Masterarbeit konzentrierte sich jedoch auf die Systemchecks des mobilen Feldkomparators, weshalb Messungen bei zusätzlichen Distanzen nicht durchgeführt wurden.

Die vorliegende Arbeit liefert aber die nötigen Korrekturen und Funktionstests um diese Messungen durchführen zu können. Sie ebnet so die Bestimmung und Modellierung des zyklischen Fehlers bei beliebigen, im Messbereich des EDM-Geräts liegenden, Distanzen. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden es künftig ermöglichen ein genaues Modell über das Verhalten des zyklischen Phasenfehlers aufzustellen.

## 12 Resümee

### 12.1 Zusammenfassung

Die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers wird oft unter Laborbedingungen auf einer Horizontalkomparatorbank vorgenommen. Dabei wirkt die Länge des jeweiligen Messlabors limitierend auf den realisierbaren Distanzbereich. Untersuchungen am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz zeigten, dass aus den Messungen im Labor alleine nicht immer zuverlässige Aussagen über das Verhalten des zyklischen Fehlers über den im Labor realisierten Messbereich hinaus getätigt werden können. Zur Bestimmung und Modellierung des zyklischen Phasenfehlers bzw. zur Verifikation eines für den gesamten Messbereich geltenden Modells sind Messungen mit z.B. einem mobilen Feldkomparator notwendig. Am IGMS wurde mit dem FC 2009 ein Prototyp eines solchen mobilen Feldkomparators entwickelt.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Funktionalität und insbesondere die Feldtauglichkeit dieses 3 m langen mobilen Feldkomparators untersucht und experimentell verifiziert.

So wurde im Messlabor des IGMS bei Vergleichsmessungen zwischen dem mobilen Feldkomparator und dem Interferometer des Horizontalkomparators Differenzen bis zu 0,12 mm festgestellt (Abschnitt 7.3). Die Ursache war in der Geometrie und dem Durchhang des 3,5 m langen Trägerbalkens (ITEM Profil) des FC 2009 begründet, wodurch das gegenüber dem Referenzmesssystem exzentrisch gelagerte Prisma geringfügig verkippte. Für die Berechnung einer geeigneten Korrektur wurde ein Wyler Neigungssensor in das System integriert, der eine rechnerische Kompensation der Schiefstellung des Prismas ermöglichte (Abschnitt 7.5).

Bei der Durchführung von Vergleichsmessungen am Horizontalkomparator auf einer Länge von ca. 30 m zur Untersuchungen des zyklischen Fehlers für ein Leica TCA 1800 wurden zyklische Fehler mit distanzabhängigen Amplituden von bis zu 0,6 mm festgestellt. Die Amplitude variierte in Abhängigkeit der untersuchten Prismen (3 Stück) bzw. Reflexfolien (2 Stück) und deren Verdrehung gegenüber dem Messstrahl des EDM-Geräts (Kapitel 8). Zur Überprüfung der

Funktionalität des mobilen Feldkomparators wurden mit dem FC 2009 Messungen im Labor und im Feld bei Entfernungen von 12 m und 18 m durchgeführt und die Ergebnisse mit den am Horizontalkomparator erzielten verglichen. Trotz Abweichungen von 0,1 mm bis 0,2 mm (knapp größer als die Auflösung des EDM-Instruments von 0,1 mm) bei manchen Distanzen, stimmen die geschätzten Amplituden des zyklischen Fehlers im Distanzbereich des FC 2009 besser als 0,05 mm überein, was die Funktionalität des mobilen Feldkomparators belegt (Kapitel 10).

Bei längeren Distanzen ist der Einfluss der Atmosphäre auf die Messungen zu berücksichtigen. So wurden bei einer 100 m Distanz über ca. 2 Stunden Variationen von bis zu 0,3 mm festgestellt, die die Messungen zum FC 2009 verfälschen. Zur Korrektur der Messungen zum FC 2009 wurden Messungen zu einem stabilen Referenzziel durchgeführt und die festgestellten Distanzvariationen als Korrekturwerte angebracht (Abschnitt 9.2.1).

Im Feld wurde bei ca. 95 m eine exemplarische Bestimmung des zyklischen Fehlers bei langen Distanzen vorgenommen. Dabei musste der FC 2009 schräggestellt werden, um ihn gegenüber dem Messstrahl des ca. 4,5 m höher gelegenen, auf einem benachbarten Gebäude montierten, EDM-Instruments ausrichten zu können und damit Messungen auf die Reflexfolie, auf die eine automatische Zielerkennung nicht möglich war, überhaupt erst zu ermöglichen (Kapitel 11). Der Einfluss der Schrägstellung auf die Ergebnisse wurde in einem Test im Labor untersucht und auch dabei die volle Funktionsfähigkeit festgestellt (Abschnitt 10.3.1).

Zur Verifikation der bei 95 m festgestellten Restabweichungen wurden aus den am Horizontalkomparator bestimmten Restabweichungen verschiedene mögliche Modelle geschätzt und mit den Resultaten des FC 2009 verglichen (Abschnitt 11.4). Dabei wurde die Problematik bei der Erstellung eines geeigneten Modells basierend auf den auf die Horizontalkomparatordistanz limitierten Bereich (1,5 m - 30 m) diskutiert und die Notwendigkeit weiterer Messungen mit dem FC 2009 bei mehreren längeren Distanzen aufgezeigt. Ein möglichst realistisches Modell ist bei der Wahl dieser Distanzen hilfreich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der mobile Feldkomparator zur Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers bei mittleren und langen Distanzen

geeignet ist. Damit wurde mit dieser Arbeit der Grundstein für künftige Untersuchungen gelegt.

## 12.2 Empfehlungen für Folgeuntersuchungen

Aufgrund der im Rahmen dieser Masterarbeit gesammelten Erfahrungen können für die künftigen Untersuchungen mit dem mobilen Feldkomparator folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Die Messungen mit dem FC 2009 sollten idealerweise bei durchgehend bewölktem Himmel durchgeführt werden, um Änderungen der meteorologischen Verhältnisse möglichst klein zu halten. Kleine zyklische Fehler sind sonst unter den sich ändernden meteorologischen Bedingungen nicht auflösbar.
- Die für die Temperaturkorrektur der Glasmaßstabmessungen notwendige Temperaturerfassung sollten gegenüber der in dieser Arbeit realisierten einfachen Variante verbessert werden.
- Die Stirnseite des mobilen Feldkomparators sollte sicherheitshalber mit schwarzem Filz abgeklebt werden, um mögliche Signalreflexionen bei noch größeren Distanzen zu verhindern.
- Bei Verwendung von Reflexfolien (ATR funktioniert bei diesen nicht) sollte besser eine echte manuelle Anzielung auf den exakt ausgerichteten mobilen Feldkomparator durchgeführt werden (allerdings 2 Mann dafür notwendig), bzw. für jede Messposition ein separater Lernsatz verwendet werden.
- Am Dach des Geodäsiegebäudes ergeben sich Einschränkungen der möglichen Distanzen (vorhandene Pfeiler). Daher sollte die Untersuchung eines EDM-Geräts vorzugsweise im Feld (eventuell horizontale Lage) bei verschiedenen Distanzen erfolgen.
- Die Auswahl an Referenzzielen sollte noch einmal überdacht werden und eventuell um ein weiteres, dem zu untersuchenden Reflektor baugleichen

Typ, erweitert werden. Damit könnten die Änderungen der Atmosphäre während der Beobachtungsdauer eventuell exakter bestimmt werden und würden durch eine andere Messreihenfolge repräsentativere Korrekturen liefern, was vor allem bei größeren Distanzen hilfreich sein könnte.

- Allerdings würde die dadurch entstehende größere Anzahl an Distanzmessungen die Messzeit erhöhen, wodurch im Beobachtungszeitraum einer Distanz (zwischen Referenzmessung und der Messung zum FC 2009) eine stabile Atmosphäre vorausgesetzt wird. Dies ist noch näher zu untersuchen. Fest steht, dass bei der hohen Messpräzision moderner EDM-Geräte die Erfassung der Änderung der atmosphärischen Bedingungen die limitierende Größe ist. In Untersuchungen bei 95 m zeigten sich im Schnitt bei Sonnenschein Variationen von bis zu 0,2 mm.

Mit Hilfe der vorliegenden Masterarbeit ist die Verwendung der mobilen Testeinrichtung für die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers ohne weitere Voruntersuchungen möglich. Die flexible Einsetzbarkeit des FC 2009 öffnet so einer Vielzahl von Untersuchungen die Tore.

## Referenzen

- Covell, P. C. (1979): Periodic and non periodic errors of short range distance meters. Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying, 30, pp. 70 – 101.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Wichmann, Heidelberg.
- Fleckl, J. (2007): Präzisionsbestimmung des Prüffeldes „Dach Steyrergase 30“ zur Überprüfung von geodätischen Instrumenten. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz, unveröffentlicht.
- Gottwald, R., Müller, I., Obrist, M. (1998): Leica TDA 5000 – Distanzmessung und automatische Zielerfassung im Nahbereich. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 105, S. 50 – 57.
- Grurl F. (2010): Geometrische Überprüfung des Feldkomparators FC2009 zur Bestimmung von zyklischen Fehlern bei EDM-Geräten. Bakkalaureatsarbeit am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, (unveröffentlicht).
- Heidenhain (2002): Digital Linear and Angular Metrology, Position Feedback for Machine Manufacture and the Electronics Industry, Fourth, revised edition, Verlag moderne Industrie.
- Heidenhain (2003): Heidenhain Charts 2003 für Hochschulen. CD-Rom.
- Heidenhain (2010): [online] [www.heidenhain.at](http://www.heidenhain.at) [Zugriff im Juni 2009].

- 
- Hartung, J. (1995): Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 11. Auflage, Oldenbourg, München.
- Ingensand, H. (2006): Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. Proceeding 3<sup>rd</sup> IAG/12<sup>th</sup> FIG Symposium, Baden, Austria, 22-24 May 2006, CD-Rom.
- Khamen, H. (1977): Electronic Measuring Techniques in Geodesy. Basics and Applications. 1<sup>st</sup> edition, Wichman, Karlsruhe, 406p.
- Langer, D., Mettenleiter, M., Härtl, F., Fröhlich, C. (2000): Imaging reader for 3-D surveying and CAD modelling of real-world environments. Industrial Journal of Robotics Research 19 (11), 1075-1088.
- Lesjak, R. (2007): Entwicklung einer Datenerfassungssoftware für den Leica TCA 1800 als Vorbereitung für ein automatisches Deformationsmesssystem. Bakkalaureatsarbeit am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz, unveröffentlicht.
- Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage, Wichmann, Heidelberg.
- Matthews, V.(1997): Vermessungskunde. Teil 2. 17. Auflage, Teubner, Stuttgart.
- Niemeier, W (2008): Ausgleichsrechnung. 2. Auflage, deGruyter, Berlin.
- Oberzaucher, M. (2003): Kontinuierliche Neigungsmessungen entlang einer Bahntrasse. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz, (unveröffentlicht).

- Presl, R. (2009): Entwicklung eines 3 m- Feldkomparators zur Bestimmung zyklischer Fehler bei beliebigen Distanzen. Unpublizierter Technischer Bericht NR. IGMS-2009/21, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz.
- Robinson, A.J. (1974): Field Investigation into the new Hewlett-Packard Distance Meter. Paper 74.127, Fall Convention, St. Louis, American Congress of Surveying and Mapping, ACSM: 376-385.
- Rüeger, J. M. (1976): Remarks on the Joint Determination of Zero Error and Cyclic error of E.D.M. Instrument Calibration. Australian Surveyor, 28, No.2 S. 96-103.
- Rüeger, J. M., Covell, P. C. (1980): Zur Konstanz und Vielfältigkeit zyklischer Fehler in elektrooptischen Distanzmessern. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 78, S. 261-267.
- Rüeger, J. M. (1996): Electronic Distance Measurement: An Introduction. Fourth edition, Springer-Verlag, Berlin.
- Rüeger, J. M., Covell, P. C. (1982): Multiplicity of cyclic errors in electro- optical distance meters. Surveyor's Review, 26, pp. 209–224.
- Sachs, L. (1993): Statistische Methoden: Planung und Auswertung. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Schwarz, W. (1981): Kalibrierung elektrooptischer Distanzmesser. Vermessungsrundschau, 43/2, S. 77 ff.

Schwarz, W. (2007): Vermessung im Sub-Millimeter-Bereich. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 114, S. 341-344.

Schwendener, H. R.(1971): Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken: Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren. Schweizer Zeitschrift für Vermessungswesen, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 69, S. 59 – 67.

TeamViewer (2010): [online] <http://www.TeamViewer.com> [ Zugriff im Juni 2010].

Witte, B., Schmidt, H. (2000): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 4. Auflage, Wichmann, Heidelberg.

Woschitz, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Shaker Verlag, Aachen.

## Anhang A Längenmessgerät Heidenhain LS 688C

Sämtliche Informationen und Abbildungen über die Funktionsweise des Glasmaßstabs der Firma Heidenhain, die in diesem Anhang gegeben werden, sind aus Heidenhain 2010 bzw. Informationsmaterialien von Heidenhain (Heidenhain 2002 und 2003) entnommen.

### Aufbau

Wesentliche Bestandteile der Messgeräte von Heidenhain sind Maßverkörperungen aus regelmäßigen Strukturen, so genannte Teilungen. Sie werden durch unterschiedliche fotolithographische Verfahren hergestellt. Im Falle des LS 688 C handelt es sich um das DIADUR-Verfahren. Die dabei entstehenden Maßstäbe werden als DIADUR-Maßstäbe bezeichnet (Abb. A-1). Bei diesem Verfahren werden die Präzisionsteilungen durch eine extrem dünne Chromschicht auf einen Träger – meist aus Glas oder Glaskeramik – realisiert. Die Genauigkeit der Teilungsstrukturen liegt dabei im Mikrometerbereich und darunter. Diese Präzisionsteilungen bestimmen die Genauigkeit und die Funktion des Längenmessgerätes.

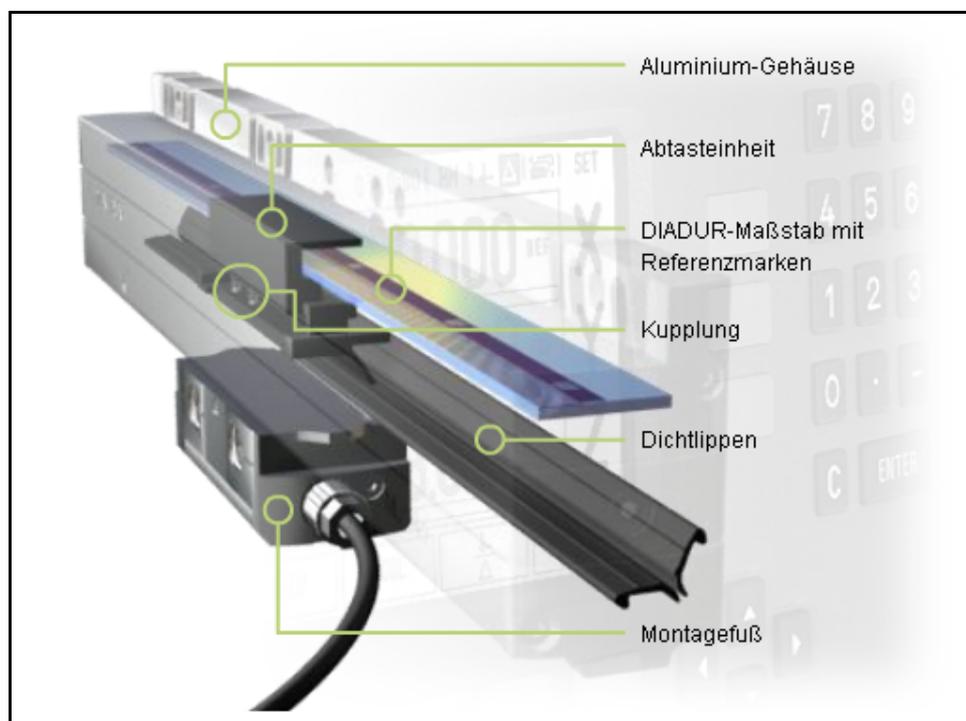


Abb. A-1: Aufbau eines gekapselten Längenmessgerätes der Firma Heidenhain (2010).

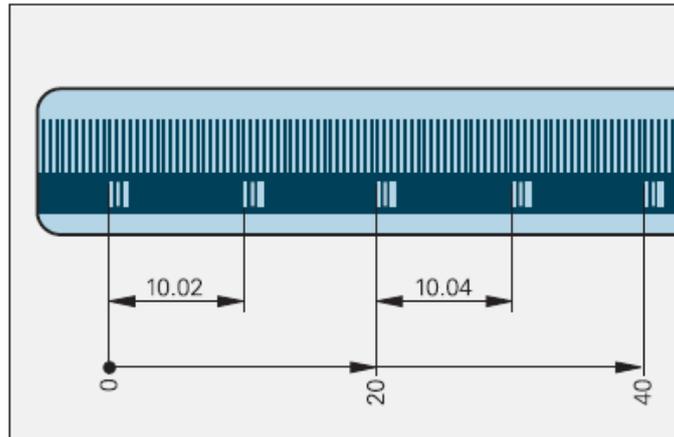
Der Maßstab und die Abtasteinheit werden durch ein Aluminiumgehäuse vor Schmutz und Spritzwasser geschützt. Abb. A-1 zeigt das gekapselte Längenmessgerät. Nach unten hin schließen elastische Dichtlippen das Gehäuse ab. Die Abtasteinheit wird reibungsarm am Maßstab geführt, um möglichst verschleißfrei zu arbeiten und so eine lange Lebensdauer des Längenmessgerätes garantieren zu können (Heidenhain, 2010).

Eine Kupplung verbindet die Abtasteinheit mit dem Montagefuß und gleicht so Führungsabweichungen aus. Ein schwertförmig ausgebildeter Arm greift durch die Dichtlippen und stellt die Verbindung zwischen Abtasteinheit und Montagefuß dar. Vom Montagefuß werden die elektronischen Leitungen in einem geschirmten Kabel zur Folgeelektronik geführt. Der Anschluss von gereinigter Sperrluft soll das Eindringen von Kühlmittel und die Kondensation am Maßstab verhindern.

### **Messprinzip des LS 688C**

Der oben beschriebene DIADUR-Glasmaßstab ist mit einer Teilungsperiode von 20 µm versehen. Die Teilungen sind dabei so angeordnet, dass sich eine regelmäßige Gitterstruktur ergibt (Abb. A-2). Durch Zählen der einzelnen Messschritte (Inkrementen) von einem beliebig gesetzten Nullpunkt aus wird die Positionsinformation gewonnen. Dieses Messverfahren wird als inkrementales Messverfahren bezeichnet.

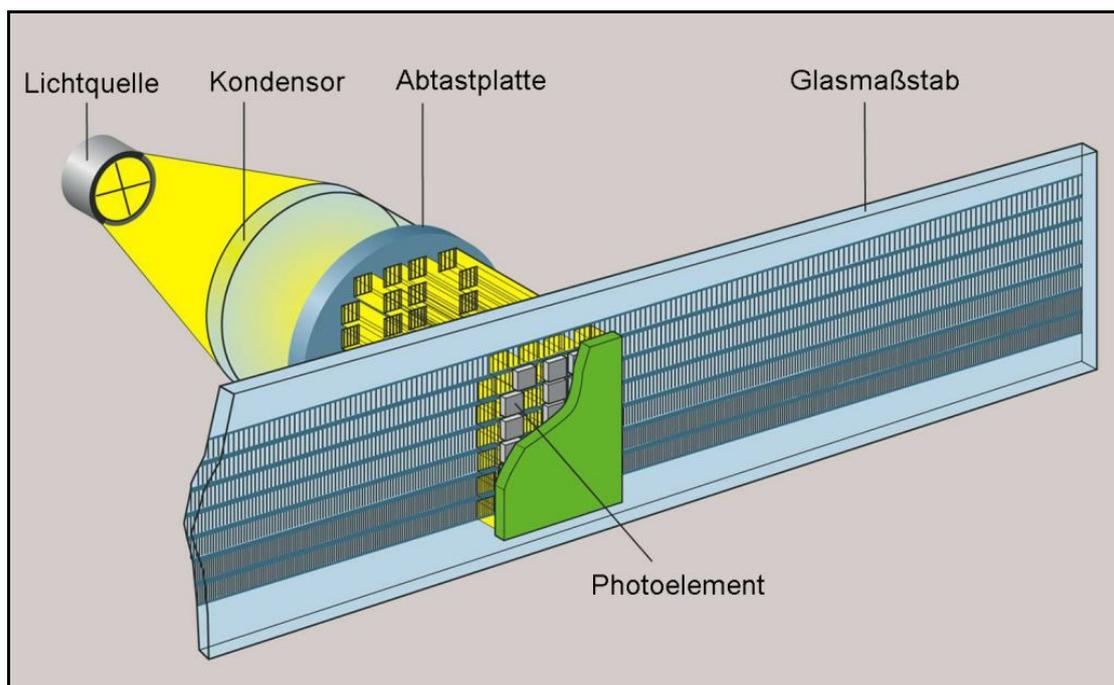
Zur Bestimmung der Position ist ein absoluter Bezugspunkt nötig. Daher verfügt der Maßstab über eine weitere Spur, die eine Referenzmarke trägt. Sie legt den absoluten Bezugspunkt fest und ist genau einer Signalperiode (einem Messschritt) zugeordnet. Die Referenzmarke muss überfahren werden bevor ein absoluter Bezug hergestellt oder der zuletzt gewählte Bezugspunkt wiedergefunden werden kann. Abstandscodierte Referenzmarken erleichtern diesen Vorgang. Die Spur der Referenzmarken weist definiert unterschiedliche Abstände zwischen den einzelnen Referenzmarken auf (Abb. A-2).



**Abb. A-2: Schematische Darstellung einer inkrementalen Teilung mit abstandscodierten Referenzmarken (Heidenhain, 2003).**

Beim Überfahren von zwei benachbarten Referenzmarken ermittelt die Folgeelektronik den absoluten Bezugspunkt. Da die Abstände der einzelnen Referenzmarken sehr gering sind, erfolgt dies bereits nach einer Verfahrstrecke von nur 20 mm. Bei abstandscodierten Referenzmarken wird der absolute Bezug durch Zählen der Inkremente zwischen zwei Referenzmarken ermittelt.

Die reibungsfreie Abtastung am Maßstab wird durch eine photoelektrische Abtastung ermöglicht, die völlig berührungslos arbeitet. Feinste Teilstriche von wenigen Mikrometern Breite werden detektiert und ein Ausgangssignal mit sehr kleinen Signalperioden erzeugt. Das Längenmessgerät LS 688 C verwendet dazu das in Abb. A-3 dargestellte abbildende Messprinzip.



**Abb. A-3: Schematische Darstellung des „abbildenden Prinzips“ (HAIDENHAIN, 2003).**



Bewegungsrichtung des Maßstabs nicht aus einem einzigen sinusförmigen Signal ermitteln. Daher werden die Felder des strukturierten Sensors so verschaltet, dass zwei um 90° phasenverschobene Ausgangssignale, die symmetrisch zur Nulllinie sind, erzeugt werden. Dies geschieht, indem jeweils zwei der vier erzeugten sinusförmigen Signale, die jeweils um 180° verschoben sind, antiparallel geschaltet werden (Abb.A-4).

Mit den beiden so generierten Signalen (rote Signale in Abb. A-4) kann die Folgeelektronik die sinusförmigen Signalperioden vorzeichenrichtig zählen. Durch Interpolation können noch feinere Messschritte erzeugt werden.

### **Messgenauigkeit**

Die Genauigkeit der Längenmessgeräte von Heidenhain wird im Wesentlichen bestimmt durch:

- die Güte der Strichgitter-Teilung
- die Güte der Abtastung
- die Güte der Signalverarbeitungs-Elektronik
- die Führungsabweichungen der Abtasteinheit zum Maßstab

Es wird zwischen den Positionsabweichungen über vergleichsweise große Fahrwege (z.B. gesamte Messlänge) und den Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode unterschieden. Letztere wird durch die Qualität der Teilung und deren Abtastung sowie durch die Signalperiode des Messgeräts bestimmt. Je kleiner die Signalperiode ist umso geringer die Positionsabweichung. Für das verwendete Längenmessgerät LS 688 C mit einer Signalperiode von 20 µm ergibt sich somit eine maximale Positionsabweichung innerhalb einer Signalperiode von ca. 0,2 µm.

Die Positionsabweichung über den Messweg wird in Klassen angegeben. Sie bezieht sich auf den Maßstab und die Abtasteinheit und beschreibt so die Systemgenauigkeit. Die Genauigkeitsklassen werden durch einen Extremwert bei einem Messweg von max. 1 m von der Firma Heidenhain bei der Endprüfung ermittelt und im Messprotokoll angegeben. Für den LS 688 C ergibt sich die Genauigkeitsklasse mit  $\pm 10 \mu\text{m}$ , wobei dieser Wert bei einer Bezugstemperatur von

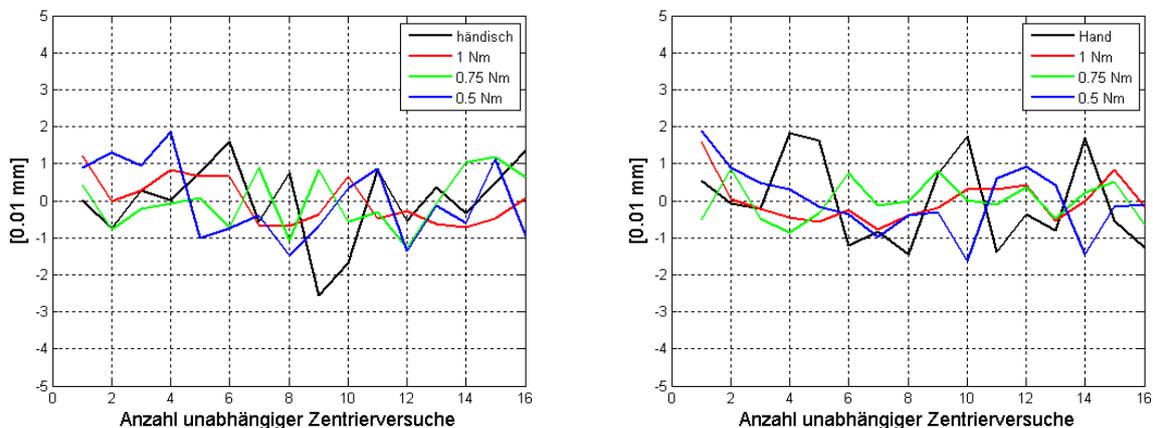
20°C gültig ist. Weitere Angaben zu den technischen Daten sind in Tabelle A-1 angeführt.

**Tabelle A-1: Technische Daten des gekapselten Längenmesssystems LS 688 C (aus Heidenhain 2003).**

Maßverkörperung	Glasmaßstab mit DIADUR-Gitterteilung
Genauigkeitsklasse	$\pm 10 \mu\text{m}$
Messlänge	170mm – 3040mm
Inkrementalsignale	1 Vss
Teilungsperiode	20 $\mu\text{m}$
Referenzmarke	abstandcodiert
Empfohlener Messschritt	bis 1 $\mu\text{m}$
Spannungsversorgung	5 V $\pm 5\%$ / < 100 mA (ohne Last)
Elektrischer Anschluss	Separates Adapterkabel am Montagefuß steckbar
Kabellänge	< 30 m (mit Heidenhain-Kabel)
Verfahrgeschwindigkeit	< 60 m/min
Erforderliche Vorschubkraft	< 5 N
Ausdehnungskoeffizient der Maßverkörperung	$\alpha\text{-therm ca. } (8\pm 1) 10^{-6} \text{K}^{-1}$

## Anhang B Reproduzierbarkeit der Pfannenpositionen

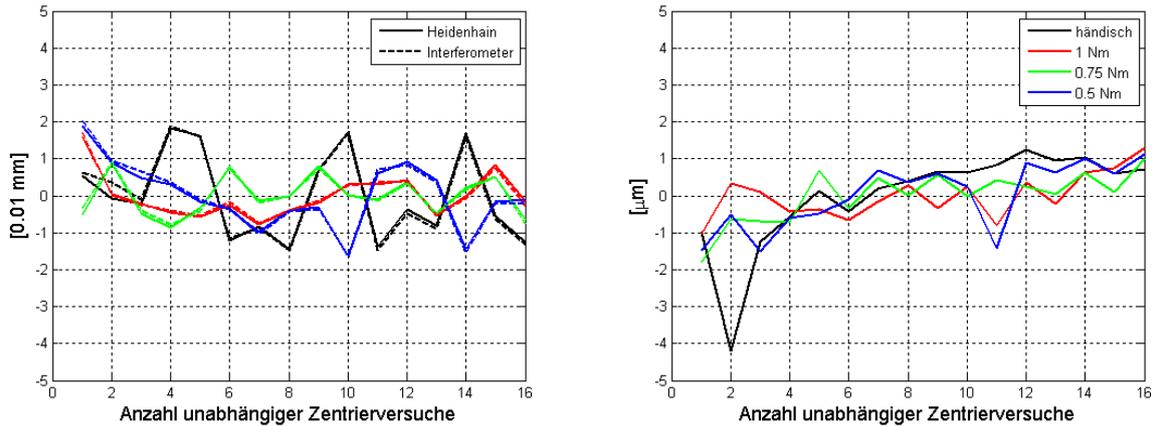
In Abschnitt 7.4 wurde die Reproduzierbarkeit der Pfannenpositionen durch Klemmung der Kugelkopfschraube in die jeweilige Pfanne beschrieben. Dort wurde das Gesamtergebnis der Untersuchung bei sechzehn Wiederholungen des Klemmvorgangs für die Glasmaßstabsmessungen dargestellt. Die Detailergebnisse der Interferometermessungen sowie die Ergebnisse von einer Wiederholung des Tests mit anderen Pfannen werden hier angeführt.



**Abb. B-1: Reproduzierbarkeit der Pfannenposition (Messung mit dem Interferometer) bei 16 unabhängigen Zentrierversuchen bei Pfanne # 8 (links) und Pfanne #3 (rechts).**

Die Erkenntnisse aus Abschnitt 7.4, dass die Reproduzierbarkeit der Messschlittenposition von der Anziehmethode nur bedingt abhängt und die Genauigkeit der Reproduzierbarkeit von Pfanne zu Pfanne stark variiert, wird durch Abb. B-1 bekräftigt. Pfanne #3 und Pfanne #8 weisen beide eine Reproduzierbarkeit von  $\pm 0,02$  mm, unabhängig von der Fixiermethode.

Die Darstellungen der Messergebnisse mit dem Interferometer ähneln jenen der Glasmaßstabsmessungen. Um diesen Sachverhalt visuell besser aufzubereiten werden in Abb. B-2, links, die Ergebnisse der beiden Messsysteme gegeneinander geplottet, sowie deren Differenz dargestellt (Abb. B-2, rechts).



**Abb. B-2: Vergleich Heidenhain - Interferometer für Pfanne #8 und Differenz Heidenhain - Interferometer für Pfanne #8.**

In Abb. B-2, links, sind neben den zuvor gezeigten Differenzen der einzelnen Pfannenpositionen von Hin- und Rückweg der Glasmaßstabsmessungen auch die Differenzen der Interferometermessungen geplottet. Die Abweichungen betragen wie zuvor  $\pm 0,02$  mm. Da die Ergebnisse der Interferometermessungen in Abb. B-2, links, sehr knapp bei den Glasmaßstabsmessungen geplottet sind, wurde die Differenz der Glasmaßstabsmessungen mit den Interferometermessungen dargestellt (Abb. B-2, rechts), um zu zeigen, dass die Abweichungen von  $\pm 0,02$  mm tatsächlich aus der Reproduzierbarkeit der Pfannenposition stammen.

Daraus wird ersichtlich, dass beide Messsysteme im Rahmen der geforderten Genauigkeit (ca. 0,01 mm) dieselben Ergebnisse bezüglich der Reproduzierbarkeit der Pfannenpositionen liefern, weshalb im Hauptteil nur die Ergebnisse der Glasmaßstabsmessungen angeführt werden

## Anhang C      Adaption des Satzmessprogramms CALMS

Am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz wurde im Zuge einer Bakkalaureatsarbeit (Lesjak 2007) das computergesteuerte Satzmessprogramm „CALMS“ (**C**omputer **A**ided **L**ong-time **M**easurement **S**ystem) entwickelt. CALMS wurde als Satzmessprogramm für Monitoringaufgaben entwickelt. Nach Definition eines Lernsatzes erfolgt eine Satzmessung mit allen in dem Lernsatz angegebenen Zielen. Konzeptionell werden neben den eigentlichen Messdaten auch Zusatzinformationen abgespeichert, z.B. um die Stabilität des Instruments kontrollieren zu können.

Für die Messungen im Rahmen der Masterarbeit wird gegenüber einer klassischen Satzmessung jedoch pro Zielpunkt eine bestimmte Anzahl an Wiederholungsmessungen benötigt. Aus diesem Grund wurde das Programm CALMS adaptiert, sodass pro Zielpunkt im Zuge der Satzmessung mehrere Einzelmessungen erfolgten, da bei Verwendung des ursprünglichen Programms infolge der Wartezeiten nach ATR-Zielung zu lange Messzeiten resultiert hätten, somit wurde nach Möglichkeiten gesucht das adaptierte Programm so zu verändern, dass die Messzeit der computergestützten Messungen optimiert wird.

Bei der ursprünglichen Version von CALMS wird nach jeder Messung ein neues Ziel anvisiert, wobei bei Reflektoren eine Zielsuche mittels ATR mit anschließender Feinjustierung durchgeführt wird. Dieser Prozess benötigt einige Sekunden und wird bei den Wiederholungsmessungen nicht benötigt. CALMS wurde daher so adaptiert, dass die Mehrfachmessung im Code nach der Anzielung eingebaut wurde. Dadurch konnte die Messzeit halbiert werden und CALMS (adaptiert) verwendet werden, ohne selbst umfangreiche Steuerrouninen erstellen zu müssen.

Die einzelnen Änderungen, die an dem Programm CALMS vorgenommen wurden, werden in Tabelle C-1 nachstehend im Detail zu Dokumentationszwecken beschrieben.

**Tabelle C-1: Vorgenommene Änderungen im Satzmessprogramm CALMS**

m-file „figCalms“	
Codezeile	Änderung
1013	„anzWhPau“ legt Anzahl an Wiederholungsmessungen fest
1018	Waitbar entsprechend anpassen
1059	Größe des Messdatenarrays auf neue Anzahl an Messungen dimensionieren
1119-1155	Anzahl der Messungen ( <i>zielnr</i> ) mit zugehörigen Zielpunkten ( <i>pos</i> ) definieren
1222	Position des Tachymeters (Kreislagenwechsel) anpassen
1236	„anzWhPau“ und „zielnr“ werden an Funktion „doMeasAutPau“ übergeben
1267	Anpassung der Positionierung für manuelles Messen
1325	Bewegung der Totalstation für manuelles Messen anpassen
m-file "doMeasAutPau" (ursprünglich "doMeasAut")	
Codezeile	Änderung
52-105	If-Schleife mit Abfrage ob erste Messung auf Ziel oder Wiederholungsmessung

## Anhang D Testmessung zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit des TCA 1800 im Feld

Zu Beginn der Arbeit wurde ein Test durchgeführt um die Anzahl an benötigten Wiederholungsmessungen für die Untersuchungen im Feld zu untersuchen, das adaptierte CALMS kennenzulernen und einen Eindruck über Störungen durch Veränderungen der Atmosphäre zu gewinnen.

Dafür wurde der Messablauf mit zwei fixen Prismen (Leica Standardprismen) bei demselben Distanzbereich nachgestellt. Die beiden Ziele wurden auf Pfeiler 2 und Pfeiler 4 aufgebaut. Der Instrumentenstandpunkt wurde in 95 m Entfernung, ident zu jenem der in Kapitel 11 gezeigten, späteren Feldmessungen, am Dach des alten Chemiegebäudes gewählt (Abb. 11.1).

Es wurden 42 Sätze gemessen (entspricht zeitlich in etwa einer Hin- und Rückmessung am Feldkomparator) wobei jedes Ziel pro Kreislage 9 Mal gemessen wurde. Während des gesamten Beobachtungszeitraumes (ca. 3 Stunden) herrschten gute Messbedingungen, d.h. der Himmel war stark bewölkt, es herrschte absolute Windstille und die Temperatur lag bei ca. 5°C. Das Ergebnis der Testmessung ist in Abb. D-1 dargestellt, wobei die Entfernungen um den Anfangswert reduziert wurden, um die Schwankungen in den Messungen besser sehen zu können.

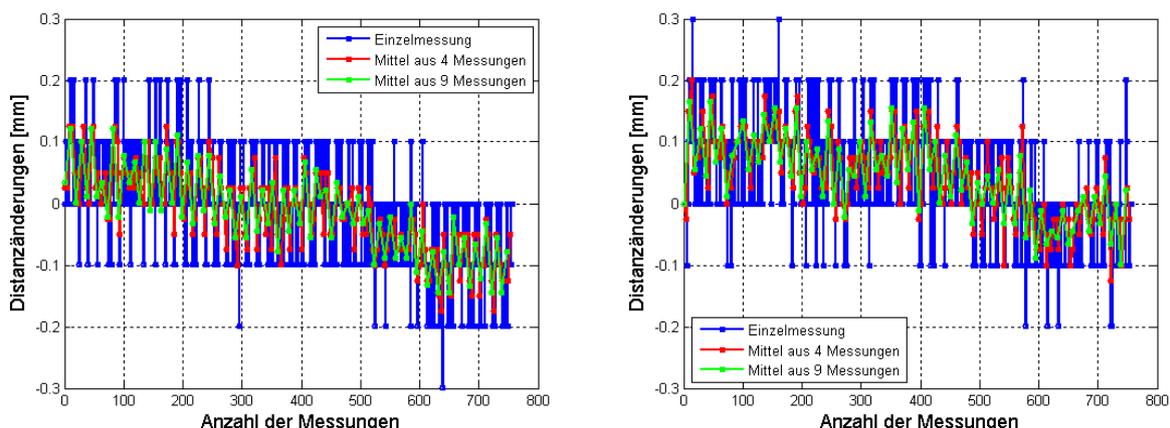


Abb. D-1: Ergebnisse der Entfernungsmessungen zu den Zielen P2 (links) und P4 (rechts).

Die Messungen in Abb. D-1 lassen nur eine geringe Variation erkennen. Deutlich ist die Streuung des Messgeräts ( $s_{EDM} = 0,04 \text{ mm}$ ) zu erkennen, aber auch eine leichte

Drift scheint vorhanden zu sein. Die neun Wiederholungsmessungen wurden gemittelt, was erwartungsgemäß zu einer Reduktion des Rauschens führte (Abb. D-1, grüne Linie). Aber die Anzahl von 9 Wiederholungsmessungen bedingt zu lange Messzeiten. Aus diesem Grund wurden bei den späteren Untersuchungen nur 4 Wiederholungsmessungen durchgeführt, als Kompromiss zwischen Reduktion des Rauschens und der Messzeit. Daher sind in Abb. D-1 auch die Mittelwerte von den 4 Wiederholungsmessungen dargestellt (rote Linie). Diese weichen vom Mittel der neun Wiederholungsmessungen um ca. 0,05 mm ab, wodurch die Reduktion der Anzahl an Wiederholungsmessungen von neun auf vier gerechtfertigt erscheint.

## Anhang E      Erstellte Matlab Routinen

In Tabelle E-1 werden die wesentlichen Matlab Routinen die für die Durchführung der Masterarbeit erstellt wurden aufgelistet.

**Tabelle E-1: Liste der erstellten Matlab Routinen.**

<b>Name</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
HinRueck310310.m	Auswertung des Vorversuchs (Abschnitt 7.3)
HinRueck060410.m	Auswertung der Wh. des Vorversuchs (Abschnitt 7.3)
HinRueck080410.m	Auswertung der Wh. des Vorversuchs (Abschnitt 7.3)
HinRueck120410.m	Auswertung der Wh. des Vorversuchs (Abschnitt 7.3)
VergleichInterHeid.m	Auswertung des Vergleichs FC 2009 vs. Interferometer (Abschnitt 7.3.2)
ReproDreh23_180310.m	Auswertung des Reproduzierbarkeitsversuchs (Abschnitt 7.4)
ReproDreh220310.m	Auswertung der Wh. des Reproduzierbarkeitsversuchs (Abschnitt 7.4)
ReproDreh290310.m	Auswertung des Reproduzierbarkeitsversuchs (Abschnitt 7.4)
Initialisierung240310.m	Auswertung des Initialisierungstests (Abschnitt 7.7)
Initialisierung250310.m	Auswertung der Wh. des Initialisierungstests (Abschnitt 7.7)
Durchhang190410.m	Auswertung des Versuchs mit Anhebung des Balkens bis sich dieser gerade noch nicht aus Lagerpunkt A zu heben beginnt (Abschnitt 7.5)
MaxDurchhang190410.m	Auswertung des Versuchs mit Anhebung des Balkens bis tiefster Punkt Höhe des Anfangspunktes erreicht hat (Abschnitt 7.5)
StandardprismaWelleAddiert.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Leica Standardprisma und Modellierung des zyklischen Fehlers mit Modell D (Kapitel 8)
StandardprismaBlase.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Leica Standardprisma und Modellierung des zyklischen Fehlers mit Modell C (Kapitel 8)
StandardprismaGERADE.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Leica Standardprisma und Modellierung des zyklischen Fehlers mit Modell A (Kapitel 8)
StandardprismaTrompete.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Leica Standardprisma und Modellierung des zyklischen Fehlers mit Modell B (Kapitel 8)
StandardprismaWelle MultipliziertMitFeldkomp.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen gemeinsam mit den Feldkomparatormessungen mit dem Leica Standardprisma und Modellierung des zyklischen Fehlers mit Modell C (Kapitel 8)
MiniprismaGelbGedreht.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Miniprisma gelb gedreht um 15° und Modellierung des zyklischen Fehlers (Kapitel 8)
MiniRot.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Miniprisma rot und Modellierung des zyklischen Fehlers (Kapitel 8)
MiniprismaGelb7k5Gedreht.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Miniprisma gelb um 7,5° gedreht und Modellierung des zyklischen Fehlers (Kapitel 8)
FolieRot.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Reflexfolie rot und Modellierung des zyklischen Fehlers (Kapitel 8)
FolieGelb.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit Reflexfolie gelb und Modellierung des zyklischen Fehlers (Kapitel 8)

Tabelle E-1: Fortgesetzt

<b>Name</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
FolieGelbAngehoben.m	Auswertung der Horizontalkomparatormessungen mit angehobener Reflexfolie gelb und Modellierung des zyklischen Fehlers mit Modell D (Kapitel 8)
VglMessungLabor230610_MiniRot.m	Auswertung der Vergleichsmessungen mit dem FC 2009 im Labor (Kapitel 10)
VglMessungDach230610_MiniRot.m	Auswertung der Vergleichsmessungen mit dem FC 2009 am Dach (Kapitel 10)
VglMessungLaborBalken Schief070710.m	Auswertung der Vergleichsmessungen mit schief stehendem FC 2009 im Labor (Kapitel 10)
FolieGelbGedrehtDach.m	Auswertung der Messungen mit dem FC 2009 bei einer Entfernung mit 95 m mit Reflexfolie gelb um 15° gedreht (Kapitel 11)
FolieGelbDach.m	Auswertung der Messungen mit dem FC 2009 bei einer Entfernung mit 95 m mit Reflexfolie gelb (Kapitel 11)
MiniGelbDach.m	Auswertung der Messungen mit dem FC 2009 bei einer Entfernung mit 95 m mit Miniprisma gelb (Kapitel 11)
StandardDach.m	Auswertung der Messungen mit dem FC 2009 bei einer Entfernung mit 95 m mit Leica Standardprisma (Kapitel 11)