

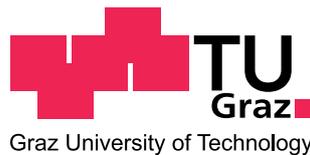
Sebastian Benkö

Erste Untersuchungen des neuen Digitalnivelliers Sokkia SDL1X

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



Technische Universität Graz

Betreuer: Dipl.Ing. Dr. techn. Helmut Woschitz

Begutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, Februar 2012

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)

Kurzfassung

Bisherige Untersuchungen von Digitalnivellieren verschiedener Hersteller am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme zeigten, dass diese Messsysteme unter bestimmten Situationen systematische Effekte aufweisen können. Die Kenntniss dieser Effekte ist für hochpräzise Messaufgaben sehr wichtig. Um neue Entwicklungen aufzuzeigen, wurde eine Marktanalyse durchgeführt, diese gibt einen Überblick und ermöglicht einen Vergleich der aktuell am Markt verfügbaren Digitalnivelliere auf Grundlage deren Spezifikationen.

2009 brachte Sokkia mit dem SDL1X ein Präzisionsdigitalnivellier auf den Markt und es sollte untersucht werden, ob auch dieses Instrument ähnliche systematische Fehlerinflüsse aufweist.

Da für das SDL1X kaum Informationen vorhanden sind, wurde dessen Aufbau durch eine Literatur- bzw. Patentrecherche studiert. Zusätzlich wurde der Aufbau des herstellerspezifischen Lattencodes ermittelt, sowie dessen Besonderheiten dargestellt.

Im geodätischen Messlabor der TU Graz wurden Untersuchungen durchgeführt, wobei im Zuge der Untersuchungen zwei SDL1X-Instrumente mit verschiedener Software- und Sensorversion zur Verfügung standen. Für beide Instrumente wurden die Aufheizzeiten bestimmt und Untersuchungen zu den Lattenendbereichen am Vertikalkomparator mit einer 2m Invarlatte durchgeführt. Diese zeigten, dass systematische Abweichungen in den Lattenendbereichen auftreten, wobei diese für das erste Instrument (ältere Software Version) größer sind als für das zweite Instrument. Aus der Größe des beeinflussten Bereichs wurde zusätzlich der elektronische Öffnungswinkel mit ca. 2.7° bestimmt.

Außerdem wurden Untersuchungen zu möglichen zyklisch wirkenden Höhenabweichungen durchgeführt, die üblicherweise vom Lattencode sowie der Pixelgröße des Bildsensors und der Brennweite des Instruments abhängig sind. Da der Hersteller keine Auskunft über diese Parameter gibt, mussten für diese ersten Tests diverse Annahmen getroffen werden. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Tests konnten allerdings keine zyklische Verläufe nachgewiesen werden, sodass diese Parameter nicht festgestellt werden konnten.

Schlussendlich wurden die Standardabweichung und Streuung der Höhenablesungen in Abhängigkeit der Distanz bestimmt. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Distanz und der Standardabweichung vorliegt, in manchen Bereichen aber erhöhtes Messrauschen auftritt.

Abstract

Investigations for digital levels of different manufacturers at the Institute for Engineering Geodesy and Measurement Systems had shown that these measurement systems are influenced by several systematic effects. The knowledge of these effects is important for high precision tasks. To reveal new developments, a market analysis was conducted, which gives an overview and allows comparison of the currently available digital levels, based on their specifications.

In 2009, Sokkia introduced the SDL1X digital level. It's investigation should show whether or not this instrument is influenced by similar systematic effects.

Because there is hardly any information available for the SDL1X, a literatur and patent research was done in order to determine the set up of the level. Additionally, the series of the basic barcode elements was determined.

Investigations were carried out in the geodetic laboratory of the University of Technology Graz with two levels of different software- and sensor versions. For both instruments the warm-up time was determined and investigations for the end sections of the staff were carried out.

These investigations showed, that this measurement system is also affected by systematic errors in the end sections of the staff. The systematic errors are greater for the first instrument (older software version). Additionally, the electronic field of view was determined as 2.7° .

Furthermore, investigations for the determination of cyclic errors were carried out. These errors usually depend on the size and sequence of the barcode elements as well as the size of the pixels of the image sensor and the focal length of the instrument. As the manufacturer has not published any information for these parameters yet, different assumptions had to be made for the first experiments. However, the investigations did not show any cyclic effects.

Finally, the aquired data was used to calculate the standard deviation and range as a function of the sighting distance. There is almost a linear correlation between the sigthing distance and the standard deviation, however there are some distances with higher noise.

Danksagung

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, welche mir mein Studium ermöglichten, sowie meiner Familie, welche mich während meiner gesamten Studienzeit stets unterstützte. Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Sandra, welche mir im Verlauf dieser Arbeit ein großer Rückhalt war und mich immer wieder aufs Neue motivierte.

Zusätzlich möchte ich meinem Betreuer, Dr. Helmut Woschitz, für die exzellente Betreuung dieser Arbeit, sowie für zahlreiche Diskussionen und Anregungen danken.

Außerdem möchte ich hiermit Herrn Dipl. Ing. (FH) Robert Presl und Herrn Ing. Rudolf Lummerstorfer für deren Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei den Messungen im Messlabor des Instituts danken.

Zusätzlich gilt mein Dank der Firma Geodis Austria (Herrn DI Erwin Truttmann), welche mir die Instrumente samt Zubehör für die Untersuchungen im Labor zur Verfügung stellte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
2	Entwicklung von Digitalnivellieren	3
2.1	Das Nivellier und seine Weiterentwicklung	3
2.2	Das Digitalnivellier	4
3	Marktanalyse	7
3.1	Allgemeines	7
3.2	Digitalnivelliere von Leica	8
3.3	Digitalnivelliere von Topcon	11
3.4	Digitalnivelliere von Sokkia	13
3.5	Digitalnivelliere von Trimble	16
3.6	Digitalnivelliere von BOIF und geo-FENNEL	18
3.7	Digitalnivelliere von South, Ruide, Kolida und Horizon	20
3.8	Digitalnivelliere von Foif	22
3.9	Digitalnivellier von Geomax	24
3.10	Zusammenfassung der technischen Spezifikationen	26
3.11	Abschließende Betrachtung	27

4	Sokkia SDL1X	28
4.1	Aufbau des Instruments	28
4.2	Lattencode von Sokkia	29
4.2.1	Aufbau des Codes	29
4.2.2	Invertierbarkeit der Latte	31
4.2.3	Verdeckte Codeelemente	31
4.3	Distanz- und Höhenberechnung	32
4.4	Autofokusfunktion	33
4.5	Software	35
4.5.1	Speicherung von Einzelmessungen	37
4.5.2	Messung im Average-Modus	37
4.5.3	Speicherung von Messdaten	38
4.5.4	Messdauer der Einzelmessung	38
5	Messlabor und Aufbau des Systems	40
5.1	Messlabor	40
5.2	Vertikalkomparator	40
5.3	Verwendetes Instrumentarium	42
5.4	Kommunikations- und Instrumentenparameter	43
5.5	Stromversorgung	44

6	Erste Untersuchungen zum Verhalten des SDL1X	45
6.1	Aufheizeffekte	45
6.1.1	Ergebnisse SDL1X#1	45
6.1.2	Ergebnisse SDL1X#2	47
6.1.3	Zusammenfassung	49
6.2	Messung in den Lattenendbereichen	50
6.2.1	Fehlereinfluss	50
6.2.2	Messablauf	52
6.2.3	Ergebnisse SDL1X#1	53
6.2.4	Ergebnisse SDL1X#2	59
6.2.5	Besondere Abweichungen im oberen Lattenende bei SDL1X#2	63
6.2.6	Zusammenfassung	71
6.3	Zyklisch wirkender Höhenfehler	72
6.3.1	Fehlereinfluss	72
6.3.2	Untersuchungen zur Bestimmung der Pixelgröße	73
6.3.3	Zusammenfassung	85
6.4	Distanzabhängige Performance	86
6.4.1	Maßstabsbestimmung	86
6.4.2	Hohes Messrauschen	88
6.4.3	Streuung der Messwerte	90
6.4.4	Zusammenfassung	92
7	Zusammenfassung und Ausblick	93

Anhang A: Messungen in den Lattenendbereichen	99
Anhang B: Untersuchungen zu zyklischen Höhenfehlern	105
Anhang C: Codeelemente	107
Anhang D: Messdaten	111

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Innovationen und Inventionen der letzten Jahre haben zu einer steten Verbesserung der verfügbaren Messsysteme, sowie damit verbunden, zu einer Vielzahl an neuen Anwendungsgebieten geführt. So führten neue Verfahren und Erkenntnisse, beispielsweise im Bereich der Satellitengeodäsie, zu erheblichen Genauigkeitssteigerungen und mittlerweile werden diese Messsysteme auch aufgrund ihrer Flexibilität und Wirtschaftlichkeit im Bereich der Ingenieur- und Bauvermessung eingesetzt (Witte und Schmidt, 2006). Doch auch im Bereich der terrestrischen Messsysteme gab es seit deren Entstehen Verbesserungen und so hat sich das Nivellier als gängiges Instrument für die Höhenmessung behauptet, da dieses terrestrische Verfahren den Satellitenverfahren im kleinräumigen Bereich an Genauigkeit überlegen ist (Kahmen, 2006). Die Anwendungsgebiete der Nivelliere umfassen dabei einfache Höhenmessungen auf Baustellen bis hin zu Präzisionsmessungen beim Brücken- und Tunnelbau, sowie die Bestimmung und Überwachung des amtlichen Höhenfestpunktfeldes.

Eine Verbesserung dieses terrestrischen Verfahrens stellt das Digitalnivellier dar. Das erste Instrument dieser Art wurde 1990 von Wild (heute Leica) am Markt eingeführt. Dieses heute gängige Messsystem besteht dabei aus zwei Komponenten: dem Nivellier samt Sensor für die automatische Datenerfassung, sowie einer codierten Latte. Durch die Einführung der automatischen Datenerfassung konnte so nicht nur eine Genauigkeitssteigerung, sondern vor allem eine enorme Produktivitätssteigerung erzielt werden (Ingensand, 2005).

Wie bei allen Messsystemen treten jedoch auch bei Digitalnivellieren gewisse Unzulänglichkeiten auf und aus umfangreichen Untersuchungen von Digitalnivellieren verschiedener Hersteller geht hervor, dass die automatischen Höhenablesungen der Nivelliere durchaus durch systematische Effekte beeinflusst werden können und weitere Schwachstellen im Messsystem auftreten können (Woschitz, 2003). Die Kenntnis über solche Effekte ist vor allem bei hochpräzisen Messaufgaben von essentieller Bedeutung.

Neben den Herstellern Leica, Zeiss und Topcon, hat sich die Firma Sokkia am Markt etabliert und bietet seit kurzem ein neues Digitalnivellier „SDL1X“ an (siehe Abbildung 1.1). Es ist zu untersuchen, ob auch bei diesem Messsystem systematische Effekte vorliegen.



Abbildung 1.1: Sokkia SDL1X (Sokkia, 2011a)

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Im Zuge dieser Masterarbeit soll das Sokkia SDL1X am Vertikalkomparator des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme untersucht werden.

Eine Marktanalyse (siehe Kapitel 3) soll einen Überblick über die zur Zeit angebotenen Digitalnivelliere aller Hersteller geben. Dabei sollen nicht nur die allseits bekannten Hersteller, sondern auch z.B. chinesische Manufakturen berücksichtigt werden. Diese Marktanalyse soll eine Vergleichsmöglichkeit sämtlicher Instrumente liefern und deren wichtigste Spezifikationen offenlegen.

Der Aufbau des SDL1X, sowie die interne Auswertemethode des Instruments sollen anhand einer intensiven Patent- und Literaturrecherche untersucht werden, um nachfolgende Untersuchungen gezielt durchführen zu können und eventuelle Rückschlüsse auf die erzielten Ergebnisse zu ziehen. Zusätzlich soll der geometrische Aufbau des Latencodes, sowie dessen Besonderheiten dargelegt werden (siehe Kapitel 4).

Im Messlabor der TU Graz soll das SDL1X vor allem durch Verwendung des Vertikalkomparators, welcher einer der besten Komparatoren auf der Welt ist, auf diverse Fehlereinflüsse untersucht werden. Dabei soll untersucht werden, ob dieses Instrument systematische Effekte bei der automatischen Höhenablesung, sowie zusätzliche Fehlereinflüsse aufweist (siehe Kapitel 6).

2 Entwicklung von Digitalnivellieren

2.1 Das Nivellier und seine Weiterentwicklung

Seit der Entstehung des Nivelliers im 19. Jahrhundert hat sich am Messprinzip nichts geändert und auch die Hauptbestandteile - das um die vertikale Achse drehbare Fernrohr, sowie eine Einrichtung zum Horizontieren der Zielachse - sind dieselben geblieben (Staiger und Deumlich, 2001). Ausgehend von Heinrich Wild wurden Nivelliere seit 1908 weiterentwickelt. So wurden Nivelliere durch die Verwendung von internen Fokussierlinsen kleiner und leichter, außerdem konnte durch die Verwendung von neuen Bauteilen, wie planparallelen Platten und Invarlatten, Genauigkeitssteigerungen erzielt werden (siehe z.B. Woschitz, 2003).

Eines der einfachsten Nivelliere ist das Libellennivellier, dessen Hauptbestandteile in Abbildung 2.1 ersichtlich sind. Hier erfolgt die Grobhorizontierung über die Dosenlibelle, anschließend kann mittels Röhrenlibelle eine Feinhorizontierung des Instruments vorgenommen werden. Das Libellennivellier ist eines der einfachsten geodätischen Instrumente, trotzdem wird es aufgrund seiner einfachen Handhabung auch noch heutzutage für Messungen von Höhendifferenzen verwendet.

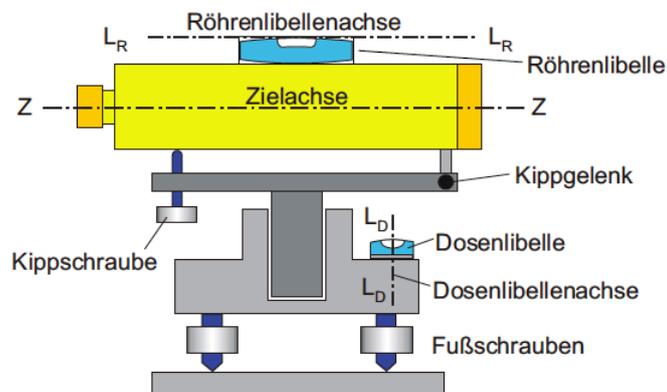


Abbildung 2.1: Aufbau des Libellennivelliers (Brunner, 2007)

Durch das Aufkommen des Kompensatornivelliers, dessen Aufbau und Funktionsweise beispielsweise durch Deumlich und Staiger (2001) beschrieben wird, konnten erstmals große Produktivitätssteigerungen erzielt werden. Das erste Kompensatornivellier wurde im Jahr 1950 von der Firma Zeiss entwickelt. Durch die Einführung des Kompensators,

welcher die automatische Feinhorizontierung des Instruments ermöglicht, konnte neben der Erhöhung der Messgeschwindigkeit um 30 bis 40% ebenso eine Steigerung der Genauigkeit erzielt werden (Kahmen, 2006). Doch auch Kompensatornivelliere wurden weiterentwickelt. Dies führte zur Erfindung des Digitalnivelliers und damit zu einer weiteren Produktivitätssteigerung aufgrund der automatischen Höhenablesung.

2.2 Das Digitalnivellier

Erste Ideen und Entwicklungen für die automatische Höhenbestimmung gab es bereits Mitte des 20. Jahrhunderts. Zunächst führte die Erfindung des Lasers in den 70er Jahren zur Entwicklung von aktiven Verfahren zur Höhenbestimmung. Bei diesen sogenannten Rotationslasernivellieren wird mit Hilfe des Lasers eine horizontale Gerade oder Ebene projiziert, die Höhenablesung erfolgt über einen positionsempfindlichen Detektor am Zielpunkt (Staiger und Deumlich, 2001). Diese Messsysteme konnten sich aufgrund ihrer geringen Genauigkeit, ihrer Komplexität, sowie ihres zeitaufwendigen Messverfahrens im Bereich des präzisen Nivellements jedoch nicht durchsetzen.

Daneben gab es weitere Ansätze, welche sich mit der Höhenablesung über das Nivellier als passive Verfahren befassten. Doch erst durch die Erfindung des CCD¹ Sensors durch Boyle und Smith im Jahr 1970 wurden diese Ideen aufgegriffen und erste Studien für ein Digitalnivellier wurden 1982 von Wild (Leica) realisiert (siehe z.B. Woschitz, 2003). Im Jahr 1990 wurde schließlich das Wild NA2000 als erstes Digitalnivellier am Markt eingeführt.

Digitalnivelliere stellen im Prinzip eine Erweiterung des Kompensatornivelliers um eine automatische Bilderfassung und -auswertung dar (Staiger und Deumlich, 2001, S. 259). Wie bereits eingangs erwähnt, besteht dieses Messsystem dabei nicht nur aus dem Instrument selbst, sondern auch aus den Nivellierlatten. Auf diesen ist ein Strichcode angebracht, welcher die automatische Höhenablesung über eine interne Auswertemethode im Instrument ermöglicht. Abbildung 2.2 zeigt ein Beispiel einer codierten Latte.

¹charge-coupled device



Abbildung 2.2: Beispiel eines Lattencodes anhand der Codefolge von Sokkia

Dieser Strichcode variiert je nach Hersteller und ein Digitalnivellier kann deshalb nur mit den zugehörigen Latten desselben Herstellers verwendet werden, da der interne Auswerteprozess des Instruments auf den jeweiligen Strichcode abgestimmt ist.

Kernstück eines Digitalnivelliers ist der Bildsensor, welcher je nach Position des Instruments zur Latte einen bestimmten Ausschnitt des Lattencodes als elektrisches Signal erfasst. Nach der Bilderfassung erfolgt eine Analog-Digital-Wandlung des Signals, welches danach nach dem vom Hersteller implementierten Algorithmus ausgewertet wird. Als Ergebnis erhält man die Höhenablesung, sowie die Distanz zwischen Latte und Instrument. Die Distanzmessung erfolgt im Vergleich zur optischen Messmethode mit einer höheren Genauigkeit und liegt im Bereich von wenigen Zentimetern (Rüeger, 2003). Durch die Einführung der automatischen Höhenablesung konnte die Nivellementgeschwindigkeit um das 1.5 fache gegenüber dem analogen Nivellier gesteigert werden (Kahmen, 2006). Daneben bieten Digitalnivelliere die Möglichkeit, die Ergebnisse direkt abzuspeichern.

Neben den Vorteilen der höheren Produktivität und der gesteigerten Genauigkeit gibt es jedoch auch bekannte Nachteile. So können die Höhenablesungen durch eine Vielzahl von Fehlerquellen beeinflusst werden. Eine detaillierte Auflistung der Fehlerquellen ist beispielsweise durch Rüeger (2003, S.40-49) gegeben. Einige dieser Fehlereinflüsse wurden im Zuge dieser Masterarbeit näher untersucht (siehe Kapitel 6).

Ein weiterer Nachteil dieses Messsystems ist die für den Betrieb benötigte Stromquelle (meist in Form eines Akkus). Ist dieser nicht vorhanden, kann keine automatische Höhenablesung erfolgen. Aus diesem Grund sind die Nivellierlatten auf den Rückseiten meist mit einer gewöhnlichen Graduierung versehen, sodass im Notfall eine optische Höhenablesung durch den Beobachter erfolgen kann.

Neben Fehlerquellen, welche sich ausschließlich auf Digitalnivelliere beziehen, gibt es

Fehlereinflüsse, welche alle Nivelliere betreffen, wie z.B. Maßstabs-, Teilungs- und Nullpunktsfehler der Latten oder Temperatureinflüsse auf die Messausrüstung (Kahmen, 2006).

Während einige dieser Fehlereinflüsse nur durch Kalibrierung eliminiert werden können, kann der Einfluss von anderen Fehlern durch entsprechende Messabläufe minimiert werden. Dies macht die Untersuchung und Kalibrierung des Messsystems unabdingbar, damit ein reibungsloser Messablauf mit der höchstmöglichen Genauigkeit gewährleistet werden kann.

3 Marktanalyse

3.1 Allgemeines

Digitalnivelliere unterscheiden sich nicht nur durch ihr äußeres Erscheinungsbild, sondern bieten - je nach Modell - unterschiedliche Zusatzeinrichtungen. Die erzielbare Genauigkeit ist das wohl wichtigste Merkmal eines Instruments. Nivelliere werden in der Fachliteratur üblicherweise nach ihrer Standardabweichung für 1km Doppelliniennivellement klassifiziert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Klassifizierung von Nivellieren nach deren Standardabweichung für 1km Doppelliniennivellement (Witte und Schmidt, 2006, S. 267)

Bezeichnung	σ_h
Nivellier einfacher Genauigkeit	$\leq 6\text{mm}$
Nivellier hoher Genauigkeit	$\leq 2\text{mm}$
Nivellier höchster Genauigkeit	$\leq 0.5\text{mm}$

Neben Leica, dem ersten kommerziellen Hersteller, sind es vor allem Trimble und Topcon, die aufgrund ihrer jahrelangen Erfahrung zu den bekanntesten Herstellern gezählt werden können. Daneben gibt es jedoch eine Vielzahl an weniger namhaften Herstellern von Digitalnivellieren, welche vor allem aus dem asiatischen Raum stammen.

Nachfolgend soll daher ein Überblick über die zur Zeit am Markt vorhandenen Instrumente gegeben werden.

Eine ähnliche Analyse wurde bereits von Woschitz (2003) durchgeführt, dabei wurden jedoch nur Digitalnivelliere höchster Genauigkeit berücksichtigt. In dieser Marktanalyse wurden zusätzlich Digitalnivelliere hoher Genauigkeit angeführt, Digitalnivelliere einfacher Genauigkeit wurden nicht angeführt. Dabei wurden die wichtigsten Spezifikationen der Nivelliere berücksichtigt, welche den diversen Produktbroschüren bzw. Handbüchern entnommen wurden. Die Recherche erfolgte unter Verwendung der Suchmaschine Google unter den Suchbegriffen *digital levels*, *electronic levels* und *Digitalnivelliere*. Zusätzlich wurde die Zeitschrift GIM International (Zeitraum 2009-2011) nach Herstellern durchsucht.

3.2 Digitalnivelliere von Leica

Leica Geosystems brachte 1990 (damals unter dem Firmennamen Wild) das erste Digitalnivellier auf den Markt (Ingensand, 1990) und kann somit auf eine lange Erfahrung in der Herstellung dieser Instrumente zurückblicken. Aktuell werden sowohl Nivelliere hoher Genauigkeit unter dem Markennamen „Sprinter“ als auch Nivelliere höchster Genauigkeit unter dem Namen „DNA“ angeboten (Leica, 2011).

Die Sprinter-Familie ist in Abbildung 3.1 ersichtlich, in Tabelle 2 sind deren wichtigste Spezifikationen vermerkt. Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Spezifikationen der DNA-Serie, welche in Abbildung 3.2 ersichtlich ist.

Besonderheiten

Vergleicht man die Spezifikationen der Sprinter-Serie untereinander, so sieht man, dass die Instrumente viele Ähnlichkeiten aufweisen. Hervorzuheben ist die weitaus höhere Genauigkeit des Sprinter 250M gegenüber den restlichen Instrumenten. Zusätzlich soll erwähnt werden, dass das Sprinter 50 und das Sprinter 150 keine Datenspeicherung erlauben und somit nur für einfachste Messaufgaben eingesetzt werden sollten. Die anderen Instrumente ermöglichen hingegen Speicherung sowie Übertragung der Daten per USB oder RS232-Schnittstelle.

Die DNA-Serie unterscheidet sich gegenüber der Sprinter-Serie vor allem durch die höher erzielbare Genauigkeit, besonders das DNA03, mit einer Genauigkeit von 0.3mm für 1km Doppelliniennivellement eignet sich daher für hochpräzise Messaufgaben. Daneben ist ein größerer Zielweitenbereich möglich und die Instrumente können bei geringeren Temperaturen verwendet werden. Außerdem verfügt die DNA-Serie über eine PCMCIA-Schnittstelle, auf einen USB Anschluss wurde verzichtet.

Zusätzlich soll erwähnt werden, dass die Sprinter Instrumente einen anderen Barcode verwenden, als die Instrumente der DNA-Serie (Wehmann et al., 2009).



Abbildung 3.1: Sprinter Serie (Leica, 2011)

Tabelle 2: Spezifikationen^a der Sprinter-Digitalnivelliere von Leica
(Stand: Okt. 2011)

	Sprinter 50	Sprinter150/150M	Sprinter 250M
Genauigkeit			
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	2	1.5	0.7
Distanz <10m [mm]	10	10	10
Distanz >10m	0.1%×D	0.1%×D	0.1%×D
Messdauer [s]	<3	<3	<3
Auflösung			
Höhenmessung [mm]	0.1	0.1	0.1
Distanz [mm]	1	1	1
Zielweite elektronisch	2-100	2-100	2-100
Kompensator			
Art	Pendel	Pendel	Pendel
Dämpfung	magnetisch	magnetisch	magnetisch
Kompensationsbereich [']	~ ±10	~ ±10	~ ±10
Genauigkeit [']	0.8	0.8	0.8
Fernrohr			
Sehfeld	2°	1°20'	1°20'
Objektivöffnung [mm]	36	45	36
Vergrößerung	24-fach	32-fach	28-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja	Ja
Datenspeicherung	Nein	Ja ^c	Ja
Schnittstellen	-	RS232, USB ^c	RS232, USB
Gewicht [kg]	2.55	2.55	2.55
Temperaturbereich [°C]	-10 - +50	-10 - +50	-10 - +50

^a Quellen: Leica (2011a), Leica (2011b)^b STD für 1km Doppelliniennivellement nach ISO 17123-2^c nur 150M



Abbildung 3.2: DNA-Serie (Leica, 2006)

Tabelle 3: Spezifikationen^a der DNA-Digitalnivelliere von Leica (Stand: Okt. 2011)

	DNA10	DNA03
Genauigkeit		
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	0.9	0.3
Distanz <10m [mm]	5	5
Distanz 10-50m	500ppm	500ppm
Messdauer	<3s	<3s
Auflösung		
Höhenmessung [mm]	0.1	0.01
Distanz [mm]	1	1
Zielweite elektronisch [m]	1.8-110	1.8-110
Kompensator		
Art	Pendel	Pendel
Dämpfung	magnetisch	magnetisch
Kompensationsbereich [']	± 10	± 10
Genauigkeit ["]	0.8	0.3
Fernrohr		
Sehfeld	2°	2°
Objektivöffnung [mm]	36	36
Vergrößerung	24-fach	24-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja
Datenspeicherung	Ja	ja
Schnittstellen	RS232, PCMCIA	RS232, PCMCIA
Gewicht [kg]	2.85	2.85
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	-20 - +50

^a Quellen: Leica (2006a), Leica (2006b)^b STD für 1km Doppelliniennivellement nach ISO 17123-2

3.3 Digitalnivelliere von Topcon

Im Bereich der Digitalnivelliere bietet Topcon zur Zeit zwei Instrumente der Serie DL500 an (Topcon, 2011). Aufgrund ihrer erzielbaren Genauigkeit können beide Instrumente als Nivelliere hoher Genauigkeit bezeichnet werden. Anzumerken ist, dass Topcon mit dem DL101C früher auch ein Nivellier höchster Genauigkeit produzierte, aktuell wird dieses Instrument jedoch nicht mehr beworben. Ein Grund dafür könnte sein, dass man nach der Übernahme von Sokkia im Jahre 2009 diesen Sektor seiner Tochterfirma überlässt.

Abbildung 3.3 zeigt die DL500 Serie, deren wichtigsten Spezifikationen Tabelle 4 entnommen werden können.

Besonderheiten

Vergleicht man diese Spezifikationen mit denen der Digitalnivelliere von Leica, so sind viele Ähnlichkeiten ersichtlich. Auch bei den Topcon-Nivellieren wird ein magnetgedämpfter Pendelkompensator verwendet, dessen Genauigkeit aber nicht angegeben wird. Weiteres Manko der Topcon-Nivelliere: Eine Datenübertragung erfolgt nur über eine RS232 Schnittstelle. Dafür beträgt die minimale Zielweite nur 1.5m, außerdem bieten diese Digitalnivelliere die sogenannte „Wave and Read“ Technologie an (Topcon, 2010). Diese ermöglicht, laut Hersteller, eine korrekte Höhenablesung auch dann, wenn die Nivellierlatte nicht richtig horizontal ist.



Abbildung 3.3: Topcon DL-500 Serie (Topcon, 2011)

Tabelle 4: Spezifikationen^a der Digitalnivelliere von Topcon (Stand: 20.10.2011)

	Topcon DL502	Topcon DL503
Genauigkeit		
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	0.6	0.8
Distanz <10m [mm]	10	10
Distanz 10-50m	0.1%×D	0.1%×D
Distanz 10-50m	0.2%×D	0.2%×D
Messdauer	<3s	<3s
Auflösung		
Höhenmessung [mm]	0.1	0.1
Distanz [mm]	10	10
Zielweite elektronisch [m]	1.5 - k.A.	1.5 - k.A.
Kompensator		
Art	Pendel	Pendel
Dämpfung	magnetisch	magnetisch
Kompensationsbereich [']	±15	±15
Genauigkeit	k.A.	k.A.
Fernrohr		
Sehfeld	1°20'	1°20'
Objektivöffnung [mm]	28	32
Vergrößerung	32-fach	28-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja
Datenspeicherung	Ja	Ja
Schnittstellen	RS232	RS232
Gewicht [kg]	2.4	2.4
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	-20 - +50

^a Quelle: Topcon (2010)^b STD für 1km Doppelliniennivellement nach ISO 17123-2

3.4 Digitalnivelliere von Sokkia

Sokkia ist ein japanisches Unternehmen, welches 1920 unter dem Namen Sokkisha Co., Ltd. in Tokyo gegründet wurde. Seither hat sich das Unternehmen auf dem Markt behauptet und konnte im Laufe seines Bestehens weltweit expandieren. Seit 1990 ist die Firma unter dem Namen Sokkia aktiv, 2009 wurde sie von Topcon übernommen, bleibt jedoch als eigenständiges Unternehmen bestehen.

Zur Zeit bietet Sokkia drei Digitalnivelliere an (Sokkia, 2011b), dabei ist das SDL1X das neueste Digitalnivellier aus dem Hause Sokkia und kann aufgrund eines ähnlichen Aufbaus als Weiterentwicklung des SDL30 angesehen werden (siehe Tabelle 5). Zusätzlich wird das SDL50 vertrieben. Die Spezifikationen dieser Instrumente sind in Tabelle 5 ersichtlich.

Besonderheiten

Vergleicht man die Spezifikationen der Instrumente untereinander, so sieht man, dass das SDL30 und das SDL50 nahezu idente Spezifikationen besitzen. Lediglich die Fernrohrdimensionen unterscheiden diese beiden Instrumente voneinander, außerdem besitzt das SDL30 eine höher erzielbare Genauigkeit.

Das SDL1X ist aufgrund der gleichen Fernrohrdimensionen im Aufbau dem SDL30 sehr ähnlich, allerdings besitzt es eine weitaus höher erzielbare Genauigkeit, weiters sind zusätzliche Schnittstellen vorhanden. Abgesehen davon besitzen alle drei Instrumente dieselben möglichen Zielweiten, sowie denselben Öffnungswinkel für das Sehfeld. Laut Herstellerangabe beträgt das Sehfeld $1^\circ 20'$, in weiteren Untersuchungen konnte aber gezeigt werden, dass der elektronische Öffnungswinkel von dieser Angabe abweicht (siehe Abschnitt 6.2).



Abbildung 3.4: SDL Serie (Sokkia, 2011a): (a) SDL50, (b) SDL30, (c) SDL1X

Tabelle 5: Spezifikationen^a der Digitalnivelliere von Sokkia
(Stand: 20.10.2011)

	SDL50	SDL30	SDL1X
Genauigkeit			
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	1.5	0.6	0.2
Distanz <10m [mm]	10	10	10
Distanz 10-50m	0.1%×D	0.1%×D	0.1%×D
Distanz 10-50	0.2%×D	0.2%×D	0.2%×D
Messdauer	<3s	<3s	<2.5s
Auflösung			
Höhenmessung [mm]	0.1	0.1	0.01
Distanz [mm]	10	10	1
Zielweite elektronisch [m]	1.6-100	1.6-100	1.6-100
Kompensator			
Art	Pendel	Pendel	Pendel
Dämpfung	magnetisch	magnetisch	magnetisch
Kompensationsbereich [°]	±15	±15	±12
Genauigkeit [°]	k.A.	k.A.	0.3
Fernrohr			
Sehfeld	1°20'	1°20'	1°20'
Objektivöffnung [mm]	36	45	45
Vergrößerung	28-fach	35-fach	35-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja	Ja
Datenspeicherung	Ja	Ja	Ja
Schnittstellen	RS232	RS232	RS232, USB, SD
Gewicht [kg]	2.4	2.4	3.7
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	-20 - +50	-20 - +50

^a Quellen: Sokkia (2000b), Sokkia (2009)^b STD für 1km Doppelnivelllement nach ISO 17123-2

Besonderheiten des SDL1X

Laut Hersteller (Sokkia, 2009) besitzt das SDL1X acht innovative Features, welche (mit Stand 1. Juni 2009) in keinem anderen Digitalnivellier Verwendung finden.

Diese sind:

- eine Genauigkeit von $0.2\text{mm}/\sqrt{km}$ für 1km Doppelliniennivellement nach ISO17123-2,
- die Autofokusfunktion für ein Digitalnivellier höchster Genauigkeit,
- der eingebaute View Finder für die einfache Auffindung der Latte,
- eine Fernbedienung für die Auslösung von Messungen,
- ein Zwei-Achs Neigungssensor für höhere Präzision,
- ein SD-Karten Slot für einfache Datenübertragung,
- eine Bluetooth-Schnittstelle (Übertragung bis 100m),
- sowie eine neue Nivellierlatte (BIS30A) mit einem Ausdehnungskoeffizienten von $\pm 0.1\text{ppm}/^\circ\text{C}$

Verglichen mit den Instrumenten der anderen Hersteller liefert das Sokkia SDL1X in Verbindung mit der BIS30A Latte somit die höchste erzielbare Genauigkeit bei der Höhenmessung für 1km Doppelliniennivellement.

Auch der Zwei-Achs Neigungssensor ist ein Herausstellungsmerkmal gegenüber den anderen Instrumenten.

Die implementierte Autofokusfunktion soll laut Hersteller eine Zeitersparnis von bis zu 40% gegenüber Instrumenten mit manueller Fokussierung bieten (Sokkia, 2009).

Daneben kann das Sokkia SDL1X über eine Fernbedienung gesteuert werden, dies soll die Präzision weiters erhöhen, da ein Auslösen der Messung am Instrument selbst vermieden wird, zusätzlich kann das Instrument mit einem externen Field-PC per Bluetooth-Verbindung gekoppelt werden.

Weiters wird die einfache Auffindung der Nivellierlatten über den sogenannten View Finder, welcher einem Teleskop mit 4.5-facher Vergrößerung und einem Sehfeld von 3° entspricht, ermöglicht.

3.5 Digitalnivelliere von Trimble

Trimble (bzw. vormals Zeiss) bietet seit Mitte der 1990er Jahre Digitalnivelliere unter dem Namen DiNi an. Aktuell werden sowohl ein Digitalnivellier hoher Genauigkeit (Trimble DiNi 0.7) als auch ein Digitalnivellier höchster Genauigkeit (Trimble DiNi 0.3) angeboten (Trimble, 2011b).

Die Spezifikationen dieser beiden Instrumente können Tabelle 6 entnommen werden.

Besonderheiten

Auch diese beiden Instrumente haben eine minimale Zielweite von nur 1.5m. Daneben fällt auf, dass auf eine RS232-Schnittstelle gänzlich verzichtet wurde. Eine Datenübertragung erfolgt nur über USB. Der Kompensatorbereich beträgt wie bei den Topcon Instrumenten $\pm 15'$, die Einspielgenauigkeit des Kompensators beim DiNi 0.3 ist mit 0.2" die höchste der derzeit am Markt erhältlichen Digitalnivelliere.

Erwähnenswert ist außerdem die geringere Messzeit des DiNi 0.7, welches eine Einzelmessung in nur 2 Sekunden ermöglicht.



Abbildung 3.5: Trimble Dini (Trimble, 2011a)

Tabelle 6: Spezifikationen^a der Digitalnivelliere von Trimble (Stand: Okt. 2011)

	DiNi 0.3	DiNi 0.7
Genauigkeit		
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	0.3	0.7
Distanz 20m [mm]	20	25
Messdauer [s]	3	2
Auflösung		
Höhenmessung [mm]	0.01	0.1
Distanz [mm]	1	10
Zielweite elektronisch [m]	1.5-100	1.5-100
Kompensator		
Art	Pendel	Pendel
Dämpfung	-	-
Kompensationsbereich [']	± 15	± 15
Genauigkeit ["]	0.2	0.5
Fernrohr		
Schfeld	2.2m auf 100m	2.2m auf 100m
Objektivöffnung [mm]	40	40
Vergrößerung	32-fach	26-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja
Datenspeicherung	Ja	Ja
Schnittstellen	USB	USB
Gewicht [kg]	3.5	3.5
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	-20 - +50

^a Quelle: Trimble (2011a)

^b STD für 1km Doppelliniennivellement nach DIN 18723 (entspricht ISO 17123-2)

3.6 Digitalnivelliere von BOIF und geo-FENNEL

BOIF (Beijing Bofei Instrument Co., LTD.) ist ein chinesischer Hersteller aller Art von Vermessungsinstrumenten. Zur Zeit werden drei Digitalnivelliere der Serie DAL vertrieben. Daneben vertreibt die deutsche Firma geo-FENNEL ein Instrument unter dem Namen DiNiv 100, welches nahezu idente Spezifikationen wie das DAL1528(R) besitzt. Die Spezifikationen können Tabelle 7 entnommen werden.

Auf der offiziellen Homepage des Herstellers geo-FENNEL wird eine minimale Zielweite von 2.5m gegenüber 2m bei BOIF angegeben, außerdem ist die Vergrößerung des Fernrohrs laut geo-FENNEL 28-fach (gegenüber 32-fach bei BOIF) (geo-FENNEL, 2011b). Eine umfangreichere Recherche brachte jedoch eine Bedienungsanleitung zum Instrument zum Vorschein (geo-FENNEL, 2011a), nach der das Instrument idente Spezifikationen wie das DAL1528(R) besitzt.

Besonderheiten

Vergleicht man die Spezifikationen dieser Instrumente mit denen der anderen Hersteller so zeigen sich auf den ersten Blick sehr viele Ähnlichkeiten. Hervorzuheben ist die geringe Messzeit für eine Einzelmessung von weniger als zwei Sekunden, sowie die hohe Einspielgenauigkeit des Kompensators. Jedoch ist nicht ersichtlich, wie die angegebenen Genauigkeiten für die Höhenmessung ermittelt wurden. Zusätzlich geben die Hersteller BOIF und geo-FENNEL keinerlei Auskunft über die erzielbare Genauigkeit bei der Distanzmessung. Daneben bleibt die Größe des Öffnungswinkels für das Sehfeld unklar.



Abbildung 3.6: BOIF DAL (a) (BOIF, 2011), (b) geo-FENNEL DiNiv100 (geo-FENNEL, 2011b)

Tabelle 7: Spezifikationen^a der Digitalnivelliere von BOIF und geo-FENNEL (Stand: Okt. 2011)

	DAL1528(R)/DiNiv100 BOIF/geo-FENNEL	DAL1032(R) BOIF	DAL0732 BOIF
Genauigkeit			
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	1.5	1.0	0.7
Distanz <10m [mm]	-	-	-
Messdauer	<2s	<2s	<2s
Auflösung			
Höhenmessung [mm]	0.2	0.1	0.1
Distanz [mm]	10	10	10
Zielweite elektronisch [m]	2-100 ^c	2-100	2-100
Kompensator			
Art	Pendel	Pendel	Pendel
Dämpfung	magnetisch	magnetisch	magnetisch
Kompensationsbereich [°]	±15	±15	±15
Genauigkeit [°]	0.5	0.3	0.3
Fernrohr			
Sehfeld	-	-	-
Objektivöffnung [mm]	40	40	40
Vergrößerung	32-fach ^c	32-fach	32-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja	Ja
Datenspeicherung	Ja	Ja	
Schnittstellen	RS232 ^d	RS232 ^e	RS232
Gewicht [kg]	2.5	2.5	2.5
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	-20 - +50	-20 - +50

^a Quellen: Quellen: BOIF (2011), geo-FENNEL (2011b), geo-FENNEL (2011a)

^b STD für 1km Doppelliniennivellement

^c laut Datenblatt (geo-FENNEL, 2011b): 2.5-100m Zielweite, 28-fache Vergrößerung, laut Manual (geo-FENNEL, 2011a) gleiche Spezifikationen wie DAL1528R

^d nur DAL 1528R, DiNiv 100

^e nur DAL 1032R

3.7 Digitalnivelliere von South, Ruide, Kolida und Horizon

Besonderheiten der Hersteller

Etwas eigenartig erscheint der Vertrieb der DL- bzw. DI-LEV-Digitalnivellierserie. Diese Instrumente werden von vier verschiedenen Herstellern (South, Ruide, Kolida, Horizon) mit nahezu identischen Spezifikationen angeboten. Auffällig dabei, dass die drei erstgenannten Hersteller dieselbe Kontaktadresse in Guangzhou, China angeben (South, 2011), (Ruide, 2011), (Kolida, 2011).

Die Spezifikationen der Instrumente können Tabelle 8 entnommen werden. Anzumerken ist, dass diese Spezifikationen nur den einzelnen Webseiten der Hersteller entnommen wurden, Datenblätter oder Manuals konnten im Zuge dieser Recherche nicht gefunden werden.

Die einzelnen Bilder (siehe Abbildung 3.7) zeigen die Instrumente je Hersteller. Dabei zeigt sich, dass das Design stets dasselbe ist, nur anhand ihrer Farbe können die Instrumente unterschieden werden.

Besonderheiten der Instrumente

Während Ruide den Öffnungswinkel für alle Nivelliere mit $1^{\circ}20'$ angibt, wird dieser von South und Kolida mit $1^{\circ}30'$ beziffert. Außerdem gibt Ruide für die Genauigkeit des Kompensators des DL-202 einen Wert von $0.5''$ gegenüber $0.3''$ bei den anderen beiden Herstellern an.

Die Firma Horizon mit Hauptsitz in Singapur vertreibt vermutlich dieselbe Instrumentenserie, jedoch unter den Namen DI-LEV 7, DI-LEV 10 sowie DI-LEV 20. Die Spezifikationen entsprechen denen von Ruide, das DI-LEV 20 wird jedoch mit einer Genauigkeit von 2mm für 1km Doppelliniennivellement beziffert, die Einspielgenauigkeit des Kompensators wird mit $0.3''$ angegeben.

Hervorzuheben ist außerdem die Datenspeicherung/Übertragung mittels SD-Karte. Diese Option wird sonst nur beim SDL1X (siehe Abschnitt 3.4), sowie beim Foif EL300 (siehe Abschnitt 3.8) angeboten. Wie bei den Nivellieren von BOIF und geo-FENNEL ist auch bei dieser Instrumentenserie nicht ersichtlich, wie die angegebenen Genauigkeiten ermittelt wurden.



Abbildung 3.7: DL Series: (a) South (2011), (b) Ruide (2011), (c) Kolida (2011), (d) Horizon (2011)

Tabelle 8: Spezifikationen^a der Digitalnivelliere der DL-Serie (Stand:Okt. 2011)

	DL-2007 ^b /DI-LEV7 ^c	DL-201 ^b /DI-LEV10 ^c	DL-202 ^b /DI-LEV20 ^c
Genauigkeit			
Höhenmessung ^d [mm/ \sqrt{km}]	0.7	1.0	1.5 ^e
Distanz <10m [mm]	10	10	10
Distanz >10m	0.1%×D	0.1%×D	0.1%×D
Messdauer	<3s	<3s	<3s
Auflösung			
Höhenmessung [mm]	0.1	0.1	0.5
Distanz [mm]	10	10	10
Zielweite elektronisch [m]	1.5-100	1.5-100	1.5-100
Kompensator			
Art	Pendel	Pendel	Pendel
Dämpfung	magnetisch	magnetisch	magnetisch
Kompensationsbereich [']	±12	±12	±12
Genauigkeit [']	0.3	0.3	0.3 ^e
Fernrohr			
Sehfeld	1°30' ^g	1°30' ^g	1°30' ^g
Objektivöffnung [mm]	-	-	-
Vergrößerung	32-fach	32-fach	32-fach
Horizontalkreis	Ja	Ja	Ja
Datenspeicherung	Ja	Ja	Ja
Schnittstellen	USB, SD	USB, SD	USB, SD
Gewicht [kg]	2.5	2.5	2.5
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	-20 - +50	-20 - +50

^a Quellen: South (2011), Ruide (2011), Kolida (2011), Horizon (2011).

^b Hersteller: South, Ruide, Kolida

^c Hersteller: Horizon

^d STD für 1km Doppelliniennivellement

^e 2mm laut Horizon (2011)

^f 0.5" laut Ruide (2011) bzw. Horizon (2011)

^g 1°20' laut Ruide (2011) bzw. Horizon (2011)

3.8 Digitalnivelliere von Foif

Foif ist ein weiterer chinesischer Hersteller von Vermessungsinstrumenten. Im Bereich der Digitalnivelliere werden zur Zeit zwei Instrumente angeboten (Foif, 2011). Detaillierte Angaben werden jedoch nur zum EL 100 gegeben. Daneben preist der Hersteller das EL 300 an, abgesehen von einer Genauigkeit für die Höhenmessung von 0.7mm für 1km Doppelliniennivellement, einer maximalen Zielweite von 105m und einer Speichermöglichkeit mittels SD-Karte sind zu diesem Instrument jedoch keinerlei Informationen vorhanden.

Besonderheiten

Während das Auflösungsvermögen der Höhenmessung aller Instrumente im Allgemeinen 0.1mm oder höher ist, beträgt dieses beim EL 100 nur 0.2mm. Zusätzlich beträgt die minimale Zielweite nur 2.5m, Messdaten können außerdem nur per RS232 Schnittstelle übertragen werden.

Zwar gibt der Hersteller einen Kompensationsbereich, sowie eine Einspielgenauigkeit an, allerdings ist unklar welche Kompensatorart im Instrument verbaut ist, außerdem ist auch hier nicht ersichtlich, wie die angegebenen Genauigkeiten ermittelt wurden.



Abbildung 3.8: (a) EL100 (Foif, 2011) und (b) EL 300 (Foif, 2011)

Tabelle 9: Spezifikationen^a der Nivelliere von Foif (Stand: Okt. 2011)

	EL 100	EL 300
Genauigkeit		
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	1.5	0.7
Distanz <10m [mm]	10	k.A.
Distanz 10-50m	0.1%×D	k.A.
Distanz >50m	0.2%×D	k.A.
Messdauer	2s	k.A.
Auflösung		
Höhenmessung [mm]	0.2	k.A.
Distanz [mm]	10	k.A.
Zielweite elektronisch [m]	2.5-100	max. 105
Kompensator		
Art	k.A.	k.A.
Dämpfung	k.A.	k.A.
Kompensationsbereich [']	±12	k.A.
Genauigkeit ["]	0.5	k.A.
Fernrohr		
Sehfeld	1°30'	k.A.
Objektivöffnung [mm]	45	k.A.
Vergrößerung	30-fach	k.A.
Horizontalkreis	Ja	k.A.
Datenspeicherung	Ja	Ja
Schnittstellen	RS232	SD
Gewicht [kg]	k.A.	k.A.
Arbeitstemperatur [°C]	-20 - +50	k.A.

^a Quellen: Foif (2007)

^b STD für 1km Doppelliniennivellement

3.9 Digitalnivellier von Geomax

Geomax stellt als Teil der schwedischen Hexagon-Gruppe eine Vielzahl an Vermessungsinstrumenten her. Aktuell bietet diese Firma das ZDL700 an (Geomax, 2011).

Besonderheiten

Aufgrund seiner maximalen Zielweite von 105m, liegt das ZDL700 in dieser Kategorie im Spitzenfeld, allerdings beträgt die minimale Zielweite dafür nur 2m. Der Kompensationsbereich ist mit $\pm 10''$ zusammen mit den Instrumenten von Leica außerdem etwas kleiner als bei den restlichen Herstellern, zusätzlich soll angemerkt werden, dass das ZDL700 nur bis Temperaturen von -10°C eingesetzt werden kann.



Abbildung 3.9: ZDL700 (Geomax, 2011)

Tabelle 10: Spezifikationen^a des
ZDL700
(Stand: Okt. 2011)

ZDL700	
Genauigkeit	
Höhenmessung ^b [mm/ \sqrt{km}]	0.7
Distanz <10m [mm]	10
Distanz >10m	0.1% × D
Messdauer	<3s
Auflösung	
Höhenmessung [mm]	0.1
Distanz [mm]	1
Zielweite elektronisch [m]	2-105
Kompensator	
Art	Pendel
Dämpfung	magnetisch
Kompensationsbereich [']	±10
Genauigkeit [']	0.35
Fernrohr	
Sehfeld	2°
Objektivöffnung [mm]	36
Vergrößerung	24-fach
Horizontalkreis	Ja
Datenspeicherung	Ja
Schnittstellen	RS232
Gewicht [kg]	2.55
Arbeitstemperatur [°C]	-10 - +50

^a Quellen: Geomax (2009)

^b STD für 1km Doppelliniennivellement
nach ISO 17123-2

3.10 Zusammenfassung der technischen Spezifikationen

Neben den zuvor offengelegten Spezifikationen der einzelnen Instrumente gibt es weitere wichtige Parameter, welche den Bildsensor und die Optik beschreiben. Diese Angaben mögen für den Anwender in der Praxis keine Rolle spielen, für diverse Untersuchungen im Messlabor ist deren Kenntnis jedoch von essentieller Bedeutung.

Diese Parameter sind jedoch nicht in den Broschüren und Manuals der Instrumente ersichtlich, deshalb konnten - abgesehen vom SDL30 von Sokkia - keinerlei Angaben zu diesen Parametern sämtlicher Hersteller gefunden werden. Daher sei für einen Überblick auf Woschitz (2003, S. 42) verwiesen, welcher die Parameter für die Instrumente von Leica, Trimble und Topcon zusammenstellte. Anzumerken ist jedoch, dass sich die Angaben für die Instrumente von Trimble und Topcon dabei auf Instrumente beziehen, welche offiziell nicht mehr vertrieben werden.

Für einen besseren Überblick wurden die Angaben zu den einzelnen Instrumenten in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Technische Spezifikationen der Instrumente

	DNA03 ^a	DL101C ^a	DiNi12 ^a	SDL30 ^b	andere Hersteller
Anzahl der Pixel	456	600	1800	1800	k.A.
Pixelgröße [μm]	14	11	14	8	k.A.
Brennweite [mm]	185	500	292	~275	k.A.
Spektralbereich [nm]	730	280	550	NIR	k.A.

^a Quelle: Woschitz (2003, S.42)

^b Quelle: Rüeger und Brunner (2000), Seto und Chiba (2000)

Auch für das SDL1X konnten trotz umfangreicher Recherchen und diverser Anfragen beim Hersteller (auf die nicht geantwortet wurde) keine Informationen zu diesen Parametern ermittelt werden. Deshalb mussten nachfolgend einige Annahmen getroffen, werden um Untersuchungen durchführen zu können, bzw. um die Größe dieser Parameter bestimmen zu können.

3.11 Abschließende Betrachtung

Allgemein bleibt zu sagen, dass alle Hersteller nahezu gleichwertige Produkte vertreiben. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal ist sicherlich die erzielbare Genauigkeit. Daneben sind es einzelne Zusatzeinrichtungen bzw. Schnittstellen, welche die Nivelliere gegenüber der Konkurrenz hervorheben.

Auch die Digitalnivelliere der chinesischen Hersteller, sowie das Instrument von Geomax stehen zwar laut Spezifikationen ihrer Konkurrenz um nichts nach, abgesehen von den Spezifikationen sind jedoch größtenteils keine weiteren Informationen zugänglich. Außerdem ist meist nicht ersichtlich, wie die diversen Genauigkeitsangaben ermittelt wurden. Weiters konnten bei einer umfangreichen Recherche keine Erfahrungsberichte oder etwaige Untersuchungen zu den Instrumenten eruiert werden. Es bleibt daher abzuwarten wie sich diese Digitalnivelliere in der Praxis bewähren.

Hingegen sind für die Digitalnivelliere von Leica, Sokkia, Trimble und Topcon umfangreiche Dokumentationen vorhanden und auch deren Codefolge ist bekannt (vgl. Staiger und Deumlich, 2001). Zusätzlich sind für einige Instrumente dieser Hersteller wichtige technische Parameter bekannt, welche für diverse Untersuchungen im Labor benötigt werden, diese sind allerdings für den Anwender in der Praxis kaum von Bedeutung.

4 Sokkia SDL1X

4.1 Aufbau des Instruments

Das SDL1X ist in zwei Ausführungen erhältlich, der Standard- sowie der Advanced-Version. Diese beiden Ausführungen sind grundsätzlich baugleich, jedoch ist in der Standard-Version kein Autofokus implementiert, außerdem fehlt der View Finder. Der Aufbau des Instruments ist in einem „White Paper“ des Instruments (Sokkia, 2011b) ersichtlich. Daneben können die einzelnen Bestandteile dem deutschen Patent für den Autofokus (Nishita et al., 2006) entnommen werden. Daraus resultierend wurde ein Schnittbild des SDL1X (Advanced) erstellt (siehe Abbildung 4.1). Dieses wurde um einen Umriss des Gehäuses des SDL1X Advanced erweitert, außerdem wurde der Aufbau der Elektronik, sowie das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten für ein besseres Verständnis zusammengefasst.

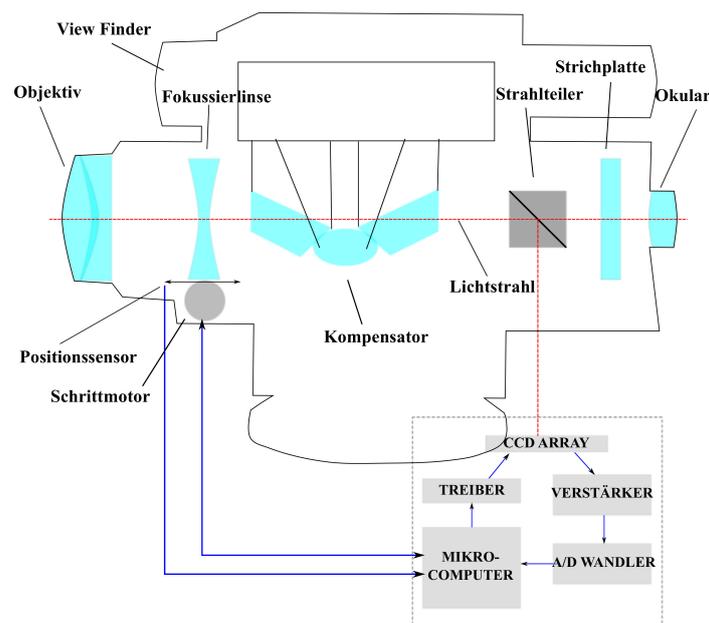


Abbildung 4.1: Schnittbild des Sokkia SDL1X Advanced (nach Sokkia, 2011b und Nishita et al. 2006)

Wie bei allen Digitalnivellieren wird auch beim SDL1X ein Strahlteiler eingesetzt, um einerseits eine optische Ablesung zu ermöglichen und andererseits das Bild des Latencodes auf den Bildsensor abzubilden. Als Bildsensor wird ein CCD-Array eingesetzt (Sokkia, 2009, S. 91). Die Pixelgröße, sowie die Anzahl der Pixel werden vom Hersteller

nicht bekanntgegeben.

Der Mikrocomputer kann als Herzstück des SDL1X angesehen werden, in welchem alle Informationen zusammenfließen und gemeinsam ausgewertet werden. Der Mikrocomputer ist so nicht nur für die Berechnung von Höhe und Distanz zuständig, sondern er ist auch mit dem Positionssensor der Fokussierlinse verbunden, außerdem wird durch ihn der Schrittmotor gesteuert, welcher die Fokussierlinse schrittweise verschiebt.

Abbildung 4.2 zeigt das bei den Untersuchungen verwendete SDL1X Advanced mit dessen wichtigsten Komponenten und Schnittstellen.

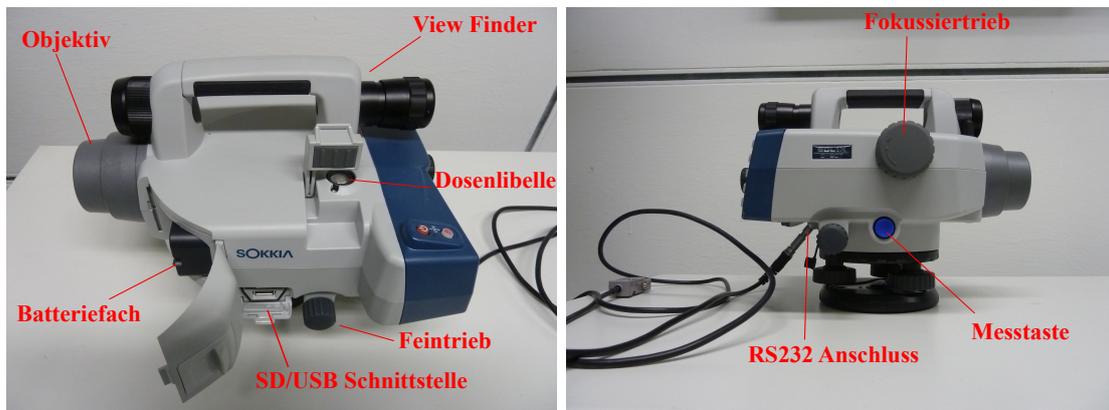


Abbildung 4.2: Komponenten und Schnittstellen des SDL1X Advanced

4.2 Lattencode von Sokkia

Für die automatische Höhenablesung und Distanzmessung wird auf den Latten ein patentierter Code angebracht (Chiba, 1999). Dieser wird im nachfolgenden näher beschrieben. Zusätzlich wurde im Zuge dieser Masterarbeit die gesamte Codefolge für den Bereich von 0-5m bestimmt (siehe Anhang C). Dabei wurden neben den Breiten der einzelnen Codeelemente ebenso deren Position auf der Latte ermittelt, die Codefolge kann dem Anhang (siehe Tabelle C.1) entnommen werden.

4.2.1 Aufbau des Codes

Wie auch bei den Lattencodes der anderen Hersteller funktioniert die automatische Höhenablesung durch die Eindeutigkeit des Codes. Ein Teil des Codes wird vom Bildsensor des Instruments erfasst und ausgewertet. Dabei ist gewährleistet, dass jeder Abschnitt

des Codes einzigartig ist, d.h. ein Teil des Codes kann nie mit einem anderen Teil des Codes ident sein und daher nicht verwechselt werden.

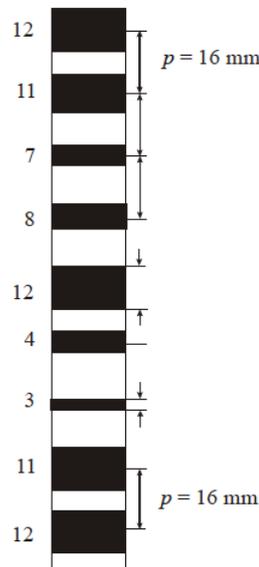


Abbildung 4.3: Aufbau des Lattencodes von Sokkia (Staiger und Deumlich, 2001)

Abbildung 4.3 zeigt den geometrischen Aufbau des Lattencodes von Sokkia. Der Abstand zwischen den Mitten zweier Codeelemente beträgt stets $p=16\text{mm}$, es gibt sechs verschiedene Breiten (3mm, 4mm, 7mm, 8mm, 11mm und 12mm). Die Auswertemethode von Sokkia besitzt die besondere Eigenschaft, dass je nach Distanz zwischen Latte und Instrument eine bestimmte Codefolge angewandt wird. Man unterscheidet hierbei zwischen einem Nahbereich (N) und einem Fernbereich (F). Die Eindeutigkeit des Codes ist dabei durch mindestens 5 Codeelemente für den Nahbereich bzw. mindestens 8 Elemente für den Fernbereich gegeben. Der Wechsel zwischen den beiden Bereichen erfolgt laut Hersteller bei rund 9m (Chiba, 1999). Im Nahbereich werden die verschiedenen Codeelemente im Mikrocomputer des Instruments mit den sechs ganzen Zahlen 0-5 in Übereinstimmung gebracht. Im Fernbereich ist aufgrund der oft großen Distanzen eine Unterscheidung zwischen den ähnlich breiten Codeelementen nicht mehr möglich. Diese werden daher paarweise zusammengefasst und diesen nur mehr drei Zahlen (0-2) zugewiesen (Seto et al., 1999). Als Beispiel werden die obersten fünf Elemente (von oben nach unten) aus Abbildung 4.3 für den Nahbereich in die Folge [5,4,3,2,5] umgesetzt, für den Fernbereich lautet die Folge [2,2,1,1,2].

Die verschiedenen Codeelemente und deren Einteilung kann Abbildung 4.4 entnommen werden.

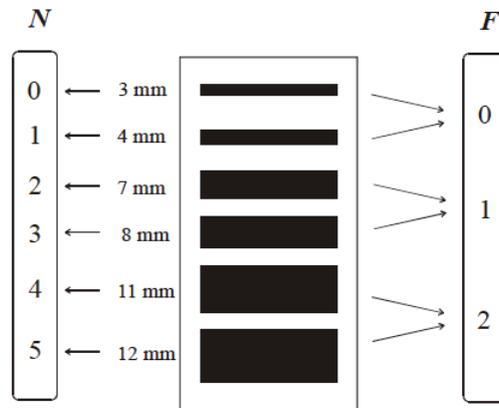


Abbildung 4.4: Codeelemente und deren Einteilung (Staiger und Deumlich, 2001)

4.2.2 Invertierbarkeit der Latte

Ein weiteres besonderes Merkmal des Sokkia-Lattencodes ist die Invertierbarkeit des Codes. Dies bedeutet, dass die Latte auch verkehrt verwendet werden kann und beispielsweise aufgehängt werden kann. Auch wenn die Latte verkehrt montiert ist, ist noch immer die Einzigartigkeit eines Teilabschnittes des Codes gewährleistet (Chiba, 1999). Ist die Latte verkehrt montiert, so wird der Mikrocomputer beim Vergleich zwischen dem Abschnitt und der gespeicherten Reihenfolge keine Übereinstimmung finden. Nun wird die interne Reihenfolge invertiert und ein erneuter Vergleich durchgeführt. Findet nun eine Übereinstimmung statt, so erkennt der Mikrocomputer, dass die Latte verkehrt montiert ist und die entsprechende Höhe wird mit negativem Vorzeichen ausgegeben.

4.2.3 Verdeckte Codeelemente

Ist ein Element des Codes verdeckt, so kann das Instrument dennoch eine Höhenablesung durchführen. Dazu werden allerdings die nachfolgenden Elemente benötigt, das verdeckte Element wird ausgelassen. Nimmt man die Beispielfolge aus Abschnitt 4.2.1 und nimmt beispielsweise an, dass das dritte Element verdeckt ist, so ändert sich diese Folge für den Nahbereich zu $[5,4,*,2,5,1]$. Man erkennt hier, dass das dritte Element

nicht berücksichtigt wird, dafür wird ein weiteres Element zur Auswertung hinzugezogen.

4.3 Distanz- und Höhenberechnung

Der Ablauf zur Distanzberechnung des SDL1X ist im Patent zur Autofokusfunktion gegeben (Nishita et al., 2006). Die Distanz zwischen Instrument und Latte wird demnach über eine Beziehung zwischen dem Grundintervall des Codes und dessen Projektion auf das CCD-Array bestimmt. Das mittels CCD Sensor erfasste Bild des Lattencodes wird zunächst über einen A/D Wandler in ein digitales Signal umgewandelt und im RAM des Mikrocomputers gespeichert. Dieses Signal wird anschließend ausgewertet, die Peaks dieses kontinuierlichen Signals entsprechen dabei den Mitten der jeweiligen Codeelemente. Aus diesen Abständen wird eine Periodenlänge bestimmt. Dies wird in Abbildung 4.5 verdeutlicht, T entspricht dabei der Periodenlänge, $S1$ entspricht dem kontinuierlichen Signal des Lattencodes.

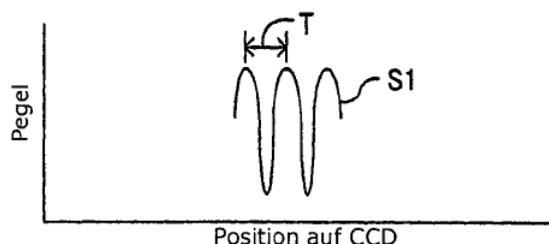


Abbildung 4.5: Ausschnitt eines Signals, Distanzberechnung über eine Periodenlänge (Nishita et al., 2006)

Setzt man diese Periodenlänge mit dem Grundintervall des Codes (16mm) in Beziehung, so kann die Distanz zwischen Instrument und Latte bestimmt werden.

Die Höhenberechnung erfolgt ebenfalls über die Auswertung des erfassten Signals, allerdings wird dabei nicht die Stärke des Signals, sondern die Existenz der einzelnen Codeelemente berücksichtigt (Seto und Chiba, 2000). Dabei wird die einzelne Breite jedes Codeelements bestimmt und somit kann eine Codefolge, welche dem mittels CCD Sensor erfassten Lattenabschnitt entspricht, festgelegt werden (Chiba, 1999), dies ermöglicht auch eine Berechnung der Höhe, wenn einzelne Codeelemente verdeckt sind. Die Codefolge wird anschließend entsprechend Abbildung 4.4 eingeteilt. Die gesamte Codefolge der Latte ist zusätzlich im ROM des Mikrocomputers gespeichert. Nun

wird bestimmt, mit welchem Teil der gespeicherten Codefolge die Codefolge des erfassten Lattenabschnitts übereinstimmt, danach kann die Höhe bestimmt werden (Chiba, 1999, S. 5-6).

Während die Algorithmen zur Höhenberechnung für die Hersteller Leica, Topcon und Trimble offengelegt wurden (siehe z.B. Woschitz, 2003), bleibt indes unklar, welche Methode Sokkia anwendet, um die Breiten der Codeelemente zu bestimmen, auch ist nicht bekannt wie die absolute Höhe der Ziellinie innerhalb dieses Codeabschnitts bestimmt wird. Seto et al. (1999) beschreiben diese Höhenberechnung als lineare Regression, der detaillierte Algorithmus, welcher dieser Höhenberechnung tatsächlich zugrunde liegt, ist indes nicht klar.

4.4 Autofokusfunktion

Das SDL1X verfügt in seiner Advanced Version als erstes Digitalnivellier am Markt über eine Autofokusfunktion. Diese patentierte Funktion ermöglicht laut Hersteller eine enorme Zeitersparnis von bis zu 40% (siehe Abschnitt 3.4). Der Hersteller bezeichnet diese Methode der Autofokusfunktion als „Kombination von passiver/elektronischer Distanzmessung und Kontrastdetektion“ (Sokkia, 2009).

Nachfolgend wird das Funktionsprinzip des Autofokus näher erklärt (Nishita et al., 2006).

Wird eine Messung über die Messtaste ausgelöst, so wird die Fokussierlinse bis zum äußersten Ende ihres Bewegungsbereichs nahe dem Okular verschoben und so eine Fokussierung auf Unendlich durchgeführt. Nun wird die Linse schrittweise zurück verschoben und die jeweilige Position über den Positionsdetektor festgestellt. Dabei wird stets das Signal, welches vom Bildsensor erfasst und verarbeitet wird und dessen Frequenz mit der Position der Fokussierlinse variiert, ausgegeben. Dieses Signal wird vom Mikroprozessor überwacht und ein Schwellwert wird festgelegt. Je näher die Linse der Fokussierposition kommt, desto kontinuierlicher wird das Signal und desto höher werden die Peaks. Überschreitet das Signal nun den festgelegten Schwellwert, so befindet sich die Linse in einer näherungsweisen Fokussierposition.

Über den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Algorithmus kann nun die Entfernung zwischen Instrument und Latte berechnet werden. Anschließend erfolgt eine Neupositionierung der Fokussierlinse, wobei die Linse in Fokussierposition angesehen wird, wenn die Differenz zwischen Fokussierposition und Position der Fokussierlinse Null ergibt (Nishita

et al., 2006, S. 8). Die exakte Fokussierposition wird dabei über die zuvor berechnete Distanz in Beziehung gesetzt (siehe Abbildung 4.6).

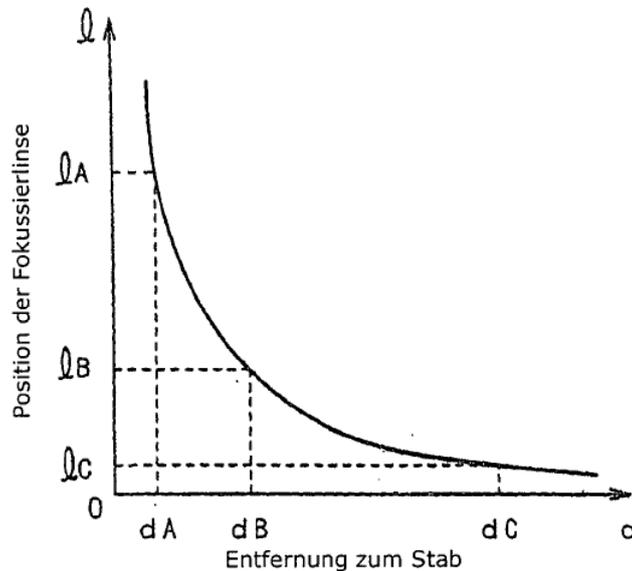


Abbildung 4.6: Beziehung zwischen Fokussierposition und Distanz (Nishita et al., 2006)

Sind weitere Objekte im Umkreis der Latte vorhanden, so kann dies zu Problemen bei der Bestimmung der Fokussierposition führen. Um dem entgegenzusteuern wird einerseits eine Bandpassfilterung eingeführt, welche die kontinuierlichen Frequenzkomponenten extrahiert, die dem Hell/Dunkel Muster der Latte entsprechen. Außerdem wird ein gleitender Mittelwert der noch vorhandenen Signale durchgeführt, da auch nach der Bandpassfilterung noch Störfrequenzen auftreten können. Diese Mittelwertberechnung liefert hohe Werte für das kontinuierliche Signal des Lattencodes, andere Signalbereiche dagegen weisen nur einen kleinen Wert nach der Mittelwertbildung auf und können somit von der Auswertung ausgeschlossen werden. Doch auch hier können noch Restfrequenzen auftreten, welche vor allem von sehr hellen Objekten im Umkreis der Latte stammen und zu einer falschen Fokussierung führen können. Deshalb wird im Anschluss an die Mittelwertbildung ein Lichtintensitätskorrekturkoeffizient eingeführt, um die gleitenden Mittelwerte korrigieren zu können und die tatsächliche Fokussierposition erhalten zu können (Nishita et al., 2006, S. 10-11).

Abbildung 4.7 zeigt ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise des Autofokus erläutert.

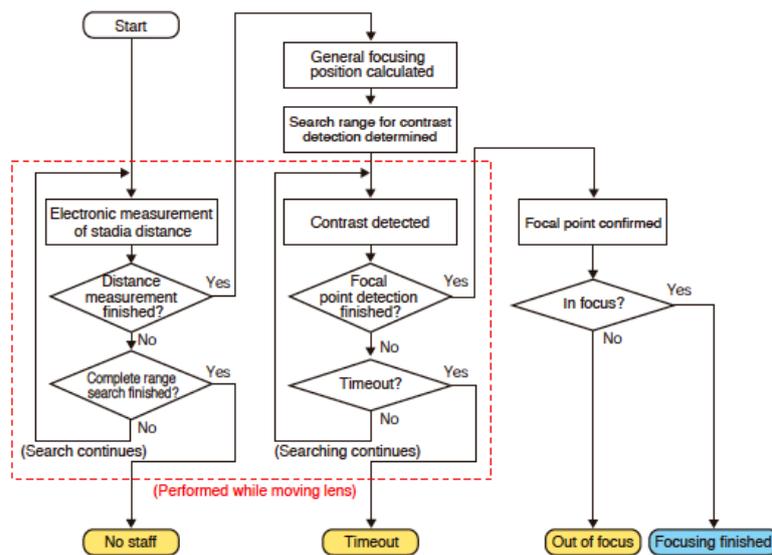


Abbildung 4.7: Flussdiagramm der Autofokusfunktion (Sokkia, 2011b)

4.5 Software

Die Software eines Instruments ist beinahe so wichtig wie das Instrument selbst. Der Hersteller sollte dabei auf eine einheitliche und übersichtliche Menüführung setzen, zugleich jedoch eine möglichst große Anzahl an Einstellungsmöglichkeiten bieten, um einen vielfältigen Einsatz des Instruments zu gewährleisten.

Allgemein bleibt zu sagen, dass der Menüaufbau des SDL1X sehr übersichtlich ist und so eine relativ einfache Bedienung gewährleistet ist. Diese ist in Abbildung 4.8 grafisch dargestellt. Die Bedienung läuft flüssig und auch die einzelnen Mess- und Justierprogramme haben einen klaren und einfachen Ablauf, somit eignet sich das Instrument auch für den ungeübten Anwender.

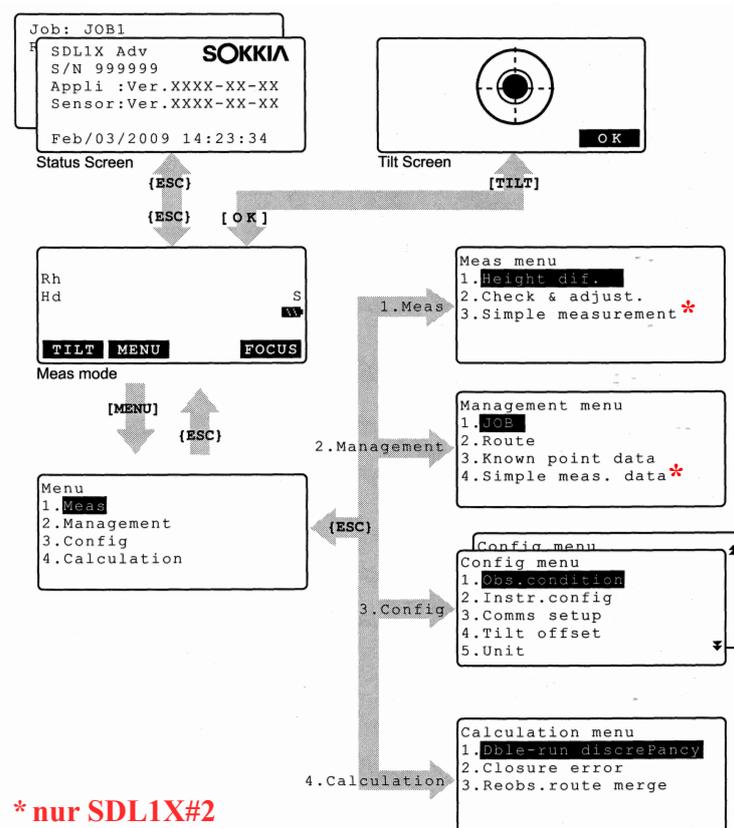


Abbildung 4.8: Softwareaufbau des SDL1X (Sokkia, 2009)

Besonders positiv hervorzuheben ist der Ablauf des „Routen-Messprogramms“. Zu Beginn dieses Programms ermöglicht der Hersteller die Eingabe von oberen und unteren Grenzwerten für die Höhen- und Distanzmessung, sowie einen Grenzwert für die Differenz aus Rück- und Vorblickdistanz. Somit können sehr einfach zu große/kleine Distanzen vermieden werden und dem Beobachter bleiben diverse Abschätzungen im Feld (Lattenendbereiche, Nivellement aus der Mitte) erspart.

Abgesehen davon gibt es jedoch einige Kritikpunkte, die den ansonsten recht guten Eindruck der Software trüben.

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden zwei SDL1X Advanced eingesetzt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Verwendete Instrumente

Bezeichnung	SN	App. Vers.	Sensor Vers.
SDL1X#1	100244	1056-30-21	1056-91-11
SDL1X#2	100299	1056-31-25	1056-91-12

Das erste Instrument wird nachfolgend mit SDL1X#1 bezeichnet, das zweite Instrument wird von nun an mit SDL1X#2 bezeichnet.

4.5.1 Speicherung von Einzelmessungen

Zunächst wurden Untersuchungen mit SDL1X#1 durchgeführt. Mit der darauf installierten Software (siehe Tabelle 12) war es nicht möglich eine einzelne Höhenablesung zu speichern. Dies wirkte sich vor allem negativ auf die ersten Untersuchungen mit dem Instrument aus. Da hier noch kein Ansteuerbefehl für die serielle Schnittstelle vorhanden war, mussten die Messwerte somit händisch abgeschrieben werden, um erste Ergebnisse zu erhalten. Hier hat der Hersteller jedoch bereits nachgebessert und bietet bei SDL1X#2 einen weiteren Menüpunkt an („Simple measurement“), welcher die schnelle Ausführung und Speicherung von einzelnen Höhenablesungen ermöglicht.

4.5.2 Messung im Average-Modus

Ein weiterer Kritikpunkt bezieht sich auf den Messmodus „Average“. Dieser ermöglicht die Bildung eines Mittelwerts aus einer beliebigen Anzahl an Einzelmessungen. Dieser Modus wird häufig in der Praxis eingesetzt, da dadurch einzelne Ausreißer schnell detektierbar sind und durch die Streuung der Messwerte die Güte der Höhenablesung festgelegt werden kann.

Allerdings werden bei Sokkia nur die einzelnen Messwerte angezeigt, am Ende der Mittelwertbildung steht der Mittelwert selbst am Display, eine Genauigkeitsangabe, beispielweise in Form einer Standardabweichung ist jedoch nicht ersichtlich. Dies hat zur Folge, dass der Beobachter wiederum jeden einzelnen Messwert am Display ablesen muss, um eventuelle Ausreißer erkennen zu können und eine eventuell zu große Streuung der Messwerte feststellen zu können. Um diesen Makel zu verdeutlichen, ist nachfolgend das Ergebnis einer Messung mittels SDL1X dem Ergebnis einer Messung mit

dem Leica DNA gegenüber gestellt (siehe Abbildung 4.9). Während beim SDL1X außer einer Distanz und Höhe keinerlei Information dargestellt wird, werden beim DNA neben der Standardabweichung der Einzelmessung und des Mittelwerts auch die Streuung der Messwerte angegeben.

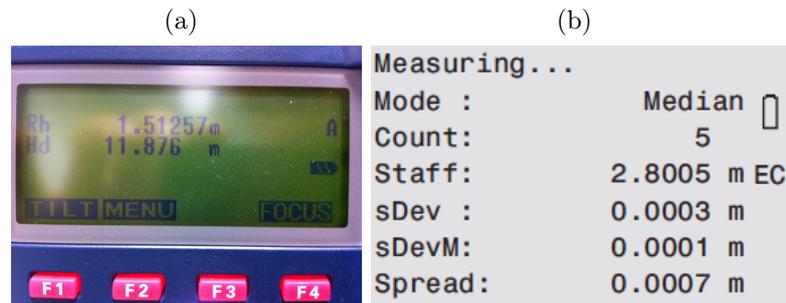


Abbildung 4.9: Darstellung im Average-Modus: (a) SDL1X, (b) DNA03/10 (Leica 2006b)

Dieser Kritikpunkt kann jedoch mit einem einfachen Softwareupdate des Herstellers behoben werden, es bleibt zu hoffen, dass Sokkia auch hier nachbessert.

4.5.3 Speicherung von Messdaten

Innerhalb des Konfigurationsmenüs lassen sich verschiedenste Beobachtungsparameter, wie zum Beispiel die Anzeigegenauigkeit der Distanz- und Höhenmessung, sowie der Speicherort (intern, SD-Karte) festlegen. Zusätzlich findet sich hier der Menüpunkt „Rec cond.“. Es wurde vermutet, dass sich dahinter die Option zur Speicherung von diversen Parametern wie Temperatur und Bewölkungsgrad, welche zu Beginn einer Messroute händisch eingegeben werden können, verbirgt. Tatsächlich bietet sich hier jedoch die Option, die Speicherung sämtlicher Messdaten auszuschalten. Es ist fraglich, warum der Hersteller diese Möglichkeit überhaupt erst anbietet und diese dazu unter solch einem widersprüchlichen Namen integriert.

4.5.4 Messdauer der Einzelmessung

Die Messdauer einer Einzelmessung liegt laut Hersteller unter 2.5 Sekunden (Sokkia, 2009). In diversen Untersuchungen konnte diese Angabe bestätigt werden, teilweise erfolgten die Messungen sogar in einer Zeit von knapp zwei Sekunden (allerdings ohne

Autofokus). Damit liegt das SDL1X verglichen mit der Konkurrenz im Spitzenfeld (vgl. Kapitel 3).

Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich hingegen, wenn Messungen nicht registriert werden können. Sei es beispielsweise aufgrund von Messungen im extremen Lattenendbereich oder durch Sichthindernisse. Hierbei benötigt das Instrument knapp 16 Sekunden um eine Fehlermeldung auszugeben. Für Praxisanwendungen ist dies eine deutlich zu große Zeitspanne, um ein effizientes Arbeiten zu ermöglichen. Es wäre wünschenswert, wenn der Hersteller hier eine etwas kürzere Dauer bis zum Abbruch einer Messung festlegen würde.

5 Messlabor und Aufbau des Systems

5.1 Messlabor

Das geodätische Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme befindet sich im Gebäude der Steyrergasse 30. Das Labor ist über eine Klimaschleuse zugänglich und bietet stabile Umgebungsbedingungen. Um schwankenden Lichteinfall und damit mögliche Temperaturänderungen zu vermeiden, sind im gesamten Labor alle Fenster abgedeckt. Weiters ist das Fundament des Labors völlig vom Rest des Gebäudes abgekoppelt, sodass Temperatur, Wind oder Verkehr, welche sich auf das Gebäude selbst auswirken, kaum Einflüsse auf Messungen im Labor nehmen.

5.2 Vertikalkomparator

Der Vertikalkomparator ermöglicht einerseits die Systemkalibrierung, außerdem können weitere Untersuchungen (z.B. Messungen der Lattenenden) des Messsystems durchgeführt werden. Der Aufbau ist detailliert durch Woschitz (2003, S. 97ff.) beschrieben und seitdem im Wesentlichen unverändert. Nachfolgend sind einige Abbildungen ersichtlich, welche die wesentlichen Bestandteile zeigen. Abbildung 5.1 zeigt die Halterung für das Instrument, welche auf einer 30m langen Betonbank aufsitzt und darauf verschoben werden kann.

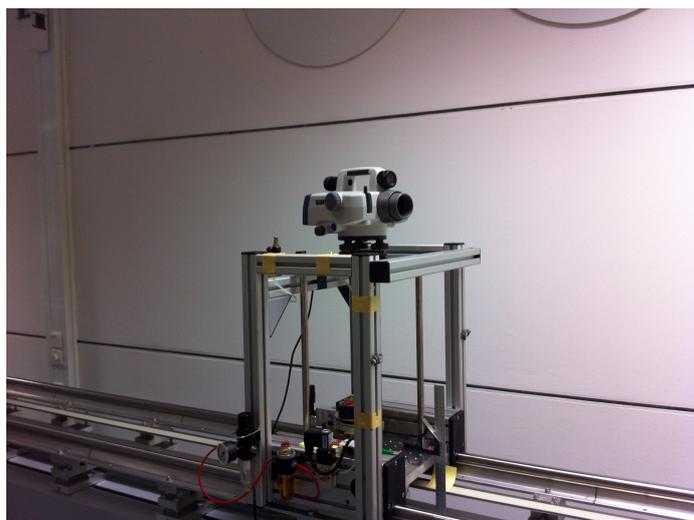


Abbildung 5.1: Halterung für das Nivellier

Abbildung 5.2 zeigt die Lattenhalterung, samt BIS20 Invarlatte. Diese Halterung kann vertikal über einen Motor verschoben werden, um so verschiedenste Höhenablesungen zu ermöglichen.

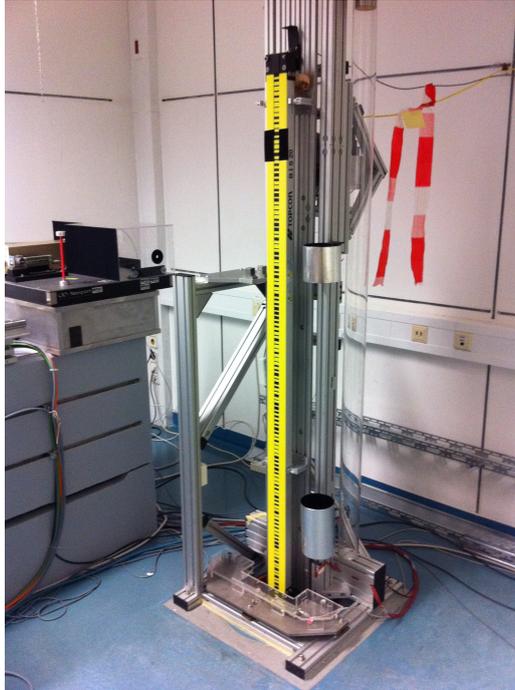


Abbildung 5.2: Halterung für die Latte

Sämtliche Untersuchungen wurden mit einer Lattenbeleuchtung, bestehend aus vier PAR38-Lampen durchgeführt (siehe Abbildung 5.3). Zwei davon sind seitlich an der Wand montiert, die beiden anderen Latten sind an der Decke positioniert. Durch ihre Ausrichtung wird eine homogene Beleuchtung der Latte gewährleistet und somit der Einfluss von wechselnden Lichtverhältnissen auf das Messergebnis minimiert.



Abbildung 5.3: Zusatzbeleuchtung für Latte bestehend aus PAR38-Lampen

Da die Messunsicherheit des Komparators nur $2.7\mu\text{m}$ beträgt (Woschitz und Brunner, 2003), kann dieser gegenüber einem Digitalnivellier als Messsystem höherer Genauigkeit festgelegt werden.

5.3 Verwendetes Instrumentarium

Für die Durchführung der Versuche wurden zwei Instrumente von der Firma Geodis Austria leihweise zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 12), zusätzlich wurden verschiedene Latten zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Verwendete Latten

Bezeichnung	SN	Länge [m]	Typ	Hersteller
BIS20#1	1544112	2m	Invarlatte	Nedo
BIS20#2	056065	2m	Invarlatte	Nedo
BAS55	100255	5m	Teleskoplatte	k.A.

Zunächst erfolgten Untersuchungen mit SDL1X#1 sowie BIS20#1. Mit diesem System wurden zunächst Untersuchungen zu den Lattenendbereichen, sowie zu den Aufheizeffekten durchgeführt. Alle anschließenden Untersuchungen wurden mit SDL1X#2 durchgeführt. Dabei wurden die Latten BIS20#2 sowie BAS55 verwendet.

Während die beiden BIS20-Latten laut Lieferschein von Nedo hergestellt werden, ist unklar, von welcher Firma die Teleskopplatte hergestellt wird.

5.4 Kommunikations- und Instrumentenparameter

Die Einstellungen der Kommunikationsparameter für die RS232-Schnittstelle sind in Tabelle 14 für die Vertikalkomparatorsoftware bzw. in Tabelle 15 für das SDL1X ersichtlich.

Tabelle 14: Kommunikationsparameter der Komparatorsoftware

Parameter	Einstellung
Baud rate	9600bps
Parity	Even
data bit	8
stop bit	0

Tabelle 15: Kommunikationsparameter des Instruments

Parameter	Einstellung
Mode	RS232C
Baud rate	9600bps
Parity	Even
Xon/Xoff	No
STX/ETX (CSV)	No

Um Messungen automatisch auslösen und speichern zu können, müssen diverse Steuerbefehle eingegeben werden. Für das SDL1X sind diese nicht dokumentiert und es ist weiterhin unklar, ob diese vom Hersteller freigegeben werden, auf Anfragen wurden nämlich keine Antworten erhalten. Deshalb mussten zu Beginn der Untersuchungen Messungen manuell (mit Hilfe der Fernbedienung) ausgelöst werden, zusätzlich mussten die Messwerte händisch abgetippt werden, da SDL1X#1 keine Speicherung von

Einzelmessungen erlaubte (siehe Abschnitt 4.5). Im weiteren Verlauf wurde eine Anfrage für die Steuerbefehle des SDL30 gestellt, diese wurden zugänglich gemacht (Sokkia, 2000a). Dabei zeigte sich, dass diese auch für das SDL1X funktionieren, deshalb konnten die nachfolgenden Untersuchungen detaillierter und effizienter durchgeführt werden. Neben den Kommunikationseinstellungen müssen am Instrument weitere Einstellungen für die Messungen festgelegt werden, diese sind in Tabelle 16 ersichtlich.

Tabelle 16: Instrumentenparameter für Messungen

Parameter	Einstellung
Meas mode	Single
Rec cond.	Yes
SD mirroring	Off
Ht reso.	0.01mm
Dist reso.	0.001m
C&R	No
A.F.setting	No
Tilt warn	Yes

Während der Untersuchungen wurde stets im Einzelmessmodus gemessen, die Auflösungen für Höhen- und Distanzmessung wurden entsprechend festgelegt. Der Autofokus war während der gesamten Untersuchungen ausgeschaltet, um eine erneute Fokussierung je Messposition zu verhindern, da die Autofokusfunktion für die durchgeführten Untersuchungen nicht von Bedeutung war und diese nicht verfälscht werden sollten.

5.5 Stromversorgung

Während der Untersuchungen im Labor stand keine externe Stromversorgung zur Verfügung. Für SDL1X#1 wurde nur ein Akku mitgeliefert, weshalb die Untersuchungen entsprechend eingeschränkt waren, da nach Beendigung einer umfangreicheren Messung der Akku neu aufgeladen werden musste. Für SDL1X#2 wurden zwei Akkus mitgeliefert. Deshalb konnten hier entsprechend intensivere Untersuchungen durchgeführt werden.

6 Erste Untersuchungen zum Verhalten des SDL1X

6.1 Aufheizeffekte

Aufgrund der Eigenerwärmung verschiedenster Bauteile des Instruments kann auch nach vollständiger Akklimatisierung eine Ziellinienänderung auftreten. Als Beispiel sei hier auf Woschitz (2005) verwiesen, welcher Untersuchungen für Instrumente von anderen Herstellern durchführte.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden Untersuchungen zu Messungen in den Lattenendbereichen mit SDL1X#1 durchgeführt. Um mögliche Aufheizeffekte minimieren zu können, wurde das Instrument dabei ca. eine halbe Stunde vor Beginn der Messungen eingeschalten, trotzdem konnten Driften festgestellt werden (siehe Abschnitt 6.2). Daher wurde angenommen, dass das Instrument eine weitaus längere Aufwärmzeit als angenommen benötigt. Nachfolgend wurde daher eine Messung zur Bestimmung dieses Effektes durchgeführt.

Änderungen der Meteorologie (insbesondere Temperaturänderungen) wirken sich auf die erzielbare Genauigkeit des Messsystems aus. Bei Digitalnivellieren sind dadurch Änderungen der Ziellinie von einigen Altsekunden bemerkbar (Woschitz, 2005). Um meteorologiebedingte Änderungen der Ziellinie ausschließen zu können, wurden deshalb für die nachfolgenden Versuche im Labor nach einer Empfehlung von Rüeger und Brunner (2000) Instrument und Latte mindestens acht Stunden vor Beginn einer Messung im Labor gelagert, welches ein annähernd stabiles Klima bietet.

6.1.1 Ergebnisse SDL1X#1

Um mögliche Aufheizeffekte des Instruments durch die Zusatzbeleuchtung des Komparators ausschließen zu können, wurden die Lampen 24 Stunden vor Messbeginn eingeschalten, da diese sich nach dem Einschalten etwas erwärmen. Außerdem wurde das Instrument bereits am Vortag an seiner späteren Messposition montiert, um weitere systematische Effekte ausschließen zu können.

Die Messung selbst bestand aus einer Dauermessung von mehr als fünf Stunden (entspricht 7500 Einzelmessungen), wobei die Latte am Vertikalkomparator in fixer Position angebracht war. Das Instrument wurde erst wenige Sekunden vor Messbeginn eingeschalten und befand sich in einer Entfernung von 29m von der Latte.

Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.1 ersichtlich. Die einzelnen Messwerte wurden dabei um den Mittelwert der letzten Messwerte reduziert. Die Einzelmessungen sind dabei grau dargestellt, für eine Rauschreduktion wurde ein gleitender Mittelwert über je 10 Messwerte berechnet.

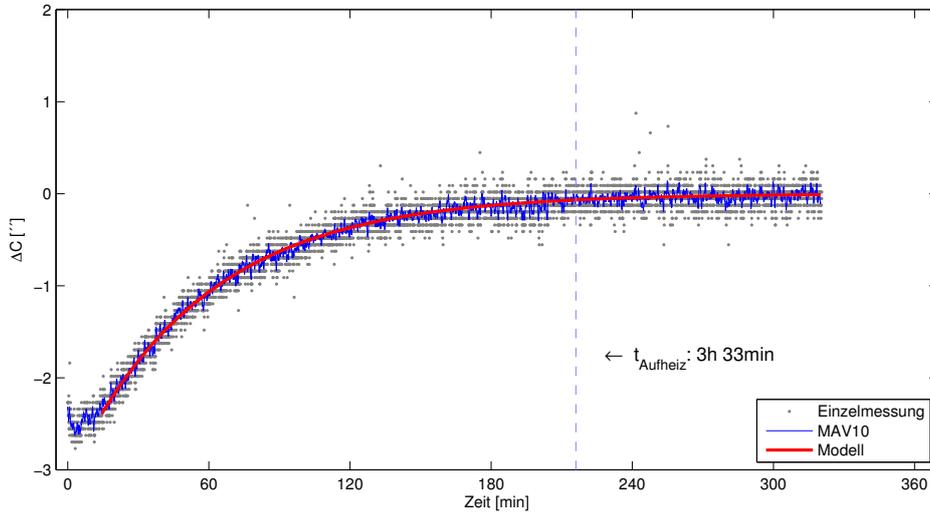


Abbildung 6.1: Aufheizeffekte von SDL1X#1

Am Beginn der Zeitreihe ist ersichtlich, dass die Ziellinie in den ersten Minuten absinkt, was auf eventuelle Inhomogenitäten beim Aufheizverhalten der einzelnen Bauteile schließen lässt, da anschließend die Ziellinie wieder steigt. Vernachlässigt man diese ersten paar Minuten, so kann an den weiteren Bereich der Zeitreihe ein Messsystem erster Ordnung (siehe z.B. Brunner, 2008) modelliert werden. Dies ist in Formel 6.1 ersichtlich.

$$T = T_u + C * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (6.1)$$

T entspricht dabei dem Modell, T_u dem Grenzwert der Annäherung des Modells, t der Zeit und τ beschreibt die Zeitkonstante des Messsystems.

Anschließend kann die Aufwärmzeit des Instruments bestimmt werden. Dabei wurde angenommen, dass das Instrument vollständig aufgewärmt ist, sobald die Änderung des Modells unter der Messauflösung des Instruments liegt (siehe Formel 6.2).

$$t_{Aufheiz} := |T - T_u| < 0.01mm \quad (6.2)$$

Es zeigt sich, dass die Aufwärmzeit des Instruments mehr als 3.5 Stunden beträgt. Betrachtet man den Kurvenverlauf, so ist außerdem eine Änderung der Ziellinie von

>2" über den gesamten Messzeitraum sichtbar.

In weiterer Folge wurde ein zweiter Versuch geplant, bei dem eine Klopfeinrichtung verwendet werden sollte, um den Kompensator zwischenzeitlich anzuregen und so einen Einsatz im Feld zu simulieren. Bevor diese Messung jedoch durchgeführt werden konnte, musste SDL1X#1 wieder an die Firma Geodis Austria zurückgegeben werden und stand danach nicht mehr zur Verfügung.

6.1.2 Ergebnisse SDL1X#2

Da sich die lange Aufwärmzeit von SDL1X#1 negativ auf die ersten Untersuchungen auswirkte, wurde mit SDL1X#2 als erstes die Aufwärmzeit neu bestimmt, um die weiteren Untersuchungen nicht zu verfälschen. Zunächst wurde ein identer Versuchsaufbau wie mit SDL1X#1 vorgenommen und eine Dauermessung von mehreren Stunden durchgeführt (10500 Einzelmessungen). Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.2 ersichtlich, für einen besseren Vergleich wurde eine gleiche Skalierung wie in Abbildung 6.1 gewählt.

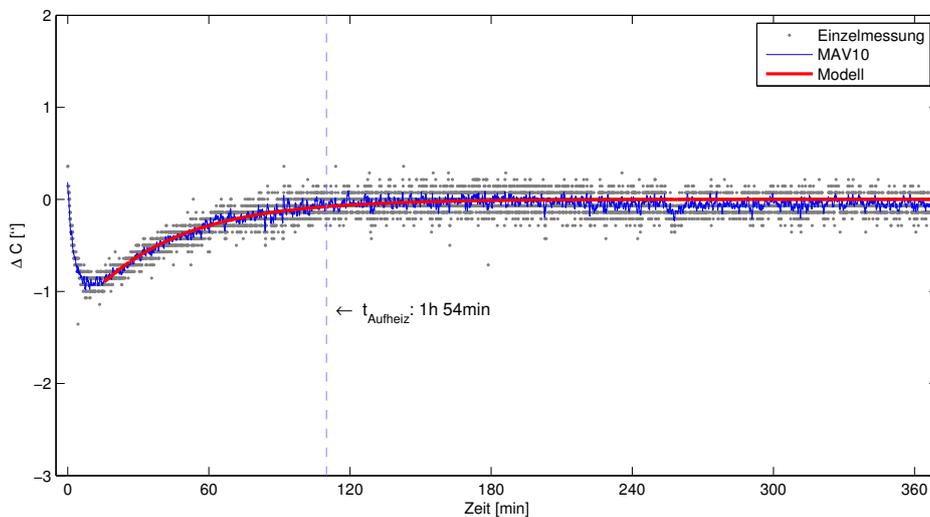


Abbildung 6.2: Aufheizeffekte von SDL1X#2

Vergleicht man Abbildung 6.2 mit Abbildung 6.1, so erkennt man wiederum einen ähnlichen Kurvenverlauf. Zunächst sinkt die Ziellinie rapide, steigt anschließend aber wieder an. Wiederum wurde ein Messsystem 1. Ordnung nach Formel 6.1 an die Kurve angenähert, um anschließend die Aufwärmzeit des Instruments nach Formel 6.2 bestimmen zu

können. Zunächst zeigt sich, dass die Ziellinienänderung gegenüber SDL1X#1 wesentlich kleiner ist und bei SDL1X#2 nur mehr im Bereich von 1" liegt. Zusätzlich liegt die berechnete Dauer, bis keine merkbaren Änderungen der Ziellinie mehr auftreten, bei knapp 2 Stunden und somit deutlich unter der von SDL1X#1. Abgesehen davon zeigt sich eine geringe Senkung der Ziellinie gegen Ende der Messung (nach ca. 4 Stunden), deren Ursache allerdings unklar bleibt.

Um dieses Ergebnis verifizieren zu können, wurde ein weiterer Versuch geplant (siehe Abbildung 6.3). Nun wurde jedoch die Klopfleinrichtung verwendet. Diese löst einen leichten Stoß auf den Nivellierwagen aus und regt somit den Kompensator an. Zunächst erfolgte eine Anregung nach je 60 Einzelmessungen für die ersten knapp 2.5h. Da eine ähnlich lange Aufwärmzeit wie in Abbildung 6.2 vermutet wurde, wurde der Kompensator danach nur mehr alle 120 Messungen angeregt. Die Wartezeit nach erfolgtem Stoß beträgt 10 Sekunden, damit sich der Kompensator wieder einspielen kann. Dadurch kann recht einfach ein Messablauf in der Praxis simuliert werden. Die Messdauer wurde bei dieser Untersuchung jedoch reduziert (8040 Einzelmessungen), da anzunehmen war, dass auch hier keine langzeitigen Änderungen der Ziellinie erfolgen. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.3 ersichtlich, zusätzlich wurden die Zeitpunkte, zu denen der Kompensator angeregt wurde, mittels schwarzer Pfeile dargestellt.

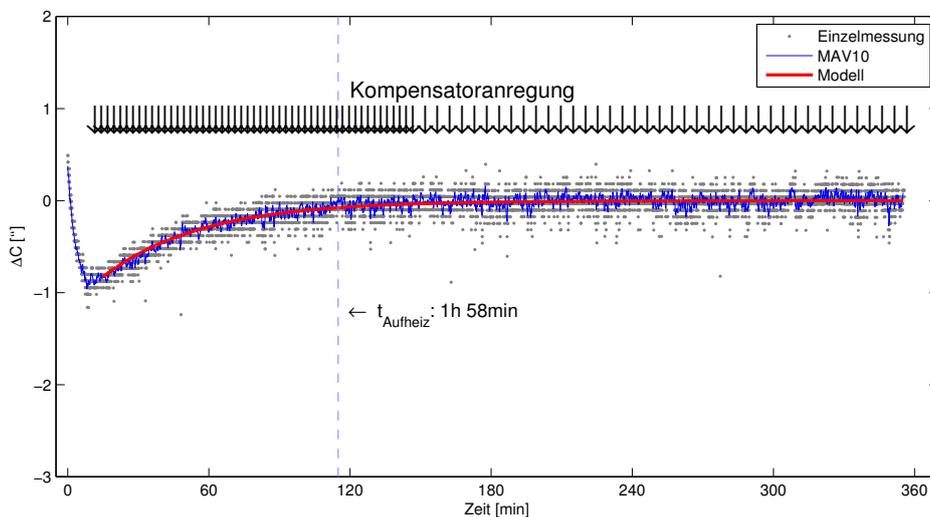


Abbildung 6.3: Aufheizeffekte von SDL1X#2 mit Kompensatoranregung alle 60 bzw. 120 Messungen

In Abbildung 6.3 zeigt sich annähernd derselbe charakteristische Kurvenverlauf wie in Abbildung 6.2. Die berechnete Aufwärmzeit ist trotz des etwas abgeänderten Ver-

suchsaufbaus (Klopfeinrichtung, Wartezeit zwischen den Messungen) mit 1h 58min nur geringfügig länger.

Die berechneten Aufheizzeiten sowie die Zeitkonstanten und deren Standardabweichung sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Berechnete Zeitkonstanten und Aufwärmzeiten je Versuchsreihe

Instrument	τ [s]	σ_τ [s]	$t_{Aufheiz}$ [h mm]	Anmerkung
SDL1X#1	3386	4.1	3 33	Dauermessung
SDL1X#2	2319	9.3	1 54	Dauermessung
SDL1X#2	2523	9.7	1 58	Kompensatoranregung

Die beiden Messungen für SDL1X#2 wurden in Abbildung 6.4 gegenübergestellt um zu verdeutlichen, dass nicht nur die Aufwärmzeit nahezu ident ist, sondern auch die Größe der Änderung der Ziellinie.

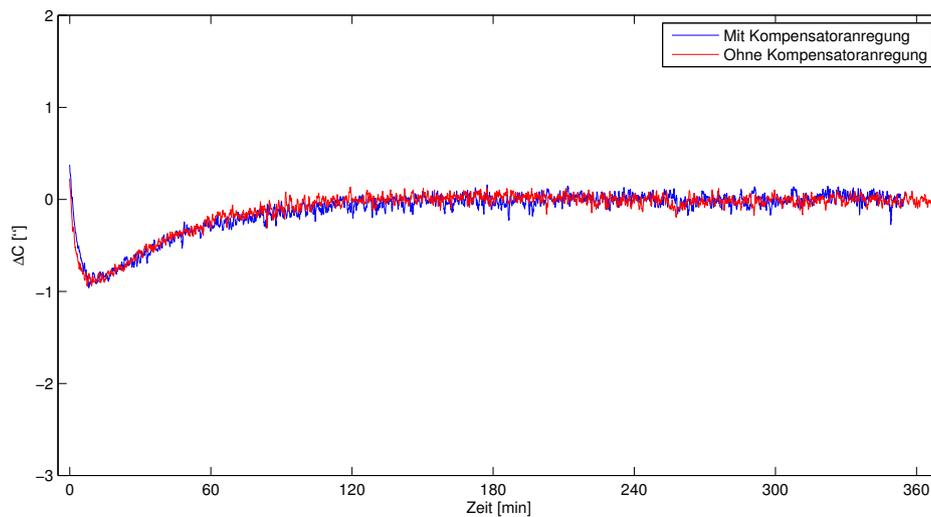


Abbildung 6.4: Aufheizeffekte von Instrument 2 mit bzw. ohne Kompensatoranregung

6.1.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass das SDL1X eine weitaus längere Aufwärmzeit als angenommen besitzt, die zwei untersuchten Instrumente zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Der Grund für die längere Aufwärmzeit von SDL1X#1 bleibt indes unklar, da weitere Untersuchungen nicht mehr durchgeführt werden konnten. Eventuell wurde diese durch

einen hängenden Kompensator begünstigt, aufgrund der verschiedenen Sensorversionen zwischen den beiden Instrumenten wäre aber auch ein Wechsel von bestimmten Bauteilen bei SDL1X#2 eine mögliche Ursache.

Die berechnete Aufwärmzeit von SDL1X#2 muss für die nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden und das Instrument mindestens zwei Stunden vor Messbeginn eingeschaltet werden, um verfälschte Messergebnisse durch Aufheizeffekte ausschließen zu können.

Für den Anwender in der Praxis ist dieses Ergebnis für ein reines Liniennivellement nur von geringer Bedeutung, da durch ein genaues Aufstellen in der Mitte dieser Einfluss minimiert werden kann. Allerdings bleibt anzumerken, dass diese lange Aufwärmzeit des SDL1X einen Nachteil darstellt, sofern das Instrument für andere Anwendungen - beispielsweise ein Flächennivellement - eingesetzt wird, da hier der dadurch verursachte Ziellinienfehler direkt in die Messergebnisse einfließt und dementsprechend die gesamte Aufwärmzeit abgewartet werden muss, um keine verfälschten Messwerte zu erhalten.

6.2 Messung in den Lattenendbereichen

6.2.1 Fehlereinfluss

Digitalnivelliere ermöglichen eine Höhenablesung auch dann, wenn nur Teile des Bildsensors von Codeelementen abgedeckt werden. Dadurch sind Höhenablesungen auch an den Lattenendbereichen möglich, allerdings entsteht dadurch ein unsymmetrisches Bild, welches zu systematischen Höhenfehlern führen kann, da neben dem Lattencode auch die Hintergrundtextur am Bildsensor abgebildet wird (Woschitz, 2005). Diese Situation ist exemplarisch in Abbildung 6.5 dargestellt.

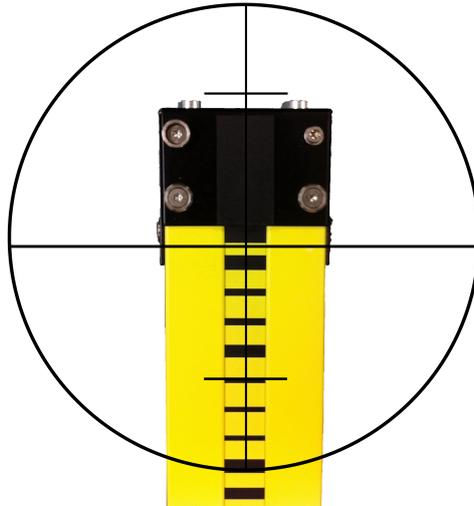


Abbildung 6.5: Lattenendbereich, Blick durch Fernrohr

Untersuchungen zu diesem Effekt wurden beispielsweise von Woschitz (2003) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass Höhenfehler von mehreren Zehntel Millimetern bei verschiedenen Instrumenten auftreten können.

Die sogenannten Lattenendbereiche richten sich nach der Länge des auf den Bildsensor abgebildeten Lattenabschnitts, welche distanzabhängig ist und sich nach der folgenden Formel berechnen lässt,

$$g = 2 \cdot d \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (6.3)$$

wobei g dem auf den Bildsensor abgebildeten Lattenabschnitt, d der Distanz zwischen Instrument und Latte und α dem Öffnungswinkel des Instruments entspricht.

Damit der ganze Bereich des Bildsensors von Codeelementen abgedeckt wird, muss mindestens die halbe projizierte Länge des Arrays ($g/2$) von der Gesamtlänge der Latte (L_{gesamt}) abgezogen werden. Dies wird in Abbildung 6.6 verdeutlicht. Außerdem müssen die beiden Bereiche $c1$ und $c2$ an den Enden berücksichtigt werden, welche aufgrund des mechanischen Aufbaus der Latte nicht sichtbar sind. Für die BIS20-Invarlatte, mit welcher Untersuchungen zu den Lattenenden durchgeführt wurde ist $c1=0.0375\text{m}$ und $c2=1.9305\text{m}$. Dadurch ergibt sich schlussendlich der tatsächlich nutzbare Lattenbereich ($L_{nutzbar}$), dieser liegt zwischen den beiden Punkten P1 und P2. Unter P1 bzw. über P2 darf somit keine Höhenablesung erfolgen, damit dieser systematische Höhenfehler ausgeschlossen werden kann.

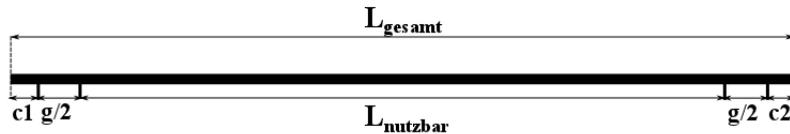


Abbildung 6.6: Lattenendbereich und nutzbarer Bereich (nach Woschitz und Brunner, 2002)

Zusätzlich wurde eine Literaturrecherche für die Bestimmung der Größe des Öffnungswinkels durchgeführt, da der Hersteller nur die Größe des Sehfeldes angibt. Dabei zeigte sich, dass für das SDL30 verschiedene Angaben vorliegen (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Angaben zum Sehfeld bzw. Öffnungswinkel des SDL30

α	Quelle	Anmerkung
$1^{\circ}20'$	Sokkia (2009)	Sehfeld
2.7°	Staiger (2002)	Öffnungswinkel
3°	Rüeger und Brunner (2000)	Öffnungswinkel

Während der Hersteller das Sehfeld mit $\alpha=1^{\circ}20'$ angibt, wird der elektronische Öffnungswinkel von Rüeger und Brunner (2000) mit $\alpha=3^{\circ}$ angegeben. Staiger (2002) bestimmte den Öffnungswinkel experimentell mit $\alpha=2.7^{\circ}$. Da das SDL30 und das SDL1X idente Fernrohrdimensionen und Angaben zum Öffnungswinkel des Sehfeldes besitzen (siehe Abschnitt 3.4), wurde vermutet, dass auch das SDL1X einen ähnlich großen Öffnungswinkel besitzt.

6.2.2 Messablauf

Die Untersuchung des Einflusses von Messungen an den Lattenendbereichen erfolgte mit beiden Instrumenten nach demselben Schema:

Die Messungen erfolgten jeweils für den gesamten Lattenbereich der 2m Invarlatte. Das Abtastintervall wurde willkürlich mit 5mm festgelegt, zusätzlich wurde das Intervall pro Abtastpunkt jedoch um $3\mu\text{m}$ verschoben um Quantisierungseffekte zu vermeiden. Pro Messposition wurden drei Einzelmessungen getätigt, um mögliche Ausreißer detektieren zu können.

Zunächst wurde eine Hinmessung (0m-2m) getätigt, anschließend erfolgte eine Rückmessung (2m-0m), welche um das halbe Abtastintervall versetzt wurde. Dadurch ist eine Kontrollmöglichkeit gegeben, außerdem können Driften durch eventuell vorhandene Aufheizeffekte aufgezeigt werden.

Nach diesem festgelegten Schema wurden die Untersuchungen für verschieden große Distanzen durchgeführt. Die Messung über den gesamten Lattenbereich ist für lange Distanzen zwingend notwendig, um eine entsprechende Anzahl an Messpunkten in den noch nutzbaren Lattenbereichen zu erhalten, welche aufgrund der großen Distanzen deutlich beschränkt sind, um eine Unterscheidung zu den Lattenendbereichen zu ermöglichen. Für Messungen bei kürzeren Distanzen ist wiederum eine weitaus größere Anzahl an Messpunkten in den nutzbaren Lattenbereichen verfügbar, wodurch zusätzliche Aussagen in Form einer Standardabweichung der Messungen gegeben werden können (siehe Abschnitt 6.4).

6.2.3 Ergebnisse SDL1X#1

Zunächst wurden Messungen mit SDL1X#1 (siehe Tabelle 12) durchgeführt, zu diesem Zeitpunkt war jedoch der Steuerbefehl, welcher das Auslösen und Speichern von Messungen über die RS232-Schnittstelle ermöglicht, noch nicht bekannt (siehe Abschnitt 4.5). Deshalb mussten diese Messungen händisch per Knopf der Fernbedienung ausgelöst werden. Zusätzlich mussten die Messergebnisse händisch abgetippt werden, da SDL1X#1 mit der darauf vorhandenen Softwareversion keine Speicherung von Einzelmessungen ermöglichte. Dadurch musste der Messumfang entsprechend reduziert werden, allerdings konnten dabei systematische Effekte gezeigt werden, die sich in Folgeuntersuchungen bestätigten (siehe Anhang A).

Da nachfolgend der Steuerbefehl zugänglich gemacht wurde, konnten anschließend umfangreichere Messungen zu den Lattenendbereichen entsprechend des zuvor festgelegten Messablaufs durchgeführt werden. Zunächst wurden Messungen für eine kurze Distanz von 3m durchgeführt, anschließend erfolgte die Messung auf eine Distanz von 29m, welcher der maximalen Zielweite des Komparators entspricht. Durch den Vergleich dieser beiden Ergebnisse kann der distanzabhängige Unterschied dieses Fehlereinflusses deutlich gezeigt werden.

Abbildung 6.7 zeigt das Ergebnis der Untersuchung mit SDL1X#1 für beide Distanzen. Dargestellt sind die Differenzen zwischen Interferometer- und Nivelliermessung. Zusätz-

lich wurden die Grenzen zwischen Lattenendbereich und nutzbarem Bereich (dargestellt mittels vertikaler Linien) geplottet.

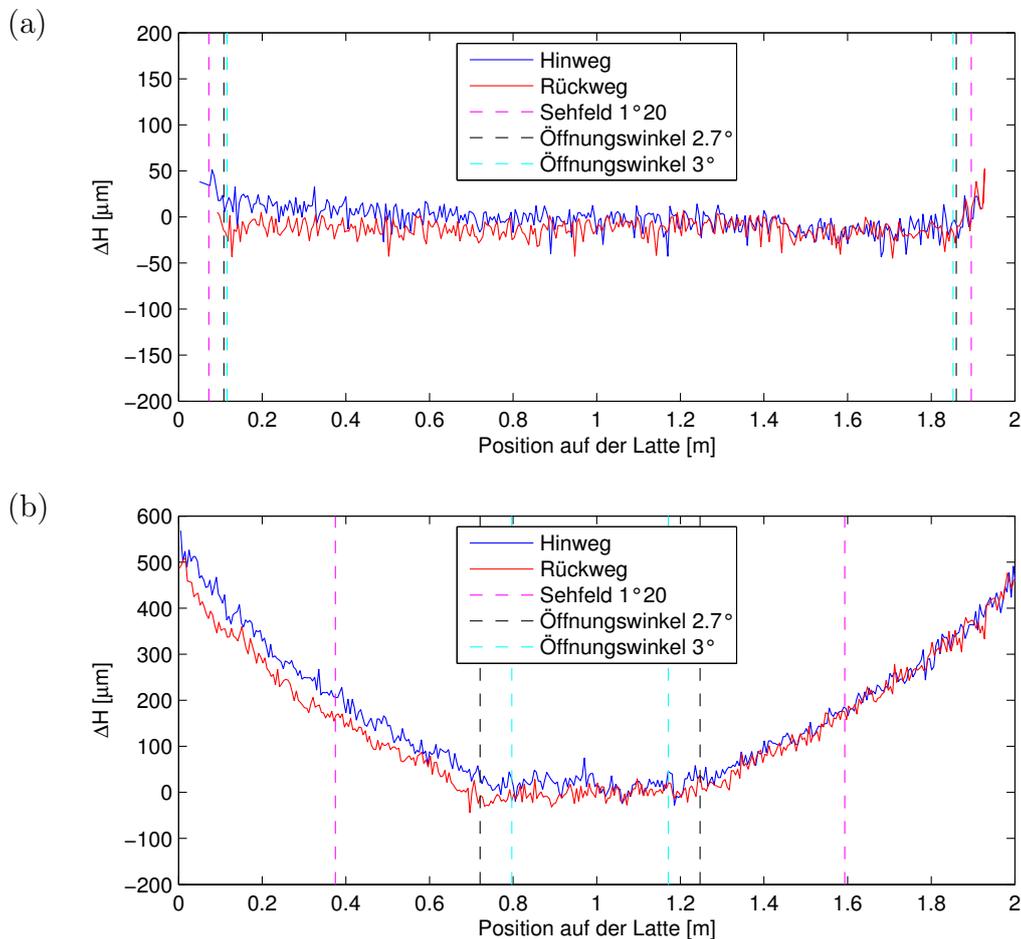


Abbildung 6.7: Mit SDL1X#1 gemessene Höhendifferenzen (unkorrigiert) bei Distanz (a) 3.0m und (b) 29.0m

Betrachtet man Abbildung 6.7, so zeigt sich bei beiden Messungen zunächst die signifikante Abweichung zwischen Hin- und Rückmessung im unteren Lattenbereich. Wie bereits zuvor erwähnt, wurden Instrument und Beleuchtungseinrichtung zwar mindestens eine halbe Stunde vor Beginn der Messungen eingeschaltet (ohne zusätzliche Aufwärmessungen), trotzdem scheinen noch weitere Aufwärmeeffekte aufzutreten, (siehe Abschnitt 6.1). Im oberen Lattenbereich sind keine Abweichungen mehr ersichtlich, da das Instrument hier aufgrund der langen Messdauer vollständig aufgewärmt ist. Weiters zeigt sich, dass an den Lattenenden systematische Abweichungen auftreten. Diese sind für die kurze Distanz entsprechend klein und bewegen sich in einer Größenord-

nung von einigen Hundertstel Millimetern. In den extremen Endbereichen ($L < 0.050\text{m}$ bzw. $L > 1.927\text{m}$) können außerdem keine Messungen mehr getätigt werden, hier sind scheinbar nicht genügend Codeelemente für eine Auswertung sichtbar.

Für die lange Distanz (29.0m) zeigen sich Abweichungen in der Größenordnung von 0.5mm. Aufgrund der größeren Entfernung ist zudem der noch nutzbare Lattenbereich deutlich beschränkt, allerdings werden hier auch in den extremen Endbereichen noch Messwerte ausgegeben.

Betrachtet man die Grenzen der verschiedenen Angaben zum Öffnungswinkel, so zeigt sich, dass auch beim SDL1X (wie beim SDL30) der Öffnungswinkel größer ist, als das vom Hersteller angegebene Sehfeld. Dies ist zwar bei 3m aufgrund der geringen Anzahl an Messungen in den Lattenenden nicht sichtbar, für die lange Distanz zeigen sich hier allerdings in den eigentlich noch nutzbaren Lattenbereichen bereits deutliche Abweichungen.

Empirische Bestimmung der Größe des Öffnungswinkels

Zur Bestimmung der Größe des Öffnungswinkels wurden die Messwerte für die Distanz von 29m verwendet, da hier der Unterschied zwischen Lattenendbereich und nutzbarem Lattenbereich deutlich sichtbar ist.

Zunächst wurden die Messwerte um die in Abschnitt 6.1 gezeigten Aufwärmzeiten nach Formel 6.4 korrigiert,

$$h_{\text{kor}} = h - C * e^{\frac{-t}{\tau}} \tag{6.4}$$

wobei h der mittels Instrument gemessenen Höhe und h_{kor} der um den Aufheizeffekt korrigierten Höhenwert entspricht.

Die korrigierten Werte sind in Abbildung 6.8 ersichtlich.

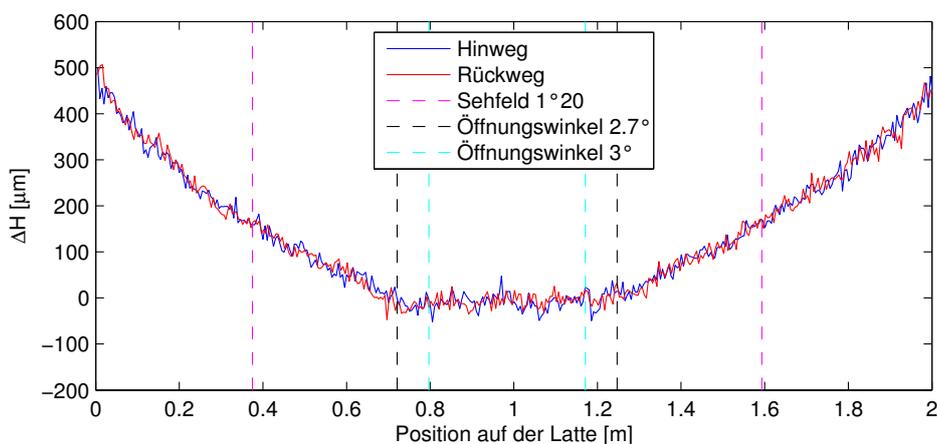


Abbildung 6.8: Mit SDL1X#1 gemessene Höhendifferenzen bei 29.0m, Messwerte um Aufheizeffekte korrigiert

Nun wurde der gesamte Lattenbereich in einen oberen und einen unteren Lattenendbereich, sowie einen mittleren Lattenbereich aufgeteilt. An die Lattenendbereiche wurde nun eine Exponentialfunktion angenähert, diese passt sich gegenüber einer einfachen Polynomfunktion besser an die Messwerte an. An den mittleren Lattenbereich wurde eine Regressionsgerade angenähert. Um festlegen zu können, bis zu welcher Grenze die jeweiligen Funktionen angepasst werden sollten, erfolgte zunächst eine „Überschätzung“ der einzelnen Funktionen. So wurden für den unteren Endbereich alle Messwerte $<1\text{m}$ herangezogen, für den oberen Bereich alle Messwerte $>1\text{m}$. Der mittlere Bereich wurde zunächst mit den Messwerten zwischen 0.5m und 1.5m geschätzt.

Es zeigte sich, dass für den unteren Endbereich alle Messwerte $>0.84\text{m}$ als Ausreißer detektiert werden, für den mittleren Bereich alle Messwerte $<0.64\text{m}$ bzw. $>1.38\text{m}$ und für den oberen Endbereich alle Messwerte $<1.10\text{m}$. Es wurden die Mittelwerte dieser Grenzen herangezogen, um die tatsächlichen Grenzen für die Schätzung der Funktionen zu erhalten. Diese sind: 0.74m bzw. 1.24m . Nun wurden die Funktionen neu berechnet, wobei nur die jeweiligen Messwerte bis zu den Grenzen herangezogen wurden. Zusätzlich wurden Ausreißer mittels Data Snooping nach Baarda (Brunner und Wieser, 2007) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.1% eliminiert.

Abbildung 6.9a zeigt die Messwerte sowie die berechneten Funktionen, die Ausreißer sind dabei rot dargestellt. Zusätzlich wurden wiederum die Grenzen der verschiedenen Angaben des Öffnungswinkels mittels vertikaler Linien geplottet. Die Schnittpunkte der Funktionen entsprechen dabei den empirisch bestimmten Grenzen des Öffnungswinkels. Abbildung 6.9b zeigt die jeweiligen Residuen zu den angepassten Funktionen,

deren Standardabweichungen sind nahezu ident und unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

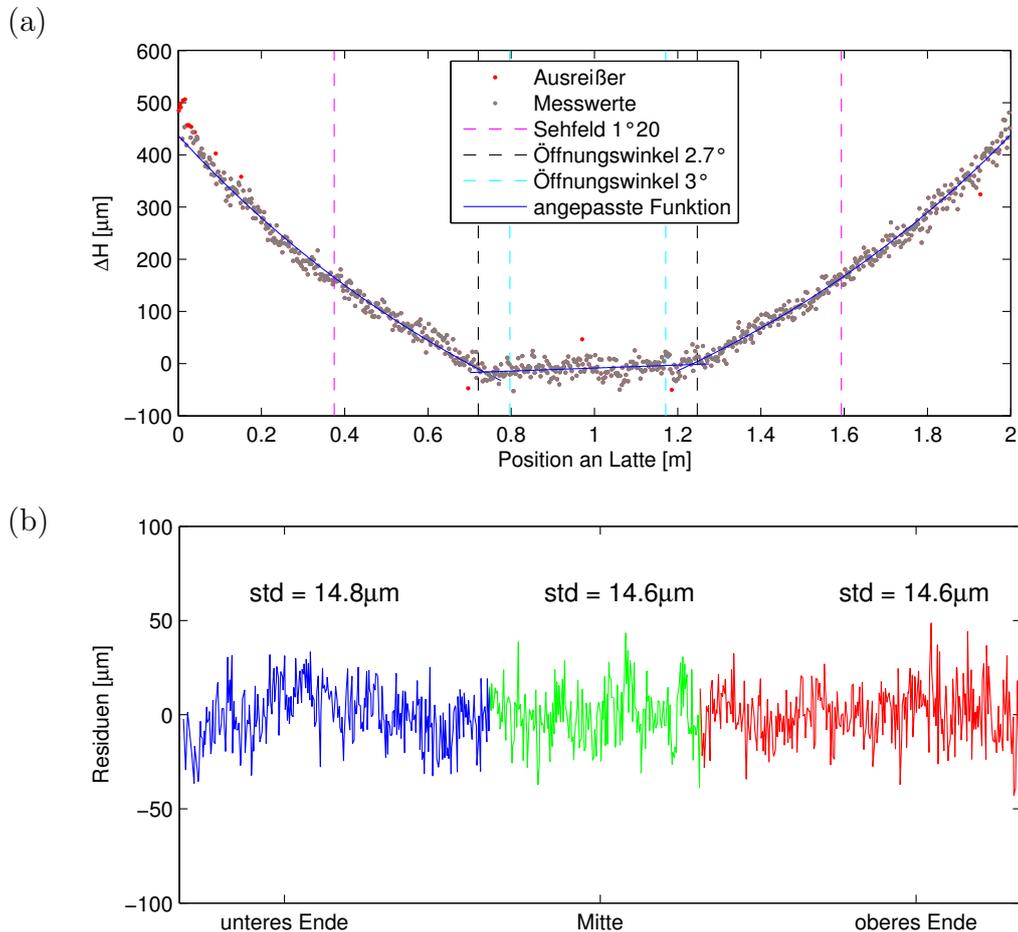


Abbildung 6.9: Mit SDL1X#1 gemessene Höhendifferenzen (a) Angepasste Funktionen zur Bestimmung des Öffnungswinkels (b) Residuen

Beide Schnittpunkte weichen um maximal 15mm von der Angabe von Staiger (2002) ab, was auf den Öffnungswinkel umgerechnet einer Abweichung von rund 0.03° entspricht. Somit kann bestätigt werden, dass der elektronische Öffnungswinkel deutlich größer als das vom Hersteller angegebene Sehfeld ist und auch beim SDL1X ca. 2.7° beträgt. Die numerischen Werte der Schnittpunkte sind in Tabelle 19 ersichtlich, zusätzlich wurden die Werte für die verschiedenen Angaben des Sehfeldes des SDL30 geplottet.

Tabelle 19: Grenzen der Lattenendbereiche für 2m-Latte (BIS20), Distanz 29.0m

α	P1 [m]	P2 [m]	Bemerkung
1°20'	0.375	1.593	Herstellerangabe (Sokkia, 2009)
2.7°	0.735	1.232	berechnet (siehe Abbildung 6.9)
2.7°	0.721	1.247	Staiger (2002)
3°	0.797	1.171	Rüeger und Brunner (2000)

Die Kenntnis der Größe des Öffnungswinkels ist ein wichtiger Punkt für den Anwender in der Praxis, da im Feld oft Abschätzungen getätigt werden, um Messungen in den Lattenendbereichen zu vermeiden bzw. beim SDL1X vor Beginn einer Route Grenzwerte festgelegt werden können (siehe Abschnitt 4.5).

Die zuvor beschriebenen Effekte sind auch in den mittels Nivellier gemessenen Distanzen ersichtlich (siehe Abbildung 6.10).

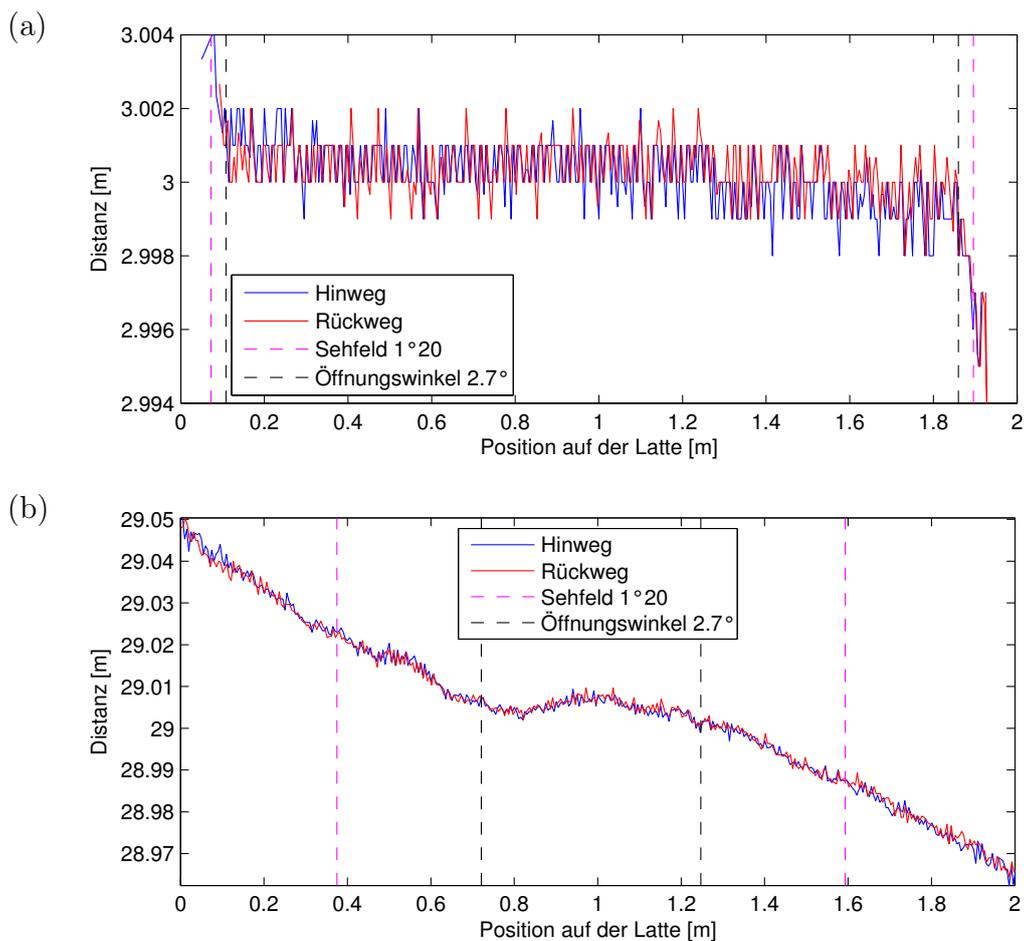


Abbildung 6.10: Mit SDL1X#1 gemessene Distanzen bei (a) 3.0m und (b) 29.0m

Auch für die Distanzmessungen zeigen sich in den Lattenendbereichen systematische Abweichungen, die mit zunehmender Distanz größer werden. Bei einer Distanz von 29.0m sind Abweichungen im Bereich von mehreren Zentimetern feststellbar, während diese mit demselben Messaufbau bei 3.0m nur wenige mm betragen. Zusätzlich wurden die Grenzen für den zuvor empirisch bestimmten Öffnungswinkel von 2.7° bzw. der Herstellerangabe des Sehfeldes geplottet, sodass gezeigt werden kann, dass auch für die gemessenen Distanzen in den laut Herstellerangabe eigentlich noch nutzbaren Lattenbereichen bereits systematische Abweichungen auftreten. Anzumerken ist weiters, dass in den Distanzmessungen keine Aufheizeffekte sichtbar sind.

Abgesehen davon kann hier ein asymmetrischer Verlauf der Messreihe beobachtet werden. Während die berechneten Distanzen im unteren Endbereich zu groß geschätzt werden, sind diese im oberen Endbereich zu klein.

6.2.4 Ergebnisse SDL1X#2

Da SDL1X#1 im Anschluss an diese Messungen zurückgegeben werden musste und danach nicht mehr verfügbar war, mussten weitere Untersuchungen mit einem anderen Instrument (SDL1X#2) durchgeführt werden. Dieses wurde nach einigen Lieferverzögerungen direkt aus Japan zugesendet und sollte somit die aktuellste Software Version installiert haben.

Zunächst wurden die mit SDL1X#1 gezeigten Untersuchungen (siehe Abbildung 6.7) wiederholt, um die beiden Instrumente entsprechend vergleichen zu können.

Abbildung 6.11 zeigt die Höhendifferenzen bei beiden Entfernungen.

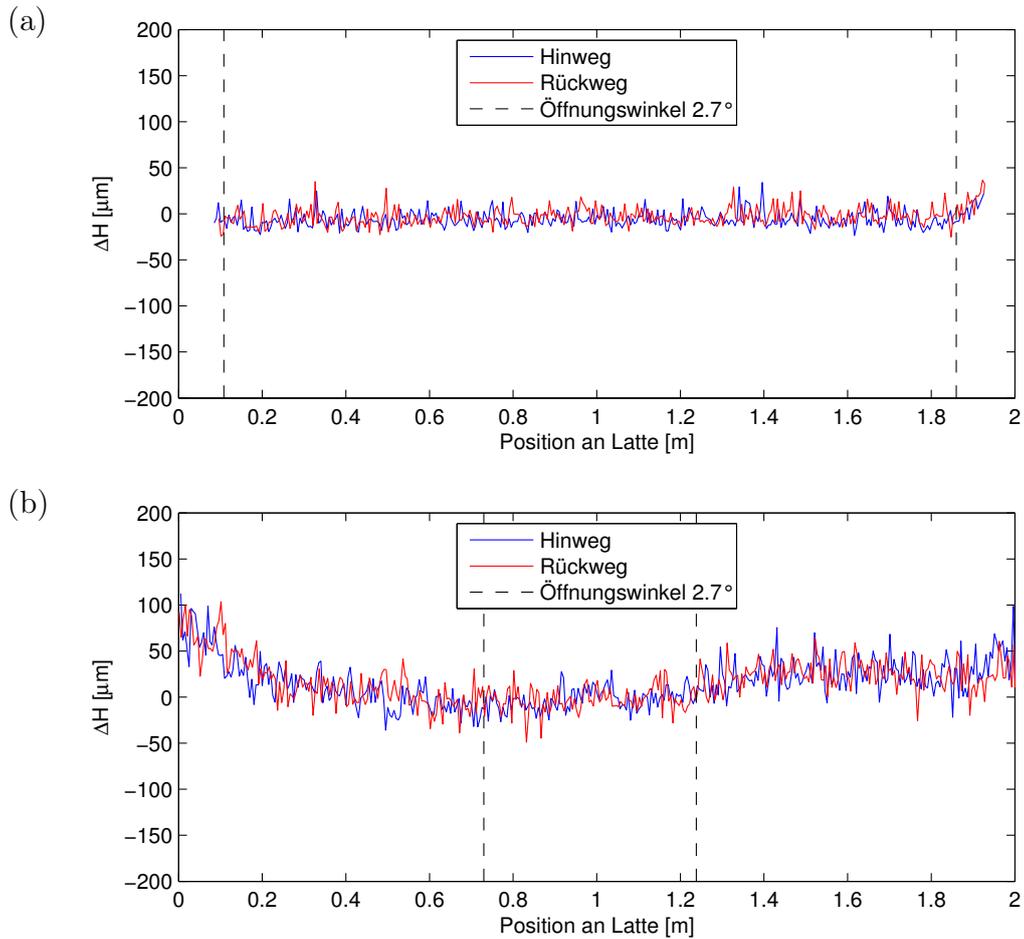


Abbildung 6.11: Mit SDL1X#2 gemessene Höhendifferenzen bei (a) 3.0m und (b) 29.0m

Betrachtet man die ermittelten Höhendifferenzen, so zeigt sich zunächst, dass Hin- und Rückmessung für beide Messreihen übereinstimmen, da hier die zuvor bestimmten Aufwärmzeiten (siehe Abschnitt 6.1) des Instruments eingehalten wurden, indem dieses zwei Stunden vor Messbeginn eingeschaltet wurde.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Instrumente (Abbildung 6.7 bzw. Abbildung 6.11), so zeigt sich für die kurze Distanz kaum ein Unterschied. Hier sind auch bei SDL1X#2 keine Messungen in den extremen Endbereichen mehr möglich ($L < 0.085\text{m}$ bzw. $L > 1.922\text{m}$), während einzelne Messungen nur sehr geringe Abweichungen $< 0.04\text{mm}$ zeigen.

Ganz unterschiedlich zeigt sich jedoch das Ergebnis für die Messung bei 29.0m. Hier zeigt SDL1X#2 deutlich geringere Abweichungen als SDL1X#1 (0.1mm gegenüber 0.5mm). Abgesehen davon fallen die systematischen Abweichungen bei SDL1X#2 im

unteren Endbereich etwas größer als im oberen Endbereich und betragen bis zu 0.1mm. Im oberen Endbereich sind diese Abweichungen etwas kleiner ($<0.05\text{mm}$), erst im extremen Endbereich von 2m ist hier ein einziger Messwert mit einer Abweichung von 0.1mm ersichtlich.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auch bei den gemessenen Distanzen (siehe Abbildung 6.12). Auch hier sind für die kurze Distanz kaum Unterschiede zwischen den beiden Instrumenten ersichtlich, hingegen werden die Unterschiede für die lange Distanz deutlich. Hier weichen die Distanzmessungen von SDL1X#2 in den Lattenenden um $<3\text{cm}$ ab, während die Abweichungen bei SDL1X#1 knapp 5cm betragen. Abgesehen davon ist auch bei SDL1X#2 ein asymmetrischer Kurvenverlauf ersichtlich.

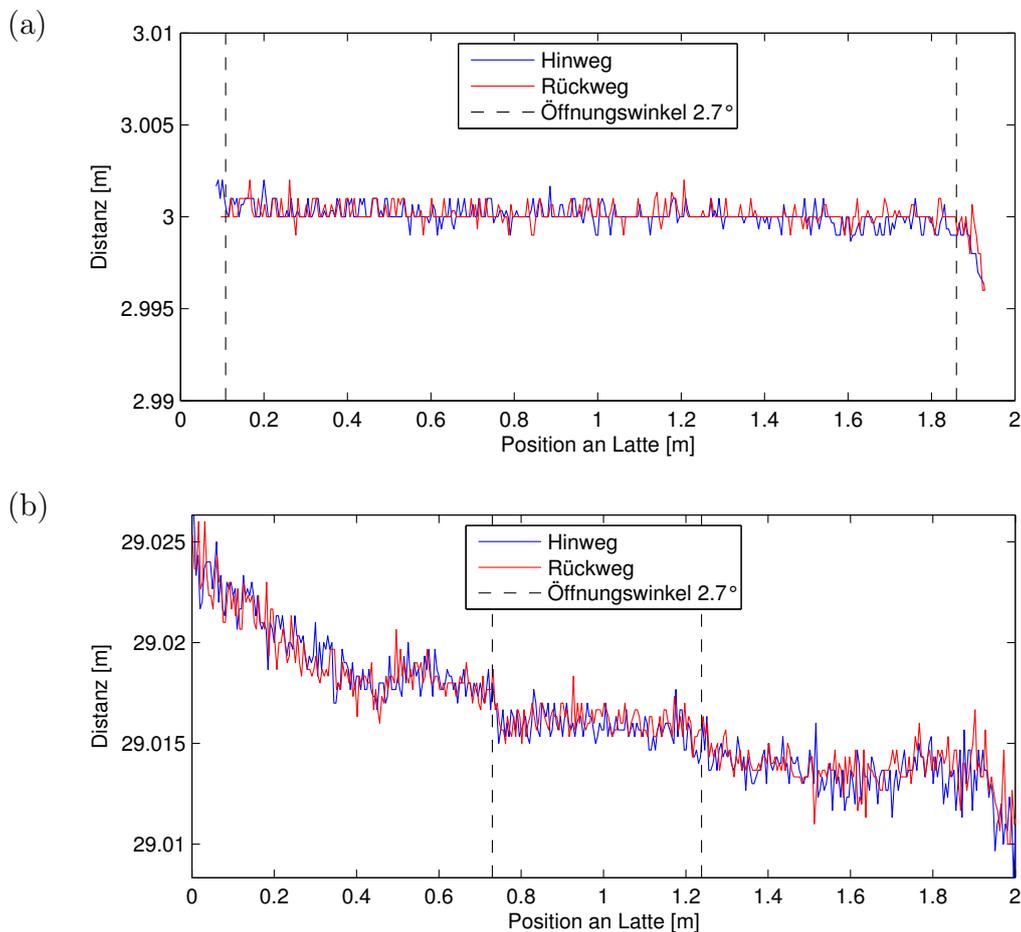


Abbildung 6.12: Mit SDL1X#2 gemessene Distanzen bei (a) 3.0m und (b) 29.0m

Da SDL1X#2 eine neuere Software- sowie Sensorversion besitzt (siehe Tabelle 12) wird vermutet, dass die systematischen Effekte der Lattenendbereiche durch angepasste Al-

gorithmen entsprechend korrigiert werden und daher die Effekte geringer sind als bei SDL1X#1.

Um zu überprüfen, ob diese Korrekturen auch bei anderen Distanzen angebracht werden, (30m ist eine in der Praxis häufig verwendete Messdistanz) wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Vermutet wurde zudem, dass im Falle von Korrekturen diese ebenso bei den Distanzen, welche der Hersteller für die Nivellierüberprüfung vorgibt (Sokkia, 2009), angebracht werden. Neben der bereits gemessenen Distanz bei 3m gibt der Hersteller eine Distanz von 15m an, um ein Nivellement aus der Mitte bzw. aus dem Ende durchzuführen. Deshalb wurde auch bei dieser Distanz eine Messung durchgeführt. Zusätzlich wurden beliebige Distanzen gewählt, welche über den gesamten Messbereich des Komparators verteilt waren, um die zuvor beschriebene Annahme überprüfen zu können, außerdem kann dadurch eine allgemeine Aussage über die distanzabhängige Performance des Instruments getroffen werden (siehe Abschnitt 6.4). Die Distanzen, bei denen Messungen durchgeführt wurden, sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Tabelle 20: Distanzen für Untersuchungen zu Lattenenden

Distanz [m]	Anmerkung
1.6	minimale Zielweite des Instruments
3.0	Nivellierüberprüfung
7.1	zufällig gewählt
10.9	hohes Messrauschen
11.4	hohes Messrauschen
11.9	zufällig gewählt
12.4	hohes Messrauschen
12.9	hohes Messrauschen
15.0	Nivellierüberprüfung
18.8	zufällig gewählt
23.3	zufällig gewählt
27.0	zufällig gewählt
29.0	maximale Distanz des Komparators

Die Ergebnisse aller Messreihen sind für eine bessere Übersicht in Anhang A zusammengefasst.

Es zeigte sich, dass die systematischen Effekte im unteren Lattenende zwar mit zunehmender Entfernung zwischen Instrument und Latte zunehmen, allerdings auch bei größeren Distanzen $<0.1\text{mm}$ betragen.

Im oberen Endbereich zeigten sich zudem meist etwas kleinere Abweichungen, deren Größe auch für längere Distanzen meist $<0.05\text{mm}$ betragen. Während die mit dem Instrument berechneten Höhen im unteren Lattenende stets zu klein berechnet werden, konnten im oberen Endbereich zudem bei einigen Messreihen ein gegenläufiger Kurvenverlauf festgestellt werden, was bedeutet, dass die Höhen hier zu groß berechnet werden. Weiters soll angemerkt werden, dass bei diversen Messreihen ein zyklischer Verlauf im extremen Endbereich sichtbar ist. Allerdings ist hierbei keine Systematik für deren Erscheinen erkennbar. Außerdem konnten diese zyklischen Verläufe bei diversen Wiederholungsmessungen nicht reproduziert werden. Um die Ursache dieser Effekte klären zu können, sind zusätzliche Untersuchungen notwendig, die im Zuge dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt wurden.

6.2.5 Besondere Abweichungen im oberen Lattenende bei SDL1X#2

Während bei den Untersuchungen zumeist Abweichungen $<0.05\text{mm}$ im oberen Lattenendbereich festgestellt werden konnten, zeigten sich bei zwei Messreihen signifikant größere Abweichungen von bis zu 0.15mm .

Erste auffällige Messreihe

Eine dieser Messungen wurde bei einer Distanz von 27.0m durchgeführt, allerdings wurde diese Messung durch einen von LabView verursachten Fehler abgebrochen (aufgrund eines Remotezugriffs per TeamViewer von außerhalb des TU-Netzwerkes) und ist somit nicht vollständig. Deshalb wurde bei dieser Distanz eine zusätzliche Messung mit identem Versuchsaufbau durchgeführt, die beiden Messreihen sind in Abbildung 6.13 dargestellt.

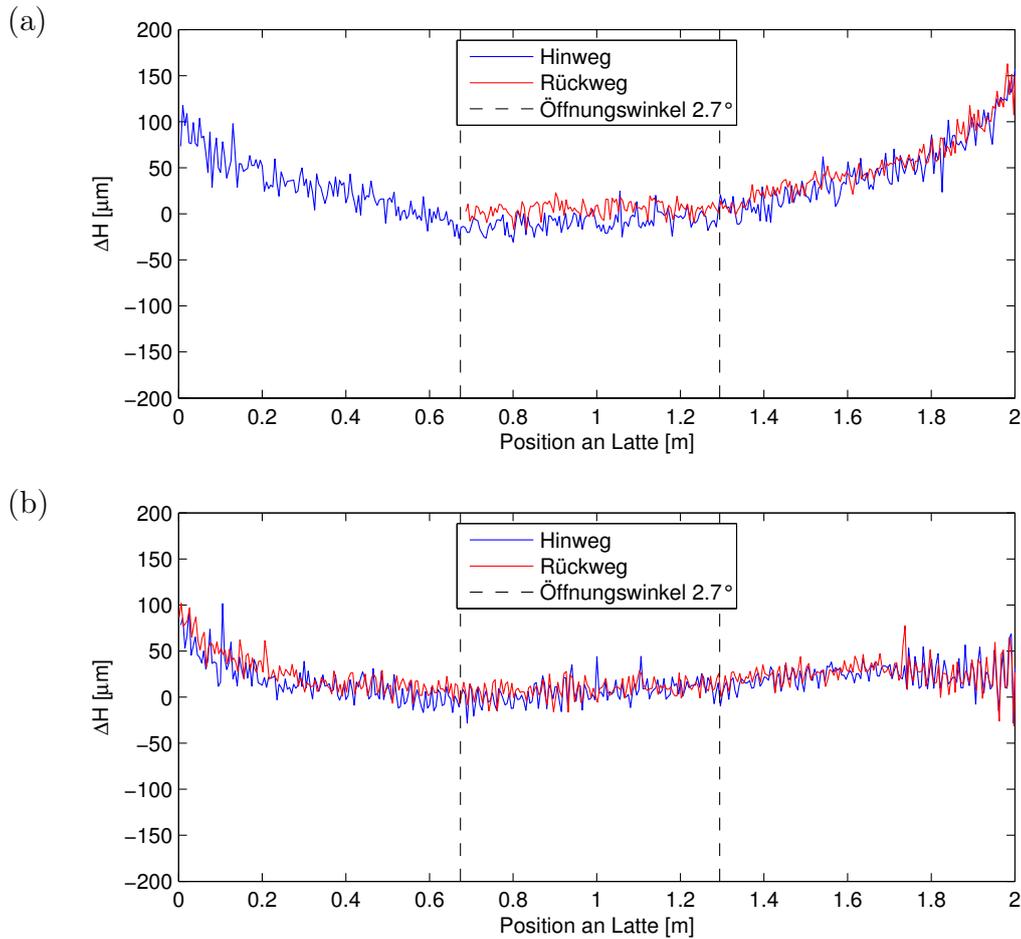


Abbildung 6.13: Mit SDL1X#2 gemessene Höhendifferenzen bei 27m, (a) abgebrochene Messung (b) erneute Messung

Betrachtet man Abbildung 6.13, so zeigt sich bei der ersten Messreihe eine deutliche Abweichung gegenüber der anderen Messreihe. Hier sind Abweichungen im unteren Endbereich von 0.1mm ersichtlich, allerdings zeigen sich auch im oberen Endbereich größere Abweichungen gegenüber dem mittleren Lattenbereich, die mit 0.15mm zudem sogar größer als die Abweichungen im unteren Endbereich sind. Zwar wurde diese Messung nicht vollständig beendet, im oberen Endbereich ist allerdings ersichtlich, dass Hin- und Rückmessung übereinstimmen, sodass ein Fehlereinfluss während der Messung ausgeschlossen werden kann. Dieser Kurvenverlauf entspricht von seiner Charakteristik her dem von SDL1X#1 (siehe Abbildung 6.7b), welcher einen annähernd symmetrischen Verlauf der systematischen Abweichungen zeigt. Der Offset zwischen Hin- und Rückmessung im mittleren Lattenende lässt zusätzlich auf Aufheizeffekte schließen.

Abbildung 6.13b hingegen zeigt wieder den für SDL1X#2 typischen Kurvenverlauf. Die Abweichungen im unteren Lattenendbereich betragen auch hier bis zu 0.1mm, hingegen sind diese im oberen Endbereich kleiner und bleiben nach einem kurzen Anstieg annähernd konstant im Bereich $<0.05\text{mm}$.

Da die erste Messung aufgrund eines LabView Fehlers abgebrochen wurde, wurden trotz der größeren Abweichungen zunächst keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da keine Fehler im Messaufbau festgestellt werden konnten.

Zweite auffällige Messreihe

Eine weitere Messung wurde bei 15m durchgeführt, diese Distanz entspricht der vom Hersteller vorgegebenen Entfernung für die Instrumentenüberprüfung (Sokkia, 2009). Auch hier zeigte sich zunächst ein anderer Verlauf der Messreihe. Allerdings wurde bei näherer Betrachtung des Versuchsaufbaus ersichtlich, dass das Lederband, welches an der Latte angebracht ist, in der Lattenhalterung mit eingeklemmt war und somit eine leichte Verdrehung und Verkipfung der Latte bewirkte. Deshalb wurde auch diese Messung erneut durchgeführt, das Ergebnis dieser beiden Messungen ist in Abbildung 6.14 dargestellt.

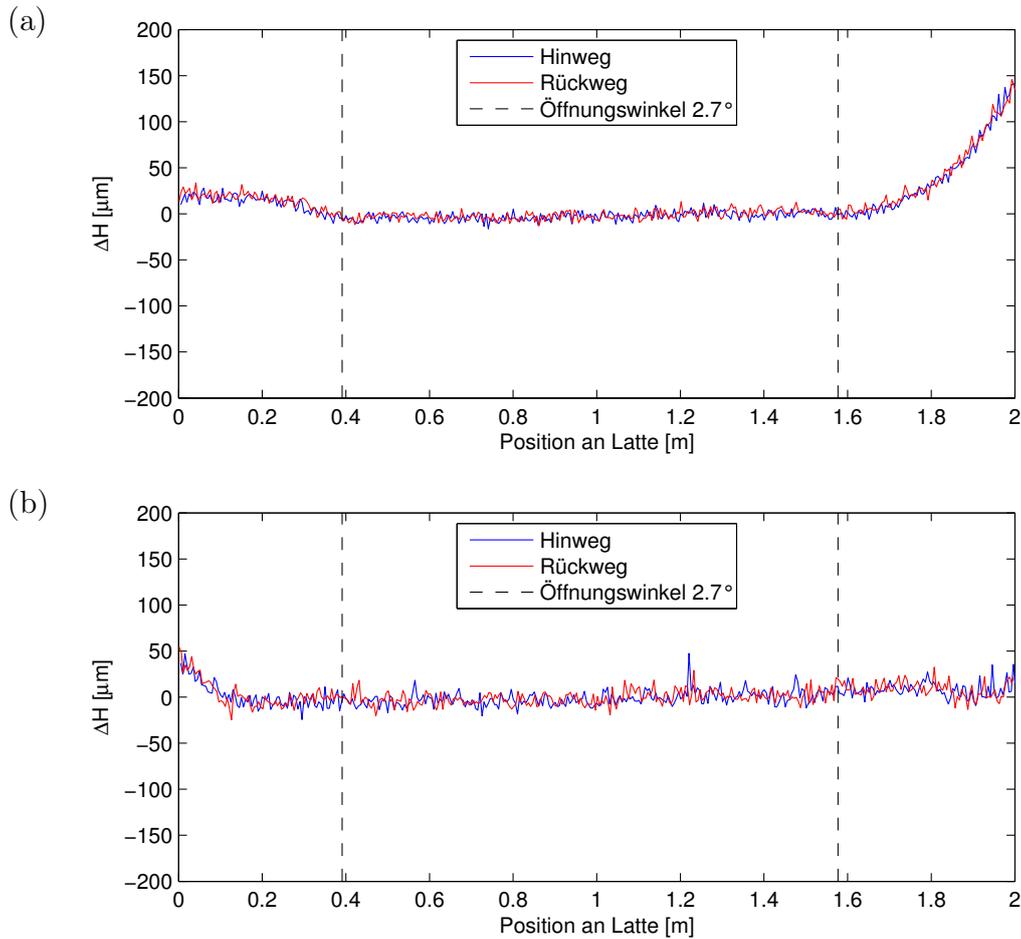


Abbildung 6.14: Mit SDL1X#2 gemessene Höhendifferenzen bei 15m (a) eingeklemmtes Lederband (b) erneute Messung

Ähnlich wie in Abbildung 6.13a zeigen sich auch hier bei der Messreihe mit eingeklemmtem Lederband Abweichungen im oberen Lattenendbereich, welche bis zu 0.15mm betragen, allerdings betragen die Abweichungen im unteren Endbereich nur rund 0.04mm. Das Ergebnis der Wiederholungsmessung entspricht dagegen wieder dem in Abschnitt 6.2.4 beschriebenen Kurvenverlauf. Im unteren Endbereich sind Abweichungen bis zu 0.05mm erkennbar, während es im oberen Endbereich zu kleineren Abweichungen kommt ($<0.03\text{mm}$). Das in Abbildung 6.14a gezeigte Ergebnis bedarf somit einer näheren Untersuchung. Der übliche Versuchsaufbau sah nämlich vor, die Latte (mit Hilfe des auf dem Nivellierwagen montierten Laserstrahls eines Distometers, sowie eines auf der Latte angebrachten Autokollimationsspiegels) orthogonal auf das Instrument auszurichten. Deshalb wurde vermutet, dass die durch das Lederband bewirkte Verkipfung und Ver-

drehung der Latte die Ursache für den in Abbildung 6.13a gezeigten Kurvenverlauf sein könnte.

Es wurde eine erneute Messung bei 15m durchgeführt, allerdings wurde die Latte absichtlich um ca -5° verdreht, eine zusätzliche Verkipfung der Latte wurde durch ein in der Lattenhalterung befestigtes PostIt bewirkt, welches ungefähr dieselbe Dicke wie das Lederband (ca. 5mm) besaß (siehe Abbildung 6.15).



Abbildung 6.15: Verkipfung der Latte durch eingeklemmtes PostIt

Im Anschluss wurde eine weitere Messung durchgeführt, wobei die Latte jedoch um ca. 15° in die entgegengesetzte Richtung verdreht wurde und wiederum eine Verkipfung mittels PostIt bewirkt wurde, um eine mögliche Abhängigkeit der Größe der Verdrehung auf die Korrekturen zu untersuchen. Die verschiedenen Ausrichtungen der Latten sind beispielhaft in Abbildung 6.16 dargestellt.

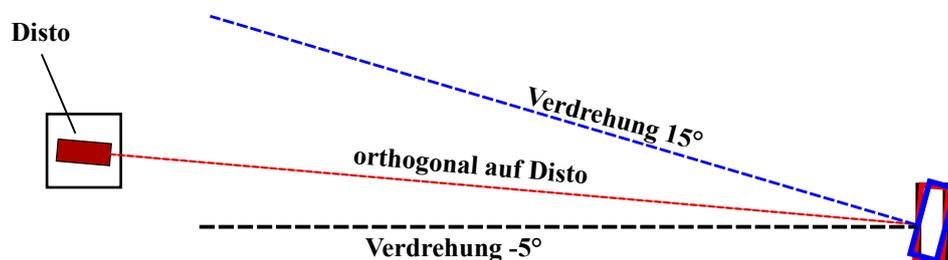


Abbildung 6.16: Verdrehung der Latte

Das Ergebnis der beiden Messungen ist in Abbildung 6.17 ersichtlich.

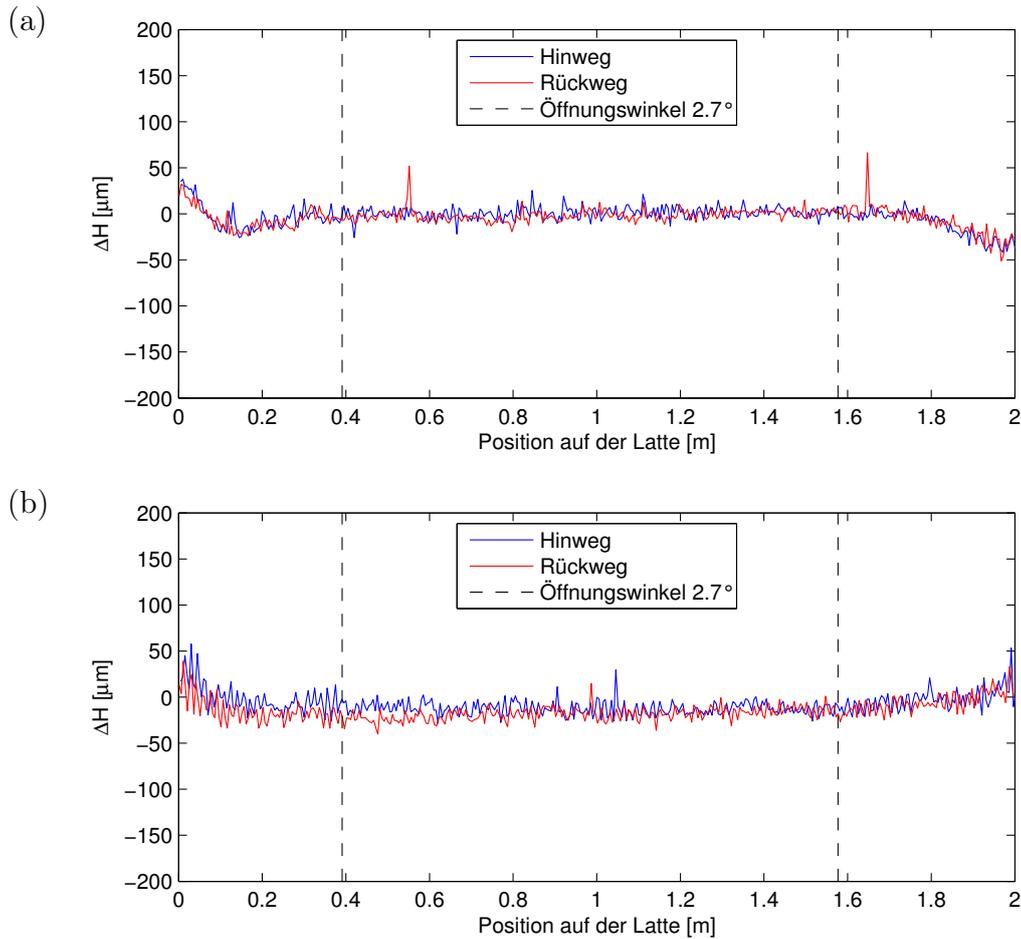


Abbildung 6.17: Mit SDL1X#2 gemessene Höhendifferenzen bei 15m, Verkippung und Verdrehung der Latte um (a) -5° (b) 15°

In Abbildung 6.17 zeigen sich in beiden Messreihen nur geringe Abweichungen in den Endbereichen $<0.05\text{mm}$. Allerdings soll der Unterschied zwischen diesen beiden Messreihen im oberen Lattenendbereich angemerkt werden. Bei der ersten Messung werden die Höhen zu groß berechnet, während diese bei der zweiten Messung zu klein berechnet werden. Zusätzlich ist bei der zweiten Messung eine Diskrepanz zwischen Hin- und Rückmessung im unteren Endbereich bei der zweiten Messung sichtbar, diese kann jedoch mit einer zu geringen Aufwärmzeit des Instruments begründet werden.

Zusätzlich soll erwähnt werden, dass aufgrund der Verkippung durch das PostIt theoretisch ein Maßstab von 9.6ppm (5mm Verkippung bei $h=1.3\text{m}$) in den Messungen auftreten sollte. Für beide Messreihen wurde ein etwas geringerer Maßstab berechnet (5.0ppm bzw. 8.8ppm).

Abgesehen davon zeigt sich, dass trotz der absichtlichen Verdrehung und Verkipfung der Latte die zuvor gezeigten Abweichungen in den oberen Lattenenden von bis zu 0.15mm nicht reproduziert werden konnten. Auch trotz einer extremen Verdrehung konnten keine entsprechenden Effekte reproduziert werden. Daher kann ausgeschlossen werden, dass dies die Ursache für die größeren Abweichungen im oberen Lattenendbereich ist.

Woschitz (persönliche Bemerkung im Dez. 2011) vermutete, dass die zuvor gezeigten Abweichungen nicht nur durch eine Verdrehung selbst, sondern durch eine veränderte Beleuchtung aufgrund der Verdrehung der Latte begünstigt werden. Nachfolgend wurden deshalb Untersuchungen mit verschiedenen Beleuchtungseinrichtungen durchgeführt, um diese Annahme zu überprüfen. Zu diesem Zeitpunkt stand allerdings die 2m-Invarlatte nicht mehr zur Verfügung, weshalb diese Messungen mit der Teleskoplatte (siehe Tabelle 13) durchgeführt werden mussten. Da diese Latte aufgrund von Sprungstellen zwischen den einzelnen Elementen keinen entsprechenden Vergleich zu den zuvor gezeigten Messungen über den gesamten Lattenbereich ermöglicht, wurden hier nur mehr die oberen Lattenenden gemessen.

Zunächst erfolgte eine Referenzmessung mit der Standardbeleuchtung des Vertikalkomparators, danach wurde diese durch eine Tageslichtneonröhre von Zumtobel (siehe Abbildung 6.18) ersetzt und eine weitere Messung durchgeführt (siehe Abbildung 6.18).

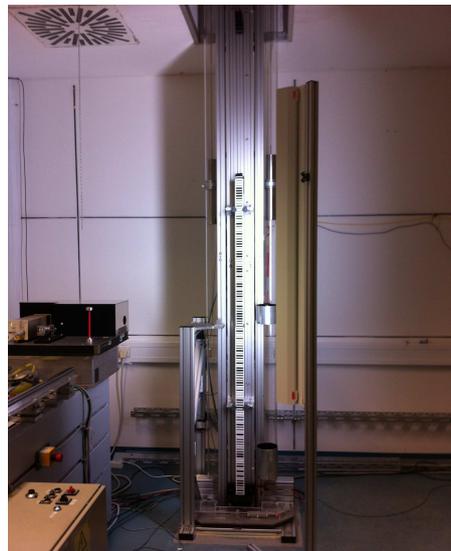


Abbildung 6.18: Zumtobel Tageslichtneonröhre

Die Standardbeleuchtung, welche aus vier Phillips PAR38-EC Lampen besteht (siehe

Abbildung 5.3), ermöglicht eine homogene Beleuchtung der Latte und sendet Licht im Spektralbereich von rund 400-900nm aus (Woschitz 2003, S. 102). Deshalb sind auch Intensitäten im nahen Infrarotbereich gewahrt. Die Tageslichtneonröhre hingegen ist in ihrer spektralen Bandbreite entsprechend limitiert und bietet so eine etwas andere Beleuchtung. Abschließend erfolgte eine Messung ohne jegliche Zusatzbeleuchtung (nur mit Laborbeleuchtung). Die Latten waren dabei wiederum orthogonal auf das Instrument ausgerichtet.

Die Ergebnisse der drei Messreihen können Abbildung 6.19 entnommen werden.

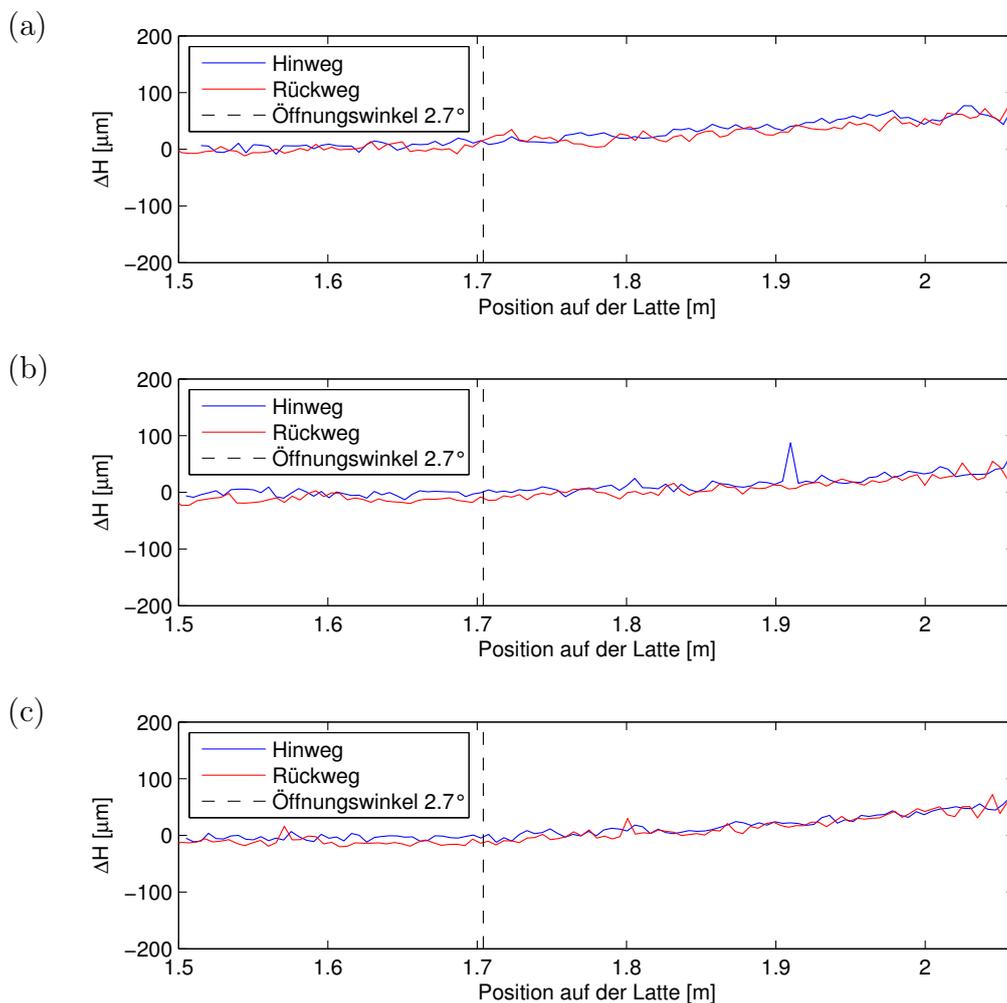


Abbildung 6.19: Verschiedene Beleuchtungssituationen der Latte bei 15m, (a) Komparatorbeleuchtung, (b) Tageslichtneonröhre, (c) Laborbeleuchtung

Die Messreihen in Abbildung 6.19 sind nahezu ident. Bei allen Messungen ist eine systematische Abweichung von rund 0.08mm im extremen Lattenende erkennbar. Zwar

sind diese Abweichungen etwas größer als die der Wiederholungsmessung aus Abbildung 6.14b, dies kann allerdings durch die Verwendung der Teleskopplatte begründet werden. Abgesehen davon zeigt sich auch durch eine Änderung der Beleuchtung keine signifikante Abweichung der Messreihen untereinander, auch konnten die in Abbildung 6.13a bzw. Abbildung 6.14a gezeigten Abweichungen von bis zu 0.15mm nicht reproduziert werden. Deshalb kann auch ausgeschlossen werden, dass eine Änderung der Beleuchtung diese Effekte hervorruft.

Weder eine Verdrehung und Verkippung der Latte, noch eine Änderung der Beleuchtung konnten somit den gezeigten Effekt reproduzieren. Außer diesen beiden möglichen Fehlereinflüssen konnten keine Auffälligkeiten im Versuchsaufbau nachgewiesen werden, sodass der Einfluss, welcher das in Abbildung 6.13a bzw. Abbildung 6.14a gezeigte Ergebnis erzeugt, unklar bleibt.

6.2.6 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass auch das SDL1X systematische Effekte in den Lattenenden aufweist. Diese sind für SDL1X#1 deutlich größer mit Abweichungen bis zu 0.5mm. Für SDL1X#2 sind diese Effekte kleiner und bewegen sich allgemein in der Größenordnung $<0.1\text{mm}$. Allerdings konnten Messreihen mit Abweichungen bis 0.15mm im oberen Lattenende nachgewiesen werden, deren Ursache trotz detaillierter Folgeuntersuchungen unklar bleibt. Allgemein kann somit nur die Empfehlung für dieses Messsystem gegeben werden, Messungen in den Lattenenden zu vermeiden, um keine systematischen Abweichungen in den Messungen zu erhalten.

Zusätzlich wurde der elektronische Öffnungswinkel des Instruments mit ca. 2.7° empirisch bestimmt und ist damit knapp doppelt so groß wie das vom Hersteller angegebene Sehfeld. Dies ist für Abschätzungen im Feld bzw. bei der Eingabe von Grenzwerten am Instrument zu berücksichtigen, um Messungen in den Lattenenden - und dadurch systematische Abweichungen - zu vermeiden.

6.3 Zyklisch wirkender Höhenfehler

6.3.1 Fehlereinfluss

Der zyklisch wirkende Höhenfehler beschreibt einen distanzabhängigen Effekt, der von Codefolge und Pixelgröße abhängig ist. Diese systematischen Abweichungen treten dann auf, wenn ein ganzzahliges Vielfaches der projizierten Pixel genau dem Grundintervall des Codes entsprechen. Woschitz (2003, S. 124-143) hat diese im Detail untersucht und beispielsweise für das Leica NA3003 systematische Fehler von einigen Zehntel Millimetern bestimmt, die an bestimmten Distanzen auftreten, an denen eine ganze Anzahl von projizierten Pixel genau dem Grundintervall von 2.025mm des Leica Codes entspricht. Ähnliche Effekte konnten auch für das Trimble/Zeiss Dini11 gezeigt werden, welche mit dem Grundintervall von 20mm für den Standardcode zusammenhängen. Dabei fallen bei einer bestimmten Positionierung der Ziellinie die Kanten der Pixel mit den Kanten der Codeelemente zusammen. Dies ist beispielhaft in Abbildung 6.20 dargestellt. Demnach sollte jedes Pixel theoretisch einen Intensitätswert von 0 oder 1 haben, je nachdem ob es ein helles oder dunkles Codeelement repräsentiert. Aufgrund des „cross talks“ kann jedoch ein Teil der Ladung eines Pixels in das benachbarte Pixel überfließen, sodass Pixel, welche ein dunkles Codeelement repräsentieren ebenfalls einen Intensitätswert größer 0 erhalten (siehe z.B. Woschitz, 2003, S.129). Dadurch entstehen systematische Abweichungen, welche zu einem zyklischen Verlauf bzw. einem Sägezahnverlauf der Zeitreihe führen können.

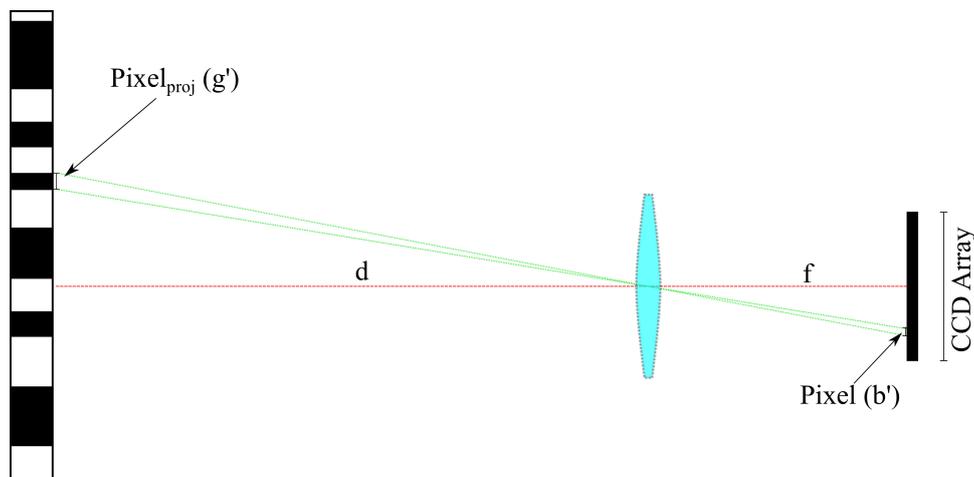


Abbildung 6.20: Pixel und dessen Projektion auf der Latte

6.3.2 Untersuchungen zur Bestimmung der Pixelgröße

Um überprüfen zu können, ob für das SDL1X in Kombination mit dem Lattencode von Sokkia ebenfalls zyklische Höhenfehler auftreten, müssen zuerst die Distanzen berechnet werden, bei denen die Größe der projizierten Pixel der Codefolge entspricht.

Das Grundintervall des Lattencodes von Sokkia beträgt 16mm, allerdings bezieht sich dieses Intervall auf den Abstand der Mitten zweier benachbarter Codeelemente (siehe Abschnitt 4.2.1). Der zuvor beschriebene Effekt richtet sich jedoch nach den Größen der einzelnen Codeelemente. Da bei Sokkia sechs verschieden große Codeelemente verwendet werden (siehe Tabelle 4.4), muss deren kleinster gemeinsamer Nenner berechnet werden, dieser beträgt 1mm. Ist die projizierte Größe eines oder mehrerer Pixel ($n \cdot pixel_{proj}$) genau 1mm, so fallen die Kanten der Pixel mit den Kanten der Codeelemente zusammen.

Um die Distanzen berechnen zu können, bei denen eines oder mehrere Pixel genau 1mm entsprechen, müssen die Größe eines einzelnen Pixels sowie die Brennweite des Instruments bekannt sein. Damit können nach Formel 6.5 die kritischen Distanzen bestimmt werden,

$$f \cdot g' = b' \cdot d \tag{6.5}$$

wobei f der Brennweite des Objektivs, g' der Größe des projizierten Pixels, b' der Größe eines Pixels und d der Distanz zwischen Instrument und Latte entspricht.

Wie bereits in Abschnitt 3.10 erwähnt, konnten in umfangreichen Recherchen keine Informationen zu den technischen Parametern des SDL1X gefunden werden. Deshalb ist neben der Pixelgröße auch die Brennweite des Instruments unbekannt. Diese Parameter sind jedoch für das Vorgängermodell SDL30 bekannt (siehe Tabelle 11).

Vergleicht man den Aufbau des SDL1X mit dem des SDL30 (siehe Tabelle 5), so zeigt sich, dass diese beiden Instrumente idente Fernrohrdimensionen besitzen. Deshalb wurde nachfolgend angenommen, dass auch das SDL1X eine Brennweite von rund 275mm (Rüeger und Brunner, 2000) besitzt.

Annahme 1 und 2

Etwas schwieriger gestaltet sich die Suche nach der Pixelgröße. Zwar kann auch diese Größe vom SDL30 mit $8\mu\text{m}$ übernommen werden, allerdings liegen zwischen diesen beiden Gerätegenerationen knapp 10 Jahre, in denen die CCD Technologie weiterentwickelt wurde und die Sensoren entsprechend optimiert wurden.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Pixelgröße bietet die Anzahl der Pixel unter Verwendung von Formel 6.5. Allerdings muss diese etwas adaptiert werden (siehe Formel 6.6),

$$f \cdot g = b \cdot d \quad (6.6)$$

wobei f der Brennweite des Objektivs, g der Länge des projizierten CCD Sensors, b der Länge des CCD Sensors und d der Distanz zwischen Instrument und Latte entspricht. Anstelle der Größe eines einzelnen Pixels tritt hier die Länge des gesamten CCD Sensors, die Größe der Projektion eines einzelnen Pixels wird durch die Größe der Projektion des CCD Sensors ersetzt. Dies ist grafisch in Abbildung 6.21 erläutert.

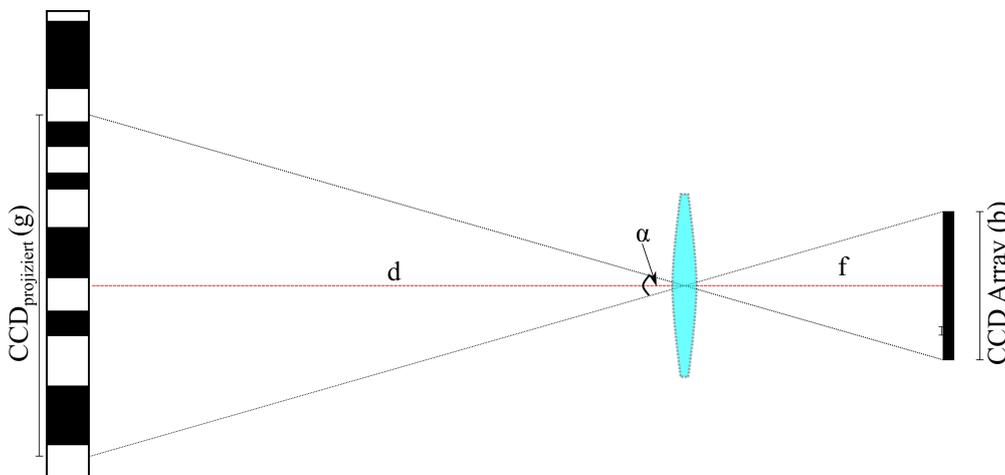


Abbildung 6.21: CCD Sensor und dessen Projektion

Die Größe der Projektion des CCD Sensors kann dabei über den Öffnungswinkel α nach Formel 6.3 bestimmt werden.

Unter Anwendung von Formel 6.6 kann nun auf die Länge des CCD Sensors geschlossen werden (sofern g und f bekannt), durch Division durch die Anzahl der Pixel kann schlussendlich die Größe eines einzelnen Pixels bestimmt werden.

Zunächst wurde wiederum angenommen, dass das SDL1X die gleiche Pixelanzahl wie

das SDL30 (1800) besitzt (siehe Tabelle 11). Unter dieser Annahme ergibt sich somit eine Pixelgröße von $7.2\mu\text{m}$ für einen Öffnungswinkel von 2.7° .

Nun wurden die kritischen Distanzen für die beiden Annahmen der Pixelgröße (8 bzw. $7.2\mu\text{m}$) berechnet (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Kritische Distanzen für die drei Annahmen der Pixelgröße bei $f=275\text{mm}$

Anzahl Pixel	$7\mu\text{m}$	$7.2\mu\text{m}$	$8\mu\text{m}$
Kritische Distanz [m]			
1	39.105	38.190	34.375
2	19.552	19.095	17.188
3	13.035	12.730	11.458
4	9.776	9.548	8.594
5	7.821	7.638	6.875
6	6.517	6.365	5.729
7	5.586	5.456	4.911
8	4.888	4.774	4.297
9	4.345	4.243	3.819
10	3.910	3.819	3.438
11	3.555	3.472	3.125
12	3.259	3.183	-
13	3.008	-	-

Dabei zeigte sich, dass die Distanzen, bei denen die Größe eines projizierten Pixels genau 1mm entspricht, außerhalb des messbaren Bereichs des Komparators liegen. Somit müssen Untersuchungen bei Distanzen durchgeführt werden, bei denen mehrere Pixelprojektionen genau 1mm abdecken.

Deshalb wurden Distanzen ausgewählt, bei denen zwei Pixelprojektionen genau 1mm entsprechen. Für eine Pixelgröße von $8\mu\text{m}$ ergibt sich somit eine kritische Distanz von 17.188m, für eine Pixelgröße von $7.2\mu\text{m}$ eine Distanz von 19.095m. Dieser Distanzbereich wurde nun näher untersucht, wobei Messungen an den kritischen Distanzen sowie 10cm vor und nach diesen durchgeführt wurden. Woschitz (2003) zeigte, dass bei manchen Instrumenten bereits durch geringe Distanzänderungen diese systematischen Effekte nicht mehr auftreten, deshalb sollten die Messungen knapp vor bzw. nach der kritischen Distanz eine Kontrolle ermöglichen und den Unterschied zwischen der mög-

lichen systematischen Abweichung und reinem Messrauschen zeigen.

Zusätzlich wurden im Distanzbereich zwischen diesen beiden kritischen Distanzen (17.1m bis 19.1m) Messungen mit einer Schrittweite von 20cm durchgeführt. Die Messung nicht nur an den berechneten Distanzen, sondern über diesen Messbereich sollen dabei helfen, mögliche Unterschiede in den Messergebnissen besser herausarbeiten zu können, außerdem ermöglicht der Messbereich ein Aufdecken von möglicherweise anderen Pixelgrößen als angenommen. Durch eine geringe Änderung der Pixelgröße ergeben sich nämlich entsprechend andere kritische Distanzen.

Dabei wurde auf der Latte jeweils ein Lattenbereich von $1\text{m} + 5 \cdot \text{pixel}_{proj}$ gemessen, wobei das Abtastintervall mit $1/10$ von pixel_{proj} festgelegt wurde, um den zyklischen Verlauf gut reproduzieren zu können, außerdem wird dadurch das Abtasttheorem von Shannon (siehe z.B. Brunner, 2008) berücksichtigt. Demnach sollte sich somit ein zyklischer Verlauf mit 5 Perioden innerhalb dieses Messbereichs ergeben.

Die Ergebnisse für die Messungen der beiden kritischen Distanzen sind in Abbildung 6.22 bzw. Abbildung 6.23 ersichtlich. Dabei wurden sowohl die Mittelwerte (aus den drei Einzelmessungen je Position) der gemessenen Höhendifferenzen, als auch der gemessenen Distanzdifferenzen (reduziert um den Mittelwert) geplottet. Zusätzlich wurden die Einzelmessungen per grauer Punkte dargestellt, die Ausreißer, welche außerhalb des dargestellten Bereichs liegen wurden mittels Pfeilen gekennzeichnet. Die vertikale, rote Linie entspricht dabei der Größe einer Pixelprojektion.

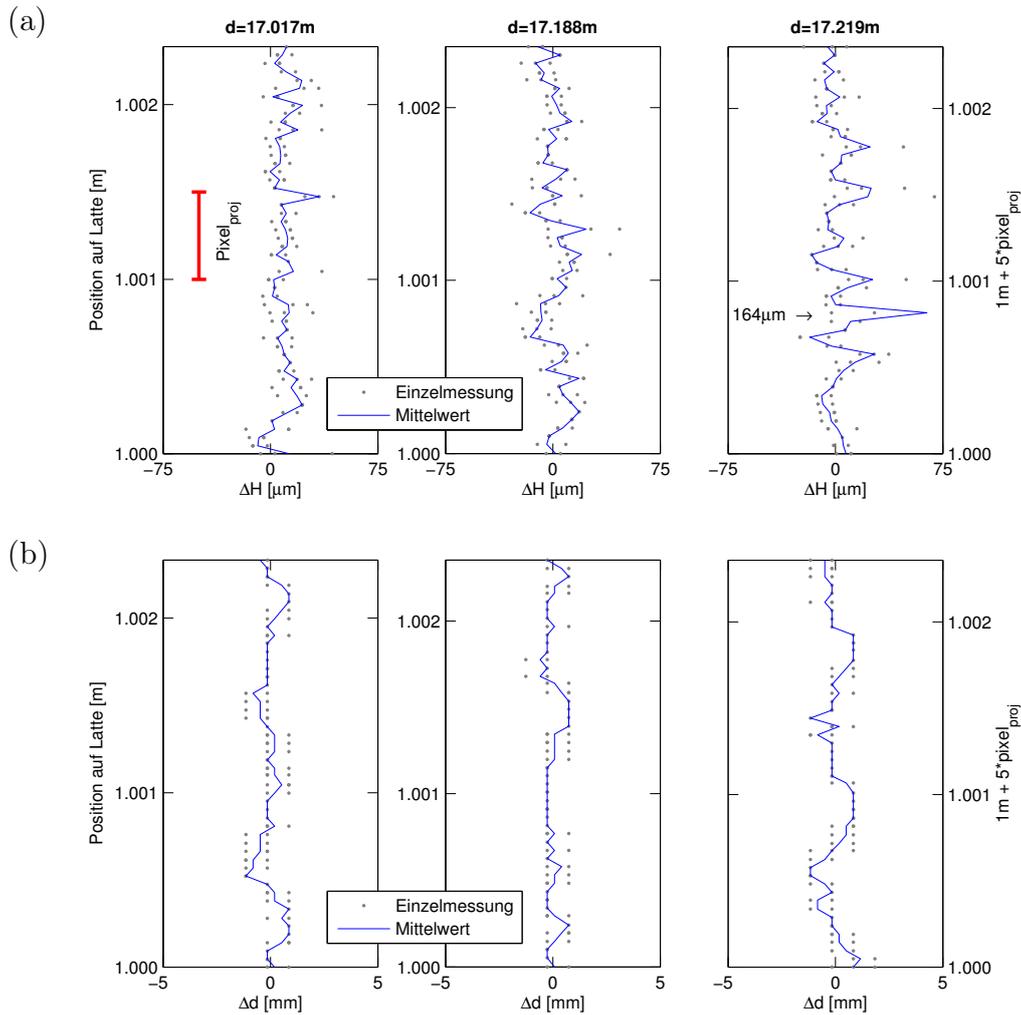


Abbildung 6.22: Messungen bei den größtmöglichen Distanzen für Pixelgröße $8\mu\text{m}$
 (a) gemessene Höhendifferenzen, (b) gemessene Distanzdifferenzen

In Abbildung 6.22 sind sowohl die Mittelwerte der gemessenen Höhendifferenzen, als auch die Mittelwerte der mittels Instrument gemessenen Distanzdifferenzen sowie die Einzelmessungen für den kritischen Bereich einer Pixelgröße von $8\mu\text{m}$ ersichtlich. Es sind keine zyklischen Verläufe sichtbar, auch sind keine signifikanten Abweichungen in den Messwerten sichtbar, welche auf eventuelle Systematiken schließen lassen könnten.

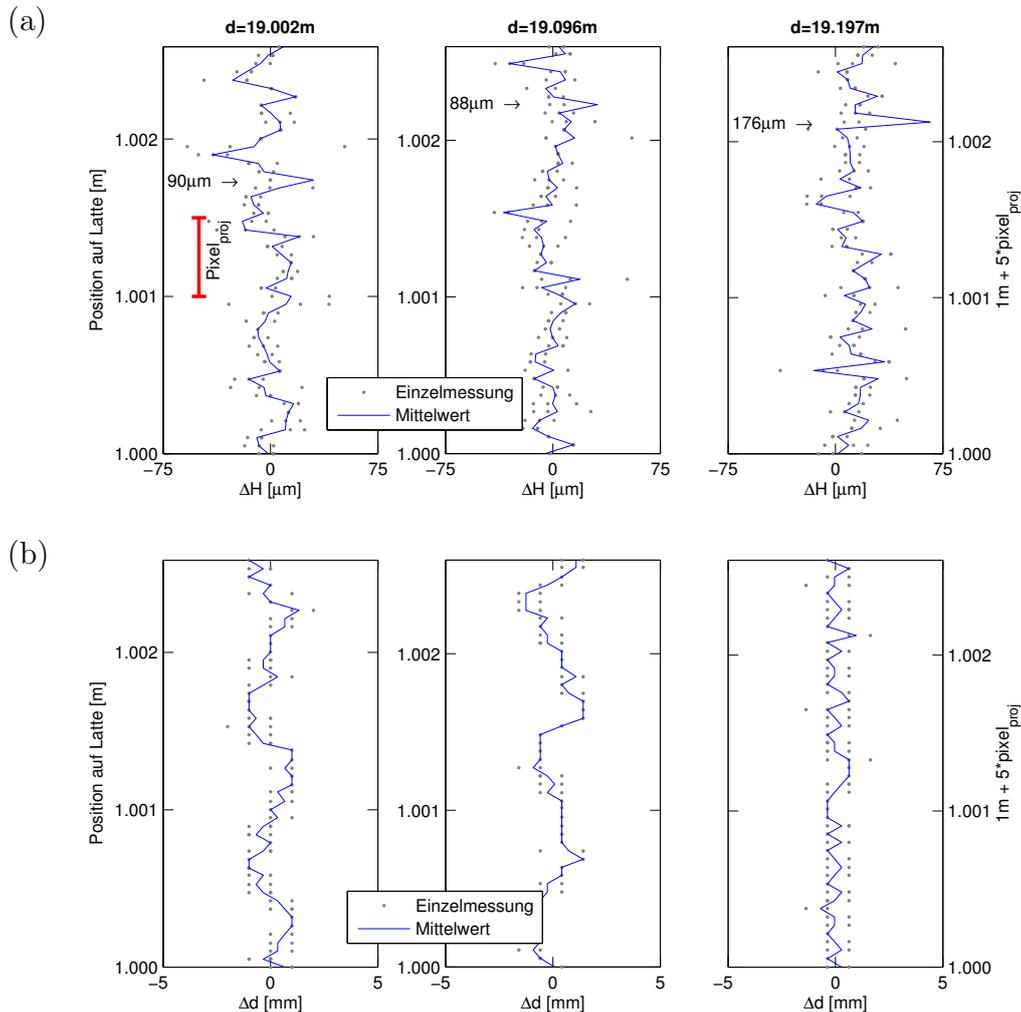


Abbildung 6.23: Messungen bei den größtmöglichen Distanzen für Pixelgröße $7.2\mu\text{m}$
 (a) gemessene Höhendifferenzen, (b) gemessene Distanzdifferenzen

Abbildung 6.23 zeigt den kritischen Distanzbereich für die Annahme einer Pixelgröße von $7.2\mu\text{m}$ und einer Brennweite von 275mm . Auch hier sind die Mittelwerte der Höhendifferenzen und der gemessenen Distanzdifferenzen sowie die Einzelmessungen abgebildet, wiederum sind keine zyklischen Verläufe sowie signifikante Abweichungen sichtbar.

Die Ergebnisse für den Distanzbereich zwischen 17.2 und 19.0m sind in Anhang B ersichtlich, auch für diese Messungen konnten keine Auffälligkeiten gezeigt werden. Die zuvor getätigten Annahmen und Messungen erlauben somit keinen Rückschluss auf die Pixelgröße.

Annahme 3

Eine genauere Recherche ergab, dass im Patent zum Autofokus (Nishita et al., 2006) ein CCD Sensor beispielhaft mit einer Anzahl von 2048 Pixel beschrieben wird. Zusätzlich wurde aus den Angaben des SDL30 mit einer Anzahl von 1800 Pixeln und einer Größe von $8\mu\text{m}$ je Pixel ein Öffnungswinkel von 3° berechnet. Dies wurde nachfolgend auch für das SDL1X angenommen. Somit würde unter Annahme einer Brennweite von $f=0.275\text{m}$, einer Anzahl von 2048 Pixel und eines nominellen Öffnungswinkels des Sehfeldes von 3° die Größe eines Pixels ca. $7\mu\text{m}$ betragen. Auch für diese Annahme wurden deshalb die kritischen Distanzen berechnet. Diese sind ebenso in Tabelle 21 ersichtlich, welche einen Ausschnitt dieser kritischen Distanzen für den Messbereich des Komparators zeigt. Für die Annahme von $7\mu\text{m}$ der Pixelgröße liegt die Distanz, bei der eine Pixelprojektion genau 1mm entspricht außerhalb des Messbereichs des Komparators. Deshalb wurden auch hier Messungen an der Distanz (bzw. 10cm vor dieser und nach dieser) durchgeführt, bei der zwei Pixelprojektionen 1mm entsprechen (siehe Abbildung 6.24).

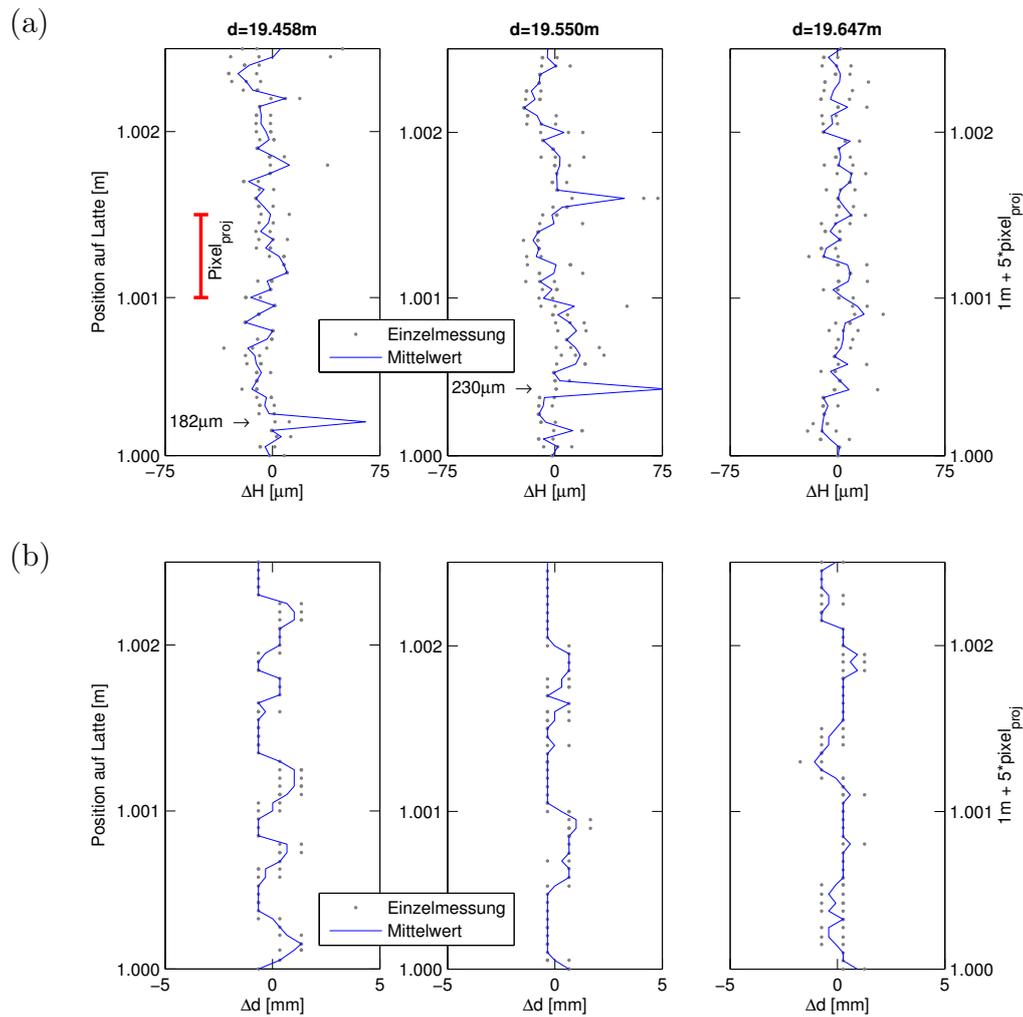


Abbildung 6.24: Messungen bei der größtmöglichen Distanzen für Pixelgröße $7\mu\text{m}$
 (a) gemessene Höhendifferenzen, (b) gemessene Distanzdifferenzen

Auch hier zeigt sich, abgesehen von einzelnen Ausreißern, nur Messrauschen in den Höhendifferenzen sowie den Distanzdifferenzen. Zyklische Verläufe oder andere systematische Effekte sind auch bei diesen Messungen nicht ersichtliche.

Weitere Untersuchungen

Die getroffenen Annahmen für die Pixelgröße konnten sich somit nicht bestätigen bzw. konnten keine systematischen Effekte gezeigt werden. Aufgrund des vielfältigen Angebots von CCD Sensoren am Markt, deren Pixelgröße sich oft nur im Nanometerbereich unterscheidet, wurden die weiteren Untersuchungen entsprechend eingeschränkt. Es wurde angenommen, dass die Pixelgröße des SDL1X nicht größer als beim Vorgängermodell gewählt wurde und im Bereich von $6\mu\text{m}$ bis $8\mu\text{m}$ liegt.

Im nachfolgenden wurde deshalb ein weiterer Messbereich ausgewählt, allerdings wurde die Entfernung zwischen Instrument und Latte gering gehalten, da hier kleine Änderungen der Pixelgröße nur minimale Änderungen der kritischen Distanzen bewirken.

Zu diesem Zweck wurde ein Bereich zwischen 4.13m und 4.37m festgelegt, in welchem mit einer Distanzschrittweite von 2cm Messungen ausgeführt wurden. Aufgrund dieser geringen Schrittweite müssten - so die Annahme - zyklische Effekte in den Messungen auftreten, auch wenn die kritischen Distanzen nicht genau mit den gemessenen Distanzen übereinstimmen, da diese zyklischen Höhenfehler auch einige Zentimeter vor bzw. nach der tatsächlichen kritischen Distanz zumindest für das NA3003 sowie das DiNi11 auftreten (siehe Woschitz, 2003). In diesen Messbereich fallen die kritische Distanzen für alle zuvor getätigten Annahmen der Pixelgröße (siehe Tabelle 21), sodass eine weitere Kontrolle dieser Annahmen erfolgt. Zusätzlich wird durch diesen Messbereich aufgrund der kurzen Distanz eine Vielzahl an möglichen weiteren Pixelgrößen bzw. deren kritischer Distanzen abgedeckt. Beispielsweise würde für eine Annahme von $6\mu\text{m}$ in diesem Messbereich 11 Pixel genau 1mm abdecken. Das Abtastintervall für diese Messungen wurde über $1/10$ der Größe einer Pixelprojektion von $7\mu\text{m}$ festgelegt, sodass wiederum eine entsprechende Anzahl an Abtastpunkten gegeben ist, gemessen wurde dabei ein nun etwas größerer Lattenbereich von $1\text{m} + 7 * \text{pixel}_{proj}$. Die Ergebnisse der Messungen können den beiden nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

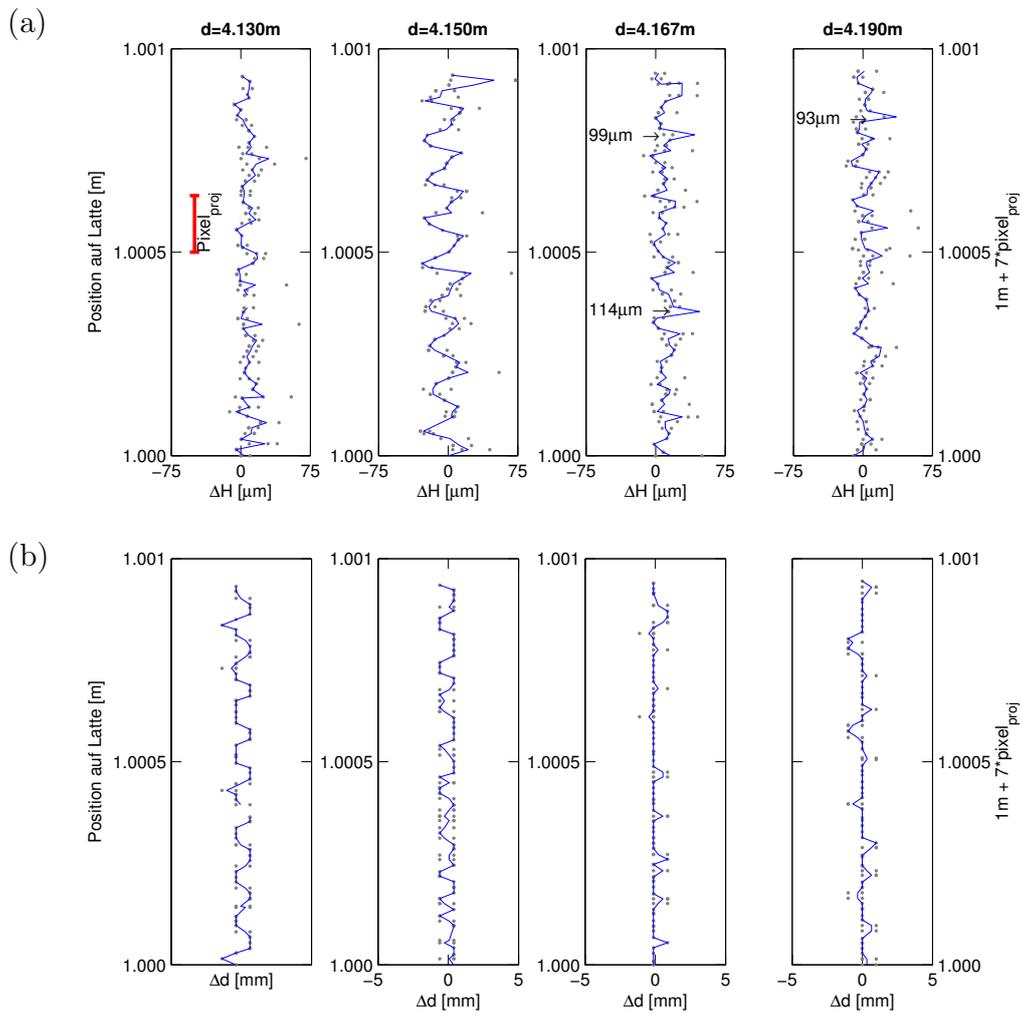


Abbildung 6.25: Messungen für kurze Distanzen, Teil 1 (a) gemessene Höhendifferenzen
(b) gemessene Distanzdifferenzen

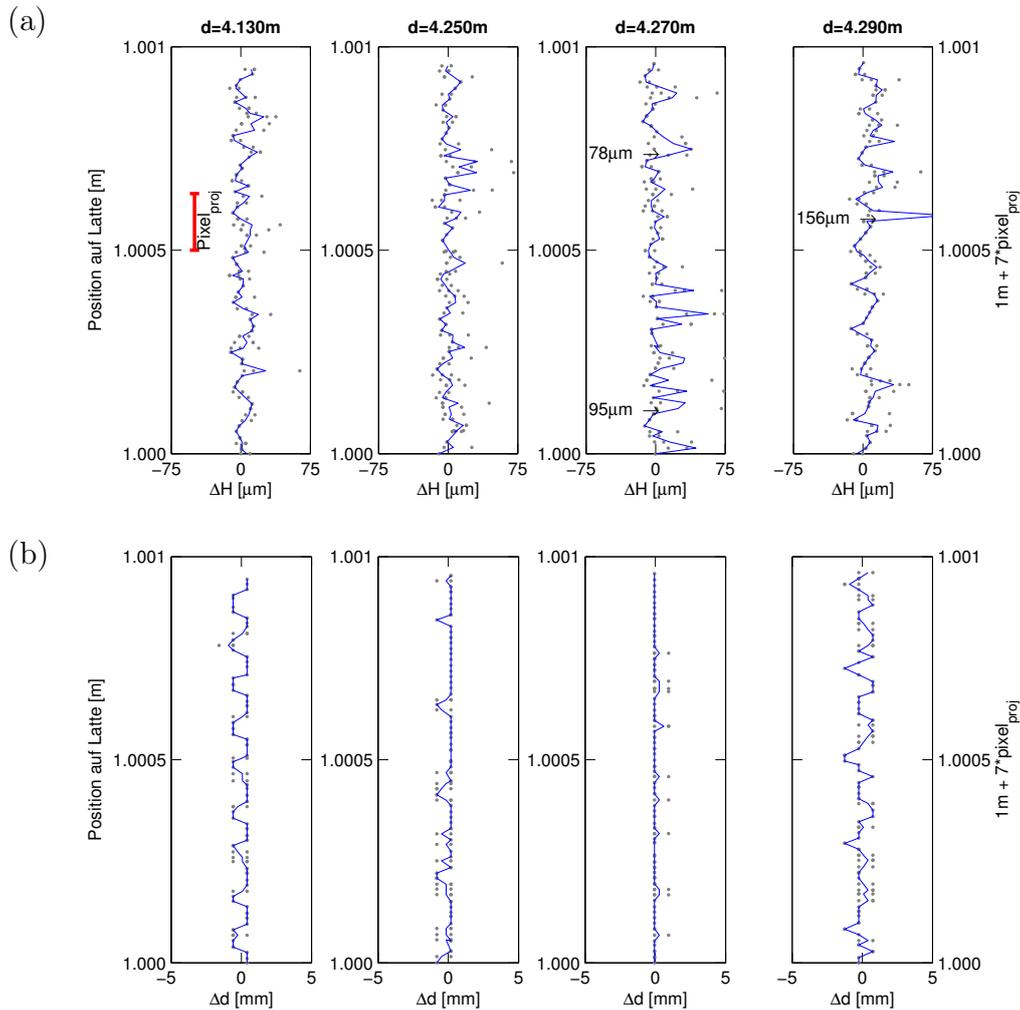


Abbildung 6.26: Messungen für kurze Distanzen, Teil 2 (a) gemessene Höhendifferenzen
(b) gemessene Distanzdifferenzen

Betrachtet man Abbildung 6.25 und Abbildung 6.26, so zeigt sich für den Großteil der Messungen keine Auffälligkeiten. Bei näherer Betrachtung ist allerdings ein zyklischer Verlauf bei 4.150m in den gemessenen Höhendifferenzen ersichtlich. Zwar zeigt dieser Verlauf keine signifikanten Abweichungen gegenüber den anderen Messungen, da die Amplitude dieser Zyklen nur rund 0.02mm beträgt, trotzdem wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt um zeigen zu können, ob dieser Effekt reproduzierbar ist. Es wurden zwei weitere Messungen bei 4.150m ausgeführt, sowie Messungen 5mm vor bzw. hinter dieser Distanz. Der Messumfang wurde dabei reduziert ($1\text{m} + 3.5 \cdot \text{pixel}_{proj}$). Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 6.27 ersichtlich.

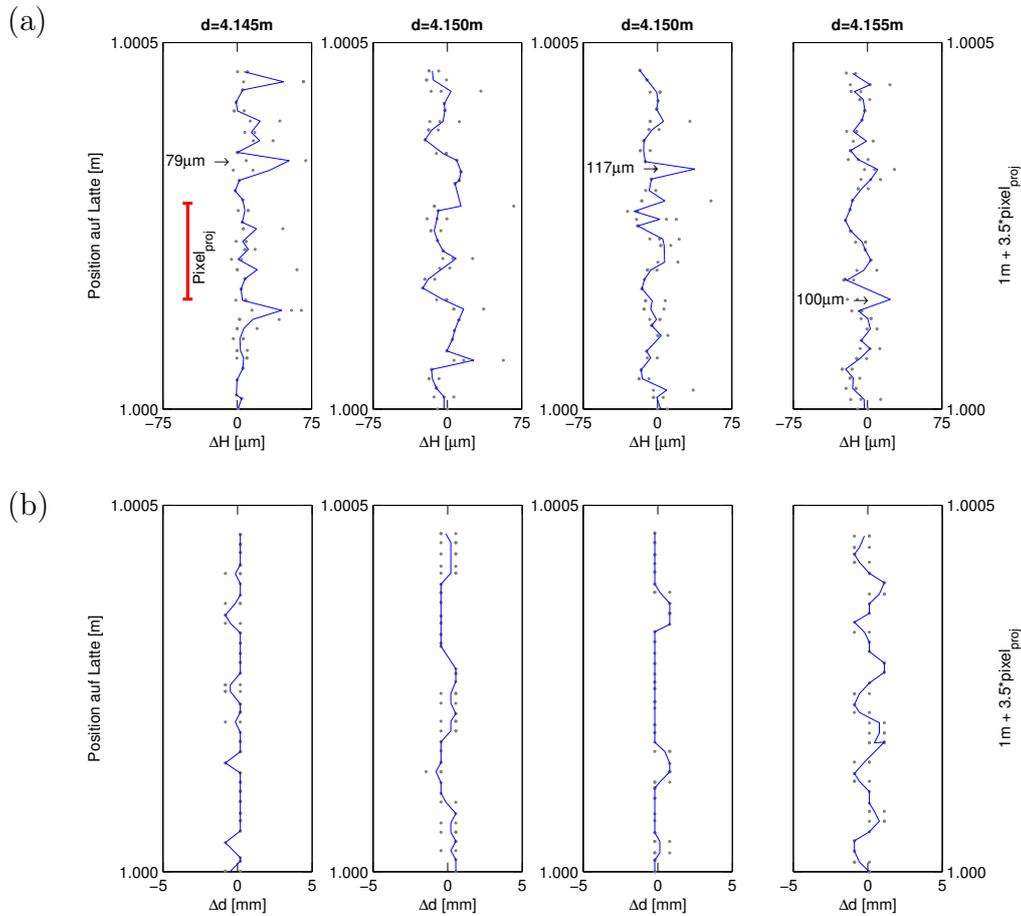


Abbildung 6.27: Messungen für Distanzbereich 4.150m (a) gemessene Höhendifferenzen
(b) gemessene Distanzdifferenzen

In diesen Messreihen ist wiederum nur reines Messrauschen sichtbar. Weder für die beiden unabhängigen Messungen bei derselben Distanz, noch bei den beiden um 5mm verschobenen Messungen zeigen sich Auffälligkeiten. Somit kann die Annahme einer kritischen Distanz nicht bestätigt werden, da der zuvor gezeigte zyklische Verlauf nicht reproduzierbar ist. Die Ursache des zyklischen Verlaufs bei 4.150m in der ursprünglichen Messung ist unbekannt, es ist jedoch anzunehmen, dass dieser durch eventuelle Reflexionen an der Lattenoberfläche hervorgerufen wurde.

6.3.3 Zusammenfassung

Auf Basis der durchgeführten Messungen konnte die Pixelgröße des Instruments nicht bestimmt werden. In den Messungen traten keine reproduzierbaren zyklischen Verläufe mit signifikant größeren Amplituden oder andere systematische Abweichungen auf. Dies lässt als Schlussfolgerung zwei Möglichkeiten offen. Entweder waren die getätigten Annahmen falsch und die Pixelgröße und/oder Brennweite des Instruments haben eine andere Größe. Es ist aber auch möglich, dass diese Annahmen richtig waren, bei diesem Messsystem einfach aber keine Zyklen auftreten.

Da zum Zeitpunkt der Arbeit keine weiteren Hinweise und Informationen für das SDL1X bekannt sind, welche konkrete Annahmen der Pixelgröße ermöglichen, sollen später weitere Nachfolgeuntersuchungen durchgeführt werden, wenn das Instrument wieder zur Verfügung steht. Entsprechend wäre es wünschenswert, wenn der Hersteller diese Information zur Verfügung stellt, sodass gezielte Untersuchungen erfolgen können. Diese konnten im Zuge dieser Arbeit allerdings nicht mehr durchgeführt werden.

6.4 Distanzabhängige Performance

Wie bereits in Kapitel 6.2 erwähnt, wurden Messungen über den gesamten Lattenbereich getätigt, sodass neben den zuvor gezeigten Fehlereinflüssen weitere Untersuchungen für SDL1X#2 getätigt werden können.

Ein gutes Maß, um die Performance des Instruments feststellen zu können, ist die Standardabweichung der Einzelmessungen, zusätzlich kann die Streuung der Messwerte bestimmt werden. Dabei werden jedoch nur die Messwerte aus den mittleren Lattenbereichen verwendet, sodass keine systematischen Abweichungen (Lattenenden) die Ergebnisse beeinflussen.

Um diese Parameter bestimmen zu können, muss zunächst jedoch ein Maßstab bestimmt werden, um welchen die Messwerte anschließend reduziert werden.

6.4.1 Maßstabsbestimmung

Für die Bestimmung des Maßstabs wurden die Messreihen für die kurzen Distanzen aus Abschnitt 6.2.4 verwendet da hier eine große Anzahl an Messpunkten in den mittleren Lattenbereichen vorhanden ist, für größere Distanzen sind aufgrund des beschränkten nutzbaren Lattenbereichs (<50cm bei 30m) nur mehr wenige Messwerte verfügbar.

Für kurze Distanzen wurden dabei Messungen bei 1.6m, 3m und 7.1m ausgeführt (siehe Tabelle 20). Allerdings zeigte sich bei Betrachtung der Messreihen ein hohes Messrauschen bei 3m, sodass diese Messreihe aufgrund der Auffälligkeiten (siehe Abschnitt 6.4.3) für die Maßstabsbestimmung ausgeschlossen werden musste. Für die beiden anderen Distanzen wurde der Maßstab unabhängig bestimmt. Die Berechnung kann dabei relativ einfach über einen Ausgleich nach Parametern erfolgen. Dabei wird eine Regressionsgerade nach Formel 6.7 an die Messwerte angenähert,

$$y = a + m \cdot x \tag{6.7}$$

wobei x den Interferometermessungen, y den Differenzen zwischen Interferometer- und Nivelliermessungen, a dem Offset und m dem Maßstab entspricht.

Zusätzlich werden Ausreißer nach der Methode von Baarda (siehe z.B. Brunner und Wieser, 2007) eliminiert. Die berechneten Maßstäbe zeigten allerdings Abweichungen voneinander, weshalb die Messreihen genaueren Untersuchungen unterzogen wurden und die Maßstäbe getrennt für Hin- und Rückmessung bestimmt wurden. Die numerischen Werte können Tabelle 22 entnommen werden.

Tabelle 22: Versuchsparameter und berechnete Maßstäbe

d [m]	Is [mm]	$L_{nutzbar}$ [m]	m Hin [ppm]	m Rück [ppm]	\bar{m} [ppm]
1.6	5.003	0.08 - 1.90	0.3	6	3.2
7.1	5.003	0.20 - 1.78	4.5	5.5	5.0

Betrachtet man Tabelle 22, so zeigt sich ein Unterschied von 5.7ppm zwischen den berechneten Maßstäben aus Hin- und Rückmessung bei 1.6m. Dies ist auch allein durch Betrachtung der Messreihe ersichtlich (siehe Abbildung A.2), welche eine geringe Diskrepanz zwischen Hin- und Rückmessung (0.01mm) zeigt. Als Ursache dafür wurde zunächst ein Aufheizeffekt vermutet, allerdings war das Instrument vor dieser Messung bereits für mehrere Stunden in Betrieb. Deshalb wird vermutet, dass aufgrund der extremen Verdrehung der Latte (für die orthogonale Ausrichtung auf das Instrument) die Schrauben der Lattenhalterung entsprechend fester angezogen wurden, um die Latte sicher zu montieren und dadurch eine Spannung auf die Latte wirkt, welche sich nur sehr langsam löst und so diese Drift verursacht. Aufgrund dessen wurde auch diese Messung für die Maßstabsbestimmung nicht berücksichtigt.

Für die Messung bei 7.1m zeigt sich dagegen nur ein Unterschied von 1ppm für die berechneten Maßstäbe aus Hin- und Rückmessung. Zusätzlich muss dabei berücksichtigt werden, dass das für diese Messungen (beliebig) gewählte Abtastintervall für eine Maßstabsbestimmung des Messsystems nicht optimiert ist, sodass systematische Resteffekte vorhanden sind. Diese können auf Basis dieser Messdaten jedoch nicht näher eingegrenzt werden und für eine zusätzliche Untersuchung stand das Instrument nicht mehr zur Verfügung.

Als Konsequenz wurde somit ein Maßstab von 5ppm (Mittelwert aus Hin- und Rückmessung bei 7.1m) an die Messwerte nach Formel 6.8 angebracht,

$$h_{red} = h - m \cdot h \quad (6.8)$$

wobei h den mittels Nivellier gemessenen Höhen entspricht und h_{red} den um den Maßstab reduzierten Höhen entspricht.

6.4.2 Hohes Messrauschen

Schon allein durch Betrachtung der einzelnen Messreihen (siehe Anhang A) zeigt sich, dass das Messrauschen mit zunehmender Distanz größer wird. Die Messung bei 11.9m bildet hier jedoch eine Ausnahme. Hier ist ein deutlich größeres Rauschen erkennbar, außerdem sind einige große Ausreißer ersichtlich.

Zunächst wurde vermutet, dass dieses Ergebnis aus einer Art zusätzlichem Aufheizefekt resultiert, da das Instrument vor dieser Messung für mehrere Tage in Betrieb war (Tag und Nacht). Deshalb wurde zunächst eine Wiederholungsmessung bei dieser Distanz durchgeführt (siehe Abbildung 6.28), nachdem das Instrument zuvor über mehrere Tage ausgeschaltet war (siehe Anhang D). Jedoch zeigte sich auch bei dieser Messung ein sehr großes Messrauschen, noch dazu traten hier weitaus größere Ausreißer auf.

Im nächsten Schritt wurden deshalb Messungen 0.5m vor bzw. hinter dieser Distanz ausgeführt, um feststellen zu können, ob dieses Verhalten ausschließlich bei dieser Distanz auftritt. Während bei der Messung für eine Distanz von 12.4m eine Verringerung des Messrauschens, sowie der Anzahl der Ausreißer ersichtlich ist, zeigte sich bei 11.4m ein ähnliches Ergebnis wie zuvor. Deshalb wurde das Instrument um weitere 0.5m weitergeschoben und abermals Messungen ausgeführt. Die Messreihen sind zusammengefasst in Abbildung 6.28 ersichtlich. Zusätzlich wurden die drei Einzelmessungen je Position mittels grauer Punkte geplottet, um das Messrauschen sowie die einzelnen Ausreißer besser zeigen zu können.

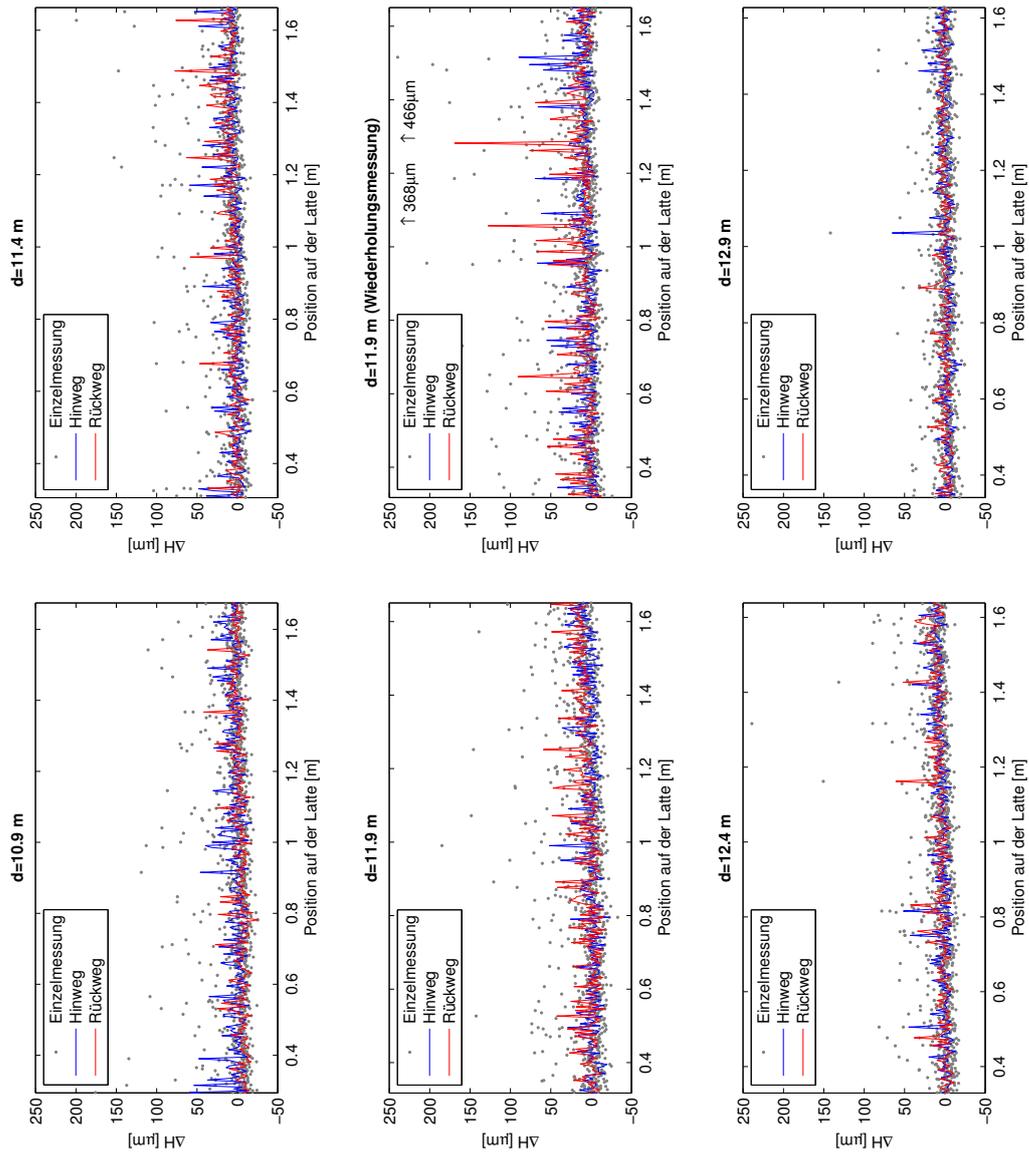


Abbildung 6.28: Messtrauschen bei Distanzbereich um 12m

Betrachtet man Abbildung 6.28, so zeigt sich, dass bei einer Distanz von 12.9m abgesehen von einzelnen Ausreißern nur mehr ein geringes Messrauschen auftritt. Bei den restlichen Distanzen zeigt sich hingegen ein höheres Rauschen, außerdem sind mehr Ausreißer ersichtlich. Besonders die Wiederholungsmessung bei 11.9m zeigt hier vereinzelt Ausreißer in der Größenordnung von 0.4 bis 0.5mm.

Die Ursache für das erhöhte Messrauschen und die extremen Ausreißer, sowie deren hohe Anzahl bei den soeben gezeigten Distanzbereichen konnte durch diese Versuchsreihen alleine nicht geklärt werden. Hierzu wären weitere Folgeuntersuchungen nötig, die allerdings nicht mehr durchgeführt werden konnten, da nach Abschluss der Messungen das Messsystem aus Kombination des SDL1X und der BIS20-Latte nicht mehr zur Verfügung stand.

6.4.3 Streuung der Messwerte

Im nächsten Schritt wurden nun für alle Messungen Standardabweichung und Streuung berechnet, nachdem diese um den zuvor berechneten Maßstab (5ppm) reduziert wurden. Dabei wurden nur die Einzelmessungen in den mittleren Lattenbereichen berücksichtigt, da die Messwerte in den Lattenendbereichen systematischen Fehlern unterliegen. Die numerischen Ergebnisse sind in Tabelle 23 ersichtlich (grafisch in Abbildung 6.29). Zusätzlich wurde die Anzahl der Messwerte jeder Messreihe angegeben. Außerdem wurde aus den Daten eine robuste Ausreißerdetektion per MAD² durchgeführt, aufgrund der verschieden großen Anzahl an Datenpunkten wurden die Ausreißer als prozentuale Angabe dargestellt.

²Median Absolute Deviation

Tabelle 23: Standardabweichung und Spannweite der Messwerte

Distanz [m]	Messwerte	STD [μm]	Range [μm]	Ausreißer [%]
1.6	2178	9	100	1.6
3.0	2100	13	120	5.3
7.1	1869	9	205	0.6
10.9	1656	17	200	4.9
11.4	1629	18	223	5.0
11.9	1596	20	219	6.0
11.9 (Wiederholung)	1596	28	497	7.7
12.4	1572	16	266	3.6
12.9	1542	11	168	2.7
15.0	1422	11	165	1.7
18.9	1203	12	157	2.0
23.3	951	15	153	1.8
27.0	744	15	215	1.1
29.0	630	18	121	0.6

Es zeigt sich, dass die Standardabweichung nicht nur - wie erwartet - mit zunehmender Distanz größer wird, sondern auch für den zuvor gezeigten Distanzbereich um 11.9m höher ist. Außerdem zeigt sich für die Distanz bei 3m eine höhere Standardabweichung. Die prozentuale Angabe zeigt für diesen Distanzbereich, ebenso wie für die Messung bei 3m, eine größere Anzahl an Ausreißern gegenüber den restlichen Messreihen. Während die Größe der Ausreißer bei 3m allerdings maximal 0.12mm beträgt, sind diese bei den zuvor gezeigten Messungen im Bereich von 11.9m deutlich größer. Dies resultiert auch in einer größeren Streuung der Messwerte. Eine größere Streuung ist auch in weiteren Messreihen (beispielsweise bei 7.1m) ersichtlich, allerdings sind hier nur vereinzelte Ausreißer auszumachen.

Besonders auffällig ist das Ergebnis bei der Wiederholungsmessung von 11.9m, welche eine Standardabweichung von knapp 0.03mm zeigt, außerdem beträgt die Spannweite der Messwerte aufgrund extremer Ausreißer rund 0.5mm.

Die berechneten Standardabweichungen wurden nachfolgend grafisch dargestellt (siehe Abbildung 6.29), um die Abweichungen der Messungen bei 3m bzw. für den Distanzbereich von 11.9m zu verdeutlichen. Zusätzlich wurde eine Regressionsgerade über die restlichen Messungen berechnet.

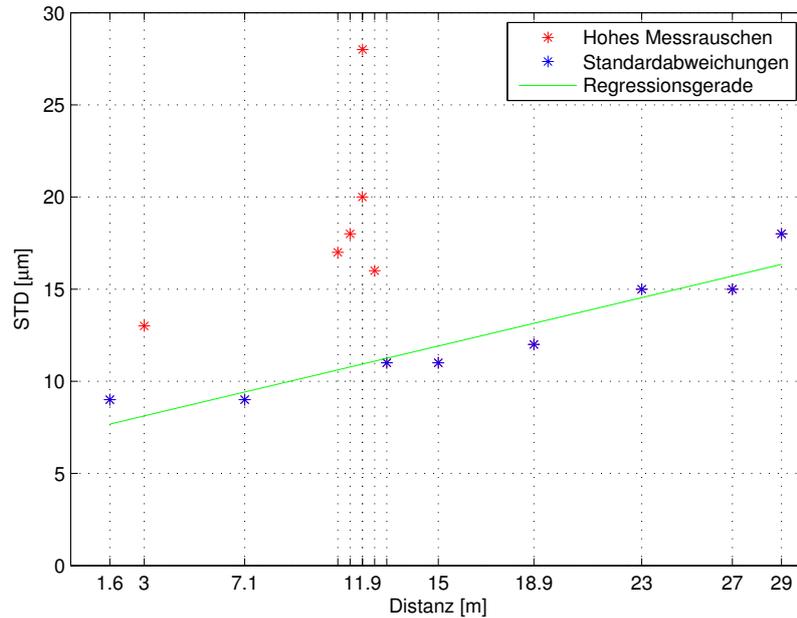


Abbildung 6.29: Berechnete Standardabweichungen und Regressionsgerade für SDL1X#2

Auf Grundlage dieser Regressionsgerade (ermittelt aus den Messdaten) lässt sich nun die Standardabweichung der Einzelmessungen für beliebige Distanzen nach Formel 6.9 berechnen.

$$\sigma_d[\mu m] = 0.32\left[\frac{\mu m}{m}\right] * (d[m] - 1.6[m]) + 8.2[\mu m] \quad (6.9)$$

6.4.4 Zusammenfassung

Ausgenommen der Wiederholungsmessung bei 11.9m zeigt sich eine Standardabweichung, welche auch für Distanzen von rund 30m $< 0.02\text{mm}$ beträgt. Zwischen der Standardabweichung der Einzelmessungen und der Distanz besteht allgemein ein linearer Zusammenhang, allerdings konnten Distanzbereiche ausgemacht werden, bei welchen erhöhtes Messrauschen auftritt und zusätzlich vermehrt Ausreißer in der Größenordnung bis knapp 0.5mm auftreten. Deshalb kann nur die Empfehlung abgegeben werden, in der Praxis stets im Average Modus zu messen, hier wäre jedoch ein Softwareupdate dringend notwendig (vgl. Abschnitt 4.5) um per statistischen Kenngrößen auf die Güte der Höhenablesung rückschließen zu können.

Die Ursache des erhöhten Messrauschens bei 3m bzw. dem Distanzbereich von 11.9m konnte mit diesen getätigten Messungen nicht geklärt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde das neue SDL1X Digitalnivellier von Sokkia untersucht.

Marktanalyse

Es wurde unter anderem eine Marktanalyse durchgeführt, bei der die aktuellen Digitalnivelliere aller Hersteller am Markt berücksichtigt wurden. Auch die Instrumente von chinesischen Herstellern wurden angeführt. Diese Marktanalyse erlaubt den Vergleich der Instrumente aufgrund deren Spezifikationen und soll dem Anwender einen Überblick geben. Dabei zeigte sich, dass sich die Instrumente innerhalb einer Genauigkeitsklasse rein von den Spezifikationen her kaum unterscheiden. Allerdings gibt es diverse Technologien, Schnittstellen und Zusatzeinrichtungen, welche die jeweiligen Instrumente von der Konkurrenz abheben. Auch die Instrumente der chinesischen Hersteller stehen der Konkurrenz dabei um nichts nach, allerdings konnten zu diesen Instrumenten - abgesehen von Datenblättern - kaum Informationen gefunden werden. Das SDL1X kann sich dabei aufgrund etlicher Zusatzeinrichtung wie Autofokusfunktion, View Finder und Bluetoothverbindung, aus der Menge hervorheben. Zusätzlich bietet es mit einer Genauigkeit von $0.2\text{mm}/\sqrt{km}$ für 1km Doppelliniennivellement die höchste erzielbare Genauigkeit aller recherchierten Instrumente.

Neben den Spezifikationen der Instrumente wurde auch deren technischer Aufbau, sowie der Bildsensoren recherchiert, allerdings konnten hier nur vereinzelt Informationen gefunden werden. Diese Angaben mögen für den Anwender in der Praxis kaum von Bedeutung sein, für die weiteren Untersuchungen im Labor sind diese jedoch unabdingbar. Aufgrund der restriktiven Informationspolitik von Sokkia konnten für das SDL1X, trotz umfangreicher Recherchen und Anfragen beim Hersteller selbst, keinerlei Informationen zur Pixelgröße und Brennweite gefunden werden, weshalb nachfolgend diverse Annahmen getroffen werden mussten.

Aufbau des SDL1X

Neben den Spezifikationen des SDL1X wurden auch der Aufbau, sowie die einzelnen Bestandteile des Instruments durch Patent- und Literaturrecherche studiert. Außerdem wurde der Lattencode von Sokkia, sowie dessen Eigenschaften und Besonderheiten angeführt. Zusätzlich wurde die gesamte Codefolge für den Bereich von 0-5m von einer 5m Teleskoplatte abgegriffen und aufgelistet. Auch die Art der Distanz- und Höhenberechnung wurden näher untersucht, allerdings sind hier kaum Informationen zu den

verwendeten Algorithmen verfügbar und die genaue Berechnungsmethode bleibt weiterhin unklar.

Zusätzlich wurde die Software des Instruments näher untersucht, dabei zeigte sich, dass die Bedienung flüssig verläuft und ein einfacher Menüaufbau vorliegt. Abgesehen davon zeigten sich aber auch einige Makel, die durch Softwareupdates behoben werden sollten.

Untersuchungen im Labor

Im geodätischen Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme wurden anschließend Untersuchungen am Vertikalkomparator durchgeführt. Dabei wurden zwei Instrumente mit verschiedenen Software- und Sensorversionen eingesetzt.

Die Untersuchungen zeigen, dass beim SDL1X systematische Abweichungen in den Lattenendbereichen auftreten. Diese sind bei SDL1X#1 noch deutlich größer als bei SDL1X#2, da durch die neuere Software- bzw. Sensor-Version von SDL1X#2 offensichtlich Korrekturen angebracht werden, um diese Abweichungen zu minimieren. Trotzdem treten bei größeren Entfernungen (ca. 30m) noch immer Abweichungen im Bereich von 0.1mm bei SDL1X#2 auf. Zusätzlich zeigten sich bei zwei Messreihen Abweichungen in den oberen Lattenenden, welche bis zu 0.15mm betragen. Trotz Folgeuntersuchungen konnte die Ursache für diese Abweichungen allerdings nicht gefunden werden.

Daneben konnte der elektronische Öffnungswinkel des SDL1X empirisch bestimmt werden. Dessen Größe ist mit ca. 2.7° knapp doppelt so groß wie die Herstellerangabe von $1^\circ 20'$ für das Seefeld. Dies sollte in der Praxis berücksichtigt werden und die Grenzwerte für die Lattenendbereiche am Instrument softwareseitig entsprechend festgelegt werden.

Da die Messungen mit SDL1X#1 durch Aufheizeffekte beeinflusst waren, wurde die Aufheizzeit für beide Instrumente bestimmt. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede in den Aufheizzeiten (SDL1X#1 ca. 3.5h, SDL1X#2 ca. 2h), sowie der Größe der Ziellinienänderung zwischen den beiden Instrumenten. Für die weiteren Untersuchungen wurden diese Effekte entsprechend berücksichtigt.

Weitere Untersuchungen sollten zeigen, ob auch beim SDL1X, wie bei Instrumenten anderer Hersteller, zyklisch wirkende Höhenfehler auftreten, welche von der Pixelgröße des Bildsensors, der Brennweite des Instruments und der Codefolge abhängen. Da keinerlei Informationen zum Bildsensors gegeben waren, mussten diverse Annahmen für die Untersuchungen getroffen werden. Untersuchungen sowohl für kurze als auch für lange Distanzen zeigten jedoch keinerlei Auffälligkeiten. Dies lässt vermuten, dass entweder die getätigten Annahmen falsch waren, andererseits wäre es auch möglich (und wün-

schenswert), dass die Annahmen richtig waren, das SDL1X allerdings keine zyklischen Höhenfehler aufweist.

Schlussendlich wurde die distanzabhängige Performance des Instruments bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die Standardabweichung der Messungen im Allgemeinen $<0.02\text{mm}$ beträgt. Allerdings konnte bei einer Distanz von 3m ein erhöhtes Messrauschen festgestellt werden wie auch bei dem Distanzbereich um 12m. Zusätzlich konnten hier mehrere Ausreißer in der Größenordnung von bis zu 0.5mm ausgemacht werden. Abgesehen von diesen Messungen zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und der Entfernung zwischen Instrument und Latte.

Ausblick

Als Folgeuntersuchung bietet sich zunächst die Bestimmung von möglichen zyklisch wirkenden Höhenfehlern an. Hier müsste allerdings die Größe der Pixel sowie die Brennweite des Instruments vom Hersteller bekannt gegeben werden, um die kritischen Distanzen berechnen zu können.

Abgesehen davon sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Ursache für die Abweichungen von 0.15mm im oberen Lattenende (welche bei zwei Messreihen auftraten) zu klären. Weiters sollten Messungen durchgeführt werden, um die Ursache für das erhöhte Messrauschen bei bestimmten Distanzen festzustellen. Zusätzliche Untersuchungen könnten für die Funktion des Autofokus vorgenommen werden, um dessen Genauigkeit, sowie Geschwindigkeit bei wechselnden Lichtverhältnissen überprüfen zu können. Außerdem würde es sich anbieten, per ISO-Test die Herstellerangabe für 1km Doppelliniennivellement zu überprüfen.

Literatur

- BOIF (2011): *DAL Series Digital Level - Operating Manual*, via www.boif.com. Stand: 20.10.2011.
- Brunner F.K. (2007): *Vermessungskunde Einführung*. Unpublizierte Unterlagen zur Vorlesung, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz.
- Brunner F.K. (2008): *Grundlagen der Messtechnik für Bauingenieure*. Unpublizierte Unterlagen zur Vorlesung, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz.
- Brunner F.K. und Wieser A. (2007): *Ingenieurgeodäsie*. Unpublizierte Unterlagen zur Vorlesung, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz.
- Chiba M. (1999): *Elektronische Vermessungsvorrichtung und Messlatte zur Verwendung mit dieser*. Offenlegungsschrift DE 19858130 A1.
- Foif (2007): *EL 100 Series Digital Level Brochure*.
- Foif (2011): www.foif.com.cn. Stand: 27.10.2011.
- geo-FENNEL (2011a): *DiNiv 100 Bedienungsanleitung*, via www.michael-kahner.de. Stand: 3.11.2011.
- geo-FENNEL (2011b): www.geo-fennel.de. Stand: 27.10.2011.
- Geomax (2009): *Geomax ZDL700 Series User Manual Version 1.0*.
- Geomax (2011): www.geomax-positioning.com. Stand: 27.10.2011.
- Horizon (2011): www.horizon.sg. Stand: 27.10.2011.
- Ingensand H. (1990): *Das Wild NA2000, das erste Digitalnivellier der Welt*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Jg. 1990, S. 201 - 210.
- Ingensand H. (2005): *Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Jg. 2005, S. 229-232.
- Kahmen H. (2006): *Angewandte Geodäsie Vermessungskunde, 20. Auflage*. de Gruyter, Berlin. 679 Seiten.
- Kolida (2011): www.kolidainstrument.com. Stand: 20.10.2011.

- Leica (2006): *Leica DNA03/10 User Manual, Version 2.0*.
- Leica (2011): *www.leica-geosystems.at/de*. Stand: 20.10.2011.
- Nishita N., Shoji N. und Nagao T. (2006): *Automatischer Fokussiermechanismus eines Vermessungsinstruments. Offenlegungsschrift DE 10 2006 007 013 A*.
- Rüeger J.M. (2003): *Electronic Surveying Instruments - A Review of Principles, Problems and Procedures*. The University of New South Wales, Sidney. 156 Seiten.
- Rüeger J.M. und Brunner F.K. (2000): *On System Calibration and Type Testing of Digital Levels*. Zeitschrift für Vermessungswesen, Jg. 2000, S. 120-130.
- Ruide (2011): *www.ruideinstrument.com*. Stand: 20.10.2011.
- Seto T. und Chiba M. (2000): *Digital Level with New Bar Code*. GIM International, February 2000, S. 77-79.
- Seto T., Chiba M., Nagao T. und Muraki M. (1999): *Results of Tests and Experiments with SDL30 Digital Level*. In: M Lilje (ed.): *Geodesy and Surveying in the Future. The Importance of Heights*, Proceedings March 15-17, 1999, FIG Commission 5, Gävle, Sweden (S.69-78).
- Sokkia (2000a): *Sokkia PowerLevel SDL30 Output Formats, Command Explanations, 2nd Edition*.
- Sokkia (2000b): *Sokkia SDL30/SDL50 Bedienungsanleitung, 8th Edition*.
- Sokkia (2009): *Sokkia SDL1X Operator's Manual, 8th Edition*.
- Sokkia (2011a): *http://www.sokkia.net*. Stand: 12.11.2011.
- Sokkia (2011b): *Technology Frontline, Digital Level SDL1X*.
- South (2011): *en.southinstrument.com*. Stand: 20.10.2011.
- Staiger R. (2002): *Instrumentenuntersuchung des Digitalnivelliers SDL30 von Sokkia*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Jg. 2002, S. 387ff.
- Staiger R. und Deumlich F. (2001): *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Wichmann Verlag, Berlin. 426 Seiten.

Topcon (2010): *DL-502/503 Electronic Digital Level Brochure*.

Topcon (2011): *www.topcon-positioning.de*. Stand: 15.10.2011.

Trimble (2011a): *Trimble DiNi Datenblatt*.

Trimble (2011b): *www.trimble.com*. Stand: 20.10.2011.

Wehmann W., Weferling U., Reimann C. und Schuster S. (2009): *Untersuchungen des Digitalnivelliers Leica Sprinter 200M auf Einsatzmöglichkeiten bei Überwachungsmessungen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Jg. 2009, S. 294-299.

Witte B. und Schmidt H. (2006): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 6., überarbeitete Auflage*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 678 Seiten.

Woschitz H. (2003): *System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results*. Shaker Verlag. 201 Seiten, Aachen.

Woschitz H. (2005): *Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen*. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten 6/2005. S. 239-244.

Woschitz H. und Brunner F.K. (2002): *System Calibration of Digital Levels - Experimental Results of Systematic Effects*. Kopáček A And Kyřinovic P (eds) In: INGENIO2002, 2nd Conference of Engineering Surveying, Bratislava, November 2002: S. 165-172.

Woschitz H. und Brunner F.K. (2003): *Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 91. S. 68-76.

Anhang A

Messungen in den Lattenendbereichen

In Abbildung A.1 zeigt die Ergebnisse für die ersten Untersuchungen zu den Messungen der Lattenendbereiche bei einer Distanz von ca. 25m. Die Messungen wurden dabei manuell ausgelöst und händisch abgetippt, deshalb wurde nur die untere Hälfte der Latte gemessen, um die Anzahl an Messungen gering halten zu können.

Auch in diesen beiden Abbildungen zeigen sich die deutlichen Abweichungen in den Lattenendbereichen. Weiters kann die Annahme getroffen werden, dass die Herstellerangabe für das Sehfeld falsch ist, aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten kann jedoch keine statistische Aussage getroffen werden.

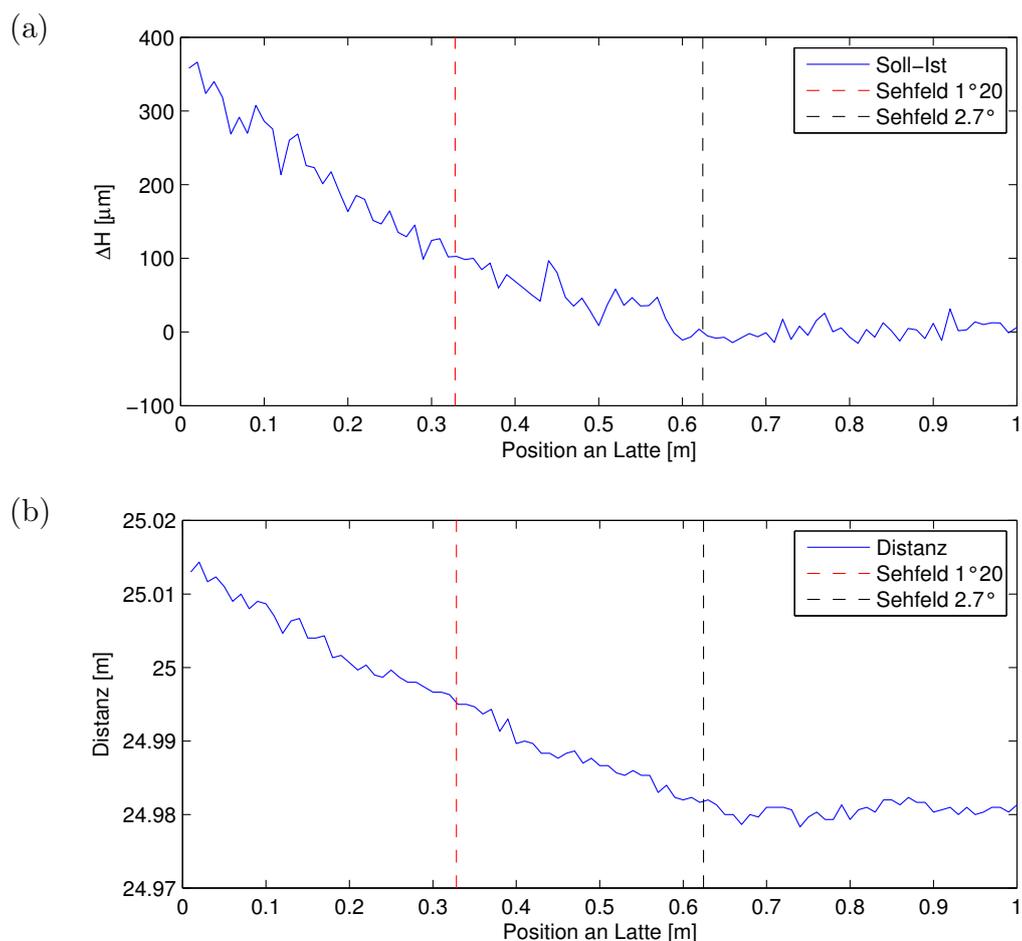


Abbildung A.1: Mit SDL1X#1 bei 25m gemessene (a) Höhendifferenzen und (b) Distanzen

Abbildungen A.2 bis A.5 zeigen eine Zusammenfassung der Messreihen von SDL1X#2. Wie zu erkennen ist, betragen die Abweichungen in den Lattenenden im Allgemeinen $<0.1\text{mm}$, zusätzlich werden im oberen Endbereich die Höhen teils zu groß geschätzt, während diese im unteren Endbereich stets zu klein berechnet werden. Außerdem treten bei zwei Messungen (15.0m und 27.0m) systematische Abweichungen von 0.15mm in den oberen Lattenenden auf. Zusätzlich zeigen sich bei einigen Messreihen Zyklen in den extremen Lattenenden.

Im Distanzbereich von 11.9m zeigt sich zudem ein erhöhtes Messrauschen, zusätzlich sind in diesem Distanzbereich extreme Ausreißer im Bereich von mehreren Zehntel Millimetern ersichtlich.

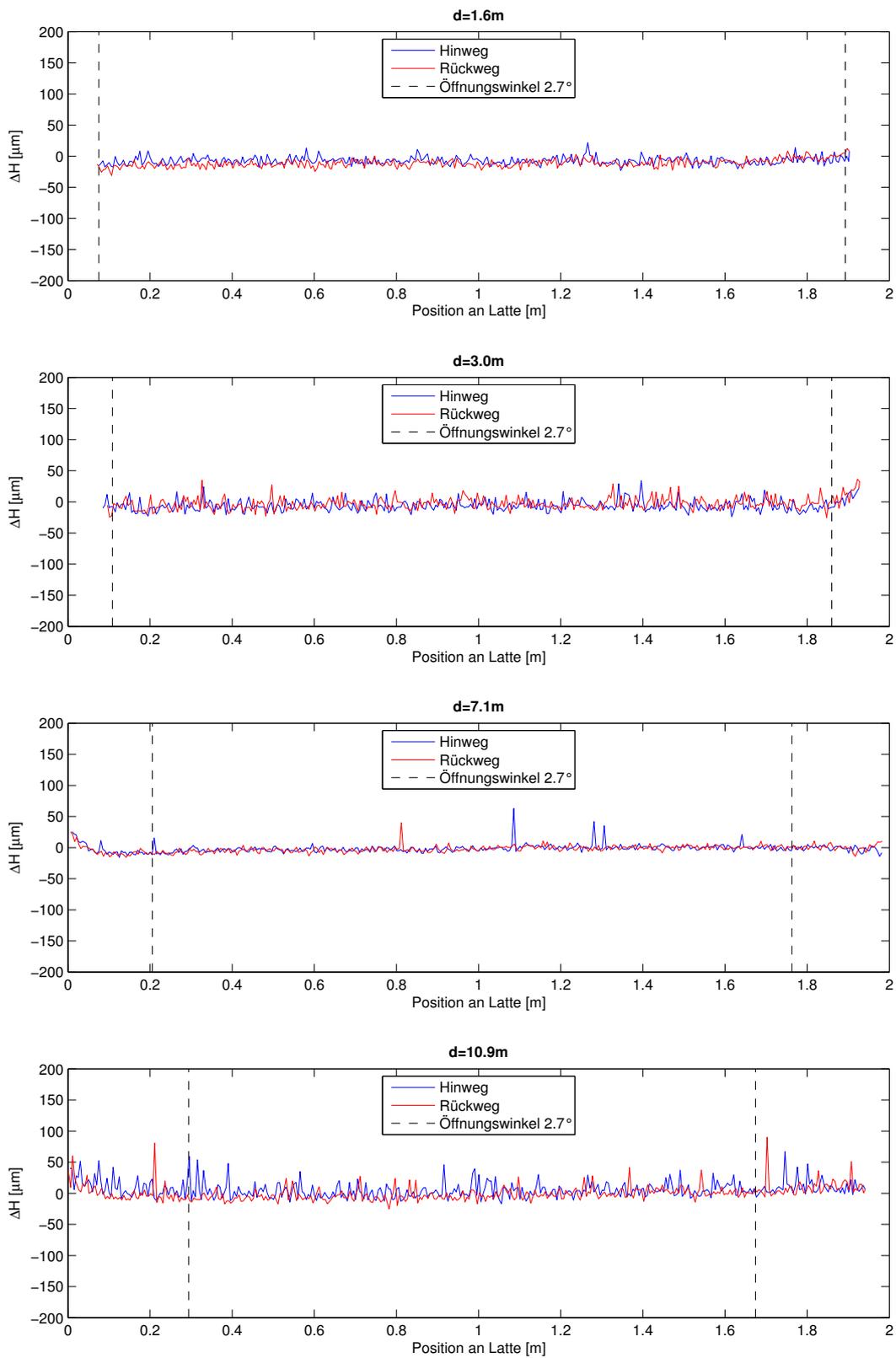


Abbildung A.2: Messreihen je Mittel der 3 Einzelmessungen über gesamten Lattenbereich, SDL1X#2

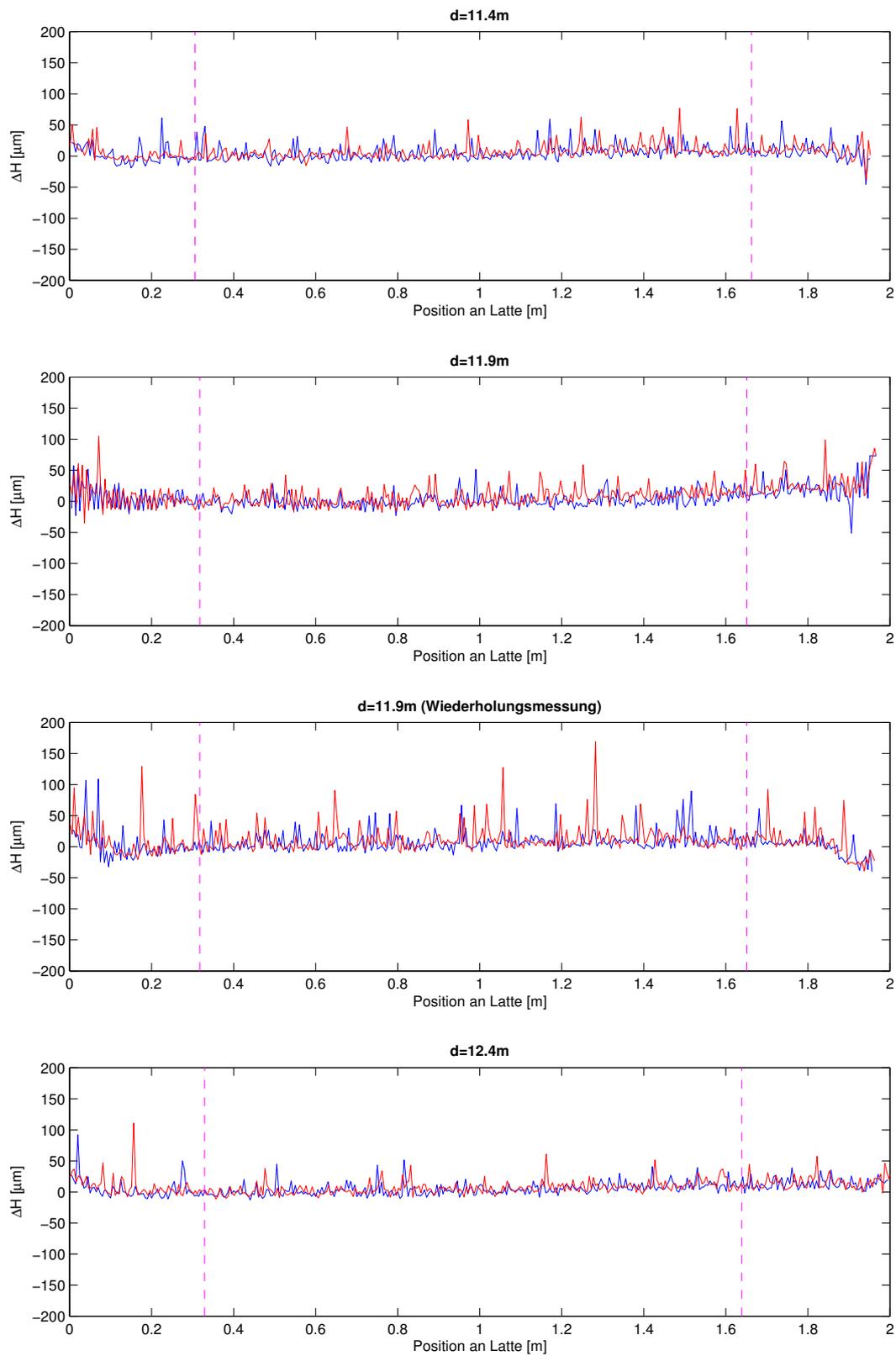


Abbildung A.3: Messreihen je Mittel der 3 Einzelmessungen über gesamten Lattenbereich, SDL1X#2

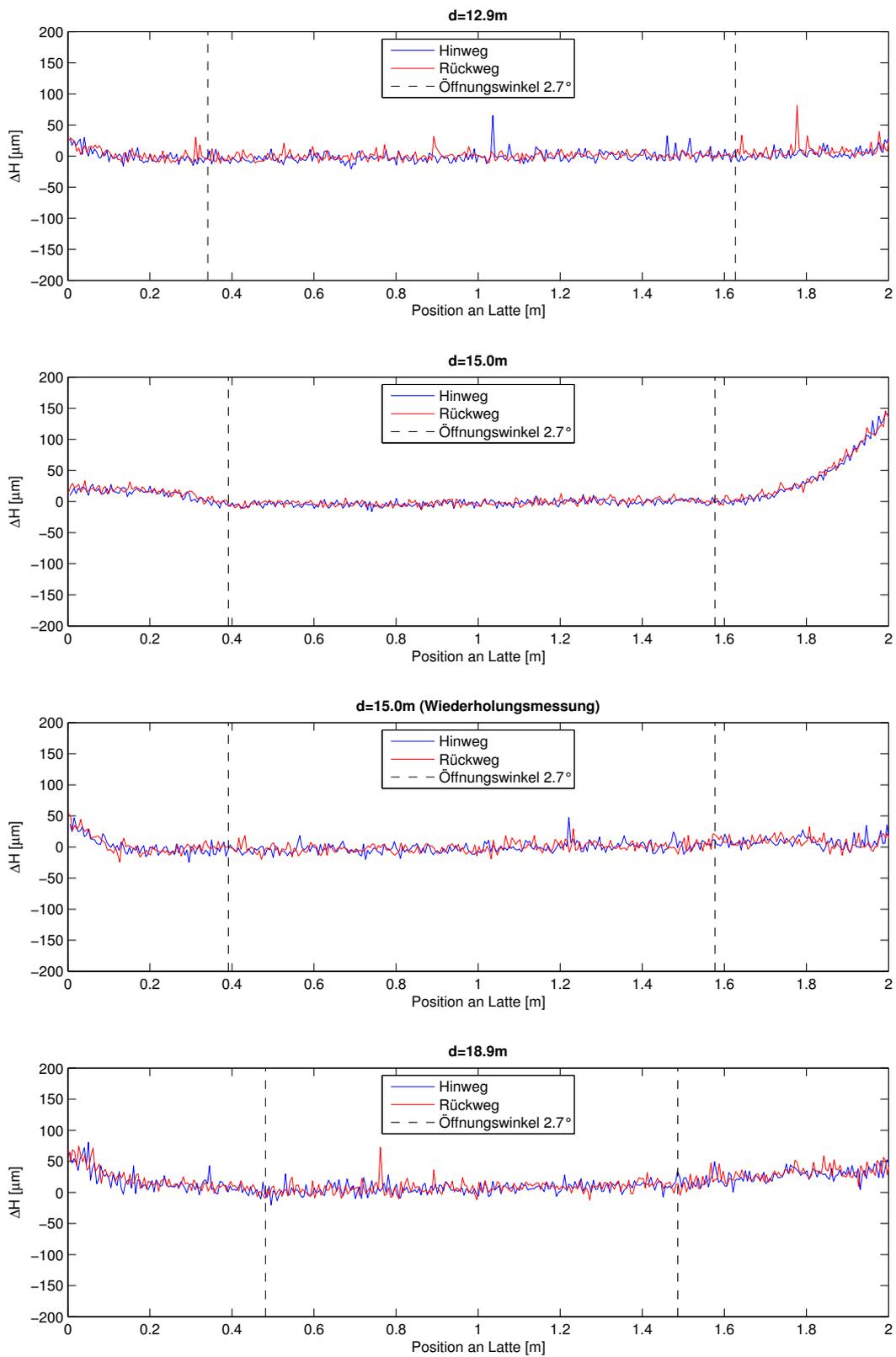


Abbildung A.4: Messreihen je Mittel der 3 Einzelmessungen über gesamten Lattenbereich, SDL1X#2

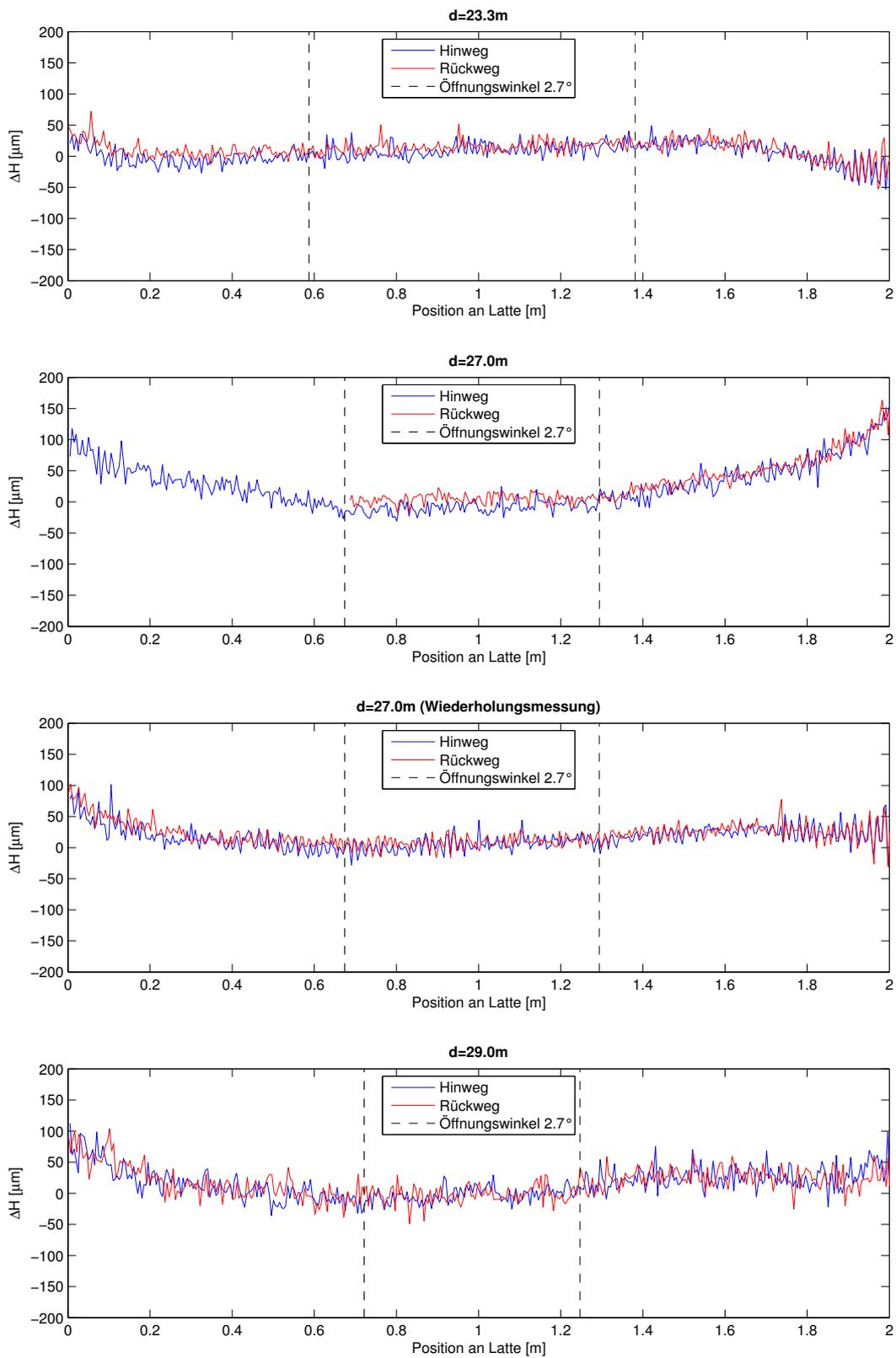


Abbildung A.5: Messreihen je Mittel der 3 Einzelmessungen über gesamten Lattenbereich, SDL1X#2

Anhang B

Untersuchungen zu zyklischen Höhenfehlern

Die nachfolgende Abbildung zeigt die gemessenen Höhendifferenzen sowie die gemessenen Distanzen für den Messbereich von 17.2 bis 19.0m. Wie bereits erwähnt konnten auch hier keine systematischen Effekte nachgewiesen werden.

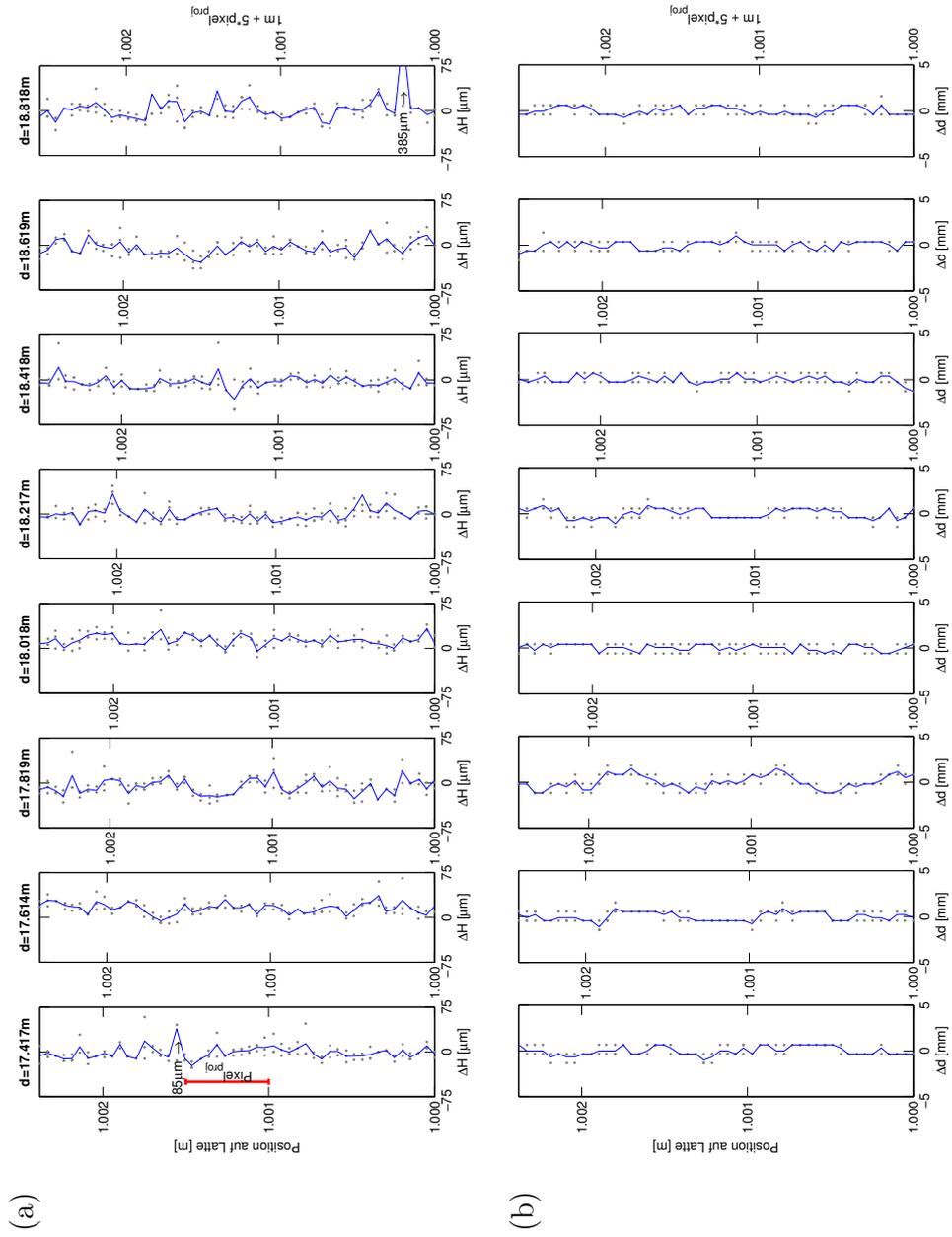


Abbildung B.6: Distanzbereich 17.2 bis 18.8m, (a) gemessene Höhendifferenzen, (b) gemessene Distanzdifferenzen

Anhang C

Tabelle C.1 zeigt die Codefolge des Lattencodes von Sokkia für den Bereich von 0-5m die von einer BIS20-Latte bzw. einer 5m-Teleskoplatte abgegriffen wurde. Dabei sind sowohl die Breiten der einzelnen Codeelemente, sowie deren Höhe (bezogen auf die Mitte des Elements) angegeben. Die Codefolge ist bisher in der Literatur nicht vermerkt.

Tabelle C.1: Codefolge des Sokkia Lattencodes von 0m bis 5m

#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]
1	16	7	23	368	8	45	720	8
2	32	11	24	384	3	46	736	12
3	48	7	25	400	12	47	752	7
4	64	11	26	416	3	48	768	8
5	80	12	27	432	7	49	784	8
6	96	11	28	448	7	50	800	8
7	112	4	29	464	11	51	816	12
8	128	12	30	480	3	52	832	11
9	144	4	31	496	8	53	848	3
10	160	12	32	512	7	54	864	11
11	176	3	33	528	3	55	880	4
12	192	11	34	544	4	56	896	8
13	208	7	35	560	7	57	912	11
14	224	3	36	576	11	58	928	4
15	240	3	37	592	8	59	944	12
16	256	12	38	608	8	60	960	7
17	272	12	39	624	11	61	976	7
18	288	8	40	640	3	62	992	3
19	304	7	41	656	3	63	1008	3
20	320	4	42	672	3	64	1024	8
21	336	7	43	688	8	65	1040	3
22	352	7	44	704	4	66	1056	4

#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]
67	1072	11	97	1552	11	127	2032	4
68	1088	4	98	1568	12	128	2048	8
69	1104	7	99	1584	8	129	2064	4
70	1120	7	100	1600	3	130	2080	11
71	1136	8	101	1616	8	131	2096	7
72	1152	11	102	1632	11	132	2112	4
73	1168	11	103	1648	8	133	2128	4
74	1184	12	104	1664	8	134	2144	3
75	1200	8	105	1680	4	135	2160	3
76	1216	7	106	1696	11	136	2176	8
77	1232	11	107	1712	4	137	2192	8
78	1248	3	108	1728	3	138	2208	3
79	1264	8	109	1744	7	139	2224	7
80	1280	4	110	1760	12	140	2240	7
81	1296	11	111	1776	3	141	2256	8
82	1312	7	112	1792	7	142	2272	7
83	1328	11	113	1808	8	143	2288	7
84	1344	3	114	1824	3	144	2304	12
85	1360	11	115	1840	3	145	2320	3
86	1376	11	116	1856	3	146	2336	3
87	1392	3	117	1872	7	147	2352	7
88	1408	3	118	1888	4	148	2368	12
89	1424	11	119	1904	4	149	2384	3
90	1440	4	120	1920	8	150	2400	8
91	1456	12	121	1936	11	151	2416	12
92	1472	12	122	1952	11	152	2432	8
93	1488	7	123	1968	11	153	2448	7
94	1504	3	124	1984	11	154	2464	7
95	1520	4	125	2000	4	155	2480	11
96	1536	4	126	2016	3	156	2496	7

#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]
157	2512	7	187	2992	4	217	3472	12
158	2528	12	188	3008	12	218	3488	3
159	2544	7	189	3024	3	219	3504	12
160	2560	11	190	3040	7	220	3520	8
161	2576	3	191	3056	7	221	3536	12
162	2592	7	192	3072	8	222	3552	11
163	2608	3	193	3088	11	223	3568	12
164	2624	7	194	3104	3	224	3584	7
165	2640	11	195	3120	3	225	3600	3
166	2656	7	196	3136	12	226	3616	4
167	2672	12	197	3152	11	227	3632	12
168	2688	7	198	3168	3	228	3648	3
169	2704	7	199	3184	8	229	3664	11
170	2720	11	200	3200	12	230	3680	8
171	2736	12	201	3216	7	231	3696	4
172	2752	4	202	3232	8	232	3712	7
173	2768	11	203	3248	7	233	3728	7
174	2784	3	204	3264	3	234	3744	7
175	2800	12	205	3280	11	235	3760	3
176	2816	3	206	3296	12	236	3776	3
177	2832	7	207	3312	3	237	3792	11
178	2848	3	208	3328	12	238	3808	3
179	2864	11	209	3344	3	239	3824	4
180	2880	11	210	3360	7	240	3840	7
181	2896	7	211	3376	11	241	3856	11
182	2912	7	212	3392	12	242	3872	3
183	2928	3	213	3408	7	243	3888	3
184	2944	3	214	3424	7	244	3904	4
185	2960	12	215	3440	4	245	3920	12
186	2976	7	216	3456	11	246	3936	12

#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]	#	H [mm]	B [mm]
247	3952	11	269	4304	4	291	4656	8
248	3968	3	270	4320	11	292	4672	11
249	3984	12	271	4336	3	293	4688	7
250	4000	12	272	4352	3	294	4704	3
251	4016	11	273	4368	7	295	4720	11
252	4032	12	274	4384	11	296	4736	4
253	4048	8	275	4400	11	297	4752	8
254	4064	3	276	4416	4	298	4768	7
255	4080	12	277	4432	4	299	4784	11
256	4096	11	278	4448	12	300	4800	7
257	4112	8	279	4464	11	301	4816	7
258	4128	4	280	4480	12	302	4832	8
259	4144	12	281	4496	3	303	4848	3
260	4160	7	282	4512	11	304	4864	4
261	4176	12	283	4528	7	305	4880	7
262	4192	11	284	4544	8	306	4896	11
263	4208	7	285	4560	7	307	4912	7
264	4224	4	286	4576	4	308	4928	12
265	4240	7	287	4592	11	309	4944	4
266	4256	7	288	4608	8	310	4960	8
267	4272	3	289	4624	7	311	4976	8
268	4288	8	290	4640	3	312	4992	8

Anhang D

Tabelle D.1 zeigt eine chronologische Auflistung der in dieser Arbeit durchgeführten Messungen.

Tabelle D.1: Chronologische Reihenfolge der durchgeführten Untersuchungen

Messfile	Datum	Untersuchung	Instrument	Distanz [m]	Anmerkung
VC0001461	09.06.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#1	25.0	manuelle Messung
VC0001469	24.06.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#1	3.0	
VC0001470	27.06.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#1	29.0	
VC0001471	28.06.2011	Aufheizeffekte	SDLIX#2	29.0	Dauermessung
VC0001506	11.11.2011	Aufheizeffekte	SDLIX#2	29.0	Dauermessung
VC0001507	14.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	29.0	
VC0001508	14.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	27.0	LabView Fehler
VC0001511	16.11.2011	Aufheizeffekte	SDLIX#2	29.0	Kompensatoranregung
VC0001519	22.11.2011	Bestimmung d. Pixelgröße	SDLIX#2	17.1 bis 19.2	Pixelgröße, lange Distanzen
VC0001520	24.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	eingeklemmtes Lederband
VC0001522	25.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	3.0	
VC0001524	28.11.2011	Bestimmung d. Pixelgröße	SDLIX#2	4.13 bis 4.37	Pixelgröße, kurze Distanzen
VC0001525	28.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	1.6	
VC0001531	30.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	7.1	
VC0001532	30.11.2011	Bestimmung d. Pixelgröße	SDLIX#2	4.13 bis 4.37	Pixelgröße, kurze Distanzen
VC0001533	30.11.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	18.9	
VC0001534	01.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	11.9	hohes Messrauschen
VC0001536	02.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	Wiederholungsmessung Lederband
VC0001537	05.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	27.0	Wiederholungsmessung LabView Fehler
VC0001538	05.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	23.3	
VC0001544	11.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	11.9	Wiederholungsmessung wegen hohem Messrauschen
VC0001548	14.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	Verkipfung und Verdrehung um -5°
VC0001549	14.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	12.4	
VC0001550	14.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	11.4	
VC0001551	15.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	Verkipfung und Verdrehung um 15°
VC0001552	15.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	12.9	
VC0001553	15.12.2011	Lattenendbereiche	SDLIX#2	11.9	
VC0001556	09.01.2012	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	Messung mit Teleskopplatte
VC0001558	10.01.2012	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	Teleskopplatte, Tageslichtneonröhre
VC0001559	10.01.2012	Lattenendbereiche	SDLIX#2	15.0	Teleskopplatte, Laborbeleuchtung
VC0001563	12.01.2012	Bestimmung d. Pixelgröße	SDLIX#2	19.6	Pixelgröße, lange Distanzen

Masterarbeit

Thema: Untersuchung des neuen Digitalnivelliers Sokkia SDL1X

Umfangreiche Untersuchungen mit Präzisions-Digitalnivellieren haben gezeigt, dass die Höhenablesungen durchaus durch systematische Effekte beeinflusst werden können.

Neben Leica, Trimble und Topcon bietet nun auch Sokkia ein Digitalnivellier für Präzisions-Höhenmessungen an. Dieses soll im Zuge einer Masterarbeit untersucht werden.

Hierfür steht am Institut einer der weltweit genauesten Vertikalkomparatoren für die Systemkalibrierung zur Verfügung.

Neben den Systemuntersuchungen soll auch ein Matlab Simulationsprogramm entstehen. Zweck dieses Programms ist es, den Messprozess besser verstehen zu lernen und mögliche Schwächen des Nivelliers zu identifizieren. Dadurch wird eine hochwertige Versuchsplanung möglich.

Die Masterarbeit umfasst

Aufgaben:

- Studium der von Sokkia verwendeten Auswertemethode (Patente, Literatur)
- Erstellen eines Simulationsprogramms in Matlab
- Erstellung einer Steuerungsroutine für das automatisierte Auslesen der Nivellier Messdaten bzw. eines Kommunikations-Prototypen
- Untersuchungen mit dem Vertikalkomparator
- Evaluierung der Resultate mit dem Simulationsprogramm



Für die Untersuchungen steht das Labor des Instituts, insbesondere der Vertikalkomparator zur Systemkalibrierung von Digitalnivellieren zur Verfügung.

Betreuer: Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut WOSCHITZ

Bearbeiter: gesucht