

Untersuchung von Steck- und Teleskopplatten für Digital-Nivelliere

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur

Michael Schauer, Bakk. techn.

Graz, Mai 2012

Masterstudium Geomatics Science



Technische Universität Graz

Betreuer:

Dr.techn. Dipl.-Ing. Helmut Woschitz

Begutachter:

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

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

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

EIDESSTÄTLICHE 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

In der technischen Vermessung oft verwendete günstige Steck- und Teleskop-Nivellierlatten mit codierter Lattenteilung wurden auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Die aus Kostengründen einfache Fertigung kann mehrere Fehler verursachen, welche sich im Messergebnis eines Nivellements niederschlagen können. Die Genauigkeitsanforderungen einfacher Nivellierlatten sind in der DIN 18703 definiert, wobei unter den bekannten Herstellern einzig Leica explizit nach diesen Vorgaben gefertigte Latten verkauft.

Hauptsächlich wurden mehrteilige Stecklatten des Typs Leica/Wild GKNL4M (10 Stk.) mit Baujahren zwischen 1990 und 2011 untersucht, zusätzlich jeweils eine Teleskoplatte der Hersteller Trimble (TD24) und Sokkia (BAS55).

Bestimmt wurde der Lattenmaßstab, welcher oft große Abweichungen von bis zu 800 ppm vom Sollmaßstab auf einzelnen Lattenteilen aufweist. Auffallend waren dabei die teilweise großen Maßstabsunterschiede zwischen den Segmenten einer Latte und das vermehrte Auftreten negativer Maßstäbe bei Elementen älterer Latten.

Einzeluntersuchungen der Stoßstellen zwischen den Lattenelementen zeigten, dass diese darüber liegende Höhenablesungen um bis zu 0.6 mm verfälschen können. Dieser Fehler lässt sich aber oft nur sehr schlecht reproduzieren. So kann sich der Stoß nach erneutem Zusammensetzen der Lattenteile um bis zu 0.8 mm verändern.

Bei der Bestimmung des Lattennullpunkts konnte gezeigt werden, dass alle Latten den maximalen in der Norm DIN 18703 tolerierten Nullpunktfehler von 0.3 mm unterschreiten. Die in der Norm maximale tolerierte Lattenfußschiefe von $10'$ wurde aber von mehreren Latten überschritten (max. $22.4'$). Als Grund hierfür kann die einfache Ausführung des Fußes angesehen werden. Durch Unregelmäßigkeiten der Lattenfußfläche können Höhenablesungen an verschiedenen Lattenaufsetzpunkten um bis zu 0.13 mm abweichen.

In einer Reihe von Temperatursprungversuchen wurde der thermische Ausdehnungskoeffizient der aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GKNL4M) bzw. Aluminium (TD24, BAS55) gefertigten Latten bestimmt. Dabei konnten die Herstellerangaben für Kunststofflatten (<10 ppm/K) sowie die Ergebnisse früherer Untersuchungen bestätigt werden. Die Herstellerangaben der Aluminiumlatten (24 ppm/K) wurden deutlich unterschritten (18 ppm/K), was auch bei Wiederholungsmessungen bestätigt werden konnte.

Es zeigte sich, dass viele der untersuchten Latten starke Abweichungen vom Soll aufweisen und nur teilweise der DIN 18703 entsprechen. Diese Arbeit bestätigt deutlich, dass die untersuchten Lattentypen nur bei einfachen Vermessungsaufgaben Anwendung finden sollen und sich keineswegs für Präzisionsaufgaben eignen.

Abstract

The aim of this master thesis was to examine cheap insertion and telescopic leveling rods with digital code which are frequently used in practical surveying. The simple construction out of financial reasons leads to numerous defects affecting the results of a level measurement. The accuracy requirements of ordinary leveling rods are defined in DIN 18703 but among leading manufacturers it is only Leica that sells rods which are explicitly built to these specifics.

Multiple insertion rods from Leica/Wild GKNL4M (10 pcs.) manufactured between 1990 and 2011 were tested, as well as two telescopic rods from Trimble (TD24) and Sokkia (BAS55). Results showed that these rods produced enormous differences up to 800 ppm from the desired scale. These obvious variations proved to be constant in all the measurements of this study. A remarkably great scale difference also occurred between the segments of a staff and the increased incidence of negative scales on older staffs.

Furthermore the edges of the rod elements turned out to be an error source which can distort the height reading up to 0.6 mm. But further tests showed that this specific error is rather difficult to reproduce. The gap between two elements can vary up to 0.8 mm between two assemblies.

Additionally, it was possible to demonstrate that all staffs used in the tests came below zero-offset of 0.3 mm, tolerated in the DIN 18703. This offset, however, varies with the attaching position of the rod on height point.

Moreover, several staffs exceeded the tolerated inclination standard of 10' (max. 22.4') for a rod footplate. It can be assumed that the simple technical design of the footplate might be causing this problem. Also the height readings can vary up to 0.13 mm because of the irregularity of the footplate surface at different setup positions.

Finally, the thermal expansion coefficients of glass fibre reinforced plastic (GKNL4M) as well as aluminium (TD24, BA555) rods were determined in a series of experiments. The findings not only confirm the manufacturer's information for plastic rods (<10ppm/K) but also verify results of former studies. On the contrary, the value for aluminium rods of 24 ppm/K as specified by the manufacturer could not be verified by the experiments (18 ppm/K).

During the entire study it became evident that many of the examined rods show rather large differences from the desired value and only correspond in part with the DIN 18703. Concluding it can be said that this thesis clearly confirms the examined types of rods should only be used for simple surveying tasks since they qualify in no way for precise leveling.

Danksagung

Am Titelblatt dieser Arbeit ist zwar nur ein Name erwähnt, jedoch haben viele andere Menschen dazu beigetragen sie entstehen zu lassen.

Am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz habe ich von Anfang an volle Unterstützung in allen Belangen meiner Arbeit erfahren. Ing. Rudolf Lummerstorfer und DI (FH) Robert Presl sollen hier besonders genannt werden: Beide hatten immer ein offenes Ohr für meine Anliegen und nahmen viele Aufbauten im Messlabor für mich vor. Auch bei meinem Betreuer Dr. Helmut Woschitz konnte ich darauf vertrauen voll und ganz unterstützt zu werden und jede fachlich Frage prompt beantwortet zu bekommen.

Weiters danke ich den Firmen, welche mir über mehrere Monate Nivellierlatten für meine Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben. Geodis Austria, Leica Austria und Geodäsie Austria liehen mir teilweise werkneue Latten und leisteten somit einen wichtigen Beitrag. Um auch bereits in der Praxis verwendete Latten untersuchen zu können, erhielt ich von auzinger/grillmayer ZT dankenswerterweise zwei Stecklatten.

Abschließend danke ich meinen Eltern, die es mir überhaupt erst ermöglicht haben Geodäsie zu studieren und mich immer dabei unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Die Norm DIN 18703	3
2	Fehlereinflüsse bei Nivelliersystemen	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Lattenbezogene Effekte	4
3	Überblick über am Markt erhältliche einfache Nivellierlatten	7
4	Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium	9
4.1	Untersuchte Nivellierlatten	9
4.2	Verwendete Nivelliersysteme	11
4.3	Vertikalkomparator	13
5	Reproduzierbarkeit der Stoßstellen	17
5.1	Einführung	17
5.2	Versuchsaufbau	19
5.3	Ergebnisse	21
6	Lattenfußschiefe	25
6.1	Einführung	25
6.2	Versuchsaufbau	26
6.3	Ergebnisse	29
7	Nullpunktfehler	33
7.1	Einführung	33
7.2	Nullpunktbestimmung mittels Doppelverhältnis	33
7.2.1	Versuchsaufbau	36
7.3	Nullpunktbestimmung mittels Präzisionsnivellier und Vertikalkomparator	38
7.4	Ergebnisse	39
7.4.1	Invarlatten	39
7.4.2	Standardlatten	40
8	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	48
8.1	Einführung	48
8.2	Versuchsaufbau	50

8.3	Ergebnisse	53
9	Systemüberprüfung am Vertikalkomparator	56
9.1	Einführung	56
9.2	Versuchsaufbau	58
9.3	Ergebnisse	61
9.3.1	Maßstab	62
9.3.2	Stoßstellen	65
9.3.3	Lattencode Wild/Leica	67
10	Ergebnisübersicht und Resümee	71
	Referenzen	74
	Anhang A: Weitere Fehlerquellen bei Nivelliermessungen	A-1
	Anhang B: Reproduzierbarkeit der Stoßstellen	B-1
	Anhang C: Thermischer Ausdehnungskoeffizient	C-1
	Anhang D: Systemüberprüfung	D-1
	Anhang E: Versuchsübersicht	E-1
	Anhang F: Ausschreibung der Masterarbeit	F-1

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Oftmals wird für die Bestimmung von Höhenunterschieden die Methode des Nivellements angewendet. Dabei werden heutzutage zunehmend digitale Nivelliersysteme verwendet. Das Messsystem besteht jedoch nicht nur aus dem Nivellier als Sensor, sondern auch aus einer oder mehreren Nivellierlatten. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau eines Nivellier-Messsystems zu sehen.

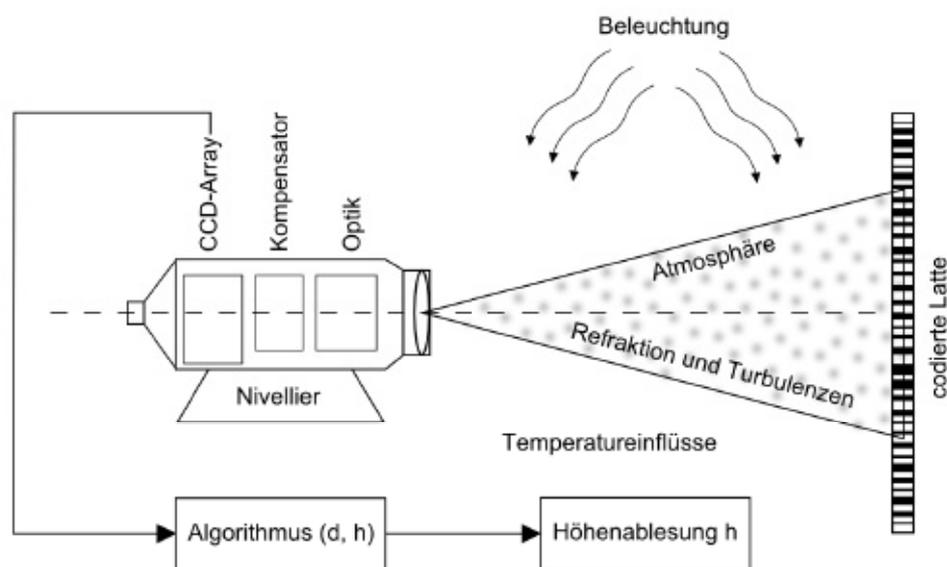


Abbildung 1: Digitalniveausystem als Messsystem (nach Woschitz, 2003)

Müssen hohe Genauigkeitsanforderungen in der Übertragung der Höhe eingehalten werden, so kommen neben Präzisionsdigitalnivellieren üblicherweise Präzisionsnivellierlatten zum Einsatz. Solche Latten tragen den Code auf einem Band aus Invar, welches in einem Metallkorpus eingespannt ist. Auf Grund der einteiligen Konstruktion des Lattengehäuses, sowie des sehr kleinen Temperaturexpansionskoeffizienten des codetragenden Invarbands können in Verbindung mit einem Präzisionsnivellier sehr hohe Genauigkeiten erzielt werden.

Für einfache Arbeiten im Feld werden aus praktikablen Gründen oft nur Latten verwendet, die sich zu Transportzwecken in mehrere kürzere Teile zerlegen lassen. Die Strichcodeelemente sind direkt am Lattenkörper (z.B. Aluminium, GFK, ...) angebracht, wodurch gegenüber Invarlatten weitere Fehlereinflüsse entstehen.

Wesentliche Fehler bei Arbeiten im Feld sind:

- **Lattennullpunkt:** Der Nullpunkt der Lattenteilung und der physische Nullpunkt der Latte unterscheiden sich um den Lattennullpunkt.
- **Unregelmäßigkeiten und Schiefe des Lattenfußes:** Die Aufsetzfläche der Latte weist Unterschiede zur Orthogonalebene der Lattenlängsachse auf.
- **Systemmaßstab:** Das Gesamtsystem „Digital-Nivellier“ verfügt über einen höhenablesungsabhängigen Maßstab ungleich Eins.
- **Stoßstellen:** Bei Höhenablesungen im Sichtbereich von Übergängen zwischen zwei Elementen der mehrteiligen Latte kann ebenfalls ein Fehler auftreten.
- **Temperaturabhängiger Ausdehnungskoeffizient:** Änderungen der Temperatur der Latte führen zu einer Ausdehnung bzw. zu einem Zusammenziehen des Lattenmaterials, was einer Änderung des Maßstabs der Latte entspricht.

Präzisionsnivellierlatten mit Codeteilung werden seit der Einführung der ersten Digitalnivelliere (Ingensand, 1990) intensiv auf ihre Fehler und deren Einflüsse auf die Höhenübertragung untersucht. Einfache Latten (z.B. mehrteilige Stecklatten oder Teleskoplatten) werden jedoch selten detailliert auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Obwohl diese sehr oft in der Praxis verwendet werden, setzen sich nur wenige Prüflabore damit intensiv auseinander (Heister, 1994).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mehrere wesentliche Fehlereinflüsse von einfachen Nivellierlatten zu bestimmen.

In Kapitel 2 werden Fehler beschrieben, die die Bestimmung von Höhendifferenzen verfälschen können. Kapitel 3 gibt eine Übersicht über sich am Markt befindliche einfache Nivellierlatten mit digitalem Code.

Das in den Versuchen verwendete Messinstrumentarium wird in Kapitel 4 näher beschrieben. In den Kapiteln 5 bis 9 sind die Durchführung und die Ergebnisse der Untersuchungen dokumentiert (Kap. 5: Reproduzierbarkeit der Stoßstellen, Kap. 6: Lattenfußschiefe, Kap. 7: Nullpunktfehler, Kap. 8: Thermischer Ausdehnungskoeffizient, Kap. 9: Systemüberprüfung am Vertikalkomparator).

1.2 Die Norm DIN 18703

Wird bei einem Nivellement ein Gerät der höchsten Genauigkeitsklasse verwendet, jedoch ungeeignete oder stark gebrauchte Latten eingesetzt, so werden die für das Gerät spezifizierten Genauigkeiten nicht erreicht werden können.

Eine Reihe von Genauigkeitsanforderungen an sogenannte Standardnivellierlatten sind in der Norm DIN 18703 (DIN, 1998) definiert. Folgende Latteneigenschaften werden darin definiert:

- **Teilung:** Die Abweichung der Codeteilung vom Sollmaßstab darf bei 20°C maximal

$$\Delta l = \pm(0.3mm + 3.l.10^{-4}) \quad (1)$$

betragen, wobei l die Länge der Nivellierlatten in Millimeter angibt.

- **Nullpunktfehler:** Der Nullpunktfehler in der Lattenfußmitte darf maximal 0.3 mm betragen.
- **Beschläge:** Die Abweichung der Lattenfußfläche von der Orthogonalebene der Lattenlängsachse darf nicht größer als 10' sein.

Nur Leica bezieht sich jedoch in der Gebrauchsanweisung des untersuchten Lattentyps GKNL4M explizit auf diese Norm.

2 Fehlereinflüsse bei Nivelliersystemen

2.1 Allgemeines

In z.B. Rüeger und Brunner (2000), Fröhlich et al. (2003) oder AdV (2009) werden eine Vielzahl von Effekten genannt, welche die Ergebnisse eines Nivellements beeinflussen können. Diese Einflüsse können in drei Gruppen getrennt werden:

a) *Instrumentenbezogene Einflüsse:*

Fehler, welche durch die Konstruktion des Nivelliers oder die verwendete Software hervorgerufen werden.

b) *Nivellierlattenbezogene Einflüsse:*

Diese Effekte beziehen sich ausschließlich auf Nivellierlatten, welche wiederum durch ungenaue Herstellung, Abnutzung oder andere äußere Einflüsse entstehen.

c) *Elektro-optische Ablesefehler und äußere Einflüsse:*

Diese Art von Effekten entsteht durch das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten. Hier spielen sowohl das Gerät, die Nivellierlatte als auch die Umgebungsbedingungen eine Rolle.

Die instrumentenbezogenen Fehler (a) und elektro-optischen Ablesefehler sowie die äußeren Einflüsse (c) sind in den Tabellen A.1 und A.2 im Anhang A zusammengefasst. Die für diese Arbeit wesentlichen lattenbezogenen Einflüsse sind in Tabelle 1 beschrieben, wobei die in Laboruntersuchungen bestimmten Fehlerquellen fett markiert sind.

Eine Vielzahl der aufgezählten Fehler treten vor allem bei Messungen im Feld auf (z.B. Einsinken des Stativs) und können durch bestimmte Messverfahren und sorgfältigem Handeln mit den Instrumenten vermieden bzw. eliminiert werden. Andere Effekte wie der Systemmaßstab können ausschließlich im Labor bestimmt werden. Wie bereits von Rüeger und Brunner (2000) erwähnt, sollten die Herstellerangaben kritisch betrachtet und unabhängig überprüft werden. Darum sollen die Parameter von Nivelliersystemen, welche für kritische Messungen verwendet werden, von einem unabhängigen Prüflabor bestimmt werden.

2.2 Lattenbezogene Effekte

Fehler der Nivellierlatte können die Höhenbestimmung des Nivelliers stark beeinflussen. Die möglichen Effekte werden in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Latienbezogene Effekte

Effekt	Beschreibung	Maßnahme	Quelle
Nullpunktfehler	Differenz zwischen dem Nullpunkt der Latenteilung und dem physischen Nullpunkt der Latente.	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung einer geraden Anzahl von Instrumentenaufstellungen (Verfahren „Rote Hose“) • Bestimmung des Fehlers im Labor 	(1), (2), (3)
Unregelmäßigkeit und Schiefe des Lattenfußes	Abweichungen vom definierten Lattennullpunkt in Abhängigkeit vom Aufsetzpunkt der Latte	<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung des Lattenschuhs im Labor • Zentrieradapter für Präzisionslatten 	(1), (2)
Lattenmaßstab	Die Lattencode-Teilung weicht vom Maßstab 1 ab und verfälscht so die Höhenbestimmung. Bei mehrteiligen Latten können auf jedem Latenteil unterschiedliche Maßstäbe vorhanden sein.	Kalibrierung von einteiligen Latten im Labor.	(1), (2), (3)
Temperaturabhängiger Lattenmaßstab	Mit jeder Temperaturänderung dehnt bzw. zieht sich das Material der Latte zusammen und verändert so den Maßstab.	Bestimmung des temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten im Labor.	(1), (2)
Feuchteabhängiger Lattenmaßstab	Standardlatten aus Holz oder Fiberglas reagieren auf eine Änderung der relativen Feuchte mit einer Änderung des Lattenmaßstabs.	Überprüfung des feuchteabhängigen Ausdehnungskoeffizienten im Labor.	(1)
Tagesabhängiger Lattenmaßstab	Durch den Gebrauch der Latte kann sich der Lattenmaßstab ebenfalls leicht ändern		(1)
Beschädigter Lattencode	Beschädigungen des Codes können vom Nivellier falsch oder gar nicht interpretiert werden und zu falsch Höhenwerten führen.	Ersetzen von beschädigten Code-latten oder Invarbänder.	(1), (2)
Fehlerhafte einzelne Code-Elemente	Trotz eines sorgfältigen Herstellungsprozesses können einzelne Code-Elemente von ihrer Soll-Position abweichen.	Kalibrierung der Latte im Labor.	(1), (3)

Tabelle 1: Fortsetzung

Effekt	Beschreibung	Maßnahme	Quelle
Stoßstellenfehler	An den Stoßstellen von Teilen herkömmlicher Latzen können Sprungstellen auftreten, welche sich als Offset in allen darüber liegenden Latzenablesungen manifestieren.	Bestimmung der evtl. vorhandenen Sprungstellen im Labor.	(1)
Dejustierung der Dosenlibelle	Eine dejustierte Libelle an der Latte erzeugt falsche Höhenablesung durch die Schiefstellung der Latte.	Justierung der Libelle.	(2)
Schiefstellung der Nivellierlatte	Steht die Latte trotz justierter Libelle schief, so hat dies die selben Auswirkungen.	Sorgfältige Horizontierung der Latte.	(3)
Sinusfehler	Dieser Effekt tritt auf, wenn das Abbé'sche Komparatorprinzip nicht eingehalten wird und bei Schiefstellung der Latte der Lattenaufsetzpunkt nicht in der Verlängerung der Lattenteilung liegt.	Aufsetzen der Latte in Verlängerung der Lattenteilung.	(2), (3)

(1) Rüeger und Brunner (2000)

(2) AdV (2009)

(3) Fröhlich et al. (2003)

3 Überblick über am Markt erhältliche einfache Nivellierlatten

Da jeder Hersteller von digitalen Nivellieren einen eigenen Code zur Höhenbestimmung entwickelt hat, sind Codelatten auch nur mit einem markengleichen Nivellier zu benutzen. Beispielsweise sind Nivellierlatten mit Leica-Code nur mit Nivellieren der Firma Leica Geosystems verwendbar.

In diesem Abschnitt wird ein Überblick gegeben, welche Standard-Codelatten sich derzeit am Markt befinden. Es sind bis auf die „LumiScale“ von Nedo nur Latten zwischen 2.2 und 8 Meter angeführt, welche aus mehreren Teilen bestehen und sich durch verschiedene Verbindungsmechanismen mit einander verbinden lassen. In Tabelle 2 werden ausschließlich Latten von Leica, Trimble, Topcon und Sokkia erwähnt. Dabei ist zu sagen, dass bei diesen Firmen nähere Informationen zu den Latten oft nur sehr unzureichend, schwer zu finden oder gar nicht vorhanden sind.

Leica Geosystems verrät als einziger Hersteller den temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten aller seiner Latten in den Gebrauchsanweisungen. Auch die Firma Trimble gibt einige Informationen zu seinen Latten preis, jedoch keine über Temperatúrausdehnungskoeffizient oder die Güte des Lattenmaßstabs. Weit schwieriger gestaltet sich die Suche nach Informationen zu den Nivellierlatten bei den beiden japanischen Herstellern Sokkia und Topcon. Durch den Zusammenschluss von Topcon und Sokkia wird für neue, mit Sokkia-Geräten baugleiche, Topcon-Nivelliere ebenfalls der Sokkia-Lattencode auf den Latten verwendet.

Als letzter Lattentyp ist die selbstleuchtende Nivellierlatte „LumiScale“ von NEDO angeführt, welche nach einem Konzept des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz entstanden ist (Brunner und Woschitz, 2004). Die LumiScale-Latte liegt in ihrer Genauigkeit zwischen den Anforderungen der DIN 18703 (Nivellierlatten) und DIN 18717 (Präzisionslatten).

Tabelle 2: Standardcodelatten von Leica, Trimble, Topcon und Sokkia am Markt (Stand: April 2012)

Name	Material	Länge [m]	Elementanzahl (Längen der Elemente [m])	Verbindung	Gewicht [kg]	Latten-Querschnitt [mm]	αT [ppm/K]	DIN18703 ¹ spezifiziert	Preis ² [€]	Quelle
LEICA										
GNLE4C ³	Holz	4.00	4 (1/1/1/1)	Scharnier	4.2	— ⁴	5	ja		Leica (2004)
GANL4C ³	Aluminium	4.00	4 (1/1/1/1)	steckbar	2.8	—	24	ja		Leica (2004)
GKNL4M	Fiberglas	4.05	3 (1.35/1.35/1.35)	steckbar	4.4	62 x 25⁵	<10	ja	335	Leica (2004)
GTL4C	Aluminium	4.00	4 (1.10/0.91/1.00/0.99)	Teleskop	1.75	—	24	ja	126	Leica (2007)
GTL4M	Fiberglas	4.08	4 (1.13/1.01/0.98/0.96)	Teleskop	2.4	—	15	ja	335	Leica (2007)
LEICA SPRINTER										
GSS111	Aluminium	5	4 (—)	Teleskop	—	—	—	nein	85	Goecke-Schwelm (2011), Geozone (2011)
GSS112	Aluminium	4	4 (—)	Teleskop	—	—	—	nein	65	Goecke-Schwelm (2011), Geozone (2011)
GSS113	Fiberglas	3	— (—)	Teleskop	—	—	—	nein	220	Goecke-Schwelm (2011), Geozone (2011)
TRIMBLE										
TD24	Aluminium	4	4 (1/1/1/1)	Teleskop	1.8	53 x 29⁵	—	nein	145	Trimble (2007)
TD25	Aluminium	5	5 (1/1/1/1/1)	Teleskop	2.3	—	—	nein	210	Trimble (2007)
LD23	Holz	3	3 (—)	Scharnier	—	—	—	nein	158	Geodäsie Austria (2011)
LD24	Holz	4	4 (—)	Scharnier	—	—	—	nein	158	Geodäsie Austria (2011)
	Fiberglas	5	5 (1/1/1/1/1)	Teleskop	1.8	—	—	nein	263	Trimble (2007)
TOPCON⁶										
SA-5M	Aluminium	5	3 (—)	Teleskop	—	—	—	nein	—	Topcon (2005), Topcon (2009)
SG-3M	Fiberglas	3	2 (1.5/1.5)	—	—	—	—	nein	—	Topcon (2005), Topcon (2009)
SOKKIA										
BGS40	Fiberglas	4.08	3 (1.36/1.36/1.36)	steckbar	2.4	58 x 28	20	nein	560	Sokkia (2000)
BGS50	Fiberglas	5.09	3 (1.36/1.36/1.36/1.01)	steckbar	3.0	58 x 28	20	nein	720	Sokkia (2000)
BAS55	Aluminium	5.01	5 (1.11/0.94/1.00/0.98/0.98)	Teleskop	—	50 x 28	24	nein	150	Sokkia (2000), Sokkia (2010)
NEDO										
Lumiscale	Aluminium ⁷	2.20	1 (2.20)	einteilig	4.0	70 x 60.5	<18	nein	1417	Nedo (2009)

¹ nach DIN-Norm 18703 (DIN, 1998)² Nettopreise³ Nicht mehr in Produktion⁴ Keine Herstellerangabe vorhanden⁵ Keine Herstellerangabe vorhanden, am Lattenfuss abgemessen⁶ Es sind keine weiteren Informationen zu TOPCON Nivellierlatten verfügbar.⁷ Die Teilung ist auf einem Polyesterfilm aufgebracht.

Die rot und fett hervorgehobenen Latten werden in dieser Arbeit näher untersucht.

4 Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium

4.1 Untersuchte Nivellierlatten

Aus den in Tabelle 2 angeführten am Markt befindlichen Standardnivellierlatten wurden drei Latten-Typen ausgewählt, welche näher untersucht werden sollen.

Auf Grund der großen Anzahl von am Institut vorhandenen Latten des Typ GKNL4M von Leica/Wild, sollte das Hauptaugenmerk auf diesen Lattentyp gelegt werden. Neben den sechs Stück des IGMS wurden von Leica Austria zwei Latten der neuesten Produktionscharge (2. Halbjahr 2011) zur Verfügung gestellt. Weiters sollten auch Latten mit starken Gebrauchsspuren dieses Typ näher untersucht werden. Ein Ziviltechnikerbüro stellte mir dazu zwei alte Latten zur Verfügung, die nach ihrem jahrelangen Gebrauch in der Praxis starke Beschädigungen am Code und an den Stoßstellen aufweisen.

Neben diesen Latten wurde mir auch vom Hersteller eine gebrauchte Teleskoplatte des Typs Trimble TD24 zur Verfügung gestellt, welche eine der meist verkauften Latten dieses Herstellers in Österreich ist. Von Geodis Austria erhielt das Institut eine neue Sokkia BAS55 Teleskoplatte, welche mit dem ebenfalls am Institut untersuchten Nivellier Sokkia SDL1X überprüft wurde.

In Tabelle 3 sind alle 12 Standardnivellierlatten angeführt, welche für die Experimente benutzt wurden. Die bei einigen Versuchen verwendeten Präzisionsinvarlatten sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 3: Untersuchte Nivellierlatten

Latte	Herstellungsjahr ¹	Länge (Elemente) ²	Charge	Verbindung	Zustand	Eigentümer
Leica GKNL4M-1	1999 (1. HJ ³)	4,05 m (3)	9029	steckbar	gut	IGMS ⁴
Wild GKNL4M-2	1990 - 1992	4,05 m (3)		steckbar	schlecht	IGMS
Wild GKNL4M-3	1990 - 1992	4,05 m (3)		steckbar	gebraucht	IGMS
Leica GKNL4M-4	1993 (2. HJ)	4,05 m (3)	9103	steckbar	gebraucht	IGMS
Leica GKNL4M-5	1993 (1. HJ)	4,05 m (3)	9043	steckbar	gebraucht	IGMS
Leica GKNL4M-6	1999 (1. HJ)	4,05 m (3)	9029	steckbar	sehr gut	IGMS
Leica GKNL4M Neu 1	2011 (2. HJ)	4,05 m (3)	1071	steckbar	sehr gut	Leica Austria
Leica GKNL4M Neu 2	2011 (2. HJ)	4,05 m (3)	1071	steckbar	sehr gut	Leica Austria
Leica GKNL4M Gebraucht 1	1999 (1. HJ)	4,05 m (3)	9029	steckbar	stark gebraucht	auzinger/grillmayer ZT
Wild GKNL4M Gebraucht 2	1990 - 1992	4,05 m (3)		steckbar	stark gebraucht	auzinger/grillmayer ZT
Trimble TD24	<2005	4 m (4)		Teleskop	gebraucht	Geodäsie Austria
Sokkia BAS55	neu	5 m (5)		Teleskop	sehr gut	Geodäs Austria

¹ Bei Latte von Wild, Trimble und Sokkia nicht mehr eindeutig feststellbar

² Stoßstellen: Leica (Wild) GKNL4M: 1.35 m / 2,70 m; Trimble TD24: 1.13 m / 2.00 m / 3.01 m / 3.05 m / 2.06 m / 3.05 m / 4.02 m

³ Halbjahr

⁴ Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Tabelle 4: Verwendete Präzisions-Nivellierlatten

Latte	Herstellungsjahr	Länge	Sr. Nr.	Verbindung	Zustand	Eigentümer
Leica GPCL2	—	2 m	25360	einteilig	sehr gut	IGMS
Zeiss LD13	—	3 m	14540	einteilig	sehr gut	IGMS
Sokkia BIS20	—	2 m	056065	einteilig	sehr gut	Geodäs Austria

4.2 Verwendete Nivelliersysteme

Jeder Hersteller von digitalen Nivelliersystemen verfügt über eine eigenständige Methode zur Bestimmung der Höhe, die jeweils durch Patente geschützt ist. Die prinzipielle Bauart der Nivelliere aller Hersteller gleicht sich, doch die Auswertelgorithmen und Lattencodes basieren, soweit bekannt, auf völlig verschiedenen Grundsätzen:

- **Leica (Wild):** Nivelliersysteme von Leica und dessen Vorgänger Wild verwenden einen nicht-periodischen pseudostochastischen Binärcode. Auf einer Lattenlänge von 4.05 m sind 2000 schwarze oder weiße Elemente abgebildet. Ein Grundelement des Codes besitzt also eine Länge von $2025 \mu\text{m}$. Der auf den im Gerät verbauten CCD-Zeilensensor projizierte Codeausschnitt wird durch ein Korrelationsverfahren mit dem intern gespeicherten Code verglichen und daraus die Lattenhöhe abgeleitet (Ingensand, 2005). Daneben wird in der Leica Sprinter-Serie ein eigenständiger Code verwendet (Goecke-Schwelm, 2011).
- **Trimble (Zeiss):** Trimble (vormals Zeiss) setzt auf einen Biphasencode mit einer Länge von 2 cm des Grundelements (Bit). Nach jedem Bit (Eins oder Null bzw. Schwarz oder Weiß) folgt ein Bit der jeweilig anderen Farbe, sodass zwischen den Bits ein starker Helligkeitswechsel detektierbar ist. Der Auswertalgorithmus bestimmt die lagemäßig bekannten Kanten der Codeelementgrenzen. Es werden nur 15 Kanten benötigt um die Höhe bestimmen zu können. Dies macht eine Messung auch im Nahbereich möglich (Ingensand, 2005).
- **Sokkia:** Sokkias RAB-Code (Random Bidirectional Code) verfügt über eine Grundelementlänge von 16 mm. Auf der Latte sind 6 verschiedene Balkenbreiten aufgetragen, welche alle in einem definierten Verhältnis zur Grundelementlänge stehen (Ingensand, 2005). Über die Auswertemethode können nur Vermutungen angestellt werden, da Sokkia dazu keine Informationen preisgibt.

Tabelle 5: Verwendete Nivelliere

	Wild NA3000	Trimble DiNi12	Sokkia SDL1X
Baujahr	1992	2003	2009
Sr.Nr.	89919	701515	100299
Software-Version	2.3	3.40	1056-31-25
Genauigkeit ¹	0.4 mm	0.3 mm	0.2 mm
Öffnungswinkel	2'	5'	2.7'
Quelle	Leica (1993)	Woschitz (2003)	Sokkia Topcon (2009)

¹ nach DIN18723-2: 1 km Doppelnivellment (mit Präzisionsinvarlatte) [$\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$]

4 Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium



(a) Wild NA3000



(b) Trimble DiNi12



(c) Sokkia SDL1X
(Sokkia, 2009)

Abbildung 2: Verwendete Nivelliere

Tabelle 5 zeigt grundlegende Daten der drei Geräte, die für alle Untersuchungen verwendet werden. Als technische Daten werden nur die Genauigkeit von 1 km Doppelnivellment und der elektronische Öffnungswinkel angeführt, da diese für die Untersuchungen entscheidend sind.

Alle drei Geräte besitzen eine Auflösung der Höhenablesung von 0.01 mm, was von vielen Benutzern als Genauigkeitsangabe missverstanden wird. Ist die Auflösung eines Nivelliers beispielsweise bei 0.1 mm bedeutet dies nicht unbedingt, dass das Gerät diese Messgenauigkeit besitzt. Jedoch steigt durch eine geringere Auflösung der Quantisierungsfehler, was zu einem Genauigkeitsverlust der Messungen führt. Besser geeignet ist daher die Angabe des Fehlers bei 1 km Doppelliniennivellement unter Verwendung einer Präzisionsinvarlatte nach der DIN 18723-2.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Planung und Durchführung der Messungen ist der elektronische Öffnungswinkel. Ein größerer Öffnungswinkel bedeutet abhängig von der Beobachtungsdistanz ein größeren sichtbaren Lattenbereich. Dabei ist anzumerken, dass das Trimble DiNi12 bei jeder Distanz maximal einen Lattenbereich von 15 cm ober- und unterhalb der Ziellinie verwendet. Staiger (2002) untersuchte mit dem Sokkia SDL30 ein Vorgängermodell des Sokkia SDL1X und hat den Öffnungswinkel des Nivelliers mit 2.7° experimentell bestimmt. Die Vermutung, dass in beiden Modellen die selben optischen Komponenten verbaut sind und somit der von Staiger bestimmte Winkel auch für das SDL1X aufgenommen werden kann, legen neueste Untersuchung am IGMS nahe (Benkö, 2012).

Über den Zusammenhang

$$x_{CCDproj} = 2.d.\tan\frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

kann die Größe des Lattenbereichs bestimmt werden, welcher auf das CCD-Array des Nivelliers abgebildet wird. An Formel 2 ist einfach zu erkennen, dass sich sowohl die

4 Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium

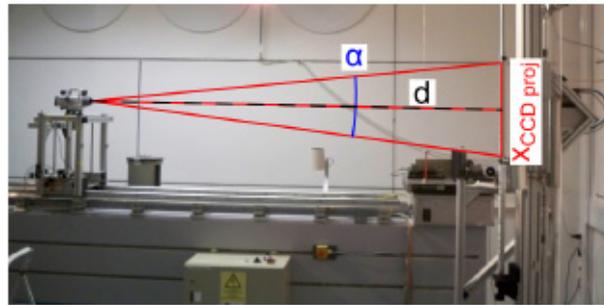


Abbildung 3: Öffnungswinkel der Nivellieroptik und der am CCD abgebildete Lattenbereich ($x_{\text{CCD proj}}$)

Beobachtungsdistanz d als auch der Öffnungswinkel α direkt proportional zum abgebildeten Lattenbereich verhalten. Mit steigender Distanz werden so immer mehr Codeelemente, die zur Höhenbestimmung herangezogen werden, für das Gerät sichtbar. Allerdings wird so auch ein einzelnes Codeelement auf immer weniger Pixel des Array abgebildet.

In Tabelle 6 ist die Größe der abgebildeten Lattenbereiche aller drei Geräte in verschiedenen (in dieser Arbeit verwendeten) Distanzen angeführt.

Tabelle 6: Sichtbereich Nivelliere

		Wild NA3000	Trimble DiNi12	Sokkia SDL1X
Öffnungswinkel		2'	5'	2.7'
$x_{\text{CCD proj}}$ [mm] bei	2.7m	94	236	127
	3.0 m	105	262	141
	6.3 m	220	550	297
	14.0 m	489	1223	660
	30.0 m	1047	2620	1414

Wichtig zu erwähnen ist auch, dass sich auf Grund der Erwärmung der elektronischen Bauteile der Nivelliere die Ziellinie ändern kann. Um eine Beeinflussung dieses Aufheizeffekts auf die Messungen auszuschließen, wurden die Nivelliere Wild NA3000 und Trimble DiNi12 mindestens 30 Minuten vor jeder Messung in Betrieb genommen. Da für das Nivellier SDL1X noch keine Untersuchungen zum Aufheizverhalten vorliegen, wurde das Gerät immer 2 Stunden vor Messbeginn eingeschaltet. So konnte sicher gegangen werden, dass sich auch hier die Geräteerwärmung nicht in den Messungen niederschlägt.

Weiters waren die Instrumente von den Untersuchungen längere Zeit im Labor gelagert und daher vollständig akklimatisiert.

4.3 Vertikalkomparator

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz ist im Besitz eines Vertikalkomparators zur Systemkalibrierung von Nivelliersystemen (siehe Abbildung 4).

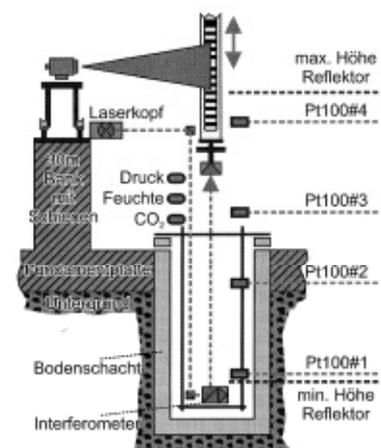
4 Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium

Ein Komparator vergleicht prinzipiell zwei Messungen des Untersuchungsobjekts miteinander. Beide Messungen kommen dabei allerdings unabhängig von einander zustande. Im Falle des Vertikalkomparators kann die Höhe einer Nivellierlatte einerseits durch ein Interferometer, andererseits durch das Nivellier bestimmt und verglichen werden. Das Interferometer kann als relatives Messsystem hoch genau im Mikrometerbereich Längenänderungen detektieren. Das Nivellier mit einer Auflösung von 0.01 mm ist hingegen fähig absolute Höhenablesungen auf der Latte zu bestimmen. Die Forderung, dass die Genauigkeit des zur Kalibrierung herangezogene Messsystems um eine Zehnerpotenz höher sein muss ist hier also gegeben.

Fehler des Nivelliersystems können so erkannt, beseitigt oder zumindest bestimmt werden. Da es sich hier um eine Kalibrierung des Gesamtsystems „Nivellier“ handelt, können sich sowohl vom Nivellier als auch von der Latte verursachte Fehler im Messergebnis niederschlagen.



(a)



(b)

Abbildung 4: Vertikalkomparator im Messlabor der TU Graz

(a) Gesamtansicht (Foto: Jänner 2012)

(b) Systemskizze (Woschitz, 2003)

Die zu untersuchende Latte ist während der Messungen am Verfahrensschlitten eingespannt und kann motorisiert vertikal verfahren werden. Die Halterungen am Schlitten sind so gestaltet, dass die Latte spannungsfrei daran befestigt ist. Spannungen im Material einer Nivellierlatte entstehen hauptsächlich durch Änderungen der meteorologischen Bedingungen welchen die Latte ausgesetzt ist. Durch Klimatisierung des Labors (Temperatur: $20.0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, Luftfeuchte: $50\% \pm 10\%$, Woschitz (2003)) und die lockere Montage kann das Auftreten solcher Spannungen ausgeschlossen werden. Für die Untersuchung der im Querschnitt kleineren Standardlatten standen zwei Adapterhalterungen zur Verfügung, um auch diese Latten am Vertikalkomparator montieren zu können. In Abbildung 5 ist

4 Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium

eine der Halterungen am Verfahrslitten des Komparators montiert zu sehen. Die aus PVC gefertigte Halterung wird fest am Vertikalkomparator verschraubt, lässt aber eine vertikale Bewegung der Latte in der Halterung zu. Die beiden Plättchen an der Front werden auch nur so stark angezogen, um die Latte nur in der Lage nicht aber in Richtung der Lattenlängsachse zu fixieren. Ein seitliche Bedeckung des Codes durch die Plättchen stellt kein Problem dar, weil das stets mittig auf die Latte anvisierte Nivellier nur einen vertikal montierten CCD-Zeilensensor besitzt, also nur eine geringe Breite des Lattencodes auch tatsächlich nutzt.



Abbildung 5: Verwendete Halterung zu Montage der Nivellierlatte

Die Latte ist in Gebrauchsstellung, also vertikal horizontaliert, am Schlitten montiert, um weitere Fehler auszuschließen, die bei der Verwendung des Nivelliersystems in der Praxis nicht auftreten würden. Würde ein Invarlatte etwa liegend untersucht werden, könnte der Durchhang des Invarbands Verfälschungen im Ergebnis bedingen. Auch bei Standardnivellierlatten führt die Montage in Gebrauchsstellung dazu, dass sich die einzelnen Teile der Latten auf Grund ihres Eigengewichts auf das darunter liegende Element setzen und die selben Eigenschaften wie bei Arbeiten in der Praxis zeigen.

Da der Verfahrslitten des Komparators nur Latten mit einer maximalen Länge von 3 m aufnehmen kann, mussten die Messungen für die 4.05 bis 5.01 in zwei Messdurchgänge geteilt werden. Im ersten Durchgang wurden die beiden unteren Lattenteile untersucht. Im zweiten Durchgang wurden Messungen zum zweiten und dritten Lattenteil durchgeführt. Durch die doppelte Messung des mittleren Elements konnten die Messungen später zusammen gefügt werden. Bei den beiden untersuchten Teleskopplatten (TD24 & BAS55) wurden zuerst die ersten drei Elemente gemessen und danach das 3. und 4. (TD24) bzw. 3. - 5. (BAS55) Element untersucht.

Das Nivelliergerät sitzt fix auf einem Invarwagen auf der Horizontalkomparatorbank. Der auf Rollen gelagerte Wagen erlaubt es das Gerät an einer beliebigen Position auf der Bank

4 Bei den Untersuchungen verwendetes Instrumentarium

des Horizontalkomparators zu positionieren und somit jede beliebige Beobachtungsdistanz zwischen zirka 1.5 und 30 Metern zu realisieren.

Die Beleuchtung der Nivellierlatte ist ein weiterer zu beachtender Punkt, da schlechte oder ungleichmäßige Beleuchtung die Messdauer verlängert und die Messgenauigkeit verschlechtert. Die CCD-Sensoren der Nivelliere sind nicht wie das menschliche Auge auf einen breiten Spektralbereich sensitiv, sondern nur auf ein schmales Spektralband. So kann es dazu kommen, dass das Nivellier trotz für das menschliche Auge guter Beleuchtung keine Messung durchführen kann.

Vier fix montierte starke Leuchten (PAR38) sorgen bei allen Experimenten für eine gleichmäßige Beleuchtung. Alle Leuchten sind so ausgerichtet, dass der CCD-Sensor des verwendeten Nivelliers das bestmögliche Signal erhält. Weiters steht eine Tageslicht-Neonröhre zur Verfügung, welche den Spektralbereich von Tageslicht aussendet.

5 Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

5.1 Einführung

Eine der größten Herausforderungen in der Fertigung von mehrteiligen Nivellierlatten ist die Sicherstellung der Stabilität der Verbindungsstellen zwischen den Lattenelementen. Alle untersuchten Latten (siehe Tabelle 3) verfügen über einen Federmechanismus zum Arretieren der Lattenteile in Gebrauchsstellung.

Die Latten des Typs GKNL4M von Leica/Wild verbinden die Lattenteile durch zwei Zapfen in der stabilisierenden Alu-Führungsschiene, die in Löcher des mittleren Elements einrasten, mit einander (siehe Abbildung 6a). Die Latten „Trimble TD24“ und „Sokkia BAS55“ haben einen gefedert Knopf am jeweils oberen Lattenteil, welcher in ein Loch im entsprechenden unteren Teil der Latte auf deren Rückseite einrastet (siehe Abbildung 6b).



(a)



(b)

Abbildung 6: Verbindung der Lattenelemente, (a) Leica/Wild GKNL4M, (b) Trimble TD24

In der Norm DIN 18703 gibt es keine dezidierten Vorgaben für den durch den Stoß der Lattenelemente verursachten Fehler, im Gegensatz zu anderen in dieser Arbeit untersuchten Lattenfehlern. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass die Latten zusammen geklappt, zusammen geschoben oder zerlegt werden können.

Bereits kurz nach deren Markteinführung wurden GKNL4M-Latten von Schauerte (1991) untersucht, wobei keine signifikanten Änderungen des Stoßstellenfehlers nach mehrmaligem Zusammenbau festgestellt werden konnten.

Glasfaser-Epoxiharz-Verbundwerkstoff wie er bei GKNL4M-Latten verwendet wird

5 Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

(Ingensand und Schneider, 1990), nutzt sich relativ leicht ab (siehe Abbildung 7). Jede Abnutzung von Elementenden, wie auch am Lattenfuß, kann zu einer Beeinflussung der Messergebnisse führen. Schließen zwei Elemente nicht mehr bündig ab, so entsteht am Stoß eine Lücke oder das obere Element liegt in einer tieferen Position als angedacht. Weiters kann es zu einer Lockerung der Verbindung führen und der Lattencode aller Elemente befindet sich nicht mehr in einer Geraden. Die Fertigung dieser Latten erfolgt wahrscheinlich in größeren Stückzahlen und die einzelnen Teile werden nicht an einander angepasst. Auch bei fabrikneuen Latten schließen die Oberflächen nicht völlig bündig ab.

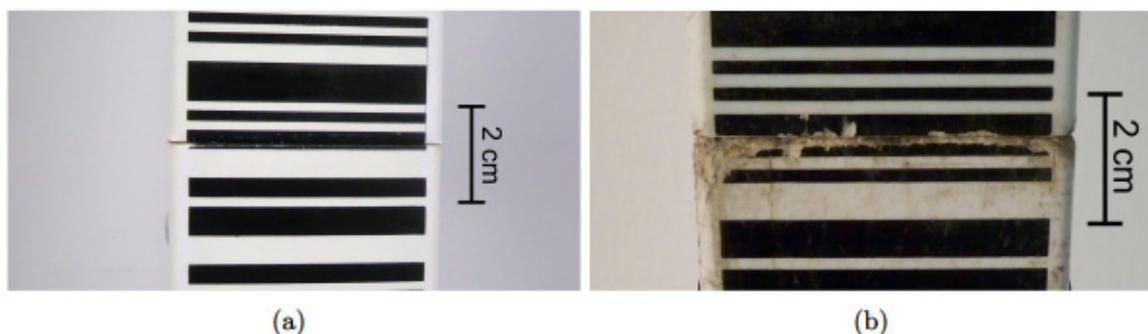


Abbildung 7: Stoßstellen bei einer (a) neuen („Leica GKNL4m Neu 1“) und (b) ca. 12 Jahre alten stark gebrauchten Leica-Latte („Leica GKNL4M-5“)

Bei den beiden Teleskopplatten von Trimble und Sokkia verringert sich der Lattenquerschnitt mit steigender Elementanzahl (siehe Abbildung 8). Das erste also unterste Lattenelemente hat im Querschnitt in etwa die selben Abmessung wie eine Leica-Stecklatte. Alle weiteren Elemente müssen durch die Teleskopbauweise einen kleineren Querschnitt aufweisen um in das vorhergehende Element zu passen. Im ausgezogenen Zustand weisen alle Verbindungsstelle beider Latten ein recht großes Spiel auf. In der Gebrauchsanweisung der Sokkia-Latte wird jedoch darauf hingewiesen „nach dem Ausziehen der Latte die Elemente zusammen zu drücken, um eine Verfälschung der Messungen zu verhindern“ (Sokkia Topcon, 2011). Bei den Teleskopplatten liegen die codetragenden Flächen der Elemente auf Grund der Bauweise parallel nach hinten versetzt, was weitere Messabweichungen im Übergangsbereich verursachen könnte.

Wie auch ein Fehler des Lattennullpunkts bringt ein Stoßstellenfehler alle weiter oben liegenden Codeelemente von ihrer Sollposition ab und verursacht dadurch einen konstanten Offset für alle über der Stoßstelle erfolgten Ablesungen, bei welchen der Sichtbereich des Nivelliers $x_{\text{CCD proj.}}$ vollständig am oberen Lattenelement liegt. Durch ein Spiel an der Verbindungsstelle kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass dieser bestimmbarer Fehler nach jedem Zusammenbau der Latte gleich, also reproduzierbar ist. In Experimenten sollte daher



Abbildung 8: „Trimble TD 24“, seitliche Ansicht

- a) die Reproduzierbarkeit der Größe des Stoßstellenfehlers
- b) der Einfluss der Stoßstellen in Übergangsbereichen am Vertikalkomparator

untersucht werden.

5.2 Versuchsaufbau

Bei den Versuchen für die Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Stoßstellen wurde das Nivellier, ähnlich dem Versuch zur Untersuchung der Lattenfußschiefe, auf einem Messpfeiler montiert und die zu untersuchende Latte horizontal auf einen fixen Höhenbolzen gestellt (siehe Abschnitt 6.2, Abbildung 12). Infolge des Aufbaus und der Pfeilerhöhe von rund 1.37 m erfolgten die Ablesungen auf der Latte bei einer Lattenhöhe von 1.644 m. So war gewährleistet, dass ausschließlich Codeelemente des zweiten Lattenteils für das Gerät sichtbar waren (siehe Tabelle 3). Bei einer Beobachtungsdistanz von 6.26 m „betrachtete“ beispielsweise das Nivellier Wild NA3000 den Lattenabschnitt von 1.535 m bis 1.753 m (siehe Tabelle 6).

Da sich die Deckenbeleuchtung im Labor im Bereich des Versuchsaufbaus als zu leuchtschwach erwies und zu einem Anstieg der Messzeit gegenüber Messungen bei Komparatorbeleuchtung führte, wurde zur Beleuchtung eine Tageslicht-Neonröhre benutzt.

Die ersten zwei Elemente der untersuchten Standardnivellierlatte wurden durch ein Fluchtstabstativ auf dem sich in der Bodeneinlassungen des Pfeiles befindlichen Höhenpunkt horizontal fixiert (siehe Abbildung 9).

Um sicher zu gehen, dass durch das Aufsetzen der Latte auf verschiedenen Punkten am Lattenfuß, nicht auch eine eventuell vorhandene Lattenfußschiefe die Messergebnisse beeinflusst, wurde die Latte mit Hilfe von Markierungen immer mittig am vorderen Rand des Fußes aufgesetzt. Eine Abweichung von 0.5 mm vom Aufsetzpunkt würde die Höhenablesung bei der in Kapitel 6 bestimmten maximalen Lattenfußschiefe von 22.42' um 0.003 mm

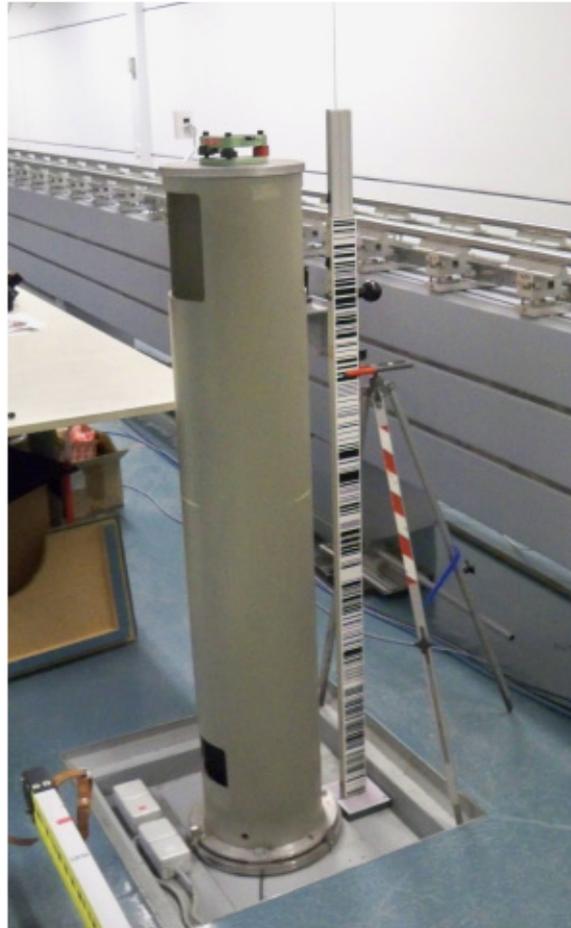


Abbildung 9: Horizontiert fixierte Latte am Höhenbezugspunkt

verändern, was deutlich unter der Messauflösung der Geräte liegt.

Vor einer Nivelliermessung wurden die beiden Lattenteile von einander getrennt und danach wieder verbunden. Dies geschah in 20 Durchgängen um für die statistische Auswertung eine größere Anzahl an Messungen zu haben. Jeder Durchgang bestand wiederum aus 20 Einzelmessungen um auch hier Ausreißer in den Lattenablesungen detektieren zu können. Diese Anzahl an Messungen hat sich in Vorversuchen als ausreichend gezeigt, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit einer Stoßstelle treffen zu können.

Vor und nach der Bestimmung der Reproduzierbarkeit einer Stoßstelle erfolgten 100 Einzelmessungen zu einer auf dem selben Höhenpunkt aufgestellten Präzisionsnivellierlatte des gleichen Herstellers, um etwaige sich während des Versuchs geänderte Fehlereinflüsse detektieren zu können. Da die genauen Aufsetzpunkte am Lattenfuß der Standardlatten nicht bekannt sind, können auf Grund der daraus resultierenden unbekanntem Nullpunktoffset auch keine Stoßstellenfehler angegeben werden.

5.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 7 für alle Latten angeführt. Exemplarisch ist ein Plot der Messungen an der zweiten Stoßstellen der Latte „Leica GKNL4M-6“ in Abbildung 10 zu sehen. Die Plots aller weiteren Versuche befinden sich im Anhang B der Arbeit.

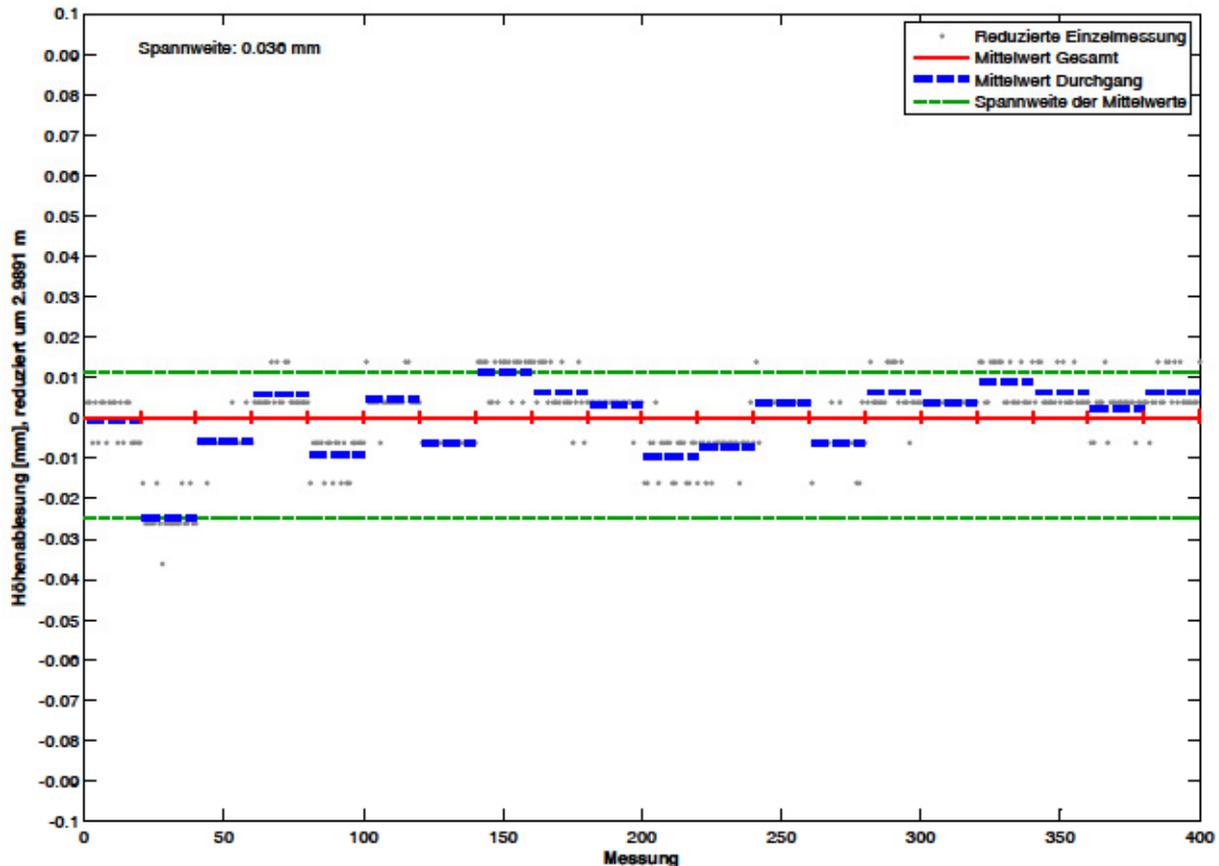


Abbildung 10: Stoßstellenreproduzierbarkeit, Latte „Leica GKNL4M-6“, 2. Stoß

Für jede Latte ist die Spannweite der Mittelwerte der 20 Durchgänge angegeben. In Spalte 4 ist eine Zustandsangabe (Spiel im Stoß) angegeben, wobei diese subjektive Bewertung aus dem versuchten Auseinanderziehen und Zusammendrücken der betreffenden Lattenteile resultiert. Daraus ist zu erkennen, dass die Größe des Spiels nicht gezwungenermaßen eine große Spannweite in den Messungen nach sich zieht. Abzulesen ist dies unter anderem an der Latte „Leica GKNL4M-4“, wo beide Stoßstellen etwa gleich viel Spiel aufweisen, sich jedoch merklich in ihren Messergebnissen unterscheiden.

Bei dieser Untersuchung sind die beiden Teleskopplatten „Trimble TD24“ und „Sokkia BAS55“ besonders zu beachten. Auch bei geringer Kraftanwendung lassen sich zwei benachbarte Lattenteile an einer Stoßstelle verschieben. Selbst durch das Eigengewicht

Tabelle 7: Ergebnisse: Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

1	2	3	4
Latte ¹	Stoß	Range [0.01 mm]	Zustand ²
Leica GKNL4M-1	1	9.9	wenig Spiel
	2	10.9	Spiel
Wild GKNL4M-2	1	5.6	großes Spiel, Schaft locker
	2	1.5	Spiel
Wild GKNL4M-3	1	3.6	Spiel
	2	2.0	minimales Spiel
Leica GKNL4M-4	1	6.3	Spiel
	2	2.7	Spiel
Leica GKNL4M-5	1	2.3	wenig Spiel
	2	2.0	kein Spiel
Leica GKNL4M-6	1	3.6	wenig Spiel
	2	3.6	kein Spiel
Leica GKNL4M Neu 1	1	4.3	wenig Spiel
	2	6.5	kein Spiel
Leica GKNL4M Neu 2	1	5.4	kein Spiel
	2	7.3	wenig Spiel
Leica GKNL4M Gebraucht 1	1	9.3	großes Spiel, Schaft locker
	2	9.1	Spiel
Wild GKNL4M Gebraucht 2	1	4.1	großes Spiel
	2	7.3	Spiel
Trimble TD24	1	8.4	sehr großes Spiel
	2	14.3	sehr großes Spiel
	3	10.4	sehr großes Spiel
Sokkia BAS55	1	59.8	sehr großes Spiel
	2	56.9	sehr großes Spiel
	3	34.6	sehr großes Spiel
	4	76.4	sehr großes Spiel

¹ siehe Tabelle 3² subjektiver Eindruck beim Arbeiten mit der Latte

verändert sich der Stoß der Latte beim Anheben. Die Bauart der Latte „Trimble TD24“ ist im Vergleich zu Latte „Sokkia BAS55“ noch immer etwas massiver, sodass sich die Lattenelemente selbst beim vorsichtigen Aufsetzen auf einen Höhenpunkt setzen und die Messungen zur Ergebnissen im Bereich der GFK-Latten führen.

Im Manual der Sokkia-Latte BAS55 ist angegeben, dass „nach dem Ausziehen der einzelnen Teile diese an den Stößen zusammen gedrückt werden müssen, sodass die Lattenteilung keine Sprungstellen an den Stößen aufweist“, was bei den gezeigten Untersuchungen auch so durchgeführt wurde. Durch das sehr geringe Gewicht und den Federmechanismus zum Arretieren der Latte, können die Lattenteile nach dem Zusammendrücken aber wieder in ihrer Lage verändern. So ist die Stoßstelle nur sehr schwer zu reproduzieren, was sich auch den Messergebnissen widerspiegelt. Durch die geringste aufliegende Masse (5. Element am leichtesten) tritt dieser Effekt besonders stark beim vierten Stoß (Spann-

5 Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

weite ca. 0.8 mm) auf. Aber auch die anderen Stöße dieser Latte lassen sich nur im Bereich einiger Zehntel Millimeter reproduzieren.

Im Extremfall könnte so die Gesamt-Lattenlänge von einem Zusammenbau zum Anderen um bis zu 2 mm variieren.

Bei den in Kapitel 9 beschriebenen Systemuntersuchungen zeigt sich die teilweise schlechte Reproduzierbarkeit der Stoßstellen in den am Vertikalkomparator erfassten Messdaten. Anhand der Latte BAS55 von Sokkia kann sehr gut gezeigt werden, wie sich die schlechte Reproduzierbarkeit von Stoßstellen auf Nivelliermessungen auswirkt. Für die vier Stoßstellen der Latte wurden Ranges zwischen 0.3 und 0.8 mm ermittelt. Wie sich diese Stoßfehler auf Höhenmesswerte auswirken, zeigt Abbildung 11.

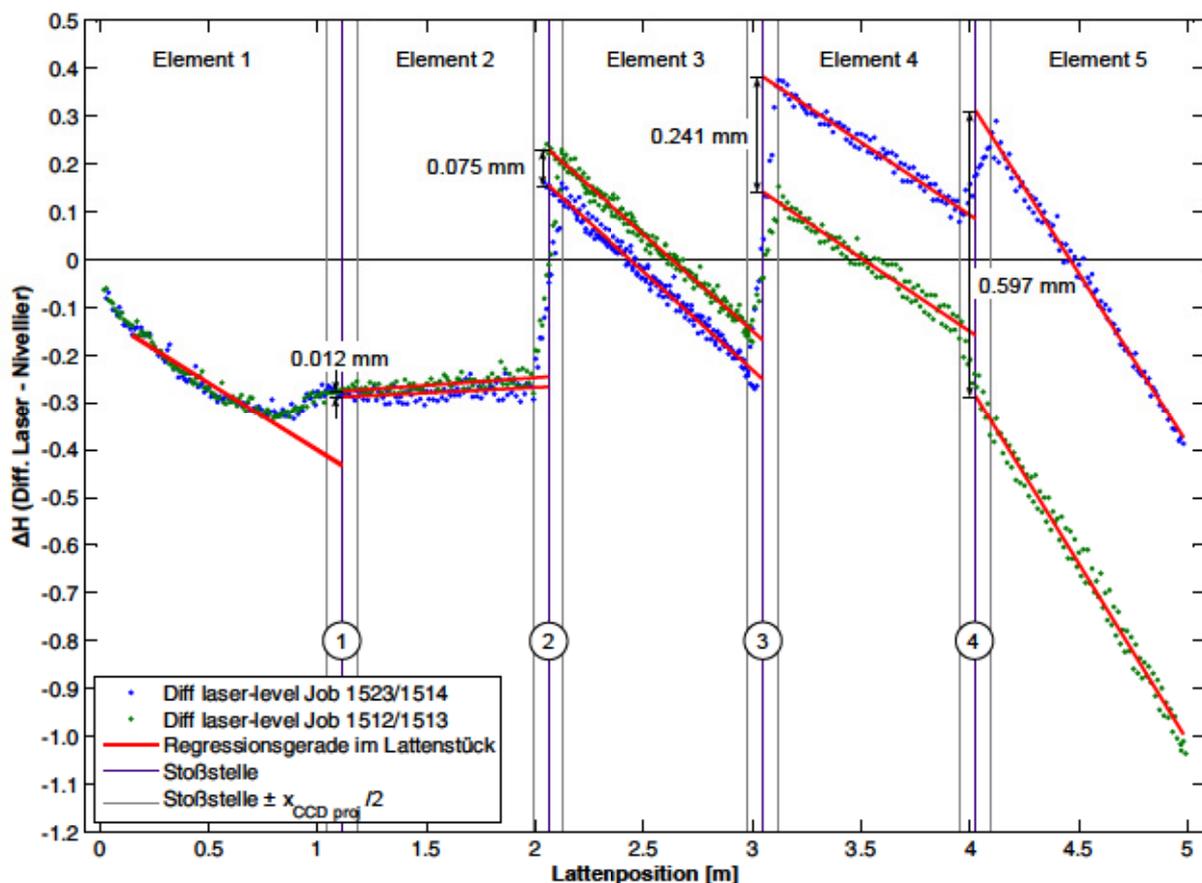


Abbildung 11: Systemüberprüfung des Sokkia SDL1X mit der Latte „Sokkia BAS55“ bei 3.00 m Distanz (grüne Punkte) und deren Wiederholungsmessungen (blaue Punkte) nach neuem Aufsetzen der Latte

In Grün sieht man die Messdaten eines Kalibrierdurchgangs, die Daten einer Wiederholungsmessung sind in Blau geplottet. Der Stoßstellenfehler wird durch Differenzbildung der Werte der Regressionsgeraden zweier zusammenstoßender Lattenstücke an der Position der Stoßstelle berechnet.

5 Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

Nach der ersten Stoßstelle beträgt die Differenz zwischen den Regressionsgeraden des zweiten Elements 0.012 mm. Doch bereits nach der zweiten Stoßstelle beträgt diese Differenz 0.075 mm. An Stoßstelle 3 differieren die Regressionsgeraden um 0.241 mm. Die Geraden im fünften und letzten Lattenteil unterscheiden sich sogar um 0.597 mm. Am vierten Lattenstoß kann beobachtet werden, dass sich das fünfte Lattenteil einmal zu hoch und einmal zu nieder in seiner Position gegenüber dem vierten Element befindet.

Würde nun in der Praxis im schrägen Gelände jeweils eine Lattenablesung am untersten (z.B. bei 0.7 m) und obersten Lattenelement (z.B. bei 4.5 m) durchgeführt werden und daraus eine Höhendifferenz abgeleitet werden, würde diese bereits nur durch die Stoßstellenfehler mit knapp 0.6 mm fehlerbehaftet sein. Da sich die Stoßstellen mit jedem Zusammenbau und auch beim bloßen Hantieren mit der Latte verändern, ist es nicht möglich diesen Fehler zu korrigieren, selbst wenn dies für eine Spezialanwendung nötig sein sollte.

6 Lattenfußschiefe

6.1 Einführung

Als Lattenfuß wird die Aufsetzfläche am unteren Ende einer Nivellierlatte bezeichnet, welche z.B. auf einen Höhenbolzen gesetzt wird. Bei oftmaliger Benutzung der Latte kann dieser Teil stark beansprucht werden und sich durch die dauernde mechanische Beanspruchung in seiner Geometrie verändern. Die Aufsetzfläche am Lattenfuß sollte idealerweise orthogonal zur Längsachse der Latte stehen. Dadurch wird gewährleistet, dass beim Aufsetzen auf einem beliebigen Punkt am Lattenfuß die Höhenablesung des Nivelliers gleich bleibt.

Bei Präzisionsnivellierlatten mit Invarband-Teilung der Firma NEDO ist der Lattenfuß durch eine massive plangeschliffene Metallplatte mit einer Dicke von 8 mm realisiert. Die untersuchten Standardlatten verfügen aus Kostengründen über eine weit einfachere Aufsetzfläche aus 1-2 mm dickem, gekanteten Stahlblech, welches seitlich durch Blindnieten mit dem Lattenkörper verbunden ist. Der DIN-Norm 18703 entsprechende Latten dürfen eine maximale Abweichung der Aufsetzfläche zur Orthogonalebene der Lattenlängsachse von 10' aufweisen. Neben einer Nichtorthogonalität kann der Lattenfuß auch Unebenheiten aufweisen, die z.B. durch das oftmalige Aufsetzen der Latte auf einem bestimmten Punkt der Aufsetzfläche entstehen oder bereits herstellungsbedingt sind.

Da der Fehler infolge eines schiefen und / oder unebenen Lattenfußes direkt einen Offset der Lattenablesung bewirkt, ist es zumindest von Interesse die Größenordnung dieses Fehlers für verschiedene Latten zu kennen.

Um die Schiefe des Lattenfußes bestimmen zu können, sind 3D-Koordinaten von zumindest drei geeignet verteilten Punkten am Lattenfuß notwendig. So kann eine Ebenengleichung aufgestellt und die Neigung der Lattenfußebene gegenüber der gewünschten horizontalen Lage bestimmt werden. Die digitale Ablesung der Latte liefert die z-Koordinate des benötigten Koordinatentriples.

Wird eine ebene Aufsetzfläche angenommen, kann durch eine Überstimmung (> 3 Punkte) auch eine Genauigkeitsinformation zur Lattenfußschiefe geliefert werden. Die Berechnung der Lattenfußschiefe geschieht über eine ausgleichende Ebene. Die Quadratsumme der Abweichung der Höhenmessungen von der Ausgleichsebene wird also minimiert und liegt folgendem funktionalem Zusammenhang zugrunde:

$$z = b_0 + b_1 \cdot y + b_2 \cdot x \quad (3)$$

Dabei sind z die Höhenabweichung, b_0, b_1, b_2 die Parameter und x, y die 2D-Koordinaten der Lattenaufsetzpunkte am orthogonal zur Lattenlängsachse stehenden Koordinatensystem (siehe Abbildung 14).

Als Beobachtungen werden die gemittelten Höhenmessungen des Nivelliers eingeführt und ausgeglichen. Dieser lineare Zusammenhang kann direkt in die Design-Matrix umgesetzt werden:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & y_{P1} & x_{P1} \\ 1 & y_{P2} & x_{P2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & y_{Pn} & x_{Pn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Sind die beiden ausgeglichenen Parameter b_1 und b_2 Null, steht die Fläche parallel zur Referenzfläche und damit orthogonal zur Lattenlängsachse.

Die Koeffizienten b_1 und b_2 werden mit

$$\eta = \arctan \frac{b_1}{1} \quad (5)$$

$$\xi = \arctan \frac{b_2}{1} \quad (6)$$

einfach in Neigungswinkel der Ebene umgerechnet, wobei ξ der Neigungswinkel in Richtung der x-Achse (Drehung um y-Achse) und η der Neigungswinkel in Richtung der y-Achse (Drehung um x-Achse) ist.

6.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 12 ist der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Lattenfußschiefe zu sehen. Dabei ist das Nivellier auf einem ca. 45 cm hohen Messpfeiler in einer Entfernung von rund 2.75 m zum Höhenbolzen (hinter Pfeiler 9) montiert. Würde ein normaler Messpfeiler (Instrumentenhöhe ca. 160 cm) benutzt werden, so würden alle Ablesungen des Nivelliers auf dem zweiten Element der mehrteiligen Latten getätigt werden und da die Verbindung zwischen den Lattenelementen nicht hinreichend stabil ist (siehe Kapitel 5), würde

dies zu einer Verfälschung des Versuchsergebnisses führen. Beim verwendeten Pfeiler erfolgt die Lattenablesung auf einer Höhe von etwa 0.68 m und somit, für alle überprüften Nivellierlatten, vollständig am untersten Lattenelement.

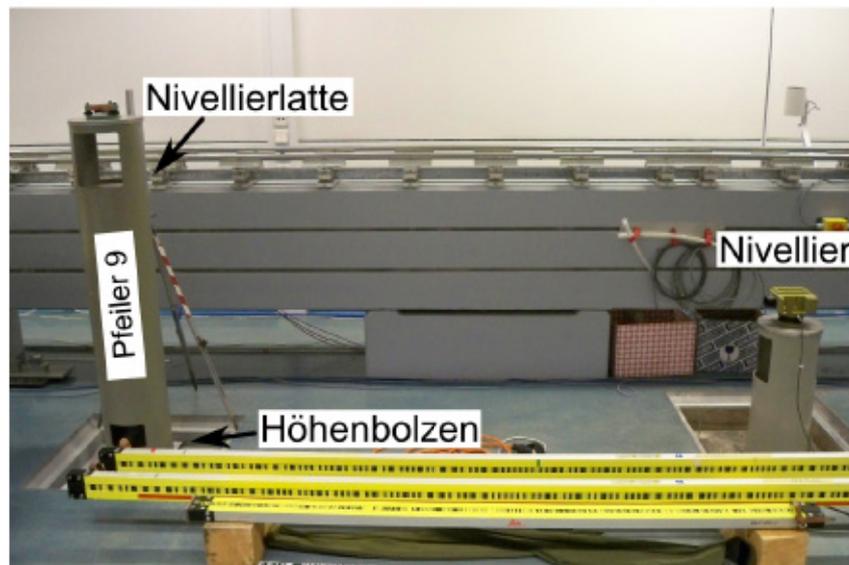


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Lattenfußschiefe

Für die Untersuchungen wurde eine Hartplastik-Platte in einer Größe von 13 x 11.5 x 2 cm (Länge x Breite x Höhe) mit einer runden Aussparung in der Mitte gefertigt, welche den Höhenbolzen umgibt, sodass sich der Bolzenmittelpunkt im Ursprung des definierten lokalen Koordinatensystems befindet (siehe Abbildung 13). Drei Justierschrauben haben Kontakt zum Boden und machen es möglich die Platte zu horizontieren und in der Höhe wenige Millimeter unter dem Bolzenmittelpunkt auszurichten. Von der auf der Platte angebrachten Millimeterskala können, von oben betrachtet, die Abstände der Lattenkanten zum Ursprung abgelesen werden. So kann auf die Koordinaten des Aufsetzpunkts am Lattenfuß in beiden Koordinatenrichtungen geschlossen werden.

Das lokale Koordinatensystem am möglicherweise schrägen Lattenfuß ist als rechtsdrehendes System mit dem Ursprung in der Lattenfußmitte definiert. Die Lattenlängsachse fungiert als z-Achse. y-Achse ist vom Ursprung normal auf die Code tragende Lattenfläche definiert. Um ein Rechtssystem zu erhalten zeigt x in Richtung der Längsachse des Lattenquerschnitts (siehe Abbildung 14b). Obwohl die Koordinatensysteme am Lattenfuß und der Platte um den Bolzen zueinander verschwenkt sind, wurden nur die Translationen zur Umrechnung zwischen den Systemen verwendet. Da die Latten visuell auf der Bodenplatte ausgerichtet wurden und die Schiefe des Fußes sich im Minutenbereich bewegt, wurden die Rotationen vernachlässigt.

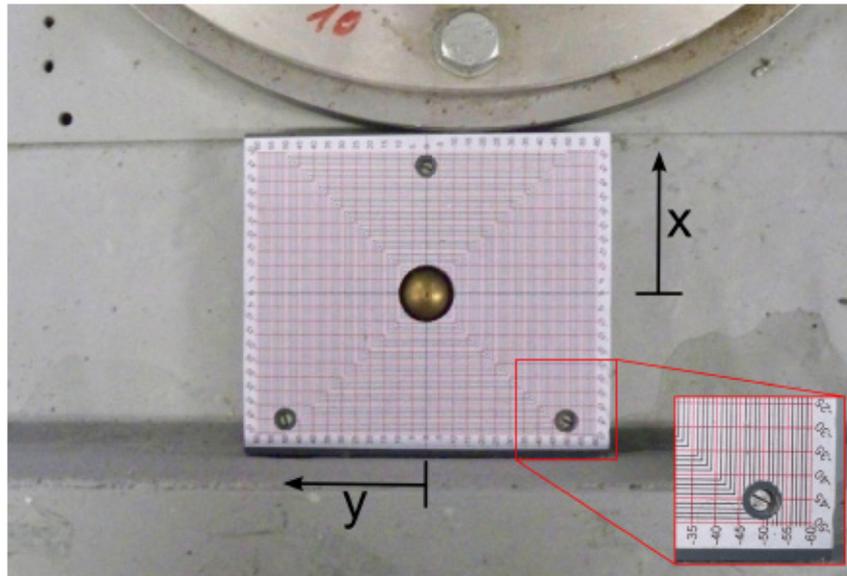


Abbildung 13: Platte um Höhenbolzen

Um neben der Schiefe des Lattenfußes auch Unebenheiten bestimmen zu können, wurden am Lattenfuß, nach einem Vorschlag von Deumlich und Staiger (2002), an 9 lagemäßig definierten Punkten die Höhe bestimmt (siehe Abbildung 14a).

Als Referenz wurde eine Invarlatte des jeweils selben Herstellers der untersuchten Standardlatte verwendet. Jeweils vor und nach der Messung der 9 Aufsetzpunkte auf einer Standardnivellierlatte wurden 100 Messungen zur Präzisionslatte in einem Aufsetzpunkt durchgeführt, um mögliche Veränderungen am Messaufbau während der Messungen detektieren zu können.

Die Messungen zu den untersuchten Latten wurden um die Höhenablesungen der Invarlatten und deren Nullpunktfehler reduziert (siehe Kapitel 7), sodass auch für die Standardlatten absolute Nullpunktoffsets angegeben werden können.

Um bei der Höhenbestimmung an den 9 einzelnen Aufsetzpunkten das Messrauschen zu reduzieren, wurde die Messung 20 Mal unmittelbar hintereinander wiederholt (1x Aufsetzen, 20 Einzelmessungen, PC-gesteuert). Da jede Berührung von Gerät oder Latte das Messergebnis ändern kann, wurde die Latte mit einem Fluchtstabstativ horizontalisiert fixiert. Das Nivellier über eine serielle RS232-Schnittstelle durch eine MATLAB-Routine ausgelöst und die Messwerte ausgelesen. Weiters wird durch diese Messmethode der Datenfluss wesentlich beschleunigt, da auch die Auswertung des Versuchs mit MATLAB durchgeführt wurde.

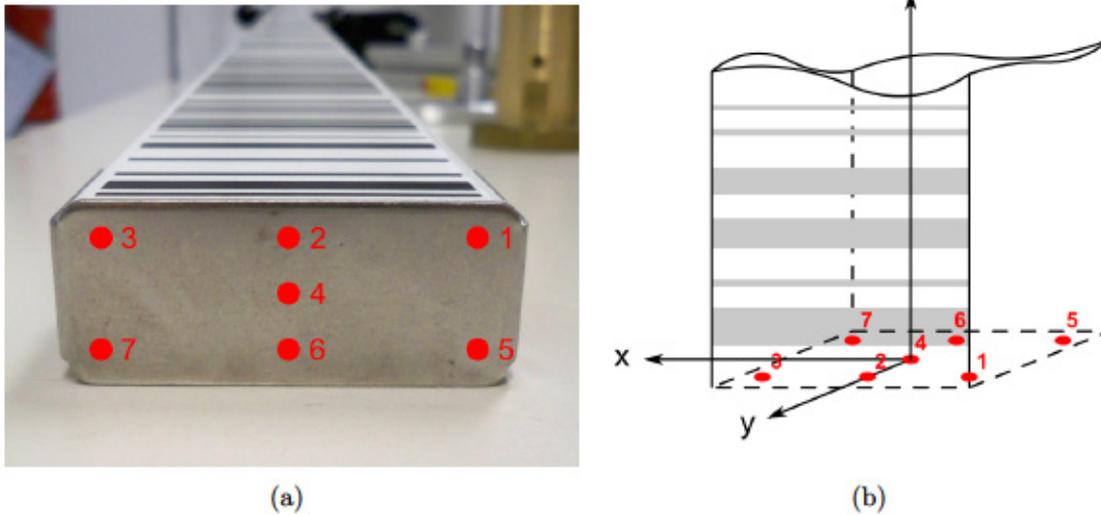


Abbildung 14: (a) Lage der Aufsetzpunkte zur Untersuchung des Lattenfußes,
(b) Definition des lokalen Koordinatensystems

6.3 Ergebnisse

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse zur Untersuchung der Lattenfußschiefe zusammengefasst. Darin sind die beiden Neigungswinkel der Aufsetzfläche ξ und η angegeben. Ein positiver Winkel η bedeutet, dass die Aufsetzfläche, von vorne auf die Teilung blickend, nach hinten abfällt. ξ gibt den Neigungswinkel entlang der x-Achse an (siehe Abbildung 15).

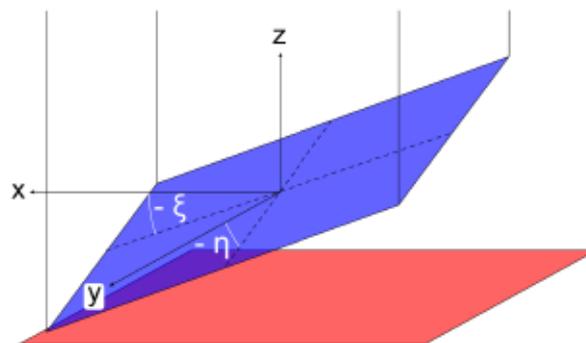


Abbildung 15: Neigungswinkel Lattenfußschiefe

In der Norm DIN 18703 sowie in der Gebrauchsanweisung der GKNL4M-Latte (Leica, 2004) ist die maximal zulässige Winkelabweichung von einer orthogonalen Aufsetzfläche mit $\pm 10'$ angegeben. Auf einen Höhenunterschied umgerechnet ergibt eine Abweichung von $10'$ bei Änderung des Aufsetzpunkts um 2 cm eine Änderung der Höhenablesung von knapp 0.06 mm.

6 Lattenfußschiefe

Tabelle 8: Ergebnisse: Lattenfußschiefe; fett gedruckte Werte überschreiten die nach DIN 18703 zulässige Abweichung von $10'$

Latte	$\xi [']^1$	$\sigma_\xi [']$	$\eta [']^1$	$\sigma_\eta [']$
Leica GKNL4M-1	2.0	1.6	-17.2	2.4
Wild GKNL4M-2	16.8		-13.3	
Wild GKNL4M-3	0.9		-15.0	
Leica GKNL4M-4	8.1		-6.0	
Leica GKNL4M-5	5.3		-10.5	
Leica GKNL4M-6	-3.8		-6.0	
Leica GKNL4M Neu 1	4.9		9.8	
Leica GKNL4M Neu 2	3.5		-10.6	
Leica GKNL4M Gebraucht 1	2.2		-4.2	
Wild GKNL4M Gebraucht 2	-0.5		5.6	
Trimble TD24	-15.7		2.0	
Sokkia BAS55	4.7	22.4		

¹ Definition siehe Abbildung 15

Viele der untersuchten Latten überschreiten diesen Wert in einer der beiden Koordinatenrichtungen (fett gedruckt). Wobei die größten Abweichungen in x-Richtung bestehen. Die Latte BAS55 weist eine Abweichung von $\eta = 22.4'$ auf, was beim Aufsetzen an der vordersten und hintersten Lattenfußkante einen Höhenunterschied von 0.2 mm bewirkt. Die aus dem Ebenenausgleich erhaltene Standardabweichung der Winkelabweichung liegen für ξ im Bereich $1.6' - 2.0'$. Der Winkel η weist mit $2.4'$ eine etwas höhere Standardabweichung auf. Als Grund für diese teilweise starken Abweichung vom Soll kann die sehr einfache Fertigung des Lattenfußes aus gekantetem Stahlblech und die Niet-Befestigung angesehen werden (siehe Abbildung 16). Dies wurde auch schon bei Schauerte (1991) bemängelt, der bei praktisch werkfrischen Latten Abweichungen von einer Orthogonal-ebene zur Lattenlängsachse von 0.1 - 0.2 mm feststellte.

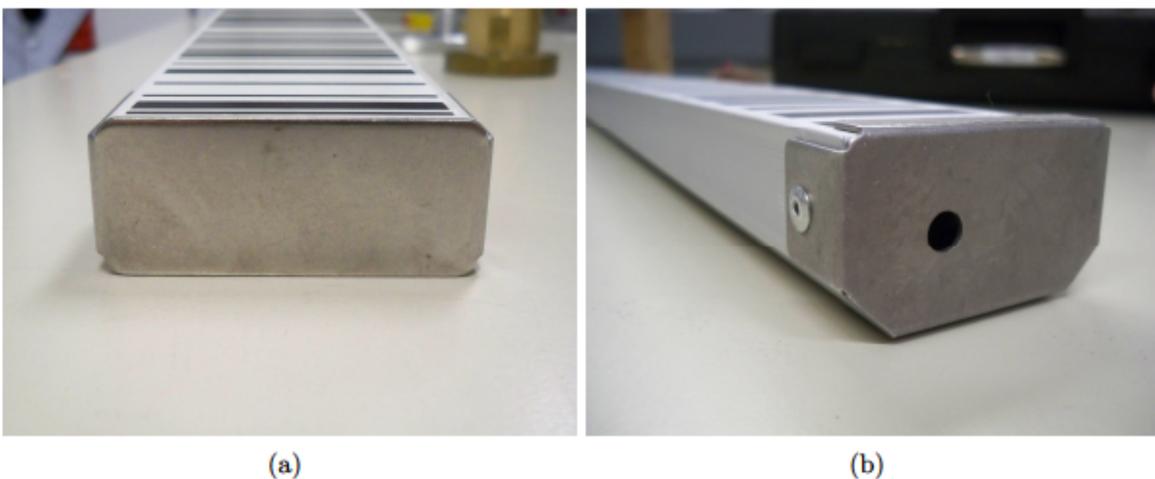


Abbildung 16: (a) Lattenfuß Leica/Wild GKNL4M, (b) Lattenfuß Sokkia BAS55

6 Lattenfußschiefe

Da nicht angenommen werden darf, dass sich alle 7 realisierten Aufsetzpunkte auf der ausgeglichenen Ebene befinden, sind in Tabelle 9 die Abweichungen von der Ausgleichsebene angegeben.

Tabelle 9: Ergebnisse: Lattenfußschiefe, Abweichung von Ebene; Minimum und Maximum fett gedruckt

Latte	Abweichung von Regressionsebene in Aufsetzpunkt ¹ [0.01 mm]						
	1	2	3	4	5	6	7
Leica GKNL4M-1	0.1	2.2	-0.1	-4.7	0.2	1.7	0.5
Wild GKNL4M-2	-1.3	3.0	1.5	-6.4	2.5	1.1	-0.3
Wild GKNL4M-3	-1.4	2.7	-0.8	-0.9	0.6	-0.2	0.1
Leica GKNL4M-4	2.8	0.0	1.8	-9.2	3.4	-3.1	4.3
Leica GKNL4M-5	0.9	3.0	-3.0	-1.7	4.7	6.3	-0.8
Leica GKNL4M-6	-0.5	2.4	-0.4	-3.2	-1.2	4.2	-1.4
Leica GKNL4M Neu 1	1.4	0.8	1.1	-6.6	1.0	1.1	1.3
Leica GKNL4M Neu 2	0.8	0.7	-0.2	-2.6	0.2	0.0	1.1
Leica GKNL4M Gebraucht 1	0.8	2.4	-0.4	-5.6	0.3	0.9	1.5
Wild GKNL4M Gebraucht 2	1.9	1.0	1.2	-8.2	1.8	-0.2	2.5
Trimble TD24	-1.7	-0.8	0.6	3.9	0.7	-1.0	-1.6
Sokkia BAS55	-1.2	1.1	0.6	-0.9	1.7	-1.2	0.0

¹ Lage der Punkte am Lattenfuß siehe 14a

Jeweils fett markiert sind die größte und kleinste Abweichung eines Lattenfußes von der Ausgleichsebene, wobei positive Werte eine Wölbung nach Oben gegenüber der Ebene bedeuten.

Dabei stechen vor allen die Punkte 2 und 4 ins Auge. Im Bereich dieser Aufsetzpunkte wird bei praktischen Vermessungsarbeiten der Lattenfuß wahrscheinlich am öftesten aufgesetzt. Mit Ausnahme der Latten TD24 und GKNL4M Neu 1 treten in Punkt 2 nur positive Abweichung auf.

Weit größere Abweichungen mit negativem Vorzeichen treten in Punkt 4, dem Mittelpunkt des Lattenfußes auf. Bis auf den Fuß der Latte TD24 wölbt sich in diesem Punkt die Aufsetzfläche auf. Am Beispiel der Latte GKNL-4 zeigt sich, das der Lattenfuß mit einer Ebene zwar sehr einfach, aber auch oft unzureichend beschrieben werden kann. Trotz einer Lattenfußschiefe in x-Richtung von $-6.0'$, besteht zwischen den Aufsetzpunkten 2 und 4 ein Unterschied in den Ebenenabweichungen von 0.09 mm. Der Winkel zwischen diesen beiden Punkten beträgt so $25.8'$. So beeinflusst eine Änderung des Lattenaufsetzpunkts die Höhenablesung stärker als man von der Neigung der Ausgleichsebene erwarten würde. In Abbildung 17 ist die Lattenfußschiefe exemplarisch für eine Leica/Wild GKNL4M-Latte visualisiert. Weitere Resultate werden in Kapitel 7 gezeigt.

6 Lattenfußschiefe

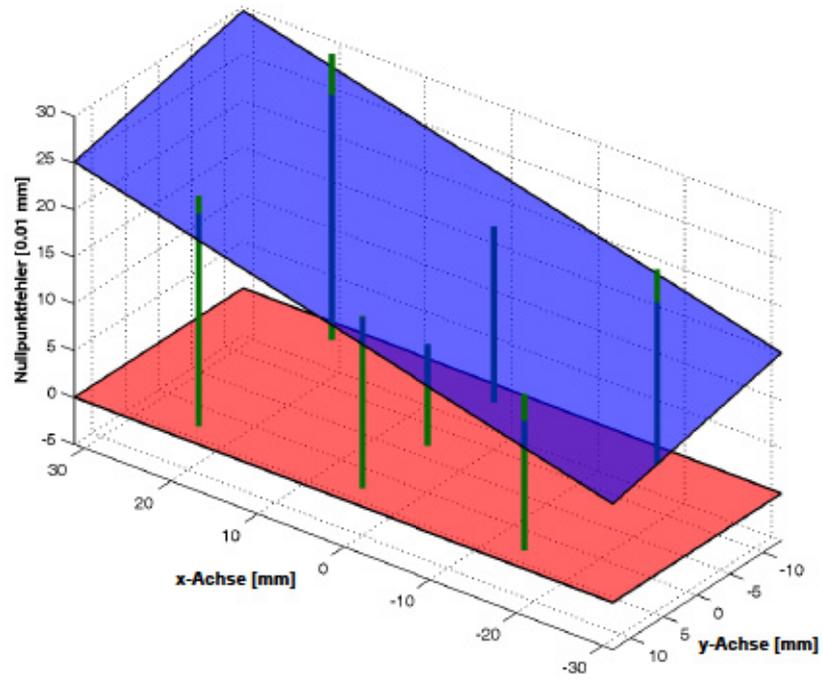


Abbildung 17: Lattenfußschiefe „Leica GKNL4M-4“

7 Nullpunktfehler

7.1 Einführung

Unzureichende Fertigung oder eine Deformation des Lattenfußes führen zu einer Differenz zwischen dem physikalischen Nullpunkt und dem Nullpunkt der Lattenteilung. Dieser Fehler wird üblicherweise beim Nivellement mit einer geraden Anzahl an Geräteaufstellungen eliminiert. Bei Flächennivellements ist dies nicht möglich und der Fehler tritt sehr wohl zu Tage.

In der DIN 18703 wird der Nullpunktfehler für Standardlatten wie folgt definiert:

„Der Nullpunktfehler ist die Differenz des ersten Dezimeters der Lattenteilung gegen das Sollmaß, gemessen in Richtung der Lattenlängsachse (Teilungsmittelpunkt) gegen den Mittelpunkt der Aufsetzfläche. Sein Betrag darf nicht größer als 0.3 mm sein.“

Wie bereits in Abschnitt 6.2 beschrieben wird, wurde vor und nach jeder Bestimmung der Lattenfußschiefe Messungen zu einer Präzisionsinvarlatte durchgeführt. Diese Messungen dienen als Referenz für die Standardlatten. Da aber auch Präzisionsinvarlatten einen Nullpunktfehler aufweisen können und so nur eine relative Referenz bilden, wurde der Nullpunkt der Präzisionslatten separat bestimmt. So kann in der Folge auch allen Standardnivellierlatten ein absoluter Nullpunkt zugewiesen werden.

Die Latten GPCL2 (S.N. 25360) von Leica und LD13 (S.N. 14540) von Zeiss mussten dazu untersucht werden. Eine Invarlatte von Sokkia stand zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht zur Verfügung.

7.2 Nullpunktbestimmung mittels Doppelverhältnis

Prof. F. K. Brunner veröffentlichte vor 40 Jahren ein Paper, dass sich mit der einfachen Bestimmung des absoluten Nullpunktfehler beschäftigte (Brunner, 1972). Er schlug vor, dieses Problem über die Anwendung des Doppelverhältnisses zu lösen. Wie in Abbildung 18 gezeigt, liegen vier Punkte auf einer Geraden, wobei die Distanzen a und b zwischen den Punkten B , C und D bekannt sind. Davon ist bei einer Präzisionsinvarlatte mit bekannten Abstände der Striche auszugehen.

Werden die Winkel zwischen allen Punkten von einem abseits liegenden Punkt 0 gemessen, lässt sich die Distanz x über ein Doppelverhältnis (siehe Formel 7) lösen.

7 Nullpunktfehler

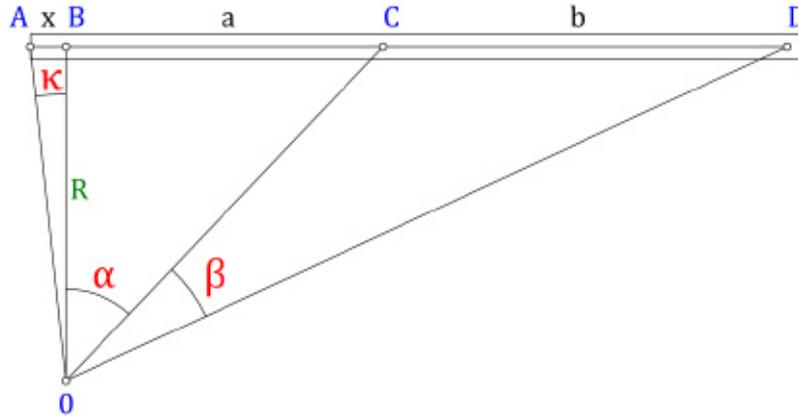


Abbildung 18: Lattennullpunktbestimmung über Doppelverhältnis (nach Brunner, 1972)

$$\lambda = \frac{x+a}{a} : \frac{x+a+b}{a+b} = \frac{\sin(\kappa + \alpha)}{\sin\alpha} : \frac{\sin(\kappa + \alpha + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

Aus Formel 7 lässt sich

$$x = \frac{a(a+b)(\lambda - 1)}{(a+b - a\lambda)} \quad (8)$$

umformen. Mit der Kenntnis der beiden Strecken a und b , sowie den drei Winkeln κ , α und β ist eine Bestimmung der dritten Strecke x möglich.

Die Distanz zwischen zwei Codeelementkanten ist genau definiert und durch die Fertigungsgenauigkeit von 0.007 mm sind a und b auf ± 0.01 mm genau bekannt (Fischer und Fischer, 1999). Als Punkt A wird ein Punkt auf der Schnittgeraden der Lattenfußfläche und der Codeebene angenommen. Idealerweise befindet sich dieser Punkt ebenfalls auf der Codelängsachse. Die Lage des Beobachtungsstandpunkts kann frei gewählt werden, da das Doppelverhältnis sich gegenüber Projektionen gegenüber invariant verhält. Deswegen ist es auch prinzipiell nicht nötig die untersuchte Nivellierlatte zu horizontieren. Die Winkelmessungen zu den vier definierten Punkten erfolgten in 2 Sätzen in beiden Kreislagen mit einem Theodolit.

Der Sollwert für die Distanz x ist ebenfalls aus Herstellerangaben bekannt. Die Differenz des aus dem Doppelverhältnis gerechneten und dem bekannten Wert für x ergibt den gesuchten Lattennullpunktfehler.

Brunner (1972) stellte sich auch die Frage, wie die Punkte und Distanzen auf der Gerade gewählt sein müssen, um den Gesamtfehler der Distanz x zu minimieren. Dazu ersetzte er

im ersten Term die Sinusse der Winkel mit den Quotienten der zugehörigen Strecken durch den Normalabstand des Winkelmesspunkts zur Geraden R ($\sin\alpha = \frac{a}{R}$). Daraus ergeben sich folgende vereinfachten Formeln zur Abschätzung der Winkel- (M_φ) und Streckenfehler (M_l):

$$M_\varphi \approx \pm R m_\varphi \sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2} \left(\frac{2a+b+x}{a+b} \right)^2 + \frac{x^2}{b^2} \left(\frac{a+x}{a+b} \right)^2} \quad (9)$$

$$M_l \approx \pm \frac{x}{ab(a+b)} m_l \sqrt{b^2(x+2a+b)^2 + a^2(x+a)^2} \quad (10)$$

Aus Formel 9 lässt erkennen, dass sich der Winkel direkt proportional zum Abstand R verhält. Der Abstand des Beobachtungsstandpunkts zur Latte ist also möglichst klein zu wählen. Da alle x nur im Zähler vorkommen wird auch eine Minimierung der Distanz x eine Verkleinerung des Winkelfehler mit sich bringen. Deswegen soll Punkt B möglichst nahe dem Punkt A als eines der untersten Codeelemente realisiert werden.

Um auch die Längen der beiden Strecken a und b hinsichtlich des Fehlers optimieren zu können, substituiert er b mit ka und vernachlässigt alle x (Forderung: $x \rightarrow 0$) in den Summen, woraus sich

$$M_\varphi = \pm R m_\varphi \sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2} \left(\frac{2+k}{1+k} \right)^2 + \frac{x^2}{a^2 k^2} \left(\frac{1}{1+k} \right)^2} \quad (11)$$

$$M_l = \pm \frac{x}{a} \frac{m_l}{k(1+k)} \sqrt{1 + k^2(2+k)^2} \quad (12)$$

ergeben.

Daraus leitete Brunner (1972) die Forderung eines möglichst großen Verhältnisses k ab, was zu der Forderung von $x \ll a \leq b$ führt. Unter einer Annahme eines mittleren Winkelmessfehlers $m_\varphi = 5''$ und einem Distanzfehler von a und b von $m_l = 0.02 \text{ mm}$ kann eine Genauigkeit der Strecke x von 0.03 mm erreicht werden. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen stand ein Gerät mit einer Winkelmessgenauigkeit von $m_\varphi = 3''$ (siehe Abschnitt 7.2.1) zur Verfügung. Die Strecken a und b sind auf 0.01 mm genau bekannt. Dies führt zu einer theoretischen Genauigkeit der Strecke x von 0.01 mm.

7.2.1 Versuchsaufbau

Zur Messung der benötigten Winkel in Gebrauchsstellung wurde die Latte am Wagen des Vertikalkomparators montiert. So konnte über die gesamte Messdauer hinweg die Lagestabilität gewährleistet werden. Durch die vertikale Lattenposition wurden die Zenitdistanzen der einzelnen Punkte beobachtet. Dafür wurde ein Leica TCA1800 (Sr.-Nr. 413701) mit einer Winkelmessgenauigkeit von $1''$ verwendet. Wie in Abbildung 19 zu sehen wurde der TCA1800 an einer stabilen Position in etwa 2.50 m Entfernung von der Latte aufgestellt.

Besonderer Augenmerk wurde auf die Realisierung von Punkt A am Lattenfuß gelegt. Hierzu wurde ein Metallplättchen mit einer 10 mm langen und 0.05 mm tiefen Einfräsung angefertigt. Dieses Plättchen wurde mittels Magneten am Lattenfuss stehend befestigt (siehe Abbildung 20), sodass zwischen der Einfräsung um der Aufsetzfläche ein 0.05 mm breiter Spalt entstand. Um den Spalt mittig anzielen zu können, wurde dieser von hinten mit zwei grünen LEDs beleuchtet. Bei der späteren Berechnung des Nullpunktfehlers wurden $25 \mu\text{m}$ ($1/2$ Spalt) als Offset berücksichtigt.

Zur Überprüfung der exakten Positionierung des Plättchens auf der Schnittgeraden der Lattenteilung mit der Aufsetzfläche, wurde ein Triangulierungssensor (μ -epsilon OptoNCDT) verwendet. Punkt A hatte eine maximale Abweichung von 0.15 mm bezüglich der gewünschten Position.

Da trotz der begrenzten Raumhöhe ein möglichst großer Lattenbereich sichtbar sein sollte, wurde die Latte möglichst niedrig am Vertikalkomparator positioniert. Um auch Punkt A, auf der Schnittgerade von der Ebene des Invarbands und der Lattenfußfläche beobachten zu können, musste die Instrumentenhöhe daher besonders gering gehalten werden. Das wurde über die Verwendung eines gekürzten Stativs in einer Bodengrube erreicht.

Als Punkt B wurde der Mittelpunkt des jeweils untersten sichtbaren schwarzen Codeelements der Latte gewählt, um die Distanz x , wie von Brunner vorgeschlagen, möglichst gering zu halten. Für Punkt C und D wurden immer jeweils zwei benachbarte schmale Elemente in einer Lattenhöhe von rund 70 bzw. 190 cm gewählt. Durch diese einfache Redundanz von C und D kann das Doppelverhältnis kontrolliert und damit auf grobe Fehler überprüft werden.

Der starke Kontrast zwischen den hellen und dunklen Codeelementen bedingt eine Überblendung der Codekante durch das helle Element. Deswegen wurden die Punkte B, C und D jeweils in der Mitte des Codeelements definiert. Zur Winkelbestimmung wurden die untere und obere Kante des Elements gemessen und gemittelt. So kann der in beiden Messungen auftretende Effekt eliminiert werden.

Die Vertikalwinkel der 6 Punkte wurden in 2 Sätzen bestimmt. Der Horizontalwinkel wurde vor jeder Satzmessung bei der Anzielung der Spaltmitte am Lattenfuß auf Null gesetzt.

7 Nullpunktfehler

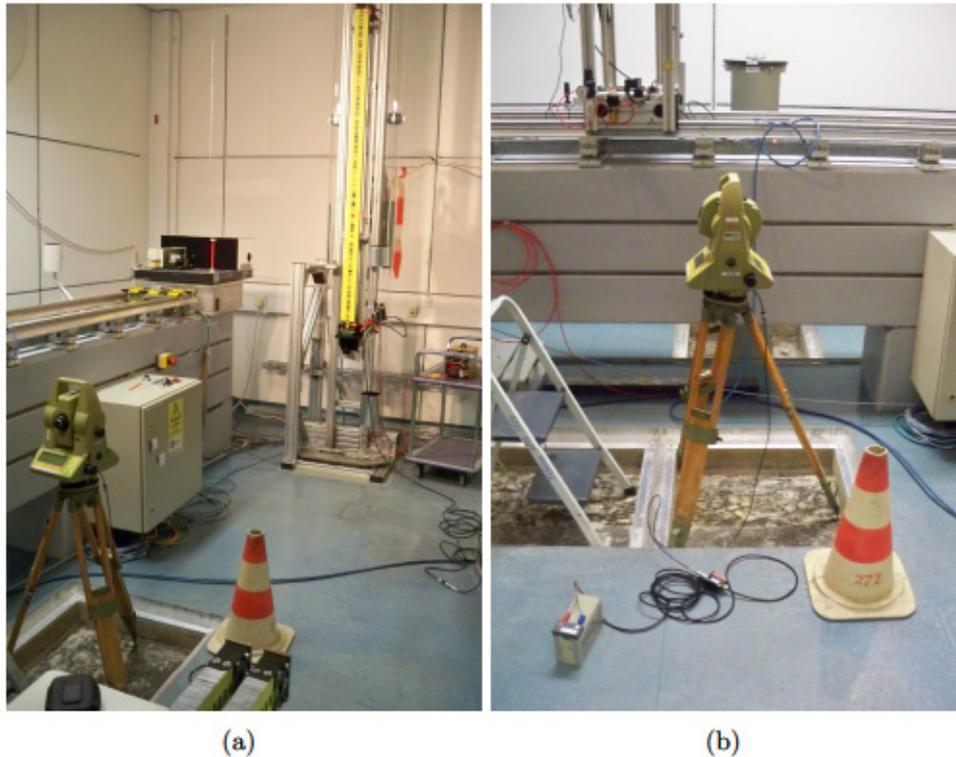


Abbildung 19: (a) Versuchsaufbau im Überblick, (b) Standpunkt des TCA1800

Alle weiteren Punkte wurden ebenfalls bei $H_z=0^{\text{g}}$ gemessen, um sicherzustellen, dass bei Hin- und Rückmessung die selben Lattenpositionen angezielt wurden.

Bei den Messungen an der Latte Leica GPCL2 wurde der Spalt bei Punkt A falsch angezielt. Dies konnte jedoch durch die Bestimmung des Winkels zwischen der falschen Anzielung und der Spaltmitte korrigiert werden.

Neben den drei Winkeln κ , α und β werden zur Bestimmung der Distanz x die Distanzen a und b zwischen B, C und D benötigt. Die Sollpositionen der Punkte können durch die Kenntnis der Basiselementbreite (siehe Woschitz, 2003) einfach berechnet werden. Jedoch verfügen auch Präzisionsinvarlatten über einen Maßstab, welcher an die Distanzen angebracht werden muss. Für beide Latten ist dieser aus am Institut durchgeführten Systemkalibrierungen bekannt (Woschitz, 2012, pers. Mitt.): Zeiss LD13: 10.5 ppm, Leica GPCL2: -0.3 ppm.

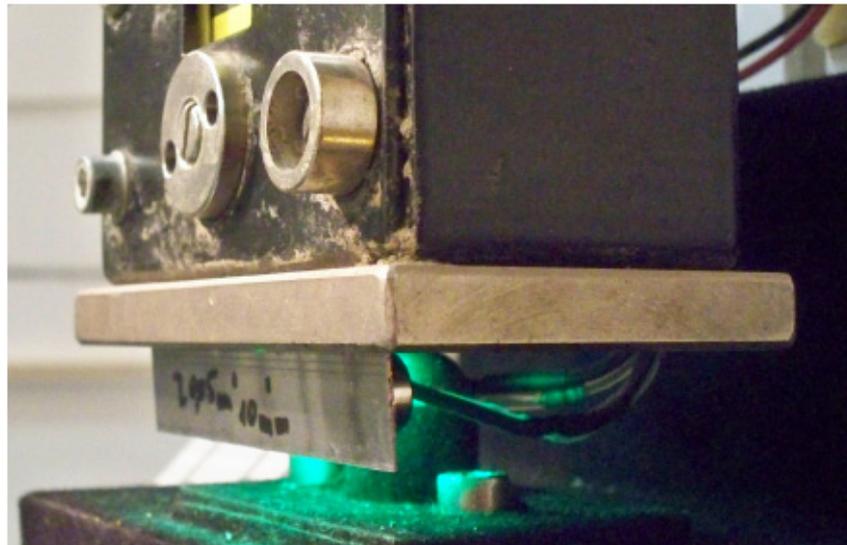


Abbildung 20: Realisierung des Punkts A durch 0.05 mm breiten Spalt, von hinten beleuchtet

7.3 Nullpunktbestimmung mittels Präzisionsnivellier und Vertikalkomparator

Der absolute Nullpunkt kann auch über den Vergleich von Präzisionsnivelliermessungen mit Interferometermessungen bestimmt werden.

Dazu verwendet wurde das analoge Nivellier Wild NA2 (S.N. 134740) mit aufgesetztem Planplattenmikrometer Wild GPM3 (S.N. 56910), siehe Abbildung 21, und das Laser-Interferometer des Vertikalkomparators. Das Nivellier NA2 mit Planplattenmikrometer war in etwa 5.7 m Entfernung von der am Vertikalkomparator montierten Latte auf einem Messpfeiler aufgebaut.

Der Wagen des Vertikalkomparators wurde so weit bewegt, dass der von hinten beleuchtete Spalt am Lattenfuß in der Visur des Nivelliers lag. Da die Latte nicht exakt auf die Position verfahren wurde, sodass sich der Horizontalfaden des Nivelliers mittig im Spalt befand, wurde mittels des Planplattenmikrometers mit einem Arbeitsbereich von 5 mm die Restabweichung bestimmt. Gleichzeitig wurde vom Interferometer die Position der Latte erfasst. Um eine leichtere Anzielung des beleuchteten Spalts zu ermöglichen, wurde die Latte leicht nach hinten gekippt am Vertikalkomparator angebracht, was auch in der Berechnung berücksichtigt wurde.

Im nächsten Schritt wurde die Latte so verfahren, dass das Nivellier eines der untersten Codeelemente der Latte mittig anzielte. Um wiederum überstrahlungsbedingte Effekte zu vermeiden, wurde die Elementmitte durch die Mittelung der Messungen der Abweichung



Abbildung 21: NA2 mit aufgesetztem Planplattenmikrometer GPM3

von den beiden Elementkanten bestimmt. Die Messungen mit der Planplatte wurde an jeder Messposition unabhängig von einander 10 Mal durchgeführt. Nach erneuter Erfassung der Interferometerdaten konnte die Verfahrdistanz am Komparator auf ca. $1 \mu\text{m}$ genau berechnet werden. Die Positionen des Verfahrschlittens wurden mit Hilfe einer von Dr. Woschitz erstellten LabView-Routine ermittelt. Die Planplattenmikrometermessungen zur Korrektur dieser Distanz wurden hinzugefügt, um die Distanz zwischen Latten-aufsetzfläche und Elementmitte zu erhalten. Zusätzlich musste die Distanz um die halbe Spaltbreite korrigiert werden, da der Spalt mittig angezielt wurde.

Durch die Differenzbildung von der berechneten Distanz mit der Solldistanz konnte der Nullpunktfehler ermittelt werden.

7.4 Ergebnisse

7.4.1 Invarlatten

Nach der Bestimmung der Nullpunktfehler aus beiden Versuchen wurden diese nach ihrer Standardabweichung gewichtet gemittelt und an die relativen, auf die jeweilige Präzisionslatte des selbe Herstellers bezogenen, Nullpunktfehler der Standardlatten angebracht. So kann auch für die Standardlatten ein absoluter Fehler des Nullpunkts angegeben werden. Die Untersuchungen der beiden Präzisionslatten ergaben die in Tabelle 10 angeführten Ergebnisse.

Für die Latte „Sokkia BAS55“ können leider keine absoluten Nullpunktfehler angegeben werden, da im Zeitraum der Untersuchung keine Präzisionsinvarlatte von Sokkia zur

7 Nullpunktfehler

Verfügung stand.

Tabelle 10: Ergebnisse Nullpunktfehler der Präzisionslatten

Latte	NP-Fehler [mm]	σ_{NP} [mm]	NP-Fehler Doppelv. [mm]	$\sigma_{Doppelv.}$ [mm]	NP-Fehler Niv. [mm]	$\sigma_{Niv.}$ [mm]
Leica GPCL2	0.12	0.014	0.14	0.012	0.11	0.016
			0.14		0.12	
			0.11			
			0.11			
Zeiss LD13	-0.03	0.014	-0.03	0.012	-0.03	0.016
			-0.03		-0.03	
			-0.03			
			-0.03			

7.4.2 Standardlatten

Bei den Untersuchungen der Lattenfußschiefe wurden beiden untersuchten Invarlatten bereits als Referenz benutzt. So ist für alle Standardlatten ein relativer Nullpunktfehler in Bezug auf die Invarlatten bekannt. Nach dem Anbringen des Nullpunktfehlers der Invarlatten kann auch für die Standardlatten ein absoluter Nullpunktfehler angegeben werden. In Tabelle 11 sind die Nullpunktfehler aller untersuchten Latten samt ihrer Standardabweichungen angegeben.

Tabelle 11: Ergebnisse Nullpunktfehler der Standardlatten

Latte	Nullpunktfehler [mm]	$\sigma_{Nullpunkt}$ [mm]	
Leica GKNL4M-1	0.14	0.014	
Wild GKNL4M-2	0.01		
Wild GKNL4M-3	-0.08		
Leica GKNL4M-4	0.11		
Leica GKNL4M-5	0.10		
Leica GKNL4M-6	0.00		
Leica GKNL4M Neu 1	0.01		
Leica GKNL4M Neu 2	0.13		
Leica GKNL4M Gebraucht 1	0.07		
Wild GKNL4M Gebraucht 2	-0.18		
Trimble TD24	-0.30		
Sokkia BASS55 ¹	—		—

¹ Es stand keine Sokkia Präzisionslatte zur Verfügung

Die Werte beziehen sich auf den in der DIN 18703 definierten Aufsetzpunkt in der Mitte der Lattenfußfläche. Alle Latten erfüllen die Norm mit einer Vorgabe von maximal ± 0.3 mm Abweichung vom Soll.

Da, wie in Kapitel 6 gezeigt, die Lattenfußflächen oft starke Neigungen gegenüber einer

7 Nullpunktfehler

zur Lattenlängsachse orthogonalen Ebene aufweisen, ist der tatsächliche Höhenoffset aber vom Aufsetzpunkt der Latte abhängig (siehe Tabelle 12). Zu diesem Zweck zeigen die Abbildungen 22 bis 32 nicht nur die im Lattenfußmittelpunkt definierten Nullpunktfehler, sondern auch die in weiteren Aufsetzpunkten bestimmten Abweichungen.

Tabelle 12: Ergebnisse: Nullpunktfehler, Offsets aller bestimmten Aufsetzpunkte

Latte	Offset des Lattenfußes vom Soll in Aufsetzpunkt [0.01 mm]						
	1	2	3	4	5	6	7
Leica GKNL4M-1	13.2	16.5	15.1	14.4	23.3	25.8	25.7
Wild GKNL4M-2	1.6	15.1	22.8	9.6	13.1	20.9	28.7
Wild GKNL4M-3	-13.4	-8.9	-11.9	-8.2	-2.7	-3.1	-2.3
Leica GKNL4M-4	16.7	18.3	24.5	10.8	20.8	18.7	30.6
Leica GKNL4M-5	6.9	11.8	8.7	10.2	7.3	21.3	17.1
Leica GKNL4M-6	3.1	3.9	-1.0	0.1	5.8	9.2	1.5
Leica GKNL4M Neu 1	9.2	5.9	3.5	1.4	14.5	11.9	9.4
Leica GKNL4M Neu 2	11.1	12.9	14.0	12.8	16.6	18.4	21.5
Leica GKNL4M Gebraucht 1	10.6	13.4	11.8	6.7	12.6	14.4	16.2
Wild GKNL4M Gebraucht 2	-5.6	-6.8	-6.9	-17.6	-9.0	-11.3	-8.8
Trimble TD24	-33.1	-39.1	-44.6	-29.6	-21.1	-29.6	-37.1
Sokkia BAS55 ¹	—	—	—	—	—	—	—

¹ Es stand keine Sokkia Präzisionslatte zur Verfügung

Betrachtet man die „Nullpunktfehler“ aller Aufsetzpunkte der Leica/Wild Stecklatten (GKNL4M), so überschreitet augenscheinlich nur eine Latte die Norm von 0.3 mm Abweichung: „Leica GKNL4M-4“ weist in einem Aufsetzpunkt eine Abweichung von 30.6 Hunderstel Millimeter auf.

Die schlechtesten Ergebnisse weist die Trimble-Latte TD24 auf. Während der in der Norm definierte Aufsetzpunkt in der Mitte des Lattenfuß mit -29.6 Hunderstel Millimeter noch knapp in Norm liegt, weisen vier andere Aufsetzpunkte mehr als 0.3 mm Fehler auf.

In den Abbildungen ist zu erkennen, dass die Definition des Nullpunktfehlers im Lattenfußmittelpunkt den Fehler nur punktuell angibt. Durch die Lattenfußschiefe in beiden Achsrichtungen und der oft nach unten gewölbten Aufsetzfläche können geringe Abweichung der Lage des Aufsetzpunkts der Latte starke Abweichung vom in Tabelle 11 angegebenen Nullpunktfehler mit sich bringen.

7 Nullpunktfehler

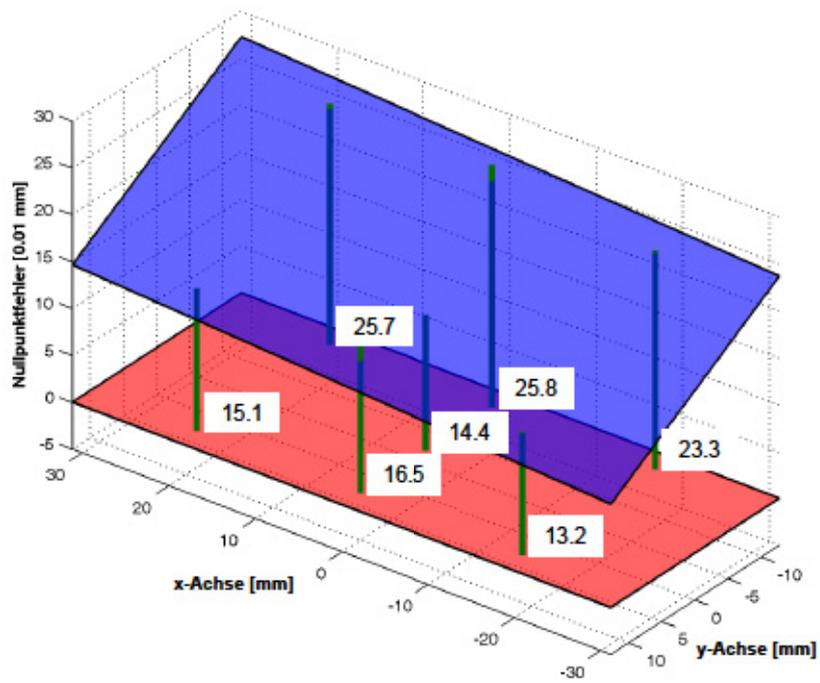


Abbildung 22: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M-1“

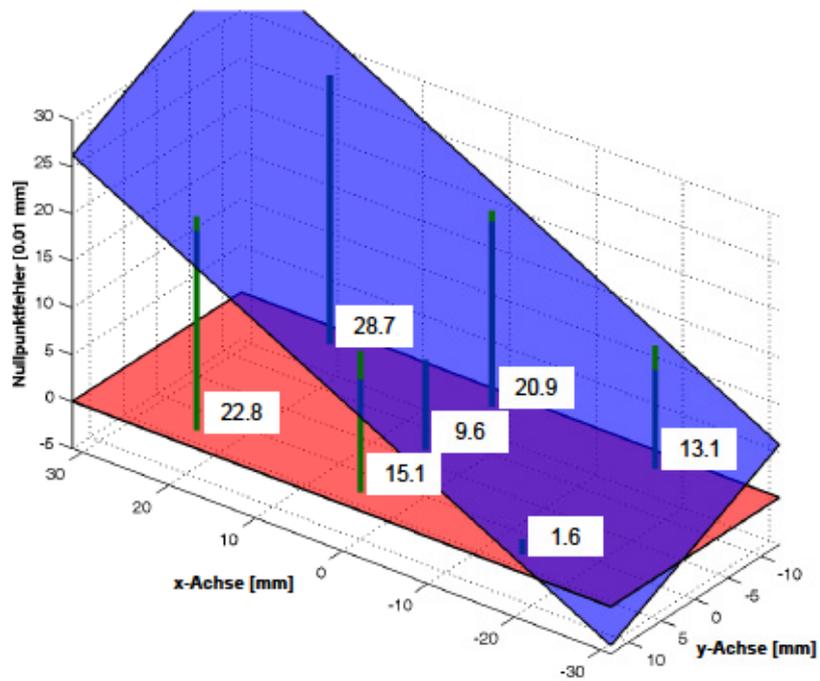


Abbildung 23: Nullpunktfehler „Wild GKNL4M-2“

7 Nullpunktfehler

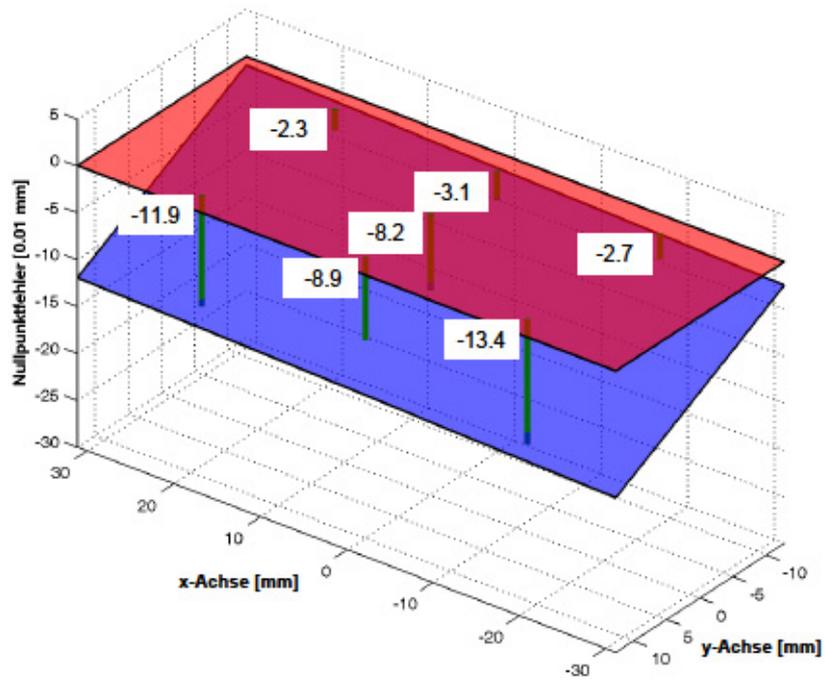


Abbildung 24: Nullpunktfehler „Wild GKNL4M-3“

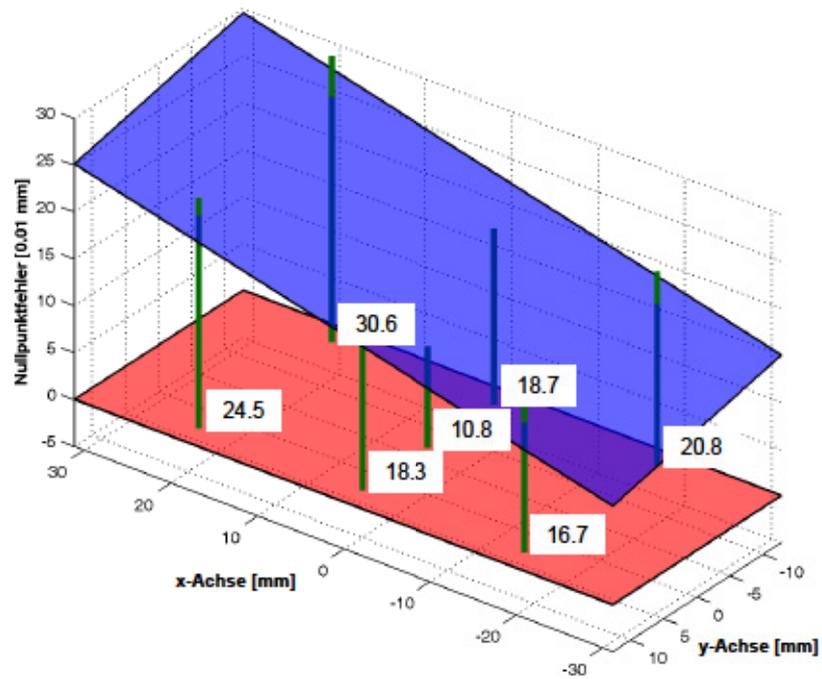


Abbildung 25: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M-4“

7 Nullpunktfehler

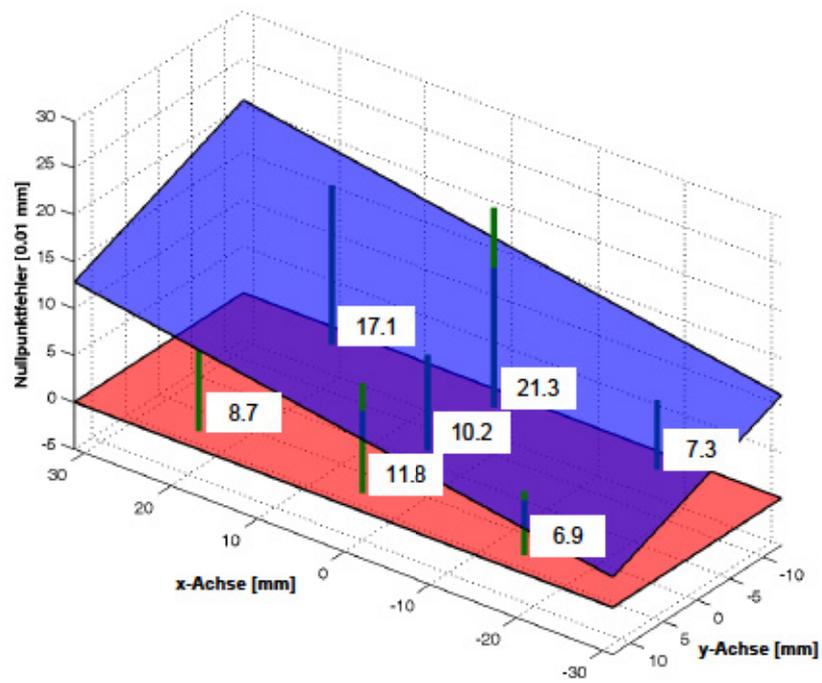


Abbildung 26: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M-5“

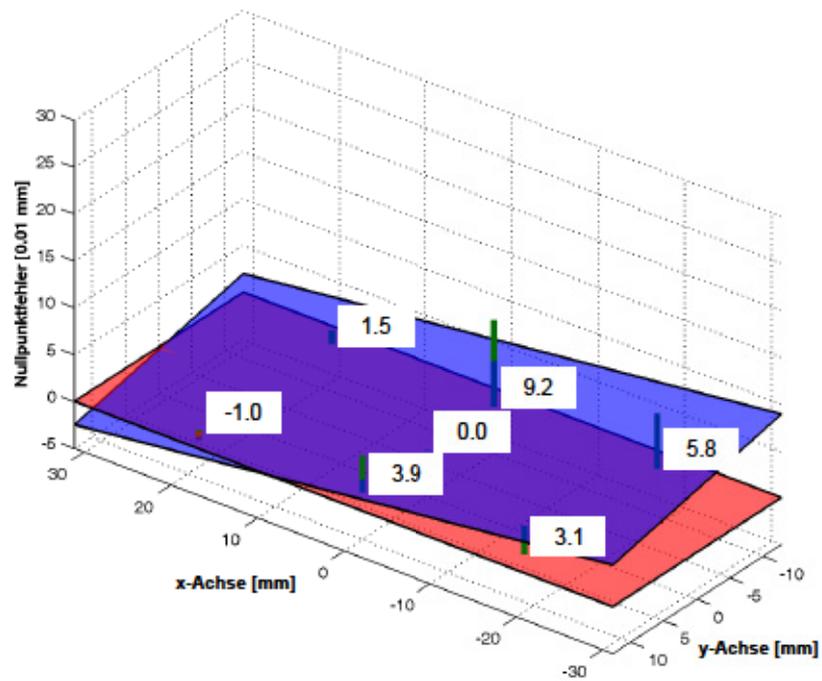


Abbildung 27: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M-6“

7 Nullpunktfehler

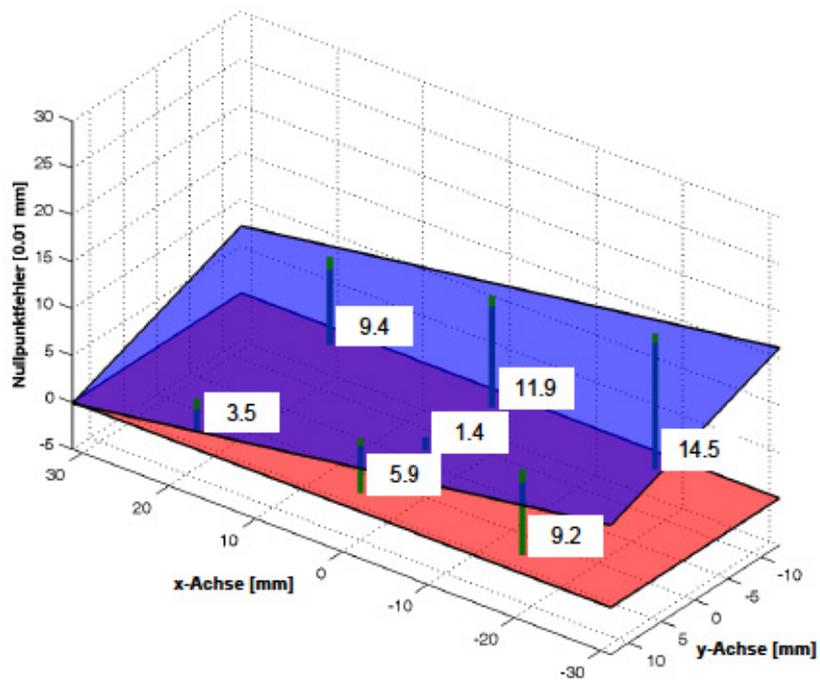


Abbildung 28: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M Neu 1“

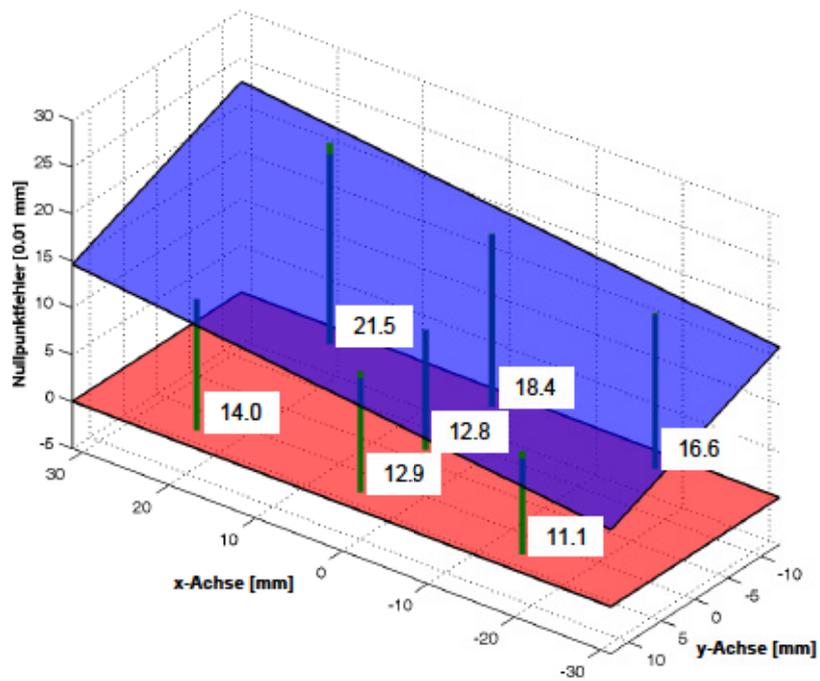


Abbildung 29: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M Neu 2“

7 Nullpunktfehler

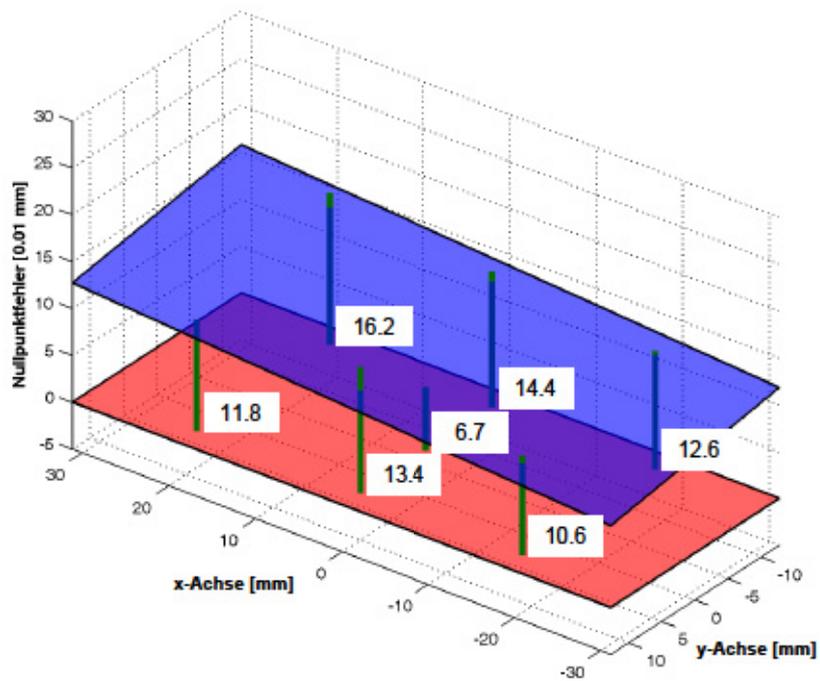


Abbildung 30: Nullpunktfehler „Leica GKNL4M Gebraucht 1“

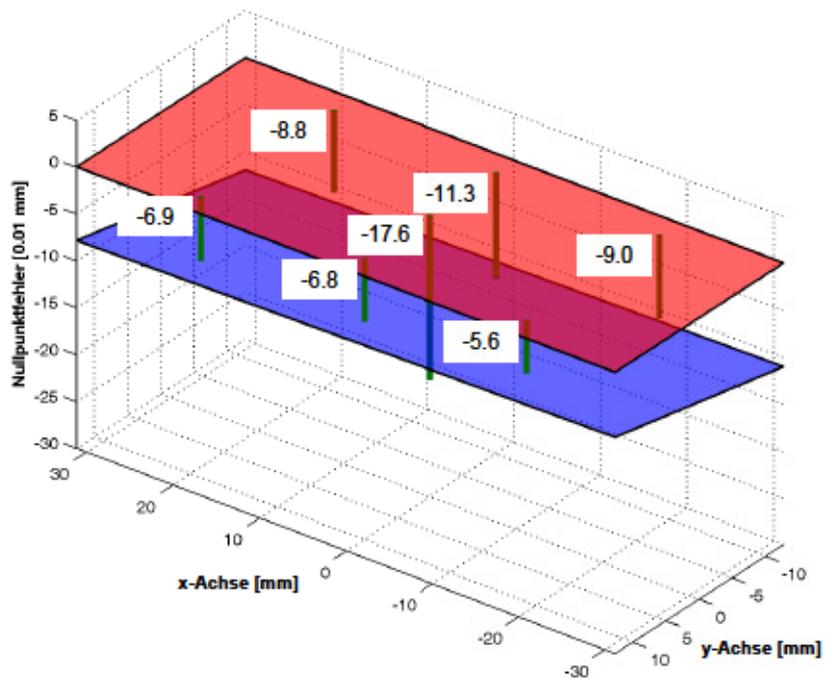


Abbildung 31: Nullpunktfehler „Wild GKNL4M Gebraucht 2“

7 Nullpunktfehler

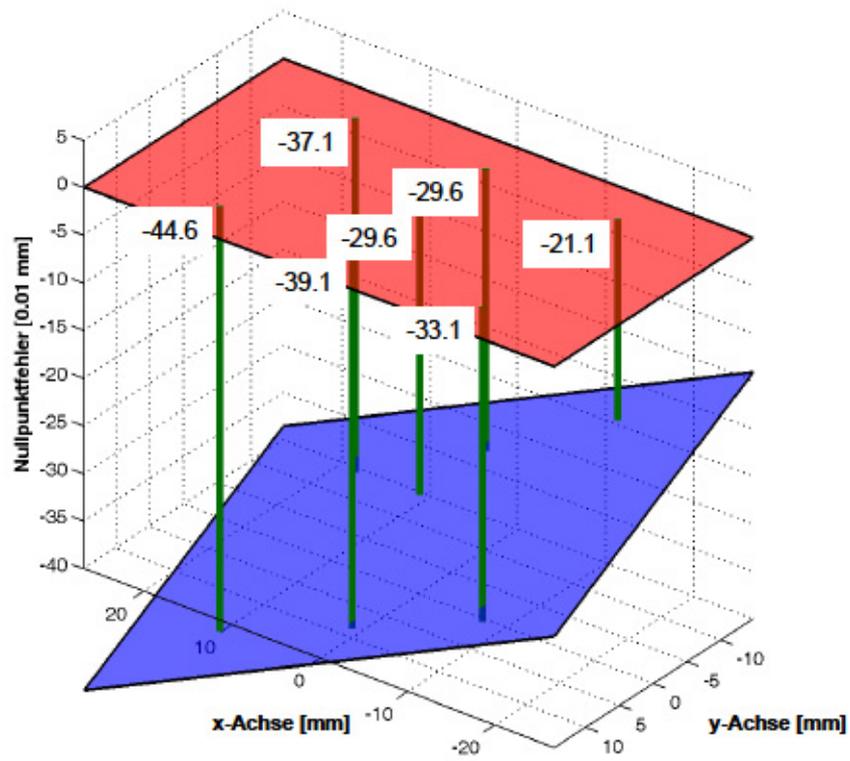


Abbildung 32: Nullpunktfehler „Trimble TD24“

8 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

8.1 Einführung

Ein Material das einer Temperaturänderung unterworfen ist, ändert dabei i.A. seine Ausdehnung. Zumeist dehnt sich ein Stoff bei einer Erhöhung der Temperatur aus und zieht sich bei Abkühlung zusammen. Da es sich hierbei nur um eine kleine Änderung in der Geometrie handelt, können sie bei Dingen des alltäglichen Lebens vom Menschen nicht wahrgenommen werden. Auch wenn dieser Effekt außerhalb der menschlich Wahrnehmung liegt, muss er oft, wie etwa bei Brücken oder Überlandleitung beachtet werden.

Jeder Stoff verfügt neben vielen anderen physikalischen Eigenschaften auch über einen spezifischen temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten, welchen ein Maß der Ausdehnung pro Temperatureinheit ist. Der Ausdehnungskoeffizient α wird als ppm/K angegeben. So bedingt z.B. die Erwärmung eines 1 Meter langen Eisenstabs ($\alpha = 12.2$ ppm/K) um 20 Kelvin ein Ausdehnung von 0.244 Millimeter.

Natürlich ist auch geodätisches Messinstrumentarium diesem physikalischen Effekt unterworfen, welcher beachtet werden muss. Oft werden Faustformeln dazu verwendet, um sicher zu gehen genügend Zeit zwischen der Änderung der Umgebungstemperatur der Ausrüstung und dem eigentlichen Messbeginn vergehen zu lassen. Da es sich bei Nivellierlatten um bis zu 8 Meter lange Teile handelt, tritt hier die temperaturabhängige Ausdehnung besonders zu Tage. Die hier untersuchten Standardnivellierlatten sind aus Aluminium und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigt. Ein typischer Koeffizient α ist für Aluminium mit 23.8 ppm/K bekannt. Für das GFK-Material der GKNL4M-Latten ist kein genauer Wert bekannt. Dieser ist abhängig von unbekanntem Faktoren wie der Faserausrichtung und dem Faseranteil. Einen Anhaltspunkt in welcher Größenordnung sich α bei Verbundwerkstofflatten bewegt, gibt Leica (2004) mit einer Angabe von <10ppm/K bei GKNL4M-Latten. Schon kurz nach Erscheinen des neuen digitalen Nivelliersystems NA2000 von Wild haben Ingensand und Schneider (1990) GKNL4M-Latten untersucht und für mehrere Proben einen Ausdehnungskoeffizienten von unter 8 ppm/K ermittelt. Auch Blum (1991) bestätigte die Herstellerangabe von 10 ppm/K. Nähere Informationen wie dieses Ergebnisse erzielt wurden stehen aber nicht zur Verfügung.

Aus den hier beschriebenen Untersuchungen könnte, sofern ein Alterungseffekt vorliegt, eine Aussage über den Koeffizienten bei Latten verschiedener Herstellungszeitpunkte getroffen werden, da nun nach mehr als 20 Jahren nach der Markteinführung mehrere verschieden alte Latten vorliegen.

Die Ausdehnung einer Latte bei Erwärmung hat auch eine Streckung des Lattencodes

zur Folge, was bedeutet, dass sich der für das Nivellier sichtbare Codebereich scheinbar absinkt (siehe Abbildung 33).

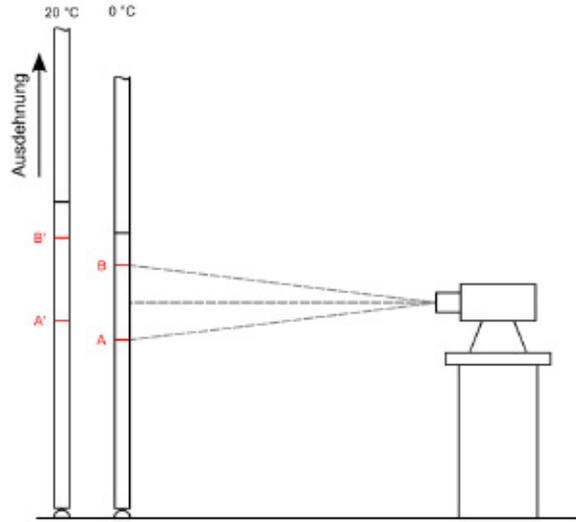


Abbildung 33: Skizze Versuchsaufbau Temperatursprung

Werden alle anderen Faktoren wie die Änderung des Lattenaufsetzpunkts oder Veränderungen an einer Lattenelementstoßstelle ausgeschlossen, kann die Änderung in den Messwerten vollständig auf die Erwärmung der Latte zurück geführt werden. Ändert sich die Materialtemperatur der Latte unmittelbar bei Messbeginn, würde eine einfache Division der Lattenausdehnung durch die Temperaturänderung genügen, um den temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten zu erhalten.

Bei der Ausdehnung einer Latte auf Grund einer Erhöhung ihrer Temperatur handelt es sich um ein dynamisches Messsystem 1. Ordnung, das mit

$$T = T_u + C \cdot e^{-t/\tau} \quad (13)$$

das Aufwärmverhalten der Latte modelliert (Brunner, 2008). Dabei steht T_u für den Messwert bei Umgebungstemperatur, T_0 für den Messwert bei Anfangstemperatur, C für die Lattenausdehnung, t für die Zeit und τ für die Zeitkonstante.

Für die Modellierung von Temperatursprüngen ist τ in erster Näherung jene Zeitdauer, die für 63 % der Anpassung an die Umgebungstemperatur T_u benötigt wird. Mit der Annahme, dass sich die Lattenausdehnung direkt proportional zur Erwärmung der Latte verhält, wird τ bei 63 % der Messwertdifferenz bestimmt.

Um die Funktion bestmöglich an die Messdaten anzupassen, wird ein iterativer Ausgleich

von τ vorgenommen. Als Abbruchbedingung wurde die Änderung von τ unter 0.5 s zwischen zwei Iterationen angenommen.

Die durch den Transport und die Horizontierung der Latte verstrichene Zeit und die einhergehende Längenausdehnung der Latte vor Messbeginn kann so modelliert werden (siehe Abbildung 34) und damit der Fehler bei der Bestimmung von α minimiert werden.

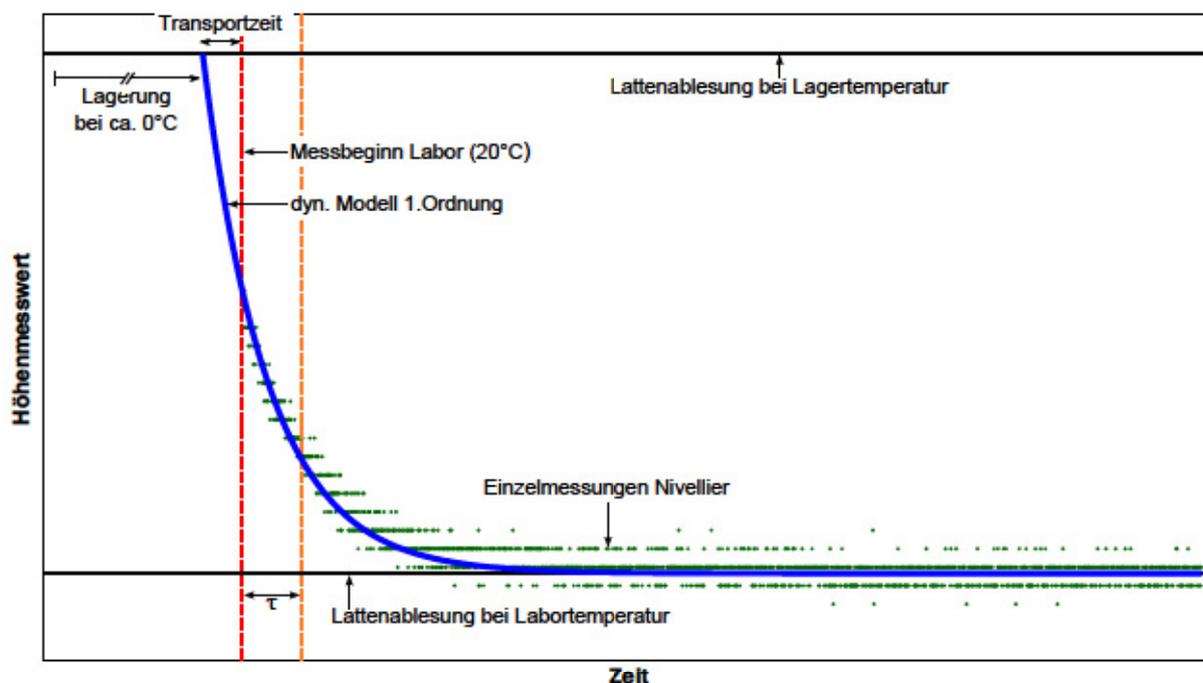


Abbildung 34: Modellierung des Temperatursprungs, schematisch

Mit dem im Ausgleich bestimmten τ kann die Modellfunktion bestimmt werden und eine Extrapolation der Messdaten vor der Messung vorgenommen werden. Da die Längenänderung in der zu Beginn des Temperatursprung am stärksten ist, verändert die Extrapolation die Gesamtausdehnung durchaus.

Die berechnete Lattenausdehnung wird auf eine Lattenlänge von 1 Meter normiert und durch die Temperaturdifferenz dividiert, um den temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten zu erhalten.

8.2 Versuchsaufbau

Im Messlabor des IGMS ist eine Klimakammer mit ca. 1 m³ Volumen vorhanden. Da die Box nur für Teile bis etwa einem Meter Länge Platz bietet, konnte diese nicht für die etwas längeren Lattenelemente benutzt werden. Da dieser Versuch im Dezember 2011 und Jänner 2012 durchgeführt wurde, konnte diesem Problem leicht Abhilfe geschafft werden. Durch die tiefen Außentemperaturen konnte ein genügend hoher Temperaturunterschied

zwischen dem Ort der Lagerung im Freien und dem Ort der Messungen erreicht werden. Bei einer Lufttemperatur im Messlabor von 20°C und einer Außentemperatur um den Gefrierpunkt, unter der Annahme eines Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_t = 10\text{ ppm/K}$, kann eine Längenausdehnung von 0.22 mm bei 1 m Lattenlänge erwartet werden, dadurch ist dieser Effekt mit einem Nivellier mit 0.01 mm Auflösung durchaus messbar.

In dieser Versuchsanordnung wird die Latte über Nacht außen gelagert. Nach der Akklimatisation der Nivellierlatte außen wird die Latte ins Messlabor gebracht, wo die Messungen durchgeführt werden. Hier herrscht eine konstante Umgebungstemperatur an welche sich die Latte mit fortschreitender Zeit im Labor anpasst. Andere Störungen, wie Visurbehinderungen, Witterung etc., können ausgeschlossen werden.

Bei der Wahl der Messtage wurde auf möglichst gleichmäßig kalte Witterung geachtet, sodass eine überwachte Abkühlung der Latten gesichert war. Zur Lagerung wurde eine Holzkiste (Transportkiste von Invarlatten) verwendet (siehe Abbildung 35). Bis zu drei Lattenteile konnten darin zusammen gelagert werden.



Abbildung 35: Lagerung der Nivellierlatten im Außenbereich, ca. 100 m abseits des Messlabors

Die Umgebungstemperatur der Latten wurde in der Kiste mit der THOMMEN Meteo Station HM30 erfasst. Das Gerät speichert in definierten Zeitabständen die Temperatur eines neben den Lattenelementen liegenden externen Temperaturfühlers, die Temperatur eines internen Thermometers und die Luftfeuchte automatisch ab. Das Gerät verfügt über eine sehr eingeschränkte Speicherkapazität, sodass alle drei Messwerte nur zu 229 Zeitpunkten erfasst werden können. Es wurde daher ein Speicherintervall von 5 Minuten gewählt, um eine Messzeit von 19 Stunden erreichen zu können.

Die Messungen folgten diesem Schema:

- **Lagerung:** Die Lagerung der Latten in der Kiste erfolgte am Hof des Wasserbau-labors der TU Graz in unmittelbarer Nähe zum Gebäude der Geodäsie-Institute. Zwischen der Kiste und dem nächsten am Messlabor liegenden Eingang liegen ca. 100 m. Dadurch war ein schneller Transport (ca. 1 min.) der abgekühlten Latte zur Gebäudetür gewährleistet.
- **Referenzmessung:** Um die Stabilität der Messanordnung (Ziellinie des Nivelliers, Höhenbolzen) zu überprüfen, wurden vor und nach der Messung des Temperatursprungs 100 Messungen zu einer im Labor akklimatisierten Invarlatte durchgeführt (gleicher Höhenbolzen wie für Prüfling).
- **Transport:** Die auf wenige Grad Celsius abgekühlte Latte sollte bis zum Start der Messungen diese Temperatur möglichst halten. Um ein Erwärmen durch Berühren der Latte zu verhindern, wurden zum Transport der Latte vom Hof in das Messlabor spezielle Thermohandschuhe benutzt.
Kritisch stellte sich der Transport von der Gebäudetür bis zum Höhenbolzen im Labor dar, da die warmen Temperaturen im Gebäudeinneren bereits zur Ausdehnung des Materials führen. Die etwa 40 Meter lange Strecke musste möglichst schnell bewältigt werden. Unter Mithilfe einer zweiten Person konnte die Zeit zwischen dem Eintreten ins Gebäude und dem Messbeginn auf ca. 1 min. reduziert werden.
- **Einrichten auf Höhenbolzen:** Vor Messbeginn wurde die Latte auf einem Höhenbolzen horizontalisiert und das Nivellier darauf fokussiert (siehe Abbildung 36a), bevor die MATLAB-Messroutine gestartet wurde. Die Fixierung der Latte geschah durch ein Fluchtstabstativ und einer eigentlich für den Vertikalkomparator gefertigten Lattenhalterung. So konnte sichergestellt werden, dass keine Zwängung der Latte stattfand und so die Materialausdehnung nicht behindert wurde (siehe Abbildung 36b).
- **Messung:** Das Nivellier maß kontinuierlich (ca. alle 4 sek.) auf die sich ausdehnende Latte und detektierte durch die temperaturbedingte Verschiebung des Lattencodes eine Änderung der Höhenablesung. In jedem Experiment wurden 1500 - 2000 Messungen in einer Zeit zwischen 90 und 120 Minuten durchgeführt.
Die Höhe des Nivelliers wurde so gewählt, dass eine möglichst hohe Ablesung auf dem ersten Lattenelement stattfand, jedoch das Lattenelementende noch nicht im Sichtbereich des Gerät war. So wurde auf einem niedrigen Messpfeiler zwei Aufsätze montiert, um eine Ablesung von 1.11 m zu erreichen (siehe Abbildung 36a). Auf Grund der geringeren Lattenelementlängen der Latten TD24 und BAS55 wurde bei den beiden Teleskopplatten nur einer dieser Aufsätze verwendet (Ablesung bei ca.

0.90 m). Je weiter oben die Ableseung stattfindet, desto größer ist die zu messende Ausdehnung durch die Temperaturänderung. Zur Beleuchtung der Latte wurde eine Tageslicht-Neonröhre verwendet. Ein Vorteil dieser Beleuchtung ist die sehr geringe Abstrahlwärme der Lampe.

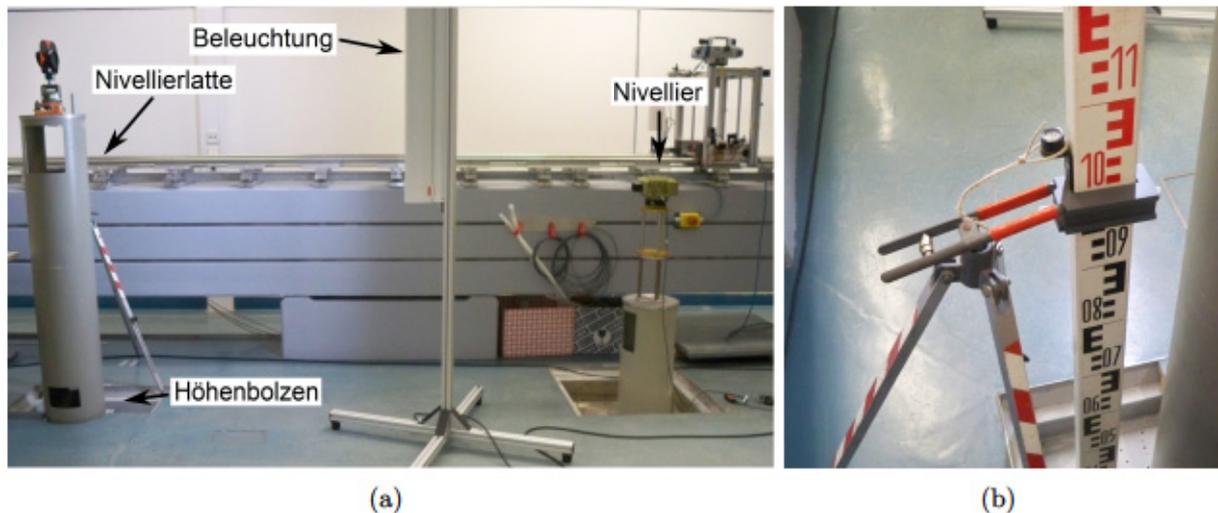


Abbildung 36: Versuchsaufbau Temperatursprung, (a) Überblick, (b) Lattenhalterung

- **Meteorologie:** Die Temperatur im Außenbereich (in Kiste, über Nacht) wurde mit der THOMMEN Meteo Station im 5'-Intervall aufgezeichnet. Die Meteorologiewerte des Messlabors werden rund um die Uhr automatisch gespeichert und standen mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Sekunden zur Verfügung.

8.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse aller Einzelversuche der Bestimmung des temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Die grafischen Darstellungen der Versuche in Anhang C zu sehen.

Auf Grund des großen Zeitaufwands des Experiments wurden nur ausgewählte Latten untersucht. Bei den Latten von Leica/Wild wurden Exemplare der Baujahre 1990-92, 1993, 1999 und 2011 untersucht, um gegebenenfalls eine Beeinflussung des Lattenalters auf den Ausdehnungskoeffizienten erkennen zu können. Weiters wurden die beiden Teleskopplatten TD24 und BAS55 untersucht.

Für alle Latten von Leica/Wild ist in der Bedienungsanleitung ein Ausdehnungskoeffizient von <10 ppm/K angegeben (Leica, 2004). Alle GFK-Latten GKNL4M unterschreiten diese Angabe mit Werten um 8 ppm/K. Dabei ist keine Abhängigkeit des Koeffizienten vom Baujahr zu erkennen.

Tabelle 13: Ergebnisse thermischer Ausdehnungskoeffizient

1	2	3	4	5	6	7	8
Latte	Baujahr Latte	Zielh. [m]	$\Delta l/m$ [0.01 mm]	ΔT [K]	τ [sek]	α_t [ppm/K]	σ_α [ppm/K]
Wild GKNL4M-3	1990 - 92	1.11	15.2	18.4	438	8.3	0.3
		1.11	16.5	21.0	566	7.9	0.2
Leica GKNL4M-4	1993	1.11	15.6	17.9	493	8.7	0.3
Leica GKNL4M-5	1993	1.11	15.3	19.0	474	8.1	0.3
		1.11	18.4	22.0	470	8.4	0.2
		1.64	18.2	22.8	563	8.0	0.3
Leica GKNL4M Neu 1	2011	1.11	13.9	17.1	418	8.1	0.3
Leica GKNL4M Neu 2	2011	1.11	13.2	18.6	482	7.1	0.3
Leica GKNL4M Gebr. 1	1999	1.11	13.0	16.8	456	7.8	0.5
Trimble TD24	<2005	0.93	28.0	15.6	458	18.0	0.2
		0.93	44.6	24.7	362	18.1	0.2
Sokkia BAS55		0.90	30.1	17.0	301	17.7	0.3

Bei drei Latten wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt (GKNL4M-4, GKNL4M-5, TD24). Einerseits konnte in zwei Versuchen die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses mit 0.4 ppm/K gezeigt werden, zusätzlich wurde bei der Latte GKNL4M-5 ein weiterer Temperatursprung durchgeführt, wobei die dritte Messung dazu diente zu untersuchen, ob das zur Verbindung der Lattenteile eingebaute Aluminium-Profil Auswirkungen auf die Ausdehnung der Latte hat. Das Aluminium-Profil ist am unteren Lattenteil mit Blindnieten befestigt. Mit dem oberen Lattenelement ist es durch Zapfen, welche in korrespondierende Löcher einrasten, fixiert (siehe Abbildung 6a). Durch den höheren Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium könnte eine größere Ausdehnung erwartet werden, wenn dem Aluminium keine zwangsfreie Ausdehnung möglich ist. Die Latte wurde bei 1.64 m angezielt, sodass sich der gesamte Sichtbereich des Nivelliers am zweiten Lattenelement befindet. Die Messung zeigte mit einem Ergebnis von $\alpha = 8.0$ ppm/K einen sogar leicht kleineren Koeffizienten als bei der Messung am unteren Lattenteil und bestätigte somit die Vermutungen nicht.

Bei den aus Aluminium (genaue Legierung unbekannt) gefertigten Latten „Trimble TD24“ und „Sokkia BAS55“ wurde auf Grund der Materialeigenschaften von Aluminium ein typischer Ausdehnungskoeffizient von 24 ppm/K erwartet, welcher auf Grund von Bearbeitungsverfahren und Legierung jedoch auch signifikant geringer sein kann. Die Messungen mit der Latte TD24 am unteren Lattenelement ergaben aber einem mittleren Koeffizienten von 18.1 ppm/K. Damit wurden die Erwartungen deutlich unterschritten.

Auch die Sokkia-Latte BAS55 weist einen geringeren Wert als Standard-Aluminium auf. Die Messung ergab hier ein α_t von 17.7 ppm/K, obwohl einem Aufkleber, der an der Lattenrückseite angebracht ist, entnommen werden kann, dass die Ausdehnung der Latte 24 ppm/K sein sollte.

8 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Die aus einer Varianzfortpflanzung gewonnene Standardabweichung des Ausdehnungskoeffizienten der Nivellierlatten liegt zwischen 0.15 und 0.32 ppm/K. Einzig die Latte „GKNL4M Gebraucht 1“ zeigt mit $\sigma_\alpha=0.53$ ppm/K einen höheren Wert. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass der Versuchsaufbau zufriedenstellende Ergebnisse in ausreichender Genauigkeit liefert.

9 Systemüberprüfung am Vertikalkomparator

9.1 Einführung

In diesem Kapitel wird die Systemüberprüfung mit Standardnivellierlatten am Vertikalkomparator behandelt. Durch diese Experimente können die Auswirkungen der Stoßstellen auf Höhenmessungen sowie der Maßstab der einzelnen Lattenelemente untersucht werden.

Aus Voruntersuchungen des Instituts (siehe Anhang F) ist bekannt, dass bei Standardnivellierlatten große Maßstäbe und Sprungstellen vorliegen. Die DIN 18703 gibt die maximale Abweichung der Lattenteilung (bei 20°C) mit folgender Formel vor:

$$\Delta l = \pm(0.3\text{mm} + 3.l \cdot 10^{-4}) \quad (14)$$

wobei Δl das Grenzabmaß und l die Länge der Nivellierlatte jeweils in mm ist.

Die angeführten 0.3 mm geben den höchstzulässigen Nullpunktfehler an, welcher in Kapitel 7 näher beschrieben wurde. Der zweite Term beschreibt bei einteiligen Latten den maximalen akzeptierbaren Lattenmaßstab, welcher bei 300 ppm, also einer Abweichung von 0.3 mm bei einer Lattenlänge von 1 m liegt. Bei mehrteiligen Latten sind darin auch die von den Stoßstellen verursachten Fehler enthalten.

Der Messablauf der Systemkalibrierung bzw. -überprüfung ist in Woschitz (2003) und Woschitz (2005) detailliert beschrieben. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde eine Distanz von 3.00 m und ein Abtastintervall von 20 mm gewählt.

Die Sichtbereiche der verwendeten Nivelliere bei einer Distanz von 3 m sind in Tabelle 14 angegeben.

Tabelle 14: Sichtbarer Lattenabschnitt bei 3.00 m Distanz

Gerät	Öffnungswinkel [°]	$x_{\text{CCD proj } 3\text{m}}$ [mm]
Wild NA3000	2'	105
Trimble DiNi12	5'	262
Sokkia SDL1X	2.7'	141

Bei den untersuchten Latten muss auch davon ausgegangen werden, dass sich der Maßstab der Latte von Element zu Element unterscheidet, da jedes Lattenteil unabhängig gefertigt wird. Dies wurde auch bereits bei Blum (1991) und Schauerte (1991) anhand einfacher Untersuchungen vermutet. So wird für jeden Codebereich der auf einem Lattenelement aufgetragen ist eine eigene Regressionsgerade geschätzt:

$$y = d + k \cdot x \quad (15)$$

wobei $y = \Delta H$ (Soll-Ist), k der Maßstab und x die Lattenposition ist.

Der Parameter k gibt dabei die Steigung der ausgleichenden Geraden an.

Zur Bestimmung der Geraden wurden nur Daten herangezogen, welche durch keine anderen Effekte, sei es latten- oder instrumentenseitig, beeinflusst wurden. Lattenendbereiche und die Übergangsbereiche an den Stoßstellen wurden deshalb für die Berechnungen nicht verwendet.

Da das Nivellier immer einen gewissen Bereich zur Bestimmung der Lattenhöhen verwendet, verschmiert sich ein vorhandener Fehler an einer Elementstoßstelle über den Sichtbereich des Gerät. So ist es aus den reinen Messdaten auch nicht möglich die Größe des Fehler am Lattenstoß zu bestimmen. Wie in Abbildung 37 zu erkennen ist, werden die hier aus den Messwert-Differenzen gerechneten Regressionsgeraden (Schwarz) bis zur Stoßstelle verlängert (Rot). Der Unterschied der Ordinaten der Kreuzungspunkte mit der Stoßstelle (Grün) gibt den Offset an, welcher durch eine fehlerhafte Elementverbindung verursacht wird.

Der Fehler am Stoß ist hier negativ definiert, wenn das obere Lattenteil sich in einer höheren Position befindet als es sein sollte (siehe Abbildung 37). Umkehrt bedeutet ein positiver Stoßstellenfehler, dass sich die Codeteilung des oberen Elements weiter oben befinden müsste.

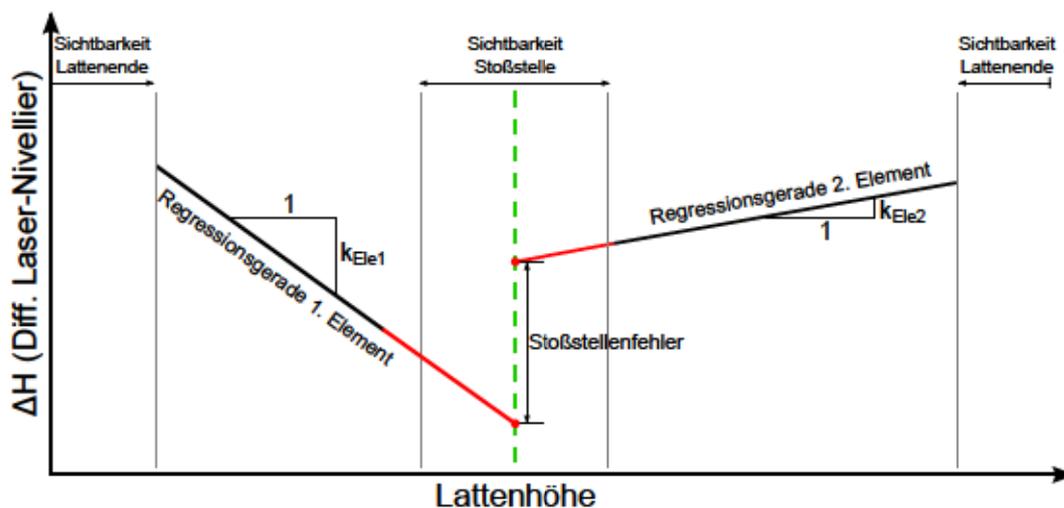


Abbildung 37: Fehler an der Stoßstelle

Da es nicht möglich ist alle Elemente einer Latte auf Grund ihrer Länge in einem am Komparator (max. mögliche Lattenlänge: 3 m) zu montieren und die Kalibriermessung

durchzuführen, müssen die Latten geteilt und die einzelnen Messreihen später zusammen geführt werden. Bei einer GKNL4M-Latte werden für die erste Messung die Elemente 1 und 2 verwendet, für die zweite Messung die Elemente 2 und 3. So liegen für das Element 2 Messdaten aus beiden Messungen vor, die ein numerisches Zusammenfügen der getrennten Messreihen ermöglichen.

Daher werden nach gesonderter Berechnung der Regression der Messreihen die beiden Datensätzen um den halben Mittelwert des Offset zwischen den Geraden nach unten bzw. oben versetzt.

9.2 Versuchsaufbau

Die Systemüberprüfungen wurden am Vertikalkomparator des Instituts durchgeführt, welcher in Abschnitt 4.3 beschrieben wurde.

Neben einigen Detailuntersuchungen wurden mit allen 12 untersuchten Latten (siehe Tabelle 3) mit den dazugehörigen Nivellieren unter folgenden Einstellungen eine Systemkalibrierung vorgenommen vorgenommen:

Tabelle 15: Bei Systemüberprüfung gewählte Parameter

Beobachtungsdistanz	3.00 m
Anzahl der Einzelmessungen pro Punkt	3
Initialisierungshöhe des Interferometers	Leica/Wild GKNL4M: 2.00 m Trimble TD24: 2.30 m Sokkia BAS55: 2.50 m
Messbereich	Leica/Wild GKNL4M: 0.00 - 4.05 m Trimble TD24: 0.00 - 4.00 m Sokkia BAS55: 0.00 - 4.98 m
Abtastintervall	20.0 mm
Beleuchtung	4 x PAR38

Die Kalibrierungsmessung folgt folgendem Schema:

- Den Nivellieren NA3000 und DiNi12 wurde jeweils 30 Minuten Aufwärmzeit eingeräumt, das Sokkia SDL1X wurde auf Grund der Untersuchungsergebnisse von Benkö (2012) rund zwei Stunden aufgewärmt.
Auch Beleuchtung des Vertikalkomparators (PAR38) wurde mindestens 30 Minuten vor Messbeginn eingeschaltet.
- Die Lattenhalterung am Wagen des Vertikalkomparators ist für die Montage von Invarlatten ausgelegt. Um auch Stecklatten des Typs GKNL4M montieren zu können, wurden zwei PVC-Adapter (siehe Abbildung 5) verwendet. Die Halterung wird dabei fest mit dem Wagen verbunden. Die Latte ist lagemäßig fixiert, kann sich jedoch noch entlang ihrer Längsachse frei bewegen.
Die verschiedenen Lattenquerschnitte der Teleskopplatten „Trimble TD24“ und „Sokkia BAS55“ wurden durch genau bemessene Papierpakete, die zwischen dem Lattenenteil und der Klammer (siehe Abbildung 38) eingelegt wurden, ausgeglichen, sodass die Latte vollständig horizontiert montiert werden konnte.

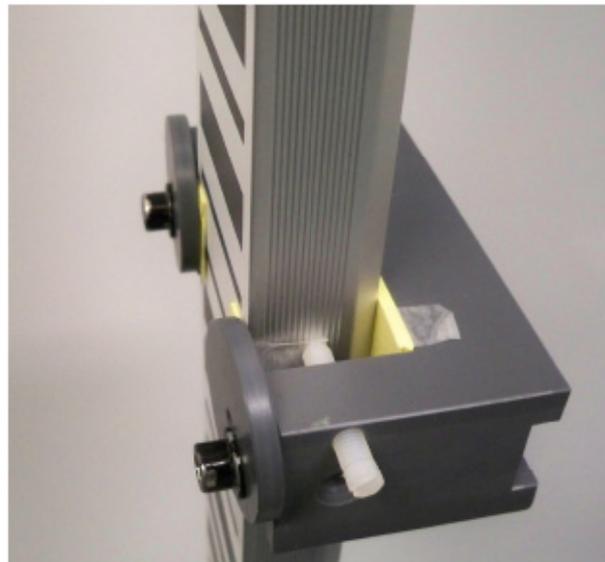


Abbildung 38: Lattenklammer für TD24 und BAS55

Für die Messung der oberen Lattenteile muss ein speziell angefertigter Lattenfuß verwendet werden, der am unteren Lattenende angebracht werden kann. Sonst könnten durch die Bauart der Latten (Hohlprofile) die Teile nicht auf den Höhenbolzen am Wagen aufgesetzt werden (siehe Abbildung 39).

- Das Nivellier wird mittels Dosenlibelle horizontiert und auf der Horizontalkomparatorbank in eine Beobachtungsdistanz von 3.00 m gebracht, auf die Latte fokussiert und in die Mitte der Lattencodeteilung ausgerichtet.

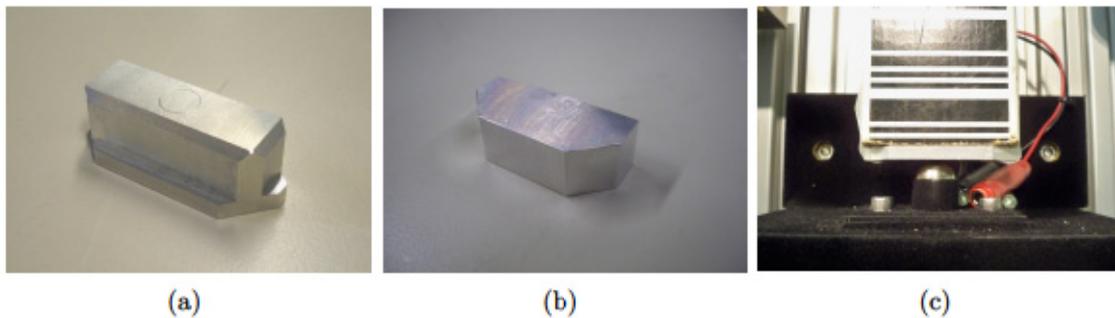


Abbildung 39: Aufsatz für Lattenende (a) für GKNL4M-Latten,
(b) für die Latten TD24 und BAS55, (c) am Vertikalkomparator

- Da es sich bei einem Laser-Interferometer um ein relatives Messsystem handelt, muss dieses um absolute Messwerte zu liefern erst initialisiert werden. Die Initialisierungsposition wurde auf 2.00 m (GKNL4M) bzw. 2.30 m (BAS55 / TD24) gesetzt, was es ermöglichte bei beiden Messungen zur Kalibrierung einer Latte die selbe Position zu verwenden. Außerdem befindet sich bei dieser Lattenaablesung keine Stoßstelle im Sichtbereich des Nivelliers.
- Jede Kalibriermessung wurde mit einem Messintervall von 20 mm durchgeführt, sodass durch die Versetzung der Latte um das halbe Intervall vor der Rückmessung, Messungen in einem Intervall vom 10 mm über den gesamten Codebereich vorliegen. Als Minimal- und Maximalposition der Latte wurde immer das äußerste Lattenende gewählt, um auch Lattenendeffekte beobachten zu können. Bei einer Kalibriermessung der Lattenteile 1 und 2 bei einem Messbereich von 0.00 m - 2.70 m einer GKNL4M-Latte entstehen so jeweils 3 Messungen an 271 Lattenpositionen. An jeder Latte wurden diese Messungen zweimal durchgeführt.

Im Allgemeinen wird darauf verzichtet, die selben Messungen bei einer größeren Distanz, wie in Rüeger und Brunner (2000) vorgeschlagen, zu wiederholen, da diese Untersuchungen vor allem auf die Abbildung von instrumentenbezogenen Fehlern auf die Messergebnisse abzielen. Währenddessen nimmt mit steigender Distanz der Einfluss der hier beleuchteten Lattenfehler auf die Messungen ab.

Eine Ausnahme bilden die Messungen zur Untersuchung des fehlerhaften Wild-Codes (Abschnitt 9.3.3) und die Versuche zur Untersuchung der Abbildung der Stoßstellen in den Messungen (Abschnitt 9.3.2).

9.3 Ergebnisse

In Tabelle 16 sind die mit dem Vertikalkomparator erzielten Ergebnisse aller untersuchten Standardnivellierlatten zusammengefasst. Für alle GKNL4M-Latten von Leica/Wild sind die bei den Kalibriermessungen bestimmten Stoßstellenfehler, sowie die Spannweite des Stoßstellenfehlers (siehe Kapitel 5) angegeben. In den weiteren Spalten sind die Maßstäbe der einzelnen Lattenelemente angeführt. Der Maßstab des zweiten Elements der GKNL4M-Latten, bzw. des dritten Elements der Latten „Trimble TD24“ und „Sokkia BAS55“ wurde aus den kombinierten Daten zweier Kalibriermessungen gewonnen.

Die in Spalte 4 angegebenen aus dem Ausgleich der Regressionsgeraden gewonnenen Standardabweichungen bewegen sich im Größenbereich zwischen 1.2 und 3.7 ppm. Diese empirische Standardabweichung ist jedoch zu optimistisch, da systematische Abweichungen darin nicht berücksichtigt sind.

Das gewählte Abtastintervall von 20 mm eignet sich nicht für eine genaue Bestimmung des Maßstabs (siehe Woschitz, 2003), da dabei bestimmte systematische Effekte (zyklisch wirkender Höhenfehler) nicht berücksichtigt sind. Im Sinne einer zügigen Durchführung der Untersuchungen wurde dies jedoch toleriert. Trotzdem konnten gut reproduzierbare Ergebnisse (max. 47 ppm Differenz) in den Messungen erzielt werden.

Tabelle 16: Ergebnisse Systemkalibrierung

1	2	3	4	5	6	7
Latte	Teil	Maßstab¹ [ppm]	σ_M [ppm]	Stoß	Stoßstellen- fehler² [mm]	Range³ [mm]
Leica GKNL4M-1	1	(-433 / -435)	-434	2.0	1 -0.025 / 0.008	0.099
	2	(-112 / -122 / -117 / -122)	-118	1.6	2 -0.098 / 0.067	0.110
	3	(-264 / -272)	-268	1.9		
Wild GKNL4M-2	1	(-169 / -156)	-162	1.5	1 0.116 / 0.192	0.056
	2	(-15 / -12 / -5 / -7)	-10	1.8	2 -0.392 / -0.385	0.015
	3	(-387 / -371)	-379	2.0		
Wild GKNL4M-3	1	(-67 / -72)	-69	1.3	1 0.276 / 0.286	0.036
	2	(-247 / -260 / -246 / -236)	-247	2.1	2 -0.512 / -0.508	0.020
	3	(-138 / -129)	-134	2.3		
Leica GKNL4M-4	1	(-383 / -378)	-380	1.3	1 -0.416 / -0.410	0.063
	2	(-147 / -145 / -140 / -130)	-140	1.6	2 -0.218 / -0.207	0.027
	3	(-826 / -818)	-822	2.2		
Leica GKNL4M-5	1	(-456 / -461)	-458	3.6	1 -0.420 / -0.420	0.023
	2	(-536 / -510 / -547 / -500)	-523	3.7	2 -0.633 / -0.630	0.021
	3	(-784 / -792)	-788	2.1		
Leica GKNL4M-6	1	(-1 / -11)	-6	1.5	1 0.184 / 0.185	0.037
	2	(-111 / -88 / -108 / -102)	-102	2.0	2 -0.186 / -0.174	0.036
	3	(-281 / -282)	-281	2.0		
Leica GKNL4M Neu 1	1	(176 / 178)	177	1.8	1 0.193 / 0.209	0.043
	2	(-17 / -8 / -8 / -7)	-10	1.2	2 0.351 / 0.352	0.066
	3	(1 / 5)	3	2.1		
Leica GKNL4M Neu 2	1	(121 / 134)	128	1.7	1 0.386 / 0.393	0.055
	2	(27 / 38 / 45 / 27)	35	1.4	2 0.290 / 0.296	0.073
	3	(9 / 31)	20	3.1		
Leica GKNL4M Gebr.1	1	(-429 / -440)	-434	1.6	1 -0.140 / -0.035	0.093
	2	(-117 / -104 / -119 / -115)	-114	1.4	2 -0.032 / -0.021	0.091
	3	(-309 / -304)	-306	2.0		
Wild GKNL4M Gebr. 2	1	(-114 / -126)	-120	1.8	1 -0.014 / 0.008	0.042
	2	(97 / 105 / 88 / 90)	95	1.7	2 -0.164 / -0.137	0.074
	3	(-70 / -89)	-79	2.1		
Trimble TD24	1	(-304 / -255)	-279	2.0	1 -0.007 / 0.025	0.084
	2	(-312 / -312)	-312	3.2	2 -0.509 / -0.483	0.143
	3	(-296 / -294 / -296 / -298)	-296	2.0	3 -0.512 / -0.467	0.105
	4	(-182 / -181)	-182	2.4		
Sokkia BAS55	1	(-289 / -281)	-285	2.4	1 -0.159 / -0.143	0.598
	2	(32 / 23)	28	1.7	2 -0.476 / -0.422	0.569
	3	(-409 / -396 / -427 / -393)	-406	1.5	3 -0.633 / -0.310	0.347
	4	(-307 / -305)	-306	1.7	4 -0.224 / 0.131	0.765
	5	(-733 / -711)	-722	2.1		

¹ fett gedruckt ist das Mittel der Einzelergebnisse (Einzelergebnisse zuvor Klammern) angegeben

² aus den beiden Komparatormessungen, Momentaufnahme

³ in gesonderten Versuchen bestimmt (siehe Kapitel 5)

9.3.1 Maßstab

Obwohl viele der untersuchten Lattenelemente einen Maßstab >300 ppm aufweisen, überschreitet nur die Latte „Trimble TD24“ in einem Messdurchgang die in der Norm DIN

18703 definierte maximale Abweichung vom Soll. Im Zusammenspiel mit dem Nullpunktfehler und der Stoßstellen, bleiben alle anderen 11 Latten in den Grenzen der Norm (siehe Anhang D).

Die Grenzen zwischen denen Daten zur Berechnung der Geraden herangezogen wurden, wurden visuell bestimmt. Im Zuge der Bestimmung dieser Grenzen ist eine systematische Abweichung des dritten Lattenelements bei GKNL4M-Latten aufgefallen.

In Abbildung 40 sind hierfür die Residuen des dritten Elements (ohne Lattenendbereiche) aller Latten von Leica/Wild zu sehen. Im Anhang sind Plots der Ergebnisse der durchgeführten Kalibriermessungen zu sehen.

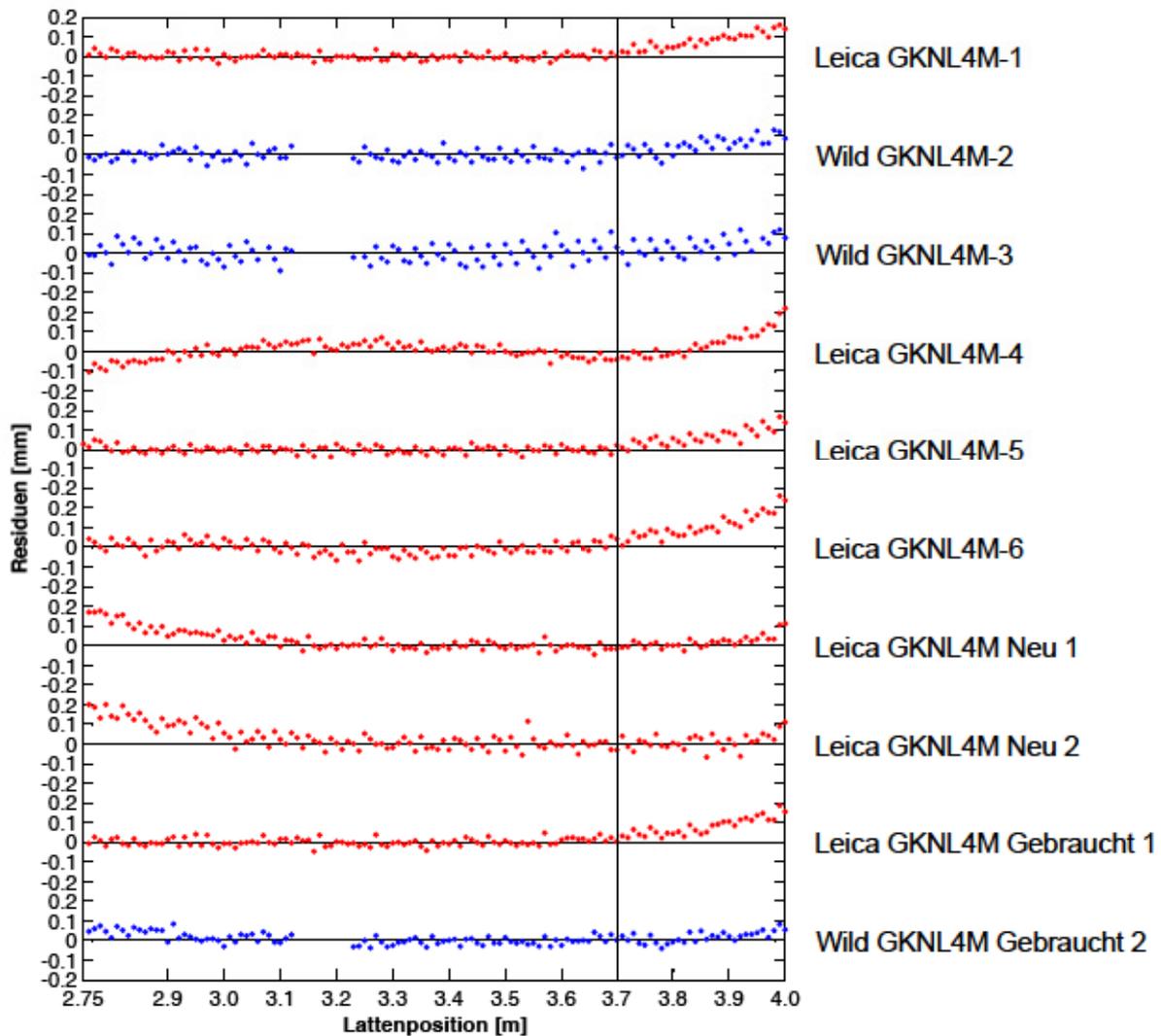


Abbildung 40: Residuen der Regressionsgeraden, 3. Element

Die Messdifferenzen aller Leica/Wild-Latten weichen ab einer Lattenhöhe von etwa 3.70 m systematisch ab und erreichen am oberen Lattenende bis zu 0.2 mm. von den Regressionsgeraden ab. Eine Ausnahme bilden hier die beiden neuen Latten „GKNL4M Neu 1“

und „GKNL4M Neu 2“. Diese 2011 gefertigten Latten zeigen ein gegenteiliges Verhalten und zeigen vom unteren Lattenelementende (2.70 m) bis zu einer Höhe von etwa 3.20 m große Abweichungen von den Regressionsgeraden. Bei den drei älteren Latten (Wild) ist ebenfalls Abweichung am oberen Lattenende zu erkennen, diese fallen weniger stark als bei den Leica-Latten aus.

Die Gründe dieser Abweichungen sind unbekannt. Möglicherweise wurde aber das Herstellungsverfahren über die Jahre hinweg geändert, da bei Latten ähnlichen Alters die Abweichungen eine ähnliche Systematik aufweisen.

Die auffallenden Datenlücken zwischen 3.1 - 3.2 m bei Wild-Latten werden in Abschnitt 9.3.3 behandelt.

Werden die Maßstäbe der Leica GKNL4M-Latten nach dem Baujahr geordnet dargestellt, um mögliche Alterungseffekte erkennen zu können, so zeigt sich folgendes Bild.

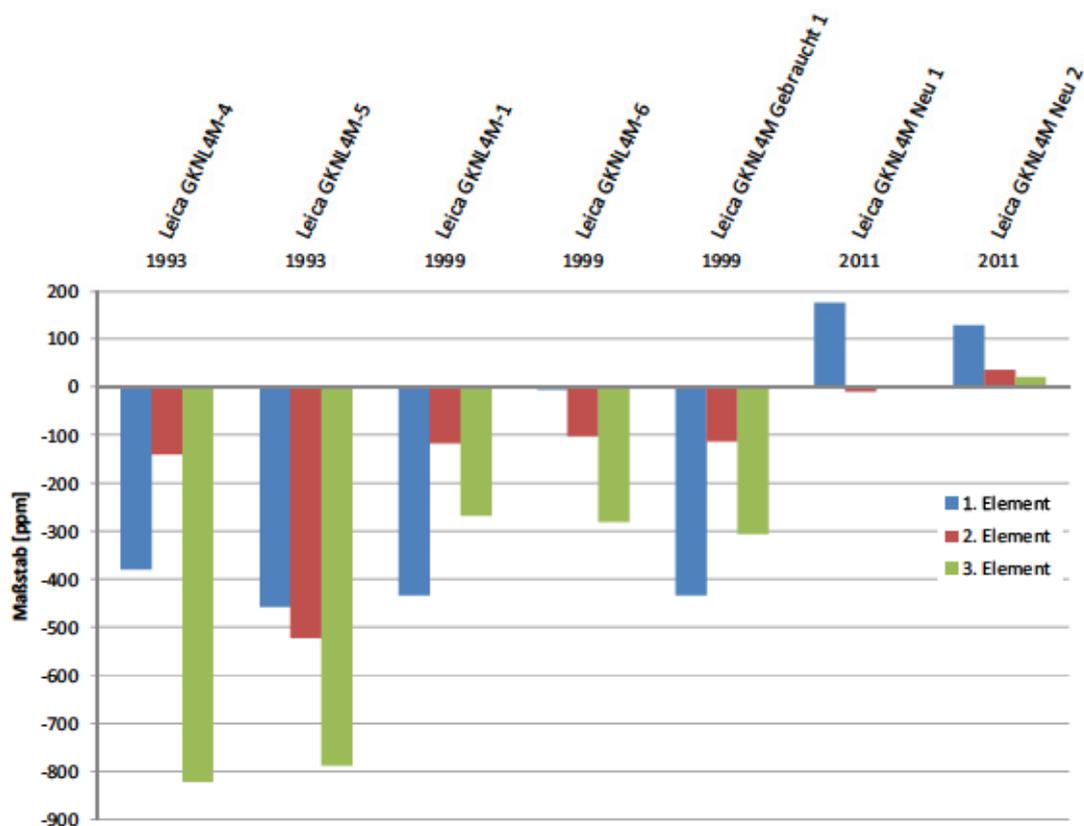


Abbildung 41: Gemittelte Maßstäbe der Leica GKNL4M-Latten

Zwar lässt sich erkennen, dass ältere Latte tendenziell größere Maßstäbe aufweisen, ein genereller Trend kann aus den Daten jedoch nicht abgelesen werden. Schauerte (1991) und Blum (1991) bestimmten vor mehr als 20 Jahren bereits die Maßstäbe der maximal ein Jahr alten Lattenteile auf sehr einfache Weise und erzielten Ergebnisse zwischen 111 und 252 ppm. Die untersuchten Lattenelemente ähnlichen Alters weisen heute aber größere

Maßstäbe auf.

Bei den beiden Aluminium-Teleskopplatten „Trimble TD24“ und „Sokkia BAS55“ können auf Grund fehlender Vergleichslatten früherer Baujahre keine Aussagen über den Einfluss des Alters auf den Lattenmaßstab getroffen werden.

9.3.2 Stoßstellen

Die Sprünge an den Stoßstellen, welche aus den Kalibrierdaten errechnet werden, können nur als Momentaufnahme angesehen werden, da die Lattenelemente beliebig zusammen gesteckt wurden. Mögliche Abweichungen davon sollten aber maximal der in Kapitel 5 ermittelten Spannweite entsprechen. Den ganzen Kalibriervorgang lang wurde die Latte nicht berührt und nur langsam am Wagen des Vertikalkomparators bewegt, sodass die Stoßstellen über den gesamte Messvorgang hinweg unverändert geblieben sein sollten. Die Berechnung des Stoßstellenfehles geschieht durch Differenzbildung der Werte der Regressionsgeraden der zusammenstoßenden Lattenelemente an der Positionen der Stoßstellen (siehe Abbildung 37).

Bereits Schauerte (1991) beobachtete Sprünge an den Elementstoßstellen und bestimmte diese zwischen 0.2 - 0.5 mm. Blum (1991) beobachtete maximal 0.7 mm große Sprünge. Es kann jedoch keine Aussage über die Genauigkeit dieses Fehlers getroffen werden, da dieser nur zweimal in zwei Kalibriermessungen bestimmt wurde. Zu diesem Zweck wurde zuvor die Reproduzierbarkeit der Stoßstellen untersucht (siehe Kapitel 5). Die Spannweite dieser Messungen ist in Spalte 7 der Tabelle 16 angegeben.

So zeigt sich, dass der Range des Fehlers an der Stoßstelle oft weit über dem bei den Messungen vorhandenen Stoßstellenfehler liegt. Besonders deutlich wird das etwa an der ersten Stoßstelle der Latte GKNL4M-1. Die Stoßstellenfehler betragen hier -0.025 und 0.008 m. Der Range der Reproduzierbarkeit liegt allerdings bei 0.099. Da jedoch nicht feststellbar ist, wo sich der bei der Kalibriermessung vorhandene Fehler in der Spannweite der Reproduzierbarkeit befindet, kann sich der tatsächliche Stoßstellenfehler im Bereich des doppelten Ranges bewegen.

Bei allen Latten zeigen sich Fehler in den Stoßstellen der Latten als starker Drift des Messungen innerhalb jenes Messbereichs, in welchem der Stoß sichtbar ist. Da alle Systemüberprüfungen bei einer Distanz von 3 m durchgeführt wurden, beschränkt sich die Abbildung dieses Fehlers in die Messungen, je nach Nivellier auf einen bestimmten Bereich (siehe Tabelle 14).

In Abbildung 42 sind Komparatormessungen der Latte GKNL4M-5 im Bereich der zweiten Stoßstelle gezeigt. Zwischen niedrigster und höchster Ablesung im Sichtbereich der Stoßstelle liegen 0.18 mm.

9 Systemüberprüfung am Vertikalkomparator

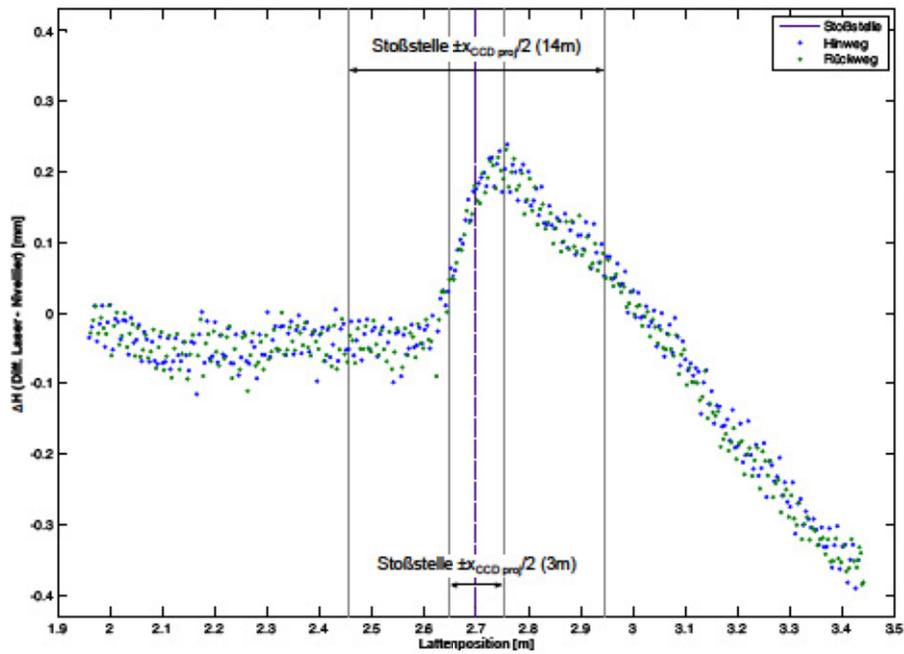


Abbildung 42: 2. Stoß der Latte „Leica GKNL4M-5“ bei 3 m Distanz und Abtastintervall 5 mm

Vergrößert sich jedoch die Beobachtungsdistanz, so „verschmiert“ sich dieser Fehler über einen größeren Lattenbereich. Werden die Messungen mit einer Distanz von 14 m durchgeführt, zeigt sich folgendes Bild.

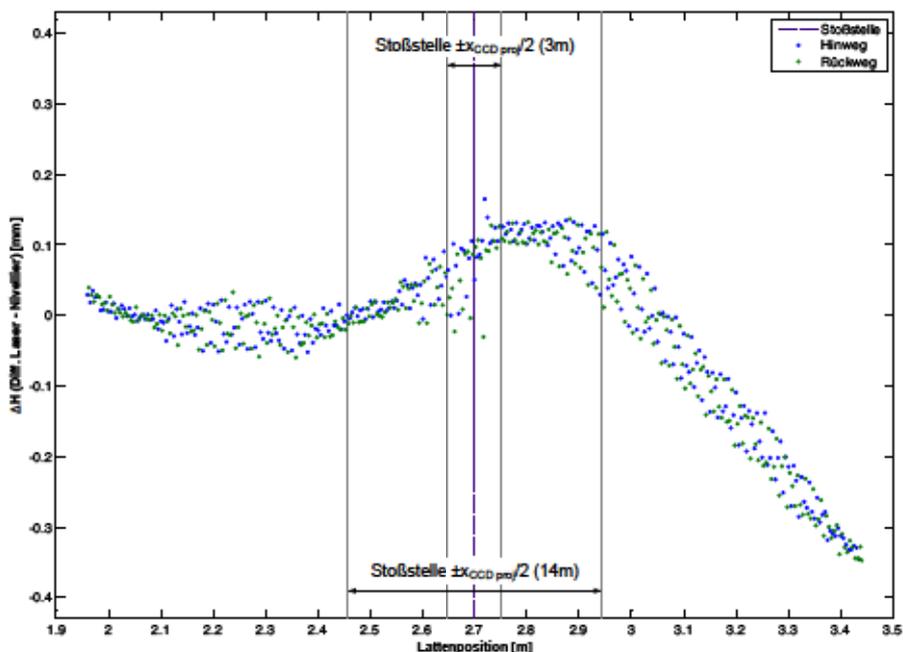


Abbildung 43: 2. Stoß der Latte „Leica GKNL4M-5“ bei 14 m Distanz und Abtastintervall 5 mm

Vor und nach dem Stoßstellensichtbereich zeigt sich ein sehr ähnliches Bild, wie bei der Beobachtungsdistanz von 3 m. Durch die größere Distanz dehnt sich der Bereich in welchem die Stoßstelle sichtbar ist ($x_{CCDproj}$) auf rund 45 cm aus. So wird auch der Einflussbereich des Stoßstellenfehlers auf den Lattenbereich 2.457 - 2.944 m erweitert. Die maximale Differenz der Lattenablesung liegt hier bei 0.15 mm, also ähnlich jener bei 3 m Entfernung.

9.3.3 Lattencode Wild/Leica

Sowohl die GKNL4M-Latten der Firma Wild als auch jene der Nachfolgefirma Leica verfügen über den selben patentierten Code. Dieser hat sich seit dem Erscheinen des ersten Digitalnivelliers Wild NA2000 im Jahr 1990 nicht verändert.

In Abbildung 40 ist jedoch bei den Kalibrierdaten aller Wild-Latten ein Ausfall der Messungen im Bereich von 3.12 m bis 3.23 m aufgefallen (siehe rote Linien in Abbildung 44). Als Grund dafür konnten 8 fehlende Codeelemente (Nr. 1562 - 1569) zwischen 3.163 und 3.179 m identifiziert werden. Bei einer Beobachtungsdistanz von 3 m bildet das Nivellier 105 mm der Latte (51 vollständige Codeelemente) ab. Der 16.2 mm breite schwarze Codestreifen führt in dieser Distanz so zu einem Ausfall der Messungen in einem 11 cm großen Bereich.

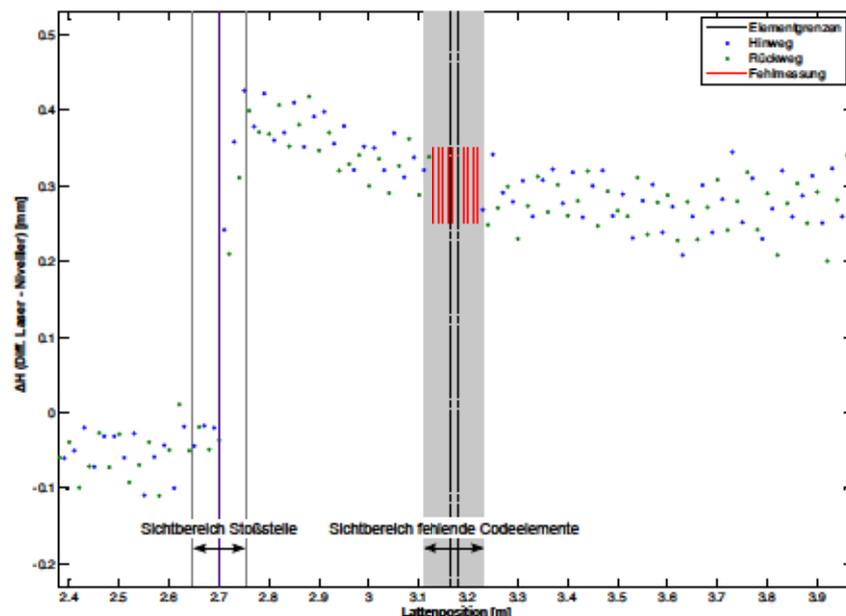


Abbildung 44: Auswirkungen der Codefehler bei der Latte „Wild GKNL-3“ bei 3 m Distanz und 20 mm Abtastintervall

Die Codeelemente 1562 - 1569 fehlen bei allen alten Latten von Wild (siehe Abbildung 45), sind bei neueren Latten (Leica) jedoch vorhanden.

9 Systemüberprüfung am Vertikalkomparator

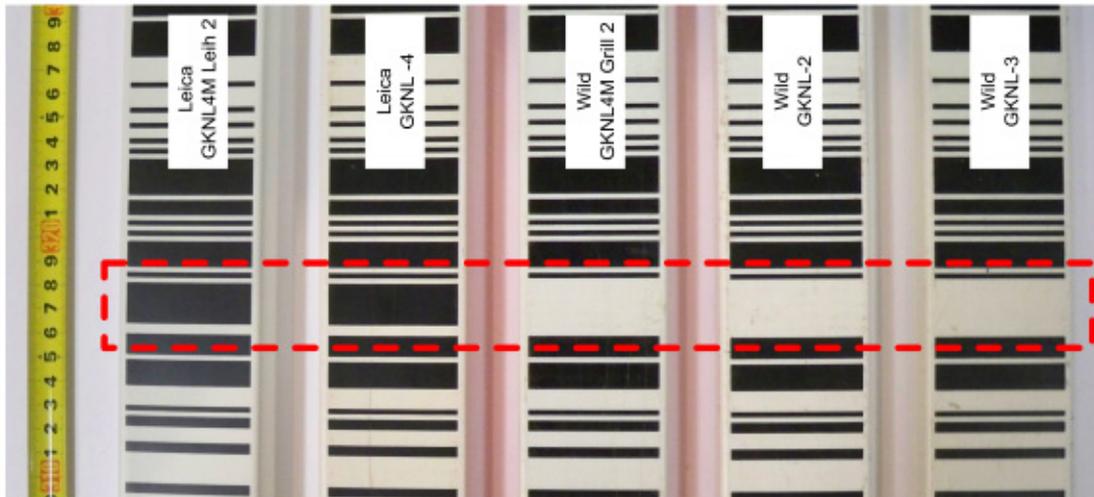


Abbildung 45: Fehlende Codeelemente

Da bei größerer Distanz auch mehr Codeelemente zur Berechnung der Höhenablesung zur Verfügung stehen, wurden im Bereich von 2.94 m bis 3.40 m aus einer Distanz von 4 m mit einem 1 mm-Intervall Komparatormessungen durchgeführt. Als Grenzen des Messbereichs wurden jeweils 1.5-fache Sichtbereich von rund 140 mm unter und über der untersten bzw. obersten fehlenden Codeelementkante gewählt. So ist für das Nivellier ober- und unterhalb der fehlenden Elemente ein Lattenabschnitt von der Größe des doppelten Sichtbereichs messbar. Dadurch können vom Codefehler beeinflusste und unbeeinflusste Messungen verglichen werden.

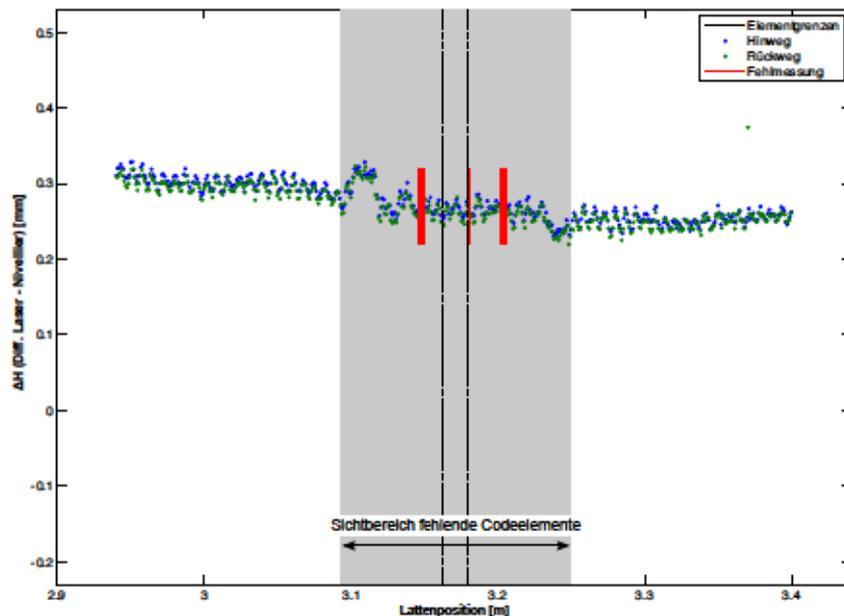


Abbildung 46: Auswirkungen der Codefehler bei der Latte „Wild GKNL-3“ bei 4 m Distanz und 1 mm Abtastintervall

Die in Abbildung 46 geplotteten Differenzen zeigen, dass bei 4 m Beobachtungsdistanz bei einer Anzielung direkt auf die fehlenden Elemente Messwerte ausgegeben werden. Jedoch kann das Gerät 13.05 mm unterhalb und 22.75 mm oberhalb der Elementkante in einem jeweils 4 mm breiten Bereich keine Lattenablesungen berechnen.

Weiters sind etwa 5 cm vor und nach den fehlenden Elementen zwei Bereiche zu erkennen, in welchen die Messungen systematisch leicht nach oben bzw. unten abweichen. An diesen Positionen befinden sich die fehlerhaften Elemente bereits im Sichtbereich des Geräts. Es kann also davon ausgegangen werden, dass diese die Abweichungen verursachen.

In einem weiteren Versuch wurde die Beeinflussung des Lattenfehlers auf die Messergebnisse bei einer größeren Distanz untersucht. Bei der gewählten Beobachtungsdistanz von 14.0 m liegt $x_{CCDproj.}$ bei ca. 489 mm. Wie bereits bei der Untersuchung bei einer Distanz von 4 m wurde der Messbereich wieder mit dem 1.5-fachen des Sichtbereichs ober- und unterhalb des Codefehlers gewählt. Das Abtastintervall lag bei 5 mm.

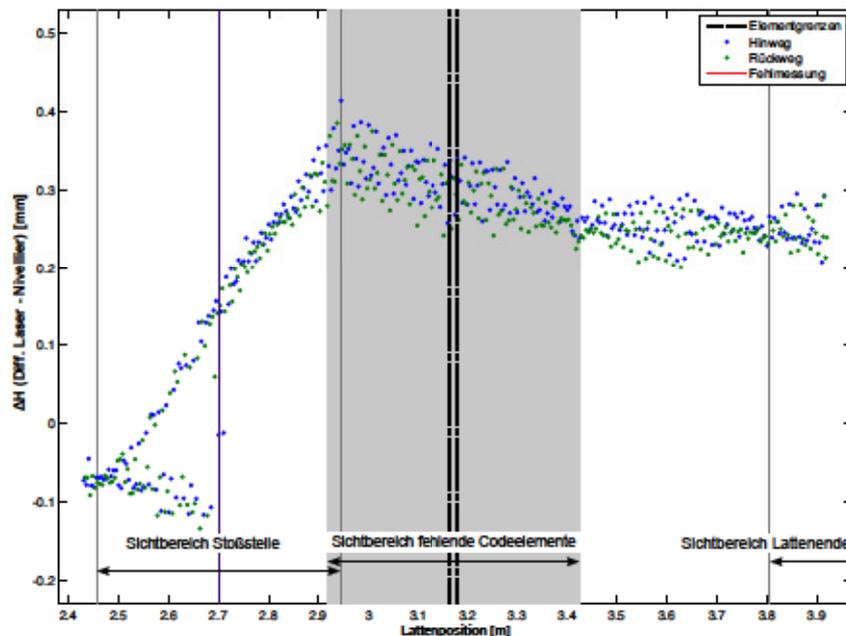


Abbildung 47: Auswirkungen der Codefehler bei der Latte „Wild GKNL-3“ bei 14 m Distanz und 5 mm Abtastintervall

Bei dieser Beobachtungsdistanz überlappen sich die Sichtbereiche der 2. Stoßstelle bei 2.70 m und der des Codefehlers. Das große Messrauschen, welches im Bereich 2.50 m - 2.72 m auftritt, könnte seinen Grund im stark abgenutzten Stoß am Übergang vom zweiten zum dritten Lattenelement haben. Über den ganzen Messbereich hinweg ist jedoch keine einzige Fehlmessung zu verzeichnen. Da nun 241 Codelemente in die Auswertung der Lattenablesung fließen, kann das Nivellier trotz 8 fehlerhafter Elemente die Lattenhöhe korrekt ermitteln (siehe Abbildung 47).

9 Systemüberprüfung am Vertikalkomparator

Unter der Annahme, dass die im Labor erzielten Ergebnisse auch im Freien gelten, wird dieser Fehler in der praktischen Vermessung nur wenig Auswirkung haben, da schon bei einer Distanz von 4 m deutlich weniger Fehlmessungen als bei 3.0 m Distanz auftreten. Bei typischen Visurlängen beim Liniennivellement von über 10 m wird so die Ablesung der Latte durchgeführt werden können.

10 Ergebnisübersicht und Resümee

Tabelle 17 ist eine Übersicht der erzielten Ergebnisse dieser Arbeit. Die Zusammenstellung ermöglicht es, alle untersuchten Eigenschaften einer Latte gesammelt betrachten zu können.

Tabelle 17: Zusammenstellung der erzielten Ergebnisse

Latte	Maßstab Element ¹ [ppm]					Spannweite [0.01 mm] Stoßstellenfehler ² zw. Elementen				Lattenfußschiefe ['] ³		Nullpunkt- fehler ⁴ [0.01 mm]	Ausdehnungs- koeffizient ⁵ [ppm/K]
	1	2	3	4	5	1-2	2-3	3-4	4-5	$\xi(\sigma_\xi)$	$\eta(\sigma_\eta)$		
Leica GKNL4M-1	-434	-118	-268			9.9	10.9			2.0 (1.6)	-17.2 (2.4)	14	—
Wild GKNL4M-2	-162	-10	-379			5.6	1.5			16.8 (1.6)	-13.3 (2.4)	1	—
Wild GKNL4M-3	-69	-247	-134			3.6	2.0			0.9 (1.6)	-15.0 (2.4)	-8	8.3
Leica GKNL4M-4	-380	-140	-822			6.3	2.7			8.1 (1.6)	-6.0 (2.4)	11	8.7
Leica GKNL4M-5	-458	-523	-788			2.3	2.0			5.3 (1.6)	-10.5 (2.4)	10	8.2
Leica GKNL4M-6	-6	-102	-281			3.6	3.6			-3.8 (1.6)	-6.0 (2.4)	0	—
Leica GKNL4M Neu 1	177	-10	3			4.3	6.6			-4.9 (1.6)	-9.8 (2.4)	1	8.1
Leica GKNL4M Neu 2	128	35	20			5.5	7.3			3.5 (1.6)	-10.6 (2.4)	13	7.1
Leica GKNL4M Gebraucht 1	-434	-114	-306			9.3	9.1			2.2 (1.6)	-4.2 (2.4)	7	7.8
Wild GKNL4M Gebraucht 2	-120	95	-79			4.2	7.4			-0.5 (1.6)	5.6 (2.4)	-18	—
Trimble TD24	-279	-312	-296	-182		8.4	14.3	10.5		-15.7 (2.0)	-16.6 (2.4)	-30	18.1
Sokkia BAS55	-285	28	-406	-306	-722	59.8	56.9	34.7	76.5	4.7 (2.0)	22.4 (2.4)	—	17.7

¹ Details siehe Kapitel 9

² Details siehe Kapitel 5

³ Details siehe Kapitel 6

⁴ Details siehe Kapitel 7

⁵ Details siehe Kapitel 8

Anhand dieser Arbeit mit der Untersuchung einer z.T. größeren Stichprobe kann abgeschätzt werden, welche Messungen mit Standardnivellierlatten sinnvoll durchgeführt werden können. Einige Fehler können in der Praxis durch geeignete Verfahren eliminiert werden. Andere Ungenauigkeiten der Standardnivellierlatten, wie die Stoßstellen der Lattenelemente, welche wegen mangelhafter Reproduzierbarkeit teilweise sehr stark variieren, können nicht korrigiert werden.

Auch wenn nur Leica explizit auf die Norm DIN 18703 (Nivellierlatten) verweist, wurde diese als wichtiges Maß angesehen, ob die untersuchten Latten den praktischen Anforderungen entsprechen und daher mit akzeptabler Genauigkeit für einfache Nivellements, z.B. auf Baustellen, verwendet werden können. Vor der Verwendung von hier untersuchten Lattentypen sollte man sich genau bewusst sein, welche Fehler hier auftreten können und wie einige davon vermieden bzw. reduziert werden können.

Da die sich Maßstäbe der untersuchten Lattenelemente zwischen -822 und 177 ppm bewegen, ist es zu empfehlen die Lattenablesung möglichst niedrig zu halten, um diesen Fehler zu minimieren. Höhenablesungen bei welchen sich Stoßstellen im Gerätesichtbereich befinden, sollten auf Grund der teilweise sprungartigen starken Abweichung der Lattenteilung vom Soll von oft mehreren Zehntel Millimeter ebenfalls vermieden werden. Diese Forderung lässt sich durch die in der Praxis oft möglichst groß gewählten Beobachtungsdistanzen nur schwer realisieren.

Während Präzisionsnivellierlatten durch ihre Bauweise (Invarband) weniger stark auf Temperaturänderungen reagieren, haben die Versuche zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten gezeigt, dass Standardlatten doch einige Zeit (ca. 3 min/K) zur Akklimatisation brauchen, um die Messungen nicht mit einer Drift zu verfälschen. In einer Reihe von Versuchen konnten die Herstellerangaben für die Leica/Wild-Kunststofflatten (<10 ppm/K) sowie die Ergebnisse früherer Untersuchungen bestätigt werden. Die Herstellerangaben der untersuchten Aluminiumlatten (24 ppm/K) wurden merklich unterschritten (18 ppm/K).

Der Lattennullpunktfehler und die Lattenfußschiefe verursachen ebenfalls nicht zu unterschätzende Fehler in den Messergebnissen von bis zu 0.45 mm. Diese Offsets lassen sich, auch wenn diese für eine individuelle Latte nicht bestimmt sind, durch das Aufsetzen im gleichen Lattenfußpunkt und der Verwendung geradzahligter Nivellierstandpunkte bei Liniennivellements eliminieren.

Trotz aller Unzulänglichkeiten dieser oft in großen Stückzahlen gefertigten Latten ist es trotzdem erstaunlich, wie robust diese sind und trotzdem für viele einfache Vermessungsaufgaben ausreichende Ergebnisse liefern. Für Präzisionsmessaufgaben hingegen sollten sie in keinem Fall herangezogen werden.

Referenzen

- AdV (2009): *Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes im Zeitraum 2006 bis 2011*. 3. überarbeitete Fassung, URL: http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07_produkte/raumbezug/bezugssysteme/hoehe/nivellement.pdf, Zugriff: 25.4.2012
- Benkö S. (2012): *Erste Untersuchungen des neuen Nivelliers Sokkia SDL1X*. Unpublizierte Masterarbeit am Institut für Ingeniergeodäsie und Messsysteme, TU Graz
- Blum M. (1991): *Untersuchung und Tests des digitalen Nivelliers Wild NA2000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 98: S. 198-205
- Brunner F. (1972): *Eine weitere Möglichkeit der Anwendung des Doppelverhältnisses*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen 60: S. 96-101
- Brunner F. (2008): *Grundlagen der Messtechnik: unpubliziertes Vorlesungsskript*. Institut für Ingenieur-geodäsie und Messsysteme, TU Graz: S. 13-14
- Brunner F.K. und Woschitz H. (2004): *Die selbstleuchtende Nivellierlatte*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 111: S. 104-109
- Deumlich F. und Staiger R. (2002): *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. 9. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg: S. 291
- DIN (1998): *DIN 18703 (Nivellierlatten)*. In Vermessungswesen Normen (Bauwesen 12), Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V., 6. Auflage (2005), Beuth Verlag, Berlin: S. 195-196
- Fischer T. und Fischer W. (1999): *Manufacturing of High Precision Leveling Rods, In Geodesy and surveying in the future, The Importance of Heights*. Hrsg: Mikael Lilje, Proceedings FIG Commission 5, Gävle, Schweden: S. 227
- Fröhlich H., Schauerte W. und Schuler D. (2003): *Praxistipps zum Präzisionsnivellment mit Digitalnivellieren*. Selbstverlag Fröhlich, Sankt Augustin: S. 17-38
- Geodäsie Austria (2011): *Zubehör für die Vermessung - Gesamtkatalog Österreich*. URL: <http://www.geodaesie.at/leistungen/download/cat-view/43-sonstiges,Version3.1>, Zugriff: 25.5.2011
- Geozone; 2011: *Produktinformation - Leica Spinter*. URL http://www.geozone.ch/de/ws?page=shop.browse&category_id=1150, Zugriff: 25.4.2012

- Goecke-Schwelm (2011): *Produktinformation - Leica Spinter Latten*. URL: <http://www.goecke-schwelm.de/de/default.asp?Page=detail2&HauptArtID=598&WarengruppenID=151&SprungID=&Webcode=,> Zugriff: 25.4.2012
- Heister H. (1994): *Zur Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten mit digitalem Code*. In Festschrift für Prof. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag, Hrsg: Kurt Brunner, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen UniBW München, Band 46: S. 95-101
- Ingensand H. (1990): *Das Wild NA2000, das erste Digitalnivellier der Welt*: Allgemeine Vermessungsnachrichten 97: S. 201-210
- Ingensand H. (2005): *Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 112: S. 233-238
- Ingensand H. und Schneider F. (1990): *Erste Erfahrungen mit dem neuen digitalen Nivellier WILD NA2000*. Vermessungswesen und Raumordnung 52: S. 289-296
- Leica (1993): *User manual Wild NA2002 - NA3000*
- Leica (2004): *Gebrauchsanweisung GNLE4C • GANL4C • GKNL4M/GKNL4F*. URL: [http://www.leica-geosystems.at/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=2338,](http://www.leica-geosystems.at/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=2338) Zugriff: 17.5.2011
- Leica (2007): *Gebrauchsanweisung GWL92N/GWL182N , GWCL92/GWCL182*. URL: [http://www.leica-geosystems.at/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=2342,](http://www.leica-geosystems.at/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=2342) Zugriff: 17.5.2011
- Nedo (2009): *Lumiscale - Bedienungsanleitung*. URL: [http://drawings.nedo.com/balumiscale_\(060389\)_\[de\]_\[en\]_\[fr\]_v_1_2.pdf,](http://drawings.nedo.com/balumiscale_(060389)_[de]_[en]_[fr]_v_1_2.pdf) Zugriff: 10.6.2011
- Rüeger J. und Brunner F. (2000): *On the System Calibration and Type Testing of Digital Levels*. Zeitschrift für Vermessungswesen 125: S. 120-130
- Schauerte W. (1991): *Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Digitalnivelliers WILD NA2000*. Vermessungswesen und Raumordnung 53: S. 47-54
- Sokkia (2000): *SDL30 / SDL50 Digitalnivellier mit internem Speicher - Bedienungsanleitung*. URL: [http://www.glm-laser.com/glm/files/bedienungsanleitung-sdl30_50.pdf,](http://www.glm-laser.com/glm/files/bedienungsanleitung-sdl30_50.pdf) Zugriff: 8.6.2011
- Sokkia (2009): *Sokkia SDL1X*. URL: [http://www.sokkia.net/UserFiles/Image/1277452859.jpg,](http://www.sokkia.net/UserFiles/Image/1277452859.jpg) Zugriff: 10.1.2012
- Sokkia (2010): *Sokkia - 2010 Supply Catalog*. URL: [http://www.sokkia.net/products/detail/attachment.axd?id=662,](http://www.sokkia.net/products/detail/attachment.axd?id=662) Zugriff: 7.6.2011

Sokkia Topcon (2009): *Operators manual Sokkia SDL1X*

Sokkia Topcon (2011): *Operators manual Sokkia BAS55*

Staiger R. (2002): *Instrumentenuntersuchung des Digitalnivelliers SDL30 von Sokkia*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 109: S. 386-391

Topcon (2005): *Electronic Digital Level DL-101C / 102C*. URL: <http://www.topcon.com.sg/survey/dl.html>, Zugriff: 7.6.2011

Topcon (2009): *DL-101C / 102C - Electronic Digital Level*. URL: <http://www.scribd.com/doc/17677411/DL101C-DL102C>, Zugriff: 7.6.2011

Trimble; 2007: *Accessories - Trimble DiNi Digital Level - Version 3.00, Revision A*. URL: http://www.geosoft.ee/UserFiles/File/DiNi_3A_Accessories.pdf, Zugriff: 25.5.2011

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

Woschitz H. (2005): *Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 112: S. 239-244

Anhang A: Weitere Fehlerquellen bei Nivelliermessungen

Die den Tabellen A.1 und A.2 sind ergänzend zu Abschnitt 2.2 weitere Fehler angeführt, welche die Ergebnisse von Nivelliermessungen beeinflussen können.

A.1 Instrumentenbezogene Effekte

Tabelle A-1 zeigt Einflüsse auf, welche ausschließlich vom Nivellier durch unzureichende Fertigung bzw. Benutzung ausgehen und dadurch Messungen verfälschen.

Tabelle A-1: Instrumentenbezogene Effekte

Effekt	Beschreibung	Maßnahme	Quelle
Dejustierung der Dosenlibelle	Bei Digitalnivellieren ist wegen dem integrierten Kompensator lediglich ein Grobhorizontierung durch eine Dosenlibelle nötig. Bei einer zu starken Dejustierung der Libelle kann der Arbeitsbereich des Kompensators überschritten werden und somit die Zielachse nicht mehr horizontalisiert werden.	Justierung der Libelle.	(1), (2)
Wiederholbare Einschwinggenauigkeit des Kompensators	Wird der Kompensator sanft zu einer Bewegung angeregt und spielt sich dieser mit der wiederholbaren Einschwinggenauigkeit wieder ein.		(1)
Hysteresis des Kompensators	Unterschied der Kompensatorposition in Abhängigkeit der Richtung aus welcher der Kompensator in die Ruhelage kommt.		(1), (2)
Schräger Horizont	Durch unzureichende Horizontierung der Ziellinie des Kompensators.	Spezielle Ablesereihenfolge $R\bar{V}V\bar{R}$ (unter Beachtung der Blickrichtung bei der Horizontierung des Geräts).	(1)
Ziellinienfehler	Die optische und elektronische Ziellinie weist meist eine Abweichung auf, die sich auf Grund von Temperaturvariationen und Stößen verändern kann.	Bestimmung des Fehler durch Nivellierüberprüfung (z.B. nach Förstner)	(1), (2)

Tabelle A-1: Fortsetzung

Effekt	Beschreibung	Maßnahme	Quelle
Einfluss magnetischer Felder	Eine Beeinflussung von Bauteilen des Geräts durch magnetische Felder beeinflusst dadurch auch die Höhenbestimmung.	Durch kein Messverfahren kompensierbar. Eine Überprüfung des Effekts unter Laborbedingungen ist notwendig.	(1), (2)
Schlechte Horizontierung	Eine unzureichende Horizontierung erzeugt den gleichen Effekt wie eine nicht justierte Dosenlibelle am Gerät.	Genaueres Horizontieren der Dosenlibelle.	(2)
Auslösen der Messung am Instrument	Zu kräftiges Auslösen der Messung am Gerät kann zu einer Verdrehung und Verkipfung der Zielachse führen.	Behutsames Auslösen der Messung.	(2)

(1) Rüeger und Brunner (2000)

(2) AdV (2009)

(3) Fröhlich et al. (2003)

A.2 Elektro-optische Ablesefehler und äußere Effekte

Neben instrumenten- und lattenbezogenen Fehlern, treten eine weitere Reihe von Effekten auf, welche ihren Ursprung in den äußeren Bedingungen oder der elektro-optischen Ablesung haben. Die Einflüsse wurden in Tabelle A-2 zusammen gefasst.

Tabelle A-2: Elektro-optische Ablesefehler und äußere Effekte

Effekt	Beschreibung	Maßnahme	Quelle
Rundungsfehler	Die Rundung der internen Höhenablesung auf die Anzeigauflösung des Geräts bedingt einen maximalen Fehler von der Hälfte der Auflösung (Woschitz, 2003).		(1)
Sichthindernisse in der Visur	Bei Visuren durch Blätter, Zäune oder Verkehr können durch die verschlechterte Sicht falsche Höhenbestimmungen des Geräts entstehen.	Freihalten der Visur von Objekte oder Wahl einer anderen Visur um diese Hindernisse zu umgehen.	(1), (3)
Kritische Distanzen	Für viele Nivelliere sind Beobachtungsdistanzen bekannt, an welche die Genauigkeit der Beobachtungen abnimmt.	Meiden der individuellen kritischen Distanzen eines Nivelliers.	(1), (2)
Vibrationen	Vibrationen können sich auf das Geräts übertagen und die Ablesung des CCD-Sensor durch Pendeln des Kompensators stören.	Vermeiden von vibrationsgefährdeten Standpunkten.	(1)
Lattenbeleuchtung	Sowohl die Intensität als auch die Gleichmäßig der Beleuchtung beeinflussen die Code-Ablesung des Geräts von der Latte.	Die Latte sollte gut und vor allem gleichmäßig beleuchtet bzw. beschattet werden.	(1), (2), (3)
Ablesung an den Lattenenden	Werden die Enden einer Latte zur Höhenbestimmung benutzt, so sind nicht mehr nur Code-Elemente für den CCD-Array sichtbar, was zu Missinterpretationen der Teilung und folglich falschen Höhenbestimmungen führen kann.	Nach Woschitz (2005) sollen die untersten bzw. obersten 30 cm einer Latte für Distanzen unter 30 Meter nicht verwendet werden.	(1), (2)

Tabelle A-2: Fortsetzung

Effekt	Beschreibung	Maßnahme	Quelle
Schlechte Fokussierung	Eine unzureichende scharfe Abbildung des Codes auf dem CCD-Array kann die Genauigkeit der Ablesung wesentlich beeinflussen.	Eine gewissenhafte Fokussierung auf die Code-Teilung beugt solchen Effekten vor.	(1), (2)
Bodennahe Anzielung	Durch die erhöhte Refraktion in bodennahen Schichten wird der Zielstrahl gebogen und das Messergebnis verfälscht.	Laut einer Faustformel sollten unter einer Lattenzielung von 50 cm keine Messungen durchgeführt werden.	(2)
Lokale Refraktionseinflüsse	Verschiedene Faktoren beeinflussen vor allem in bewohntem Gebiet die lokale Refraktion und stören somit korrekte Höhenablesungen.	Es sind Visuren zu meiden, welche innerhalb unterschiedliche Refraktionen aufweisen.	(2)
Einsinken des Stativs	Das Stativ samt Gerät und die Latte kann während und zwischen Messungen seine Höhe verändern und damit die Messungen systematisch verfälschen.	Festes Eintreten der Stativbeine in den Untergrund bei jeder Aufstellung und Verwendung von dem Untergrund angepassten Lattenuntersätze (Frosch, Pflock).	(2)
Einsinken der Nivellierlatte	Auf weichem oder brüchlichem Untergrund kann es während und zwischen Messungen zu einem Einsinken der Latte kommen. Diese kleinen positiven Fehler summieren sich im Laufe der Schleifenmessung auf.	<ul style="list-style-type: none"> • Dem Untergrund angepasste Lattenuntersätze (Frosch, Pflock) verwenden. • Messreihenfolge 	(2)

(1) Rüeger und Brunner (2000)

(2) AdV (2009)

(3) Fröhlich et al. (2003)

Anhang B: Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

Abbildung B-1 zeigt beispielhaft einen Plot der Messungen zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Latten-Stoßstellen (siehe Kapitel 5), um die Darstellungen der Messungen in den Abbildungen B-2 bis B-28 zu erläutern.

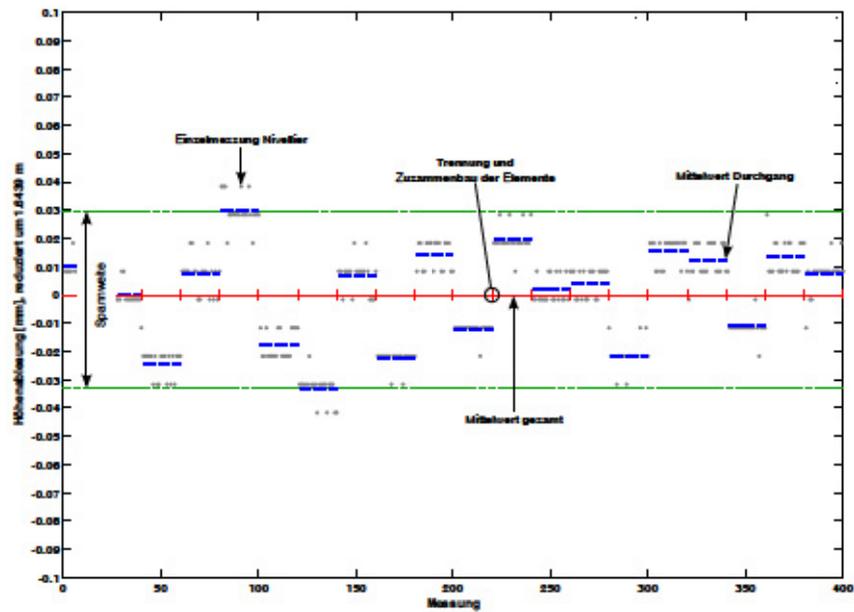


Abbildung B-1: Erklärender Beispielplot (Latte „Leica GKNL4M-4“, 1.Stoß)

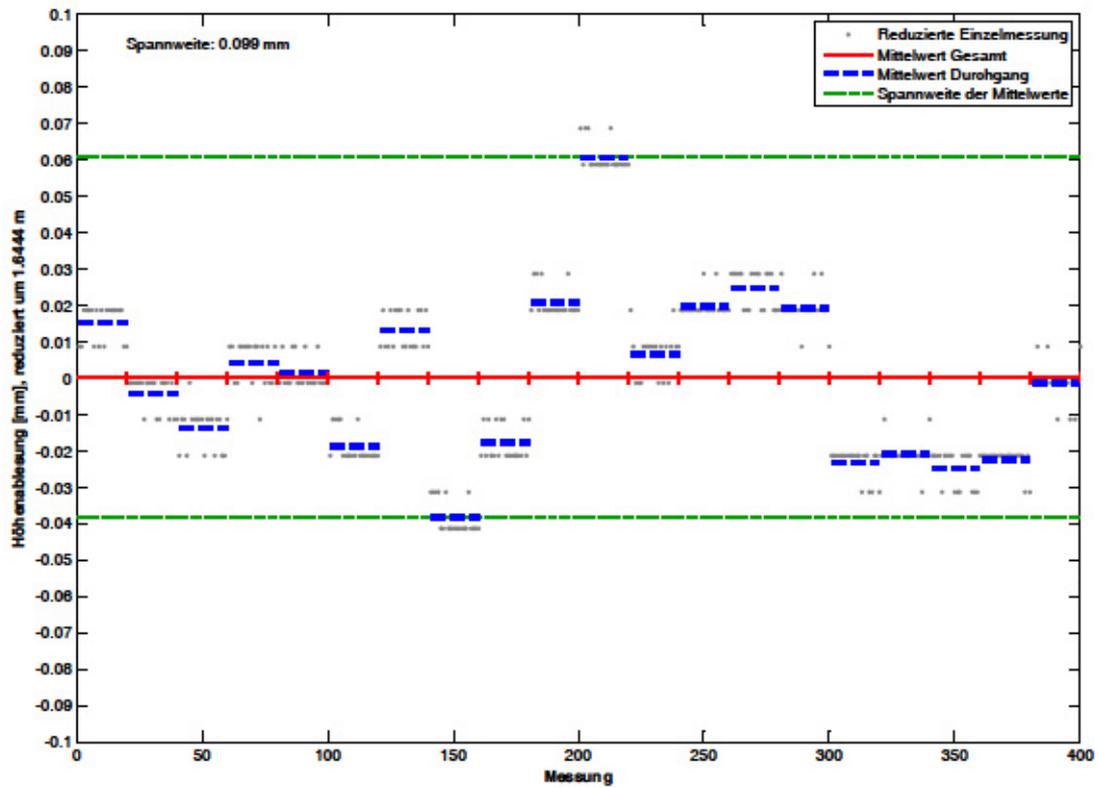


Abbildung B-2: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-1“, 1.Stoß

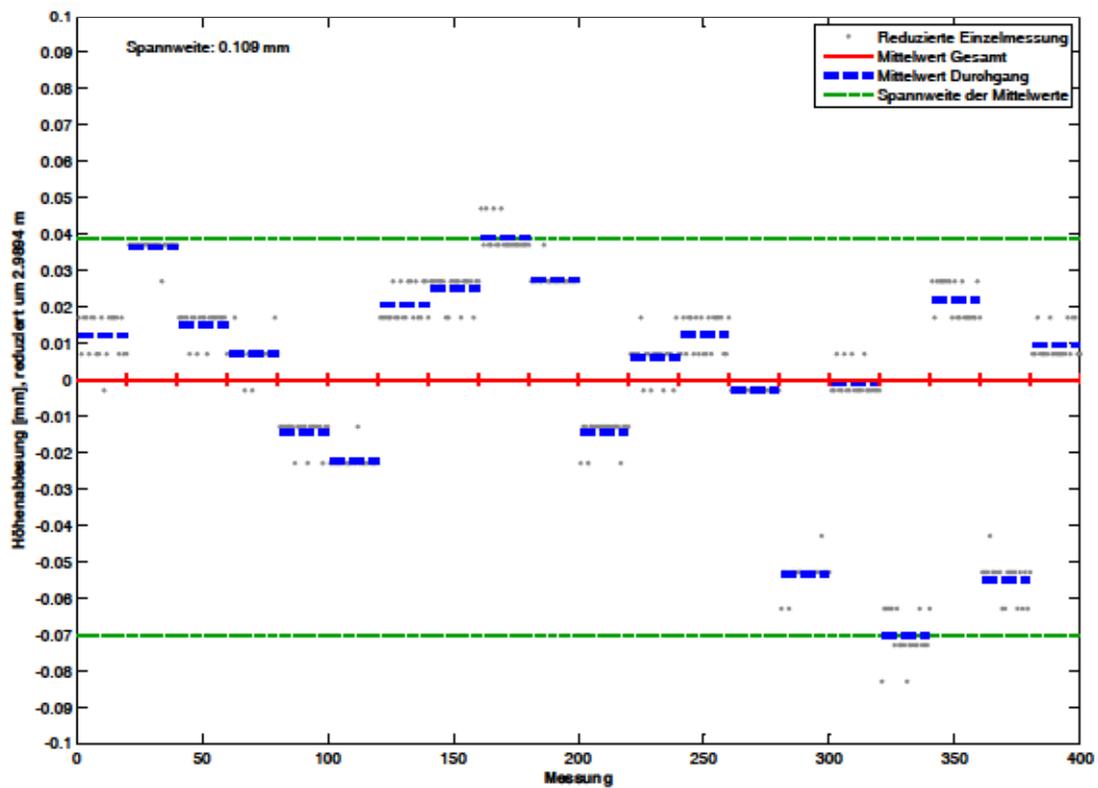


Abbildung B-3: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-1“, 2.Stoß

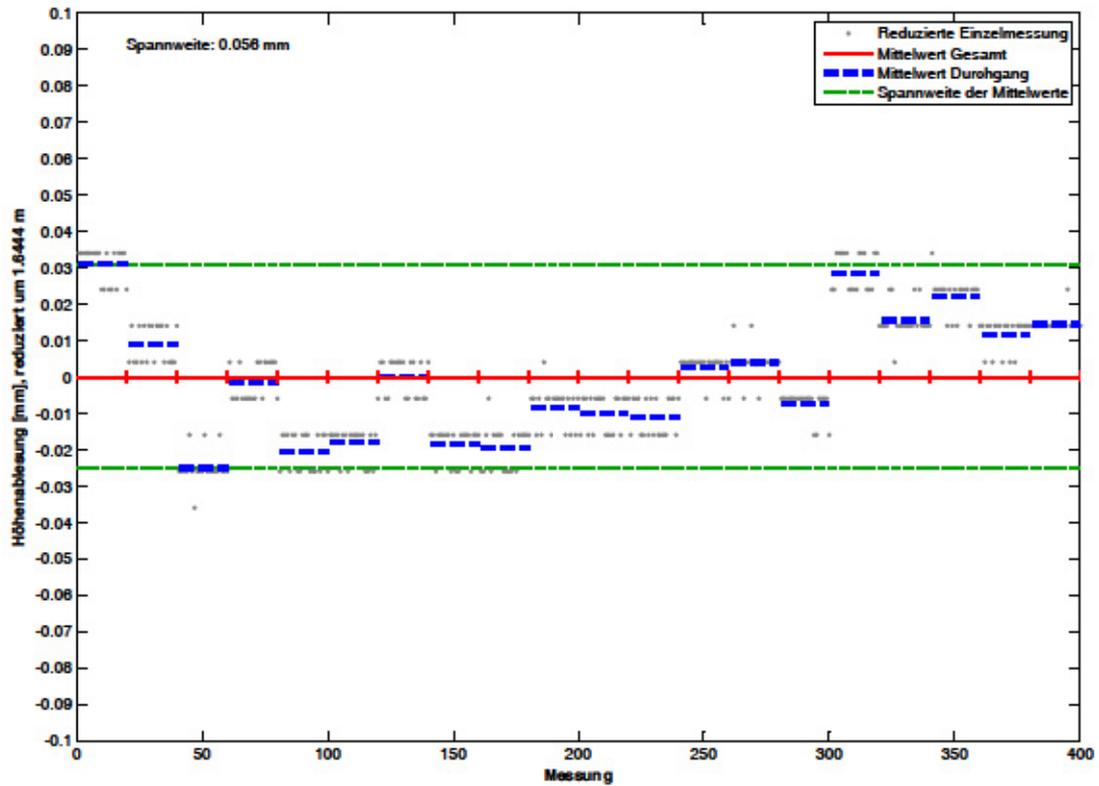


Abbildung B-4: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Wild GKNL4M-2“, 1.Stoß

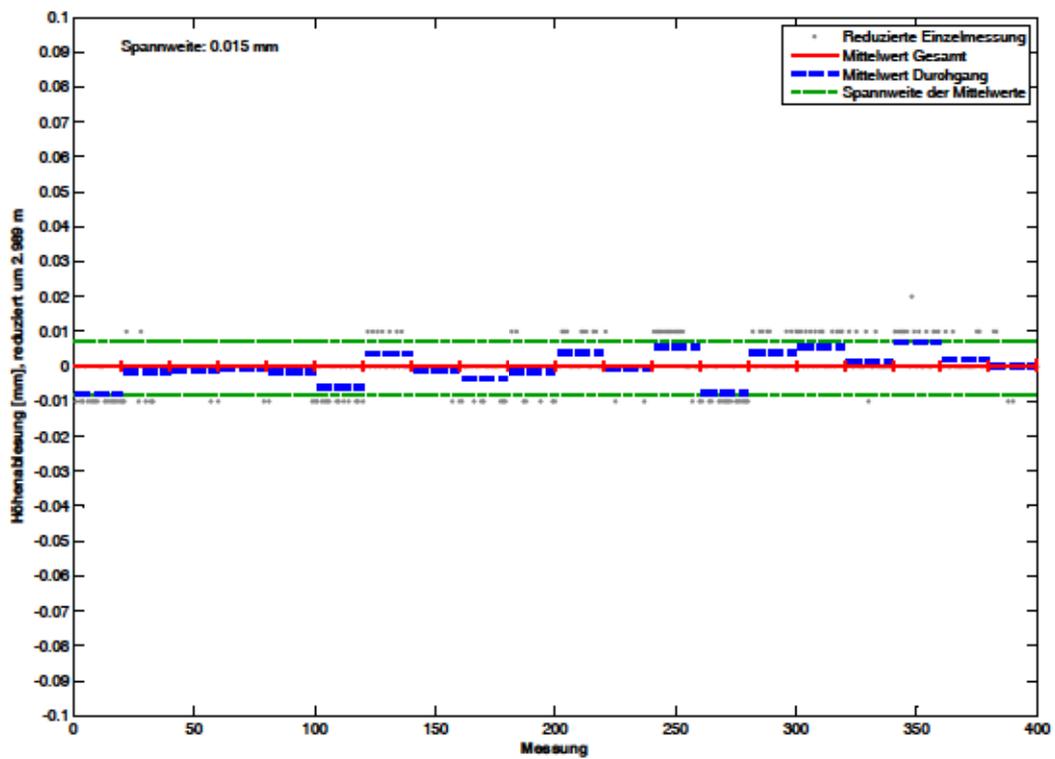


Abbildung B-5: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Wild GKNL4M-2“, 2.Stoß

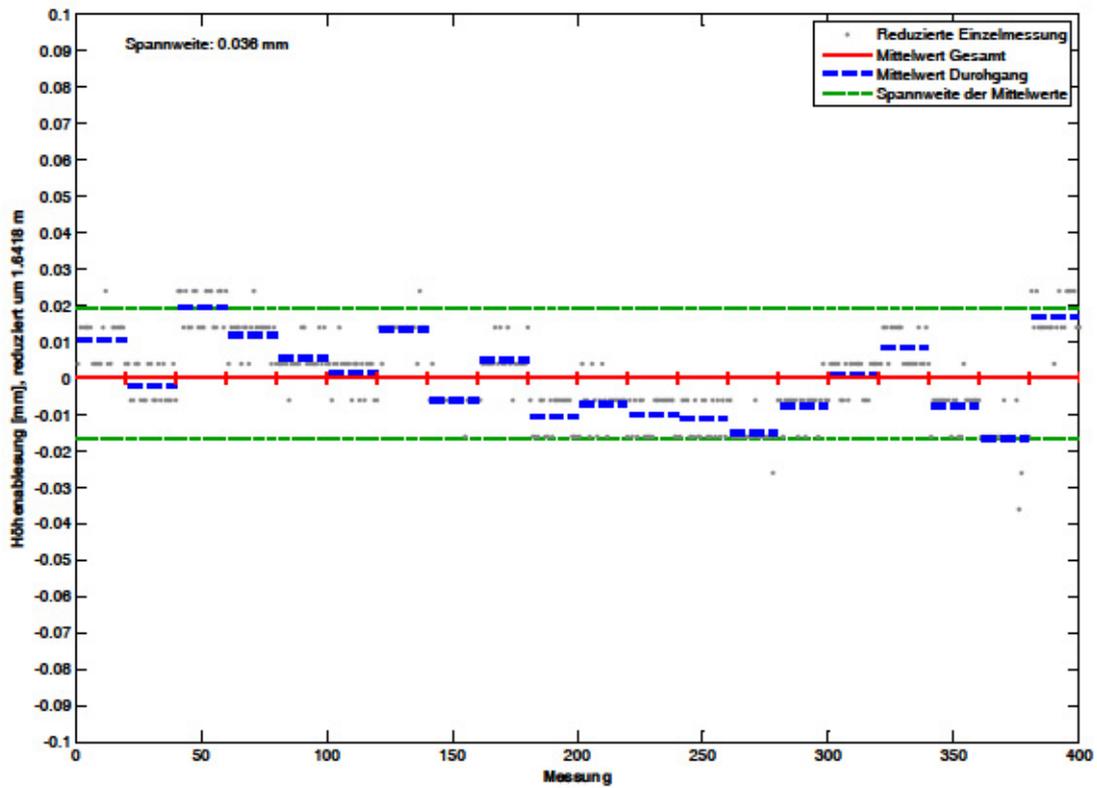


Abbildung B-6: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Wild GKNL4M-3“, 1.Stoß

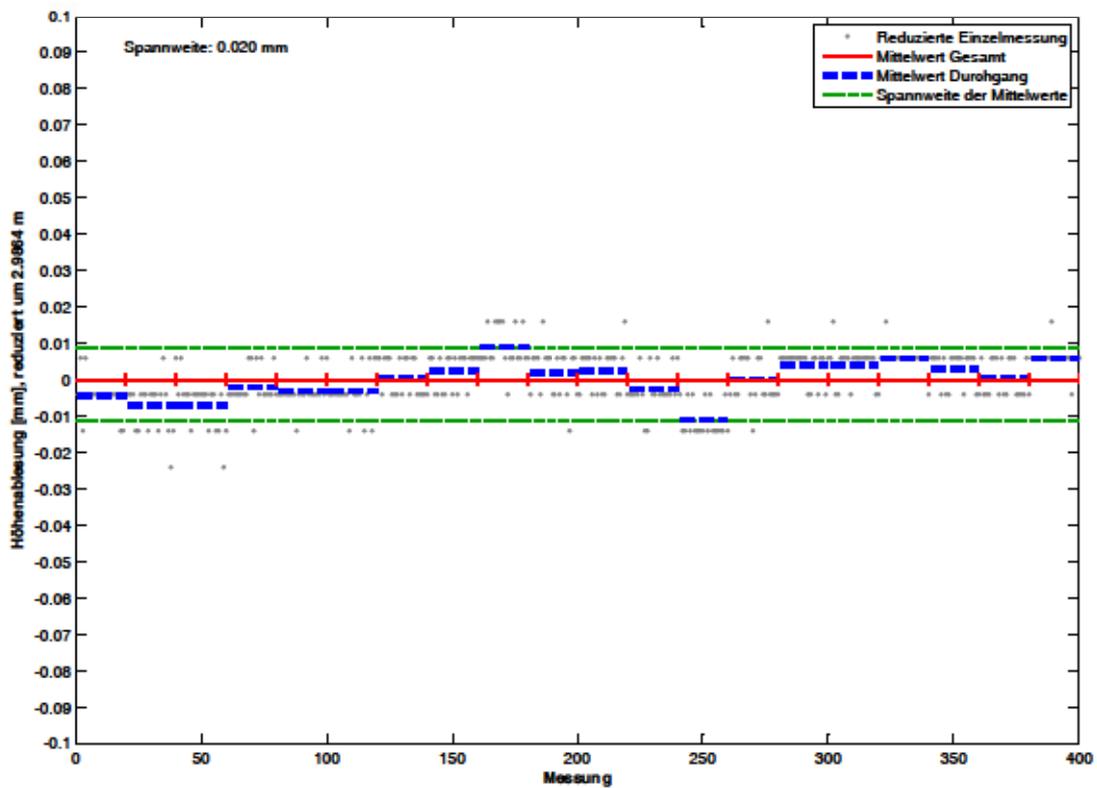


Abbildung B-7: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Wild GKNL4M-3“, 2.Stoß

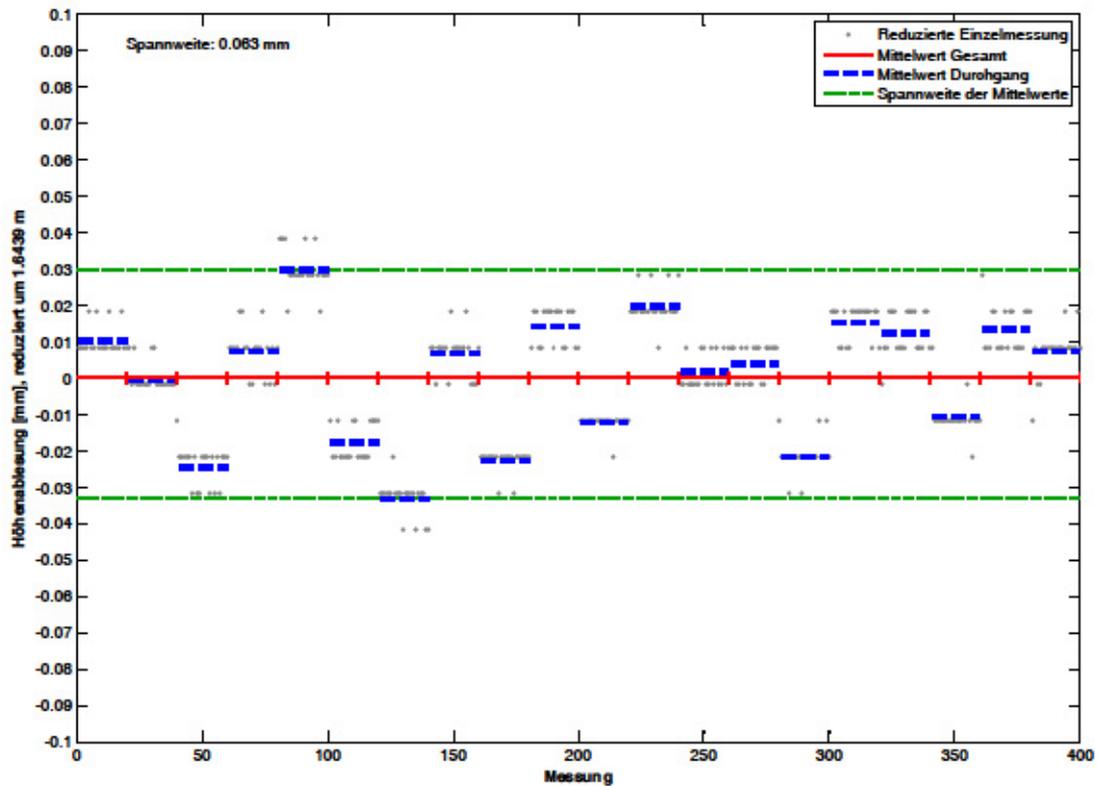


Abbildung B-8: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-4“, 1.Stoß

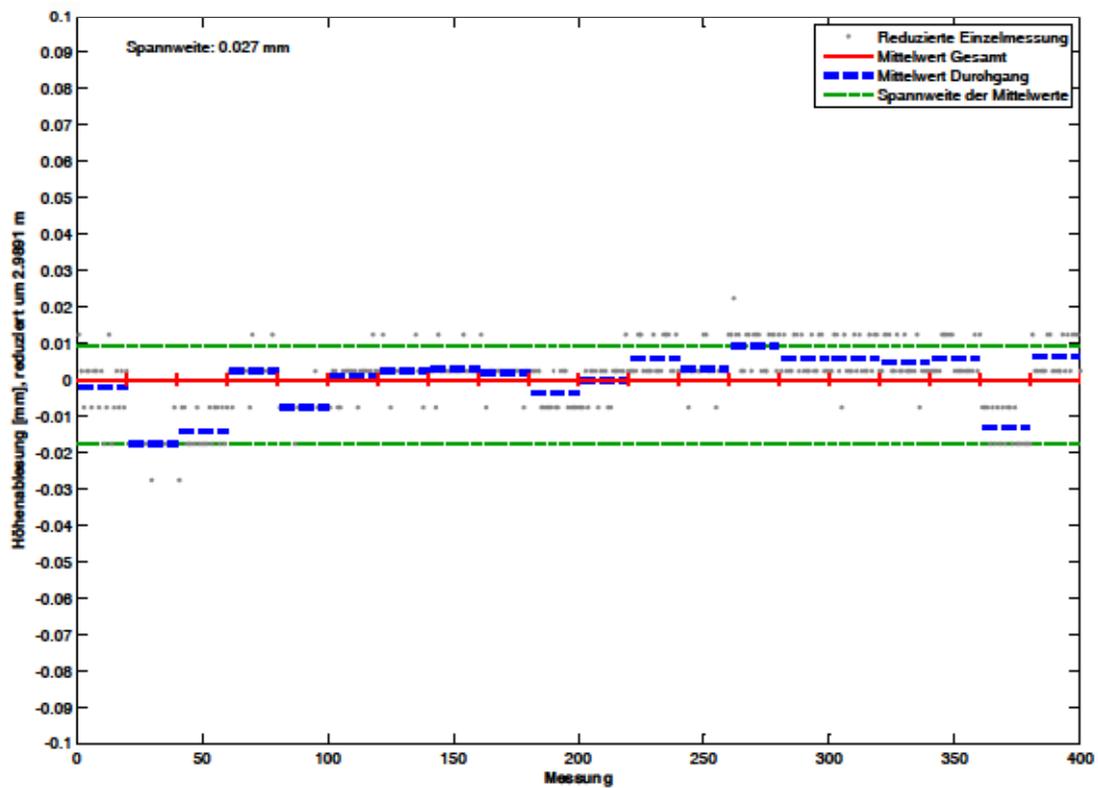


Abbildung B-9: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-4“, 2.Stoß

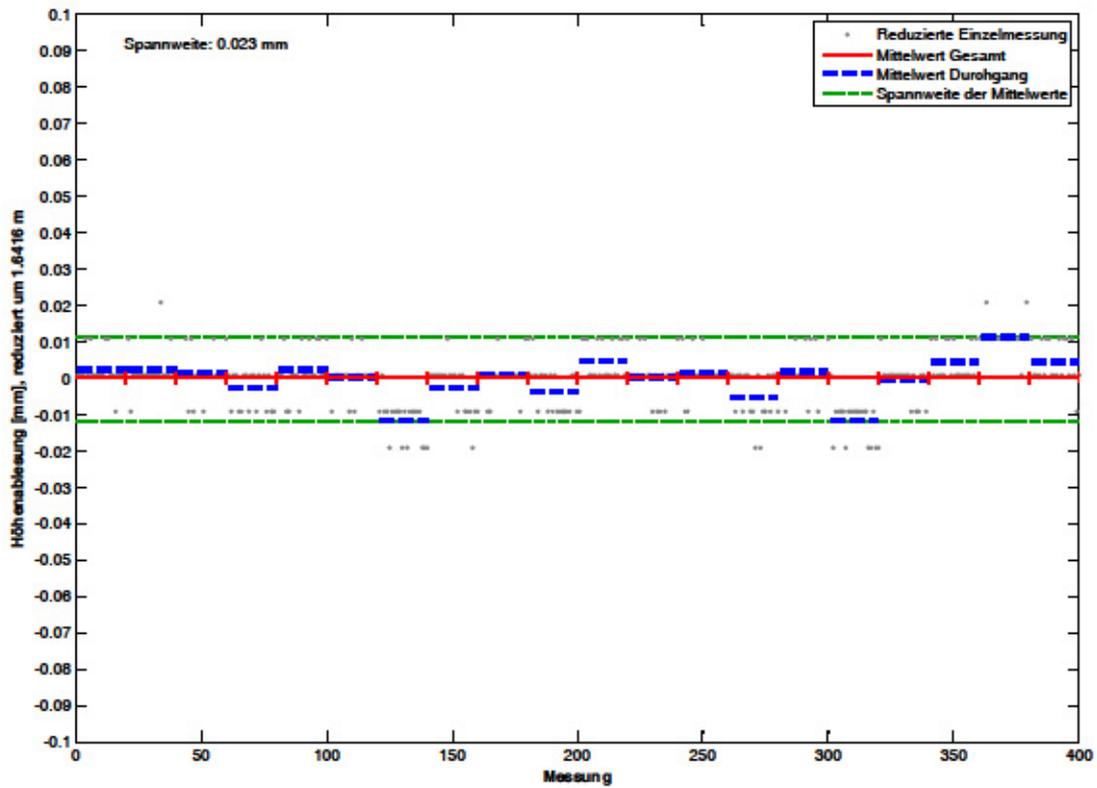


Abbildung B-10: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-5“, 1.Stoß

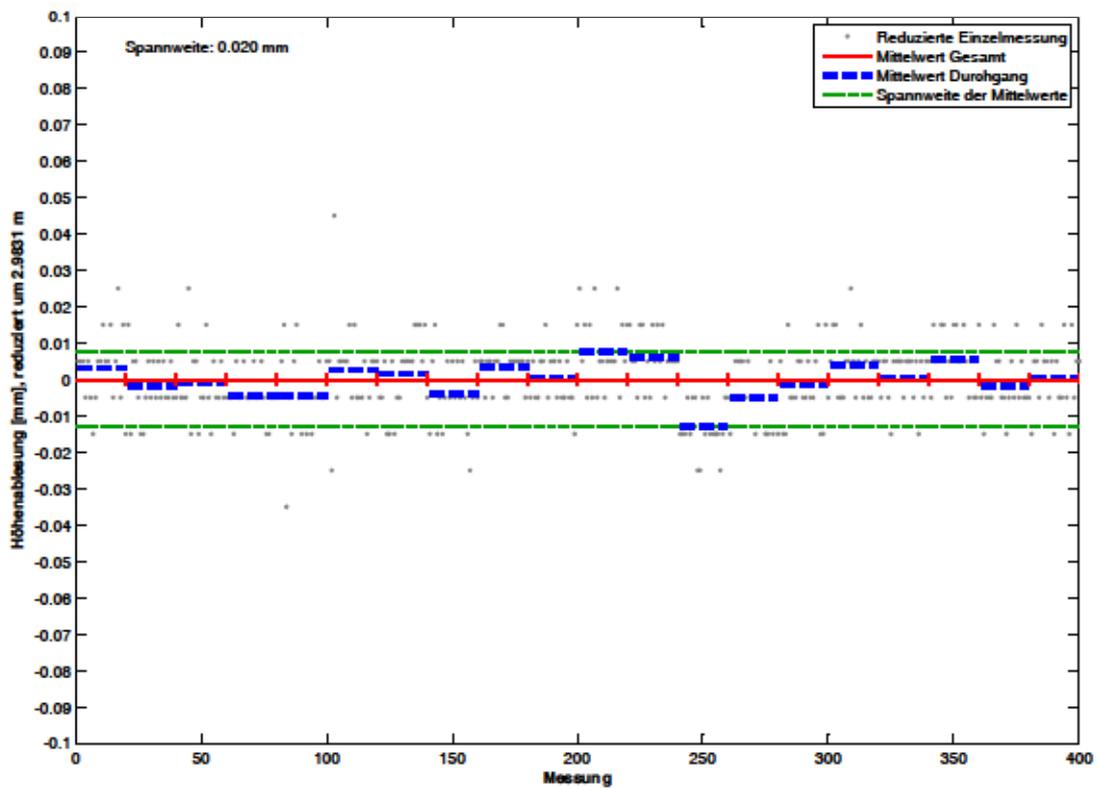


Abbildung B-11: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-5“, 2.Stoß

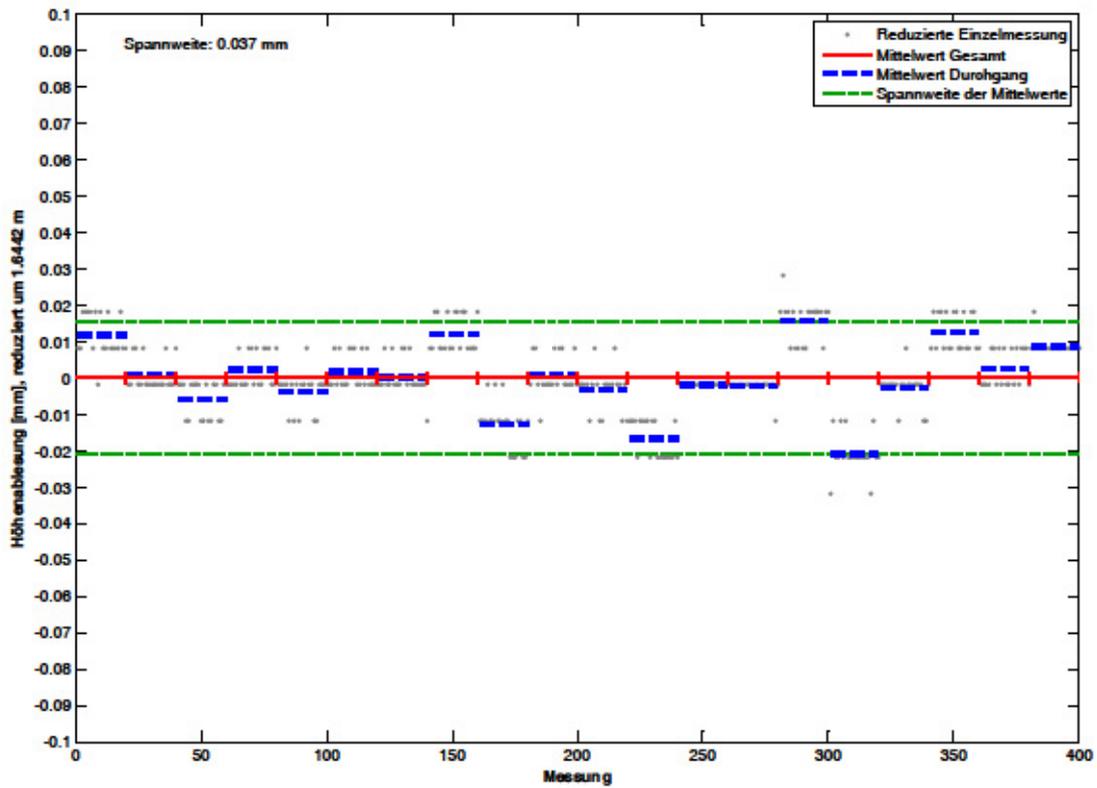


Abbildung B-12: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-6“, 1.Stoß

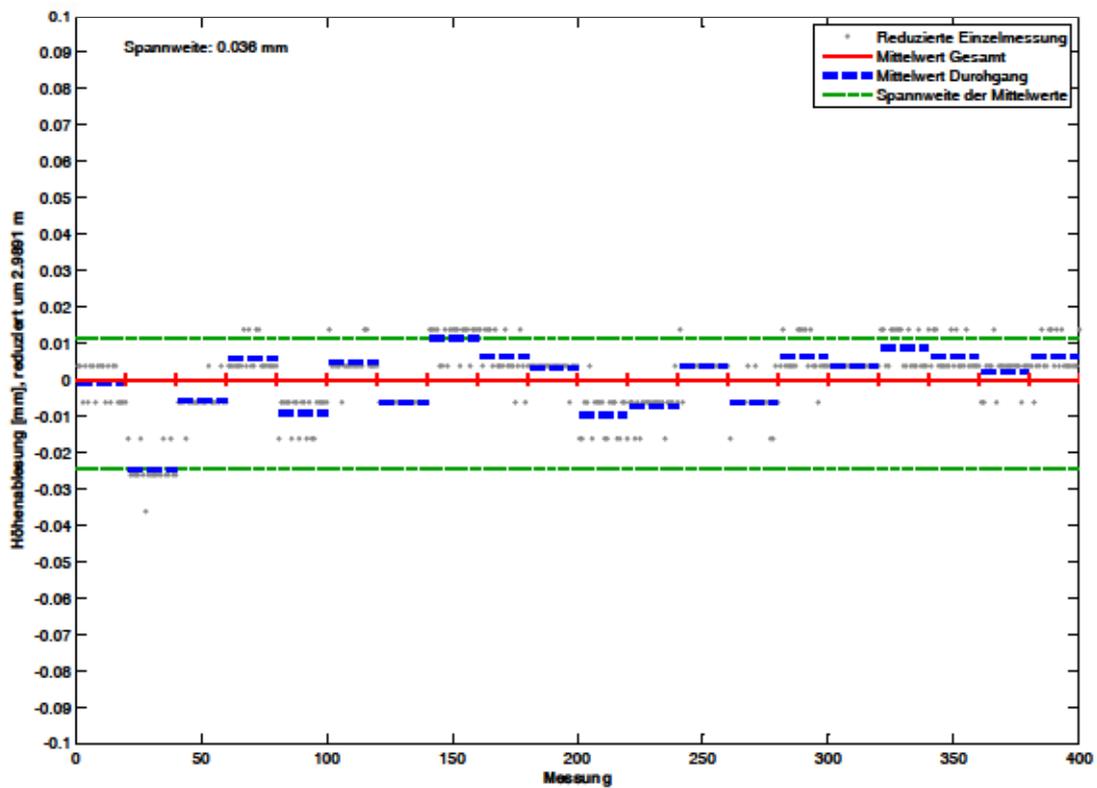


Abbildung B-13: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M-6“, 2.Stoß

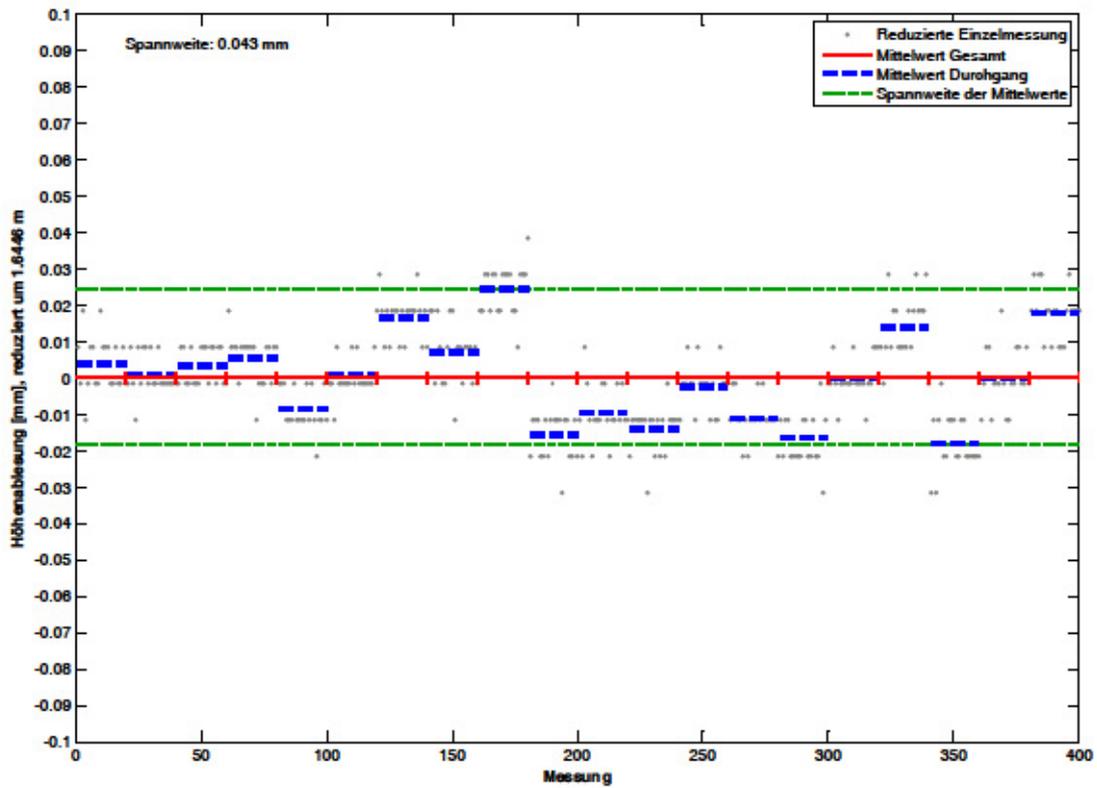


Abbildung B-14: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M Neu1“, 1.Stoß

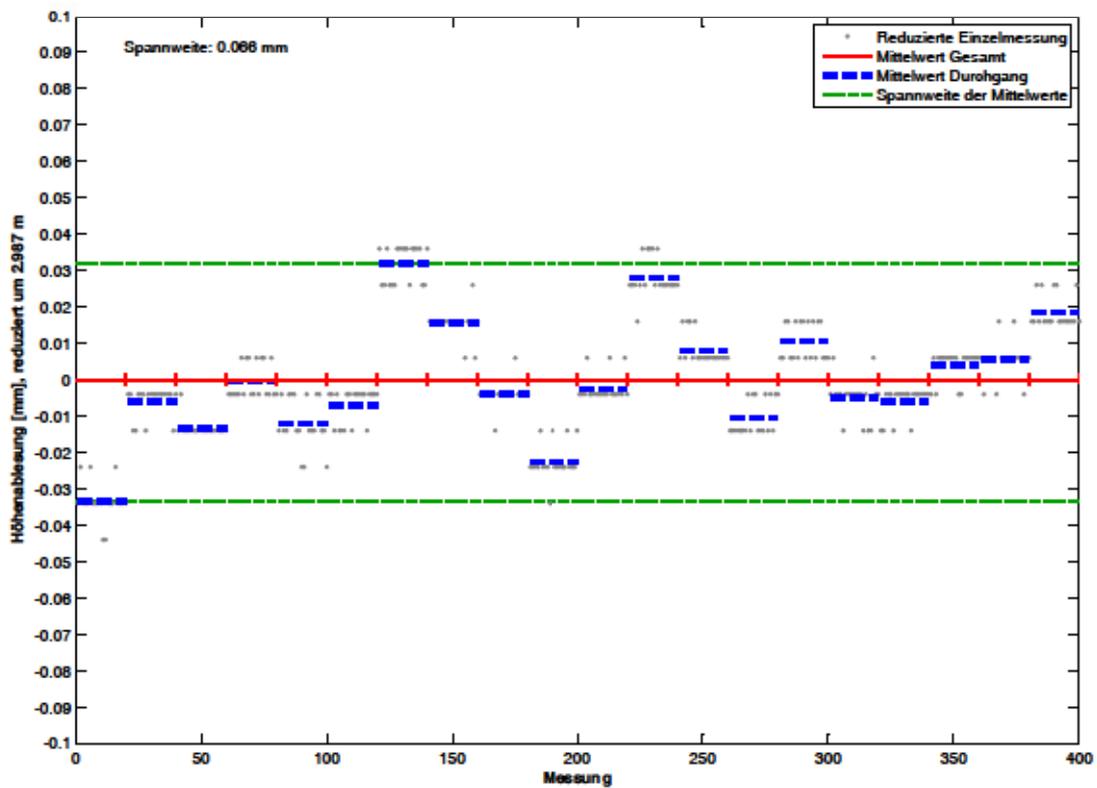


Abbildung B-15: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M Neu1“, 2.Stoß

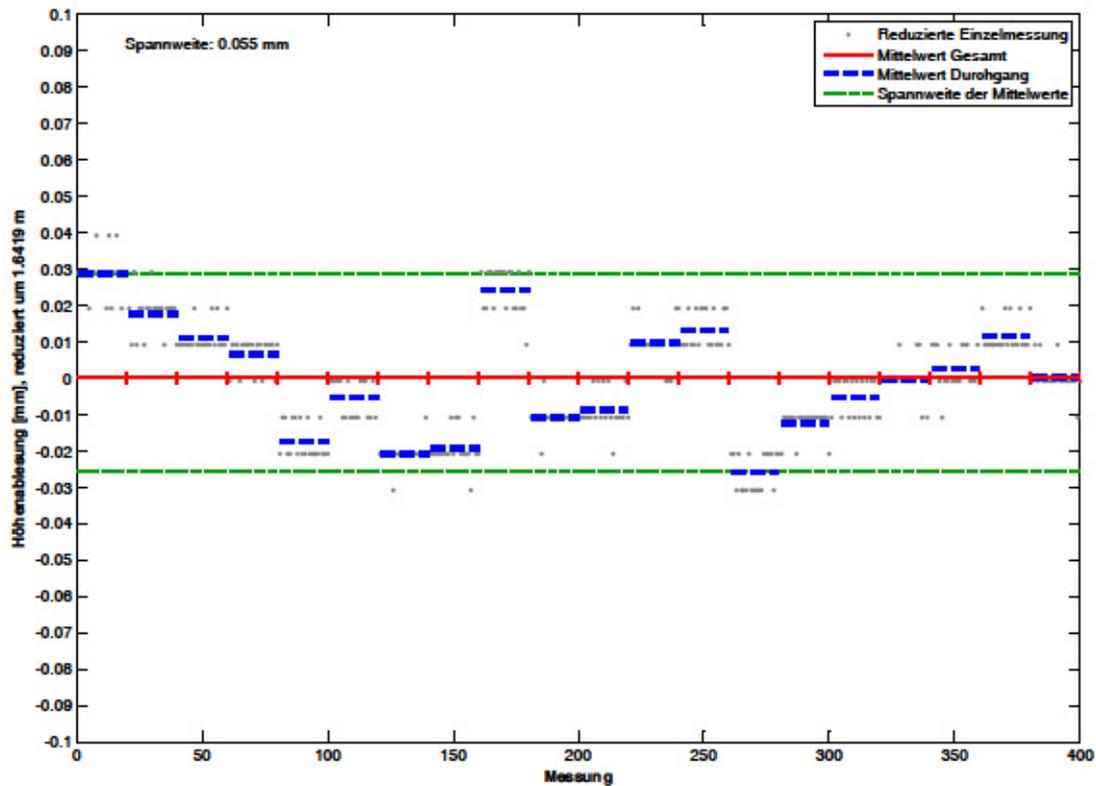


Abbildung B-16: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M Neu2“, 1.Stoß

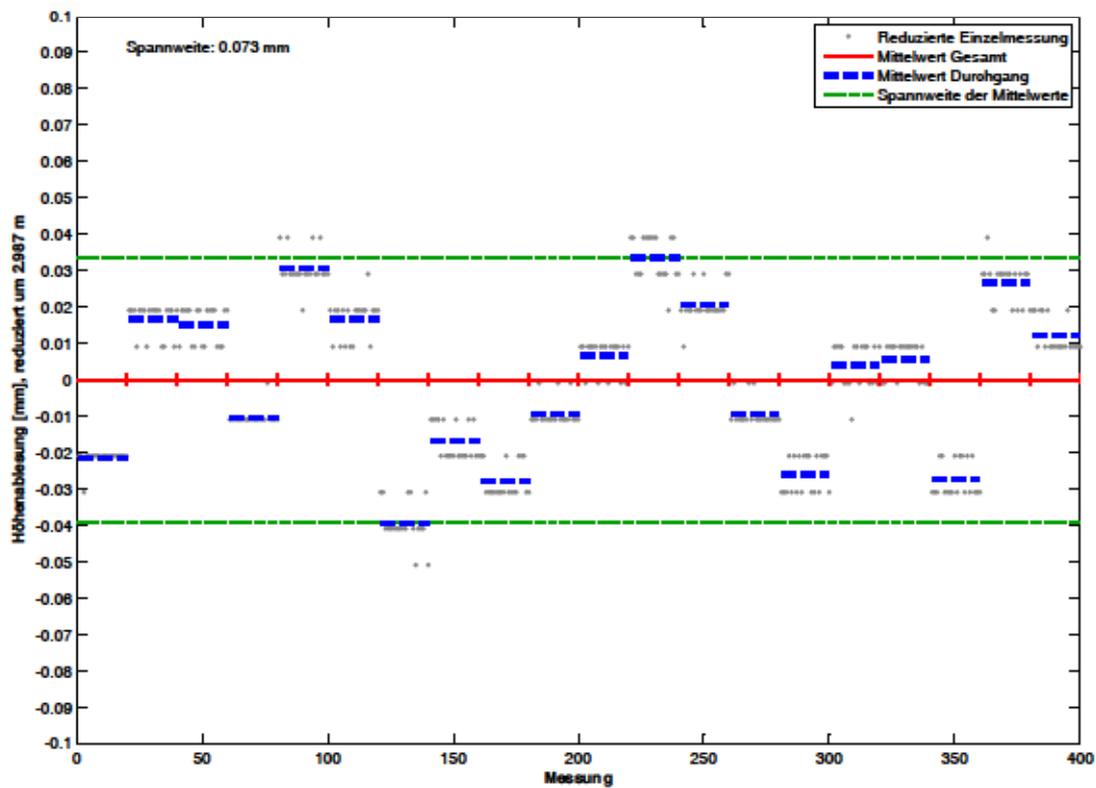


Abbildung B-17: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M Neu2“, 2.Stoß

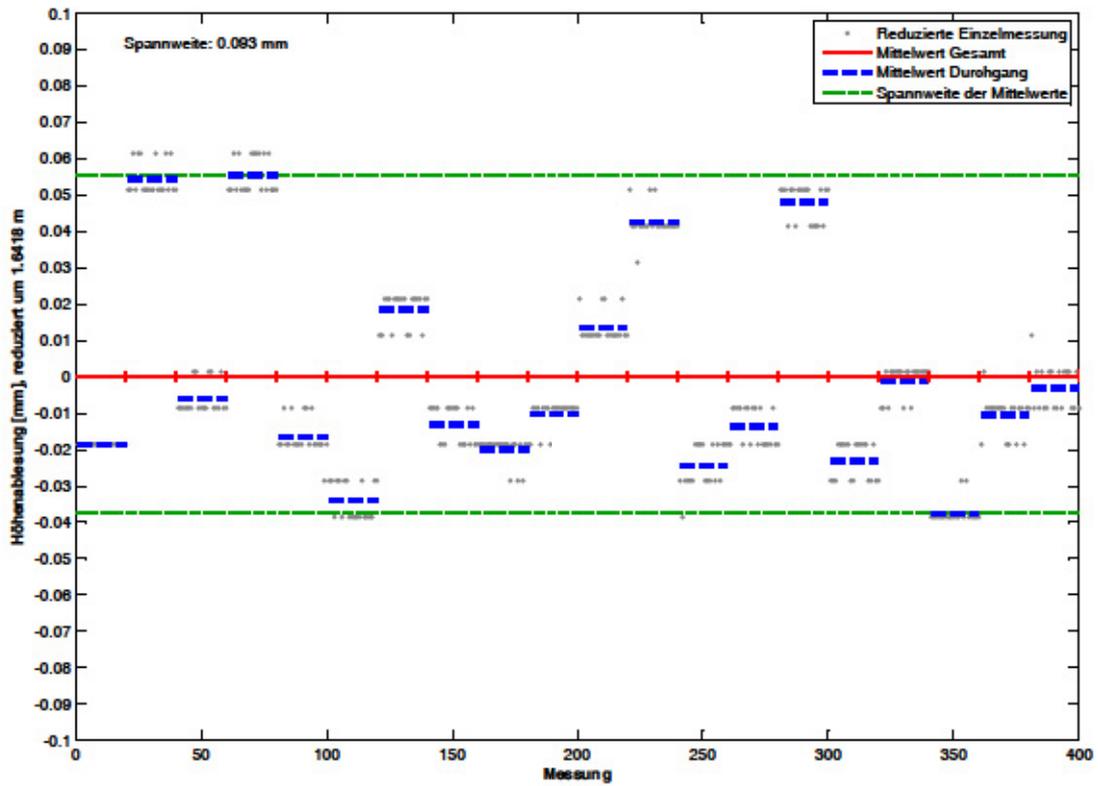


Abbildung B-18: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M Gebraucht 1“, 1.Stoß

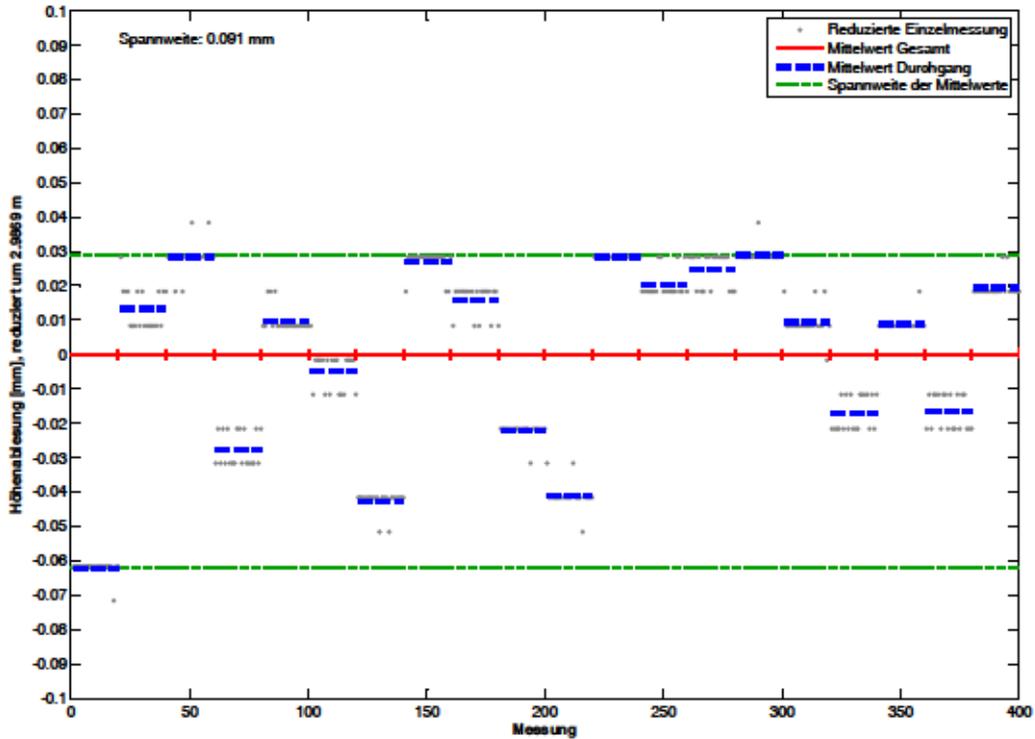


Abbildung B-19: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Leica GKNL4M Gebraucht 1“, 2.Stoß

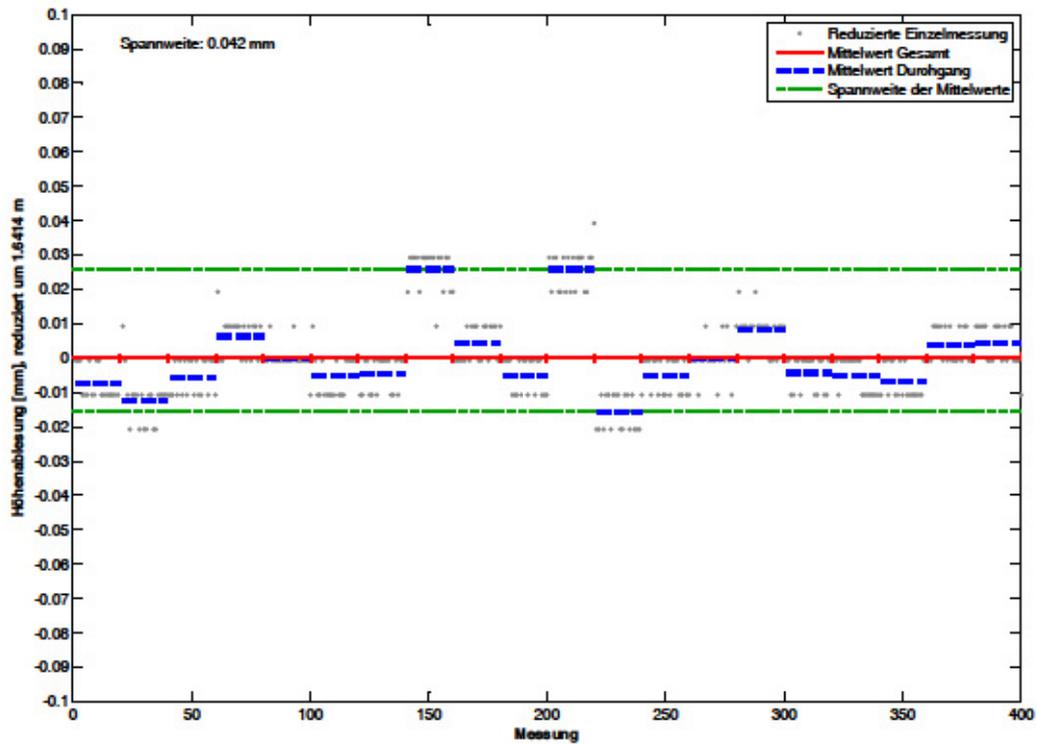


Abbildung B-20: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Wild GKNL4M Gebraucht 2“, 1.Stoß

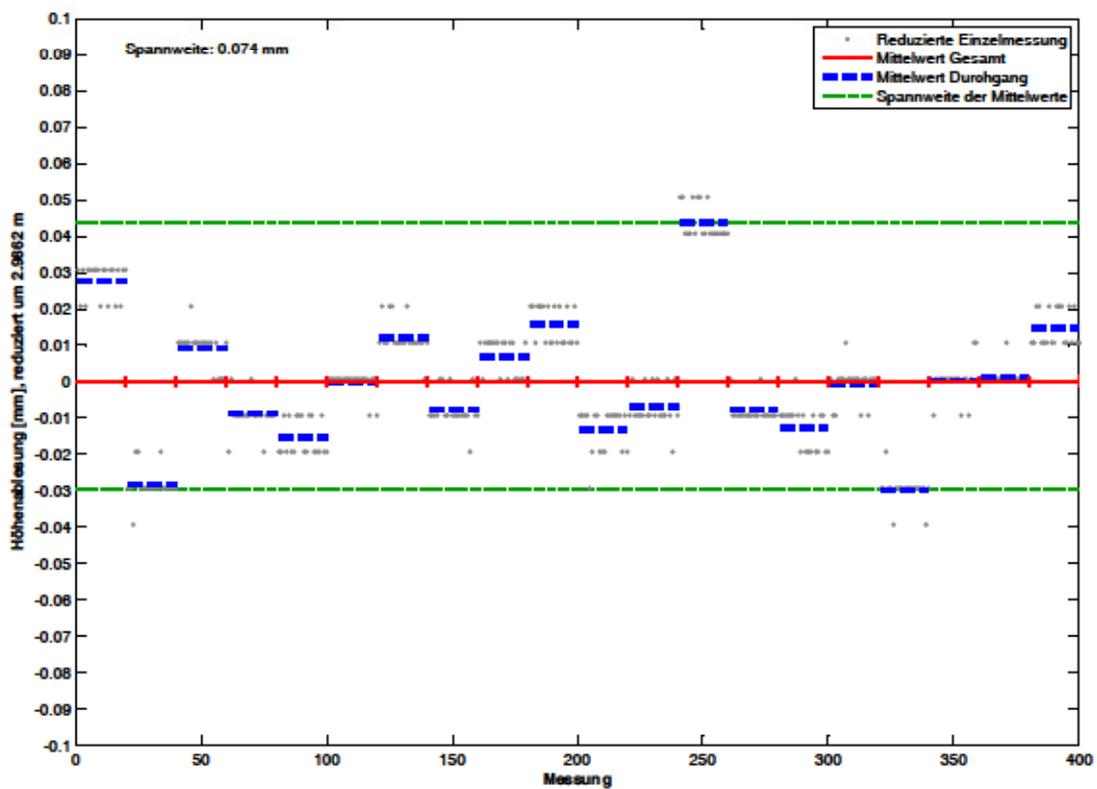


Abbildung B-21: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Wild GKNL4M Gebraucht 2“, 2.Stoß

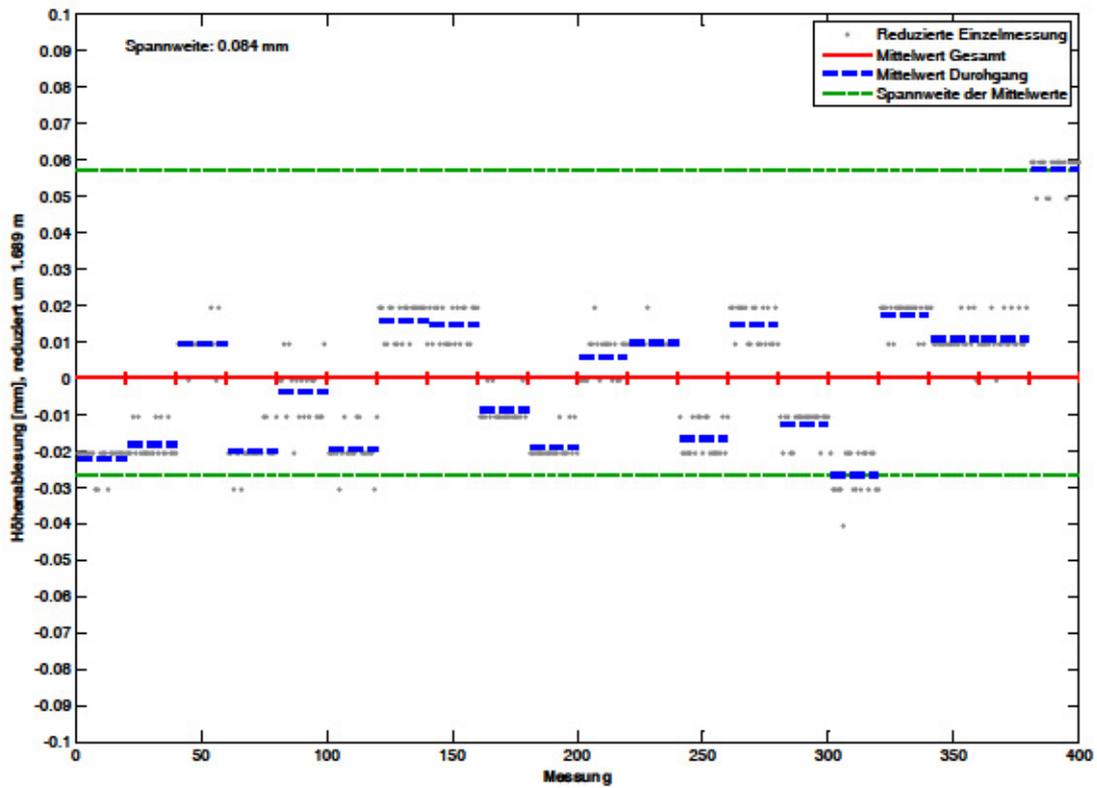


Abbildung B-22: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Trimble TD24“, 1.Stoß

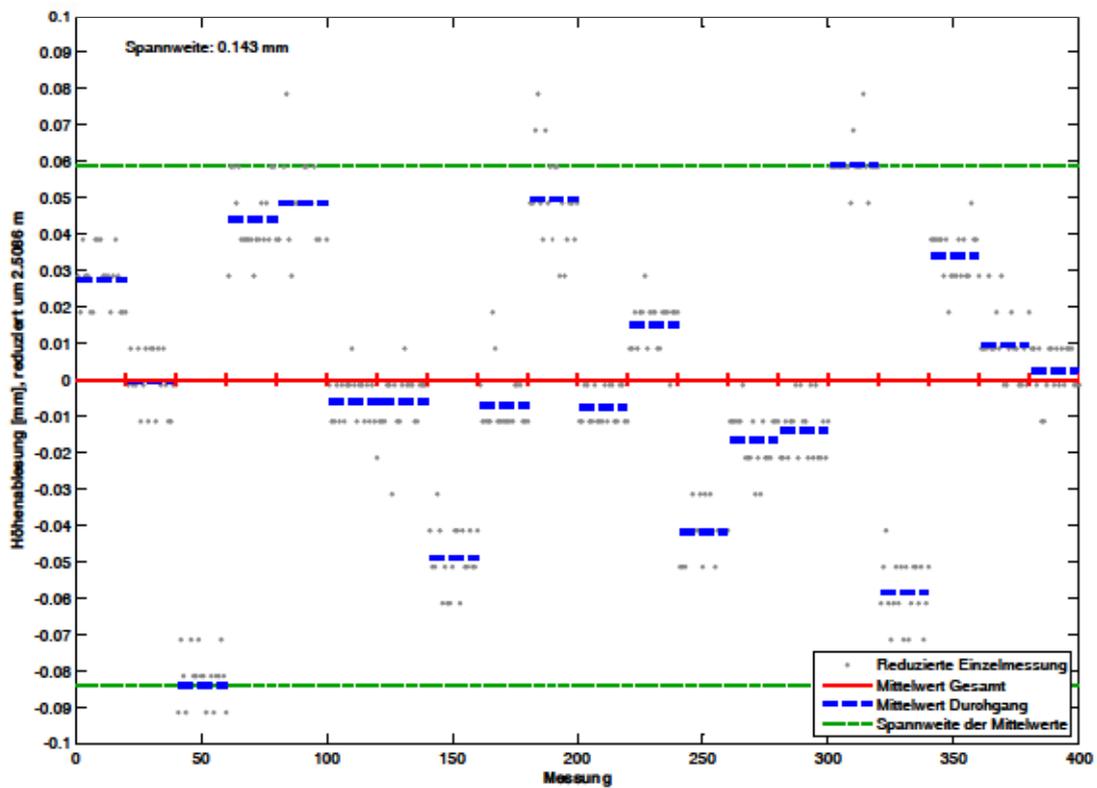


Abbildung B-23: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Trimble TD24“, 2.Stoß

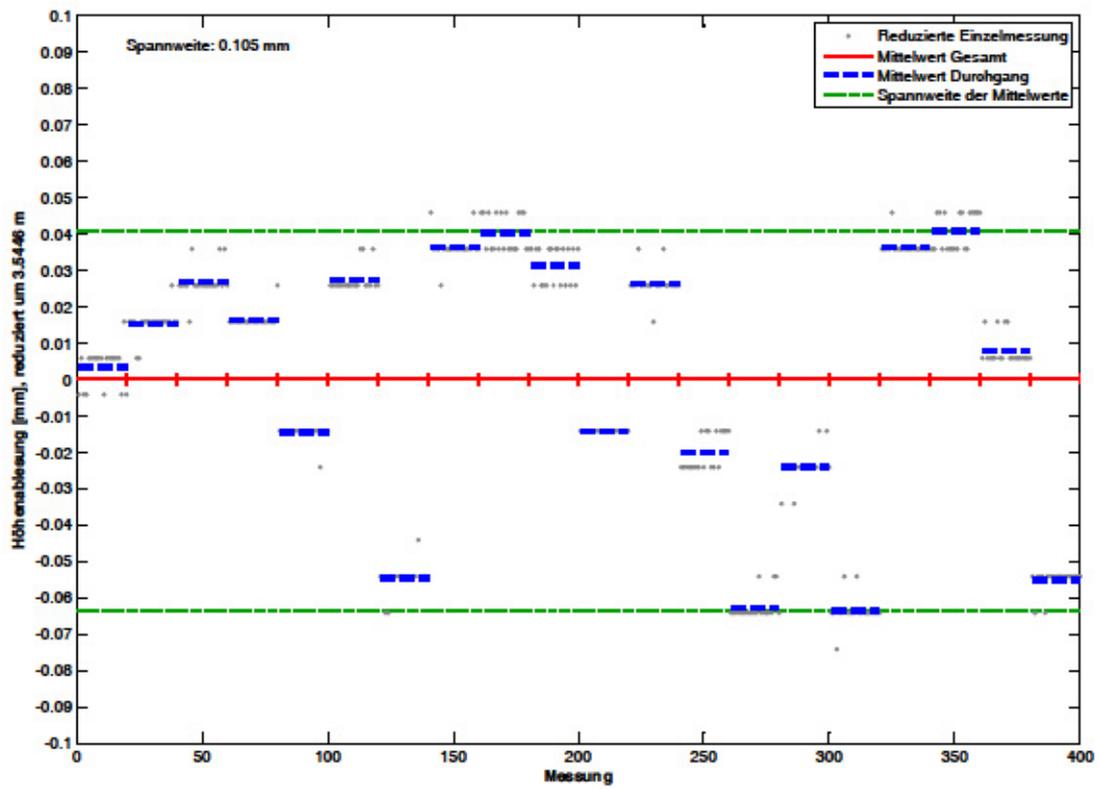


Abbildung B-24: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Trimble TD24“, 3.Stoß

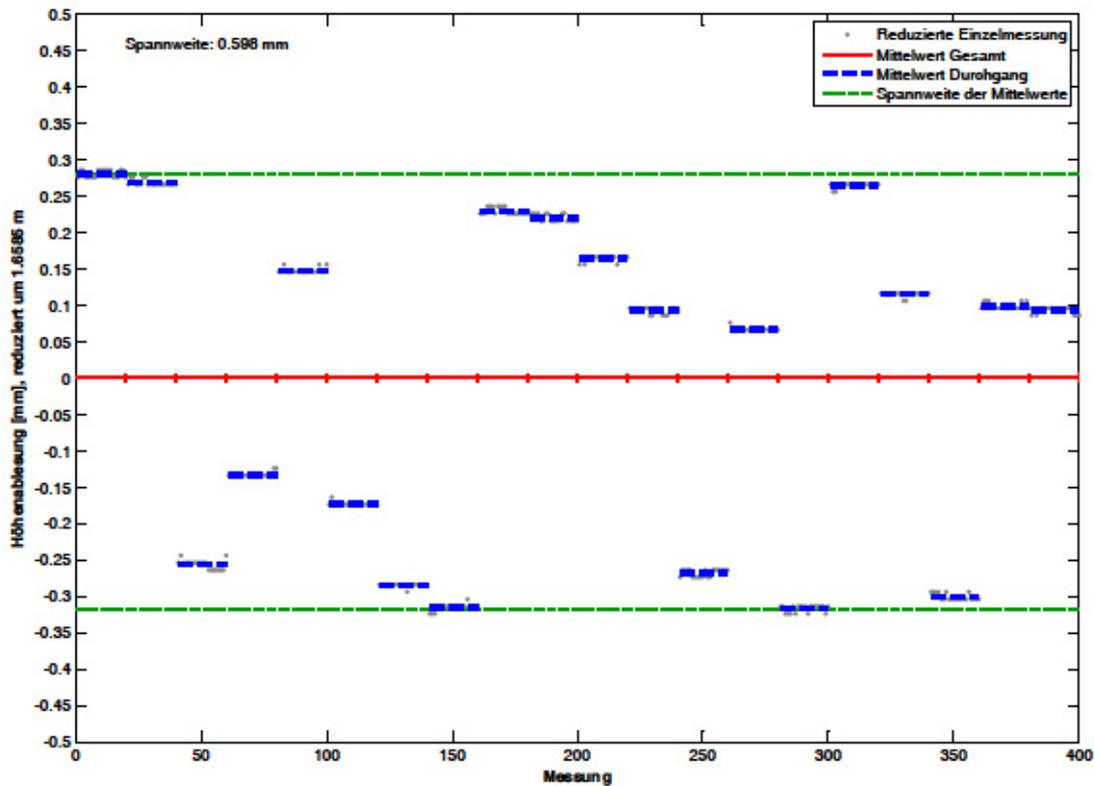


Abbildung B-25: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Sokkia BAS55“, 1.Stoß

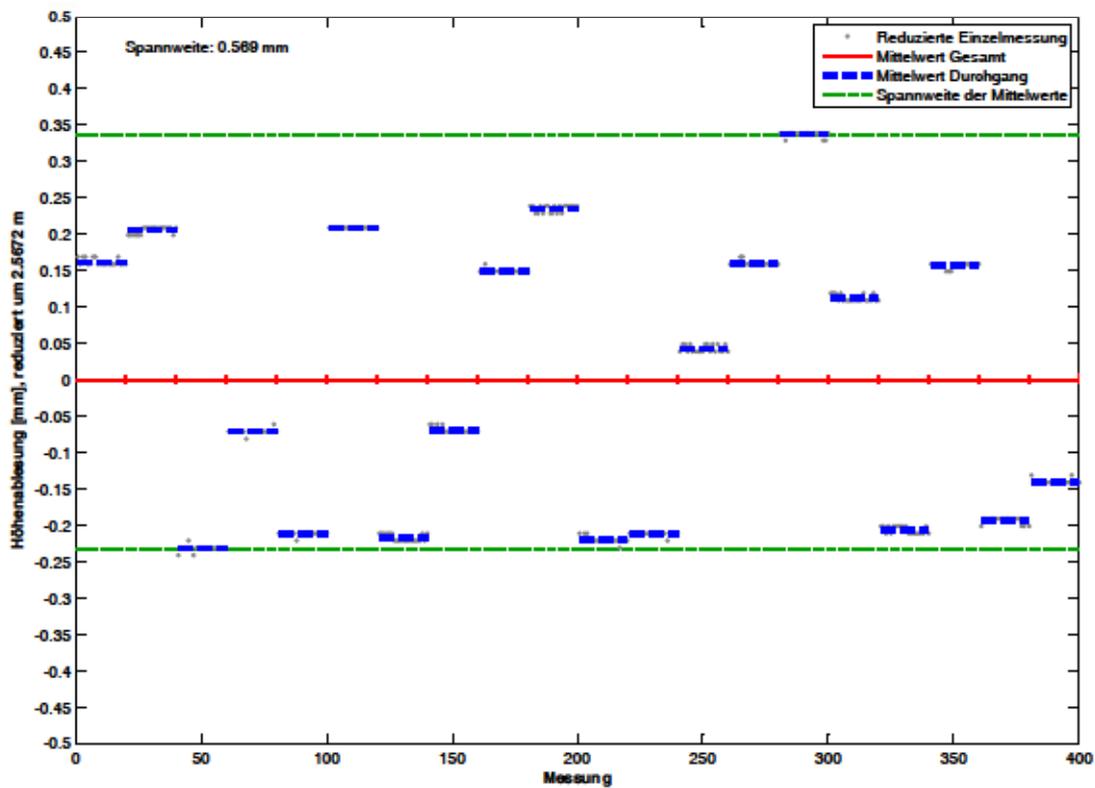


Abbildung B-26: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Sokkia BAS55“, 2.Stoß

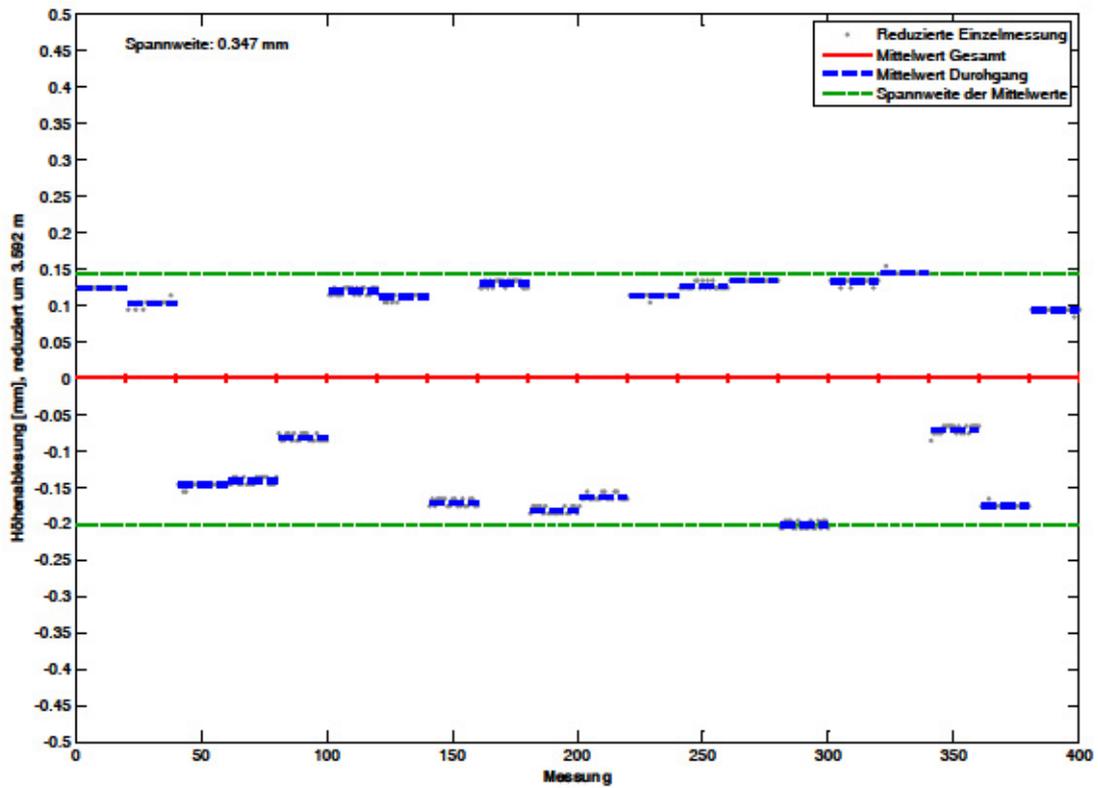


Abbildung B-27: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Sokkia BAS55“, 3.Stoß

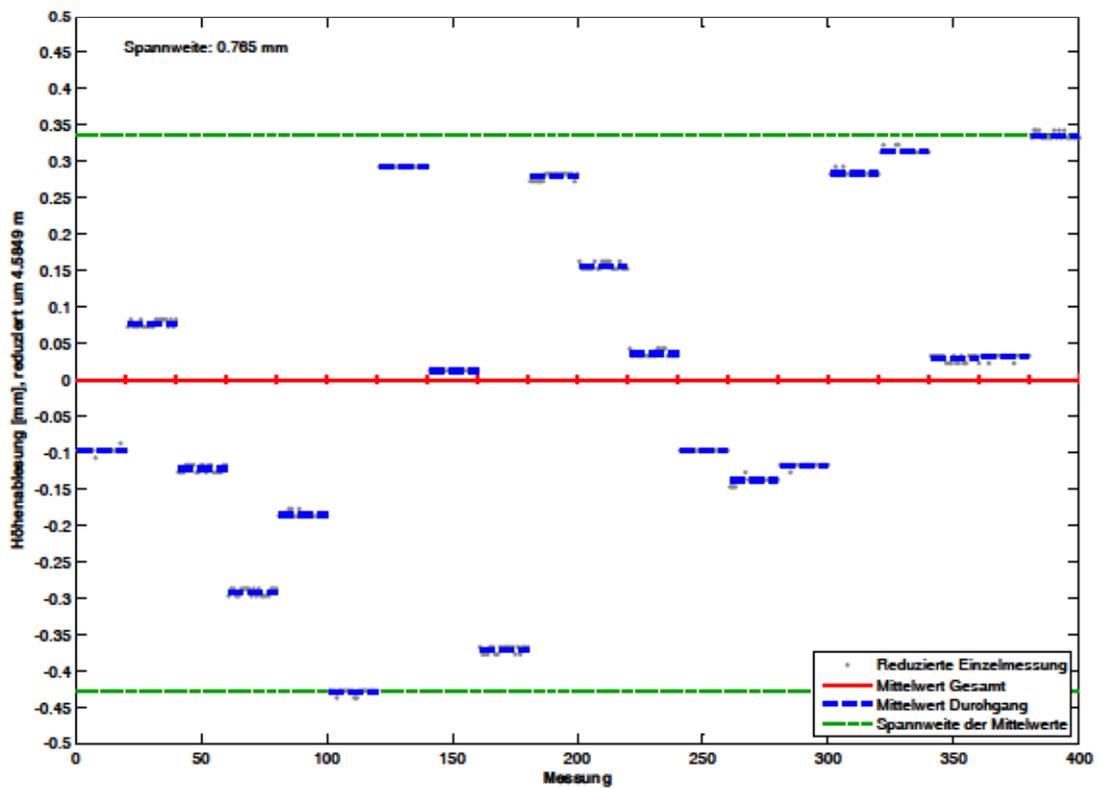


Abbildung B-28: Reproduzierbarkeit der Stoßstelle, Latte „Sokkia BAS55“, 4.Stoß

Anhang C: Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Abbildung C-1 zeigt beispielhaft einen Plot der Messungen.

In den Abbildungen C-2 bis C-13 sind grafische Darstellungen der Messungen zur Untersuchung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (siehe Kapitel 8) ohne weitere Interpretation zu sehen.

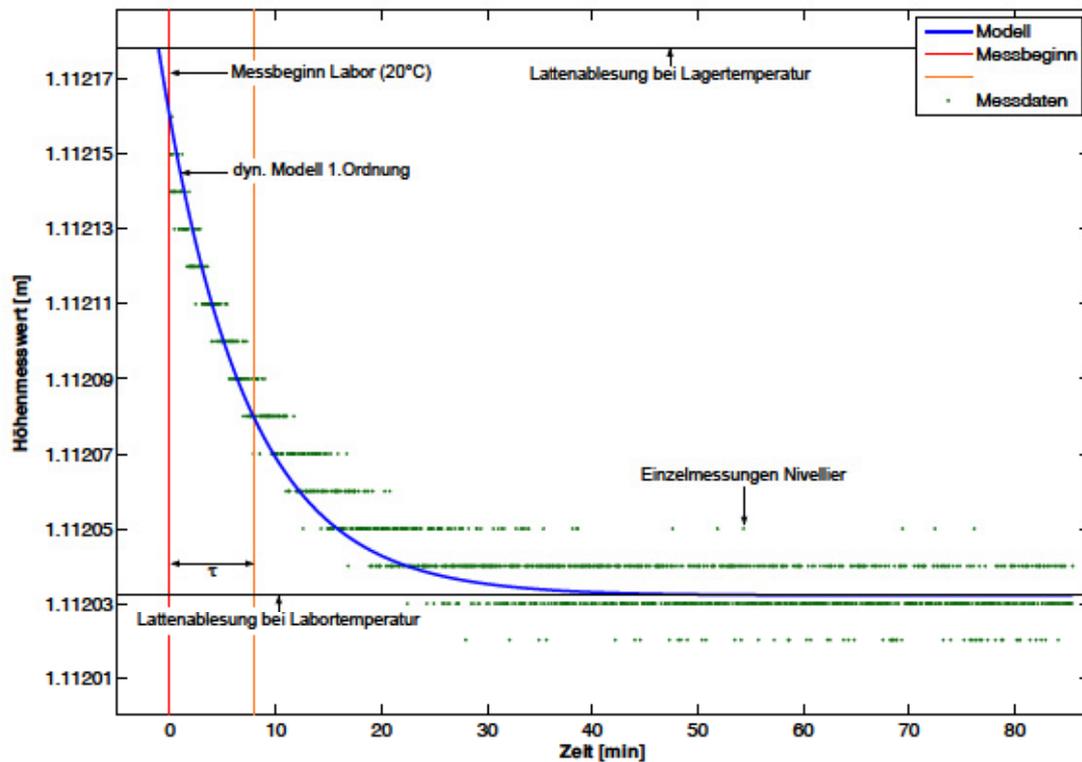


Abbildung C-1: Erklärender Beispielplot (Latte „Leica GKNL4M Neu 2“)

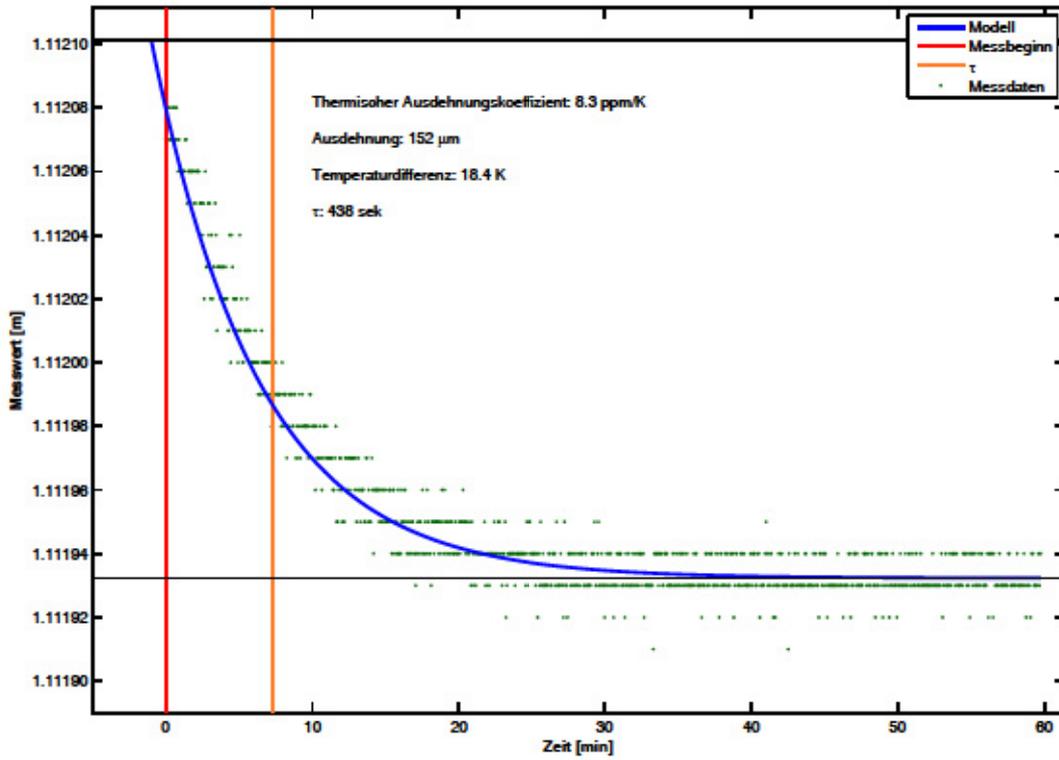


Abbildung C-2: Tempsprung Latte „Wild GKNL4M-3“, Job-Nr.: 5

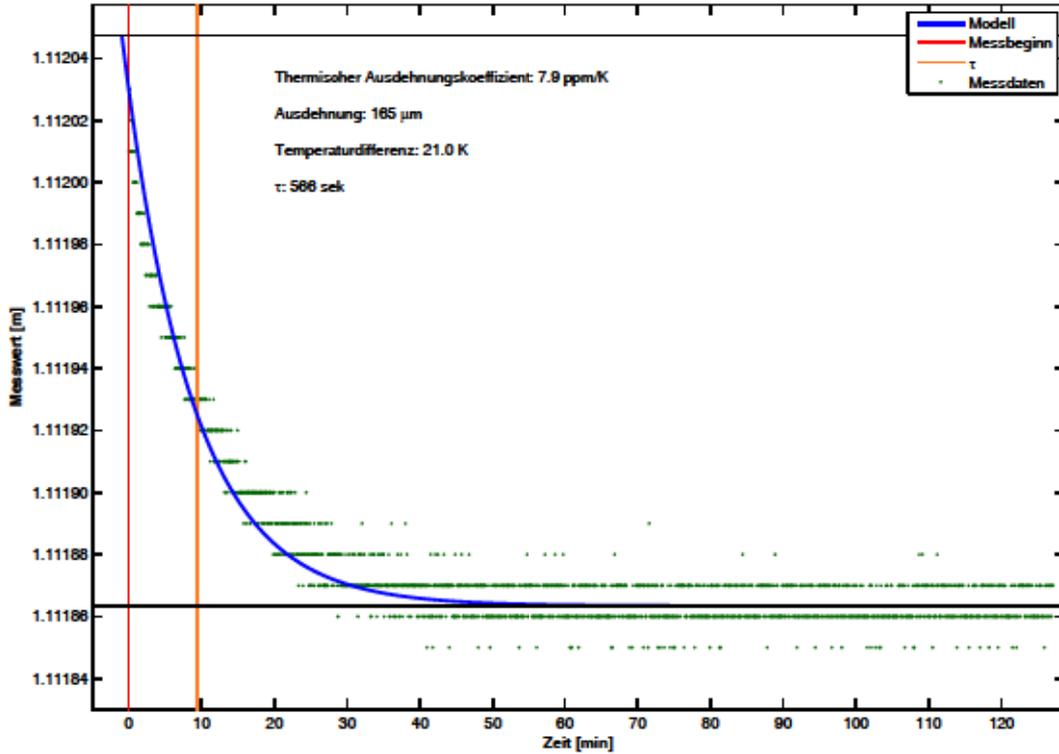


Abbildung C-3: Tempsprung Latte „Wild GKNL4M-3“, Job-Nr.: 11

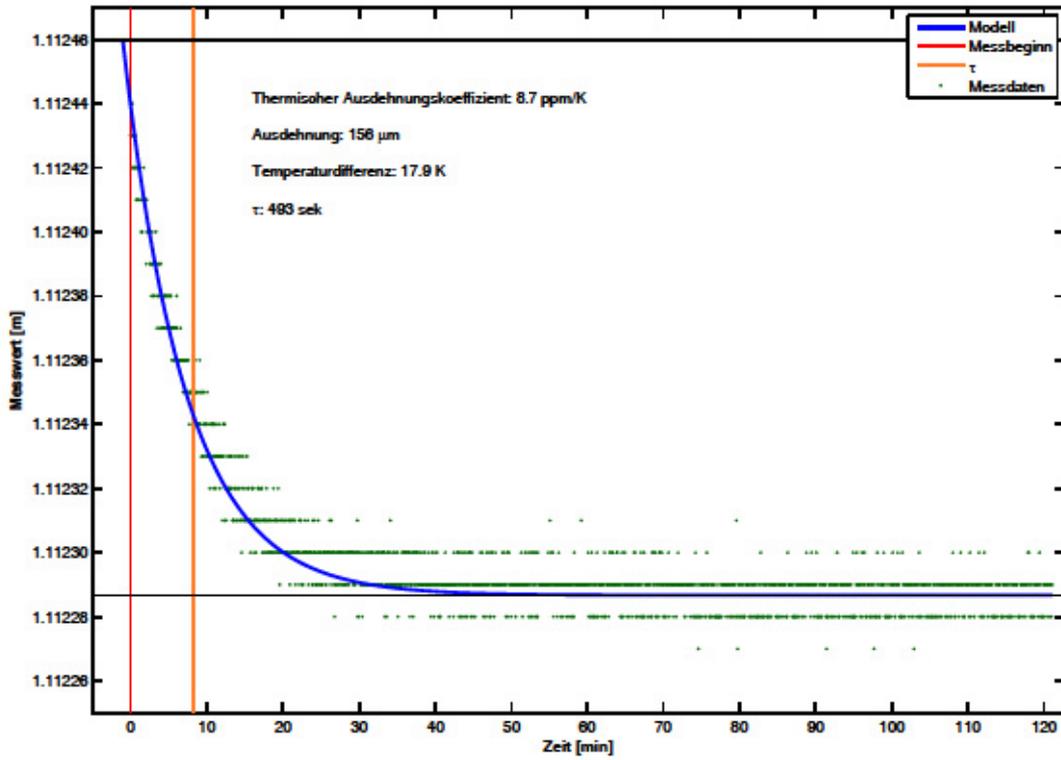


Abbildung C-4: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M-4“, Job-Nr.: 6

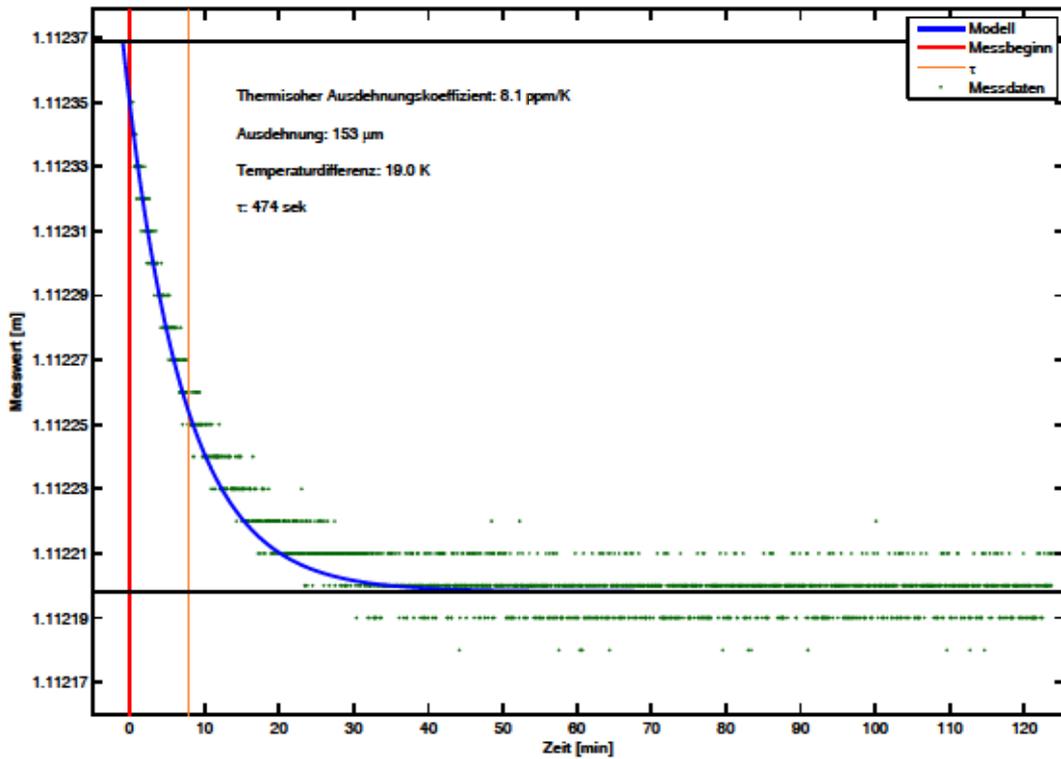


Abbildung C-5: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M-5“, Job-Nr.: 4

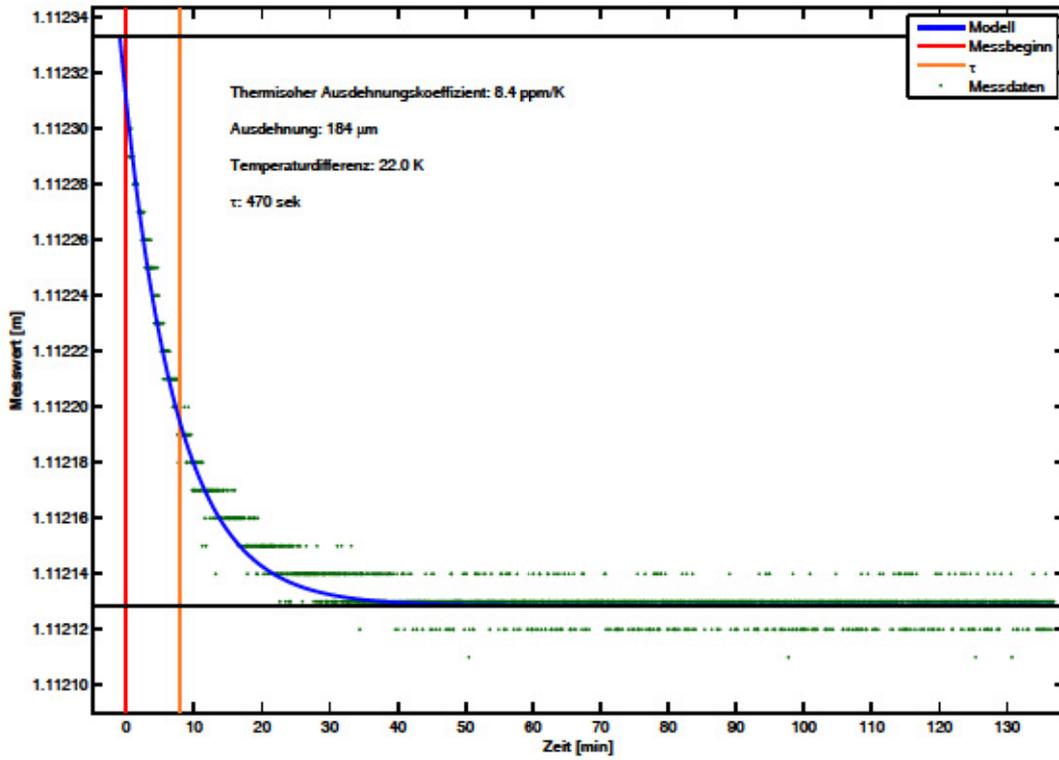


Abbildung C-6: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M-5“, Job-Nr.: 10

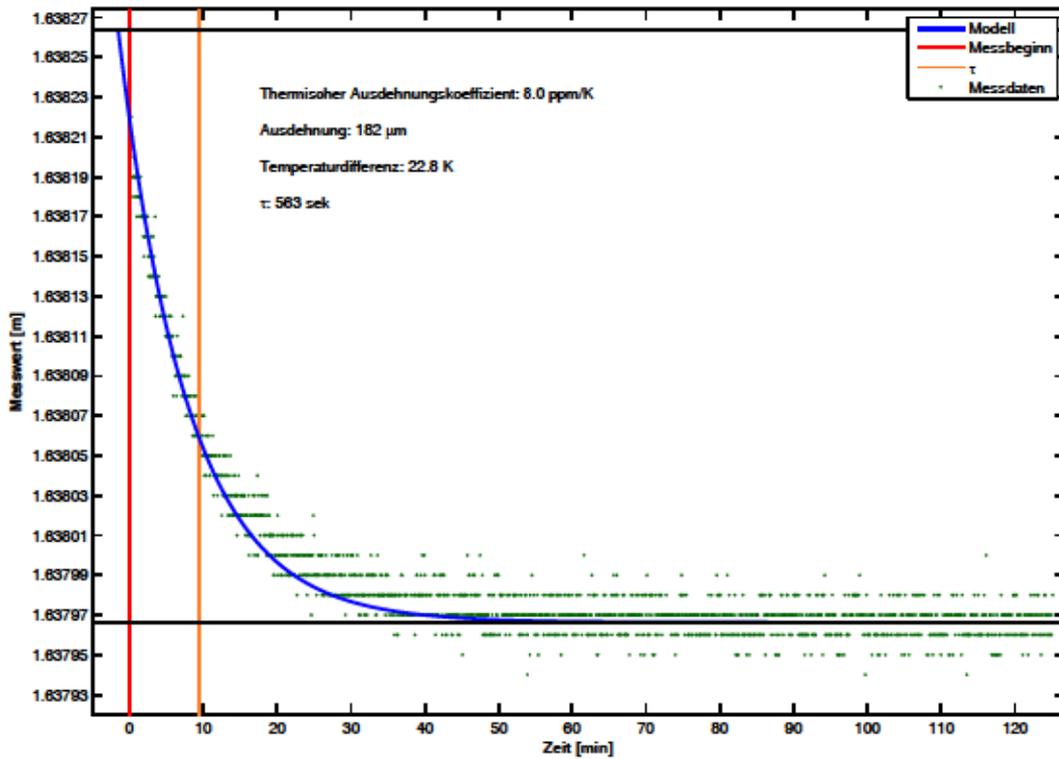


Abbildung C-7: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M-5“, Job-Nr.: 13

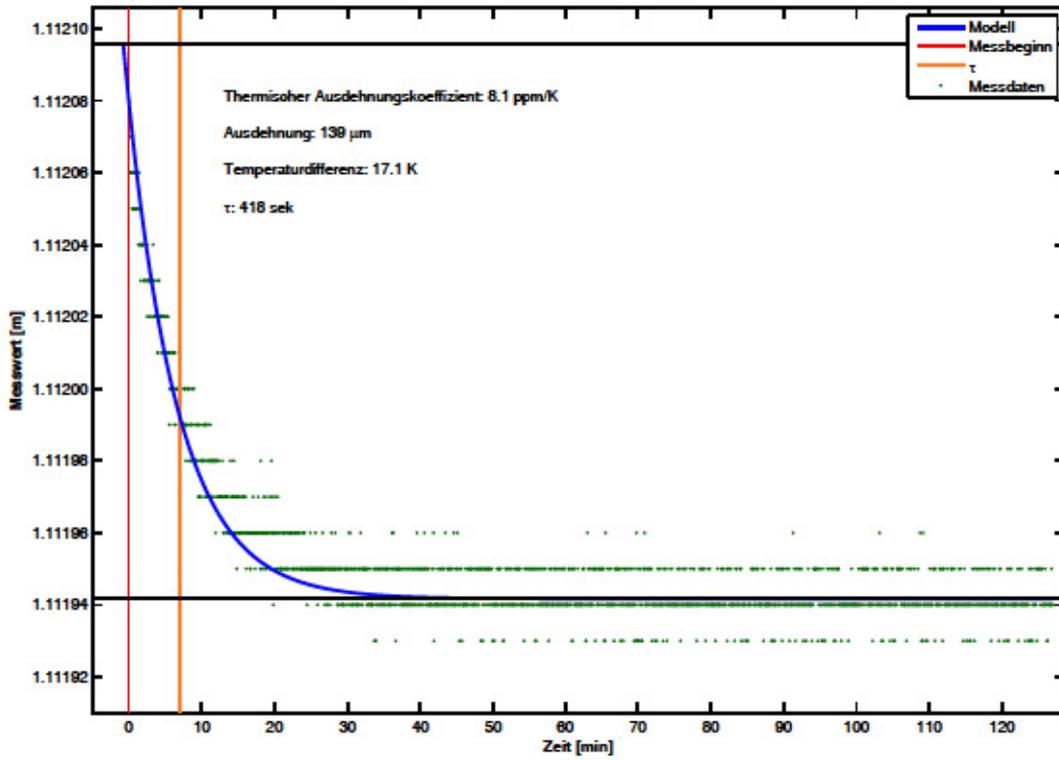


Abbildung C-8: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M Neu 1“, Job-Nr.: 2

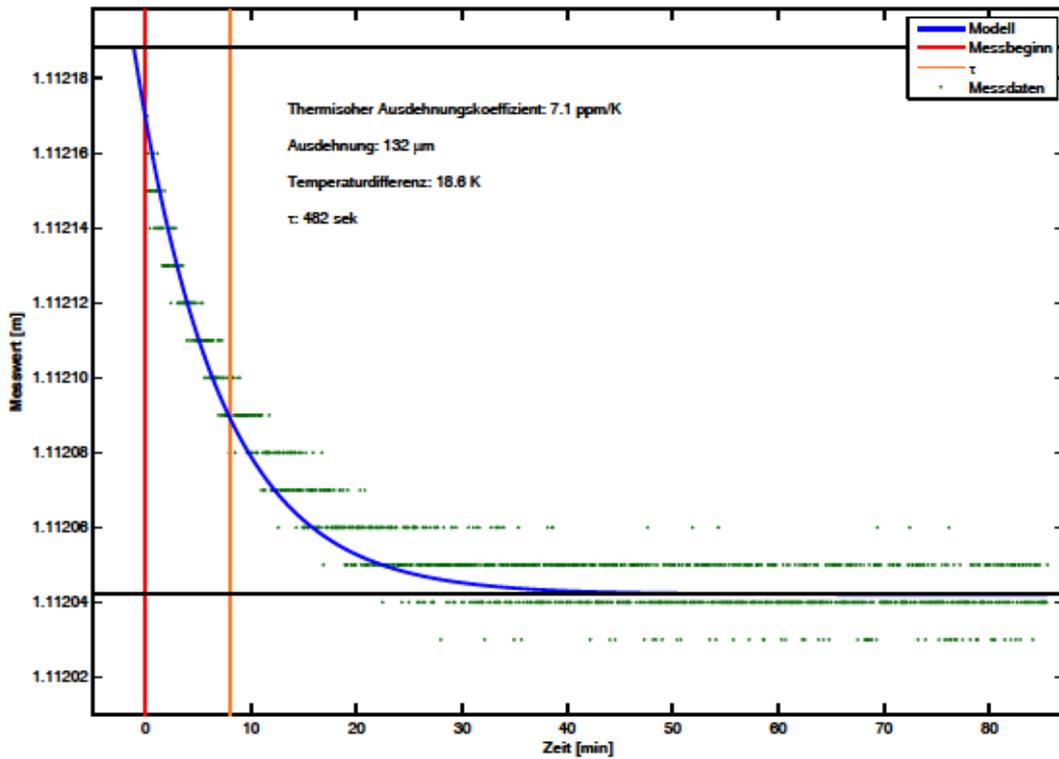


Abbildung C-9: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M Neu 2“, Job-Nr.: 1

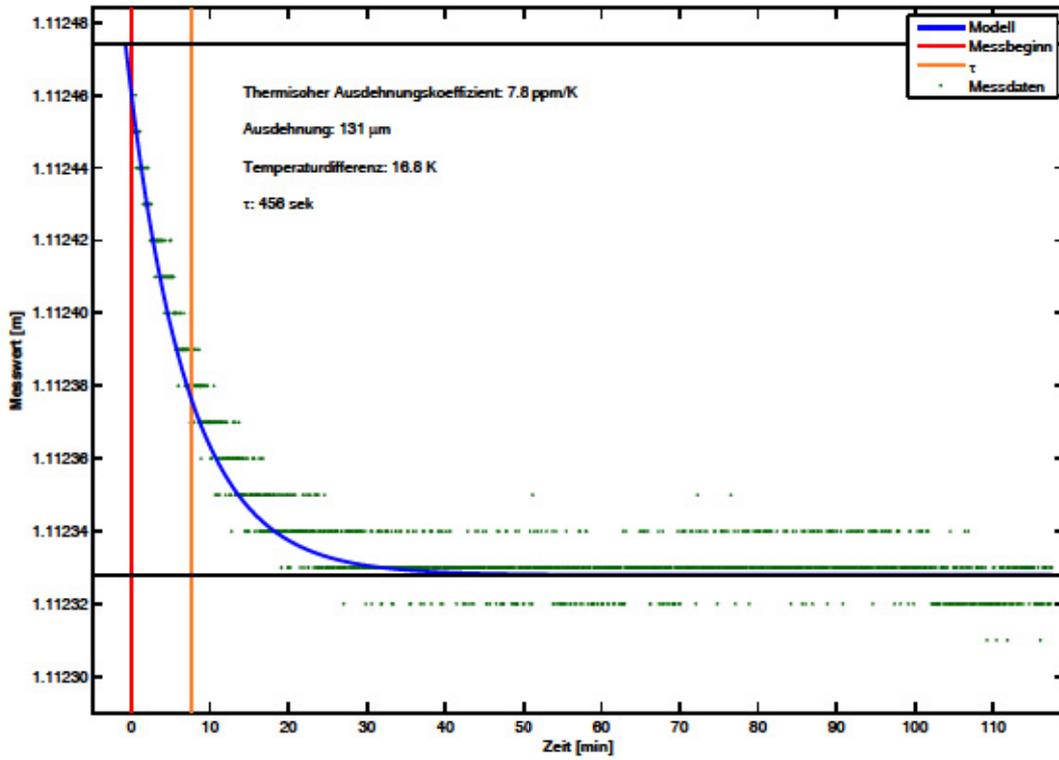


Abbildung C-10: Tempsprung Latte „Leica GKNL4M Gebraucht 1“, Job-Nr.: 3

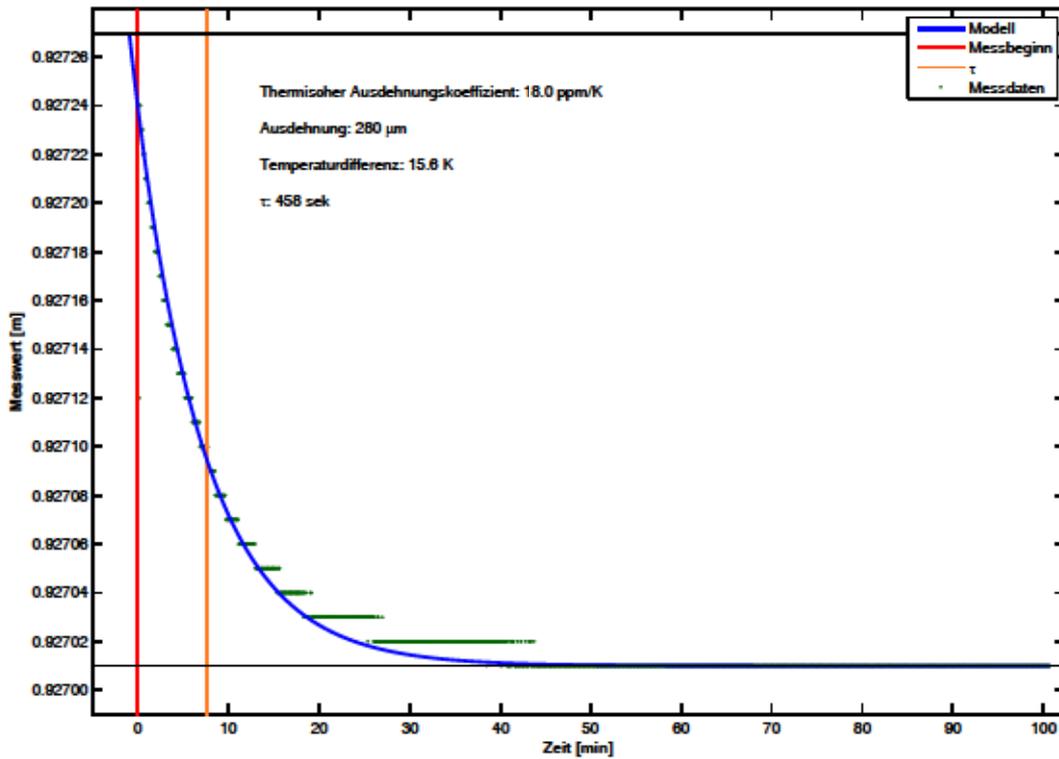


Abbildung C-11: Tempsprung Latte „Trimble TD24“, Job-Nr.: 9

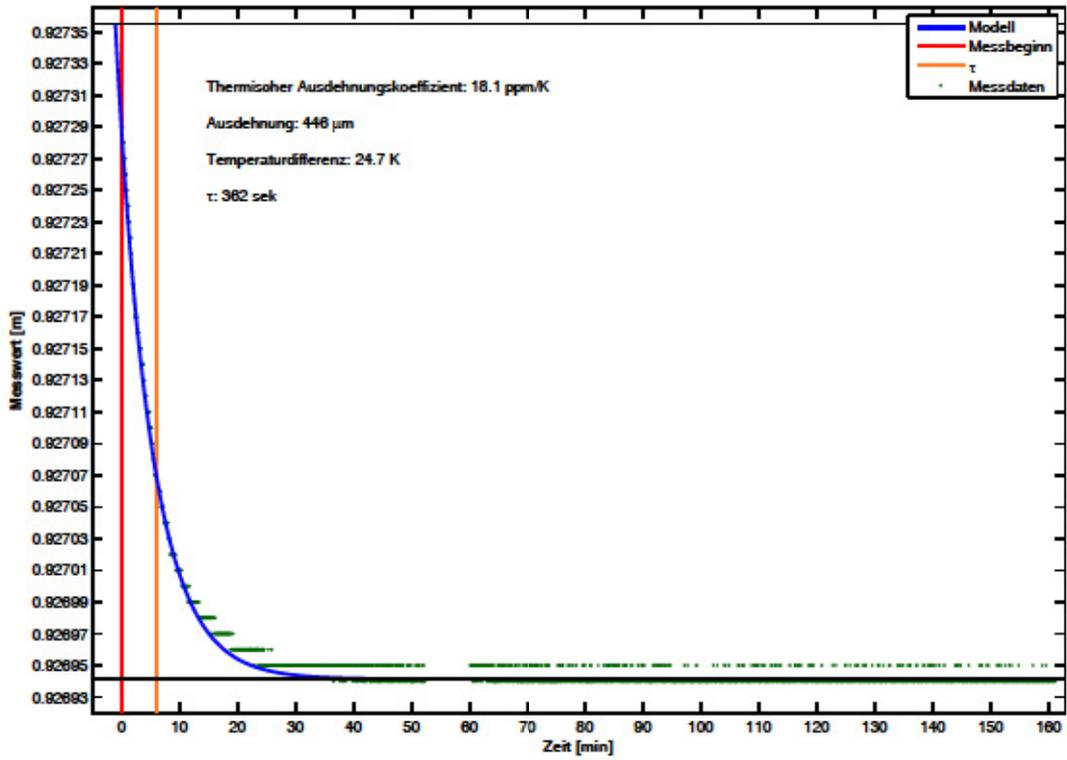


Abbildung C-12: Tempsprung Latte „Trimble TD24“, Job-Nr.: 12

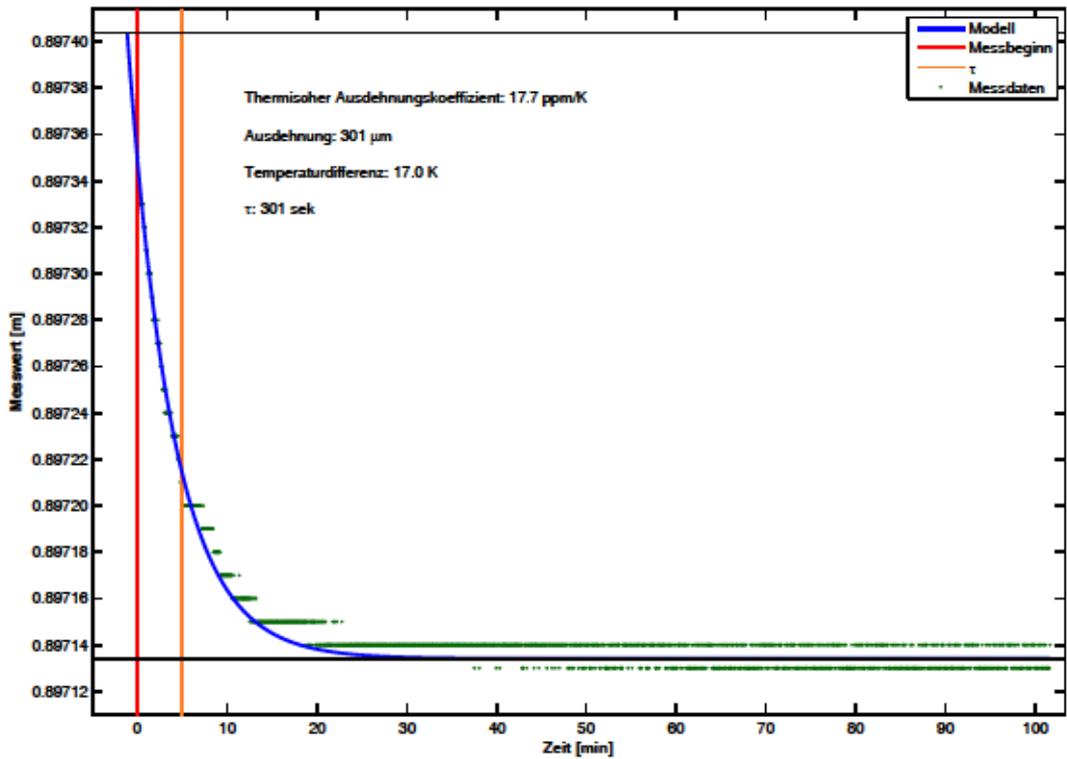


Abbildung C-13: Tempsprung Latte „Sokkia BAS55“, Job-Nr.: 7

Anhang D: Systemüberprüfung

Abbildung D-1 zeigt beispielhaft einen Plot der Messungen.

In den Abbildungen D-2 bis D-25 sind grafische Darstellungen der Messungen der Systemüberprüfung, der Untersuchung des Nullpunktfehlers und der Reproduzierbarkeit der Stoßstellen (siehe Kapitel 9, 7 und 5) ohne weitere Interpretation zu sehen.

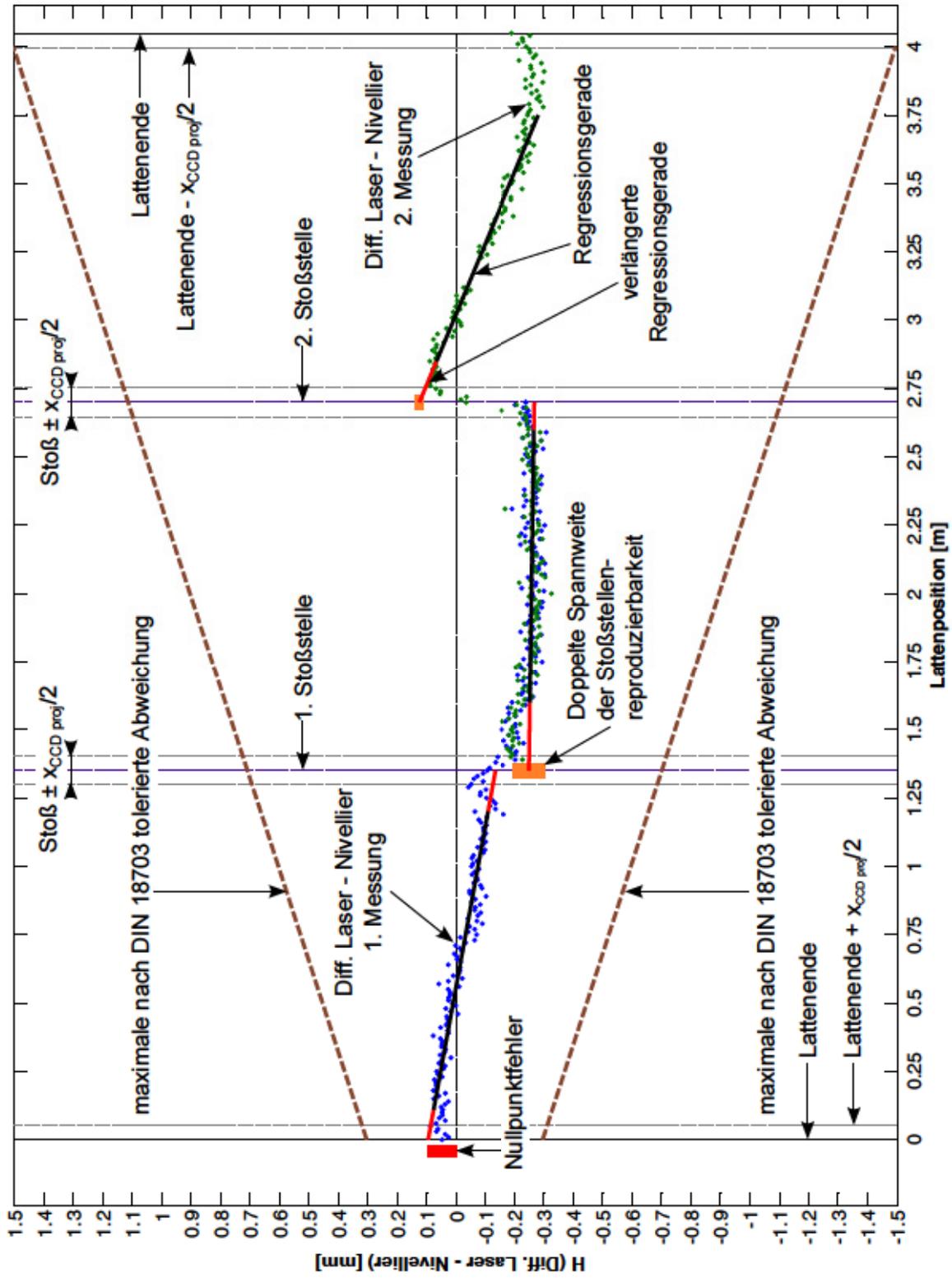


Abbildung D-1: Erklärender Beispielplot (Latte „Leica GKNL4M-2“), Job Nr.: 1479 / 1480

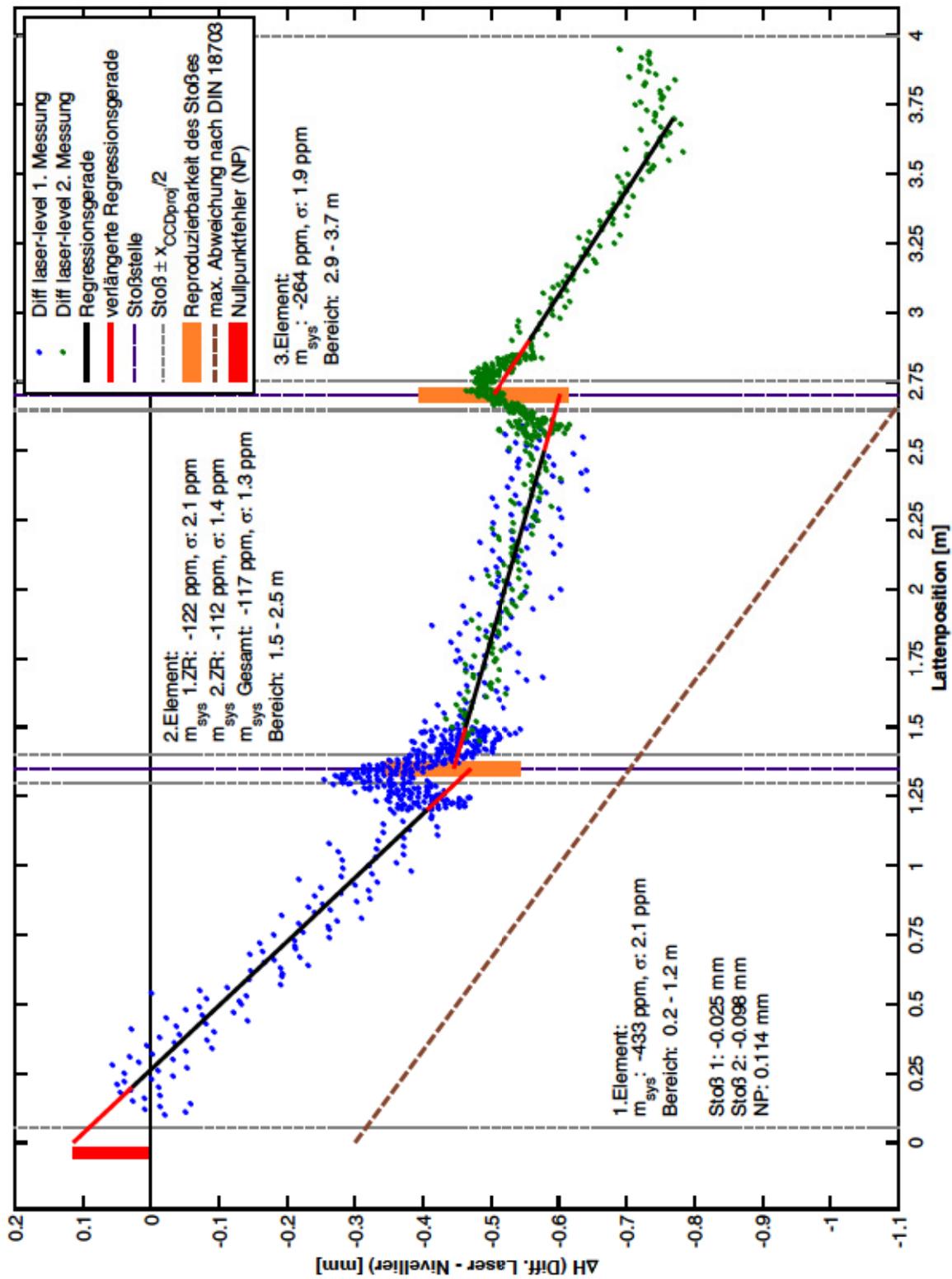


Abbildung D-2: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-1“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1474 / 1473

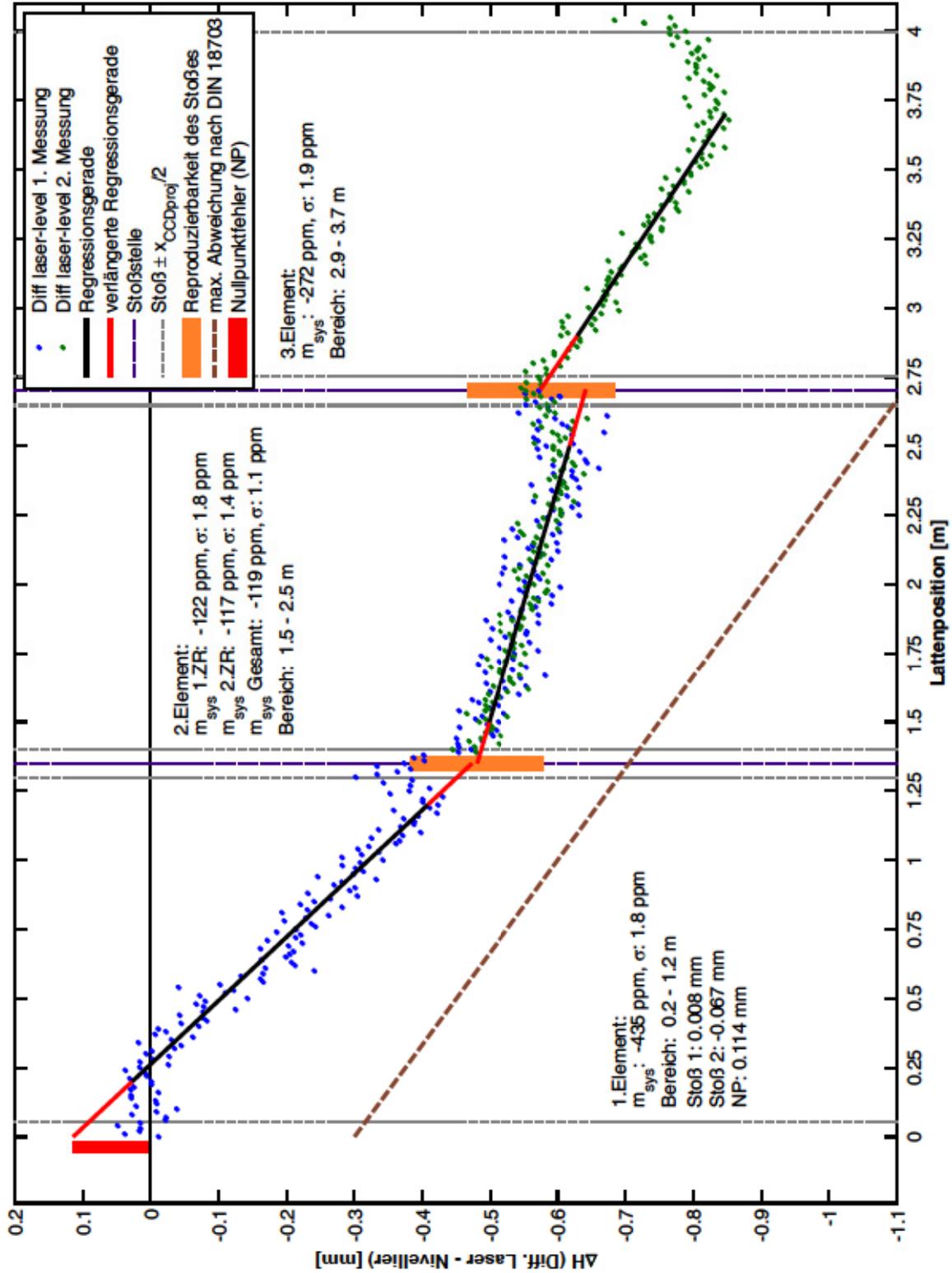


Abbildung D-3: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-1“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1504 / 1503

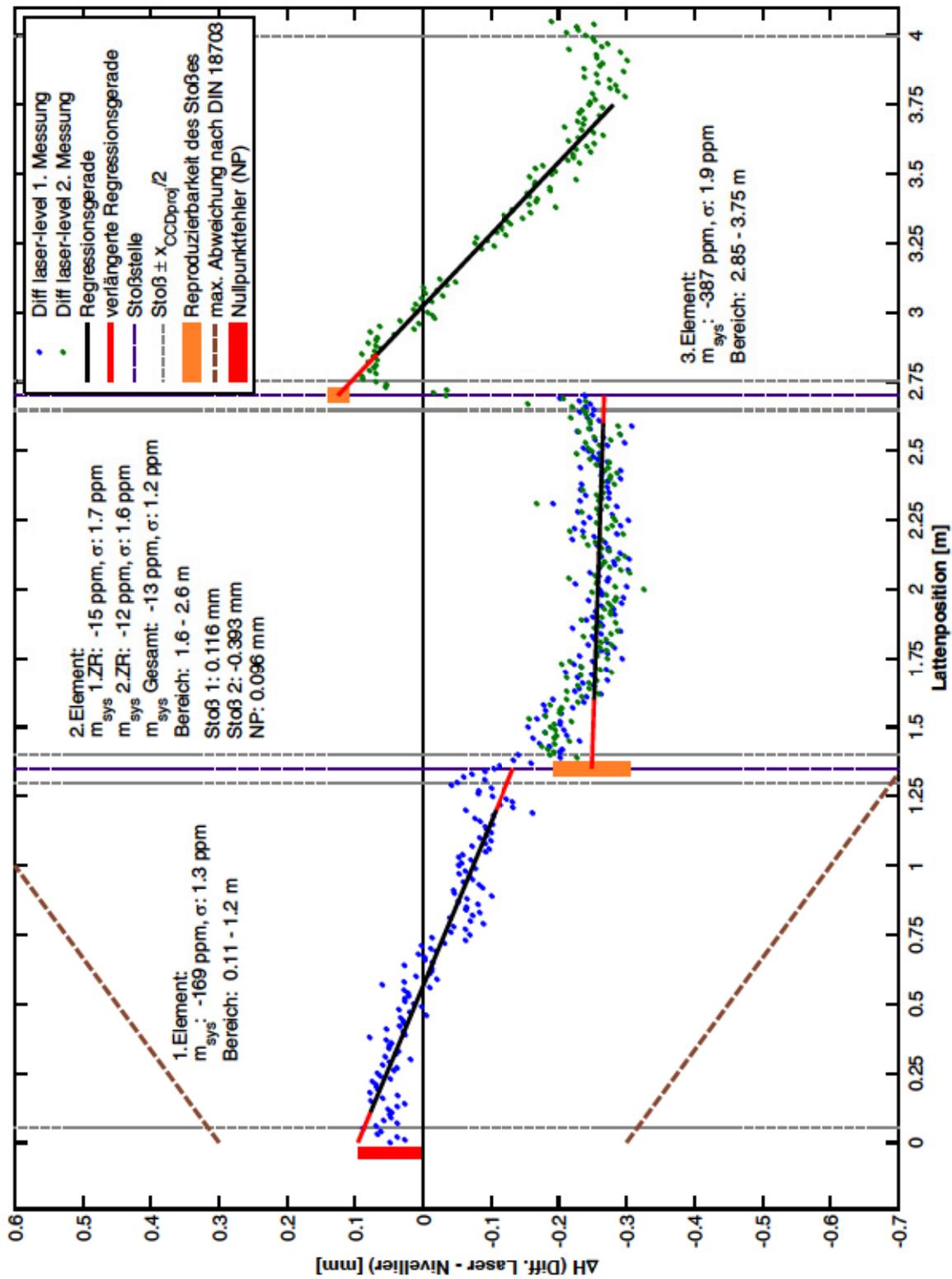


Abbildung D-4: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Wild GKNL4M-2“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1489 / 1490

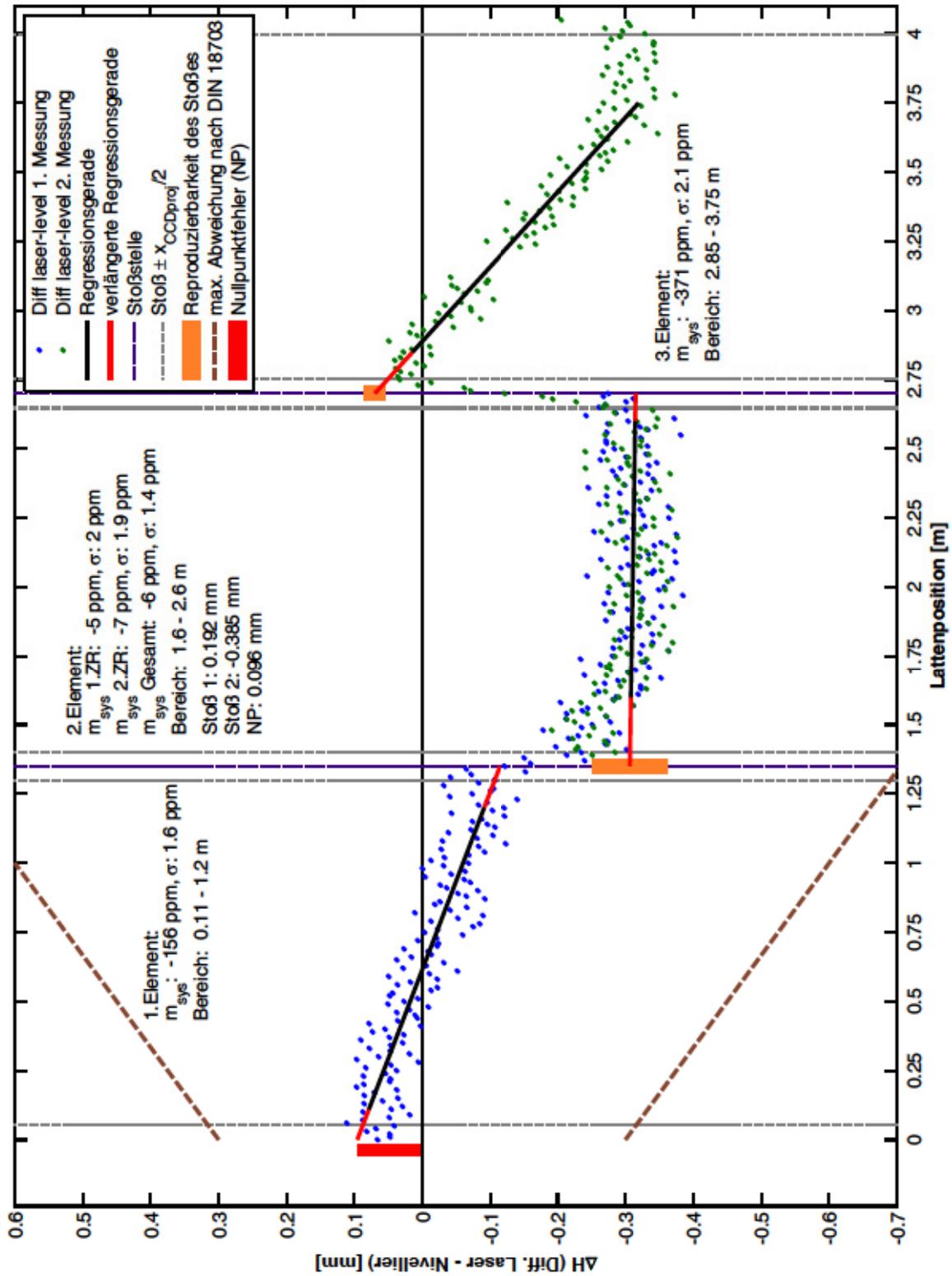


Abbildung D-5: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Wild GKNL4M-2“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1562 / 1560

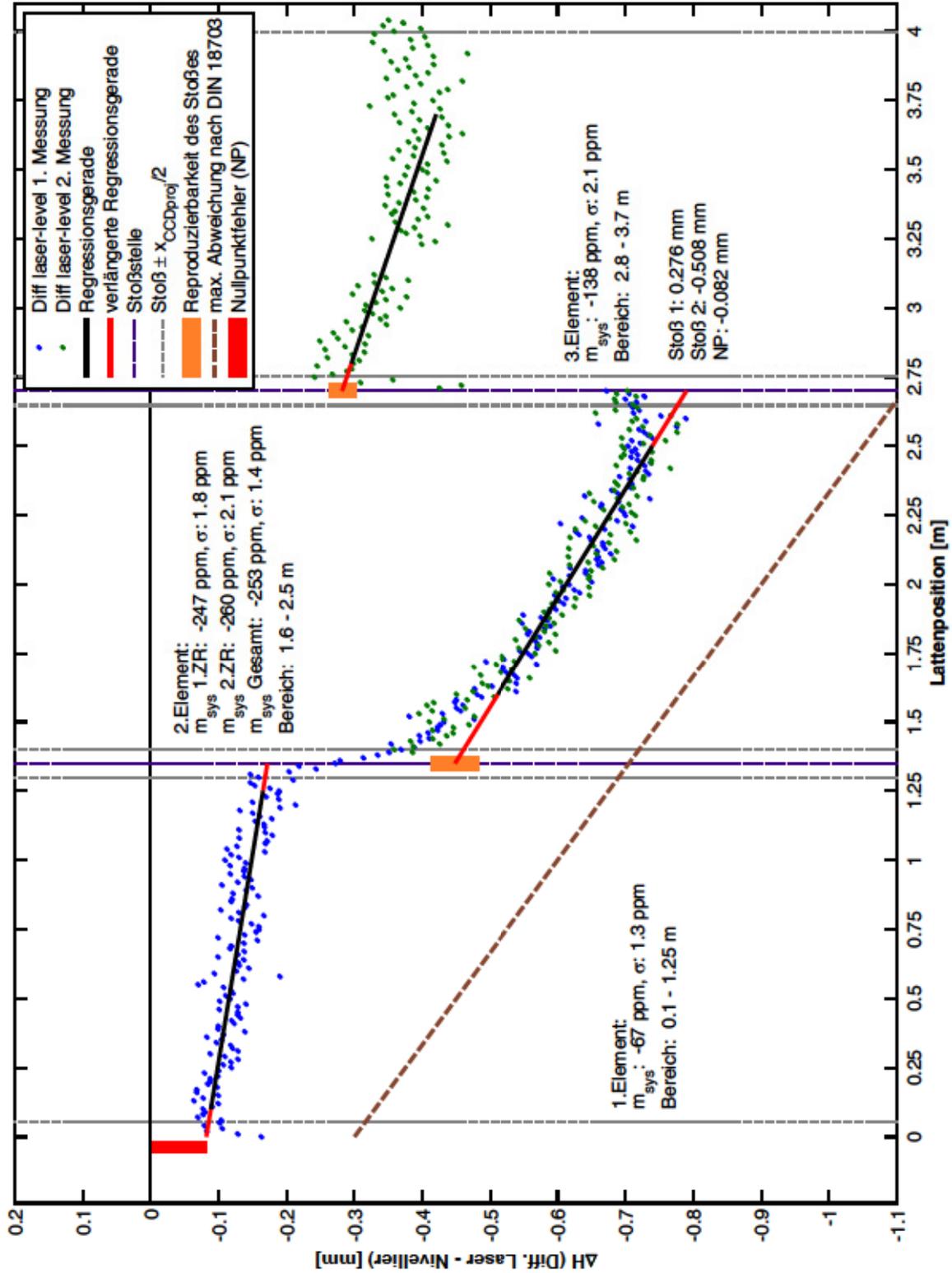


Abbildung D-6: Latteüberprüfung Wild NA3000 / „Wild GKNL4M-3“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1482 / 1484

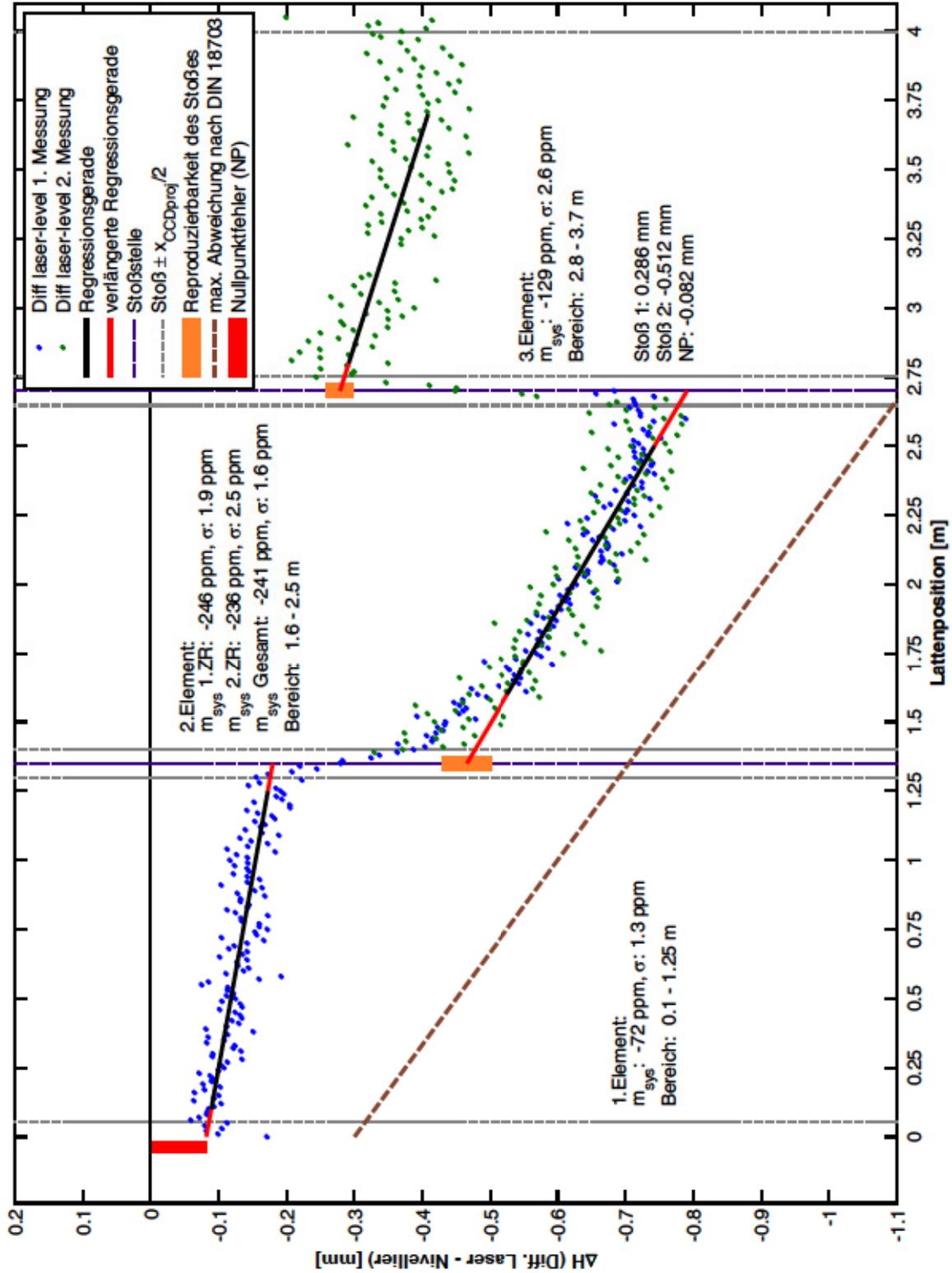


Abbildung D-7: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Wild GKNL4M-3“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1543 / 1545

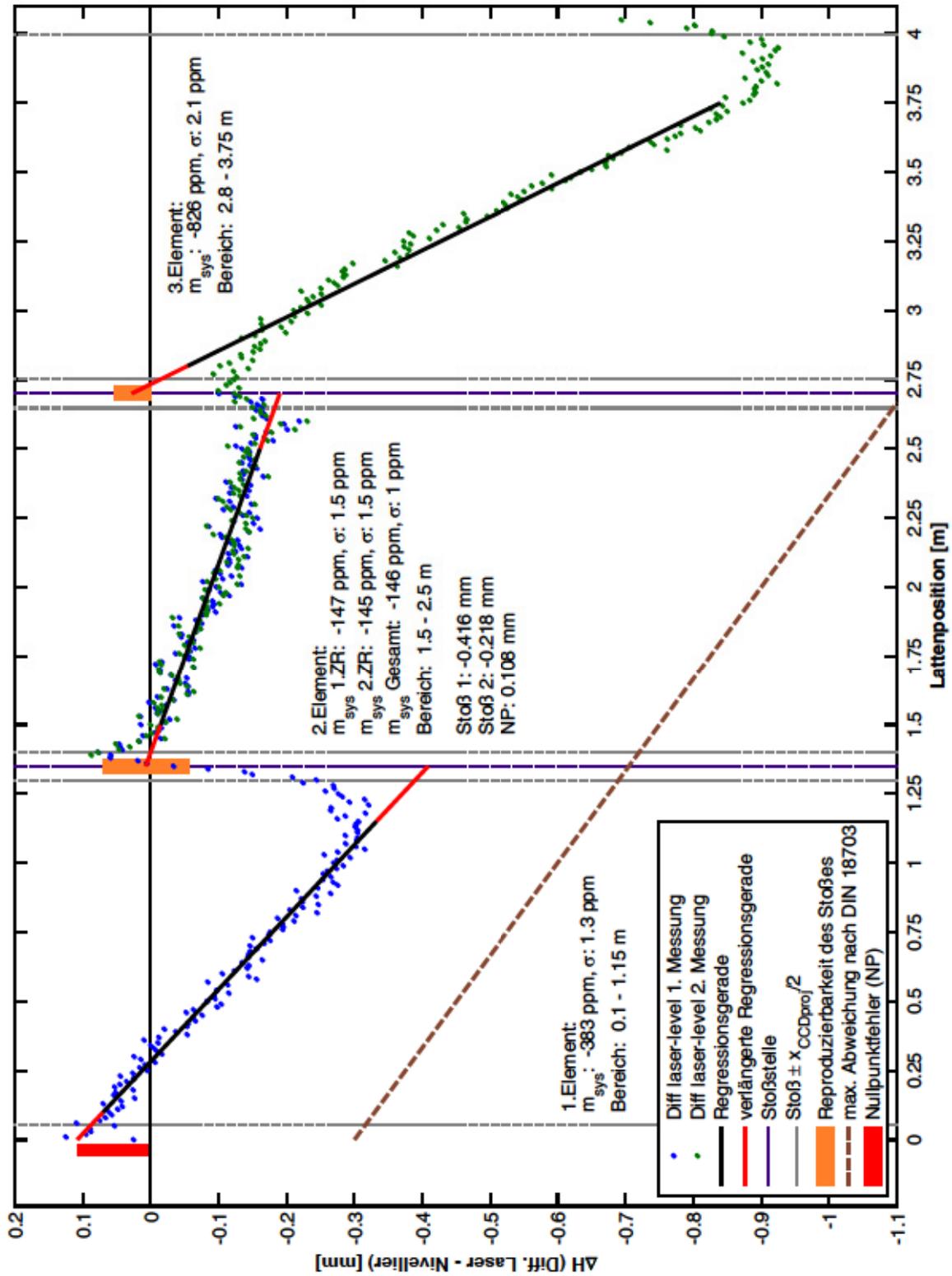


Abbildung D-8: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-4“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1487 / 1488

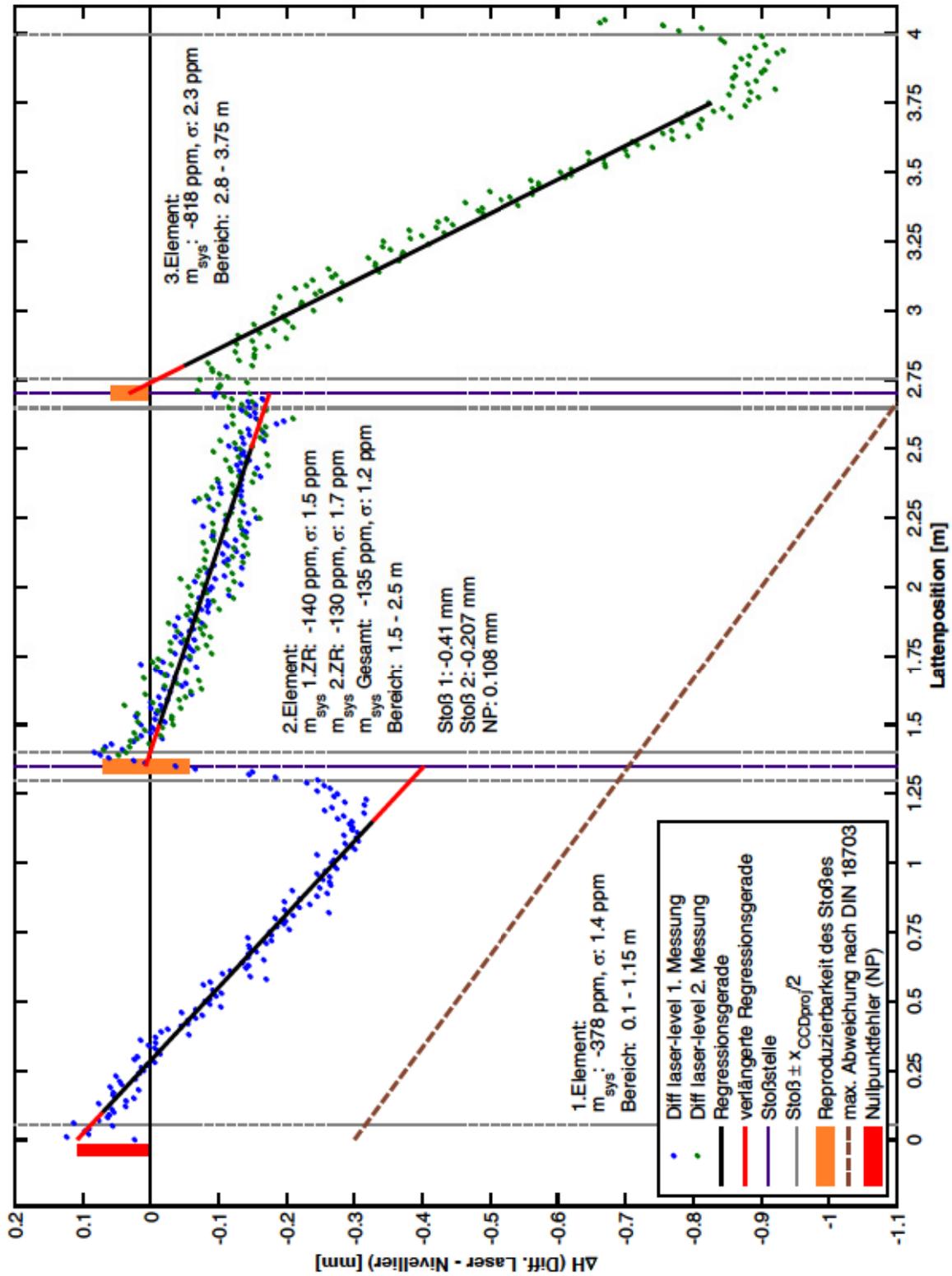


Abbildung D-9: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-4“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1554 / 1561

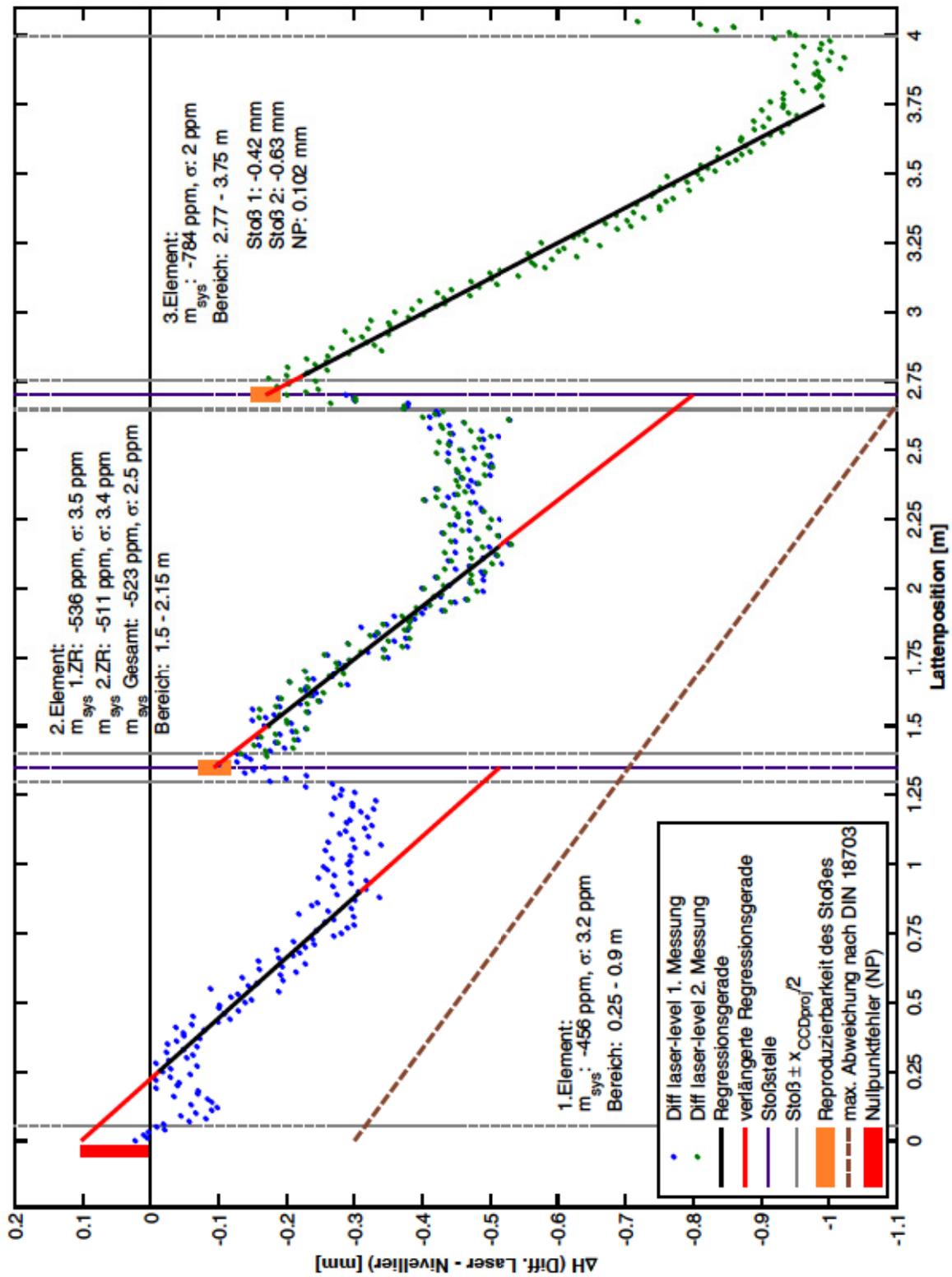


Abbildung D-10: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-5“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1485 / 1486

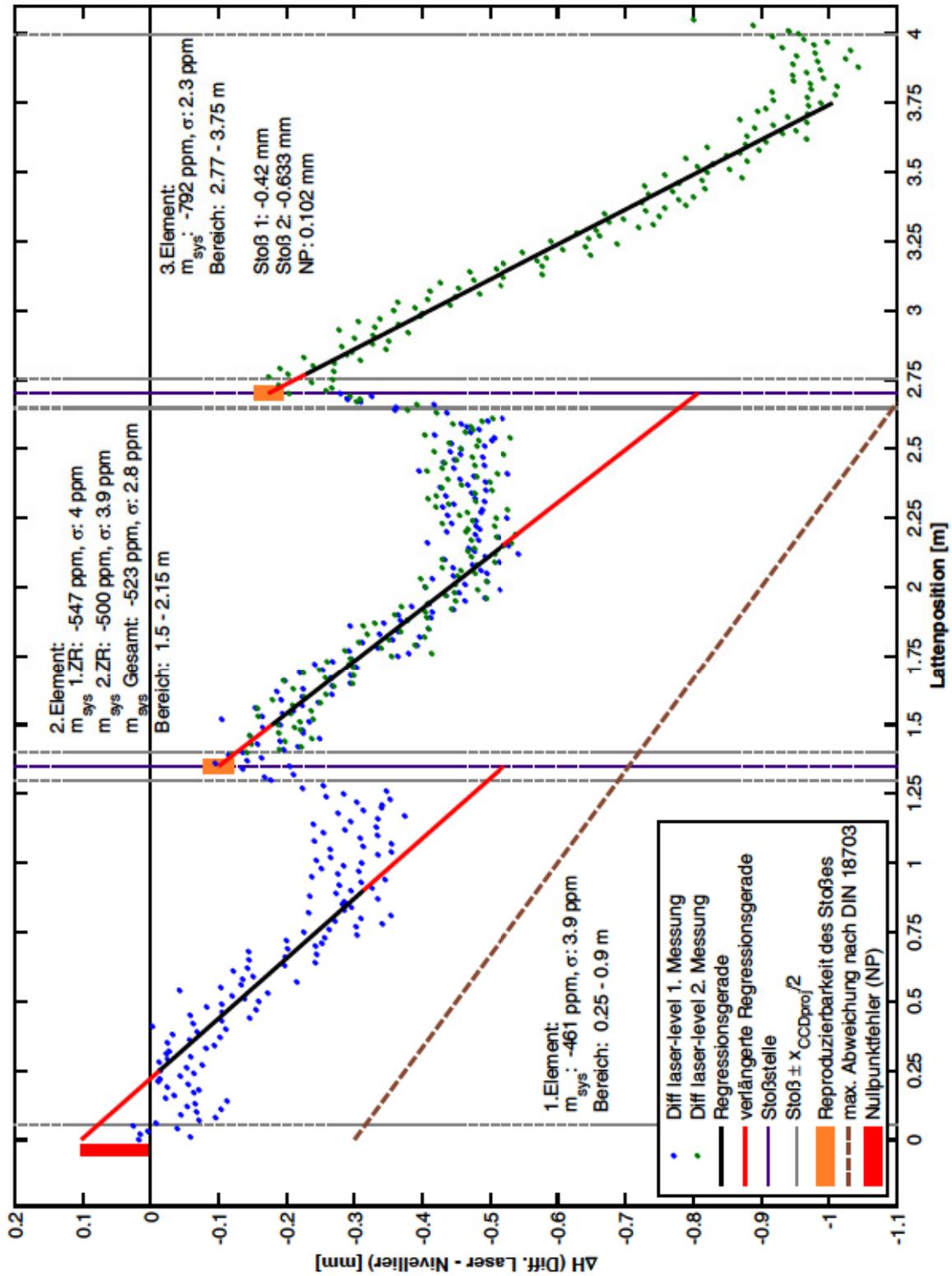


Abbildung D-11: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-5“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1546 / 1547

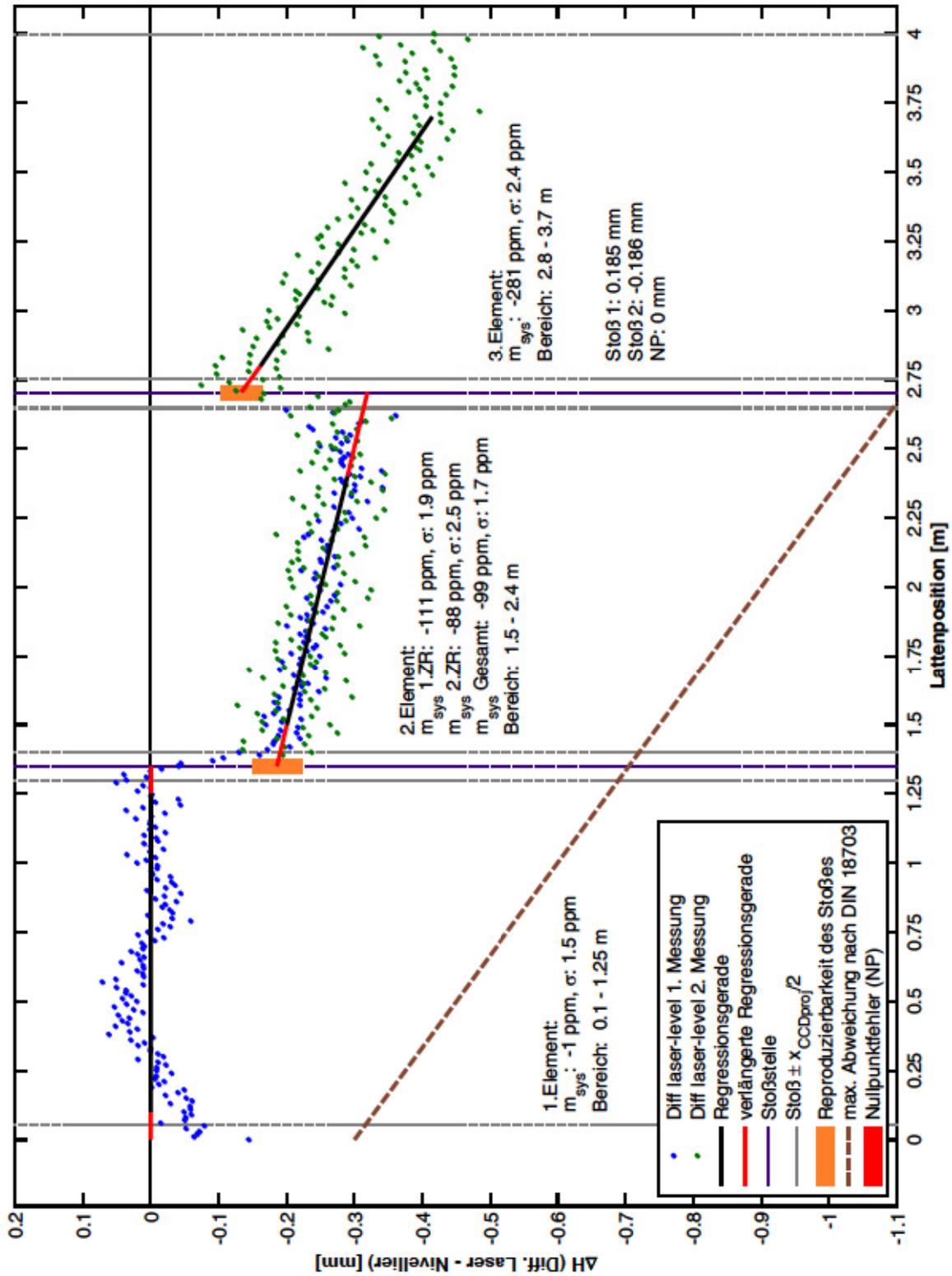


Abbildung D-12: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-6“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1475 / 1478

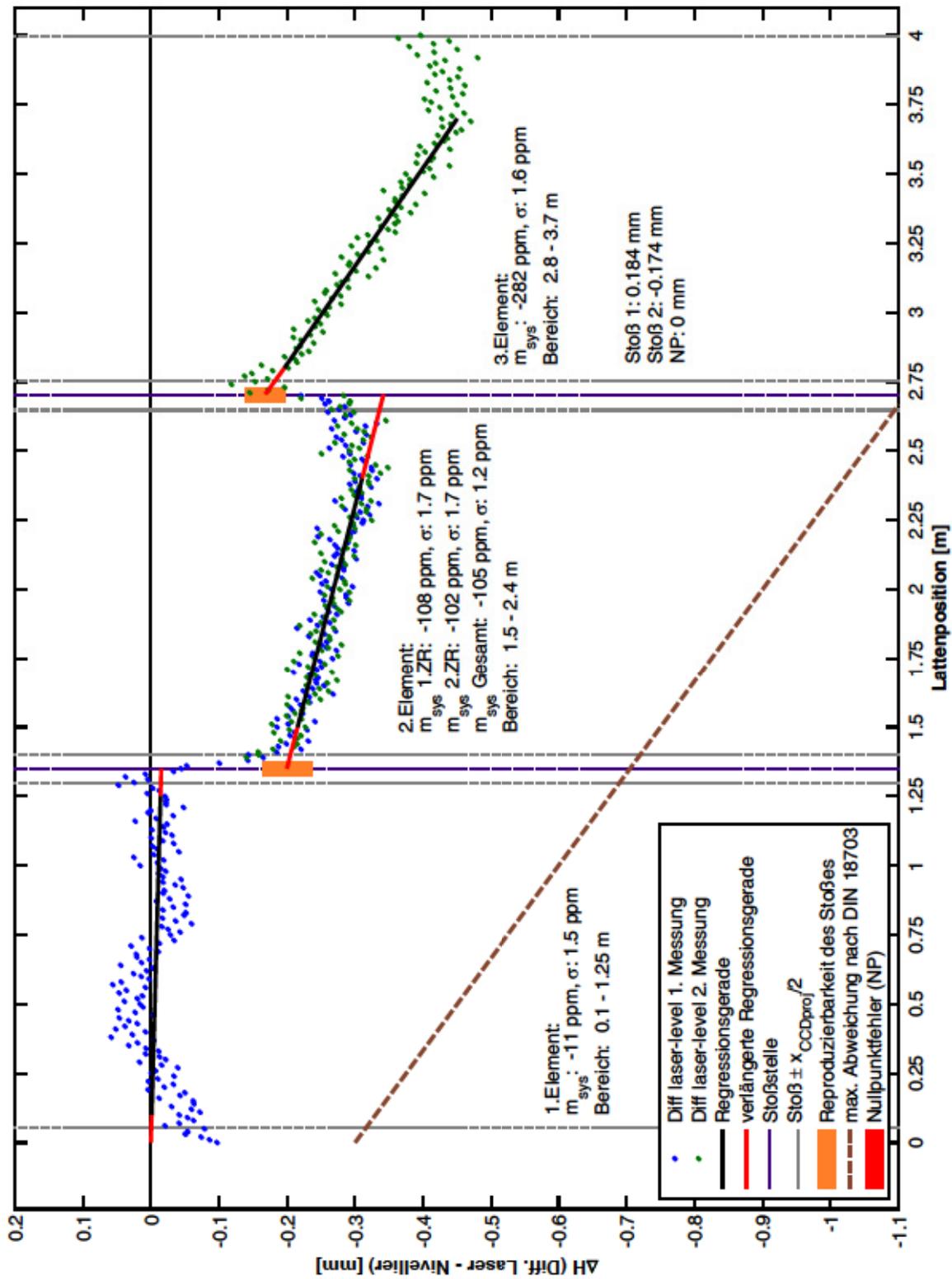


Abbildung D-13: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M-6“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1480 / 1481

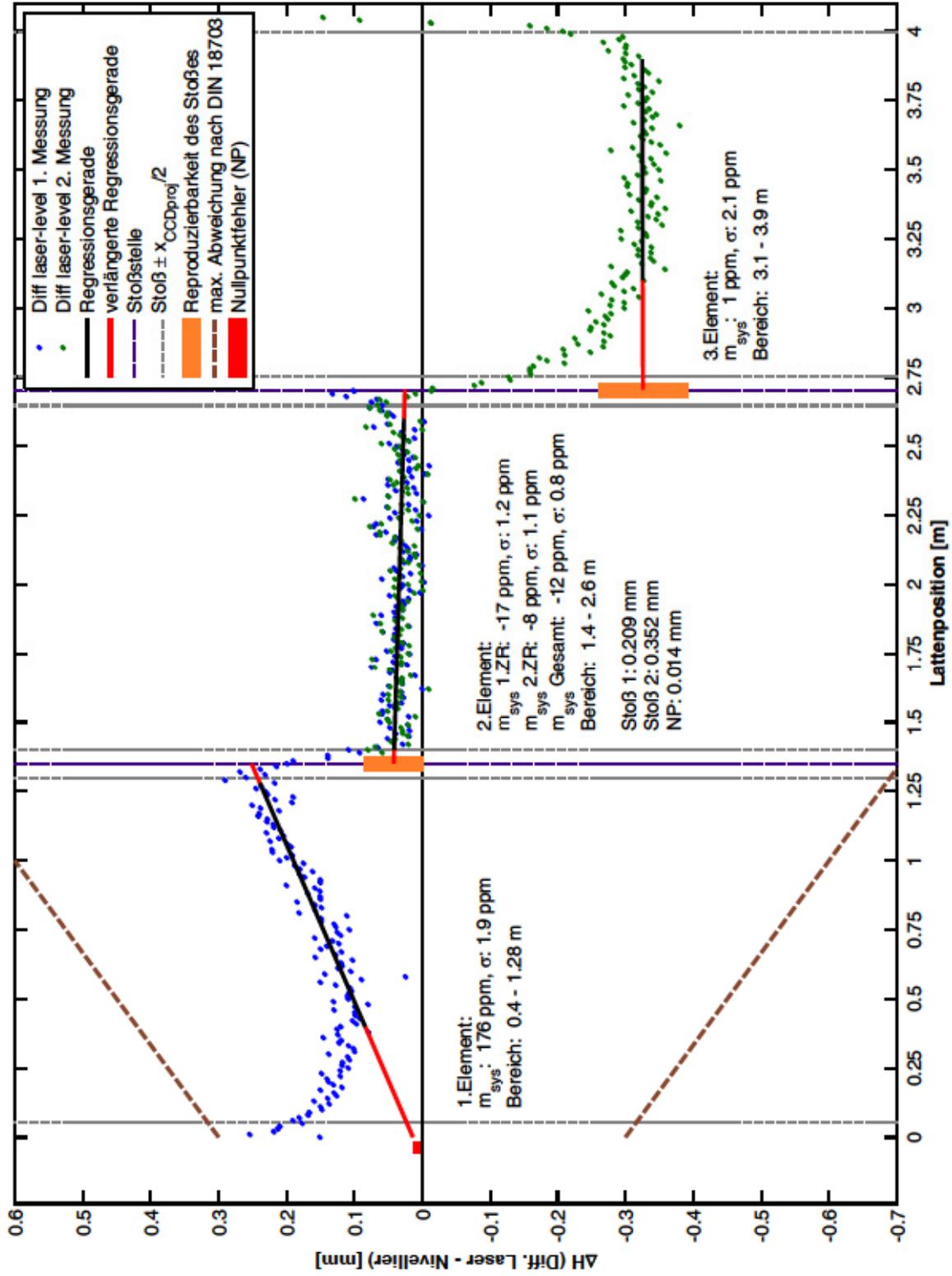


Abbildung D-14: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M Neu 1“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1495 / 1496

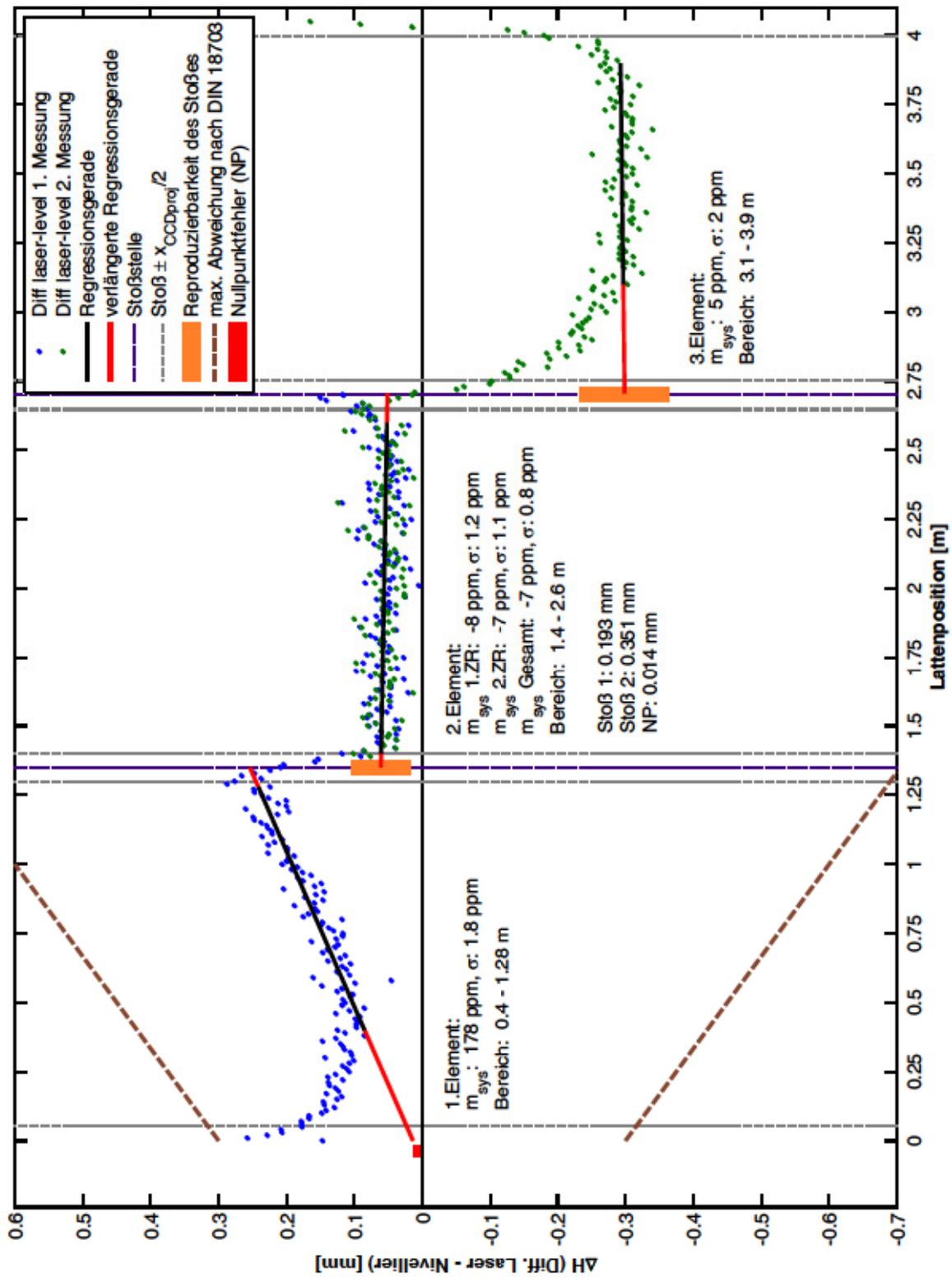


Abbildung D-15: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M Neu 1“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1499 / 1501

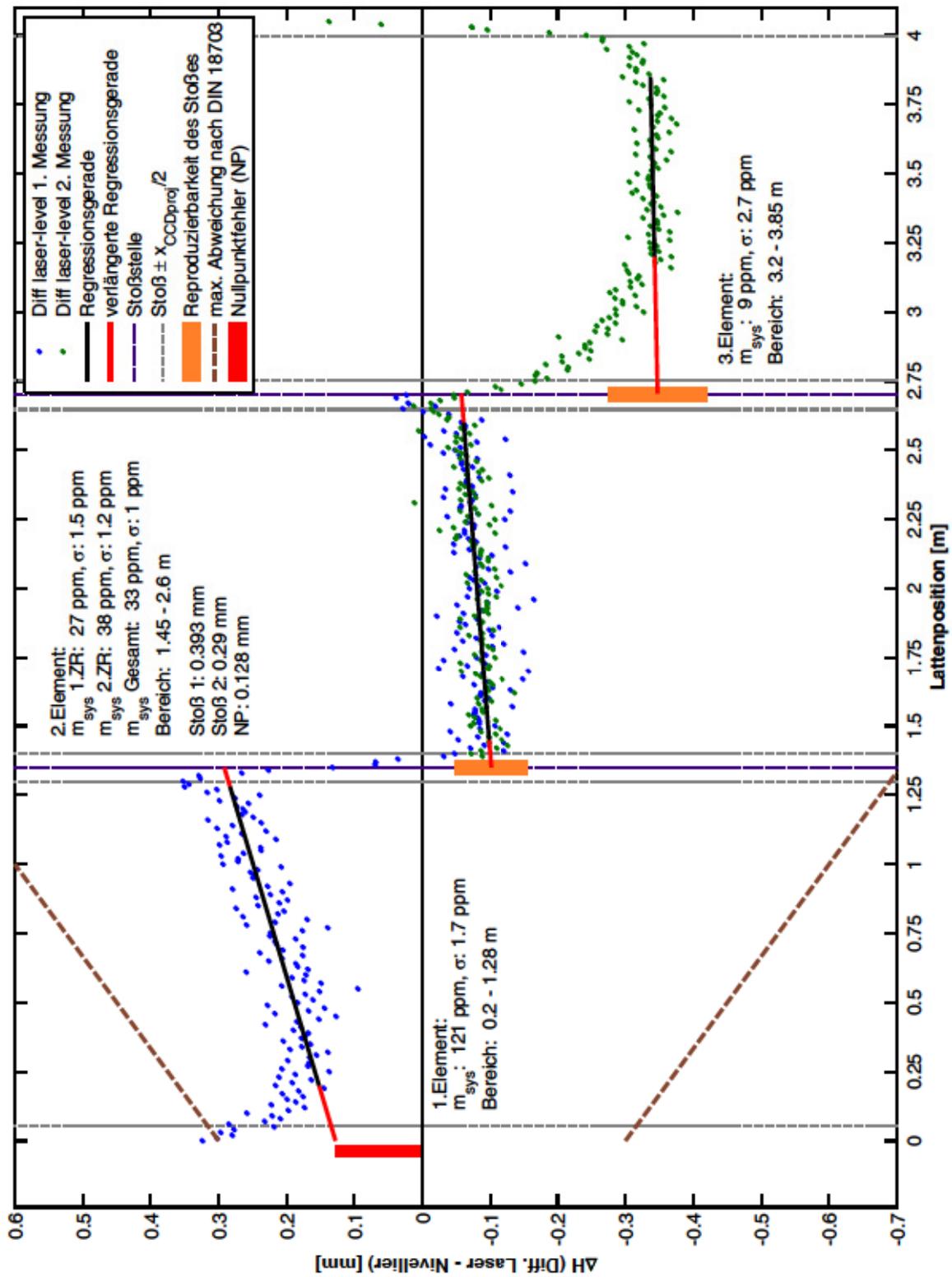


Abbildung D-16: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M Neu 2“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1497 / 1498

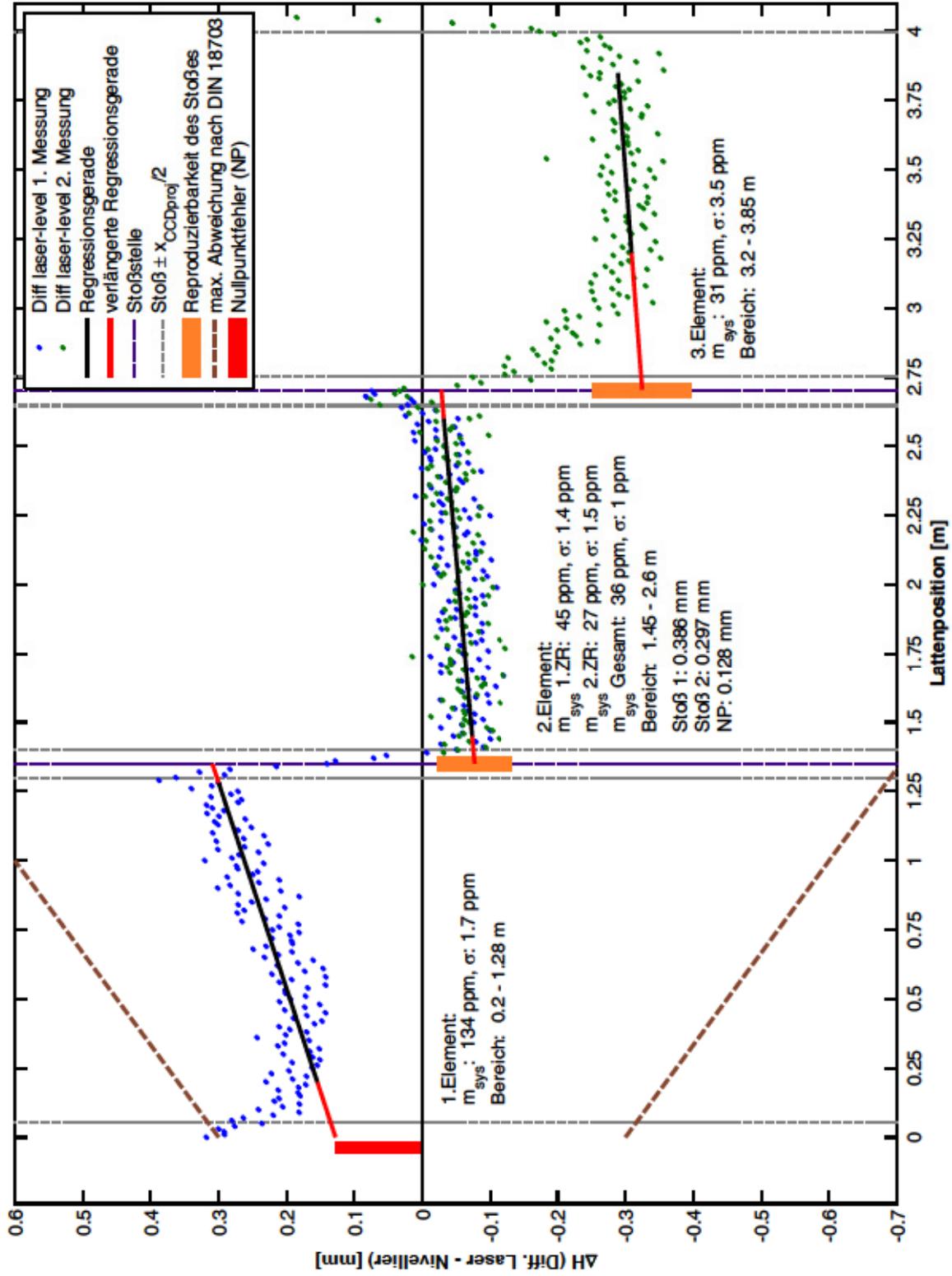


Abbildung D-17: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GK4M Neu 2“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1500 / 1502

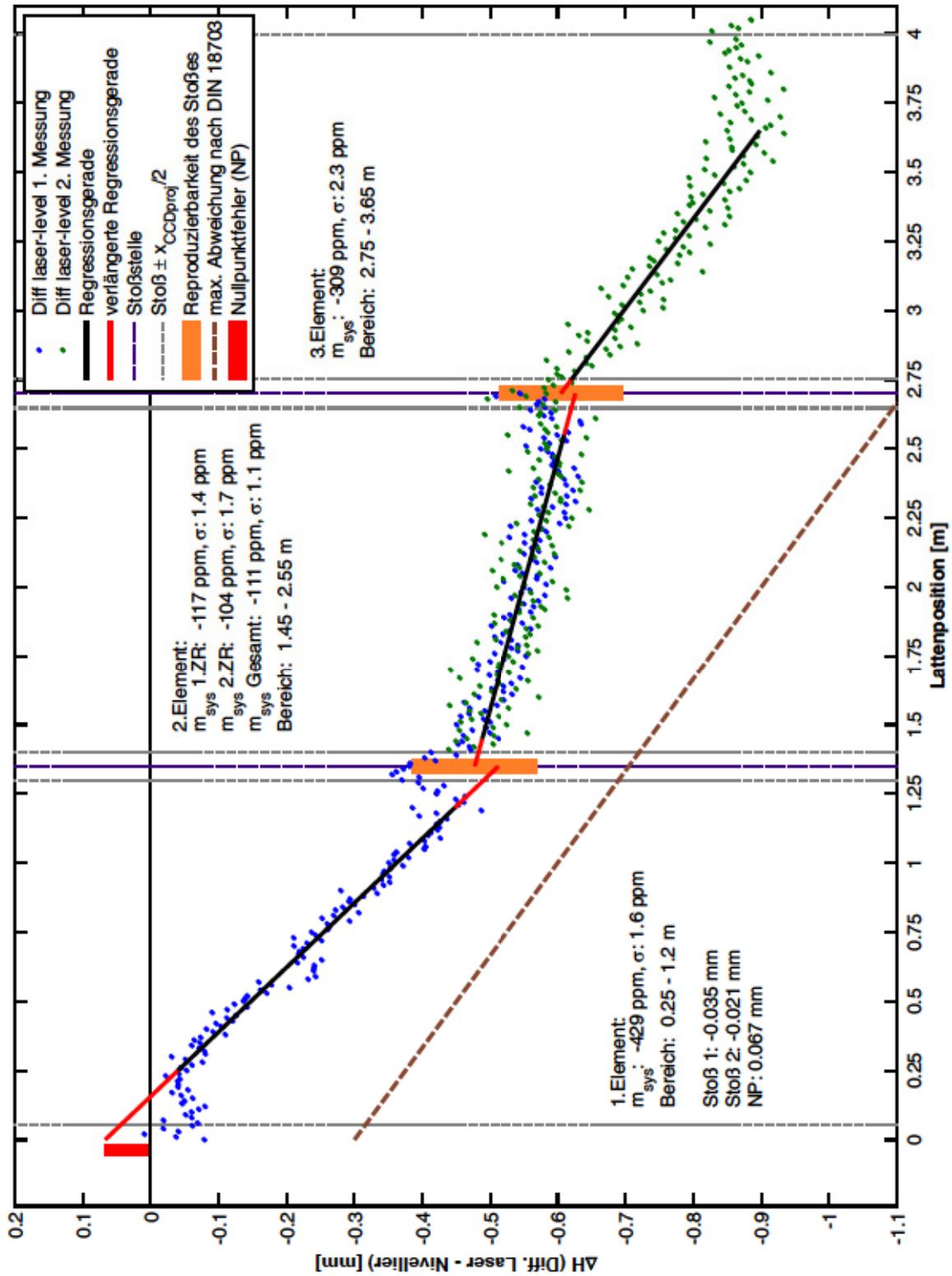


Abbildung D-18: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M Gebraucht 1“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1527 / 1529

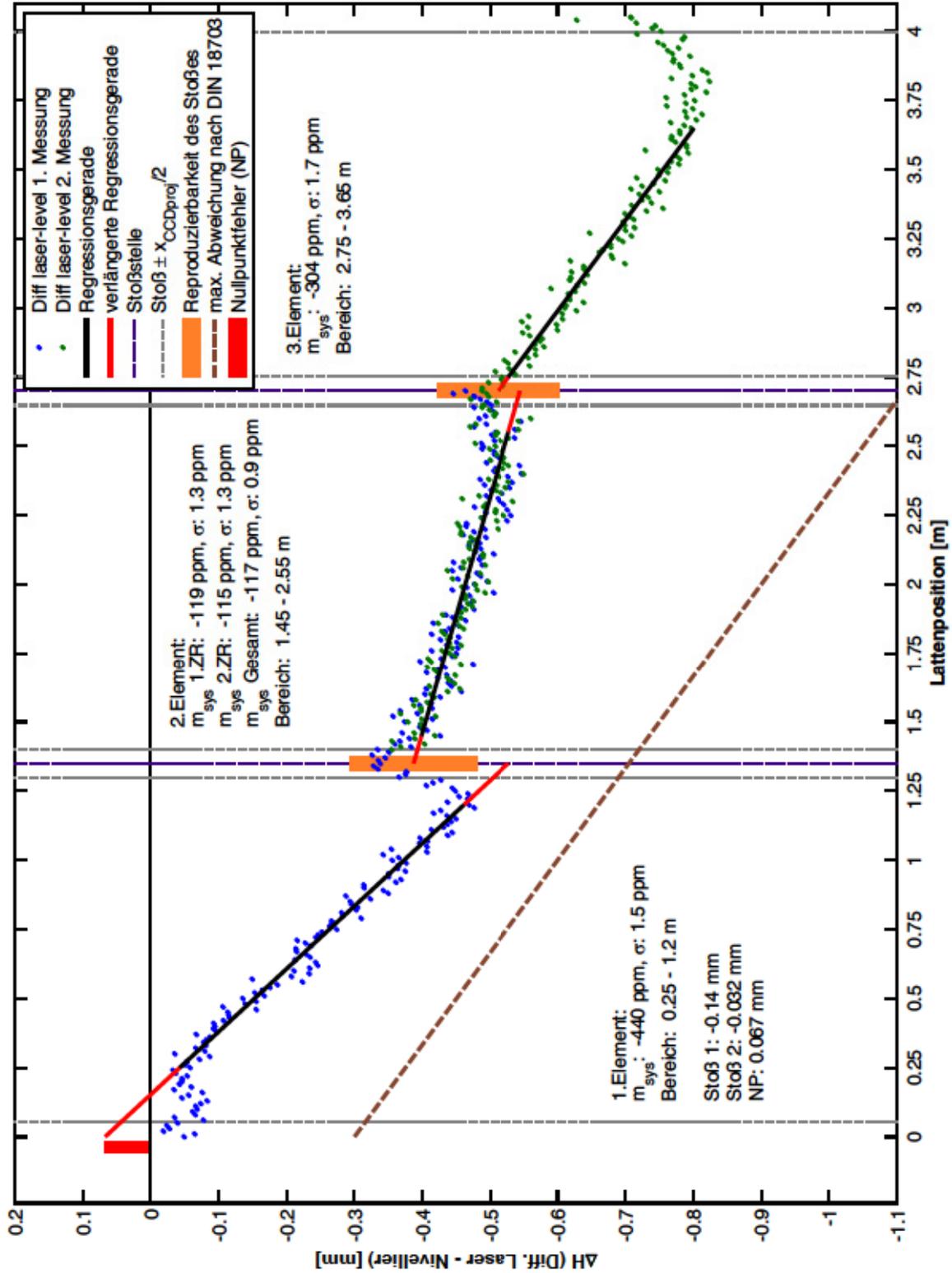


Abbildung D-19: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Leica GKNL4M Gebrauch 1“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1540 / 1542

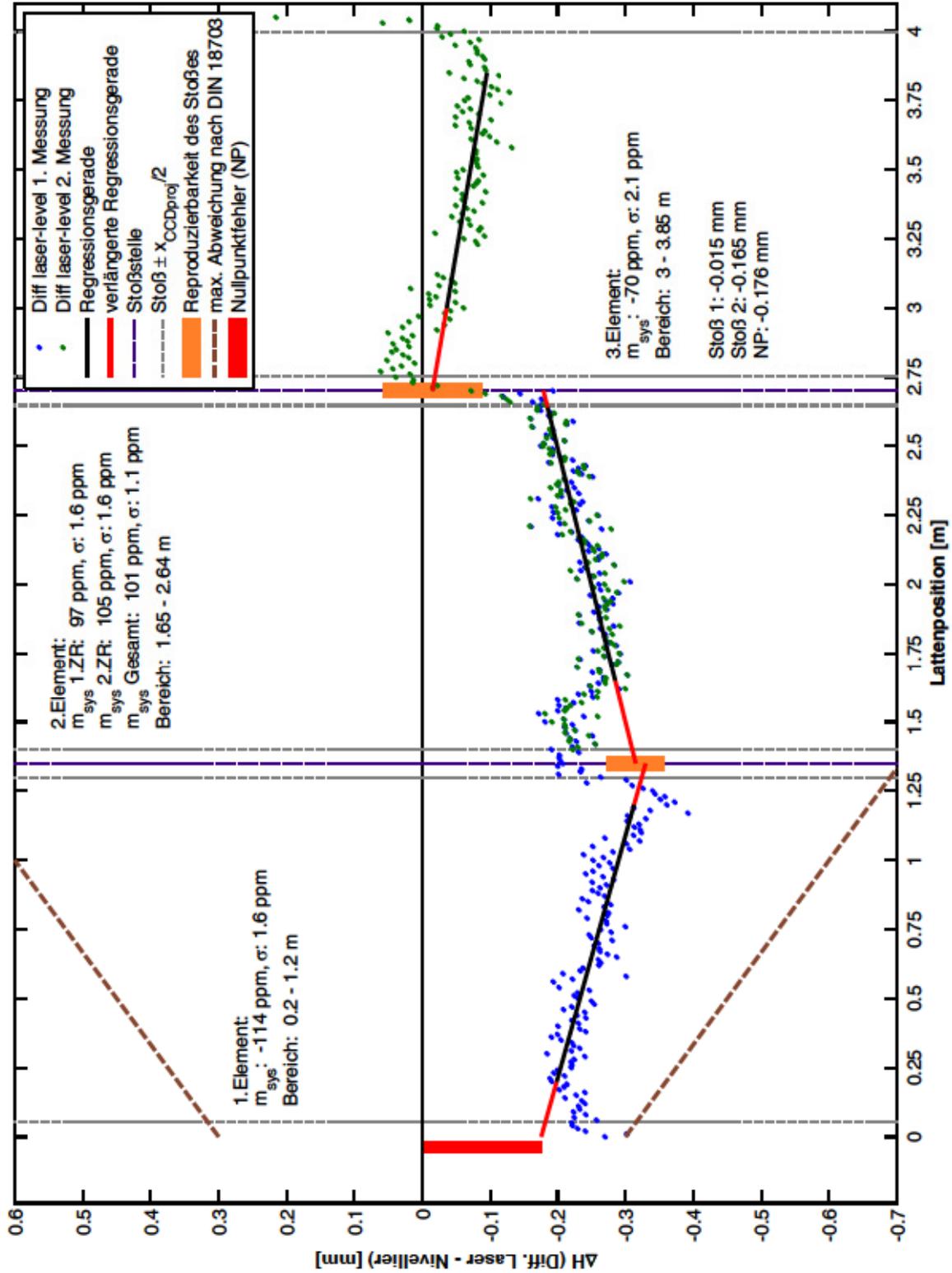


Abbildung D-20: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Wild GKNL4M Gebrauch 2“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1526 / 1528

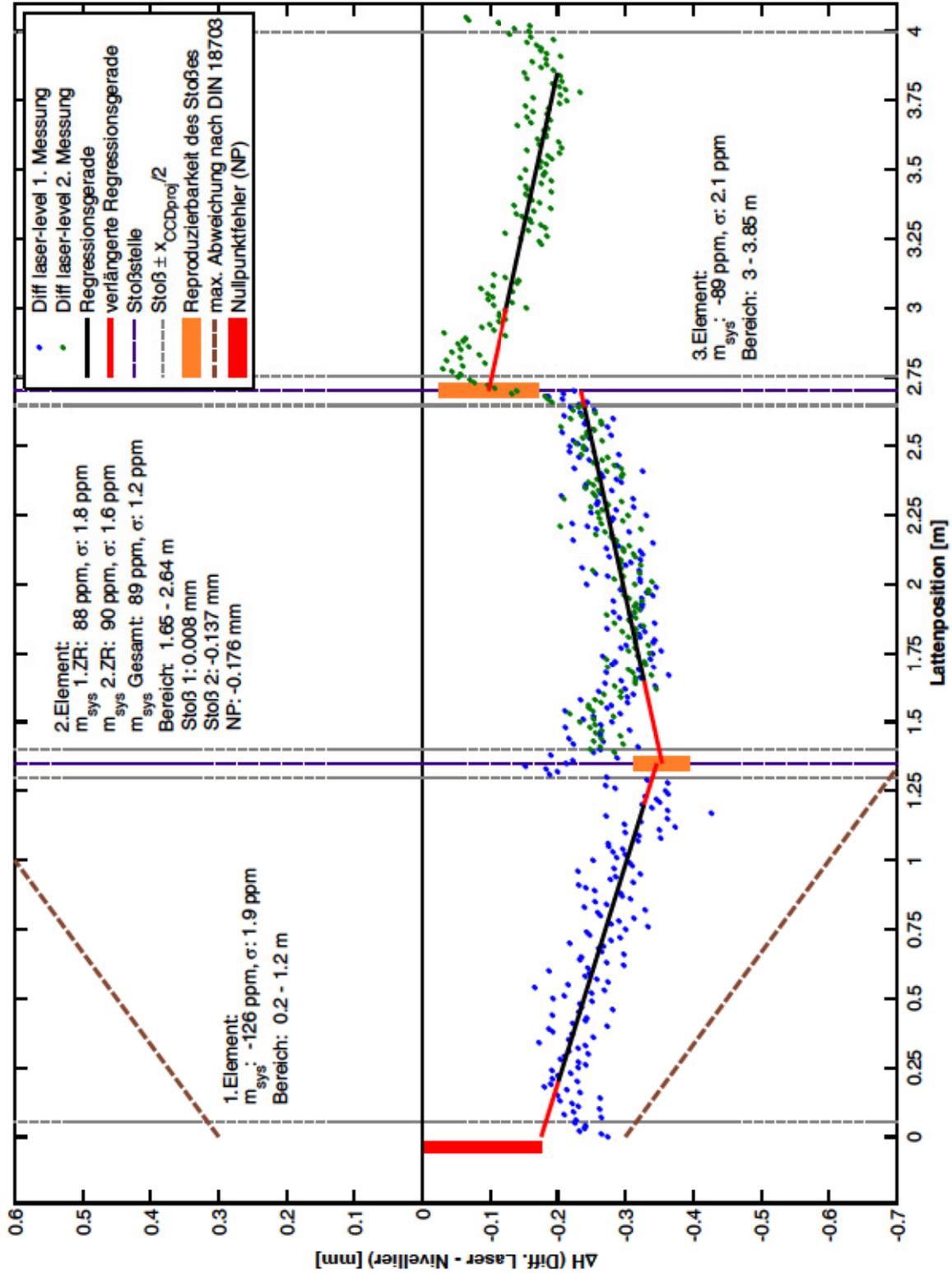


Abbildung D-21: Lattenüberprüfung Wild NA3000 / „Wild GKNL4M Gebrauch 2“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1539 / 1541

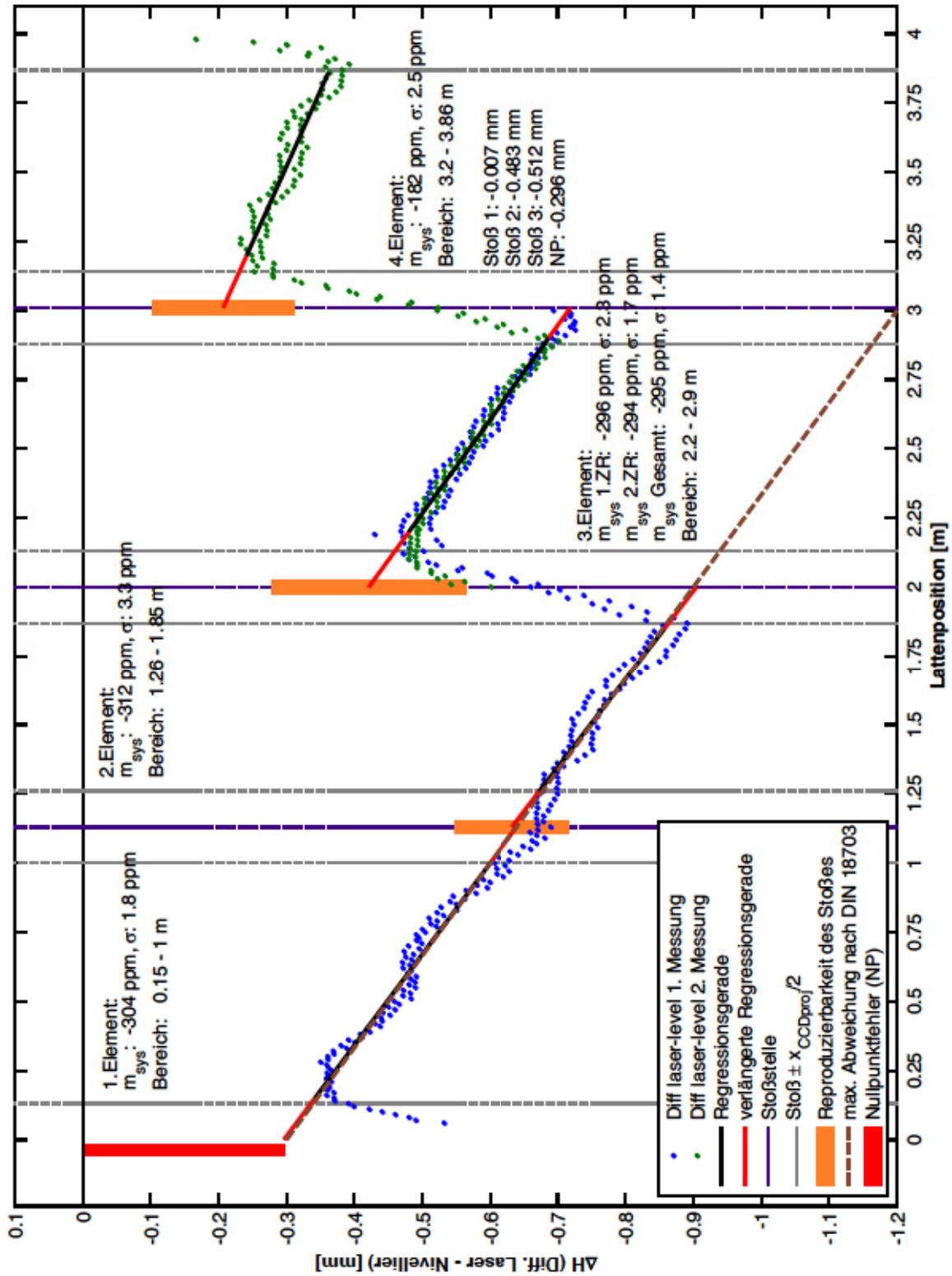


Abbildung D-22: Lattenüberprüfung Trimble DiNi12 / „Trimble TD24“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1491 / 1493

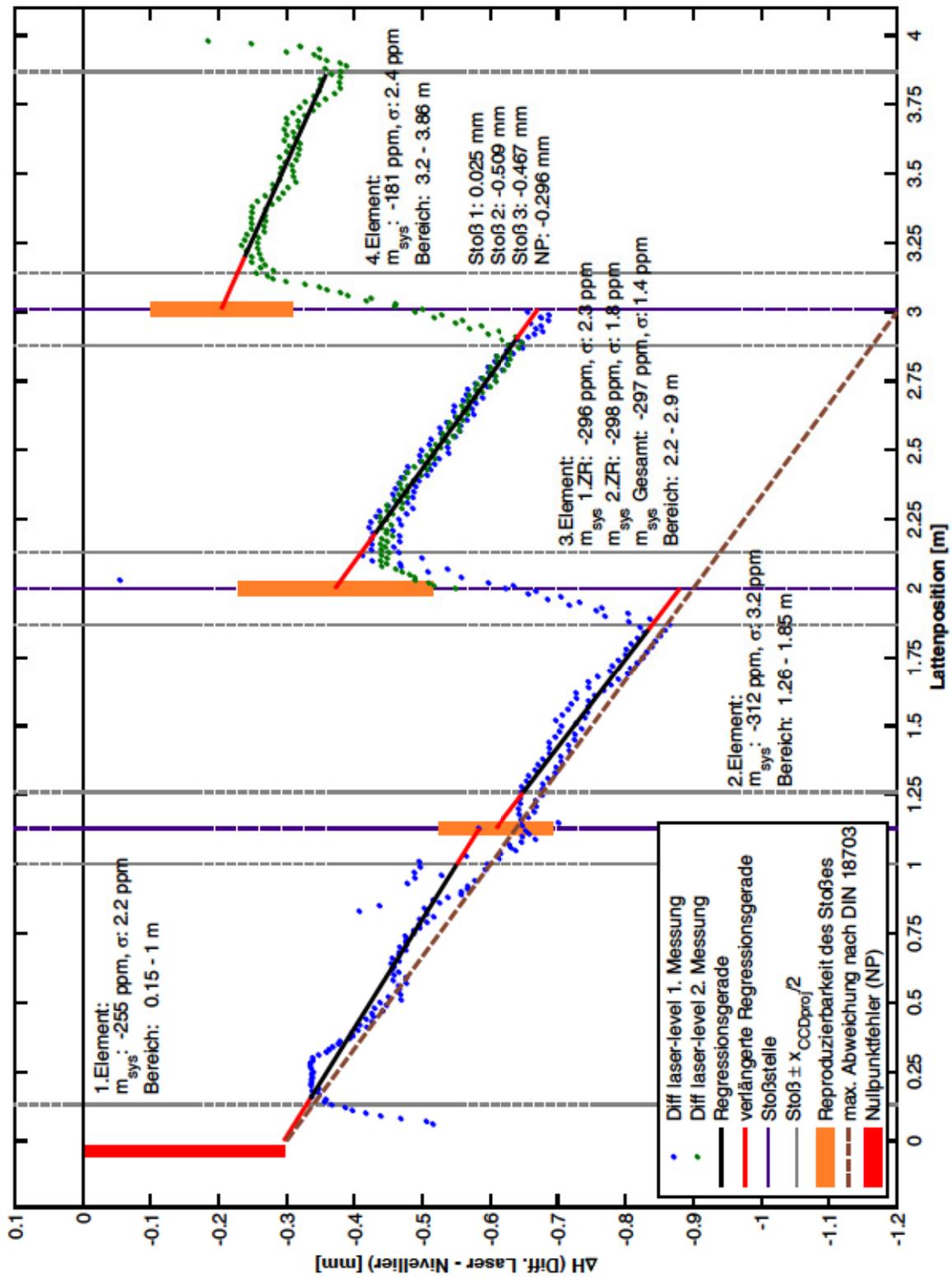


Abbildung D-23: Lattenüberprüfung Trimble DiNi12 / „Trimble TD24“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1492 / 1494

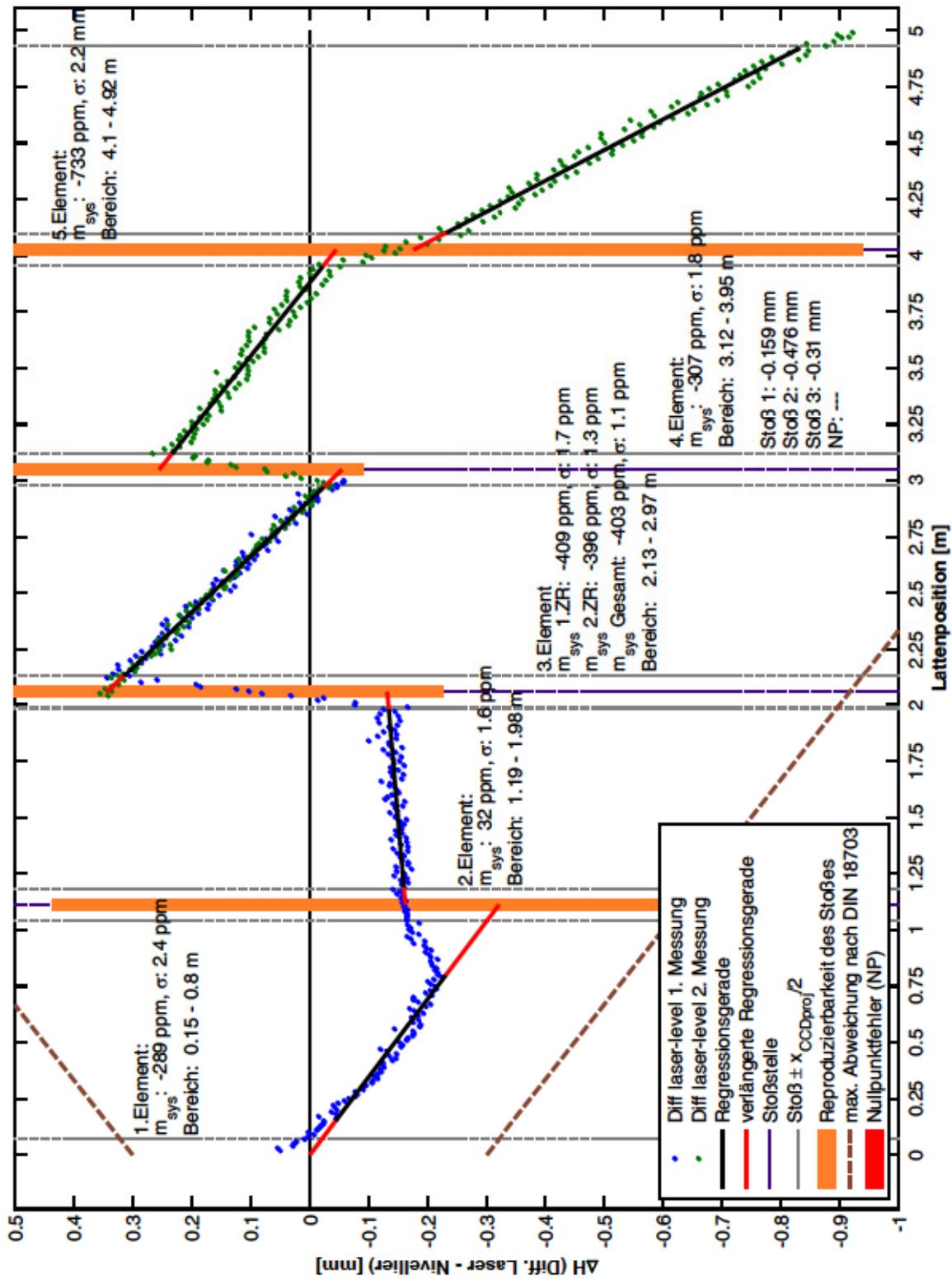


Abbildung D-24: Lattenüberprüfung Sokkia SDLIX / „Sokkia BAS55“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1512 / 1513

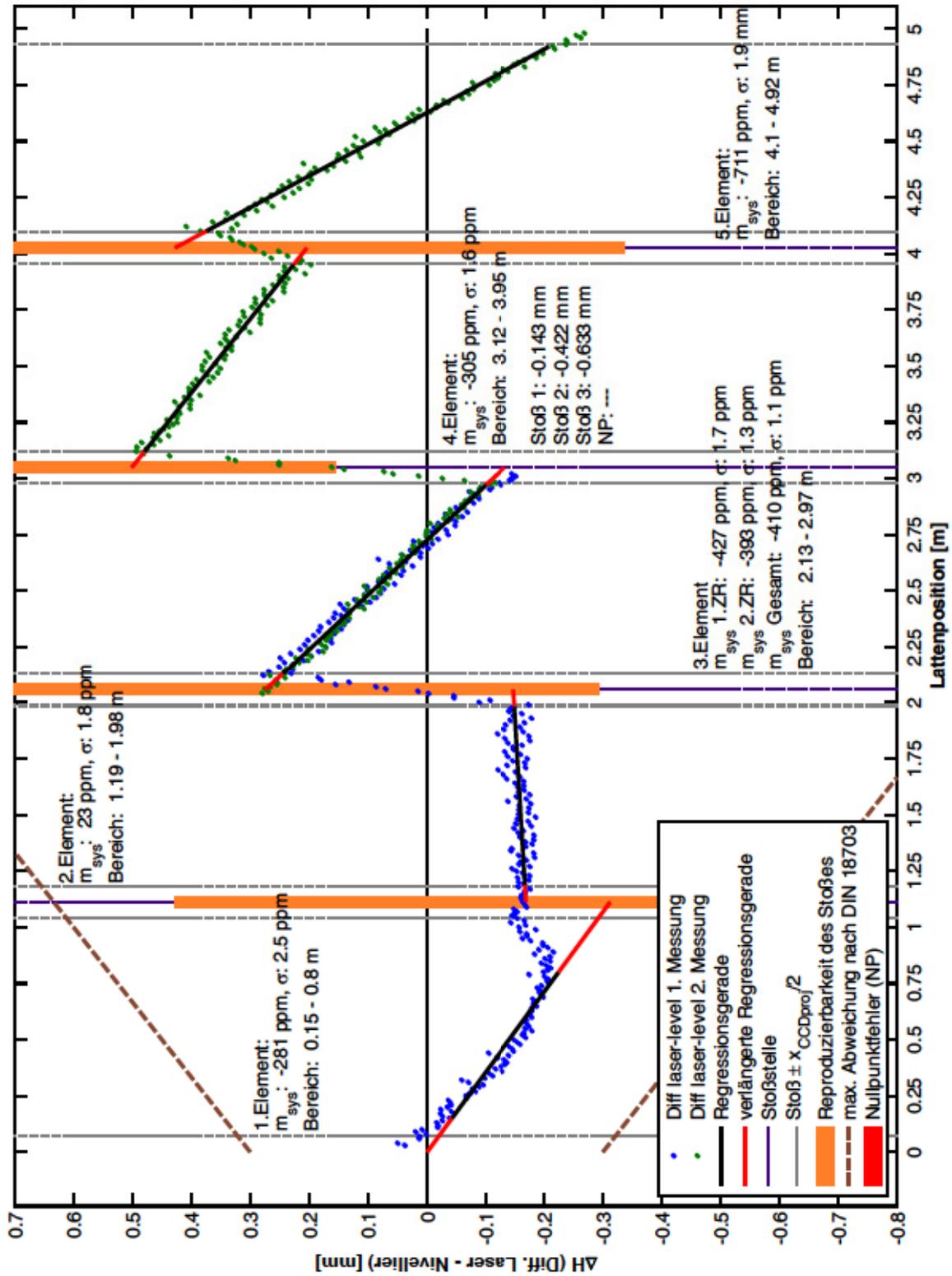


Abbildung D-25: Lattenüberprüfung Sokkia SDLIX / „Sokkia BAS55“, Distanz: 3 m, Job Nr.: 1523 / 1514

Anhang E: Versuchsübersicht

Die Tabellen E-1 bis E-4 zeigen Auflistungen der durchgeführten Versuchen zu verschiedenen Untersuchungen.

E.1 Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

Tabelle E-1: Durchgeführte Versuche zur Reproduzierbarkeit der Stoßstellen

Job Nr.	Latte	Latteteile	Datum
3	Leica GKNL4M-1	1 / 2	24.10.2011
4	Leica GKNL4M-1	2 / 3	27.10.2011
5	Wild GKNL4M-2	1 / 2	27.10.2011
6	Wild GKNL4M-2	2 / 3	27.10.2011
16	Wild GKNL4M-3	1 / 2	22.11.2011
17	Wild GKNL4M-3	2 / 3	22.11.2011
7	Leica GKNL4M-4	1 / 2	28.10.2011
8	Leica GKNL4M-4	2 / 3	28.10.2011
18	Leica GKNL4M-5	1 / 2	22.11.2011
30	Leica GKNL4M-5	2 / 3	6.2.2012
2	Leica GKNL4M-6	1 / 2	19.10.2011
1	Leica GKNL4M-6	2 / 3	18.10.2011
28	Leica GKNL4M Neu 1	1 / 2	16.01.2012
13	Leica GKNL4M Neu 1	2 / 3	21.11.2011
14	Leica GKNL4M Neu 2	1 / 2	21.11.2011
15	Leica GKNL4M Neu 2	2 / 3	21.11.2011
20	Leica GKNL4M Gebraucht 1	1 / 2	22.11.2011
21	Leica GKNL4M Gebraucht 1	2 / 3	22.11.2011
22	Wild GKNL4M Gebraucht 2	1 / 2	22.11.2011
23	Wild GKNL4M Gebraucht 2	2 / 3	22.11.2011
9	Trimble TD24	1 / 2	3.11.2011
29	Trimble TD24	2 / 3	31.1.2012
11	Trimble TD24	3 / 4	3.11.2011
24	Sokkia BAS55	1 / 2	29.11.2011
25	Sokkia BAS55	2 / 3	29.11.2011
26	Sokkia BAS55	3 / 4	29.11.2011
27	Sokkia BAS55	4 / 5	29.11.2011

E.2 Lattenfußschiefe

Tabelle E-2: Durchgeführte Versuche zur Lattenfußschiefe

Job Nr.	Latte	Datum
33	Leica GKNL4M-1	06.02.2012
34	Leica GKNL4M-1	06.02.2012
15	Wild GKNL4M-2	18.01.2012
16	Wild GKNL4M-2	18.01.2012
17	Wild GKNL4M-3	18.01.2012
18	Wild GKNL4M-3	18.01.2012
20	Leica GKNL4M-4	20.01.2012
21	Leica GKNL4M-4	20.01.2012
24	Leica GKNL4M-5	20.01.2012
25	Leica GKNL4M-5	20.01.2012
28	Leica GKNL4M-6	01.02.2012
29	Leica GKNL4M-6	01.02.2012
6	Leica GKNL4M Neu 1	17.01.2012
7	Leica GKNL4M Neu 1	17.01.2012
8	Leica GKNL4M Neu 2	17.01.2012
9	Leica GKNL4M Neu 2	17.01.2012
13	Leica GKNL4M Gebraucht 1	18.01.2012
14	Leica GKNL4M Gebraucht 1	18.01.2012
10	Wild GKNL4M Gebraucht 2	18.01.2012
12	Wild GKNL4M Gebraucht 2	18.01.2012
30	Trimble TD24	01.02.2012
31	Trimble TD24	01.02.2012
1	Sokkia BAS55	16.01.2012
2	Sokkia BAS55	16.01.2012

E.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Tabelle E-3: Durchgeführte Versuche zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Job Nr.	Latte	Datum
5	Wild GKNL4M-3	2.12.2011
11	Wild GKNL4M-3	26.1.2012
6	Leica GKNL4M-4	2.12.2011
4	Leica GKNL4M-5	2.12.2011
10	Leica GKNL4M-5	26.1.2012
13	Leica GKNL4M-5 (2. Element)	31.1.2012
2	Leica GKNL4M Neu 1	1.12.2011
1	Leica GKNL4M Neu 2	1.12.2011
3	Leica GKNL4M Gebraucht 1	1.12.2011
9	Trimble TD24	15.12.2011
12	Trimble TD24	31.1.2012
7	Sokkia BAS55	13.12.2011

E.4 Lattenüberprüfungen

Tabelle E-4: Durchgeführte Versuche zur Lattenüberprüfung

Job Nr.	Latte	Latten- teile	Latten- abschnitt	Distanz	Abtast- intervall	Datum
1473	Leica GKNL4M-1	2 / 3	1.45 - 3.95	3.00	20 / 2 mm	27.9.2011
1503	Leica GKNL4M-1	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	8.11.2011
1474	Leica GKNL4M-1	1 / 2	0.10 - 2.60	3.00	20 / 2 mm	28.9.2011
1504	Leica GKNL4M-1	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	9.11.2011
1489	Wild GKNL4M-2	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	20.10.2011
1490	Wild GKNL4M-2	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	21.10.2011
1560	Wild GKNL4M-2	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	11.1.2012
1562	Wild GKNL4M-2	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	11.1.2012
1482	Wild GKNL4M-3	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	19.10.2011
1484	Wild GKNL4M-3	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	19.10.2011
1543	Wild GKNL4M-3	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	6.12.2011
1545	Wild GKNL4M-3	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	13.12.2011
1563	Wild GKNL4M-3	2 / 3	2.94 - 3.40	4.00	1 mm	12.1.2012
1615	Wild GKNL4M-3	2 / 3	2.43 - 3.92	14.00	5 mm	16.2.2016
1487	Leica GKNL4M-4	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	20.10.2011

Tabelle E-4: Fortsetzung

Job Nr.	Latte	Latten- teile	Latten- abschnitt	Distanz	Abtast- intervall	Datum
1488	Leica GKNL4M-4	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	20.10.2011
1554	Leica GKNL4M-4	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	16.12.2011
1561	Leica GKNL4M-4	2 / 3	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	11.1.2012
1485	Leica GKNL4M-5	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	20.10.2011
1486	Leica GKNL4M-5	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	20.10.2011
1546	Leica GKNL4M-5	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	13.12.2011
1547	Leica GKNL4M-5	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	13.12.2011
1616	Leica GKNL4M-5	2 / 3	1.96 - 3.44	14.00	5 mm	16.2.2012
1617	Leica GKNL4M-5	2 / 3	1.96 - 3.44	3.00	5 mm	16.2.2012
1475	Leica GKNL4M-6	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	12.10.2011
1478	Leica GKNL4M-6	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	13.10.2011
1480	Leica GKNL4M-6	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	14.10.2011
1481	Leica GKNL4M-6	2 / 3	1.36 - 4.05	3.00	20 mm	18.10.2011
1495	Leica GKNL4M Neu 1	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	7.11.2011
1496	Leica GKNL4M Neu 1	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	7.11.2011
1499	Leica GKNL4M Neu 1	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	8.11.2011
1501	Leica GKNL4M Neu 1	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	8.11.2011
1497	Leica GKNL4M Neu 2	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	7.11.2011
1498	Leica GKNL4M Neu 2	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	8.11.2011
1500	Leica GKNL4M Neu 2	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	8.11.2011
1502	Leica GKNL4M Neu 2	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	8.11.2011
1527	Leica GKNL4M Gebr. 1	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	29.11.2011
1529	Leica GKNL4M Gebr. 1	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	29.11.2011
1540	Leica GKNL4M Gebr. 1	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	6.12.2011
1542	Leica GKNL4M Gebr. 1	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	6.12.2011
1526	Wild GKNL4M Gebr. 2	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	29.11.2011
1528	Wild GKNL4M Gebr. 2	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	29.11.2011
1539	Wild GKNL4M Gebr. 2	1 / 2	0.00 - 2.70	3.00	20 mm	6.12.2011
1541	Wild GKNL4M Gebr. 2	2 / 3	1.35 - 4.05	3.00	20 mm	6.12.2011
1491	Trimble TD24	1 - 3	0.00 - 3.00	3.00	20 mm	2.11.2011
1492	Trimble TD24	1 - 3	0.00 - 3.00	3.00	20 mm	2.11.2011
1493	Trimble TD24	3 / 4	2.00 - 4.00	3.00	20 mm	3.11.2011
1494	Trimble TD24	3 / 4	2.00 - 4.00	3.00	20 mm	3.11.2011
1512	Sokkia BAS55	1 - 3	0.00 - 3.05	3.00	20 mm	17.11.2011
1513	Sokkia BAS55	3 / 5	2.06 - 4.98	3.00	20 mm	17.11.2011
1514	Sokkia BAS55	3 / 5	2.06 - 4.98	3.00	20 mm	17.11.2011
1523	Sokkia BAS55	1 - 3	0.00 - 3.05	3.00	20 mm	25.11.2011

Masterarbeit

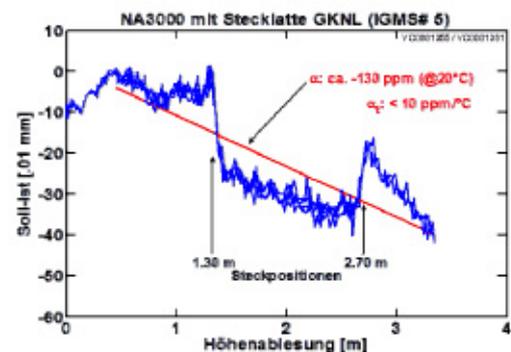
Thema: Untersuchung von Stecklatten mit dem Vertikalkomparator

Für einfache Vermessungsaufgaben werden mit Digitalnivellieren häufig Steck-, Teleskop- und Klapplatten verwendet. An den Stoßstellen treten systematische Effekte von zumindest einigen Zehntelmillimetern auf, wie aus Voruntersuchungen bekannt ist. Zusätzlich weisen diese Latten Maßstabeffekte sowie Temperaturabhängigkeiten auf, die im Vergleich zu Invarlatten um ein Vielfaches größer ausfallen können.

In einer Masterarbeit sollen die mit den angeführten Nivellierlatten in Zusammenhang stehenden systematischen Effekte untersucht werden, wobei jeweils mehrere Latten desselben Typs verwendet werden sollen.

Die Masterarbeit umfasst

- Literaturstudium
 - Zusammenfassung bekannter Effekte von Nivellierlatten
 - Am Markt für Digitalnivelliere vorhandene Latten
- Planung
 - der eigenen Untersuchungen
 - Anzahl der Samples
 - Möglichkeiten zur Bestimmung der Sprünge
- Untersuchungen am Vertikalkomparator
 - Bestimmung der Sprungstellen und des Maßstabs für eine Latte
 - Untersuchung mehrerer Latten (neu, gebraucht)
- Untersuchung der Lattennullpunkte (absolut, relativ)
- Thermisches Verhalten
 - Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten
 - Akklimatisationsverhalten der Latten, Zeitkonstante
 - Matlab Routine zum Auslesen der Messwerte



Die Experimente zur Untersuchung des Systemverhaltens können im Labor des Instituts durchgeführt werden. Zentrales Instrument der Untersuchungen ist der Vertikalkomparator, wobei das System bestehend aus Digitalnivellier und Latte bei verschiedenen Visurlängen untersucht wird. Die Klimakammer wird für die Akklimatisation der Latten verwendet. Für die Experimente zur Verfügung stehende Nivelliere sind ein Leica NA3000 sowie ein Trimble DiNi12. Mehrere Latten vom Typ Leica GKNL sind vorhanden.

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

Bearbeiter: gesucht