



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY



DIPLOMARBEIT

Genauigkeitsanalyse von Vermessungsstativen und Dreifüssen unter der Belastung verschiedener Instrumente.

Ausgeführt am Institut für Geodäsie und Geophysik,
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von:

Betreuer:

Dr.-Ing. Andreas Eichhorn
Dipl.-Ing. Dr. Johannes Fabiankowitsch
Dipl.-Ing. Mirko Wiebking

Begutachter:

o.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen

durch:

Daniel Nindl
Quettensberg 28
A-5723 Uttendorf im Pinzgau

*Meinen Eltern Alois und Barbara,
meinen Großeltern Johann und Margarethe sowie
meinem Bruder Christoph und meiner Freundin Kathrin*

Vorwort und Dank

Während meines Geodäsiestudiums seit dem Jahr 2000 habe ich mehrmals als Praktikant bei Leica Geosystems AG in Heerbrugg/CH gearbeitet. Durch diese Tätigkeit hat sich die Möglichkeit eröffnet, von Herbst 2005 bis Frühjahr 2006 ein 6-monatiges Praktikum zu absolvieren und gleichzeitig über eine Thematik eine Diplomarbeit zu schreiben, die für Leica Geosystems AG, als auch für die Technische Universität Wien von Interesse ist.

Folglich ist ein grobe "Road Map" über die wichtigsten Punkte gemeinsam mit Leica Geosystems AG (Dipl.-Ing. M. Wiebking) und der Technischen Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie (o.Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Kahmen, Dr.-Ing. A. Eichhorn und Dipl.-Ing. Dr. J. Fabiankowitsch) vereinbart worden. Das vorliegende Dokument stellt nun die Umsetzung dieser Roadmap dar.

ICH MÖCHTE MICH SEHR HERZLICH BEDANKEN BEI LEICA GEOSYSTEMS AG, INSBESONDERE DER TPS ABTEILUNG, DIE MIR ERSTENS DIE MÖGLICHKEIT ERÖFFNET HAT, DIE VORLIEGENDE ARBEIT ALS PRAXISORIENTIERTE DIPLOMARBEIT DURCHZUFÜHREN, UND ZWEITENS GILT MEIN DANK ALLEN MITARBEITERN DES TPS TEAMS (UND AUCH JENE, DIE BEREITS PENSIONIERT SIND), DIE MIR BEI EINER MENGE VON FRAGEN IMMER MIT RAT UND TAT BEISEITE STANDEN UND GEHOLFEN HABEN DIE AUFTRETENDEN PROBLEME ZU LÖSEN. EBENFALLS DANK AUSSPRECHEN MÖCHTE ICH MEINEN BEIDEN BETREUERN, DIE GEDULDIG MEINE ENTWÜRFE KORRIGIERT HABEN, UND MEINEM STUDIENKOLLEGEN HARI, DER MIR SEIN BAUINGENIEURSWISSEN FÜR DIE ERSTELLUNG DES STATISCHEN MODELLS ZUR VERFÜGUNG GESTELLT HAT. MEINEM EHEMALIGEN "CHEF" HANS, DER MEIN INTERESSE AN DER VERMESSUNG GEWECKT HAT, UND UNTER DESSEN OBHUT ICH DAS ERSTE MAL EIN STATIV AUFGESTELLT HABE, MÖCHTE ICH HIER EBENFALLS DANKEN. NICHT ZULETZT MÖCHTE ICH MEINEN ELTERN DANKEN, DIE MIR IMMER VIEL VERTRAUEN UND EIN UNIVERSITÄTSTUDIUM GESCHENKT HABEN.

Daniel Nindl

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Modellierung eines Stativs als Stabwerk	5
2.1	Modellbildung	5
2.2	Mechanische Grundlagen: Statik	6
2.3	Grundgleichungen der Statik	7
2.4	Modellrealisierung	9
2.4.1	Grundlegende Annahmen zum Modell	9
2.4.2	Diskretisierung	10
2.4.3	Verwendete Software	10
2.5	Beispielhafte Berechnung für einen vertikalen Lastfall	11
2.6	Zusammenfassung	14
3	Bestimmung der Höhenstabilität unter statischer Belastung	15
3.1	Untersuchte Zielgrößen	15
3.2	Anforderungen an das Experiment	16
3.3	Welche Störeinflüsse sind zu erwarten?	16
3.4	Anforderungen an die Sensoren	16
3.4.1	Kalibrierung	17
3.4.2	Genauigkeiten	17
3.5	Welche Sensoren sind geeignet?	18
3.5.1	Ungeeignete Sensoren	18

3.5.1.1	Mechanische Messuhr	18
3.5.1.2	Tachymeter TCA2003	19
3.5.1.3	System TPS1200	20
3.5.2	Sensoren höchster Genauigkeit für Kontrollmessungen	20
3.5.2.1	Digitale Messuhr Sylvac25	20
3.5.3	Geeignete Sensoren	21
3.5.3.1	Digitalnivellier DNA03	21
3.6	Experimentelle Versuchsaufbauten	23
3.7	Messergebnisse	27
3.8	Diskussion der Ergebnisse	34
3.9	Zusammenfassung	35
4	Horizontale Verdrehsteifigkeit und Horizontaldrift von Stativen	36
4.1	Erwartete Deformationen	36
4.2	Eingesetzte Messsensoren	38
4.2.1	Tachymeter Sensoren	38
4.2.2	(Auto-)kollimator	38
4.2.2.1	Technisches Prinzip	38
4.2.2.2	Kalibrierung	41
4.3	Versuchsaufbau (Auto-)kollimator	43
4.4	Bestimmung der Horizontaldrift	44
4.4.1	Messergebnisse und Beurteilung	44
4.5	Untersuchung der Hz-Verdrehsteifigkeit unter dem besonderen Aspekt motorisierter Tachymeter	47
4.5.1	Messungen unter dem Einfluss der Drehmomente des motorisierten Tachymeters TCA2003	47
4.5.1.1	Messergebnisse und Beurteilung	48
4.5.2	Messungen mit dem Tachymeter TPS1200	51
4.5.2.1	Messergebnisse und Beurteilung	51

4.5.3	Vergleichende Betrachtung der Verdrehsteifigkeit der Stative von Leica und Crain	54
4.6	Bestimmung der Hz-Verdrehsteifigkeit nach ISO12858 (1999)	55
4.6.1	Messergebnisse und Beurteilung	56
4.7	Horizontale Verformungen durch manuelle Bedienung am Beispiel eines TPS700	56
4.8	Zusammenfassung	58
5	DreifüÙe	59
5.1	Funktionalität	59
5.2	Verdrehsteifigkeit	60
5.3	Beurteilung	61
5.4	Zusammenfassung	63
6	Handlungsempfehlungen und Ausblick	64
6.1	Ausblick	66
	Bibliographie	69
A	Zusätzliche Informationen zur Höhenstabilität	71
B	Zusätzliche Informationen zur Hz-Verdrehsteifigkeit	73

Zusammenfassung

Viele der täglichen Vermessungsaufgaben erfordern Genauigkeiten, wo der Einfluss des Messzubehörs vernachlässigbare Auswirkungen hat. Für Vermessungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen sind diese Einflüsse aber durchaus von Interesse.

Die vorliegende Arbeit hat nun zum Ziel, Stative und DreifüÙe bzw. deren Genauigkeiten zu analysieren. Bei der Definition von Genauigkeitsparametern und dazugehörigen Grenzwerten für das erwähnte Zubehör wird einerseits auf standardisierte Verfahren aus ISO-Normen zurückgegriffen, andererseits werden, insbesondere bei der Untersuchung der horizontalen Verdrehsteifigkeit, neue Verfahren entwickelt und eingesetzt. Dadurch wird eine breitere Wissensbasis für die Qualifizierung von Stativen und DreifüÙen geschaffen.

Der Arbeit wird ein theoretisches Modell vorangestellt, das im konkreten Fall die Auswirkungen von vertikalen Belastungen simuliert und über Materialkenngrößen und die Abmessungen des Stativs einen Konnex zur vertikalen Verformung herstellt. Im experimentellen Teil werden die Höhenstabilität, die horizontale Drift und die Verdrehsteifigkeit untersucht. Zur Untersuchung der Höhenstabilität wurde aus Gründen der Automatisierbarkeit und Messgenauigkeit das Digitalnivellier Leica DNA03 ausgewählt. Zur Bestimmung der horizontalen Verdrehsteifigkeit sowie zur Bestimmung der horizontalen Drift wurde ein elektronischer Kollimator eingesetzt der einen automatischen Datenfluss gewährleistet. Über die Befestigung zweier Spiegel am Untersuchungsobjekt (Stativ, DreifuÙ) konnten mit dem Prinzip der Autokollimation die auftretenden horizontalen Verformungen gemessen werden. Die Beobachtungsfrequenz von 16 Hz ermöglichte eine sehr gute Detektionsmöglichkeit von dynamischen Verformungen, sodass umfassende Kenntnisse der Verformungen während der Bewegungen motorisierter Tachymeter gewonnen werden konnten. Die Genauigkeit des DreifuÙ spielt ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei hochgenauen Vermessungen. Von zwei verschiedenen Modellen wurden Stichproben genommen und die Hysterese bestimmt. Diese Werte gelten folglich als GenauigkeitsmaÙ für DreifüÙe.

Abschließend sind alle Testergebnisse und die jeweiligen Kombinationen Instrument/DreifüÙ/Stativ als eine Art "Empfehlungskatalog" tabellarisch zusammengefasst worden.

Abstract

The purpose of this study is the accuracy analysis of tripods and tribrachs. In the daily work of a surveyor, the accessories do not influence the accuracies that are normally required. However, accessories can affect high precision measurements. Therefore it is both necessary and useful to have some knowledge about this influence. When defining accuracy parameters of accessories, reference to standardized testing procedures and limits should be made.

For the investigation of torsional rigidity a new procedure was developed and applied in this study. This has resulted that the evaluation basis for the qualification of tripods and tribrachs was extended.

A model was created before performing the experimental investigation. The model attempts to simulate the effects of vertical load. In accordance with the rules of statics the connection between material parameters, tripod dimensions and vertical deformation had to be established in order to calculate the vertical deformation.

For investigations of height stability different sensors were evaluated. By considering measurement accuracy and automatization capability, it was decided to use a Leica DNA03 (digital level) to measure the deformations.

An electronic, automatized collimator was used to determine torsional rigidity and horizontal drift. Measurements were made to two autocollimation mirrors, one mounted on the tripod and the other one on the tribrach. Therefore it was possible to monitor the deformations through the principle of autocollimation. An output frequency of 16 Hz ensured a high detectability of dynamic (temporal fast changing) deformations. The accuracy of the tribrach is not negligible if results of high precision are needed. Two different models (10 of each) were investigated and the hysteresis was determined to define the accuracy of tribrachs.

Finally all tests were summarized. Based on that summary an evaluation of the tripods and tribrachs was made and the results abstracted.

Kapitel 1

Einführung

Wenn man über Stative und DreifüÙe spricht, so denkt man eigentlich nicht weiter über deren Qualität nach. Man akzeptiert sie als Zubehör, das funktioniert und womit auch (fast) nie Probleme auftreten. Das Vertrauen das diese Produkte genießen ist sehr hoch. Man fragt nicht: *Was kann mein Stativ?, Ist es gemäß ISO-Standard konstruiert bzw. genügt es den ISO-Kriterien?* oder *Wie stabil ist das Stativ bzw. der Dreifuß?* Gegebenenfalls ist die Frage nach dem maximal zulässigen Instrumentengewicht noch von Bedeutung. All diese Fragen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden.

Prinzipiell sollte beim Einsatz von Vermessungsinstrumenten eine stabile Aufsatzmöglichkeit gewährleistet werden, sofern kein Messpfeiler verfügbar ist, ist man daher auf Stative angewiesen. Wenn man aber - fälschlicherweise - für eine Aufgabenstellung, welche über das übliche Messen von Polarpunkten hinausgeht, bloÙ die Spezifikationen eines Tachymeters als Einsatzkriterium heranzieht, so kann man mitunter böse Überraschungen erleben. Gerade bei höchsten Genauigkeitsanforderungen und/oder Beobachtungen über einen längeren Zeitraum, sollte der mögliche Einfluss des "Messzubehörs" auf das Messergebnis bekannt sein. Dazu ist es notwendig, die Fehlerquellen zu (er-)kennen und ihre Größenordnung messtechnisch zu erfassen.

Die Stabilitätsuntersuchungen dieser Arbeit beziehen sich auf Stative und DreifüÙe. Der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wird nicht berücksichtigt.

Aus den eingangs formulierten Fragestellungen ist ein gemeinsames Projekt von Leica Geosystems AG (fortfolgend als Leica bezeichnet) mit der Technischen Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Ingenieurgeodäsie, entstanden. Seitens der Abteilung Ingenieurgeodäsie sind ebenfalls Vorgaben definiert worden, die in der vorliegenden Arbeit behandelt werden.

Vorgaben der Universität:

- (a) Eine theoretische Annäherung an das System "Stativ", über die Ideen der Statik und der Erstellung eines vereinfachten Modells womit Verformungen als Funktion von angreifenden Kräften auftreten.
- (b) Entwicklung von verschiedenen Messstrategien zur Bestimmung von Stativbewegungen, insbesondere das Messen sehr kleiner Bewegungen.
- (c) Quantifizierung des Stativverhaltens. Wie verhalten sie sich prinzipiell? (Es gibt sehr wenige Publikationen auf diesem Gebiet.)

Ad (a): Es soll exemplarisch ein Modell erzeugt werden, das es ermöglicht ohne aufwendige Experimente und Messreihen Aussagen über das Stativverhalten unter bestimmten Belastungen zu treffen. Die Modellierung beschränkt sich auf ein vereinfachtes, aber dennoch realitätsnahes Modell, das aufgrund erwarteter Komplexität auf eine vertikal angreifende Kraft beschränkt ist. Als Ergebnis des Modells können dann Vertikaldeformationen berechnet werden.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die unterschiedlichen Stativ- und Dreifussmodelle von Leica und deren Verhalten unter verschiedenen mechanischen Belastungsformen zu untersuchen. Auch soll festgestellt werden, ob bestimmte Instrumentenspezifikationen eingehalten werden können, wenn ungeeignetes Zubehör eingesetzt wird. Beispielsweise ist bei Einsatz eines TPS1201 zusammen mit einem CTP103 (Billigvariante eines Aluminiumstatives) die Winkelmessgenauigkeit von $1,5^{cc}$ vermutlich nicht mehr garantiert. Das Verhalten ist durch verschiedene Experimente und Messreihen zu quantifizieren. Die Untersuchungen erfolgen unter Laborbedingungen, um bestmöglich vergleichbare Resultate zu erzielen. Ein Ergebnis muss ein numerisch beschriebenes Verhalten sein, womit Leica Produktkombinationen (und ggf. Einschränkungen) für ihre Kunden vorschlagen kann: Welche Kombination ist für eine bestimmte Messgenauigkeit zu empfehlen?

Zusätzlich werden zwei Stative, die keine Leica Produkte sind untersucht. Dies geschah aus Vergleichsgründen und, um Informationen über das Material Fiberglas zu sammeln. In Zukunft ist es auch für Leica denkbar ein etwaiges Produkt auf dem Markt zu platzieren, allerdings nur wenn es den sehr hohen Qualitätsstandards genügt und auch einen Vorteil für den Anwender bringt.

Kapitel 2

Modellierung eines Stativs als Stabwerk

Im folgenden Kapitel wird das System *Belastung – Verbindung – Stativ* als eine räumliche Struktur beschrieben. Hierbei kommen die Theorien der Festigkeitslehre zur Anwendung, um ein möglichst realitätsnahes Modell zu erstellen. Es soll dazu dienen, die durch äußere Kräfte verursachten Verformungen in einem Stativ besser zu verstehen. Darauf basierend sollen die Zusammenhänge zwischen Stativbewegungen/Stativverformungen und den möglichen Einflüssen auf die Messgrößen gezeigt werden.

2.1 Modellbildung

Es soll ein Modell erzeugt werden, das es ermöglicht, die Verformung eines Stativs aufgrund vertikaler Auflast zu berechnen. Überwiegend werden Stative mit Theodoliten (Tachymetern) belastet, die seit etwa zwei Jahrzehnten auch in zahlreichen motorgetriebenen Varianten verfügbar sind. Ausgehend von dieser Motorisierung entstehen neben der durch das Instrumentengewicht verursachten Vertikalkraft noch Drehmomente, die ihren Ursprung im Beschleunigen und Bremsen des Hz- und V-Motors haben. Dieses Modell betrachtet aber ausschließlich den ersten Lastfall, der die vertikale Verschiebung des Stativtellers (im Modell als Knoten idealisiert) behandelt.

Ein Modell wird immer bis zu einem gewissen Grad abstrakt bleiben, das heißt: es versucht so nahe wie möglich die Wirklichkeit zu approximieren. Bei der Erstellung des Modells wird folgende Abstrahierung angenommen: Es werden *Belastungen* betrachtet, die über einen *Knoten* mit dem *Tragwerk* (folgend als *Stativsystem* bezeichnet) verbunden sind. Es gibt weiters eine ganze Reihe von Parametern die berücksichtigt werden können bzw. müssen. In diesem Zusammenhang ist Belastung entweder als Instrumentengewicht oder als standardisiertes Gewicht nach ISO12858 (1999) realisiert, die Funktion des

Knotens nimmt der Dreifuß ein und als Tragwerk fungiert das Stativ. Der Dreifuß wird im Modell "nur" als kräfteübertragender Knoten betrachtet und nicht speziell modelliert.

Unabhängig von der (mechanischen) Modellbildung wird der Einfluß der Temperatur auf das Modell meistens erstgenannt, allerdings sind Luftfeuchtigkeit und Feuchtigkeitsgehalt (speziell bei Holz), etc. ebenfalls keineswegs zu vernachlässigen. Diese Betrachtung ist durch die verwendeten Messmittel beschränkt und führt gleichzeitig in die Materialwissenschaft, die für dieses "Problem" geeignete Methoden bereit hält.

Die Modellierung der genannten Parameter gestaltet sich äußerst komplex, weshalb sie im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Es wird also nur mechanische Belastung unterstellt. Eine Berücksichtigung der oben angeführten Parameter ist bei praktischen Testmessungen, welche nicht unter Laborbedingungen stattfinden, mit einem erheblichen Aufwand an Messsensoren verbunden. Zusätzlich ist es auch problematisch für alle Prüflinge gleiche Umweltbedingungen zu schaffen. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu erreichen wurden daher alle Tests unter Laborbedingungen durchgeführt. Der Einfluss von Temperatur, etc. verschwindet deshalb zwar nicht, allerdings wird er konstant gehalten → statisches Gleichgewicht.

Stative werden vorrangig aus Aluminium, Fiberglas und Holz hergestellt. Verschleißteile werden aus Metall gefertigt. Jedes dieser Materialien hat unterschiedliche Eigenschaften, die a priori nicht als gut oder schlecht eingestuft werden können. Es ist nur notwendig, sie für die Konstruktion von Stativen (unterschiedlicher Qualität) geeignet einzusetzen.

2.2 Mechanische Grundlagen: Statik

Nach Beer (2002) beschäftigt sich die Statik als Teilgebiet der Mechanik mit Kräften in unbewegten Systemen. Sie findet vor allem im Bauingenieurwesen bei der Berechnung von realen Tragwerkssystemen Anwendung.

Die Berechnung der Kräfte an unverformten Tragwerken nennt man Theorie I. Ordnung. Das bedeutet, dass die Änderung der Geometrie der Tragwerke durch die Belastung selbst vernachlässigt wird. Diese Vorgehensweise ist dann zulässig, wenn die Verformungen so klein sind, dass sie die Ergebnisse der Berechnung nur unwesentlich beeinflussen.

Unter Berücksichtigung der mechanischen Natur des Tragwerks haben verschiedene Lasten unterschiedliche Auswirkungen, die wie folgt unterteilt werden können:

1. Statische Lasten

- Eigengewicht — verursacht durch die Tragkonstruktion selbst
- Äußere Auflast (vertikal) — verursacht durch das Instrument bzw. das substituierte Testgewicht

2. Dynamische Lasten

Prinzipiell alle Lasten die einer zeitlichen Veränderung unterliegen. Im Kontext von Stativen sind das auch menschliche Einflüsse wie das Drücken von Knöpfen am Instrument oder maschinell erzeugte Vibration (z.B. Tunnelbohrmaschinen bei Vermessungen unter Tage oder generell der Straßenverkehr). Letztere Einflüsse seien hier als "passiv" zu bezeichnen. Bewegungen und insbesondere Momente die durch motorisierte Instrumente ausgelöst und übertragen werden, sollen hier als "aktiv" bezeichnet werden.

Äußere Einflüsse auf das Stativ treten als Kräfte F (F_x, F_y, F_z) und als Momente M (M_x, M_y, M_z) auf. Gebräuchliche Einheiten sind $[N]$ und $[Ncm]$. Die Beschreibung erfolgt entweder in einem globalen (das ganze Tragwerk beschreibende) oder in einem lokalen (das einzelne Element beschreibende) Koordinatensystem. Veränderungen sind üblicherweise als Verschiebungen (U) oder als Verdrehungen (Φ) ausgewiesen.

2.3 Grundgleichungen der Statik

Nach Wunderlich u. Kiener (2004) verbindet die statische Berechnung eines Tragwerks (im konkreten Fall die Berechnung des *Stativsystems*) vier Gruppen von Zustandsgrößen (vgl. Abbildung 2.1):

- Einwirkungen (angreifende Lasten oder Lastmomente)
- Schnittgrößen (Kräfte, Momente)
- Verzerrungen (Dehnungen, Verkrümmungen, Verwindungen)
- Verschiebungen (Knotenverschiebungen, Verdrehungen)

In Abbildung 2.1 sind die grundlegenden Beziehungen der Statik dargestellt. **I. Gleichgewichtsbedingungen** können entweder auf das verformte oder auf das unverformte (*Stativ*-)system bezogen werden. Sie werden über Betrachtungen am differentiellen Element – oder gleichwertig – über das Arbeits- oder Energieprinzip erhalten. Die Schnittgrößen oder Spannungen sind mit den Verzerrungen über Stoffgesetze (III) verbunden. Für das Stativsystem werden aus diesen Beziehungen über die Gleichgewichtsbedingungen die

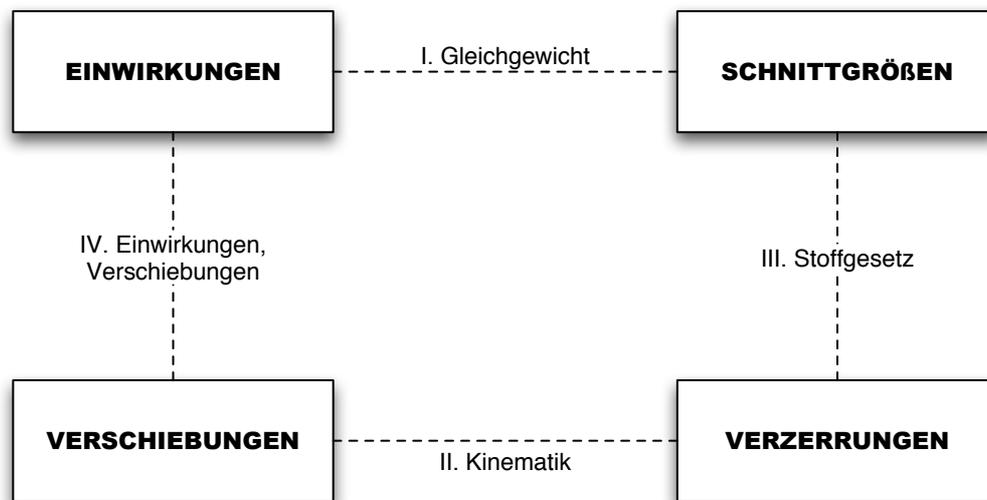


Abb.: 2.1: Zustandsgrößen und grundlegende Beziehungen der Statik nach Wunderlich u. Kiener (2004)

Stab- und Auflagerkräfte berechnet. Letztere sind hier allerdings nicht von Interesse. Stabkräfte sind die Folge der Belastung, welche vom Instrument bzw. Testgewicht ausgehen. Sie sind verantwortlich für Stauchung und ggf. Dehnung der Stäbe. Dieser Zusammenhang ist im **Hooke'schen Gesetz** beschrieben (= III. Stoffgesetz).

	Modell	Fallstudie (<i>Stativsystem</i>)
A	Definition von relevanten Zielgrößen. Geforderte Genauigkeit des Ergebnisses. Festlegung des Modells.	Die Untersuchung von Stativen, um deren vertikale Stabilität unter verschiedenen Einflüssen festzustellen.
B	Auswahl von interessierenden Parametern	E-Modul, Querschnittsfläche, Stativbeinlänge, Aufstellkonfiguration, Materialeigenschaften für Temperatur und Feuchtigkeit. Die Richtung der angreifenden Kräfte.
C	Auswahl eines konkreten Modells für das Tragwerk (Stativ)	Das Stativ wird als räumliches Tragwerk, bestehend aus drei einzelnen Stäben betrachtet. Die Belastung wird vertikal auf den Verbindungsknoten des Tragwerks aufgebracht.
D	Bestimmung von konkreten Werten für die verwendeten Parameter	Die Werte (siehe Punkt B) sind aus der Literatur entnommen.

Tab.: 2.1: Stufen der Modellierung

2.4 Modellrealisierung

Die in Tabelle 2.1 angeführten Punkte sollen zeigen, wie im konkreten Fall des *Stativsystems* der Modellierungsprozess durchgeführt wurde.

2.4.1 Grundlegende Annahmen zum Modell

Um die Kräfteverteilung im Stativsystem und deren Einflüsse auf die Messgrößen zu untersuchen, soll ein einfaches Modell erstellt werden.

Das Modell beschränkt sich auf eine Abstraktion des Stativbeins durch drei Teile (siehe auch Abb. 3.12): (a) Oberteil (Rundhölzer), (b) Überlappungsbereich (Rundhölzer an den Fasonstab geklemmt) und (c) Unterteil (Fasonstab, ohne Berücksichtigung des Stativschuhs). Die drei Teile werden im Modell als biegesteif verbunden definiert. Für den Stativteller (Stativkopf) wird ein einzelner, idealisierter Knoten angenommen, die Stativspitzen gehen als unbeweglich in das Modell ein.

Bei der Betrachtung eines Stativs mit ausziehbaren Beinen wird allerdings eine sehr wich-

tige Tatsache vernachlässigt: die Klemme. Verglichen mit der tatsächlichen Konstruktion ist dieser Punkt (wahrscheinlich) als Schwachpunkt einzuordnen, weil es sich, wie der Name schon sagt, um eine Klemmverbindung und somit um keine formschlüssige Verbindung handelt. Eine Verschiebung ist wahrscheinlich anzunehmen, aber in einer Größenordnung, die bei den auftretenden Kräften messtechnisch sehr schwer nachzuweisen sein wird. Die Bestimmung von Parametern zur Charakterisierung der Klemme wird hier deswegen nicht durchgeführt, weshalb diese im Modell auch nicht berücksichtigt werden.

Der Einfluss von Momenten (Drehmomenten) ist sehr komplex zu modellieren und erfordert einschlägige Kenntnis bezüglich Festigkeitslehre und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

2.4.2 Diskretisierung

Wie in der ISO12858 (1999) für Stativtests vorgeschlagen, wird für das Modell ein Abstand der Beine von 1 m gewählt (= symmetrische Aufstellung). Weiters sind voll ausgezogene Beine vorgegeben. Das entspricht einem Verhältnis von Grundfläche zur Stativhöhe von $\approx 1 : 2$.

2.4.3 Verwendete Software

Für die konkrete Berechnung der Verformungen ist hier auf ein Softwarepaket (RSTAB)¹, welches hauptsächlich von Bauingenieuren verwendet wird, zurückgegriffen worden. RSTAB ist in der Lage, Verformungen eines beliebig definierten Stabwerks über die Angabe definierter Kräfte zu berechnen.

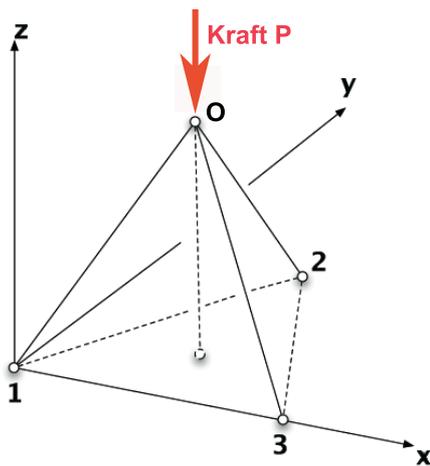
Für das Modell ist eine vertikal angreifende Kraft, die das Instrumentengewicht (bzw. das standardisierte Testgewicht) substituiert gewählt. Im folgenden Abschnitt wird exemplarisch die (manuelle) Berechnung der Stabkräfte demonstriert.

Bei einer symmetrischen Aufstellung tritt dieselbe Schnittgröße (Normalkraft) in allen drei Stäben auf, was impliziert, dass die Verformungen bei gleichem Material und Querschnitt ebenfalls ident sein müssen.

¹nähere Informationen siehe www.dlubal.de

2.5 Beispielhafte Berechnung für einen vertikalen Lastfall

Die folgenden Formeln sind aus Hirschfeld (1965) entnommen, und zeigen die Berechnung eines sogenannten "Dreibocks", eines räumlichen Stabwerks, bestehend aus drei Stäben. In Abbildung 2.2 ist die Aufstellkonfiguration eines Stativs mit 1 m Abstand der Stativspitzen und 1,7 m Höhe des Stativtellers gezeigt.



Punkt	x	y	z
1	0	0	0
2	0.5	0.8660	0
3	1	0	0
O	0.5	0.2887	1.7
Kraft P	0	0	300 N

Abb.: 2.2: Aufstellkonfiguration als Stabmodell

Tab.: 2.2: Zugehörige Modellkoordinaten inkl. vertikaler Auflast

Die Kraft P greift am Punkt O als Vertikalkraft an ($P_x = P_y = 0; P_z = 300N$). Dieses Gewicht (P_z) entspricht einer Auflast durch eine Testmasse von ca. 30 kg und dem in der ISO12858 (1999) festgelegten Wert, wonach das doppelte (max.) Instrumentengewicht für Stativtests aufgebracht werden muss. Die in Tabelle 2.3 angeführten Werte wurden nach

cos					
α_1	0.3110855	β_1	0.1796053	γ_1	0.9332565
α_2	0	β_2	0.3592106	γ_2	0.9332565
α_3	-0.3110855	β_3	0.1796053	γ_3	0.9332565

Tab.: 2.3: Richtungscosinus' der Stäbe

Formel 2.1

$$\cos \alpha_n = \frac{x_o - x_n}{s_n} \quad (2.1)$$

für die Richtung des Stabes n zur x-Achse berechnet. Für die verbleibenden Richtungen zur y- bzw. z-Achse sind die jeweiligen Koordinaten zu ändern.

Lineares Gleichungssystem (vgl. Hirschfeld (1965)):

$$\text{I.: } S_1 \cos \alpha_1 + S_2 \cdot \cos \alpha_2 + S_3 \cdot \cos \alpha_3 + P \cdot \cos \alpha_P = 0$$

$$\text{II.: } S_1 \cos \beta_1 + S_2 \cdot \cos \beta_2 + S_3 \cdot \cos \beta_3 + P \cdot \cos \beta_P = 0$$

$$\text{III.: } S_1 \cos \gamma_1 + S_2 \cdot \cos \gamma_2 + S_3 \cdot \cos \gamma_3 + P \cdot \cos \gamma_P = 0$$

$$S_{1,2,3} = \begin{pmatrix} -10,715168 \text{ N} \\ -10,715168 \text{ N} \\ -10,715168 \text{ N} \end{pmatrix}$$

Über die Lösung von $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ erhält man S_1 , S_2 und S_3 , die drei Stabkräfte. Als Konsequenz müssen alle auftretenden Verformungen in jedem Stab gleich sein.

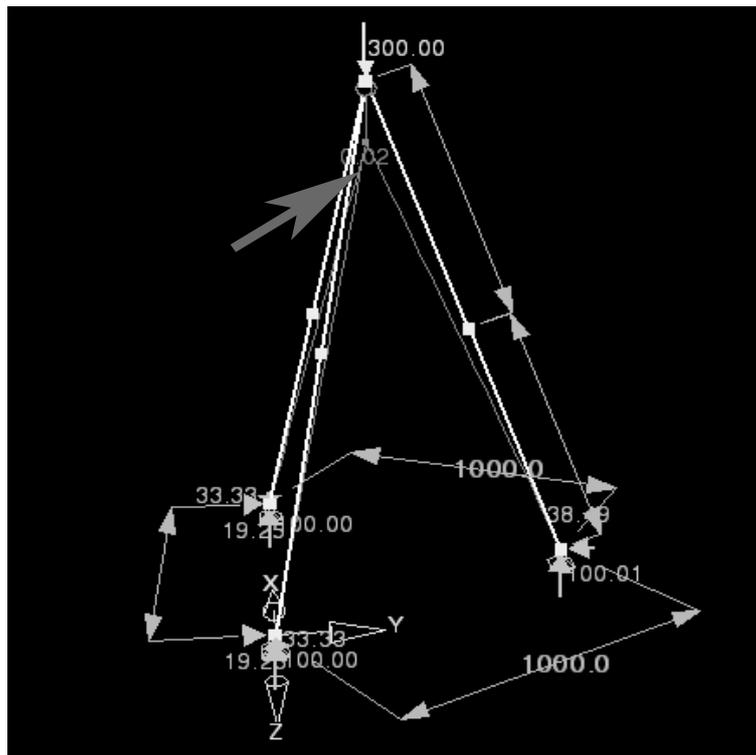
Wie man in Abbildung 2.3 sehen kann, tritt eine vertikale Verschiebung des Stativtellers von 2/100 mm bei einer Belastung auf. Für die Berechnung mit der Software RSTAB (siehe 2.4.3) sind folgende Eingangsparameter erforderlich:

- Stablängen
- Aufstellkonfiguration (Abstand zwischen den Stativspitzen und Winkel zwischen Stativbein und Boden)
- Stabquerschnitt
- Definition der Knoten
- Materialparameter (=E-Modul)

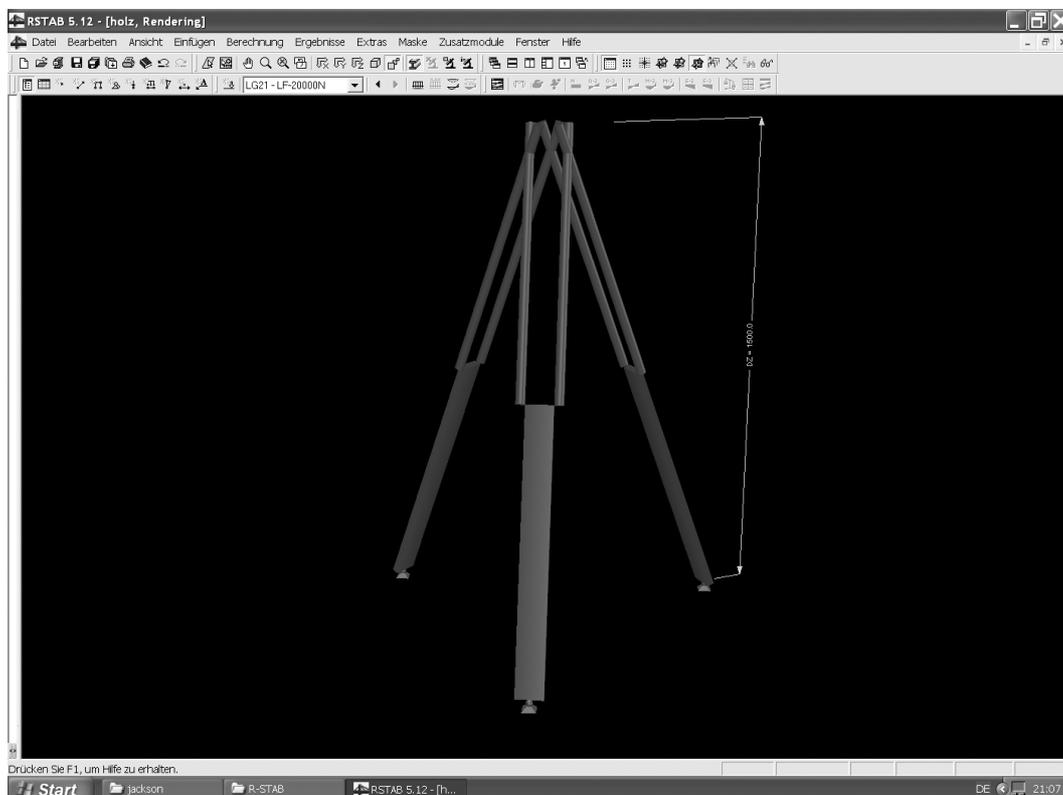
Die Berechnungen basieren auf den Abmessungen eines Leica GST 120-9 Stativs. Das E-Modul wurde für Hartholz angenommen. Für leichte Stativbeine ist ein Testgewicht von 100 N (≈ 10 kg) vorgesehen (2-faches, max. zulässiges Instrumentengewicht).

Die Abhängigkeit der vertikalen Knotenverschiebung von der aufgebrauchten Kraft verhält sich im Modell weitgehend linear. Für Auflasten von einigen 100 N ist es bereits erforderlich in die statische Berechnung nach Theorie II. Ordnung zu wechseln. Das heißt, die Berechnung erfolgt auf Basis des verformten Systems. Bei einer Auflast von 2300 N ergibt sich eine Vertikalverschiebung des Stativkopfes von 1,5/10 mm (für das Modell eines GST120-9), etwa bei 2400 N (≈ 240 kg) erfolgt der Bruch.

Wie die Ergebnisse von Kapitel 3 zeigen werden, liefert das Modell durchaus plausible Werte, die Testergebnisse weisen für das GST120-9 bei den Tests zur Höhenstabilität eine



(a) Definiertes Modell in der RSTAB-Software



(b) Abstrahiertes Modell mit richtigen Querschnitten

Abb.: 2.3: Auszüge aus RSTAB

Vertikalverschiebung von $2/100 - 3/100$ mm auf, was mit der Modellrechnung ($2/100$ mm) sehr gut übereinstimmt.

Theoretisch könnten unendlich viele Konfigurationen im Modell durchgerechnet werden. Für die Vertikalstabilität ist aber die gewählte Geometrie mit voll ausgezogenen Stativbeinen durchaus als Extrembedingung zu betrachten.

Das beschriebene (exemplarische) Modell kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden:

- für Simulationsrechnungen geeignet
- vor dem Experiment kann festgestellt werden:
 - Welche Verformungen sind zu erwarten?
 - Welche Messmittel sind dafür geeignet?
- Bruchanalysen

2.6 Zusammenfassung

Das Kapitel 2 befasst sich mit der Modellbildung eines als räumliches Tragwerk abstrahierten Stativs, wie es für die praktische Vermessung eingesetzt wird. Es wird einerseits gezeigt, welche Parameter von Interesse sind, andererseits sind dem Modell bewusst Grenzen gesetzt worden. Es hat aber durchaus Potential zur Weiterentwicklung. Für die bereits erwähnte vertikale Veränderung ist in 2.5 bereits eine Querverbindung Modell \leftrightarrow Experiment hergestellt worden. Im folgenden Kapitel wird dazu das konkrete experimentelle Prüfverfahren vorgestellt und erläutert.

Kapitel 3

Bestimmung der Höhenstabilität unter statischer Belastung

Für die Untersuchungen zur Höhenstabilität kommt die Unterscheidung zwischen *statischen* und *dynamischen* Belastungen bzw. Deformationen zur Geltung. Die einfache vertikale Belastung des Stativs mit einem Gewicht (in verschiedenen Variationen) wird als *statische* Belastung betrachtet, im Sinne einer sich nicht verändernden Belastung. Die in Kapitel 4 auftretenden, zeitveränderlichen Momente werden dagegen als *dynamische* Belastungen behandelt.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit empirischen Untersuchungen zur Bestimmung der Höhenstabilität von Stativen bei vertikalen statischen Belastungen. Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Faktoren, Parameter und Messverfahren angeführt. Im Anschluss erfolgt eine Beschreibung und Diskussion der durchgeführten Experimente und der Messergebnisse.

Das Einsinken des Stativs, so wie es im Feld (z.B. auf Wiesen) auftritt, ist primär durch die Art des Bodens bestimmt. In dieser Arbeit geht es aber rein um die Beurteilung der inneren Stativstabilität. Bodenparameter sind kein Untersuchungsgegenstand.

3.1 Untersuchte Zielgrößen

Nach ISO12858 (1999) und zusätzlichen Produktspezifikationen (durch den jeweiligen Stativhersteller gegeben) ist mit einer vertikalen Veränderung des Stativkopfes (Stativtellers) von 1/100 mm bis zu 1/10 mm zu rechnen. Die Geschwindigkeit der Verformung (bislang nicht spezifiziert), sowie die Hysterese nach der Entlastung ($< 5/100$ mm) sind ebenfalls zu bestimmende Zielgrößen.

3.2 Anforderungen an das Experiment

Das Experiment muss auf Art und Dauer der auftretenden Veränderungen abgestimmt werden. Zu diesem Zweck ist es erforderlich a priori einen Zeitbereich zu wählen, in dem man messbare Veränderungen erwartet. Die anfänglichen Experimente haben gezeigt, dass für die Höhenstabilität eine Messdauer von etwa 1/2 h ausreicht, um den messbaren Deformationsprozess aufzunehmen. Das deckt sich auch mit dem Expertenwissen erfahrener Ingenieure, die ein Abklingen der Vertikalbewegungen im Stativ nach 20 bis 30 min erwarten.

3.3 Welche Störeinflüsse sind zu erwarten?

Für die Messung der vertikalen Deformationen sind hauptsächlich Einflüsse durch Temperatur, Luftfeuchte und die erreichbare Auflösung bzw. Genauigkeit der Sensoren (siehe 3.4) von Bedeutung. Bei Annahme von Laborbedingungen relativiert sich die Bedeutung von Luftfeuchte und Temperatur. Beide Parameter müssen nur möglichst konstant gehalten werden. Falls weitere Objekte am Stativ befestigt werden (z.B.: Batterien, Spiegel, etc.) können sie das Verhalten ebenfalls beeinflussen und müssen, wenn möglich, berücksichtigt werden. Verspannungen in den Stativbeinen sind eventuell durch zu festes Anziehen der Schrauben oder der Klemme verursacht und können unerwartete, nicht erklärbare Verformungen zur Folge haben. Sie sind daher nach Möglichkeit zu vermeiden. Das Einsinken der Stativbeine ist grundsätzlich ein wichtiger Faktor bei der Beurteilung der Höhenstabilität. Im Labor ist dieses Problem allerdings vernachlässigbar, weil sich das Stativ auf einem speziellen Messplatz mit Metallplatten (samt Vertiefungen) für die Stativschuhe (Spitzen) befindet.

3.4 Anforderungen an die Sensoren

Aus 3.1 kann der erforderliche Messbereich von 1/10 mm abgeleitet werden. Um auch unerwartet größere Verformungen messen zu können ist der Sensor so zu wählen, dass der Messbereich eine ausreichende Sicherheitstoleranz aufweist.

Von Bedeutung ist auch die mögliche Auslesefrequenz des Sensors. Für die Bestimmung der Höhenstabilität über der Zeit ist es von Interesse:

- Wie schnell verläuft die Vertikaldeformation?

- Wie hoch muss die Messfrequenz sein, um auftretende Einschwingvorgänge korrekt detektieren zu können?

3.4.1 Kalibrierung

Nach DIN (1994) umfaßt die Kalibrierung *Tätigkeiten zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den ausgegebenen Werten eines Messgeräts oder einer Messeinrichtung oder den von einer Maßverkörperung oder von einem Referenzmaterial dargestellten Werten und den zugehörigen, durch Normale festgelegten Werten einer Messgröße unter vorgegebenen Bedingungen.*

Auch wenn die Hersteller für die eingesetzten Sensoren einen bestimmten Messbereich als linear angeben, empfiehlt es sich trotzdem die Spezifikationen nochmals zu überprüfen bzw. eine Kalibrierung durchzuführen. Dies ist dann die Basis der richtigen Interpretation der Messwerte. Falls man Ergebnisse erhält die außerhalb des linearen Bereichs liegen, ist es unbedingt notwendig, dieses nicht-lineare Verhalten zu kennen und ggf. die Messwerte entsprechend zu korrigieren.

Grundsätzlich sollte zur Kalibrierung ein Messmittel verwendet werden, das um den Faktor 10 genauer ist, als das Gerät, welches man überprüfen möchte. Falls Firmen Kalibrierprotokolle ausliefern (oder zusätzlich anbieten) die z.B. eine Kalibrierkurve enthalten, können wenige Einzelmessungen ausreichen und mit den Solldaten verglichen werden, um festzustellen, ob das Messgerät korrekte Ergebnisse liefert. ‘‘

3.4.2 Genauigkeiten

Für die Qualitätsprüfung der Stative ist es grundsätzlich ausreichend festzustellen, ob der Prüfling die durch die Technischen Lieferbedingungen (=TLB, vom Hersteller definiert) vorgegebenen Grenzwerte auch einhält. Zunächst ist daher sicherzustellen, dass die vom Hersteller spezifizierte Standardabweichung des Prüfsensors, womit die TLB überprüft werden sollen, in einem Bereich liegt, der gesicherte Aussagen über die aufzudeckenden Deformationen zulässt. Für den zu untersuchenden Fall ist die Einhaltung des Grenzwerts von 5/100 mm nachzuweisen, daher ist ein Equipment mit mindestens folgender Qualität (Toleranz)

$$T = \pm \frac{1}{100} \text{ mm} \quad (3.1)$$

und der Standardabweichung (Prüfsensor)

$$\sigma \approx \frac{T}{3} \cdots \frac{T}{5} \quad T = \text{Toleranz} \quad (3.2)$$

erforderlich.

Externe Einflüsse wie Gebäudevibrationen werden a priori als vernachlässigbar klein angenommen. Ggf. müssen sie durch geeignete Filter eliminiert werden (z.B. Tiefpaß).

3.5 Welche Sensoren sind geeignet?

Zusätzlich zur Messfrequenz und Auflösung/Genauigkeit muß auch die automatisierte Datenerfassung und Registrierung sichergestellt werden. Für die Kommunikation zwischen Messmittel, Speichermedium, Stromversorgung und dem Display sind verschiedene Standards definiert:

- **[RS232]** Radio Section, (bit-)seriell, asynchroner Datentransfer; ebenfalls für die Stromversorgung eingesetzt.
- **[GP-IB]** General Purpose Interface Bus
- **[USB]** Universal Serial Bus
- **[COM]** Communication
- **[PCMCIA]** Personal Computer Memory Card International Association
- **[BCD]** Binary Coded decimal (sehr alt, für die ersten digitalen Geräte)

Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob die Schnittstellen für die verwendete Hardware mit der Software zusammenpassen und ob die Signalübertragung korrekt funktioniert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Sensoren getestet. Trotz geeigneter Auflösung und Messgenauigkeit konnten einige davon bereits im Vorfeld als ungeeignet klassifiziert werden.

3.5.1 Ungeeignete Sensoren

3.5.1.1 Mechanische Messuhr

Die Genauigkeit beträgt 1/100 mm. Da keine Schnittstelle vorhanden ist sind keine kontinuierlichen Messungen möglich, wodurch keine Daten ausgelesen werden können (nur analoge Anzeige) und nur Einzelmessungen möglich sind. Für die Bestimmung der Vertikalstabilität wird dieses Messmittel aufgrund mangelnder Automatisierbarkeit des Messverfahrens nicht eingesetzt.



Abb.: 3.1: Compac (Genevè), Type 532

3.5.1.2 Tachymeter TCA2003

Dieses (automatisierte) Instrument (Abb. 3.2) hat ein hochgenaues Winkelmesssystem. Sowohl für den Horizontal- als auch den Vertikalwinkel ist eine Genauigkeit von 0,15 mgon ausgewiesen. Automatisierte Messungen sind nur bei Verwendung von ATR (Automated Target Recognition) möglich. Der TCA2003 hat eine ATR1 (1. Generation) eingebaut.

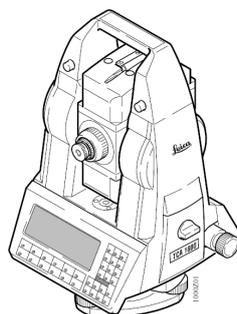


Abb.: 3.2: TCA2003

Die Genauigkeit der ATR hängt nach Leica (1997) von der inneren Genauigkeit sowie von äußeren Bedingungen wie dem verwendeten Prisma, Umgebungsbeleuchtung, usw. ab. Für die innere Genauigkeit sind die Auflösung der CCD-Kamera, die Messzeit, die Ausrichtung des Prismas u.a. Faktoren maßgebend. Generell ist die Genauigkeit der ATR nach unten begrenzt. Aus Abbildung 3.3 kann entnommen werden, dass bei einer Entfernung von < 200 m und normalen Bedingungen eine Winkelmessgenauigkeit von < 1 mm Querabweichung nicht erreicht werden kann. Im günstigsten Fall kann mittels der ATR1 unter sehr guten atmosphärischen Bedingungen und im Präzisionsmodus eine Genauigkeit von 0,5 mm erreicht werden. Bei auftretenden Deformationen im Bereich von 1/100 mm ist dies nicht ausreichend und der TCA2003 für die beschriebene Aufgabe deshalb nicht geeignet.

Abbildung 3.3 zeigt das Verhalten der ATR1 in Abhängigkeit der Distanz. Sie zeigt wei-

ters, dass bei einer Messung (mit ATR) unter 200 m die geforderte Winkelmessgenauigkeit nicht erreicht wird. Bei der Bestimmung der Höhenstabilität erlaubt der Messaufbau nur Distanzen von ≈ 5 m, sodass die für die Messung erforderliche Genauigkeit nicht erreicht werden kann.

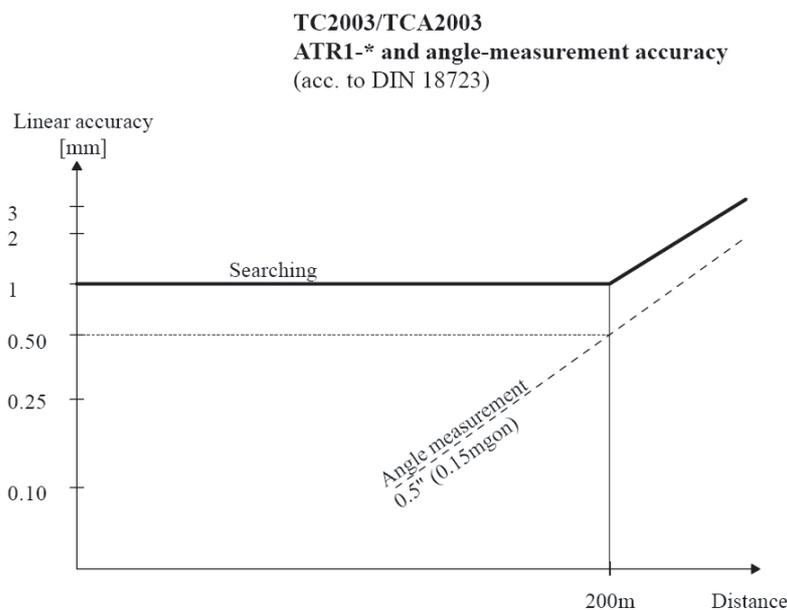


Abb.: 3.3: ATR1 Winkelmessgenauigkeit nach Leica (1997)

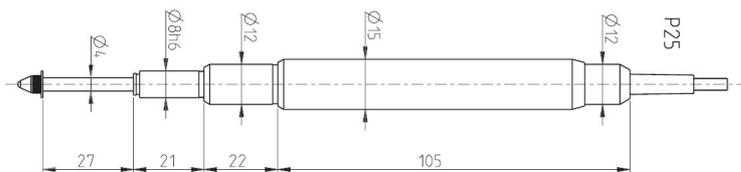
3.5.1.3 System TPS1200

Dieses System arbeitet mit der dritten Generation der automatischen Zielerfassung (ATR3). Im offiziellen Produktdatenblatt von Leica wird eine Positionierungsgenauigkeit von < 2 mm (was im Vergleich zum TCA2003 mit der verminderten Winkelmessgenauigkeit begründet ist) für die gesamte spezifizierte Distanz angegeben. Das heißt, es treten dieselben Probleme auf, wie bereits in 3.5.1.2 erwähnt.

3.5.2 Sensoren höchster Genauigkeit für Kontrollmessungen

3.5.2.1 Digitale Messuhr Sylvac25

Das genaueste Messmittel, das in der vorliegenden Liste aufgeführt ist. Der Messtaster hat eine Genauigkeit von $1/1000$ mm = $1\mu\text{m}$. Die Messgrößenumformung basiert auf kapazitiven Gebern. Obwohl hier von einem digitalen Sensor die Rede ist, kann das Messsystem nicht automatisiert werden. Für die Versuche zur Bestimmung der Höhenstabilität kommt



(a) Detailzeichnung



(b) Messuhr aufgebaut um die Höhenstabilität zu prüfen

Abb.: 3.4: Digitale Messuhr

dieser Sensor deshalb nur als unabhängiges Kontrollmessmittel zur stichprobenartigen Überprüfung der Messwerte in Frage.

3.5.3 Geeignete Sensoren

3.5.3.1 Digitalnivellier DNA03

Aus der Modellserie der Digitalnivelliere von Leica ist das DNA03 das genaueste Nivellier das momentan auf dem Markt verfügbar ist. Es ist mit einer Schnittstelle (RS232) ausgestattet, die sehr gut geeignet ist, Daten automatisiert aufzuzeichnen. Die Standardabweichung der Höhenmessung pro 1 km Doppelnivellement nach ISO17123 (2001) beträgt 0,3 mm. Diese Angabe ist a priori für die gegebene Aufgabe als unzureichend einzustufen. Deshalb wird im Folgenden die Vorgangsweise beschrieben, wie von obiger Angabe auf die Genauigkeit der Einzelablesung bei kurzer Messentfernung/kleinem Messbereich geschlossen werden kann. Es können drei Hauptfehlerquellen für die Messgenauigkeit des DNA03 genannt werden:

- Temperaturvariationen
- Code(un)genauigkeit
- Kompensator(un)genauigkeit

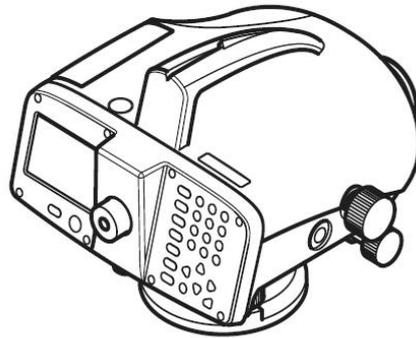


Abb.: 3.5: Digital Level DNA03

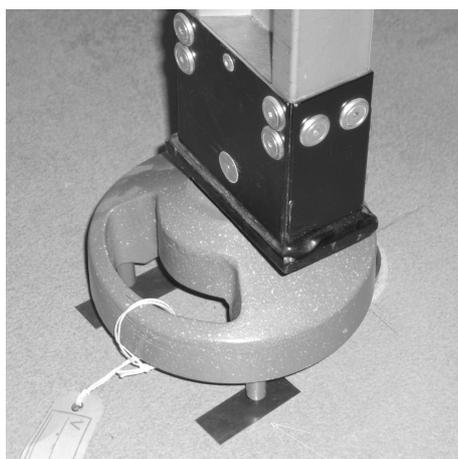
Für Laboruntersuchungen können Temperatur und Luftfeuchtigkeit als konstant angenommen werden und sind daher für Genauigkeitsbetrachtungen nicht weiter relevant. Es wird auch ständig derselbe Lattenabschnitt beobachtet, sodass die Genauigkeit des Codes ebenfalls nicht in die weitere Genauigkeitsuntersuchung eingeht. Für den Fehlerhaushalt sehr wohl interessant ist aber der Einfluss des Kompensators.

Untersuchung der DNA03 Kompensatorgenauigkeit

Um die Kompensatorgenauigkeit festzustellen ist folgender Test durchgeführt worden:

Mit dem DNA03 wurden mehrere Sätze auf eine Invarlatte (Invarcode GPLC2) gemessen. Das Nivellier war hierbei auf einem Messpfeiler aufgebaut (Abb. 3.6 b). Die Invarlatte wurde auf einem Frosch aufgesetzt, der zusätzlich mit Metallplättchen gesichert wurde, um eventuelles Einsinken weitestgehend zu vermeiden (Abb. 3.6 a).

Vor jeder Messung wurde auf das Gehäuse geklopft, um den Kompensator in Schwingung zu versetzen. Die Messung wurde 20 mal wiederholt. Die geschätzte Einschwingzeit des Kompensators beträgt 0,3 sec. Danach wurde nochmals 20 mal gemessen, allerdings ohne klopfen. Nach 30 min wurde das ganze Experiment wiederholt. Das Ziel des Tests war es herauszufinden, ob der Kompensator in die initiale Position mit einer bestimmten Genauigkeit zurückkehrt. Ein weiterer Grund war, abzuschätzen, ob es notwendig ist, den Kompensator mechanisch zu fixieren (und somit das Einschwingen gänzlich zu eliminieren). Aus Tabelle A.1 kann entnommen werden, dass eine Standardabweichung von 4/1000 mm erreicht wird. Spalte 2 und 4 aus Tabelle A.1 repräsentieren die "ungeklopften" Messungen, die einen normalen Messablauf darstellen sollen. Die Streuung dieser Messungen kann als Rauschen des Kompensators betrachtet werden. Sie weist, verglichen mit den geklopften Messungen einen noch niedrigeren Wert aus. Die zweite Messung streut sogar gar nicht.



(a) GPCL2 auf einem Frosch, unterstützt mit Metallplättchen



(b) DNA03 auf einem Messpfiler aufgebaut

Abb.: 3.6: Messaufbau zur Kalibrierung des DNA03 Kompensators

Bei einer näheren Betrachtung der Dämpfungskonstanten lässt sich feststellen, dass sich der Kompensator nach etwa 1,1 sec (siehe Abb. 3.7) in seine Nullposition $\pm 0,5''$ bewegt. De facto ist eine Lattenablesung aber nicht eine einfache manuelle Ablesung, sondern das Resultat von digitaler Bildverarbeitung um die Position der Zielachse zu detektieren.

Nach Leica beschreibt die folgende Gleichung (mit empirisch ermittelten Eingangsparametern) das erwähnte (idealisierte) Verhalten des Kompensators:

$$y(t) = 20'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3.3)$$

Der gesamte Ablauf einer Messung dauert etwa 4 sec, es ist also eine Messfrequenz von 0,25 Hz möglich. Aus Abbildung 3.7 ist zu entnehmen, dass bereits nach 1,6 sec eine sehr stabile ($< \pm 0,5''$) Position des Kompensators erwartet werden kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zum Zeitpunkt jeder Messung eine sehr stabile Position des Kompensators vorausgesetzt werden kann. Die empirische Ermittlung der Genauigkeit der Ablesung mit dem DNA03 ergibt eine Standardabweichung von:

$$\sigma_{\text{Einzelablesung}} = \frac{0,4}{100} \text{ bis } \frac{0,6}{100} \text{ mm} \quad (3.4)$$

3.6 Experimentelle Versuchsaufbauten

Das DNA03 wird über die Software MATLAB unter Zuhilfenahme von GSI-Commands (Leica (2003)) gesteuert. Dadurch ist ein effizienter Datenfluss gewährleistet. Weiters kön-

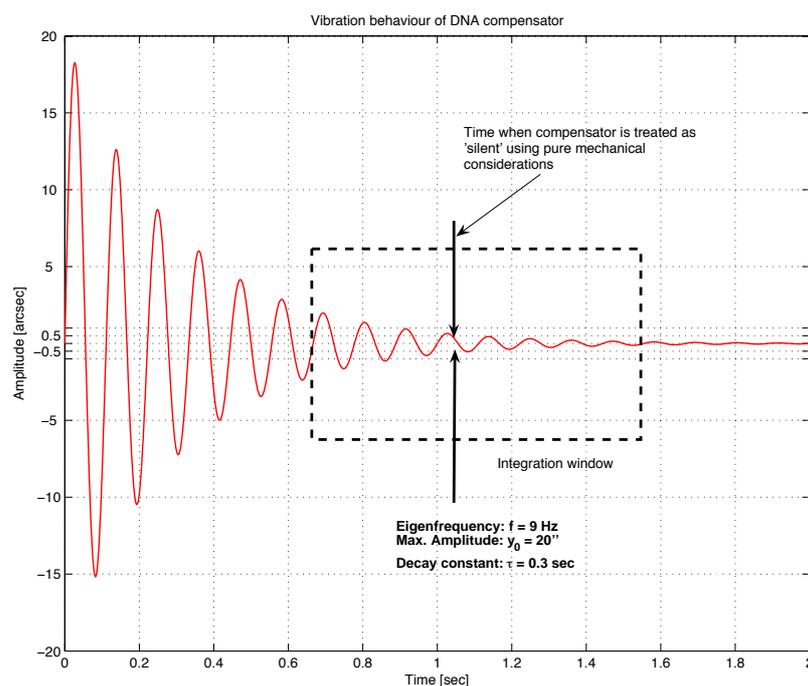


Abb.: 3.7: Vibrationsverhalten des DNA Kompensators

nen mit MATLAB die Messdaten anschließend in Grafiken, wie z.B. in 3.7ff dargestellt werden.

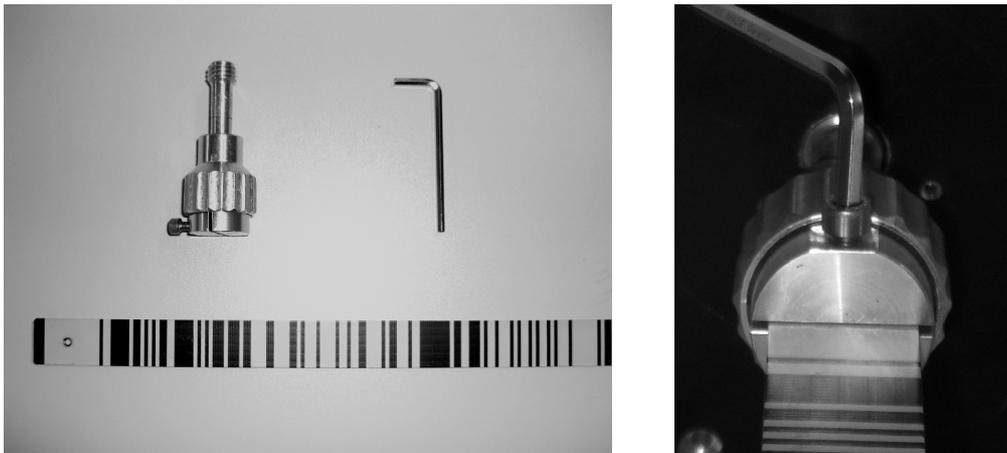
Für die Erfassung der Höhenstabilität eines Stativs mit dem DNA03 boten sich zwei Versuchsaufbauten an:

- (1) Belastung des Teststativs durch ein hängendes Gewicht unterhalb des Stativtellers
- (2) Belastung des Teststativs durch Gewicht auf dem Stativteller

Für beide Versuchsaufbauten muss gewährleistet sein, dass kontinuierliche Messungen möglich sind, eine ausreichende Messgenauigkeit erzielt werden kann und eine 100%ige vertikale Stabilität der Latte (GWLC60) sichergestellt ist. Letztere Forderung erfüllt man mittels eines Zylinders mit Schlitz, in welchem die kurze Invarlatte geklemmt ist und zusätzlich verschraubt werden kann. Der Zylinder selbst ist in die hohle Stativschraube (Herzschraube) geklebt (Abb. 3.8 a und b).

Zu Versuchsaufbau (1):

Zur Bestimmung der Höhenstabilität wurden durch das Aufhängen von Gewichten über eine Schnur, die an der Stativschraube befestigt wurde, Messungen durchgeführt (siehe Abb. 3.9). Dabei hat sich herausgestellt, dass das elastische Verhalten der Schnur



(a) Invarcode, Sicherungsschraube und Inbus-schlüssel

(b) Invarcode geklemmt und verschraubt

Abb.: 3.8: Invarlatte/Inbus/Stativschraube + Einsatz

beim Aufhängen der Gewichte eine oszillierende Bewegung erzeugt. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 3.10 a ersichtlich.

Es ist fast unmöglich durch manuelles Hängen der Gewichte keine zusätzlichen, zufälligen Vibrationen bzw. Schwingungen in der Schnur zu erzeugen, die dann auf das Stativ übertragen werden. Um einen möglichst idealen und reproduzierbaren Lastsprung zu erzeugen, wurde letztendlich Belastungsmethode (2) gewählt.

Zu Versuchsaufbau (2):

Das Testgewicht wurde über ein Seil (mit Gegengewicht) auf den Stativteller ab-

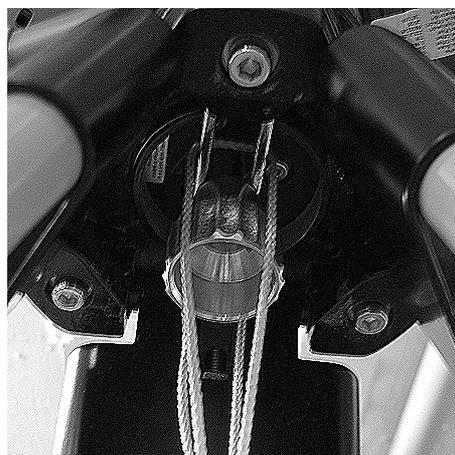


Abb.: 3.9: Befestigung der Schnur am Stativkopf

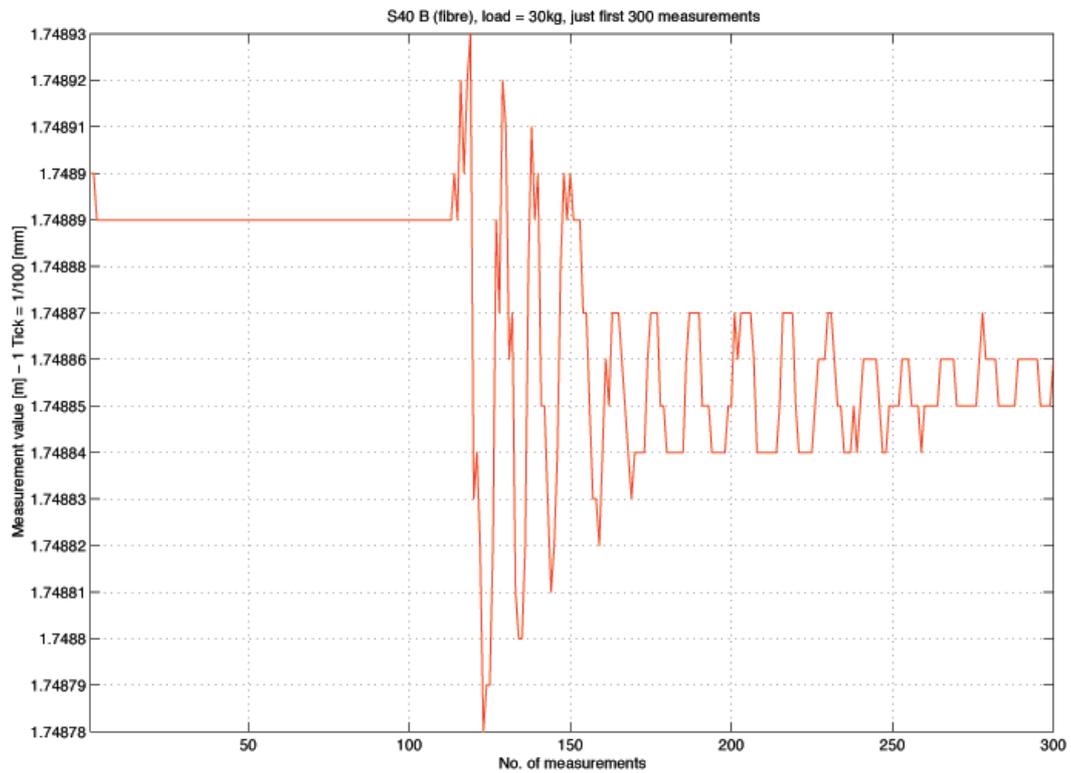


Abb.: 3.10: Oszillation durch elastische Schnur

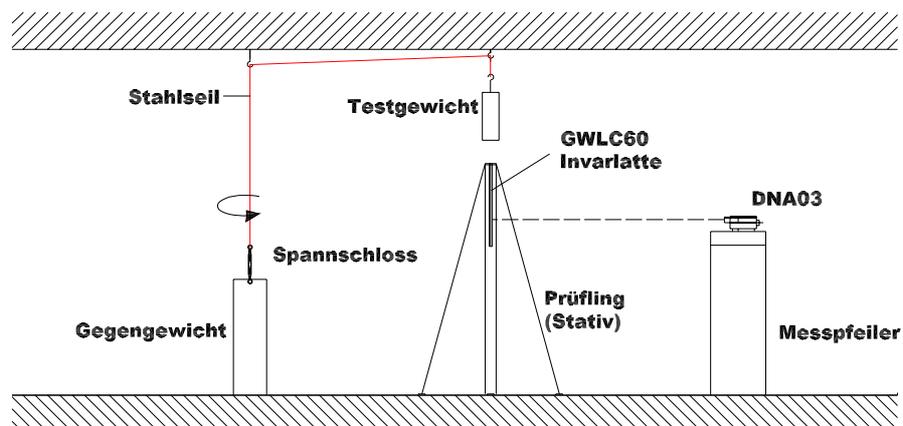


Abb.: 3.11: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Höhenstabilität

gesenkt worden (Abb. 3.11). Verschieden schwere Messingzylinder wurden als Last verwendet. Um dieses Absenken möglichst "sanft" und vergleichbar durchführen zu können ist dem Seil oberhalb des Gegengewichts eine Spannschraube zwischengeschaltet. Anschließend wurde das Stativ mit voll ausgezogenen Beinen aufgebaut und die Klemmen mit einem Drehmomentschlüssel angezogen. Danach sind jeweils ca. 100 Messungen im unbelasteten Zustand erfolgt, um ein stabiles Referenzniveau mit $\sigma \lesssim 0,5/100$ mm zu erreichen. Danach wurde das Testgewicht abgesenkt und nach Messung 400 wieder angehoben bzw. das Stativ wieder entlastet. Das bedeutet eine Messdauer von etwa 30 min, die aus dem in 3.2 angegebenen Zeitbereich abgeleitet ist. Die (höchstmögliche) Abtastrate beträgt 0,25 Hz (siehe auch Kap. 3.5.3.1). Aufgrund der Verarbeitungsdauer der Sensorbilder ist die Messfrequenz des DNA03 beschränkt.

Nach dem Abbèschen Grundsatz oder Komparatorprinzip sollte das Messgerät so konstruiert sein, dass die Messstrecke und die Maßverkörperung in einer Flucht liegen um jegliche Einflüsse von Kippfehlern zu minimieren (aus Dutschke u. Kieferstein (2005)). Bei einem Nivellier müsste sich demnach streng der Code direkt in der Bildebene des Fernrohrs befinden. Ein Parallelversatz ist durch die Natur des Messprinzips "nivellieren" unvermeidbar und durch die Beobachtungsentfernung vorgegeben. Mögliche resultierende Kippfehler werden durch die

- streng vertikale Montage der Latte (Codeteilung parallel zur Bildebene)
- zwangszentrierte Positionierung der Latte in der Stativschraube (Minimierung der Schiefstellung)
- Betrachtung eines sehr kleinen Lattenausschnitts ($< 1/10$ mm)

minimiert. Es wurde bei allen Versuchen die gleiche Schraube verwendet, um größtmögliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Zur unabhängigen Kontrolle wurde die vertikale Veränderung mit dem digitalen Messtaster Sylvac25 (Abb. 3.5.2.1 a und b) vor, während und nach der Belastung zusätzlich gemessen. Die Messergebnisse des Messtasters sind der Tabelle A.1 zu entnehmen.

3.7 Messergebnisse

Es standen insgesamt 15 Stative für Testmessungen zur Verfügung. Jedes Stativ wurde wie in 3.6 (Versuchsaufbau 2) beschrieben getestet. Die hochfrequenten Schwankungen die bei mehreren Graphen sichtbar sind (bis zur Belastung, während der Belastung, und nach der Entlastung) sind durch die Auflösung des DNA03 (1/100 mm) begründet, d.h.

es können keine Veränderungen $< 1/100\text{mm}$ detektiert werden. Zum Teil sind leichte Trends erkennbar, falls nach dem Aufbringen der Last (Lastsprung) die Verformung ein stabiles Niveau annimmt, folglich die Frequenz der Schwankungen aber zunimmt (siehe z.B. Abb. 3.19 a, b und 3.18). Das zulässige Kriterium für max. vertikale Verformungen beträgt für alle Stativ 5/100 mm. Die Tests unterscheiden sich nur durch die verwendete Testmasse. In Abbildung 3.12 sind die Termini welche zur Beschreibung der einzelnen Stativkomponenten verwendet werden dargestellt. Details zu den durchgeführten Tests entnehme man dem Anhang aus Tabelle A.1.

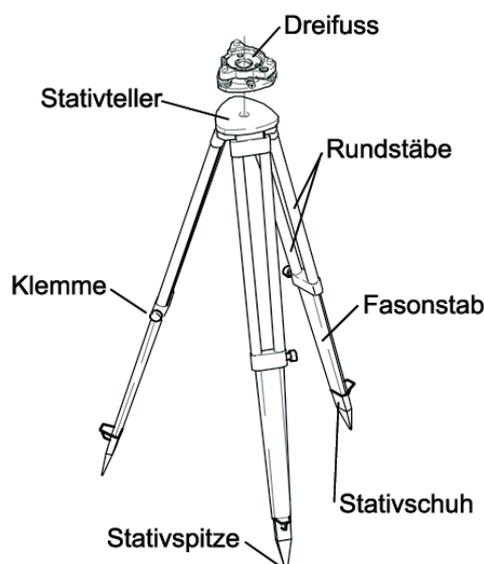


Abb.: 3.12: Benennung der einzelnen Stativkomponenten

Leica GST40 (Holz):

In Abbildung 3.13 ist die vertikale Verformung des Leica GST40 dargestellt. Das GST40 ist das einzige Stativ aus allen Getesteten, das keine Teleskopbeine hat. Es wird vorwiegend für Präzisionsnivellements gebraucht, deshalb geht man auch von einer außerordentlich guten Höhenstabilität aus. Da nur sehr wenige GST40 verfügbar sind, ist hier ein gebrauchtes Stativ (allerdings fast neu, 2-3x verwendet) getestet worden. Die restlichen Stativ sind dagegen alle fabriksneu. Das GST40 wurde mit 30 kg belastet. Normalerweise beträgt das Gewicht eines Nivelliers weniger als 5 kg. Aus Abb. 3.13 ist eine Verformung zwischen $2/100 - 2,5/100$ mm ersichtlich. Bei einer verringerten Last sind naturgemäß kleinere Vertikalveränderungen zu erwarten. Die gemessene Verformung ist bezüglich der

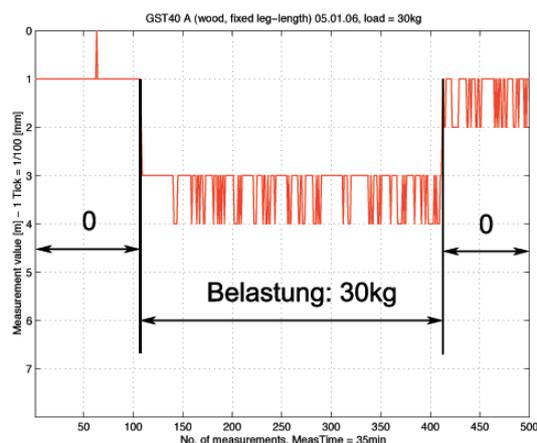


Abb.: 3.13: Höhenstabilität Leica GST40 - fixe Beinlänge (Holz)

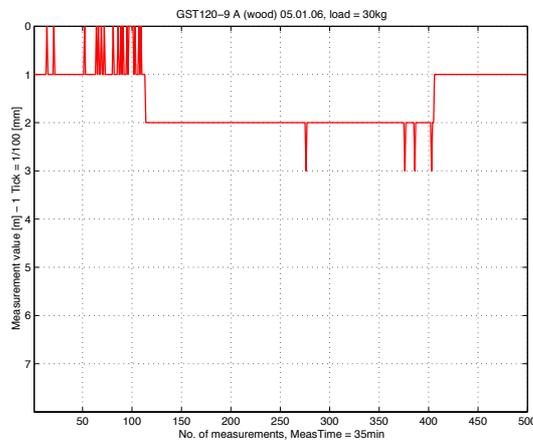
durch die Vorgabe der ISO12858 (1999) (max. 5/100 mm) als gutes Verhalten einzustufen.

Leica GST120-9 (Holz):

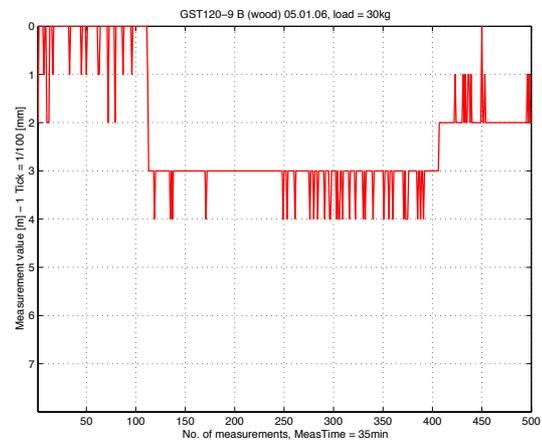
Abbildung 3.14 zeigt die Verformungskurven von 2 verschiedenen Leica GST120-9 Stativen, die als schwere (H) Stative klassifiziert sind (ISO12858 (1999)) und folglich mit 30 kg Belastung getestet wurden. Sie sind aus Buche gefertigt. Das GST120-9-A zeigt eine sehr gute Stabilität. Wenn man die Schwankungen der ersten 100 Messungen vernachlässigt, beträgt die vertikale Verformung 1/100 mm ohne Hystereseeffekt. Das getestete GST120-9-B zeigt unbelastet Schwankungen bis zu 2/100 mm. Bei einer Mittelung der ersten 100 Messungen kann von einer vertikalen Verschiebung von $\approx 2,5/100$ mm ausgegangen werden. Dieser Wert deckt sich ebenfalls mit den Werten der Messuhr, die 2,45/100 und 1,96/100 mm (B-Prüfling) betragen. Der Hystereseeffekt beträgt etwa 1,5/100 mm. Beide Stative, insbesondere das GST120-9-A zeigen sehr gute Eigenschaften und liegen deutlich unter dem durch die ISO12858 (1999) vorgegebenen Limit von 5/100 mm.

Leica CTP101 (Holz):

Abbildung 3.15 zeigt die Verformungskurven von zwei verschiedenen Leica CTP101 Stativen, die für Höhenstabilitätstests eine Sonderstellung einnehmen und normalerweise nur mit 20 kg getestet werden. Es handelt sich um ein Holzstativ mit etwas kürzerer Beinlänge. Aufgrund des Haupteinsatzgebietes für Baustellentachymeter hat Leica eine verringerte Testmasse zur Prüfung der Höhenstabilität genehmigt. Das CTP101 kann daher nicht als schweres Stativ klassifiziert werden. Um die Vergleichbarkeit zu wahren, wurde es aber ebenfalls mit 30 kg getestet. Das CTP101-A zeigt unter Belastung eine Höhenstabilität von 3/100 mm, mit einer Hysterese von $\approx 0,5/100$ mm. Das CTP101-B verformt sich etwas stärker und liegt etwa bei 4/100 mm was die vorgegebenen Kriterien ebenfalls noch erfüllt. Es schneidet im Vergleich mit dem GST120-9 etwas schlechter ab. CTP Stati-

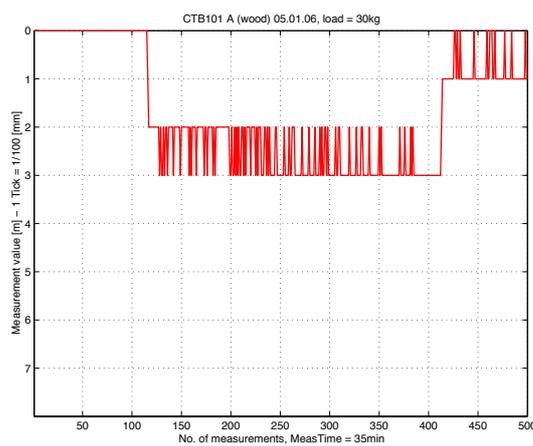


(a) Leica GST120-9, A

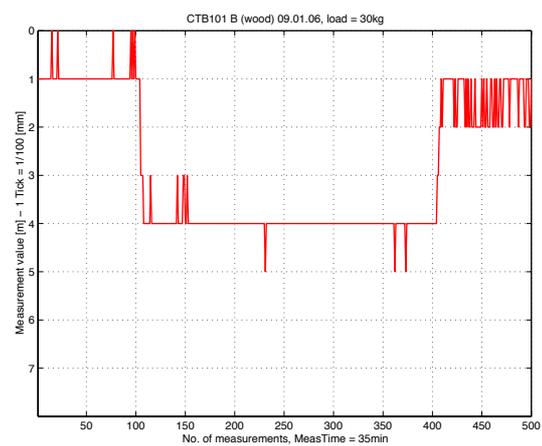


(b) Leica GST120-9, B

Abb.: 3.14: Höhenstabilität Leica GST120-9 (Holz)



(a) Leica CTP101, A



(b) Leica CTP101, B

Abb.: 3.15: Höhenstabilität Leica CTP101 (Holz)

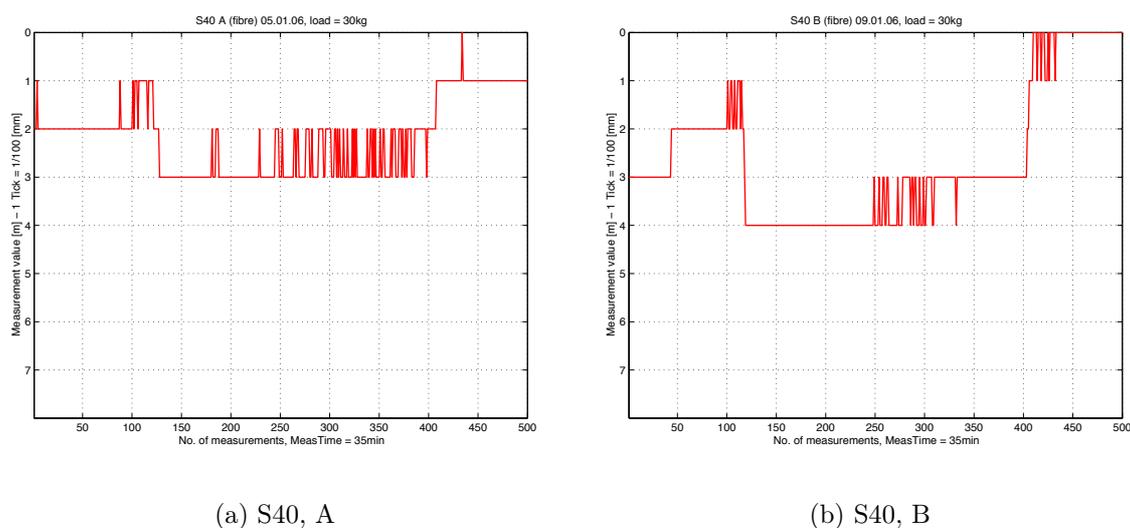


Abb.: 3.16: Höhenstabilität S40 (Fiberglas) [Nanjing Survey, China]

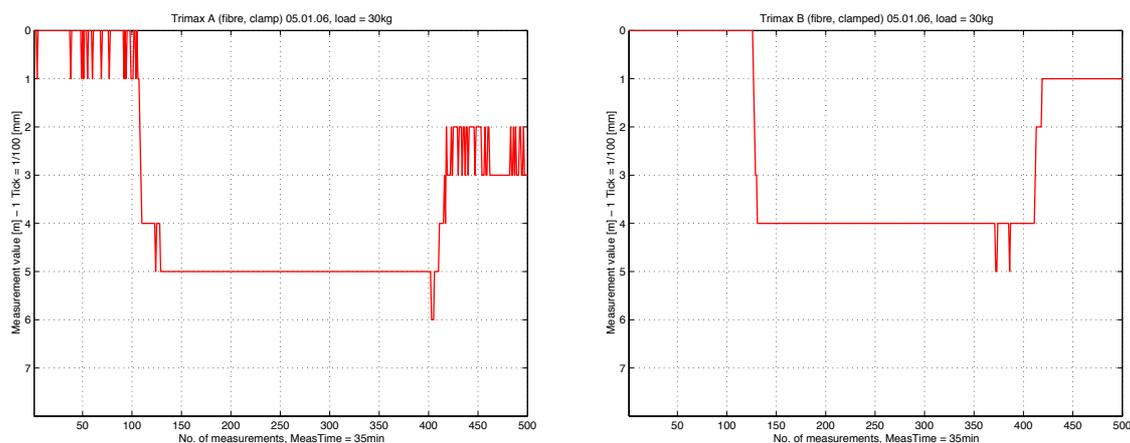
ve sind Low-cost Stative aus China, produziert nach Leica Spezifikationen. Sie weisen in diesem Kontext eine sehr gute Vertikalstabilität auf.

Nanjing Survey S40 (Fiberglas):

Abbildung 3.16 zeigt die Verformungskurven zweier Fiberglasstative, deren Rundstäbe sowie der Fasonstab aus einem Voll(fiberglas)profil besteht. Das S40 ist ein schweres Stativ und wurde mit 30 kg belastet. Falls alle Testergebnisse positiv verlaufen, könnte dieses Stativ ev. parallel zum GST120 als (fast) baugleiches Fiberglasmodell in den Markt eingeführt werden. Die Verformung des S40–A bewegt sich im Bereich von 2/100 mm (inkl. Entlastung), das ist ein sehr guter Wert und charakterisiert eine gute Vertikalstabilität. Das S40–B (Abb. 3.16 b) weist hingegen eine etwas ungewöhnliche Verformungskurve auf. Die anfängliche Hebung des Stativkopfes kann nur durch minimale Restspannungen im Material erklärt werden. Die gesamte vertikale Deformation bewegt sich nach wie vor unterhalb von 4/100 mm, somit ist Konformität zur ISO12858 (1999) gegeben.

Crain Trimax (Fiberglas):

Abbildung 3.17 zeigt die Verformungskurve zweier Crain Trimax Stative, die ebenfalls aus Fiberglas konstruiert sind. Die Stäbe (Oberteil des Stativs) sind Fiberglashohlprofile. Dieses Modell besitzt keine Schraubklemme, sondern nur eine Schnellklemme was u.U. auf eine verringerte Vertikalstabilität schließen lässt. Das Crain Trimax ist ebenfalls als schweres (H) Stativ kategorisiert und folglich mit 30 kg belastet. Die Verformungen beider Stative zeigen ein ähnliches Verhalten. Das Trimax–A stößt an die Grenze der zulässigen Verformung von 5/100 mm und weist eine relativ hohe Hysterese von 2/100 - 3/100 mm auf. Die zulässige Verformung gemäß ISO12858 (1999) definiert eine zulässige Verformung



(a) Trimax, A

(b) Trimax, B

Abb.: 3.17: Höhenstabilität Trimax (Fiberglas) [Crain, US.]

vor, während und nach der Belastung von 5/100 mm, deshalb ist auch diese Hysterese noch als problemlos einzustufen. Es ist zu empfehlen noch weitere Stative zu testen, um ein besseres Bild über die relativ hohe Vertikaldeformation zu erhalten.

Leica GST05 (Holz):

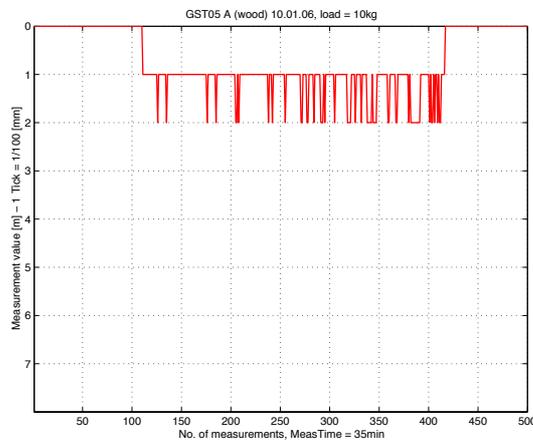
Abbildung 3.18 zeigt die Höhenstabilität der Leica GST05 Holz Stative. Das GST05 ist ein leichtes (L) Stativ und vorwiegend für GPS-Einsätze und als Stativ für Bautheodolite bzw. Bautachymeter vorgesehen. Das max. zulässige Instrumentengewicht beträgt 5 kg. Die Stäbe der Stativbeine bestehen aus einem Fichtenkern, der mit einer EPS-Schicht ummantelt ist. Wie man aus Abb. 3.18 entnehmen kann, weisen beide Teststative eine sehr gute Verformungskurve auf. Nach einer Belastung mit 10 kg verformen sich beide Stative um höchstens 2/100 mm, bei 0 mm Hysterese. Für die vorgesehenen Einsatzmöglichkeiten sind das hervorragende Werte.

Leica GST05L (Alu):

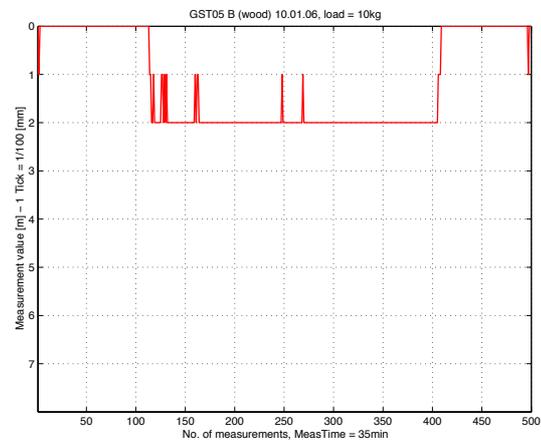
Abbildung 3.19 zeigt die Vertikalverformung des GST05L, einem Aluminiumstativ, das ebenfalls (wie das GST05) als Baustellen- und GPS-Stativ vorgesehen ist. Im Vergleich zur Ausführung in Holz weisen beide Stative eine etwas größere Vertikalverschiebung und Hysterese, nämlich 3/100 mm und 1/100 mm auf, was sich durch das geringere Eigengewicht erklären lässt.

Leica CTP103 (Alu):

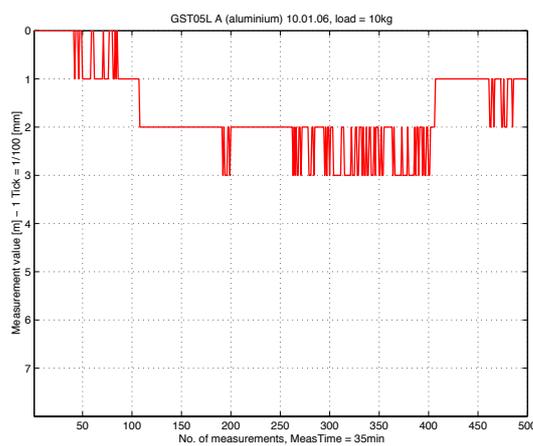
Das CTP103 in Abb. 3.20 verhält sich sehr ähnlich dem GST05L. Es hat aber um etwa 15 cm kürzere Stativbeine. Bei einer Belastung von 10 kg verformt es sich um bis zu 3/100 mm, mit einer Hysterese von 1/100 mm. Es ist ebenso wie das Modell aus Holz eine



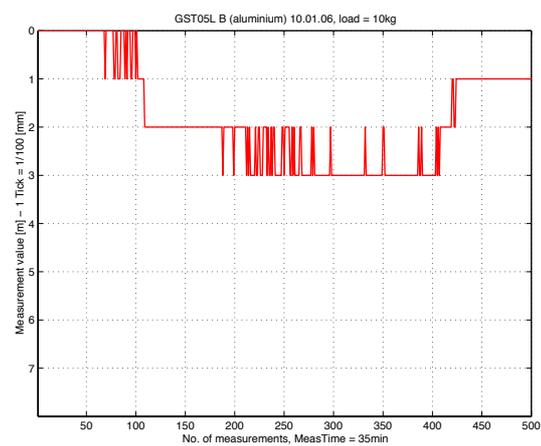
(a) GST05, A



(b) GST05, B

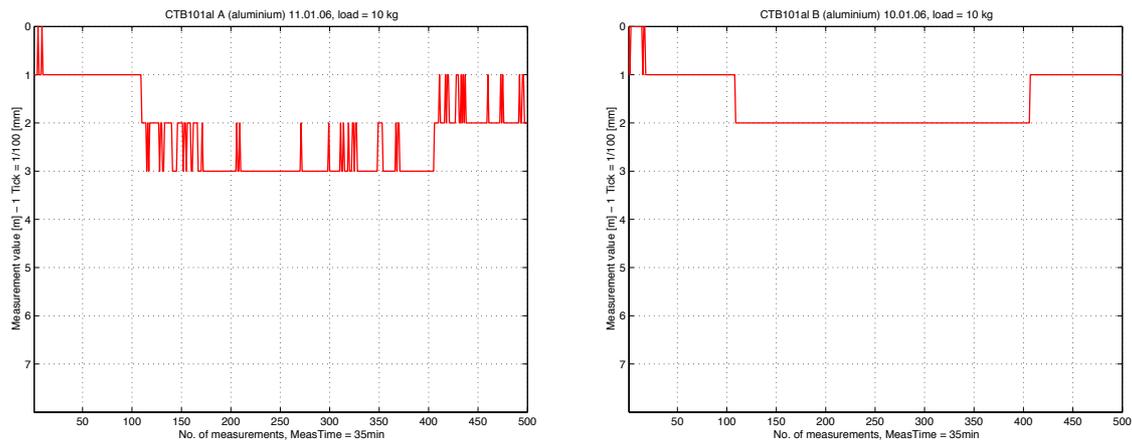
Abb.: 3.18: Höhenstabilität Leica GST05 (Holz)

(a) GST05L, A



(b) GST05L, B

Abb.: 3.19: Höhenstabilität Leica GST05L (Aluminium)



(a) CTB103, A

(b) CTB103, B

Abb.: 3.20: Höhenstabilität Leica CTP103 (Aluminium)

Low-cost Variante aus China. Es wird vorwiegend für Instrumente niedriger Genauigkeit eingesetzt. Die Kriterien nach ISO12858 (1999) sind aber dennoch erfüllt.

3.8 Diskussion der Ergebnisse

Alle gestesteten Stative erfüllen die durch die ISO12858 (1999) definierten Kriterien zur Höhenstabilität. Bei den schweren Stativen (H) schneidet das Leica GST120-9 mit leichtem Vorsprung zum S40 am besten ab. Das S40 von Nanjing Survey und das CTP101 (Holz) liegen in etwa gleichauf, wobei das CTP101 um ca. 15 cm kürzere Stativbeine hat und daher eine leicht höhere Stabilität aufweist. Das Trimax (Crain) erfüllt die Kriterien ebenfalls, es ist aber das einzige Stativ, dessen Höhenstabilität an die definierten Grenzwerte stößt. Alle Stative, die als leicht (L) eingestuft sind, erfüllen die definierten Kriterien ebenfalls. Das GST05L hat hier die besten Werte.

Die Sprungantwort erfolgt bei allen Prüflingen innerhalb von 2 Messungen, d.h. die Deformation erreicht ein stabiles Niveau in weniger als ≈ 8 sec, welches sich noch um max. 1/100 mm verändern (nachsinken) kann (CTP101 (a), S40 (b), Trimax (a), GST05L (b)).

Zwischen der Deformation des Stativs und der aufgebrachten Last kann ein funktionaler Zusammenhang hergestellt werden. In Abbildung 3.21 ist das idealisierte Verhalten nach einem Lastsprung (Aufsetzen des Instruments) gezeigt. Dieses Verhalten kann jedoch für die getesteten Stative aufgrund der Abtastrate von 0,25 Hz (für die Höhenstabilität)

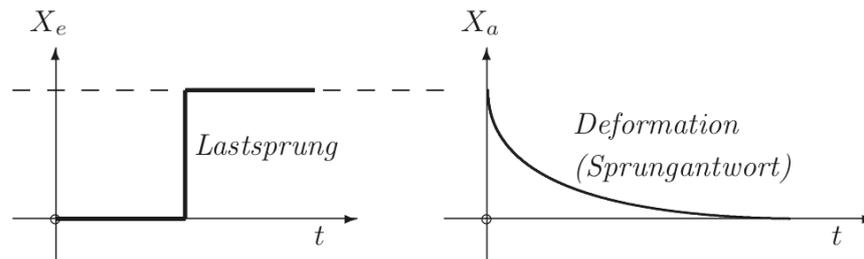


Abb.: 3.21: Fiktives Übertragungsverhalten

nicht beliebig genau rekonstruiert werden. Über eine Laplacetransformation könnte eine Übertragungsfunktion bestimmt, und so das jeweilige Stativ ohne a-priori-Kenntnis von Materialparametern charakterisiert werden.

Die mit dem Messtaster (3.5.2.1) gemessenen Hysteresewerte decken sich mit den Testergebnissen und betragen max. 1,6/100 mm. Auch bei genauer Betrachtung der Ergebnisse ist kein materialspezifisches Verhalten feststellbar. Die beiden Trimax Stative erreichen zwar die höchsten Werte bez. Vertikalverformung, das S40 (ebenfalls ein Fiberglasmodell) ist aber durchaus mit den Holzmodellen GST120-9 und CTP101 vergleichbar.

Bei einer horizontalen Entfernung von 100 m und einem Zenitwinkel von 50° bewirkt eine vertikale Veränderung des Stativs um 1,5/100 mm eine Änderung der Zenitdistanz von $0,06''$, d.h. sie ist praktisch vernachlässigbar.

3.9 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde ein Messverfahren entwickelt, womit die Höhenstabilität von Stativen überprüft werden kann. Aus den möglichen Optionen hat sich speziell aus Gründen der Automatisierbarkeit das DNA03 (ein Digitalnivellier) als geeigneter Sensor erwiesen. Für die vorliegende Aufgabe ist seine Messgenauigkeit ausreichend genau, und es kann über die RS232-Schnittstelle gut in einen digitalen Datenfluss mit anschließender Visualisierung eingebunden werden. Ein digitaler, automatisierbarer Weggeber wäre für das beschriebene Vorhaben ebenfalls sehr gut geeignet, was den Messaufbau betrifft, aufgrund der direkten Montagemöglichkeit am Stativteller sogar zu bevorzugen. In den Abbildungen 3.13 bis 3.20 ist dann die Höhenstabilität der jeweiligen Stative graphisch dargestellt und ihr Verhalten anschließend interpretiert. Alle Stative erfüllen die ISO-Spezifikation für die Höhenstabilität. Das nächste Kapitel wird näher auf zwei weitere wichtige Stativeigenschaften, nämlich die horizontale Verdrehsteifigkeit und die horizontale Drift, eingehen.

Kapitel 4

Horizontale Verdrehsteifigkeit und Horizontaldrift von Stativen

Kapitel 3 hat sich mit der Höhenstabilität von Stativen beschäftigt. Zwei weitere Eigenschaften, die für die Beurteilung von Stativen eine große Bedeutung haben, werden in diesem Kapitel behandelt:

Die horizontale Verdrehsteifigkeit und die horizontale Drift. Beide Eigenschaften haben einen entscheidenden Einfluss auf die Orientierung des Instruments.

Die Verdrehsteifigkeit ist die Eigenschaft eines Stativs, horizontale Verdrehungen aufzunehmen, es soll aber möglichst wieder in die ursprüngliche Position zurückkehren. Das ist aufgrund Imperfektionen im Material faktisch unmöglich und somit verbleibt eine Differenz zur Erstposition, die als Hysterese bezeichnet wird. Es werden insbesondere diese Hysteresewerte, gemeinsam mit den Extremwerten der Verformungen gemessen, um ein umfassendes Bild der Verdrehsteifigkeit zu erhalten.

Die horizontale Drift eines Stativs ist ein Maß, wie sehr sich die "Orientierung" eines Stativs über einen bestimmten Zeitraum verändert. Sie ist nicht in der ISO12858 (1999) definiert, es ist aber ein zusätzliches Maß, das von Leica zur Qualitätssicherung ihrer Stativ eingeführt wurde und im folgenden Kapitel ebenso Gegenstand der Untersuchungen ist.

4.1 Erwartete Deformationen

Die Gewichtsbelastung durch das Instrument und die durch die Motorisierung hervorgerufenen Drehmomente (beim Beschleunigen und beim Bremsen) kann getrennt voneinander betrachtet werden.

Nach der Aufstellung können noch Restspannungen (ev. durch ungleiches oder zu starkes Klemmen, durch generell zu stark angezogene Schrauben, etc.) im Stativ verbleiben. Der stetige Abbau dieser Spannungen und mögliche Bewegungen in der Klemme können zu Drifterscheinungen führen. Eine strenge Trennung der beiden (möglichen) Einflüsse ist nur dann möglich, wenn das Driftverhalten der Klemme durch geeignete Sensoren (z.B. DMS oder Messwertgeber) nachgewiesen werden kann. Dies war aber im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Um die Größenordnungen der verschiedenen Deformationen a priori abschätzen zu können, sei nochmals auf folgende Unterscheidung hingewiesen:

- (a) Horizontale Drift (verursacht durch das Instrumentengewicht)
- (b) Hz-Verdrehsteifigkeit kontinuierlich gemessen (nur durch die Drehung des Instruments hervorgerufen) unter besonderer Beobachtung des Einflusses der motorisierten Tachymeter
- (c) Hz-Verdrehsteifigkeit, gemessen nach Vorgaben gemäß ISO12858 (1999)

Leica hat eine horizontale Stabilität des Stativs bzw. der Stativkopfplatte von 8^{cc} als kumulativen Wert über einen Zeitraum von 15 min definiert. Die Hz-Drift (a) wird dabei jeweils bei 0/5/10/15 min gemessen. Das heißt, es ist unter Berücksichtigung von Extremwerten ein Messbereich von etwa $\pm 8^{cc}$ erforderlich. Falls jedoch über einen längeren Zeitraum (z.B. mehrere Stunden) Beobachtungen angestellt werden, ist es schwierig den Messbereich a priori festzulegen. Die ersten Tests wurden über ~ 12 h durchgeführt und haben gezeigt, dass mit einem Abklingen der Hz-Drift nach ≈ 3 h zu rechnen ist.

Die Hz-Verdrehsteifigkeit (c) ist grundsätzlich eine Hysteresemessung. Nach ISO12858 (1999) muss das Stativ ein Drehmoment, das bei der Bedienung des Instruments auftritt, ohne bleibende Verformung aufnehmen können. Zur Überprüfung dieses Sachverhalts wird der Stativkopf mit angeschraubtem Theodolit mit Hilfe zweier diametral angreifender, tangential wirkender Kräfte um 20 mgon verdreht. Die Größe der angebrachten Kraft spielt keine Rolle, entscheidend ist nur die Verdrehung um 20 mgon. Nach ISO12858 (1999) ist für leichte Stative (L) eine bleibende Verdrehung von 30^{cc} , für schwere Stative (H) sind 10^{cc} zugelassen. Nach Ingensand (2001) liegen die Einflüsse von motorisierten Tachymetern in einem Bereich von etwa 10 mgon (max.).

Dieser Wert kann folglich als Richtmaß für den erforderlichen Messbereich für (b) dienen.

4.2 Eingesetzte Messsensoren

In 4.1 ist der erforderliche Messbereich und das notwendige horizontale Auflösungsvermögen zur Bestimmung der horizontalen Drift bez. Verdrehsteifigkeit angeführt. Aufgrund dessen standen zwei verschiedene Sensoren zur Verfügung:

4.2.1 Tachymeter Sensoren

Der Leica TC2002 mit einer Genauigkeit von $1,5''$ ist ein Instrument höchster Genauigkeit. Er wird zur Bestimmung der Verdrehsteifigkeit nach ISO12858 (1999), wie in 4.6 noch beschrieben wird, eingesetzt. Weiters kommt auch noch ein TCA2003 (Genauigkeit: $1,5''$) zur Kalibrierung des Kollimators zum Einsatz und als Instrument, das einen definierten Messprozess ausführt. Letzteres bedeutet, dass der TCA2003, welcher auf einem Stativ montiert ist, eine Satzmessung ausführt, währenddessen die Beobachtung der Hz-Verdrehung durch einen Kollimator (siehe 4.2.2) erfolgt.

4.2.2 (Auto-)kollimator

Zur Bestimmung von kleinen Winkeländerungen eignet sich besonders das Verfahren der Autokollimation. Sind diese Messungen kontinuierlich und automatisiert auszuführen, so eignet sich dafür besonders ein elektronischer Autokollimator. Zum Einsatz kommt ein Eigenbausystem von Leica (EO Colli), die Detektion eines reflektierten Laserstrahls übernimmt ein Positionsdetektor (PSD) von SİTEK ELECTRO OPTICS.

4.2.2.1 Technisches Prinzip

Nach Kahmen (1997) spricht man von Autokollimation, wenn parallele Lichtstrahlen durch einen rechtwinklig im Strahlengang stehenden Spiegel in sich selbst reflektiert werden. In Abbildung 4.1 ist das Messprinzip eines Autokollimationsfernrohres graphisch dargestellt. Das Verfahren der Autokollimation eignet sich besonders zur Bestimmung kleiner Winkeländerungen. Wird der Spiegel um einen kleinen Winkel δ gedreht, so werden die reflektierten Strahlen um 2δ abgelenkt. Die Zielgenauigkeit ist dadurch doppelt so groß als beim Anzielen eines herkömmlichen Kollimators.

In Tabelle B.1 (Anhang) sind die technischen Daten des EO Kollimators aufgelistet. Der EO Kollimator hat einen hochlinearen Positionsdetektor, der nach dem "lateral effect photodiode" Prinzip funktioniert. Ein zweidimensionaler PSD kann einen sich über den Sensor bewegenden Lichtstrahl in zwei Richtungen detektieren. Der Sensor hat jeweils 2

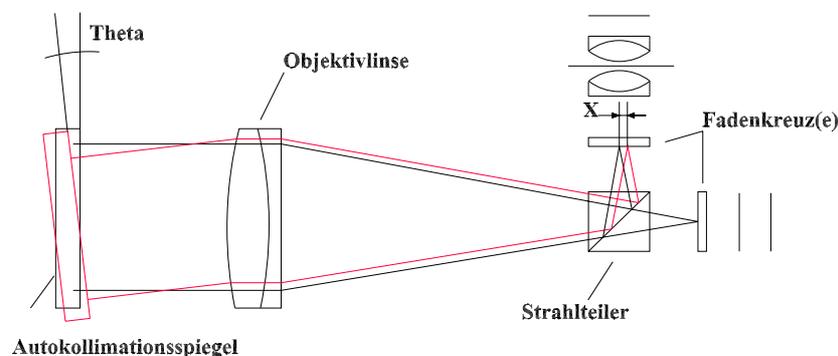


Abb.: 4.1: Prinzip eines Autokollimationsfernrohres

rechtwinklig zueinander stehende Terminals, zwei auf der Frontseite, zwei an der Rückseite. Der photoelektrische Fluss, der durch das einfallende Licht erzeugt wird, wird sodann als eingehender Strom X_1 und X_2 und als ausgehender Strom Y_1 und Y_2 weiterverarbeitet. Durch folgende Beziehung zwischen den Strömen kann die Position des Lichtstrahls berechnet werden:

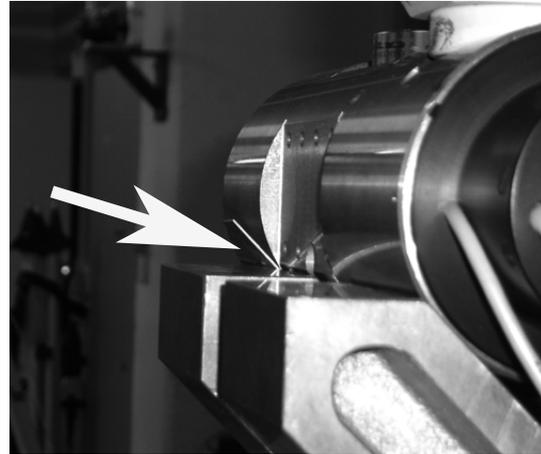
$$y = \frac{L_y}{2} \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} \quad x = \frac{L_x}{2} \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2} \quad L_{x,y} = \text{Länge des PSD} \quad (4.1)$$

Gelagert ist der Kollimator auf zwei massiven X-förmigen Metallprismen (Abb. 4.2 (a)). Durch dünne Metallplättchen kann die Kollimatorausrichtung minimal angepasst werden (siehe Pfeil, Abb. 4.2 b). Der Kollimator besitzt kein Okular, deshalb kann der einfallende Strahl über einen Strahlteiler auf eine CCD-Kamera abgebildet und so über einen Monitor visualisiert werden. In Abbildung 4.3 (a) und (b) wird das visualisierte Bild, eines schlecht ausgerichteten (b) bzw. sehr gut ausgerichteten Spiegels (a), gezeigt. Über eine spezielle Steuerungssoftware (gemeinsam mit der zugehörigen Steuerhardware) kann eine Auslesefrequenz der Messwerte (vom Positionsdetektor) von 16 Hz erreicht werden.

Nachdem der Autokollimator schon längere Zeit nicht mehr verwendet wurde, ist eine Kalibrierung durchgeführt worden. Dieser Prozess wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.



(a) Kollimatoraufstellung auf schweren X-Prismen



(b) Leichte Korrektur der Kollimatorposition

Abb.: 4.2: Kollimatoraufstellung



(a) Starke Reflexion



(b) schwache Reflexion

Abb.: 4.3: Bilder des reflektierten Strahls



(a) TCA2003 mit zusätzlichem Autokollimationsspiegel, montiert auf dem Fernrohr



(b) Ausgerichtete Aufstellung zum EO Colli

Abb.: 4.4: Aufstellung des TCA2003 auf einem Kurbelstativ

4.2.2.2 Kalibrierung

In 3.4.1 wurde bereits erwähnt, dass für Kalibrierzwecke ein Sensor verwendet werden muss, der etwa 10 mal genauer misst als der Prüfling selbst. Im Falle des zu prüfenden Autokollimators war es sehr schwierig dieser Forderung nachzukommen. Es bedarf eines erheblichen finanziellen Rahmens, um Sensoren für den genannten Genauigkeitsbereich zu beschaffen. Deshalb wurde hier auf einen bereits vorhandenen Tachymeter höchster Genauigkeit zurückgegriffen (Leica TCA2003, Winkelmessgenauigkeit: $1,5''$).

In Abbildung 4.4 wird der Messaufbau zur Kalibrierung des EO Kollimators gezeigt. Die höhenmäßige Ausrichtung der beiden Achsen erfolgte über ein Kurbelstativ, lagemäßig durch Verrücken des Stativs. Auf das Objektiv des TCA2003 (Abb. 4.4 a) wurde mittels eines Klemmgewindes ein Autokollimationsspiegel befestigt.

Nach der Ausrichtung sind die Stativschuhe des Kurbelstativs mit Extragewichten belastet worden, um eine zusätzliche Stabilität zu erreichen. Am TCA2003 sind drei Winkel φ_i eingestellt worden. In jeder Position wurde der Hz-Winkel ca. 300 mal ausgelesen und der Mittelwert gebildet. Abbildung 4.5 zeigt die mit dem Kollimator aufgezeichneten Messwerte. In Tabelle B.1 im Anhang ist das Ergebnis wiedergegeben und die Auflösung des Kollimators über die mit dem TCA2003 gemessenen $\delta\varphi$ berechnet worden. Der erwähnte Positionsdetektor ist laut Herstellerangabe über den gesamten Bereich hochlinear, Verzeichnungsparameter des Linsensystems des Kollimators standen nicht zur Verfügung.

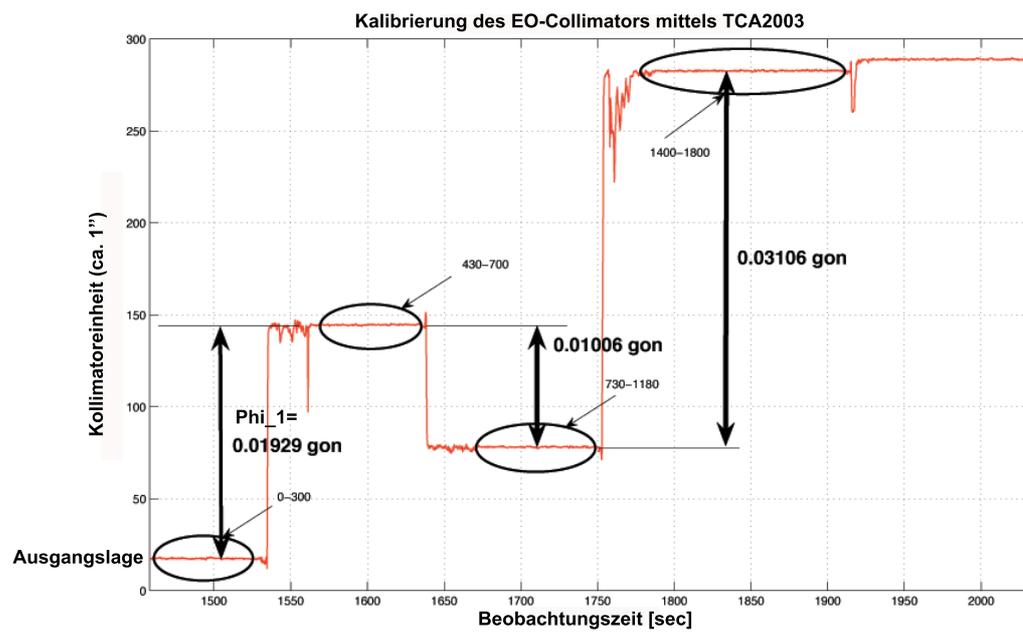


Abb.: 4.5: Kalibrierung des EO Colli

Es ist aufgrund des Ergebnisses aus Tabelle B.1 eine Genauigkeit der Messungen mit dem EO Kolti von 3^{cc} zu erwarten.

4.3 Versuchsaufbau (Auto-)kollimator

Wie Abbildung 4.1 zeigt, muss am Untersuchungsobjekt ein Autokollimationsspiegel angebracht werden. Die Befestigung erfolgte auf einer Aluminiumplatte, die zwischen Stativteller und Dreifuß zwischengeklemmt wurde. Um den erhöhten Reibungskoeffizienten der durch die gerillte Oberfläche des Stativtellers erzeugt wird auch mit der zwischengeschalteten Aluminiumplatte weiterhin zu gewährleisten, ist auf diese eine idente Oberfläche gefräst worden. Abbildung 4.6 zeigt die montierte Platte samt Autokollimationsspiegel.

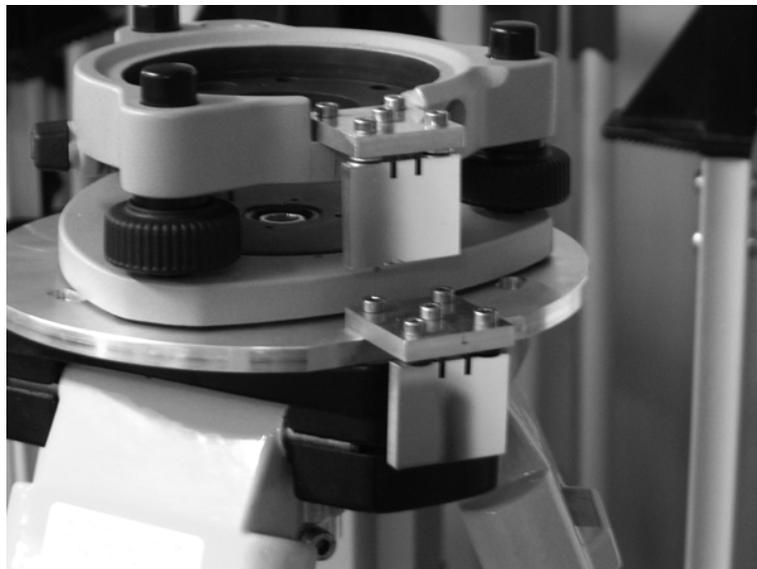


Abb.: 4.6: Autokollimationsspiegel

Auf dem Dreifuß ist ein weiterer Spiegel zu sehen, der eine zusätzliche Autokollimationsmessung auf den Dreifuß ermöglicht. Die $1\text{-}2\text{ cm}^2$ großen Spiegel sind mit drei Inbusschrauben so befestigt, dass eine Feinjustierung möglich ist, wodurch der Spiegel senkrecht auf den Zielstrahl ausgerichtet werden kann. Aufgrund der relativ kleinen Spiegelfläche ist das sehr schwierig und eine minimale Justierung über die Inbusschrauben kann bereits ausreichen um den Spiegel normal auf den Zielstrahl auszurichten. Bei der Ausrichtung des Kollimators auf das Untersuchungsobjekt (Stativ) ist man auf die Beobachtung des Lichtflecks am Bildschirm angewiesen.

Die exzentrische (nicht im Zentrum des Stativtellers) Anordnung der Spiegel ist insofern unproblematisch, als dass eine mit dem Prinzip der Autokollimation gemessene Bildverschiebung \mathbf{X} im Fernrohr (siehe Abb. 4.1) nur von der Richtungsdivergenz θ der beiden Achsen und der Brennweite des Fernrohrobjektivs abhängt. Die Bildverschiebung \mathbf{X} ist al-

so nicht entfernungsabhängig. Die Spiegel sind mit dem Stativteller über die Herzschraube fix verbunden, sodass an jedem Punkt dieselbe Verdrehung vorausgesetzt werden kann.

4.4 Bestimmung der Horizontaldrift

Um einen besseren Eindruck der Hz-Drift zu erhalten, wurde die Messzeit von 15 min auf mindestens 2 h ausgedehnt. Die Messfrequenz des Kollimators wurde auf 0,5 Hz reduziert, um das anfallende Datenvolumen in Grenzen zu halten. Für den Versuch ist das jeweilige Stativ auf dem bereits in Kapitel 3 beschriebenen Messplatz aufgebaut worden. Zwischen dem Stativteller und dem Dreifuß ist die in 4.3 beschriebene Platte zur Befestigung des Autokollimationsspiegels eingesetzt worden (Abb. 4.6). Um die Stative besser vergleichen zu können, wurden alle mit einem TCA2003 belastet.

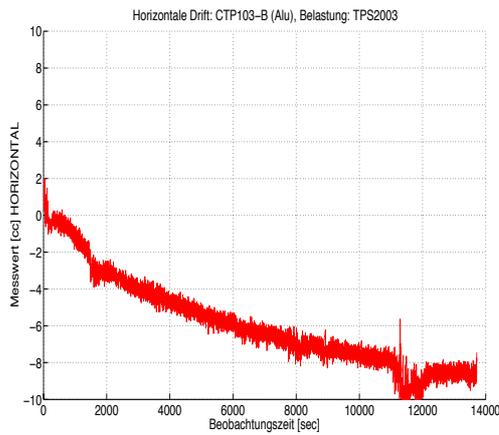
4.4.1 Messergebnisse und Beurteilung

Die Ergebnisse der umfangreichen Testmessungen für die verschiedenen Stativtypen sind in den Abbildungen 4.7 und 4.8 graphisch dargestellt.

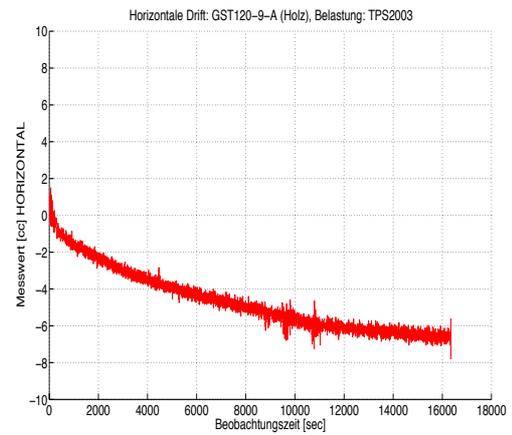
Modell	Drift gesamt [cc]	Drift nach 15 min [cc]	Toleranz eingehalten	Bemerkung
GST120-9	6,5	1,5	JA	
CTP101	4	1,5	JA	Sehr gute Werte
S40	22,5	12	NEIN	Relativ große Drift, bedenklich falls Markteinführung
GST05	3	0,5	JA	Variationen am Ende der Kurve durch menschl. Einflüsse erklärbar
GST05L	23	15	NEIN	Hoher Wert
CTP103	9,5	2	NEIN	Erkennbare Variationen ebenfalls durch menschl. Einflüsse erklärbar
Trimax	8,5	8	NEIN	

Tab.: 4.1: Ergebnisse der Messungen zur Hz-Drift

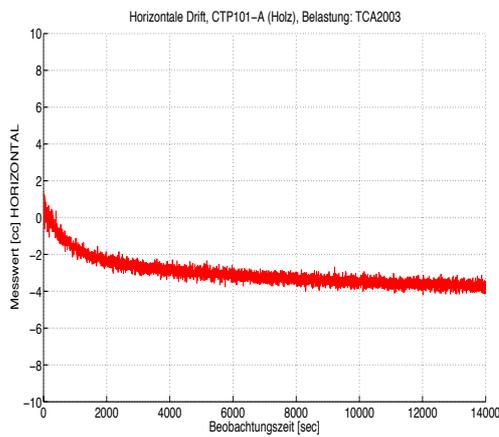
In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der Tests zur Bestimmung der Horizontaldrift zusammengestellt. Die Messdauer beträgt zwischen 2,5 - 4,5 h. Die in Spalte 4 angegebene



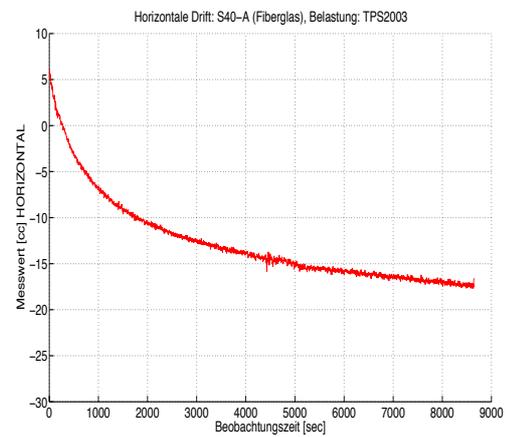
(a) CTP103, B (Alu)



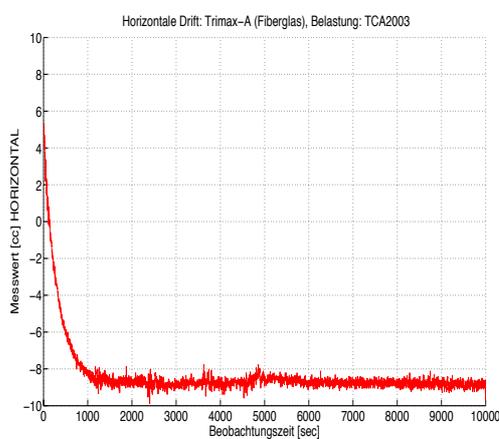
(b) GST120-9, A (Holz)



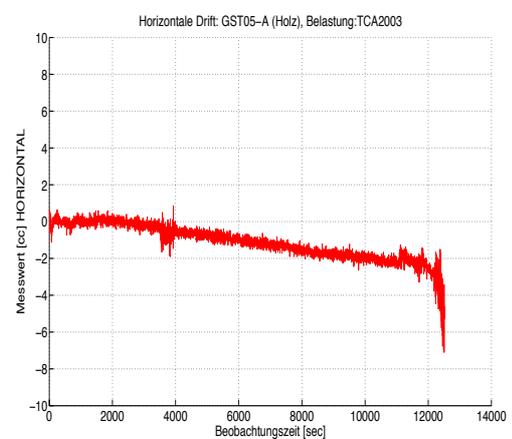
(c) CTP101, A (Holz)



(d) S40, A (Fiberglas)



(e) Trimax, B (Fiberglas)



(f) GST05, B (Holz)

Abb.: 4.7: Hz-Drift der getesteten Stative (i)

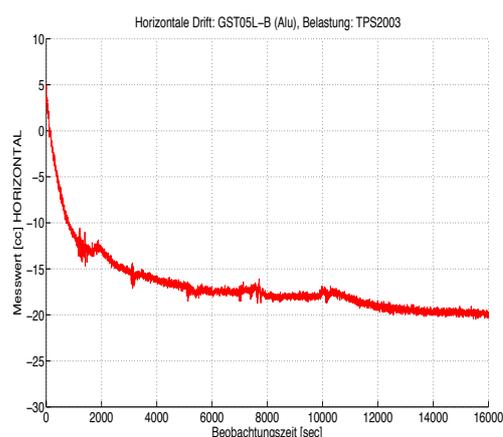


Abb.: 4.8: Hz-Drift des GST05L, B (Alu) (ii)

”Einhaltung der Toleranz” bezieht sich auf die interne Toleranzvorgabe der Hz-Drift von Leica ($\leq 8^{\text{cc}}$). Die konkrete Überprüfung in der Praxis ist aber nur für das GST120-9 vorgesehen. Zum Vergleich und für die praktische Beurteilung (für sehr viele Anwendungen ist die Stabilität der ersten 15 min entscheidend) ist dieses Kriterium in dieser Tabelle aber ebenfalls angeführt.

Die Modelle aus Fiberglas (S40, Trimax, B) und Aluminium (GST05L) weisen die größten Werte für die Hz-Drift auf.

Insgesamt ist aufgrund der Abbildungen 4.7 bis 4.8 und der Tabelle 4.1 klar erkennbar, dass die Holzstative nur eine minimale Hz-Drift zulassen und diesbezüglich somit die besten Eigenschaften aufweisen. Die Konsolidierung der Verformung vollzieht das Trimax (Fiberglas) innerhalb von 15 min am schnellsten und bleibt danach auf einem stabilen Niveau von $8,5^{\text{cc}}$. Der B-Prüfling liegt bei $13,5^{\text{cc}}$ Gesamtdrift. Gemeinsam mit dem zweiten Fiberglasmodell S40 ($22,5^{\text{cc}}$ Gesamtdrift) kann aber keine spezielle, materialspezifische Eigenschaft bez. Hz-Drift festgestellt werden.

In der Abbildung 3.21 aus Kapitel 3 ist das idealisierte Verformungsverhalten nach dem Aufbringen einer Last (=Instrument) auf das Stativ gezeigt. Für die horizontale Drift ließe sich ebenfalls ein funktionaler Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Last und horizontaler Drift formulieren. Ansatzweise ist dieser Zusammenhang über die Grundgleichungen der Statik in Kapitel 2 gezeigt worden, weshalb auf das Übertragungsverhalten eines Statives als gedämpftes System nicht näher eingegangen wird.

4.5 Untersuchung der Hz-Verdrehsteifigkeit unter dem besonderen Aspekt motorisierter Tachymeter

Der Einfluss motorisierter Tachymeter auf die Hz-Verdrehsteifigkeit ist ein wichtiger Punkt zur Beurteilung der Stabilität eines Stativs. Das unterschiedliche Gewicht der Instrumente zusammen mit den auftretenden Drehmomenten wird über den Dreifuß in das Stativ und weiter in den Boden übertragen. Leica Instrumente beschleunigen üblicherweise mit $50^g/s$. Beim Beschleunigen und beim Abbremsen wird ein horizontales Drehmoment von 56 Ncm erzeugt und über eine Rutschkupplung über den Dreifuß in das Stativ übertragen. Unabhängig von der Drehgeschwindigkeit kann durch das Prinzip der Rutschkupplung also kein größeres Moment zustande kommen.

4.5.1 Messungen unter dem Einfluss der Drehmomente des motorisierten Tachymeters TCA2003

Für die experimentellen Untersuchungen wurde wieder der Autokollimator und ein Spiegel am Testobjekt eingesetzt. Auf dem Stativ wurde ein motorisierter Tachymeter (TCA2003) aufgebaut, welcher eine automatisierte Satzmessung (onboard gestartet) zu zwei fest installierten Prismen durchführte. Für den hier angewendeten Fall wurden zwei Prismen (P_1, P_2) in der Reihenfolge P'_1, P''_1, P''_2, P'_2 angezielt. In Abb. 4.9 sind die "Peaks" der Hz-Verdrehung den Tachymeterbewegungen zugeordnet. Das Drücken des "Mess"-Knopfes (F1) bei der manuellen Auslösung des Programms "Satzmessung" verursacht den ersten Peak. Danach dreht sich das Instrument zum Punkt P_1 in Lage I, startet die automatische Zielsuche und führt eine Messung aus. Der zweite Peak wird durch das Stoppen des Instruments am Punkt P_1 verursacht. Der dritte Peak entsteht nach der Beendigung der Zielsuche. Beim "Anfahren" nach der Messung wird durch eine Lastwechselreaktion ein Doppelpeak ausgelöst. Danach vollführt das Instrument einen Lagewechsel und führt die zweite Messung zu P_1 in Lage II aus. Die Bewegung zu P_2 erfolgt ohne Lagewechsel in derselben Zeitdauer, da die beiden Prismen $\approx 180^\circ$ voneinander entfernt sind und daher dieselbe Wegstrecke zurückzulegen ist wie bei einem Lagewechsel. Die Messung zu P_2 in Lage II und I komplettiert den Satz. Alle weiteren Peaks entstehen nach demselben Muster wie oben beschrieben.

Eine Beeinflussung der horizontalen Winkelmessung durch die beschriebene (elastische) Verdrehung des Stativtellers (Peaks) ist nicht gegeben, weil die Messung zeitversetzt (in Abhängigkeit von der Motorbewegung) stattfindet.

Jeder Satz wurde zwei mal gemessen, was eine Messdauer von insgesamt etwa 4 min zur

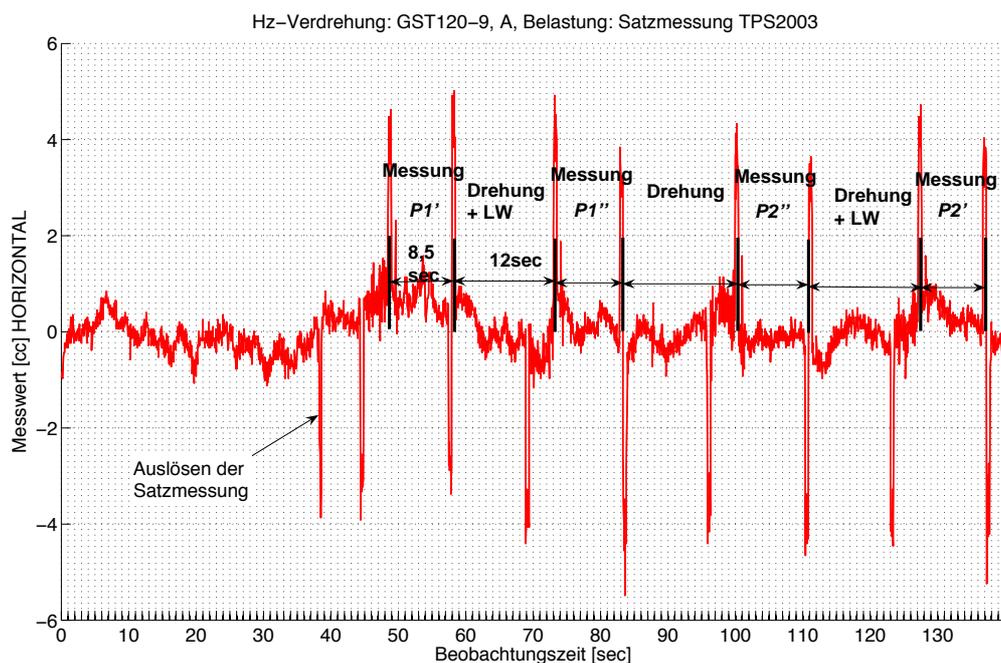


Abb.: 4.9: Details zur Satzmessung mit TCA2003

Folge hatte. Vor und nach der Satzmessung wurden noch zusätzlich etwa 50 Messungen im "Ruhezustand" durchgeführt, um ein stabiles Ausgangs- und Endniveau zur Berechnung der Hysterese zu definieren.

4.5.1.1 Messergebnisse und Beurteilung

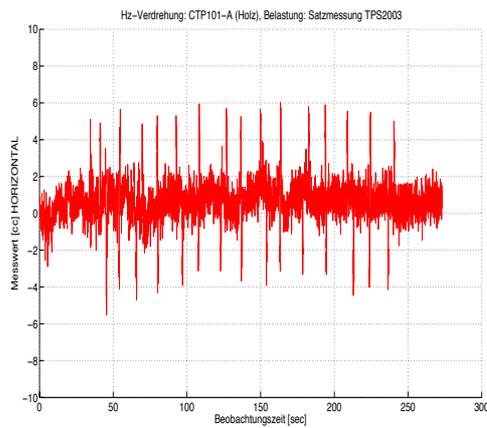
Die Ergebnisse dieser Testmessungen sind in den Abbildungen 4.10 und 4.11 graphisch dargestellt bzw. in der Tabelle 4.2 zusammengefasst. Von jedem Stativmodell standen zwei Stück zur Verfügung, die im weiteren Verlauf als A- bzw. B-Prüflinge bezeichnet werden.

Das CTP101, A (a) weist insgesamt niedrige Amplituden beim Anfahren und Bremsen des Tachymeters auf. Das konstante Band, das von $+2$ bis $-1,5^{cc}$ während der ganzen Messepoche sichtbar ist, lässt auf eine starke "Basisvibration" schließen. Das Aluminiummodell CTP103 (b) hat dagegen größere Maxima, schwingt aber um die Ausgangsposition mit etwas geringeren Amplituden. Der Betrag der Hysterese beider Stativmodelle ist mit $0,3^{cc}$ und $-2,1^{cc}$ als vernachlässigbar klein einzustufen, insbesondere deshalb, weil diese Stativmodelle vorwiegend für den Baustelleneinsatz gedacht sind und für diesen Zweck Instrumente mit einer Winkelmessgenauigkeit ab $\approx 10^{cc}$ eingesetzt werden. Bei den GST05 Modellen (Alu + Holz) sind Sprünge der Hz-Orientierung der Stativmodelle beim Lagewechsel erkennbar. Sie bewegen sich in einem Bereich von $+1,5^{cc}$ bis $2,5^{cc}$, was ebenfalls als unbedenklich

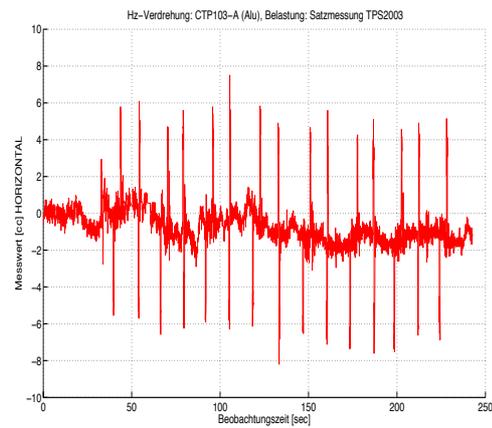
Modell	Nr.	Max. Ampl.	Min. Ampl.	Hysterese	Trend
		[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	
CTP101	A	6,0	-5,5	0,3	-
(Holz)	B	7,3	-5,7	-0,2	-
CTP103	A	7,5	-8,2	-1,0	-
(Alu)	B	6,8	-7,4	-2,1	-
GST05	A	17,3	-19,0	-0,8	-
(Holz)	B	16,8	-17,3	-2,2	-
GST05L	A	14,7	-14,6	0,5	-
(Alu)	B	14,7	-14,8	1,0	-
S40	A	6,2	-5,0	0,5	-
(Fgl.)	B	5,7	-6,7	-1,0	-
Trimax	A	8,0	-9,3	-1,7	-
(Fgl.)	B	8,9	-8,3	-0,3	-
GST120-9	A	5,8	-5,5	-0,1	-
(Holz)	B	7,1	-7,7	0,3	-

Tab.: 4.2: Auswirkungen der horiz. Motorbewegung des TCA2003 auf die Verdrehsteifigkeit durch verschiedene Stativtypen

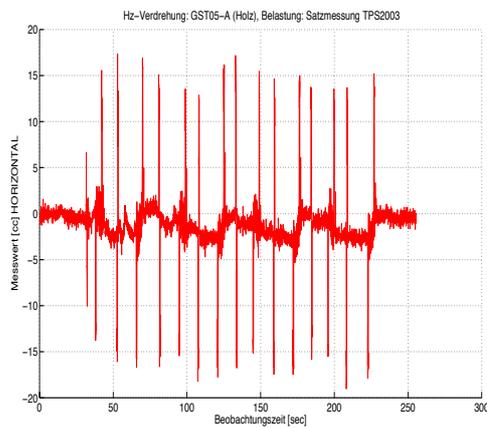
einzustufen ist, weil beide Modelle für den mittleren Genauigkeitsbereich ($> 5^{\circ}$ Instrumentengenauigkeit) vorgesehen sind. Die beiden Modelle weisen die größten Verformungen während des Drehvorgangs auf. Das GST120-9 weist die geringsten Hysteresewerte, und die zweitniedrigsten Amplituden auf. Die horizontale Lage ist während der ganzen Messepoche sehr stabil. Das S40 Fiberglasstativ ist im Kontext der Hz-Verdrehsteifigkeit durchaus mit dem GST120-9 konkurrenzfähig. Das Trimax (4.11) weist einen leichten Trend auf, hat aber relativ niedrige Amplituden.



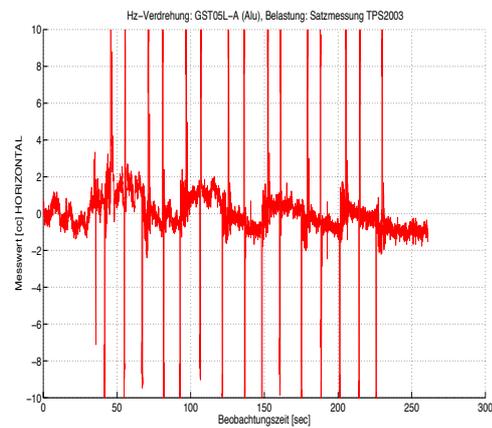
(a) CTP101, A (Holz)



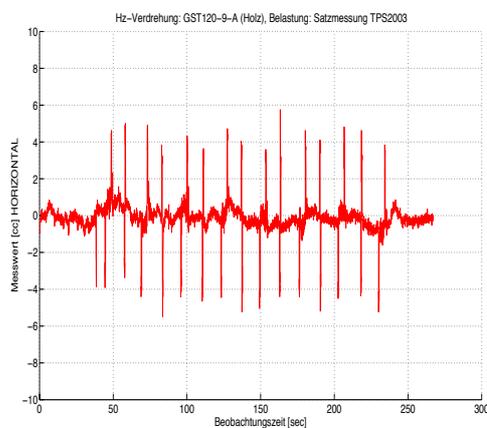
(b) CTP103, A (Alu)



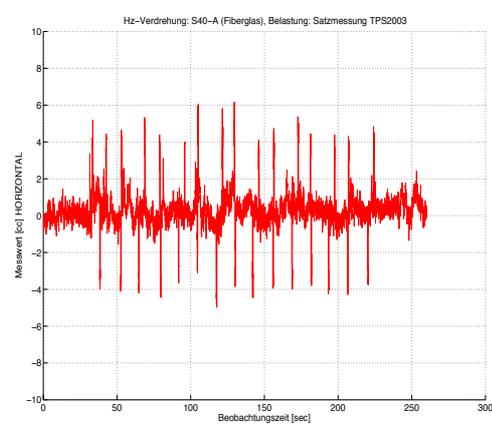
(c) GST05, A (Holz)



(d) GST05L, A (Alu)

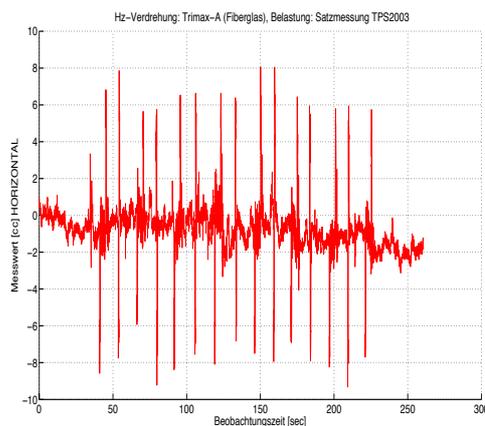


(e) GST120-9, A (Holz)



(f) S40, A (Fiberglas)

Abb.: 4.10: Stativbewegungen während einer Satzmessung zu 2 Prismen (i)



(a) Trimax, A (Fiberglas)

Abb.: 4.11: Stativbewegungen während einer Satzmessung zu 2 Prismen (ii)

4.5.2 Messungen mit dem Tachymeter TPS1200

Die in 4.5.1 beschriebenen Testmessungen sind mit dem Tachymeter TCA2003 durchgeführt worden. Dieses Instrument wiegt 8,7 kg, im Vergleich dazu wiegt der TPS 1200 nur 6,5 kg.

Es wurde nun derselbe Versuch mit einem Tachymeter TPS1200 durchgeführt. Diese Testmessungen sollen zeigen, ob sich eine Gewichtsdiﬀerenz von ca. 2 kg positiv oder negativ auf die Hz-Verdrehsteifigkeit auswirken.

4.5.2.1 Messergebnisse und Beurteilung

Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 4.12 a bis f und 4.13 a graphisch dargestellt. Alle Stativ auf Motorbewegungen des TCA2003 weniger stark "reagiert" als auf die des TPS1200. Das lässt sich primär durch weniger ausbalancierte Lage des Schwerpunktes (bezogen auf die Stehachse) der Tachymeter erklären.

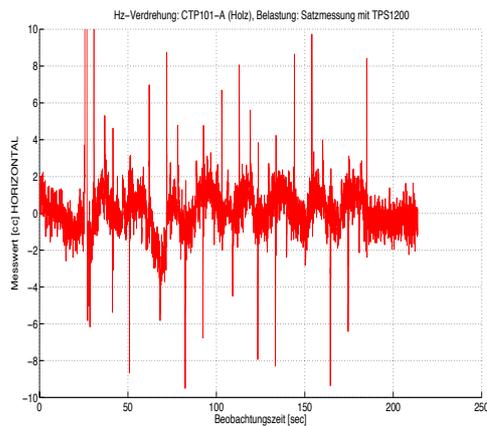
Der Vergleich der beiden Tachymeter bringt teilweise überraschende Ergebnisse. So zeigen alle drei getesteten Modelle aus Holz ein relativ stabiles Driftverhalten, die Hysterese ist auch nach der Belastung noch in einer akzeptablen Größenordnung. Die Aluminium- und die Fiberglasstativ zeigen hingegen teilweise starke Trends die z.B. beim CTP103 bis zu 28^{cc} betragen können. Beim Vergleich mit den Ergebnissen der Hz-Drift (über $\approx 3h$) aus Kapitel 3 ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Aluminium- und Fiberglasmodelle in den ersten 15 min eine sehr starke Hz-Drift aufweisen. Das ist in den Abbildungen 4.12 d, f und 4.13 a wiederzuerkennen. Eine Ausnahme bildet das Modell CTP103. Durch

Modell	Nr.	Max. Ampl.	Min. Ampl.	Hysterese	Trend
		[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	
CTP101	A	9,7	-9,5	-0,4	-
	B	-	-	-	-
CTP103	A	(4)	(-38,3)	(-26,2)	JA
	B	-	-	-	-
GST05	A	32,1	-38,2	0,11	-
	B	-	-	-	-
GST05L	A	26,4	-29,4	-6	JA
	B	-	-	-	-
S40	A	(8,4)	(-14,7)	(-5,4)	JA
	B	-	-	-	-
Trimax	A	16,9	-17,2	-2,9	JA
	B	-	-	-	-
GST120-9	A	8,9	-11,6	-0,4	-
	B	-	-	-	-

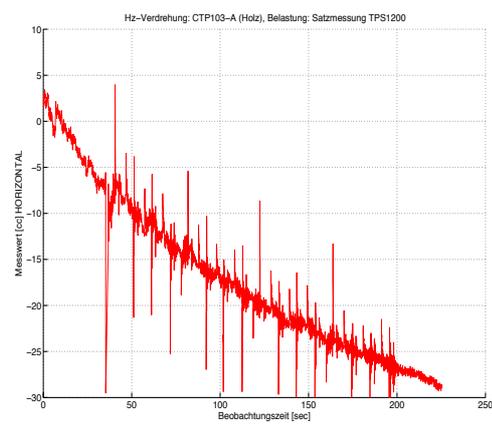
Tab.: 4.3: Auswirkungen der horiz. Motorbewegung des TPS1200 auf die Verdrehsteifigkeit der verschiedenen Stativtypen

die Belastung der Satzmessung durch den TPS1200 entwickelt es einen außerordentlich hohen (nichtlinearen) Trend. Die Begründung für dieses Phänomen erfordert noch eingehendere Untersuchungen. Für die Bewertung geht es als Faktum ein. Das Trimax Stativ entwickelt ebenfalls einen linearen Trend und weist, verglichen mit der Belastung durch den TCA2003, doppelt so hohe Amplituden auf.

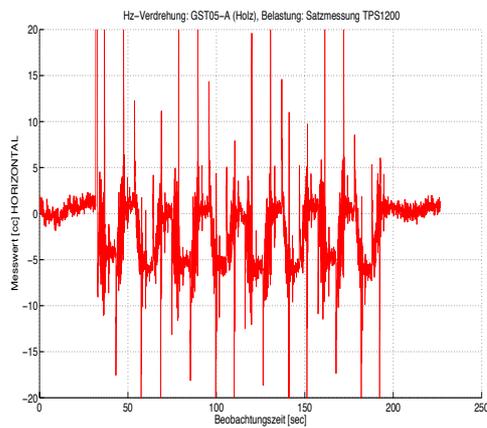
Das GST05L weist insbesondere eine periodische Hz-Veränderung beim Lagewechsel von etwa 5° auf. Dieses Verhalten ist von Bedeutung, falls während dieser Zeit Messwerte (spez. Hz-Werte) ausgelesen werden. Im konkreten Fall ist das Hz-Niveau nach der Drehung wieder stabil. Die in Tabelle 4.3 in Klammer gefassten Werte sind Absolutwerte und daher nur teilweise repräsentativ.



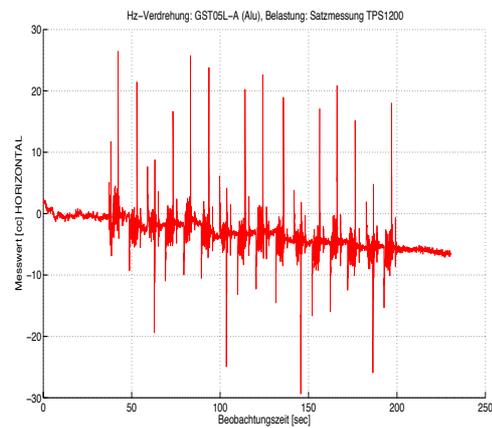
(a) CTP101, A (Holz)



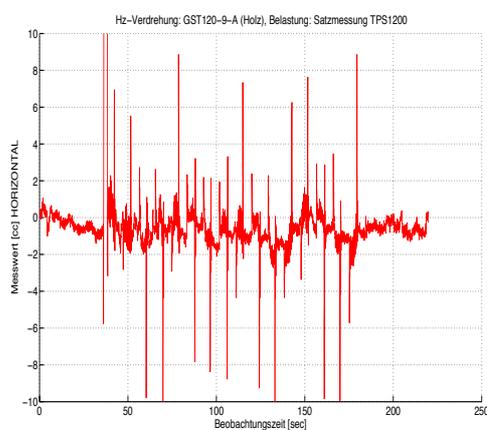
(b) CTP103, A (Alu)



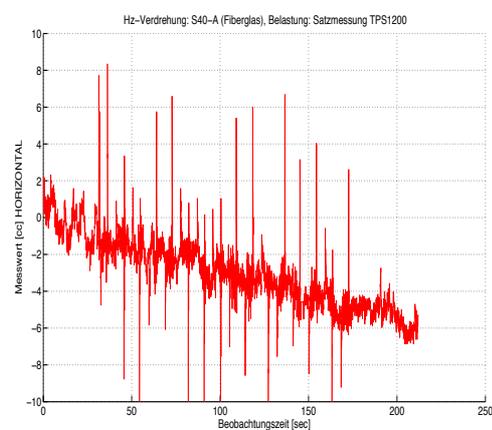
(c) GST05, A (Holz)



(d) GST05L, A (Alu)

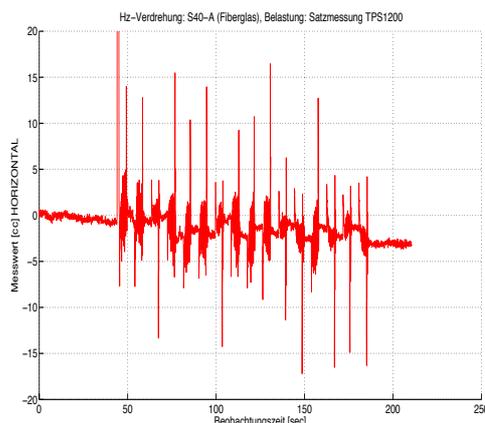


(e) GST120-9, A (Holz)



(f) S40, A (Fiberglas)

Abb.: 4.12: Stativbewegungen während einer Satzmessung zu 2 Prismen (TPS1200), (i)



(a) Trimax, A (Fiberglas)

Abb.: 4.13: Stativbewegungen während einer Satzmessung zu 2 Prismen (TPS1200) (ii)

4.5.3 Vergleichende Betrachtung der Verdrehsteifigkeit der Stativ von Leica und Crain

Abbildung 4.14 zeigt einen Detailausschnitt aus den Testmessungen mit dem TCA2003. Auffallend sind die hohen Amplituden nach dem Abbremsen beim Lagewechsel. Das Crain (Trimax) Stativ zeigt Amplituden von $\approx 5^{\circ}$ etwa 2,5 sec lang, wogegen sich das Leica (GST120-9) Stativ in einem Bereich von $\approx 0,5^{\circ}$ während dieses Zeitraums bewegt. Diese Feststellung ist insofern unproblematisch, solange die Verformung elastisch bleibt. Dieser Vergleich beweist einmal mehr, die guten Dämpfungseigenschaften von Holz, verglichen mit dem spröderen Werkstoff Fiberglas.

Zur Feststellung, ob nachklingende Vibrationen Einfluss auf die Hz-Winkelmessung haben, wäre hier ein weiterer Test, wo der Zeitpunkt der Verformung und der Zeitpunkt der Winkelmessung exakt synchronisiert sind, von Interesse. Eine weitere Möglichkeit wäre, die beiden Zeitreihen auf Korrelation zu untersuchen. Das ist in diesem Fall aber nicht möglich, weil für den Hz-Winkelabgriff kein Zeitstempel zur Verfügung steht.

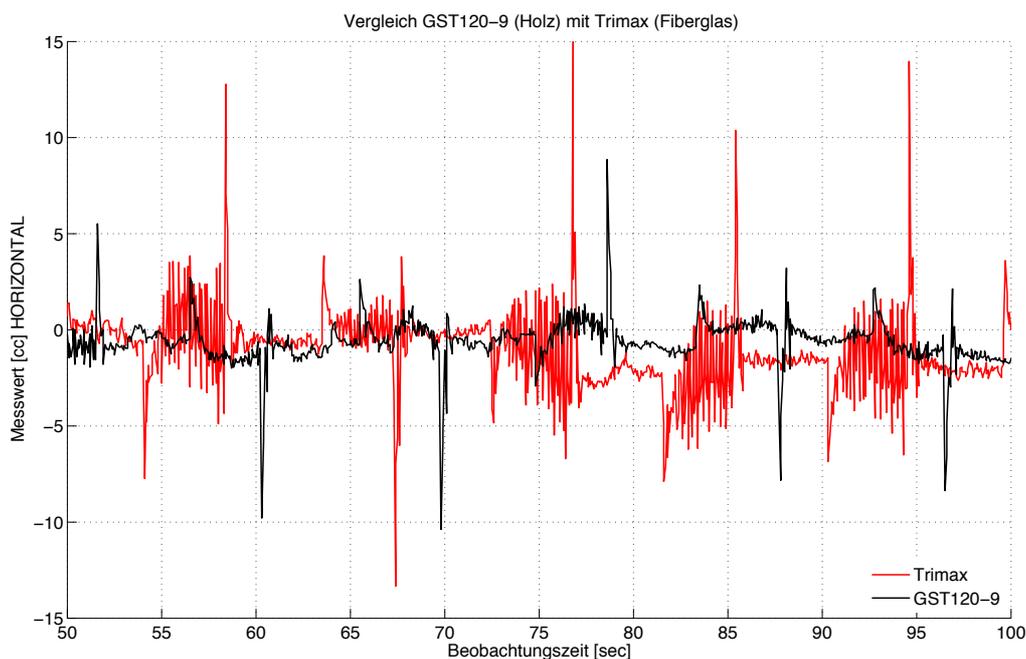


Abb.: 4.14: Vergleich des Vibrationsverhaltens Trimax/GST120-9

4.6 Bestimmung der Hz-Verdrehsteifigkeit nach ISO12858 (1999)

Dieser Test wird von Leica in Kombination mit anderen Tests (wie z.B. Höhenstabilität) zur Qualitätssicherung ihrer Stativ durchgeföhrt. Es wird exakt das in der ISO12858 (1999) vorgegebene Testverfahren ausgeföhrt. Die Konformität der Verdrehsteifigkeit mit der ISO-Norm ist Prüfgegenstand.

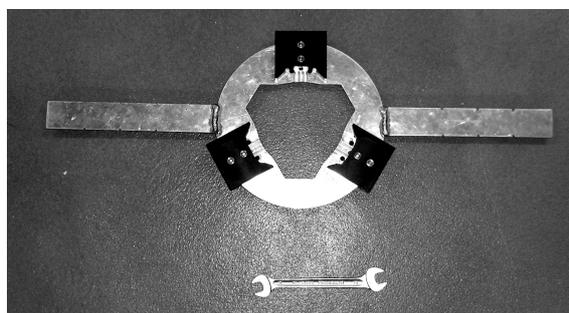


Abb.: 4.15: Testvorrichtung zur Bestimmung der Hz-Verdrehsteifigkeit nach ISO12858 (1999)

Zur Verdrehung des Stativkopfs ist das in Abbildung 4.15 gezeigte Spezialwerkzeug verwendet worden. Es wird auf den Stativkopf zwischen Stativteller und Dreifuß befestigt.

Mit dem TC2002 (4.2.1) wird ein Ziel (etwa 25 m entfernt) anvisiert und der Hz-Wert notiert. Anschließend wird der Stativkopf um 20 mgon (Ableseung am Instrument) verdreht und danach die Verdrehung wieder gelöst. Das zuvor anvisierte Ziel wird nochmals angezielt und die Hz-Differenz gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6.1 wiedergegeben.

4.6.1 Messergebnisse und Beurteilung

Dieser Test (Ergebnisse siehe Tabelle 4.4) zeigt, dass fast alle Stativbeispiele bezüglich der Hz-Verdrehsteifigkeit innerhalb der geforderten Toleranz liegen. Einzig ein Trimax Stativ (Fiberglas) überschreitet die geforderte Toleranz von 10^{cc} für schwere Stativbeispiele (H). Der zweite Trimax Prüfling zeigt allerdings sehr gute Werte. Um also eine verlässliche Aussage über die ISO-Konformität der Crain Trimax Stativbeispiele treffen zu können, müsste die Stichprobe vergrößert werden.

4.7 Horizontale Verformungen durch manuelle Bedienung am Beispiel eines TPS700

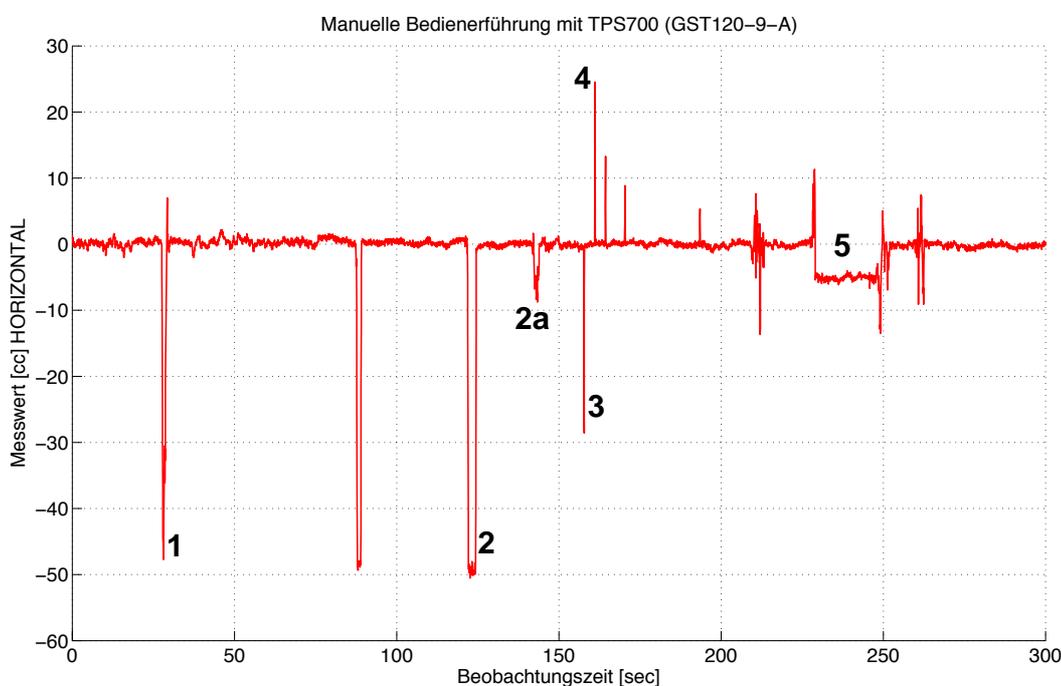


Abb.: 4.16: Hz-Verdrehungen durch manuelles Bedienen

In Abbildung 4.16 ist exemplarisch gezeigt, wie sich ein GST120-9 Stativ bei manuel-

Modell	Messreihe	Verdrehrichtung	Hz-Ablesung		δ [cc]	Tol.	O.K.?
			vor [cc]	nach [cc]			
GST120-9 Holz	1	↺	0.0000	399.9995	5	10	gut
		↻	399.9998	0.0008	10		gut
	2	↺	0.0004	399.9996	8	gut	
		↻	399.9997	0.0002	5	gut	
GST05 Holz	1	↺	0.0000	399.9993	7	30	gut
		↻	399.9997	0.0003	6		gut
	2	↺	0.0000	399.9996	4	gut	
		↻	399.9996	0.0003	7	gut	
GST05L Alu	1	↺	0.0000	0.0001	1	30	gut
		↻	0.0008	0.0016	8		gut
	2	↺	0.00016	0.0014	2	gut	
		↻	0.0019	0.0028	9	gut	
CTP101 (Holz)	1	↺	0.0000	0.0001	1	30	gut
		↻	0.0004	0.0009	5		gut
	2	↺	0.00010	0.0006	4	gut	
		↻	0.0006	0.0011	5	gut	
CTP103 (Alu)	1	↺	0.0000	0.0001	1	30	gut
		↻	0.0001	0.0006	5		gut
	2	↺	0.0006	0.0005	1	gut	
		↻	0.0006	0.0007	1	gut	
Trimax A Fiberglas	1	↺	0.0005	399.9987	18	10	außer Tol.
		↻	399.9986	0.0021	35		außer Tol.
	2	↺	0.0020	0.0001	19	außer Tol.	
		↻	0.0004	0.0030	26	außer Tol.	
Trimax B Fiberglas	1	↺	0.0006	0.0004	2	10	gut
		↻	0.0004	0.0019	15		außer Tol.
	2	↺	0.0017	0.0012	5	gut	
		↻	0.0010	0.0019	9	gut	

Tab.: 4.4: Ergebnisse der Prüfung der Hz-Verdrehsteifigkeit nach ISO12858 (1999)

ler Bedienung eines TPS700 Tachymeters bewegt. Dieses Instrument wiegt 5,6 kg, also knapp über dem Limit von 5 kg für leichte Stativ. Insgesamt sind in 4.16 mehrere, durchnummerierte "Peaks" zu erkennen. Die Ursachen für diese Ereignisse sind untenstehend erläutert:

- (1) Menschlicher Einfluss; Stampfen mit dem Fuß
- (2) Lagewechsel horizontal ($\approx 50^{\circ}$)
- (2a) Lagewechsel vertikal ($< 10^{\circ}$)
- (3) Drücken der Taste "ALL"
- (4) Drücken der Taste "ENTER"
- (5) Entfernen und Wiedereinsetzen des Tachymeters in den Dreifuß

Wie die Grafik zeigt, ist mit beträchtlichen Verformungen, auch bei manueller Bedienung, zu rechnen. Die Tasten "ALL" und "ENTER" sind links bzw. rechts unten auf der Tachymetertastatur plazierte. Die jeweilige asymmetrische Anordnung reicht aus, um beim Drücken der Tasten gegensätzliche Verformungen von bis zu 30° zu erzeugen.

Dieser Test soll veranschaulichen, wie groß der Einfluss durch eine manuelle Bedienung an der Tastatur eines Tachymeters auf die Horizontalablesung werden kann. Er dient nicht zur Qualitätsbeurteilung für die Teststative. Entscheidend ist aber nach wie vor, wie groß die Hysterese nach einer bestimmten Zeit ausfällt. Im durchgeführten Test ist sie vernachlässigbar klein, als Teststativ ist allerdings eine GST120-9 verwendet worden, was in den bisherigen Untersuchungen die besten Eigenschaften bzgl. Verdrehsteifigkeit aufgewiesen hat.

4.8 Zusammenfassung

Die Hz-Verdrehsteifigkeit und Hz-Drift sind entscheidende Eigenschaften, womit ein Stativ klassifiziert werden kann. Eine Untersuchung der Hz-Stabilität unter dynamischer Belastung erfordert bereits einigen messtechnischen Aufwand. Als geeigneter Sensor hat sich in diesem Zusammenhang ein Kollimator (inkl. Schnittstelle und Registriermöglichkeit) erwiesen. Anschließend an jeden Test erfolgte eine Beurteilung der Prüflinge. Zum Teil sind die Ergebnisse erwartet worden, beim Prüfen der Hz-Stabilität mit verschiedenen Instrumenten sind aber überraschend große Unterschiede aufgetreten. Eine zusammenfassende Beurteilung, die alle Tests einschließt, wird in Kapitel 6 gegeben.

Kapitel 5

DreifüÙe

Dieses Kapitel befasst sich mit der Funktionalität und Stabilität eines DreifuÙes. Vor allem der Einfluss der horizontalen Stabilität auf die MessgröÙen wird diskutiert und durch Testmessungen verifiziert. Eine Höhenveränderung durch den DreifuÙ ist praktisch auszuschließen und wird daher nicht untersucht.

5.1 Funktionalität

Ein DreifuÙ wird benötigt, um eine Verbindung zwischen Instrument und Stativ herzustellen. Er wird über die Herzschraube (Zentralanzugsschraube) auf dem Stativteller fixiert. Lt. Hersteller wird diese Verbindung als formschlüssig angenommen, d.h. man nimmt an, dass von dieser Verbindung keine Hz-Verschiebungen ausgehen können. Vom Stativ zum Instrument ist es nötig, den Grad der Feinjustierung zu erhöhen, um ein ordnungsgemäÙes Horizontieren des Instruments zu ermöglichen.

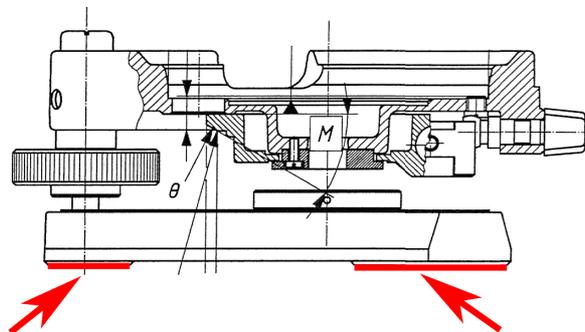


Abb.: 5.1: Querschnitt eines DreifuÙes

Das wird durch die DreifuÙschrauben, die ein sehr feines Gewinde besitzen, ermöglicht.

Der DreifuÙ kann etwa 5° Schiefstellung des Stativtellers ausgleichen.

Die obere und die untere DreifuÙplatte sind über drei Bolzen im Gehäuse der DreifuÙschrauben verbunden. Das Gewinde ist vorgespannt um jegliches lockern bzw. "ausleiern" auch nach vielfacher Justierung zu vermeiden. Das DreifuÙgewinde ist sehr stabil und Temperatureinflüsse sind lt. Hersteller vernachlässigbar klein. Die Produktspezifikation gewährleistet volle Funktionalität von -20°C to $+50^\circ\text{C}$.

Die untere DreifuÙplatte ist je nach Modell eben oder es sind drei etwa 1 cm^2 große Erhöhungen herausgearbeitet, die eine ideale Dreipunktauflage bilden. Die roten Pfeile in Abbildung 5.1 weisen auf diese Erhöhungen hin.



Abb.: 5.2: Leica GDF111 High Professional DreifuÙ

Die obere DreifuÙplatte hat ebenfalls drei Auflagepunkte, worauf der Tachymeter aufliegt (rote Pfeile in Abb. 5.2). Die Bolzen des Tachymeters passen in die Löcher der oberen DreifuÙplatte und werden über einen Fixierstern eingespannt, der sich auf der Unterseite der oberen DreifuÙplatte befindet. Dieser Fixierstern wird über die DreifuÙklemme gesteuert. Er bewirkt eine radiale und eine tangentielle Klemmung der Tachymeterbolzen. Das Restspiel bei nicht ordnungsgemäÙer Klemmung beträgt lt. Hersteller weniger als 3° . Eine nicht ordnungsgemäÙe Klemmung kann durch Schmutzpartikel im DreifuÙ oder durch leicht "schiefes" einsetzen des Tachymeters auftreten. Bei zweimaliger Klemmung ist ein derartiges Verhalten praktisch auszuschließen.

5.2 Verdrehsteifigkeit

Die im Kapitel 4 beschriebene Verdrehsteifigkeit kann in ähnlicher Weise auch als Qualitätskriterium für DreifuÙe herangezogen werden. Im ISO-Standard ISO12858 (2005) ist eine Beschreibung des Tests zur Verdrehsteifigkeit von DreifuÙen gegeben, es fehlt jedoch die Definition konkreter Grenzwerte:

Der DreifuÙ ist auf einem harten und stabilen Stand gemeinsam mit dem Instrument aufzubauen (nicht auf einem Stativ). Mit dem Instrument ist ein Kollimator (oder ein ähnliches Ziel) anzuvisieren und danach ist ein Drehmoment (wie es beim vorgesehenen Einsatz erwartet wird) in beiden Drehrichtungen anzubringen [...] Danach ist die Hystere-



Abb.: 5.3: Messaufbau zur Bestimmung der DreifuÙhysterese

se zu messen. Folglich liegt es in der Verantwortung des Benutzers, sicherzustellen, dass der eingesetzte DreifuÙ eine ausreichende Verdrehsteifigkeit aufweist, um die ausreichende Kompatibilität mit der Genauigkeit des verwendeten Instruments zu garantieren.

In 4.5.1 ist das von der Tachymetermotorisierung erzeugte Drehmoment mit 56 Ncm angegeben. Vom Hersteller sind umfangreiche DreifuÙtests durchgeführt worden. Es wurde das Prinzip der Autokollimation verwendet (Abb. 4.1). Im Gegensatz zur Untersuchung der Verdrehsteifigkeit von Stativen ist jedoch manuell mit einem TC2002 Tachymeter mit Autokollimationsokular gemessen worden. Der DreifuÙ wurde mit einem TCA2003 belastet und das Drehmoment wurde manuell mit zwei tangential angebrachten Federwaagen aufgebracht (Abb. 5.3). Neben dem in Abbildung 5.2 gezeigten High Professional DreifuÙ gibt es noch eine zweite Produktlinie von Leica, die Construction Series, vorwiegend als DreifuÙe für Instrumente niedriger Genauigkeit eingesetzt (z.B. Baustellentachymeter). Für beide Modelle wurde eine relativ große Stichprobe von jeweils 10 Modellen gemessen.

5.3 Beurteilung

Abbildung 5.4 zeigt zwei Verformungskurven, gemessen während einer Satzmessung eines TPS1200 zu zwei Prismen. Die Beobachtung erfolgte mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Kollimator. In Abbildung 4.6 aus Kapitel 4.3 ist die Montage zweier Autokollimationspiegel zu sehen. Während der Messung wurde je ein Spiegel abgedeckt, um eine Doppelreflexion zu verhindern. Die rote Linie in Abbildung 5.4 zeigt die Messung zu dem am DreifuÙ befestigten Spiegel, die schwarze Kurve zeigt die Messung zum Stativkopf (siehe

Abb. 4.6 in 4.3). Zwischen dem GDF121 (hochgenauer DreifuÙ) und dem CTB101 (niedere Genauigkeit, für Baustelleneinsatz) ist optisch das wichtigste Unterscheidungsmerkmal die Form der Fußschrauben. Produziert werden sie von zwei verschiedenen Firmen, der CTB101 ist als BaustellendreifuÙ billiger und weist aufgrund des Fertigungsprozesses eine größere Streuung bei der Hysterese auf.

Tabelle 5.1 zeigt die Hysteresewerte von jeweils 10 getesteten GDF121 bzw. CTB101 DreifuÙen. Die getesteten High Professional DreifuÙe weisen alle Hysteresewerte von weniger als 1^{cc} ($\sigma = 0,79^{cc}$) auf. Die CTB101 Prüflinge bewegen sich in einem Bereich von $0,8^{cc}$ bis $6,6^{cc}$ ($\sigma = 2,37^{cc}$).

	GDF21 [cc]	CTB [cc]
1	1,00	5,51
2	1,38	0,89
3	0,29	1,01
4	1,01	0,81
5	0,47	1,10
6	0,56	3,09
7	1,14	1,10
8	0,85	6,66
9	0,56	3,99
10	0,65	0,86
σ	0,79	2,37

Tab.: 5.1: Hysteresewerte nach Bestimmung der DreifuÙ-Verdrehsteifigkeit

Beim Vergleich der beiden Kurven ist klar zu erkennen, dass sich die jeweiligen Start- und Endniveaus der ca. 50 Messungen vor und nach der Belastung bezogen auf die beiden Spiegel sich de facto nicht unterscheiden. Auffällig ist hingegen, dass die gemessenen Amplituden des Spiegels am DreifuÙ (rote Linie) während der ganzen Epoche in etwa um Faktor drei höher sind als jene des Spiegels am Stativteller. Das lässt den Schluss zu, dass der DreifuÙ dämpfende Eigenschaften besitzt.

Für den praktischen Einsatz bedeuten die erwähnten Hysteresewerte, dass für Vermessungen hoher und höchster Genauigkeit nur ein High Professional DreifuÙ in Frage kommt. In Tabelle 5.1 sind auch CTB101 DreifuÙe mit Hysteresewerten von weniger als 1^{cc} aufgelistet, nur liegt die durch den Hersteller zugelassene Toleranz a priori bei 15^{cc} . Daraus folgt, dass beim Eintreten des "worst case" mit einem erheblichen Einfluss auf die Messgrößen zu rechnen ist. Der Einfluss von einem 1^{cc} durch den DreifuÙ ist bei den Tests zur Verdrehsteifigkeit von Stativen praktisch nicht möglich zu separieren.

Von besonderem Interesse ist die DreifuÙgenauigkeit aber bei Messungen ohne Stativ, z.B. auf einem Messpfeiler. Messungen, die einen Messpfeiler erfordern sind aber meist Präzisionsmessungen, sodass in diesem Fall ebenfalls DreifuÙe aus der High Professional Series empfohlen sind.

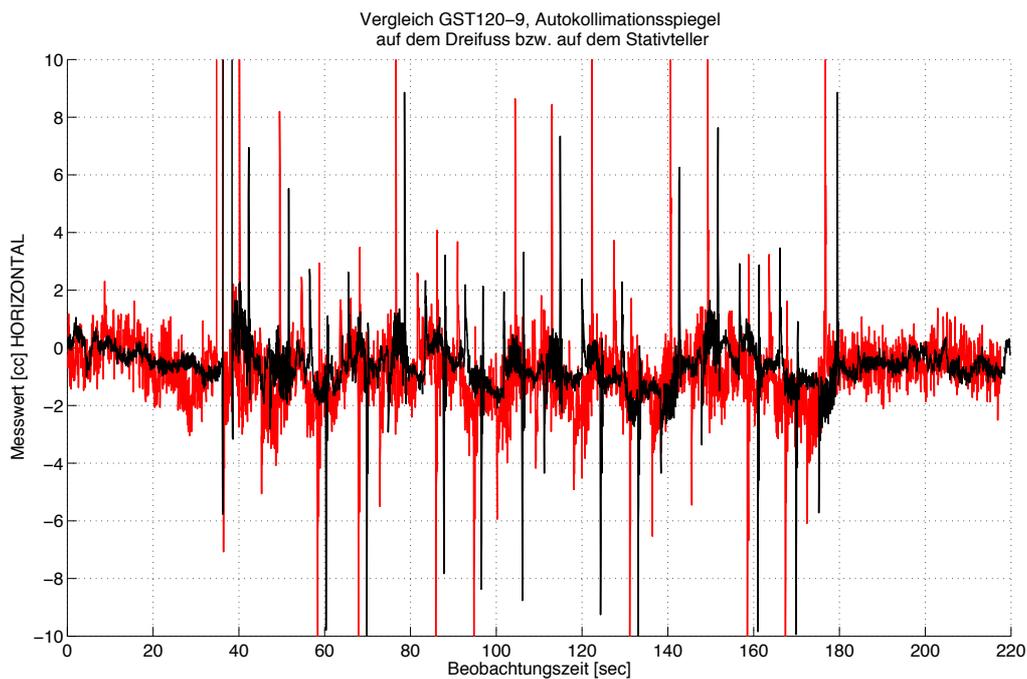


Abb.: 5.4: Messreihe(n) zum Vergleich Hz-Verdrehung DreifuÙ/Hz-Verdrehung Stativ

5.4 Zusammenfassung

Unter dem Begriff Messzubehör, vor allem bestehend aus Stativ und DreifuÙ, ist in diesem Kapitel eine komprimierte Darstellung der Funktionalität und Genauigkeit von DreifuÙen wiedergegeben. Die Frage *"Wie genau ist ein DreifuÙ?"* wird über die Bestimmung der Hysterese nach einem Verdrehsteifigkeitstest beantwortet. In Kapitel 6 sind Empfehlungen aufgelistet, welcher DreifuÙ für die jeweilige Vermessungsaufgabe eingesetzt werden sollte.

Kapitel 6

Handlungsempfehlungen und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind vorwiegend Stative und deren Eigenschaften untersucht worden. Der Einfluss von Dreifüßen ist in Kapitel 5 ebenfalls kurz gezeigt worden. Insgesamt kann man sich nun die Frage stellen, welche Konsequenzen aus den Testergebnissen, sowohl für den Anwender, als auch für den Hersteller gezogen werden können. Diese Konsequenzen werden dann schließlich, wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, in einem "Empfehlungskatalog" zusammengefasst. Dieser Katalog (Tabelle 6.2) stellt einen Zusammenhang zwischen einzusetzendem Messinstrument, dessen Genauigkeitsspezifikationen und dem zu verwendeten Messzubehör her. In der Tabelle 6.1 sind die Eigenschaften der jeweiligen Instrumente aus dem aktuellen Produktkatalog von Leica aufgelistet. Daraus ist zu ersehen, dass die Winkelmessgenauigkeiten in einem Bereich von $1,5^{cc}$ bis 30^{cc} liegen. Diese, je nach Instrument variierende (Winkelmess-)genauigkeit legt nahe, dass man je nach Art der Aufgabenstellung bzw. der erforderlichen Messgenauigkeit, geeignetes Messzubehör auswählen kann bzw. muss.

Die unterschiedlichen Vermessungsaufgaben erfordern den Einsatz von mehr oder weniger genauem Instrumentarium. Die Frage nach dem Einfluss auf das Messergebnis, ausgehend vom Stativ, stellt sich natürlich nur dann, wenn für (hoch)genaue Aufgaben der wirtschaftliche Aufwand eines Messfeilers (noch) zu groß ist und daher ein Stativ zum

Eigensch./Modell	Builder	TPS400	TPS700	TPS800	TPS1200	TPS1800/ TCA2003
Instr. Gewicht [kg]	5	5.2	5.6	5.4	5.5+ 0.2+ 0.8	8.7
Genauigkeit ^[cc]	20 – 30 ^{cc}	10 – 20 ^{cc}	6 – 15 ^{cc}	6 – 15 ^{cc}	3 – 15 ^{cc}	1.5 – 3 ^{cc}
Motorisierung	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja
Genauigkeitssegment	N	N	M	M	P	P

Tab.: 6.1: Instrumentencharakteristika (N= niederes, M=mittleres, P=präzises Genauigkeitssegment).

Einsatz kommt. Üblicherweise wird ja bei Vermessungen über einen längeren Zeitraum vom selben Standpunkt ein Messpfeiler gebaut (z.B. für Deformationsmessungen). Lokale Gegebenheiten oder andere Zwänge erfordern es dennoch manchmal, Messungen auf einem Stativ durchzuführen.

Höhenstabilität

Bezüglich der Höhenstabilität sind die Ergebnisse prinzipiell für alle Stative unbedenklich. Es lässt sich auch kein Unterschied zwischen Aluminium-/Fiberglas und Holzmodellen feststellen. Das GST40 (keine Klemme) hat verglichen mit dem GST120-9 keine außerordentlich bessere Vertikalstabilität.

Horizontale Drift

Die Untersuchungen der horizontalen Drift zeigen allerdings, dass eine klare Unterscheidung zwischen den Bau- und Konstruktionsmaterialien Holz und Aluminium/Fiberglas zu treffen ist.

Alle drei Holzmodelle (GST120-9, CTP101, GST05) weisen sehr gute Werte ($< 6,5''$), auch nach einer Beobachtungsdauer von mehr als 2,5 h auf. Alle Stative sind zur Bestimmung der Hz-Drift mit einem TCA2003 belastet worden, das wie man aus Tabelle 6.1 entnehmen kann, das schwerste Instrument aus der aktuellen Leica Produktlinie darstellt. Die Modelle CTP101 und GST05 werden üblicherweise nur mit den Instrumenten Builder bis TPS800 eingesetzt, die sich durch eine geringere (Gewichts-)belastung auszeichnen und daher eine noch bessere horizontale Langzeitstabilität ($\approx 2-3$ h) erwarten lassen.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits erläutert, dass es in der vorliegenden Arbeit nicht möglich war, das Verhalten der Klemmen einer eingehenden Untersuchung zu unterziehen. Die teilweise sehr hohen Werte der Hz-Drift für die Aluminium- und Fiberglasmodelle legen aber dennoch den Verdacht nahe, dass die Klemmverbindung (bzw. die Oberfläche worauf die Klemme wirkt) hier zumindest teilweise eine Rolle spielt. Basierend auf den Ergebnissen der Hz-Drift sind bei Anwendungen im obersten Genauigkeitssegment jedenfalls Holzstative bevorzugt einzusetzen. Man beachte beispielsweise die Hz-Drift (in Tab. 6.2) des S40 Fiberglas Statives, dessen Betrag nach 2,5 h bereits $22,5''$ (!) beträgt.

Verdrehsteifigkeit

Bezüglich der Verdrehsteifigkeit unter der Belastung motorisierter Tachymeter sind bei den beiden GST05 Modellen (Alu + Holz) leicht unterschiedliche Niveaus bei Messungen mit dem TCA2003 in verschiedenen Lagen festzustellen, was sich mit 2 bis $3''$ (siehe Abb. 4.10 c und d) auf die horizontale Winkelmessung niederschlägt. Die restlichen Prüflinge bewegen sich auf stabilem Niveau. Durch die ausbalancierte Gewichtsverteilung des TCA2003 sind in dieser Testreihe auch kaum Drifterscheinungen zu erkennen.

Das CTP101 sowie das CTP103 können bei kurzer Messdauer auch für Instrumente im

mittleren Genauigkeitssegment eingesetzt werden. Die Motorisierung des TPS1200 bewirkt beim CTP101 und beim GST05 (beide aus Holz) erhöhte Amplituden während des Lagewechsels. Zum Zeitpunkt der Messung ist die Position aber wieder konstant. In den Messreihen der Modelle CTP103, GST05, S40, sowie der des Trimax, sind eindeutig die gemessenen Horizontaldriften wiedererkennbar. Überraschenderweise ist das bei den vorangegangenen Tests (Belastung durch TCA2003) nicht der Fall. Für Messungen mit dem TPS1200 wird daher eines der Modelle aus Holz empfohlen.

DreifüÙe

Der Einsatz von DreifüÙen ist durch die zugelassene Toleranz von 15^{cc} Hysterese für die *Construction Series=CS* (vorwiegend für den Baustelleneinsatz) eingeschränkt. Für das mittlere und das präzise Genauigkeitssegment empfiehlt sich der Einsatz von *High Professional=HP* DreifüÙen, für präzise Messungen mit dem TPS1200, sowie dem TCA2003 ist es unbedingt notwendig.

6.1 Ausblick

Für den Bau von Stativen ist das Material Holz, insbesondere in jener Qualität, wie es beim GST120-9 eingesetzt wird, nach wie vor am besten geeignet. Ähnliche Dämpfungseigenschaften sind derzeit weder mit Aluminium, noch mit Fiberglas zu erzielen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass trotz der vielen Kenntnisse über Stative, die in der vorliegenden Arbeit gewonnen wurden eine geeignete Messstrategie unverzichtbar bleibt. Bei den schweren Stativen beträgt der Mindesteinfluss (durch die Hz-Drift) nach wie vor $6,5^{cc}$. Das ist bei Instrumenten mit einer Winkelmessgenauigkeit von bis zu $1,5^{cc}$ ein nicht zu vernachlässigender Störfaktor, dessen sich der Beobachter bewusst sein muss. Für hochgenaue, dauerhafte (Überwachungs-)Messungen ist es daher (nach wie vor) empfohlen, einen Messpfeiler oder eine Konsole einzusetzen.

Alle Einflüsse sind außerdem unter Laborbedingungen untersucht worden. Im Feldeinsatz sind nicht nur wechselnde Bedingungen (Temperatur, Feuchte), sondern auch noch zusätzliche Störfaktoren (z.B. Wind) zu erwarten, wodurch unter Umständen mit einem abweichenden (schlechteren) Verhalten zu rechnen ist.

Abbildung 6.1 zeigt exemplarisch an der Messung zweier Ziele (Z_1 und Z_2) in zwei Halbsätzen die Elimination der Hz-Drift. Über die Mittelung beider Messungen (die zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgten) ist es möglich, eine etwaige Stativverdrehung unschädlich zu machen. Für dieses Vorgehen wäre ein lineares Deformationsverhalten vorauszusetzen, die in Abb. 6.1 gezeigte Sprungantwort kann aber zur Bestimmung der Stativverdrehung

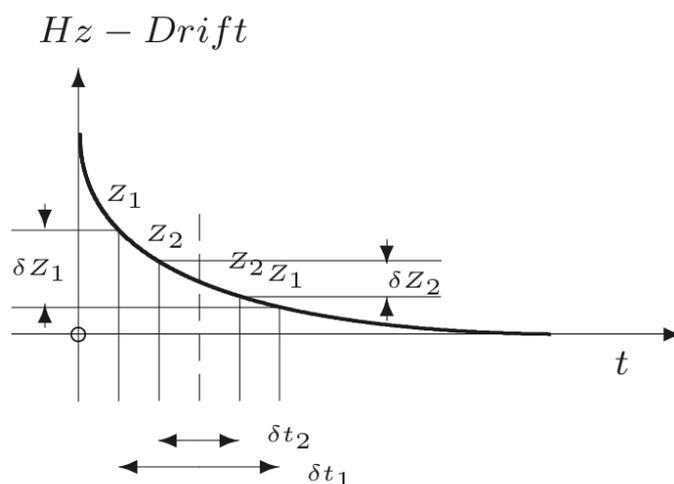


Abb.: 6.1: Orientierung durch Satzmessung

als linear angenähert werden. Die Abbildungen 4.12 b,d und f sind typische Beispiele für ein derartiges Verhalten, wo sehr schnell nach Beginn der Belastung ein relativ starkes Driftverhalten auftritt. Das zeigt weiters, das klassische Satzmessverfahren nach wie vor sinnvoll sind um durch ihre Anwendung die angesprochenen Einflüsse zu eliminieren.

Für die Güte einer Messung ist und bleibt der "Vermesser" hauptverantwortlich. Der Einfluss von Stativen übersteigt bei präzisen Vermessungen die Instrumentengenauigkeit, deshalb sind neben dem gewissenhaften Einsatz von (passendem) Zubehör geeignete Messverfahren vorzusehen, um den Fehlereinfluss des Stativs (und Dreifuss') zu kompensieren. Verschiedene Varianten von Satzmessungen dienen zur Ausschaltung einer Reihe von Instrumentenfehlern sowie etwaiger Stativverdrehungen (s.o.). Jedenfalls ist die Orientierung in geeigneten Beobachtungsintervallen zu überprüfen. Bei Monitoringsystemen geschieht dies oft automatisiert durch einen prozessorgesteuerten Regelkreis.

Modellbezeichnung	GST120-9	S40	Trimax	GST05	C'TP101	GST05L	C'TP103	(GST40)
Hersteller	Leica	Nanjing Survey	Crain Inc.	Leica	Leica	Leica	Leica	Leica
Material	Holz (Buche)	Fiberglas	Fiberglas	Holz (Kiefer)	Holz	Aluminium	Aluminium	Holz (Buche)
Höhenstabilität								
nach ISO12858 (1999)	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
max. Vertikalverformung [l/100 mm]	3	4	5	1,5	3	3	2	3
Hysterese [l/100 mm]	1	-2	2	0	1	1	0,5	0,5
Hz-Drift								
Hz-Drift nach Leica-Kriterium (15 min) [cc]	1,5	12	13	0,5	4	23	9,5	-
eingehalten ?	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN	-
Hz-Drift nach ca. 3 h (max) [cc]	6,5	22,5	13,5	3	4	23	9,5	-
Hz-Verdrehssteifigkeit								
TCA2003 (Hysterese/Trend) [cc]	0,2	0,75	1	1,5	0,25	0,75	1,55	-
Klassifizierung	P	P	M	M	M	N	M	-
TPS1200 (Hysterese/Trend) [cc]	0,4	5,4	2,9	0,11	0,4	6	26,2	-
Klassifizierung	P	M	M	M	N	N	N	-
nach ISO12858 (1999)	OK	OK	n.OK.	OK	OK	OK	OK	-
empfohlener Dreifuß	HP	HP	HP	HP	HP	CS	CS	
gesamt anzunehmender Einfluss durch Hz-Drift [cc]	6,5	22,5	13,5	3	4	23	26,2	

Tab.: 6.2: Zusammenfassung der Testergebnisse. (P=präzises, M=mittleres, N=niederes Genauigkeitssegment), HP=High Professional Dreifuß, CS=Construction Series Dreifuß

Literaturverzeichnis

- [Beer 2002] BEER, Gernot: *Baustatik 1*. Version:2002. http://www.ifb.tugraz.at/educ/teaching_material/Baustatik/Baustatik1_Sk%riptom_IBK.pdf, Abruf: 21. Jun. 2006. – Vorlesungsskriptum
- [DIN 1994] DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. 2. Auflage. Beuth Verlag GmbH, 1994 (ISBN 3-410-13086-1)
- [Dutschke u. Kieferstein 2005] DUTSCHKE, Wolfgang ; KIEFERSTEIN, Claus P.: *Fertigungsmesstechnik - Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2005
- [Hirschfeld 1965] HIRSCHFELD, Kurt: *Baustatik - Theorie und Beispiele, Zweiter Teil, Seite 769 - 1284*. 2. Auflage. Springer Verlag, 1965
- [Ingensand 2001] INGENSAND, Hilmar: Systematische Einflüsse auf praktische Messungen mit dem Tachymeter und Digitalnivellier. In: *54. DVW-Seminar "Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik"* Schriftenreihe 42 (2001), S. 120–137
- [ISO12858 1999] ISO12858: *Optics and optical instruments - Ancillary devices for geodetic instruments - Part 2: Tripods*. First Edition. Case postale 56, CH-1211 Geneve, January 1999
- [ISO12858 2005] ISO12858: *Optics and optical instruments - Ancillary devices for geodetic instruments - Part 3: Tribrachs*. 2005
- [ISO17123 2001] ISO17123: *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 2: Levels*. 2001
- [Kahmen 1997] KAHMEN, Heribert: *Vermessungskunde*. 19. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 1997 (3-11-015399-8)
- [Leica 1997] LEICA, Geosystems: *Leica TPS - System 1000 - System User Manual*. 2.3.4en. 9435 Heerbrugg, Switzerland, 1997

[Leica 2003] LEICA, Geosystems: *GSI ONLINE for Leica TPS and DNA*, November 2003

[Wunderlich u. Kiener 2004] WUNDERLICH, Walter ; KIENER, Gunter: *Statik der Stabtragwerke*. 1. Auflage. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2004 (3-519-05061-7)

Anhang A

Zusätzliche Informationen zur Höhenstabilität

Nr.:	Staffreading 1 (knocked) [m]	Staffreading 2 [m]	Staffreading 3 (knocked) [m] +25min	Staffreading 4 [m] +30min
1	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
2	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
3	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
4	1.10125	1.10125	1.10124	1.10125
5	1.10125	1.10125	1.10124	1.10125
6	1.10124	1.10124	1.10125	1.10125
7	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
8	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
9	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
10	1.10124	1.10125	1.10125	1.10125
11	1.10124	1.10125	1.10125	1.10125
12	1.10124	1.10125	1.10125	1.10125
13	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
14	1.10124	1.10125	1.10125	1.10125
15	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
16	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
17	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
18	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
19	1.10125	1.10125	1.10125	1.10125
20	1.10124	1.10125	1.10125	1.10125
StdDev.:	0.000004	0.000002	0.000003	0
Spread.:	0.000010	0.000010	0.000010	0

Abb.: A.1: Messergebnisse zur DNA03 (SerialNr.: 21) Kompensatorgenauigkeit; Leica Messkeller (Laborbedingungen), Ziel: GPCL2 Invarcode, Messzeit: 18:05/18:30, 05.12.05

task	GST120-9		TRIMAX C		CTB101 W		S40 FIBR		GST05 WO		GST05 AL		CTB101 A		GST40 fx	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
accl. testobj.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
accl. of instr.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
screw check	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
tripod shoes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
torque check	✓	✓	--	--	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
general check	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
trip. tips	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
meas. w/o load	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
initial meas.	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
load	30kg	30kg	30kg	30kg	30kg	30kg	30kg	30kg	10kg	10kg	10kg	10kg	10kg	10kg	10kg	30kg
load start	+0.0231	+0.0183	+0.0444	+0.0437	+0.0267	+0.0360	+0.0103	-0.0070	+0.0101	+0.0121	+0.0198	+0.0164	+0.0129	+0.0192	+0.0166	
during load	+0.0245	+0.0196	+0.0541	+0.0461	+0.0286	+0.0387	+0.0102	+0.0008	+0.0111	+0.0126	+0.0239	+0.0218	+0.0148	+0.0202	+0.0187	
bef. endof load	+0.0250	+0.0199	+0.0542	+0.0463	+0.0299	+0.0399	+0.0102	+0.0008	+0.0111	+0.0126	+0.0240	+0.0220	+0.0149	+0.0204	+0.0197	
w/o load again	+0.0084	+0.0055	+0.0276	+0.0140	+0.0072	+0.0101	+0.0083	-0.0286	+0.0024	+0.0037	+0.0159	+0.0144	+0.0082	+0.0158	+0.0059	
final meas. (hy-steresis)	+0.0084	+0.0055	+0.0274	+0.0138	+0.0072	+0.0098	+0.0082	-0.0304	+0.0022	+0.0032	+0.0158	+0.0144	+0.0081	+0.0157	+0.0058	
nr. of meas.	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

Tab.: A.1: Checkliste für Stativtests

Anhang B

Zusätzliche Informationen zur Hz-Verdrehsteifigkeit

Brennweite	215mm
Eintrittspupille	43mm
Winkelauflösung	$0.032'' = \frac{1}{30}''$
Messbereich	$\pm 25'$
Linearitätsfehler über den ganzen Bereich	$< 0.2\%$
Lichtquelle	Infrarot Sendediode (850nm)
Faserdurchmesser	$190\mu m$
Sensortyp	SiTek 2L4, 2-axis lateral diode
Kollimatorabmessungen	$\varnothing 92 \times 260mm$
Gewicht	4.9 kg
Kontrollmöglichkeit	K210 CCD-camera Siemens

Abb.: B.1: Technische Daten des EO Kollimators

Hz Position		Meas. Nr.		rel. Diff.			Res.
TCA2003	EO Colli	From	To	EO Colli	Stdev. ["]	TCA2003	[gon]
I.							
399.99953	17.43	0	300		.322		
399.98024	144.52	430	700	127.09187	.248	0.01929	0.000151780
399.99030	77.96	750	1180	66.56282	.625	0.01006	0.000151135
399.95924	282.70	1400	1800	204.73861	.259	0.03106	0.000151706
II.							
399.99998	288.99348	0	300		.261		
399.99995	289.18438	550	700	0.190891	.246	0.00003	0.000157157
000.00357	265.22202	820	1030	23.96235	.232	0.00362	0.000151070
000.00436	259.98408	1200	1500	5.237941	.377	0.00079	0.000150823
III.							
0.13525	-1.25241	0	300		.360		
0.13420	5.82497	360	700	7.077374	.579	0.00105	0.000148360
0.13700	-12.75183	740	1180	18.57680	.413	0.00280	0.000150726
0.13066	30.07164	1200	1600	42.82347	.460	0.00634	0.000148050
IV.							
399.99953	241.65150	0	340		.393		
399.98024	184.40994	370	740	57.24156	.471	0.00858	0.000149891
399.99030	250.60811	780	1200	66.19817	.369	0.00990	0.000149551
399.95924	297.02051	1200	1450	46.41241	.528	0.00697	0.000150175
				AVG	.384		
						AVG	0.000150869

Abb.: B.2: Kalibrierergebnis

Lebenslauf

Daniel Nindl,

geboren am 08. Mai 1980 in Schwarzach im Pongau (Sbg.).

Österreichischer Staatsbürger, ledig, römisch-katholisch.

Präsenzdienst abgeleistet: 30. August 1999 – 28. April 2000

(Kroatinkaserne St. Johann im Pongau)

Familie

Mutter: Barbara Nindl, Vertragsbedienstete im öffentlichen Dienst

Vater: Alois Nindl, Werkmeister für Maschinenbau

Bruder: Christoph Nindl, HTL-Schüler, 15 J.

Schulbildung

Volksschule Uttendorf von	1986 – 1990
Hauptschule Uttendorf von	1990 – 1994
Ausbildung zum Bautechniker in der Höheren Technischen Bundeslehranstalt Saalfelden, Abteilung Bautechnik/Hochbau von	1994 – 1999
Reifeprüfung abgelegt am	24. Juni 1999
Studium Vermessung und Geoinformation (TU Wien) seit	01. Okt. 2000
Auslandsstudium an der University of Uppsala (SWE), Department for Earth Sciences von	Jänner – Juni 2005
derzeit:	12. Semester

Zahlreiche Teilnahmen an internationalen Treffen für Geodäsiestudenten, wie IGSM (International Geodetic Students Meeting) und ARGEOS (ARbeitsgemeinschaft der GEOdäsieStudierenden).

Berufliche Tätigkeiten

Ferialpraktikant (Bauarbeiter)

bei *StegerBau* Litzldorf 24

1995: 10.07 – 26.07

A-5723 Uttendorf

1996: 08.07 – 03.08

Vermessungsgehilfe im

1997: 07.07 – 25.07 / 18.08 – 29.08 /

Markscheidebüro der

22.12 – 30.12

Wolfram

1998: 14.07 – 20.08

Bergbau Mittersill

1999: 12.07 – 26.07 / 16.08 – 27.08

GesmbH. Nfg. Kg.

2000: 05.06 – 28.06 / 21.08 – 01.09

A-5730 Mittersill / Felbertal

2001: 05.02 – 24.02

Assistent in der TPS Entwicklung

2001: 02.07 – 14.09

LEICA Geosystems

2002: 02.07 – 31.08

Heinrich-Wild-Strasse 1

2003: 01.07 – 21.09

CH-9435 Heerbrugg / Schweiz

2004: 05.07 – 10.09

Werksstudent / Diplomand

2005/06: 01.09 – 24.02

In den Wintersaisons **2002/03, 2003/04, 2004/05, 2005/06** tätig als Skilehrer.