

Auswirkungen von hochfrequenten Störeinflüssen auf das geometrische Nivellement

Dr.-Ing. W. Schauerte, Universität Bonn

Einleitung

Durch den am Geodätischen Institut vorgenommenen Umbau eines Trimble DiNi 10-Digitalnivelliers ist es nun möglich, Höhenmessungen mit einer hohen Messfrequenz vorzunehmen. Damit gelingt es auch, die Einflüsse von Störungen (Kompensator, Atmosphäre usw.) quantitativ zu erfassen und ihre Auswirkungen qualitativ abzuschätzen. Exemplarisch werden die auf den Kompensator bezogenen Untersuchungsergebnisse vorgestellt.

1. Messablauf und -verfahren von konventionellen Nivellieren und Digitalnivellieren

1.1 Messprozess mit konventionellen Nivellieren

Ein mit einem konventionellen Präzisionsnivellier auf der Nivellierlatte einzustellender Strich hat, wenn man ihn durch ein stark vergrößerndes Messinstrument beobachtet, keine stabile Raumlage. Vielmehr führt der „Zielstrahl“ in Abhängigkeit von diversen Faktoren wie den meteorologischen Einflussgrößen (Intensität der Sonneneinstrahlung, Temperaturgradienten, Feuchtigkeit usw.), dem Untergrund, dem Abstand zum Boden, den Kompensatorbewegungen, usw. unregelmäßige Höhenbewegungen gegenüber einem unbewegten Strichkreuz auszuführen. Würde man diese Bewegungen zeitlich aufzeichnen, ergebe sich beispielsweise der entsprechend Abb. 1-1 skizzierte analoge Signalverlauf (vgl. SCHAUERTE 1995). Er wurde allerdings geglättet, um besser die niederfrequenten Signalanteile herauszuarbeiten. In der Realität sind der skizzierten Funktion auch hochfrequente Signalanteile überlagert, die bei Lufttemperaturen ab 20 bis 25 °C auch höhere Frequenzen erreichen. Allerdings fallen aus physikalischen Gründen die Amplituden hochfrequenter Signalanteile gegenüber den niederfrequenten Komponenten signifikant kleiner aus.

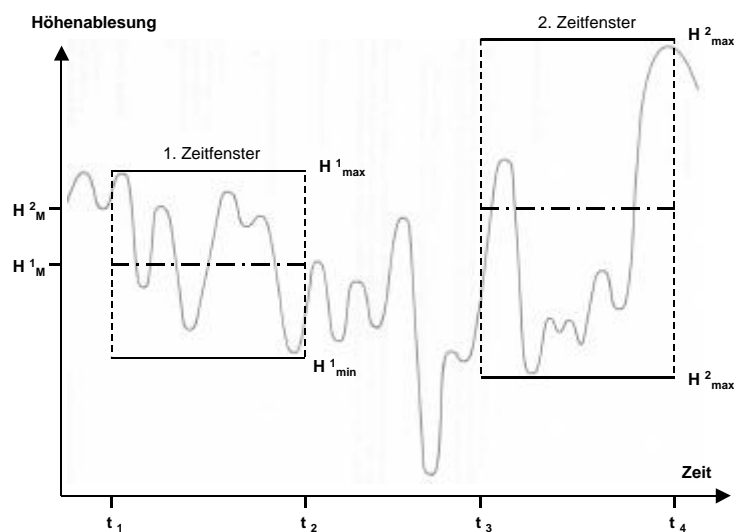


Abb. 1-1: Auswirkungen des Messzeitpunktes auf die Höhenlage der anzumessenden Strichposition

Bestimmende Größen für das "abzulesende" Höhenmaß sind das benutzte Zeitfenster (angedeutet durch die hervorgehobenen Bereiche in Abb. 1-1, in denen die Messung erfolgt), und die Beobachtungstechnik, d.h. ob eine visuelle oder digitale Messmethode (Messelement: CCD-Sensor) zugrunde liegt.

Geübte Beobachter haben in der Regel "eigene" Methoden entwickelt, wie sie den Lattenstrich innerhalb des keilförmig ausgebildeten Strichkreuzes positionieren. Die benutzte Methode ist dabei auf die unterschiedlichen Zielweiten abzustellen, wobei insbesondere bei längeren Zielweiten Effekte wirken, die auf Kompensatorbewegungen und/oder meteorologische Einflüsse zurückzuführen sind. Beide erzeugen eine "bewegte" Lattenstrichposition, deren Schwingungsamplituden und -frequenzen sich gegenseitig überlagern. Hochfrequente Anteile, die deutlich die Augenabtastrfrequenz von 4 bis 13 Hz überschreiten,

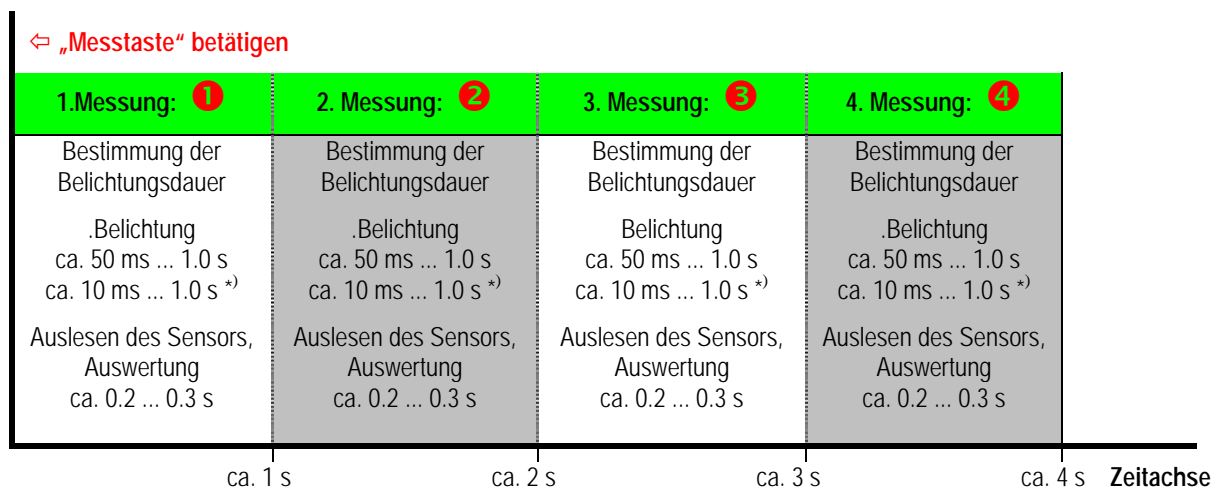
erkennt der Beobachter üblicherweise nicht mehr. Er kann bei den Messungen folgende Strategien verfolgen, wie er seine Referenzmarke Strichkreuz relativ zum bewegten Strichbild einstellt :

1. Bei höheren Bewegungsfrequenzen des Strichbildes (verursacht z.B. durch Luftszintillationen) und längeren Zielweiten wird er z.B. versuchen, zwischen der höchsten und niedrigsten Strichposition des 1. Zeitfensters (H^1_{max} und H^1_{min}) oder des 2. Zeitfensters (H^2_{max} und H^2_{min}) den Mittelwert H^1_M bzw. H^2_M einzustellen (vgl. Eintragungen in Abb. 1-1).
2. Bei kürzeren Zielweiten und langsamen Bewegungsabläufen (verursacht z.B. durch Kompensatorbewegungen) ist u.U. eine andere Technik sinnvoll. Man versucht dabei den "Schwerpunkt" der verschiedenen Höhenpositionen einzustellen, also den Bereich auszuwählen, der innerhalb des Beobachtungszeitraums am häufigsten vom Strichkreuz überstrichen wurde. Damit wird der Einfluss extremer Strichbildausschläge heruntergedrückt. Dieses Verfahren ist genauer, erfordert allerdings vom Beobachter eine höhere Konzentration und findet sicherlich nur bei kürzeren Zielweiten Anwendung, wo sich kleinste Strichpositionsänderungen mit dem Auge besser auflösen lassen.

Ob beide oder nur eines der genannten Verfahren plausible Ergebnisse liefern, wird ganz wesentlich durch den vom Zeitfenster ausgeschnittenen Signalverlauf bestimmt. Will man also eine Zeitabhängigkeit vermeiden und auch keine beliebig langen Beobachtungszeiten zulassen, verbleibt nur, solche Einflussgrößen wie Verkehr, Wind, Refraktion, usw. möglichst nicht einwirken zu lassen. Gute äußere Messbedingungen reduzieren zwangsläufig Frequenzanteile mit großen Amplituden. Ansonsten hängt die Qualität der Einzelablesung ausschließlich von der Erfahrung des Beobachters ab.

1.2 Messprozess mit Digitalnivellieren

Im Gegensatz zum visuellen Beobachtungsverfahren, das die meisten (älteren) Fachkolleginnen und -kollegen selbst noch praktiziert hatten, gestaltet sich die Messprozedur bei Digitalnivellieren nicht nur deutlich anders, sondern auch einfacher. Aufgezeigt wird der interne Messablauf am Beispiel des Digitalnivelliers Trimble DiNi 10/11 und DiNi12^{*)} (vgl. Abb. 1-2), wobei der Ablauf einer Einzelmessung wiedergegeben wird.



Ausgeführte Schritte bei jeder Messung: 4 Einzelmessungen(① bis ④). Sofern die vorgegebene Spanne zwischen den Werten zu groß ist, werden automatisch eine oder max. 2 weitere Einzelmessungen ausgelöst. Bei Überschreiten der Spanne → Fehlermeldung

Abb. 1-2: Ablauf einer Einzelmessung beim Digitalnivellier DiNi 10/11/12 der Firma Trimble

Der Modus sieht, nachdem die Messtaste betätigt wurde, ein Zeitintervall von ca. 1 s vor, in dem einerseits das Messsystem die Belichtungsdauer auf die aktuellen Bedingungen bestellt. Daran schließt sich der eigentliche Mess- und Auswerteprozedur an, in der zunächst über die Belichtung eine Abbildung des relevanten Lattenabschnitts auf den Sensor eingeleitet wird. Die Belichtungszeit wird automatisch auf die vorherrschenden äußeren Messbedingungen abgestimmt und variiert je nach eingebautem Sensor zwischen 10 ms und 2 s. Der eigentliche Höhenmesswert wird mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung aus dem Messsignal ermittelt. Innerhalb des insgesamt ca. 4 s andauernden Messintervalls erfolgen insgesamt vier Belichtungs- und Auswertezyklen. Unter der Maßgabe, dass die Spanne zwischen den vier intern ermittelten Messwerten einen bestimmten Wert überschreitet, wird eine 5. Belichtung mit Auswer-

tung nachgeschaltet. Falls der Spannwert wieder überschritten wurde, erfolgt eine weitere 6. Messung mit Auswertung. Wurde wieder die festgelegte Messspanne überschritten, wird am Display eine Fehlermeldung ausgegeben.

Überträgt man diese Prozedur in das analoge Höhensignal der Abb. 1-1, ergibt sich ein modifiziertes Bild bei Mehrfachrepetitionen (vgl. Abb. 1-3). Die jeweiligen Strichpositionen werden durch den Belichtungszeitpunkt t_i fixiert.

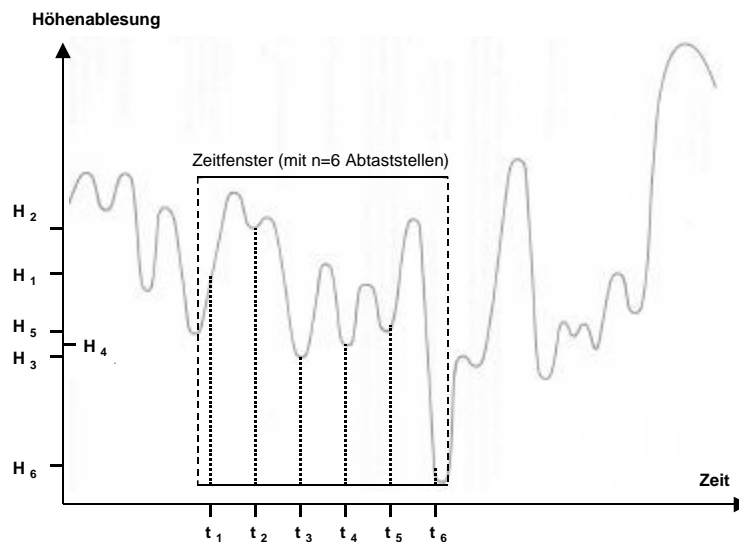


Abb. 1-3: Messzeitfenster beim Digitalnivellieren mit den Belichtungszeiten für die Einzelmessungen

Man kann die so erhaltenen n Einzelmesswerte unter mathematisch-statistischen Gesichtspunkten auch als diskrete Abtastungen eines analogen Signals verstehen. Dieses ließe sich umgekehrt wieder (vollständig) rekonstruieren, wenn bestimmte Kriterien erfüllt würden. So müssten, um dem Kriterium der Ergodizität zu genügen, die innerhalb des Zeitfensters gewonnenen Messwerte das gesamte Höhensignal beschreiben. Das ist aber nur möglich wäre, wenn man sich das Anlogsignal als Summe des beliebig oft aneinander gelegten Teilsignals vorstellt, das innerhalb des Zeitfensters anstand. Da einerseits über die im Anlogsignal vorhandenen Frequenzen grundsätzlich keine Informationen vorliegen und andererseits bei allen Messsystemen die Taktfolge der Belichtungszeiten mehr oder weniger starr festliegen und sich vom Operateur nicht manipulieren lassen, ist das vorgenannte Kriterium nicht einhaltbar. Folglich geben alle "abgetasteten" Höhenpositionen zusammen nicht nur ein unvollständiges, sondern in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen ein mehr oder weniger stark verzerrtes Bild des tatsächlichen Bewegungsablaufs des Strichbildes wieder (vgl. gestrichelte Verbindungslinie). Ihr Informationsgehalt ist dennoch höher als der des angezeigten und abgespeicherten Mittelwerts.

Notwendigerweise muss der berechnete Mittelwert nicht mit der "visuell bestimmten Mittelposition" übereinstimmen. Dieses wird noch unwahrscheinlicher, wenn problematische die (äußeren) Bedingungen sind. Objektiverte Beobachtungsergebnisse erhält man nur, wenn die für präzise Messungen benötigten guten Rahmenbedingungen vorherrschen.

Die in diesem Abschnitt angesprochenen Prinzipien sind prinzipiell auch für die Produkte der Firmen Leica (NA 3000/3003 und DNA 03), Topcon mit dem DL 101 als auch Sokkia mit dem SDL 30 übertragbar, müssten dann allerdings auf deren Spezifika, ob z.B. pro Einzelmessung mehrere Belichtungen oder nur eine erfolgt, angepasst werden.

2. Herausstellung der wesentlichen Unterschiede

Üblicherweise erfordern Präzisionsmessungen neben einem geeigneten Instrumentarium und speziellen Messtechniken auch einen qualifizierten Beobachter mit großer Messpraxis. Dieser sollte sowohl in der Lage sein, die Qualität seiner Messungen vor Ort einschätzen und bewerten zu können als auch fachlich korrekte Entscheidungen zu treffen, wenn besondere Situationen oder Bedingungen vorliegen oder dieses es erfordern. Mit den präzise arbeitenden Digitalnivellieren wurde scheinbar die Möglichkeit eröffnet, auch mit geringer Messerfahrung hochgenaue Nivellementmessungen zügig auszuführen. Dieser Trend wird durch folgende Argumente maßgeblich unterstützt:

- Während des Mess- und Auswerteprozesses wird, wie das beim klassischen Präzisionsnivellament zwangsläufig notwendig war, das in der Austrittspupille betrachtete Lattenbild nicht mehr kontinuierlich beobachtet. Folglich erhält der Operateur, da er gewöhnlich in den automatisch ablaufenden Messprozess überhaupt nicht eingreifen kann und während dieser Zeit das Geschehen nicht "beobachtet", keine Informationen mehr darüber, ob Störeinflüsse auf die aktuelle Messung einwirken und, wenn dieses zutrifft, wie groß diese Effekte dann ausfallen.
- Mit Digitalnivellieren sind in den meisten Fällen noch Messungen möglich, unabhängig davon, welche (äußeren) Messbedingungen vorliegen und wie groß die Zielweite ist. Da die interne Software praktisch nur solche Messungen ausschließt und dann eine Fehlermeldung ausgibt, die beispielsweise zu große Streuungen bei den internen Mehrfachmessungen aufweisen, keine geeignete Belichtungen für den Messsensor ermöglichen oder durch Einwirkungen auf den Kompensator gestört sind, suggerieren die auf 0.01 mm ausgegebenen Höhenmesswerte u.U. eine unsinnig hohe Messungsqualität. Denn über die Qualität und Streuung jeder einzelnen Signalauswertung liegen dem Operateur überhaupt keine Informationen vor.
- Es ist von ungeübten Operateuren bereits nach kurzer Einarbeitungszeit eine deutlich höhere Messgeschwindigkeit erreichbar, als wenn dieselben Personen mit konventionellen Präzisionsnivellieren und visuellen Beobachtungstechniken arbeiten würden. Dies hängt damit zusammen, dass zum "bloßen Knöpfchendrücken" nicht viel Messerfahrung benötigt wird. Letzteres muss in der Regel durch häufigere Wiederholungsmessungen „teuer“ bezahlt werden und wird damit zu einem nicht zu unterschätzenden wirtschaftlichen Faktor.

Ein ganz wesentlicher Unterschied muss in diesem Zusammenhang noch stärker herausgestellt werden als dieses bisher getan wurde, nämlich die Auswirkungen der teilweise extrem kurzen Belichtungszeiten der Digitalnivelliere. Sie üben einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Messqualität aus und sollten deshalb in den Betrachtungen nicht unberücksichtigt bleiben. Aus diesem Grund wird in den beiden nachfolgenden Kapiteln auf diese Problematik dezidiert eingegangen.

3. Durchgeführte Modifikationen am DiNi10 (MoDiNi10)

3.1 Integration einer neuen CCD-Kamera

Die standardmäßig im DiNi10 eingebaute CCD-Zeile ist von der Firma TOSHIBA hergestellt worden. Es handelt sich dabei um den Typ TCD133D. Um eigenständige und unabhängig von der Firmware durchführbare Messungen vornehmen zu können, wurde aus dem vorgenannten Instrument die komplette Elektronik entfernt. Erhalten blieb im wesentlichen nur noch die optisch-mechanischen Bausteine des DiNi 10. Anschließend ist das Gerät mit einer neuen CCD-Zeilenkamera vom CCDL-25M1-8 der Firma EURECA Messtechnik GmbH versehen worden. Diese besitzt einen CCD-Sensor vom Typ ILX505a der Firma SONY und weist folgende wesentliche Unterschiede gegenüber dem alten TOSHIBA-Sensor auf:

Eigenschaft	Sony CCD-Zeile	Toshiba CCD-Zeile	Vorteil Sony gegenüber Toshiba
Pixelanzahl	2592	1024	Höheres und besseres Auflösungsvermögen
Pixelgröße	11µm x 11µm	14µm x 14µm	
Ansprechempfindlichkeit R	53 V/lx	12 V/lx	Höhere Empfindlichkeit auf einfallende Photoelektronen
Sättigungsspannung U	1,8 V	3 V	Höhere Empfindlichkeit bei schlechten Beleuchtungssituationen
Spektrale Empfindlichkeit	410 – 560 nm	500 – 650 nm	Beide Sensoren im Grünbereich empfindlich, wichtig aufgrund des eingebauten Grünfilters

Tab. 3-1

Um die CCD-Zeile betreiben und auslesen zu können, ist im Gehäuse des DiNi10 eine Steckbuchse für die Stromversorgung und eine Datenschnittstelle zum Auslesen der Zeilenkamera integriert worden. Über die Datenschnittstelle lässt sich das modifizierte DiNi nun über einen PC ansteuern und die Werte aus CCD-Zeile auslesen. Die Ansteuerung des Zeilensensors erfolgt dabei über den parallelen Port (EPP 1.9 nach IEEE1284-Norm) des PC und durch eine definierte Abfolge von Schreib- und Lesefunktionen (insgesamt 2658 Byte Schreib- bzw. Leseoperationen) kann auf die CCD-Zeile direkt zugegriffen werden (EURECA 1999A, 1999B).

3.2 Festlegung der Instrumentenparameter

Wesentliche Voraussetzungen für die messtechnische Nutzung eines Digitalnivelliers sind folgende Kenngrößen (WIZESARSKY 2002):

- *Bestimmung des Mittelpixels und Konventionen*

Abbildung 3-2 zeigt ein typisches Signal, welches aus der CCD-Zeile ausgelesen wird. Es ist ein Intensitätsabfall an den Rändern der CCD-Zeile zu erkennen, was auf Abbildungsfehler und Helligkeitsverluste zurückzuführen ist. Ferner sollte bei der CCD-Zeile mit insgesamt 2592 Pixeln das optische Mittelpixel bei Nummer 1296 liegen. Untersuchungen am Geodät. Institut der Uni Bonn belegten, dass das optische Mittelpixel bei der Nummer 1186 liegt. Dieses hängt ursächlich mit dem Einbau der CCD-Zeile zusammen, da hierbei schon kleinste Abweichungen einen kleinen Versatz in Zeilenrichtung zu Folge haben. Zusammen mit der Information bezüglich Abbildungsfehlern und Helligkeitsverlusten wird daraus geschlossen, nur den Bereich von Pixel-Nr. 600 bis 1800 zu nutzen.



Abb. 3-1: Das modifizierte DiNi 10

- *Streckenverbesserung und Abbildungsmaßstab*

Bei dem in dieser Arbeit angewandten Auswerteverfahren wird als Ergebnisse eine Verschiebung zweier Signale zueinander als Pixelwert erhalten. Um diesen Pixelwert in ein reales metrisches Maß überführen zu können, muss der ermittelte Wert mit einem Maßstabsfaktor multipliziert werden. Der Maßstabsfaktor ergibt sich aus der Optik des Messsystems entsprechend:

$$\frac{g}{d-c} = \frac{b}{f} \quad (3-1)$$

wobei g = Gegenstandsgröße (Signal auf der Latte) in [m]
 d = Abstand Codeträger – Stehachse MoDiNi in [m]
 c = Additionskonstante in [m]
 b = Bildgröße (abgebildetes Signal auf der CCD-Zeile) in [mm]
 f = Brennweite des optischen Systems in [mm]

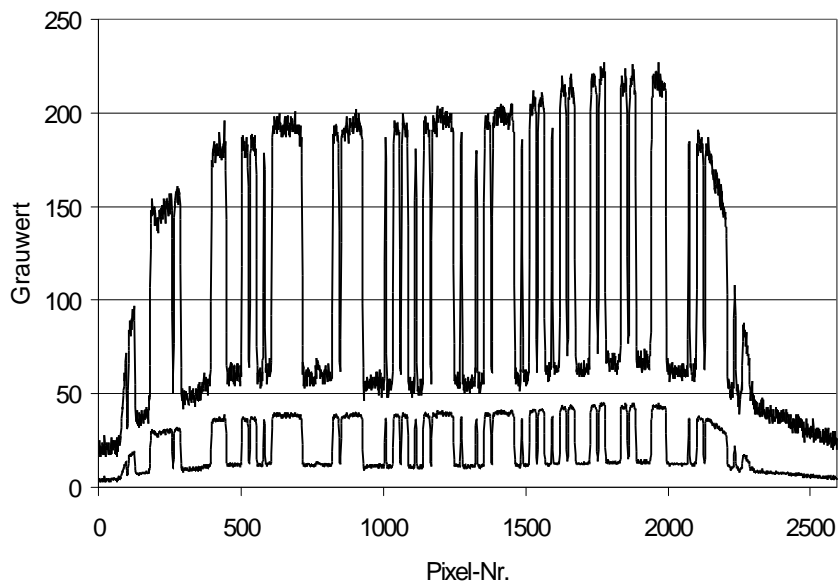


Abbildung 3-2: Messsignale mit verschiedener Grauwertdynamik

· *Grauwertdynamik, optimierte Integrationszeit und Messfrequenz*

Ziel der Versuchsmessungen war, eine schnellstmögliche Auslesefolge bei einer ausreichenden Beleuchtung des Codes zu erreichen. Abb. 3-2 zeigt zwei Signale desselben Lattenabschnittes, welcher bei gleichbleibender Beleuchtung, aber um etwa den Faktor 5 geänderter Messfrequenz, aufgenommen worden sind. Es ist deutlich zu sehen, dass bei dem Signal, welches man mit einer geringeren Messfrequenz (= längere Integrationszeit) aufnahm, die Hell-Dunkel-Unterschiede deutlicher ausgeprägter sind als diese bei schneller Messfolge. Der Unterschied zwischen den Helligkeits- und Dunkelwerten wird auch als Grauwertdynamik bezeichnet. Es existiert ein Zusammenhang zwischen Grauwertdynamik und Integrationszeit auf der einen Seite und der Grauwertdynamik und der Qualität der Wiedergabe der Kantenstruktur auf der anderen Seite. Liegt bei dem „unteren“ Signal nur maximal ein Pixel auf den Übergängen der Hell-Dunkel-Felder, so sind dies bei dem Signal mit der höheren Grauwertdynamik mindestens drei Pixel. In der Aufbereitung des Messsignals wird eine Kantendetektion vorgenommen, weshalb es nicht unerheblich ist, wie viele Messwerte auf dem Übergang liegen. Da mindestens drei Punkte eine Flanke definieren sollen, hat man die Grauwertdynamik so zu wählen, dass das Messsignal diese Information liefert. Testmessungen konnten belegen, dass dieses bei einer Grauwertdynamik von 70 gegeben ist. Aus der ermittelten Integrationszeit ergibt sich dann direkt die minimale Messfrequenz.

4. Extraktion der Störeinflüsse

4.1 Festlegung des Auswerteverfahrens

Um die relative Verschiebung zwischen zwei Signalen festzustellen, wird das Verfahren der Kreuzkorrelation benutzt. Es zeichnet sich das Verfahren sowohl durch das einfache Berechnungsverfahren, als auch durch seine hohe Genauigkeit aus (CASOTT/PRENTING 1998). Als Ergebnis erhält man die relative Verschiebung zwischen zwei Signalen, wobei die Qualität im Bereich von wenigen 0.01 Pixeln liegt. Ferner erlaubt das Verfahren selbst den Vergleich von zwei Signalen, die entweder ein anderes Grauwertniveau oder auch einen Maßstabsunterschied bis zu 30% aufweisen. Dieses ist u.a. für Feldmessungen nützlich, da durch Windeinwirkung die Nivellierlatte leicht verkippen kann und damit eine Maßstabsänderung verursacht. Gegen solche Effekte ist das Kreuzkorrelationsverfahren robust.

Das Berechnungsverfahren besteht aus zwei Arbeitsschritten. Im ersten wird das zu untersuchende Signal bezüglich des Referenzsignals pixelweise verschoben. Zu jeder Verschiebung wird ein Korrelationskoeffizient entsprechend

$$\rho_{12} = \frac{\sigma_{g1g2}(u)}{\sigma_{g1}(u) \cdot \sigma_{g2}(u)} \quad (4-1)$$

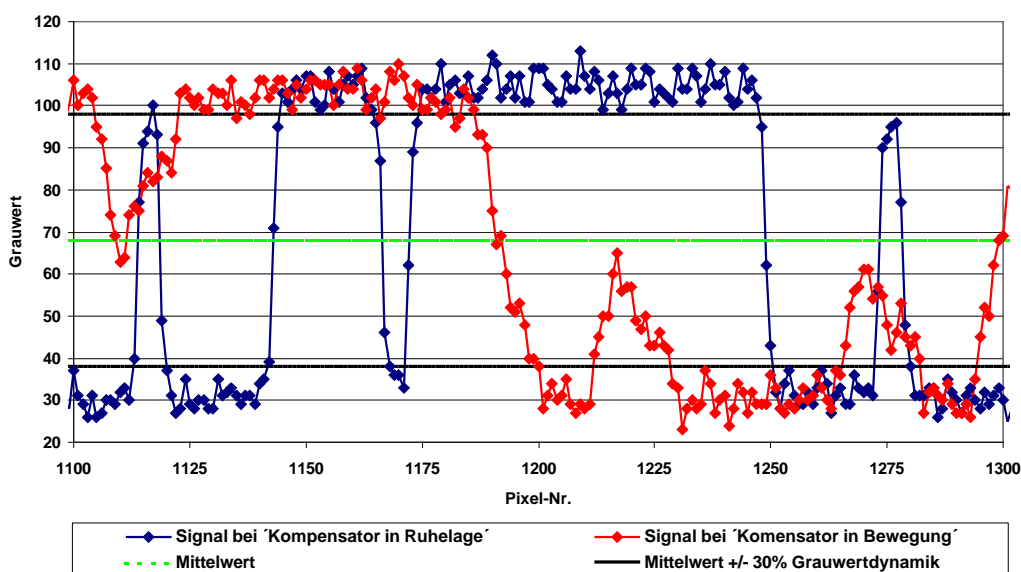


Abb. 4-1: Signal bei Kompensator in Ruhe und in Bewegung

berechnet (LANG, FÖRSTNER 1995). Zur Korrelation werden alle Pixel der aufbereiteten Signale herangezogen, d.h. maximal 1200 Pixel. Diese Zahl reduziert sich, da bei der Verschiebung um einen Betrag u nur noch $1200-u$ Pixel miteinander verglichen werden können. Bei der pixelweisen Verschiebung der beiden Signale gegeneinander wird der Korrelationskoeffizient ρ_{12} (maximal ± 1) erhalten, wenn die Signale lagemäßig übereinstimmen. Der Verschiebungsbetrag u mit dem maximalen Korrelationskoeffizienten stellt dann den ganzzahligen relativen Abstand zwischen den beiden Signalen dar.

Das zuvor beschriebene Verfahren bedarf musste insoweit modifiziert werden als der bewegte Kompensator leichte „Verschmierungeffekte“ im Messsignal erzeugt und sich damit die Signalstruktur signifikant von einem Signal bei „ruhendem“ Kompensator unterscheidet. In Abb. 4-1 ist gut zu erkennen, dass bei „angeregtem“ Kompensator die Kantenübergänge nicht mehr so scharf über 5 Pixel abgebildet werden. Die Kantenabbildung überstreicht nun deutlich mehr Pixel (ca. 10) und weist eine deutlich flachere Steigung auf. Dieses ist auch daran zu erkennen, dass die 1mm-Striche kaum noch als Peak erkennbar sind (WIZESARSKY 2002).

4.2 Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Messsystems

a) Messaufbau

Wie in den vorherigen Abschnitten dargelegt, wird aufgrund der Eigenschaften der CCD-Zeile eine maximale Auslesegeschwindigkeit angestrebt. Bei den Testmessungen konnte an Hand der gesetzten PC-Zeitmarken ein Wert von 100 Hz erreicht werden.

Um diese Angaben zu bestätigen und die zu erreichende Messfrequenz überprüfen zu können, wurde ein geeigneter Messaufbau konzipiert. Ein Lautsprecher wurde dafür über einen Signalgenerator mit einem definierten Sinus-Signal versorgt. Die eingestellte Frequenz sollte in einem Bereich von 30Hz liegen, so dass aufgrund der Ergebnisdaten eine Aussage darüber gemacht werden kann, ob die Auslesung von 100 Signalen pro Sekunde realistisch ist.

Dazu wurde auf die Membrane des Lautsprechers eine dünne, kreisrunde Aluminium-Platte geklebt, so dass zwischen Membrane und Platte eine starre Kopplung vorlag. Dieses ist notwendig, damit sich die Platte nicht löst, wenn der Lautsprecher in Schwingung versetzt wird. Die Aluminiumplatte dient als Träger einer aus Pappe geformten „Nivellierlatte“ (Länge ca. 15 cm).

Die von einem Sinus-Generator ausgehende Anregung wurde mit einem Frequenzzähler der Firma HEWLETT-PACKARD vom Typ 5345A überwacht. Die Visualisierung des Messsignals erfolgte über einen Oszillograph der Firma TEKTRONIX vom Typ TDS 3054.



Abb. 4-2: Lautsprecher mit Lattenaufsatz

b) Versuchsdurchführung und Auswertung

Dem Lautsprecher wird über den Signalgenerator eine definierte Frequenz aufgeprägt. Mit Hilfe dem MoDiNi wurde nun diese Schwingung erfasst. Unter optimierten Beleuchtungsbedingungen konnten 250 Einzelmessungen in einer Zeit von 2,8 Sekunden aufgenommen werden, was einer Messfrequenz von ca. 90 Hz entspricht. Insgesamt wurden mehrere Messreihen aufgenommen, wobei die Frequenz der Anregung zwischen 4Hz und 30Hz variiert wird. Die Auswertung der Datensätze erfolgte als relative Verschiebung der Einzelmessung relativ zur Bezugsmessung. Zur Ermittlung der Schwingfrequenz, die Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Systems ermöglichen sollte, werden die Daten weiterverarbeitet und die Parameter der Schwingung in einem Gauß-Markoff-Modell (GMM) geschätzt. Als mathematischen Ansatz wird im GMM eine harmonische Schwingung der Form angesetzt:

$$y = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) + b \quad (4-2)$$

mit

- a = maximale Amplitude [in Pixel]
- f = Frequenz der Schwingung [in 1/s]
- t = Zeitpunkt der Einzelmessung [in s]
- φ = additive Frequenzverschiebung [in rad]
- b = Verschiebung der Sinusschwingungen in y-Richtung [in Pixel]

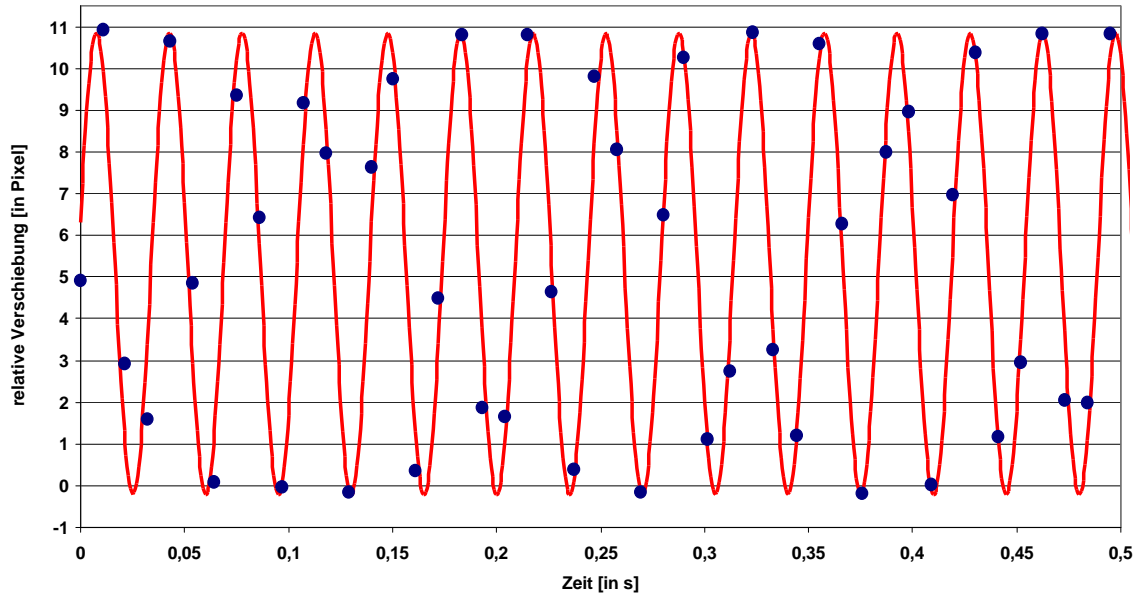


Abb. 4-3: Diskrete Messwerte der rel. Verschiebung und im GMM bestimmte Schwingung mit 25,58Hz

Abbildung 4-3 gibt exemplarisch das ausgewertete Schwingungssignal für die voreingestellte 30 Hz-Frequenz wieder. Die eingetragenen Punkte stellen dabei die diskreten Messwerte (relative Verschiebung zur Nullmessung innerhalb einer Messreihe) dar, während durch die rote Kurve die im GMM geschätzte Funktion repräsentiert wird. Man erkennt, dass mindestens vier Messwerte auf einer ganzen Schwingung liegen, d.h. die Schwingung kann sicher bestimmt werden, da minimal drei Messwerte ausreichend für die Bestimmung einer Schwingung sind. Daraus folgt, dass das Messsystem noch Schwingungsfrequenzen über 30Hz korrekt auflösen kann (vgl. auch Tab. 4-1).

Eingestellte Frequenz (Soll-Frequenz) [1/s]	Im GMM geschätzte Frequenz (Ist-Frequenz) [1/s]	Standardabweichung (Ist-Frequenz) [1/s]
2,00	1,91	0,001
4,00	3,68	0,002
6,00	5,76	0,004
8,00	7,13	0,002
10,00	9,98	0,004
15,00	15,01	0,007
20,00	17,21	0,004
25,00	25,28	0,014
30,00	28,58	0,010

Tab. 4-1

4.3 Ermittlung des Ruhezustands des Kompensators

Um bei Testmessungen im Labor oder im Außenbereich eine Aussage über die Bewegung des Kompensators treffen zu können, sollte man versuchen mit dem MoDiNi auch Referenzmessungen durchzuführen, die unter optimalen Messbedingungen stattfinden. Damit liegen dann qualitativ gute Vergleichsdaten vor, in denen nur noch das Messrauschen enthalten ist. Eventuelle Einflussgrößen wie z.B. atmosphärische Störungen (Wind, Refraktion), Erschütterungen durch Bodenschwingungen usw., sind dann ausgeschlossen.

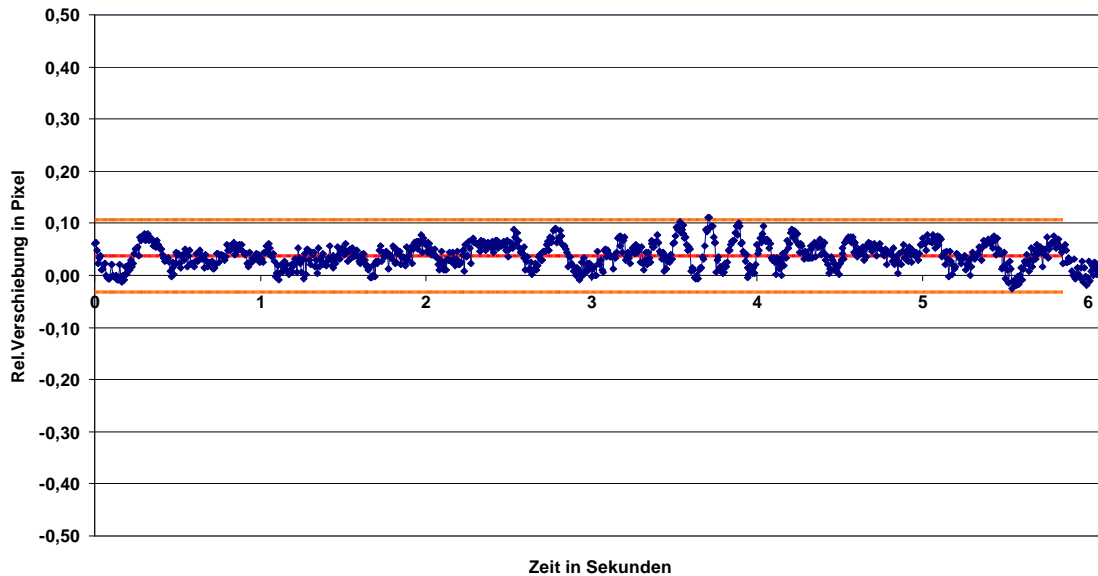


Abb. 4-4: Messrauschen bei „ruhendem“ Kompensator

Für die vorgenannten Untersuchungen eignet sich am Geodätischen Institut eingesetzter Kollimator. Dieser wurde von der Firma ZEISS dahingehend umgebaut, dass einerseits das sonst vorhandene Strichkreuz durch den ZEISS-Nivellierlatten-Code ersetzt und andererseits die Brennweite auf die Zielweite von ungefähr 20,5m angepasst wurde. Die Beleuchtung der Strichplatte befindet sich auf der Brennebenenseite und erfolgt über eine Mattscheibe. Durch den Einsatz des Kollimators entfällt fast der gesamte Weg durch die Atmosphäre, so dass refraktive Einflüsse vollständig entfallen.

Um noch die Störungen aus dem Messaufbau minimieren zu können, hat man das MoDiNi auf einen separat gegründeten Messpfeiler montiert, der nicht mit dem Gebäude gekoppelt ist. Damit wird verhindert, dass eventuell Schwingen aus dem Gebäude oder über den Fußboden auf das Nivellier wirken können. Der gesamte Aufbau ist im „Messlabor I“ im Keller des Geodätischen Instituts installiert worden.

Ausgehend von einem Referenzsignal werden wieder die relativen Verschiebungen zu den folgenden Messsignalen berechnet (WIZESARSKY 2002). Diese Differenzen sind nur noch durch das Messrauschen beeinflusst. Der Mittelwert der relativen Verschiebungen beträgt im vorgestellten Beispiel 0,4 Pixel und die dazugehörige Standardabweichung 0,023 Pixel. Dargestellt sind in Abb. 4-4 die relative Verschiebung der Einzelmessung zur Nullmessung, der Mittelwert und die 3σ -Umgebung zum Mittelwert. Man erkennt, dass die relative Verschiebung der Einzelmessungen bei quasi-ungestörter Atmosphäre in einem Bereich von ca. 0,1 Pixel streut (=Messrauschen).

4.4 Auswirkung von diversen Störeinflüssen auf das Messsignal

Der Nivellierkompensator ist innerhalb seines Wirkungsbereiches für die Feinhorizontierung des Messsystems verantwortlich. Zudem beeinflusst er die Messgeschwindigkeit und steuert maßgeblich die Genauigkeit der Höhenmessung. Wird der Kompensator durch eine Erregung (z.B. vorbeifahrendes Auto) ausgelenkt, sollte er im Rahmen seiner Einspielgenauigkeit wieder in seine alte Ruhelage einschwingen. Ist dieses nicht der Fall, entsteht ein systematischer Zielachsfehler. Aufgrund seines variablen Charakters lässt er selbst sich nicht über die Messanordnung ausschalten. Mit dem in den vorherigen Abschnitten dargestellten Messsystem ist es nun möglich, diese Eigenschaft (Rückkehr des Kompensators in seine Ruhelage) in geeigneter Form zu beschreiben.

Wird ein Impuls auf das Nivellier ausgeübt, wird erwartet, dass der Kompensator sich aus seiner Ruhelage heraus bewegt. Aufgrund der Luftdämpfung sollte seine Bewegung der einer gedämpften Schwingung gleichen. Da auch das Auslösen der Messung einen Impuls auf das Gerät darstellt, ist es für den Verlauf der Messung wichtig, nach welcher Zeit der Kompensator wieder seine Ruhelage einnimmt. Eventuell verbleibende Restabweichungen können hier zu Ungenauigkeiten in der Höhenmessung führen, wenn sie nicht schnell genug durch den Kompensator gedämpft werden. Bei den Labormessungen wird die

Erschütterung durch einen künstlich erzeugten Impuls ausgelöst. Dieser wird in den nachfolgenden Messreihen (WIZESARSKY 2002) durch verschiedene Einflüsse erzeugt:

- Impuls durch Klopfen auf das Gerätegehäuse
- Impuls durch simuliertes Auslösen der Messung an der vorderen und hinteren „Mess“-Taste

Als Signalträger wird ein auf Karton aufgetragener und mittels Laserdrucker erstelltes Code-Signal benutzt, welches den gleichen „Code“ wie in Abb. 4-2 benutzte Lattenabschnitt besitzt. Der Signalträger ist mit Hilfe einer Wasserwaage horizontal ausgerichtet und über alle Seiten auf der Wand festgeklebt worden. Als Zielweite ist für die Messungen ist ein Abstand von 2,6 m gewählt worden. Zum einen bedeckt dabei das aufzunehmende Signal die CCD-Zeile komplett, was sich positiv auf das Auswerteverfahren mittels Kreuzkorrelation auswirkt. Zum anderen werden die atmosphärischen Störungen minimiert, wie sie bei längeren Zielweite verstärkt auftreten können. Ferner können innerhalb des abgeschlossenen Raumes gleichbleibende bzw. sich nur langsam ändernde atmosphärische Bedingung garantiert werden. Durch die kurze Zielweite bedingt, wird außerdem nur wenig Lichtenergie des von der CCD-Zeile aufgenommenen Signals eingebüßt, was bei längeren Zielweiten >10 m schon der Fall ist.

Bei den nächsten Versuchen sollte untersucht werden, welche Auswirkungen die Betätigung der standardmäßigen Messtasten hat. Pro Versuch sind insgesamt mindestens 4 Messungen durchgeführt worden. In diesem Zeitraum erfolgten jeweils 900 CCD-Zeilenmessungen, wobei die Beobachtungszeit zwischen 8,85 und 8,95 Sekunden liegt. Es wird also ein Messtakt von ca. 100 Hz erreicht.

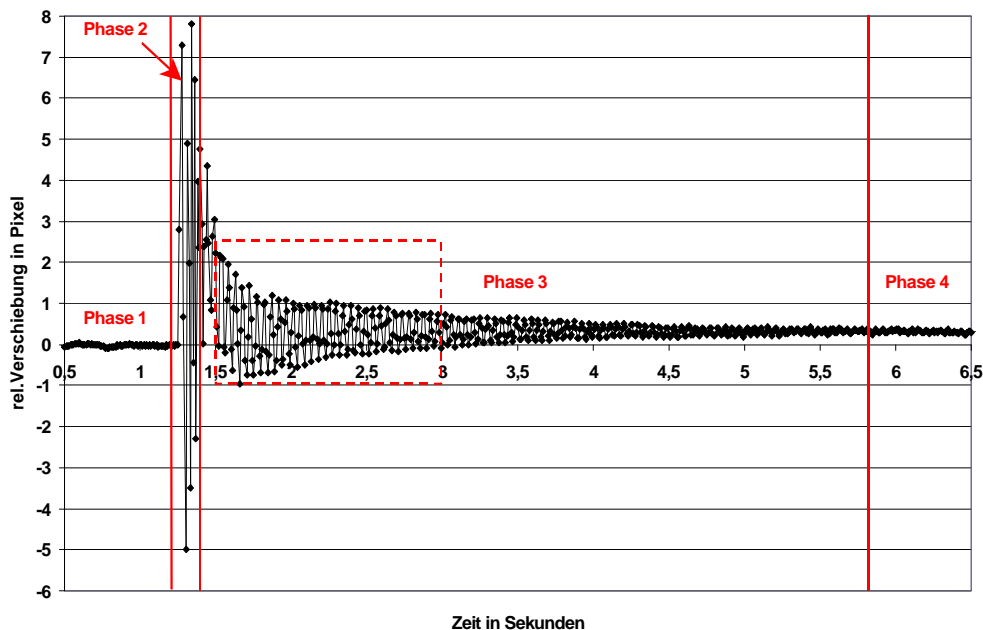


Abb. 4-5: Einschwingverhalten des Kompensators bei Auslenkung durch Klopfen

Die Abb. 4-5 zeigt exemplarisch die relative Verschiebung der aufgenommenen Messung gegenüber der ersten Messung der Messreihe, wenn als Störeinfluss eine Kompensatorauslenkung durch Klopfen auf das Instrumentengehäuse wirksam wurde (WIZESARSKY 2002). Die Messreihe lässt sich in vier Phasen aufteilen:

1. Phase (bis ca. 1,25 Sekunden) keine bis geringe relative Verschiebung zwischen den Bildern (nur Messrauschen, Größenordnung $\pm 0,1$ Pixel (3s)), da keine zusätzlich Kraft auf den Kompensator wirkt; das Rauschen liegt bei dieser Zielweite aufgrund der Kompensatorgenauigkeit von $0,2''$ bei 0,23 Pixel
2. Phase (bis ca. 1,50 Sekunden) Sprungantwort auf die Anregung messbar; 2 Peaks erkennbar; Auslenkung durch Klopfen findet statt
3. Phase (bis ca. 5,80 Sekunden) schrittweise Abnahme der Amplitude, aperiodisches Einschwingen des Kompensator
4. Phase (ab ca. 5,80 Sekunden) periodische Anteile noch sichtbar; die Größenordnung liegt aber mit $\pm 0,1$ Pixel innerhalb der Kompensatorgenauigkeit

Im Gegensatz zu den Erwartungen tritt keine reine gedämpfte Schwingung auf, sondern in der zweiten Phase (Auslenkung) schwingt der Kompensator mehrmals mit gleicher Amplitude. Dieser Effekt lässt sich über die Impulsabgabe durch den Schlag mit der Holzkugel erklären. Wenn nämlich die Kugel auf die

Oberfläche trifft, kommt es zu einer Gehäuseverkipfung bzw. -verformung, die sich wieder zurückbildet. Auf den Kompensator wirkt das wie eine aus unterschiedlichen Richtungen einwirkende Beschleunigungsanregung. Folglich entstehen zwei Peaks mit ungefähr gleicher Amplitude. Kurz nach dem Ende der Deformation setzt die dritte Phase ein, in der die Dämpfung des Kompensators greift und die Auslenkung aperiodisch reduziert wird. Interessant ist, dass die Kompensatoranregung durch eine neue Schwingung überlagert wird, was Abbildung 4-5 verdeutlicht.

Die Amplitude dieser angeregten Schwingung nimmt im zeitlichen Verlauf aber nur langsam ab. In einem Ausgleichsprozess mittels Gauß-Markoff-Modell ist für drei Bereiche innerhalb der 3. Phase, in der die Amplitude möglichst gleich bleibt, die Frequenz dieser Schwingung bestimmt worden. Die Beobachtungsgleichung, die in das GMM eingeht, liefert im Mittel eine Frequenz von 20,5 Hz (WIZESARSKY 2002).

Die Ergebnisse der Testmessungen gibt Abb. 4-6 wieder. Sie zeigt exemplarisch den Einfluss auf, den die Betätigung des „hinteren“ Auslöseknopfes verursacht. Man erkennt, dass nach Auslenkung des Kompensators eine signifikante periodische Anregung verbleibt. Dieses lässt sich über die Anordnung der Tasten erklären. Während bei dem Drücken der seitlichen „Mess“-Taste die Anregung senkrecht zur Pendelrichtung des Kompensators wirkt, wird beim Betätigen der hinteren Taste die Anregung genau in Schwingrichtung des Pendels gegeben. Die „Erschütterungen“ vor der eigentlichen „Betätigung“ sind durch das Suchen des seitlichen Startknopfes und zusätzlich durch die Kontrolle der Zielausrichtung zu erklären. Interessanter ist jedoch die Tatsache, dass in beiden Messreihen wieder eine Schwingung mit ca. 20 Hz verbleibt, selbst wenn der größte Teil der Auslenkung „weggedämpft“ wurde. Diese Schwingung besitzt bei beiden Messreihen eine Amplitude von ungefähr 0,3 Pixel und endet ca. 3 Sekunden nach der Anregung.

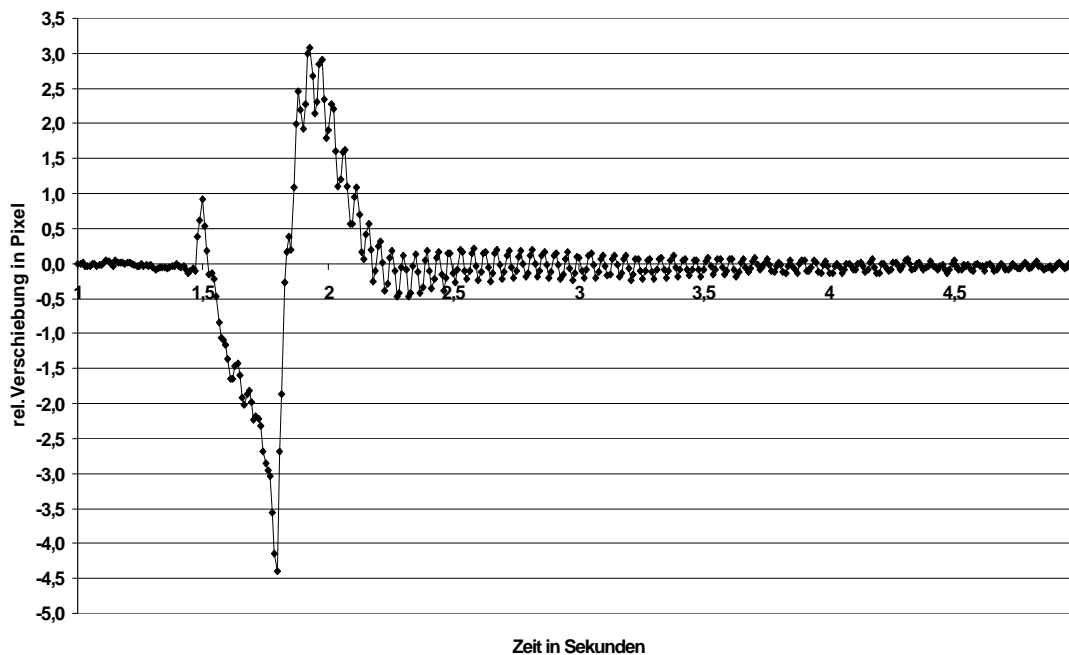


Abb. 4-7: Teil des Auslenkungsbild bei Anregung des Kompensators durch Drücken der hinteren „Mess“-Taste

5. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend können aus diesen im Labor durchgeführten Versuchsmessungen folgende Schlüsse gezogen werden:

- Das Dämpfungssystem des DiNi10 dämpft den Kompensator nach einer Auslenkung aufgrund eines Störeinflusses in einer aperiodisch gedämpften Schwingung mit der Dämpfungszahl von ca. $D = \sqrt{2} / 2$ ab, d.h. der Kompensator schwingt höchstens einmal über die Ziellinie hinaus, bevor er sich ihr asymptotisch nähert. Diese Schwingungsdauer beträgt ca. 0,5 Sekunden.
- Die zuvor gemachte Aussage bezieht sich nur auf eine ausgleichende bzw. einhüllende Funktion. Überlagert wird diese Funktion durch eine weitere Schwingung von ungefähr 20 Hz, deren Amplitude mindestens noch drei Sekunden nach Auslenkung größer ist als die vom Hersteller angegebene

Kompensatorgenauigkeit bezogen auf die hier verwendete Zielweite. Diese Schwingung in der Größenordnung von 20 Hz besitzt in den ersten 1,5 Sekunden nach Auslenkung eine durchschnittliche Amplitude von 0,3 Pixel. Dieser Effekt scheint erstmals durch die hohe Abtastrate aufgedeckt zu sein.

- Als Gründe können zunächst mehrere Komponenten in Betracht kommen. Als naheliegende Ursachen sollen zunächst das Stativ, die Dreifußkonstruktion und der Kompensator in Betracht gezogen werden. Auch die Beleuchtungseinrichtung, welche mit 50 Hz Wechselspannung betrieben worden ist, und refraktive Einflüsse sollte man als Ursache vorerst noch nicht ausschließen.
- Um ausschließen zu können, dass nicht die Auswertemethode zu diesen Effekten geführt hat, wurden die Berechnungen durch eine zweite, unabhängige Methode verifiziert.

Nachdem die 20Hz-Schwingung nachgewiesen worden war, wurde im Rahmen der Ursachenforschung unterschiedliche Testmessungen sowohl auf Stativen anderer Bauweise (z.B. schweres Aluminium-Stativ SM11 der Firma ZEISS/Oberkochen, Kurbelstativ usw.) als auch auf einem Messpfeiler im Turm des Geodätischen Instituts durchgeführt. In allen Fällen erzielte man dieselbe Aussage, dass immer die 20Hz-Schwingung auftrat und Änderungen lediglich bei den Amplituden zu verzeichnen waren (WIZESARSKY 2002). Folglich konnte man die Fehlerquelle „Stativ“ als Ursache ausschließen. Die Dreifußkonstruktion des MoDiNi scheidet ebenfalls als Verursacher aus, da eine sehr große Energie nötig wäre, um das gesamte Instrument mit einer Frequenz von 20Hz über einen längeren Zeitraum (ca. 3 Sekunden) in Schwingung zu halten .

Atmosphärische Störungen und Refraktionseinflüssen können auch als Ursache ebenfalls unberücksichtigt bleiben, da die 20Hz-Schwingungen erst nach einer größeren Auslenkung des Kompensators auftreten. Wären Luftturbulenzen für die Schwingung verantwortlich, so sollten diese auch vor einer Auslenkung sichtbar sein und sich nicht mit fortschreitender Zeit in der Amplitude reduzieren.

Die vorgestellten Untersuchungen machen deutlich, dass diverse Effekte (Kompensatoranregung, kurzperiodische refraktive Einflüsse usw.) infolge der extrem kurzen Belichtungszeiten eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen können und damit nachhaltig den angezeigten Messwert beeinflussen.

Literatur:

CASOTT, N. UND PRENTING, J. (1998):

Genauigkeitssteigerung beim Korrelationsverfahren in der digitalen Bildverarbeitung. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 2/1999, S.101 – 112, DGPF Stuttgart

EURECA MESSTECHNIK GMBH (1999A):

CCDL-25M1-8 – 2592-Pixel-s/w-CCD-Zeilenkamera für EPP-Port. Internet-Download: www.eureca.de , Köln

EURECA MESSTECHNIK GMBH (1999B):

Technische Daten zum CCD-Zeilensensor TCD132D (ähnlich dem TCD133D). Internet-Download: www.eureca.de, Köln

LANG, F. UND FÖRSTNER, W. (1995):

Matching Techniques. In: Second Course in Digital Photogrammetrie, Bonn

SCHAUERTE, W. (1995):

Erfordert der Einsatz moderner Präzisionsdigitalnivelliere neue Beobachtungstechniken? Der Vermessungsingenieur Heft 5, S. 223-231

WIZESARSKY, A. (2002):

Messtechnische Erfassung von Störeinflüssen mit einem modifizierten DiNi 10 durch hohe Abtastraten und Entwicklung der dafür notwendigen Steuer- und Analysesoftware. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geodätisches Institut der Universität Bonn, 2002

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Wolfgang Schauerte
Geodätisches Institut der Universität Bonn
Nußallee 17, 53115 Bonn
e-Mail: schauerte@uni-bonn.de