



Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten

H. Ingensand

Der Beitrag gibt einen kurzen Abriss zur Entwicklung von Digitalnivellieren verschiedener Hersteller sowie der zugehörigen Lattencodes.

1 Einleitung

Das geometrische Nivellement ist eines der letzten geodätischen Messverfahren, welches sich bis vor wenigen Jahren einer Automatisierung weitgehend entzogen hat. Obwohl es immer wieder Entwicklungen gab, die Ablesung durch vertikales Verschieben von positionsempfindlichen Detektoren auf einer Nivellierlatte zu automatisieren, haben sich derartige Konstruktionen nicht durchsetzen können, da der Einstellvorgang länger dauerte als die Messung durch einen erfahrenen Operateur.

Als legitimer Vorläufer der heutigen Digitalnivelliere ist die Bonner Entwicklung von Prof. ZETSCHKE (1966) zu nennen, die bereits alle grundlegenden Merkmale des heutigen elektronischen Nivellierverfahrens beschreibt. Die Abbildung eines speziellen Lattenmusters in der Bildebene, die Erfassung, Verschiebung und Anpassung des Maßstabes als Funktion der Entfernung sowie der optischen Übertragungsfunktion werden erstmals in einem Laborinstrument realisiert. Da es damals noch keine geeigneten optischen Sensoren oder Sensorzeilen gab, musste die Einstellung spezieller Marken auf der Nivellierlatte (Abb. 1) noch von dem Beobachter durchgeführt werden. Ebenso wurde die Maßstabsänderung als Funktion der Distanz mittels einer Zoomoptik kompensiert. Die Auswertung und Anzeige waren aber bereits digital, indem die vertikale Verschiebung des Lattenbildes im Instrument mit einem inkrementalen Weggeber erfasst wurde.

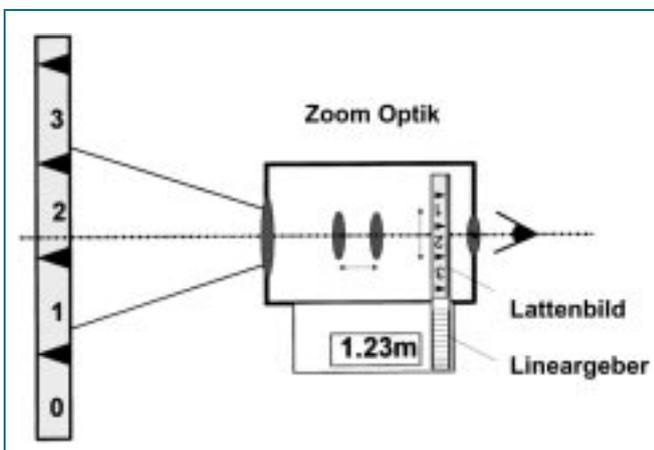


Abb. 1: Grundprinzip der Bonner Entwicklung

In den nächsten 15 Jahren sind keine weiteren Entwicklungen in dieser Richtung bekannt geworden. Erst mit der Erfindung der sogenannten CCD-Technologie (Charge Coupled Device) sah man erstmals eine Chance, ein Lattenbild in der Bildebene eines Messfernrohrs in digitale Informationen umzuformen. Die Dissertation von SCHLOSSER (1984) an der TU Dresden, die zusammen mit der Firma Carl Zeiss, Jena, durchgeführt wurde, nahm die Idee eines vollautomatisierten Ablesungsvorgangs mit Hilfe der Bildverarbeitung wieder auf (Abb. 2).

Diese Entwicklung basierte instrumentell auf dem Zeiss Ni002 und arbeitete mit einem CCD-Zeilensensor mit 1024 lichtempfindlichen Elementen (Pixeln). Diese Erfahrungen sind sicherlich in die spätere Digitalnivellierentwicklung der Firma Zeiss eingeflossen. Im Jahr 1990 wurde dann das erste serienmäßig hergestellte Digitalnivellier Wild NA2000 von der Firma Leica vorgestellt (INGENSAND 1990).

2 Der optische Aufbau von Digitalnivellieren

Gemeinsames Merkmal aller heutigen Digitalnivelliere ist es, dass sie optisch auf den Kompensatornivellieren aufbauen und zusätzlich über einen Zeilensensor verfügen, auf den das Lattenbild mit einem Teilerwürfel abgelenkt werden (Abb. 3). Daher sind digitale Nivelliere auch als eine Kombination von digitaler Kamera und Kompensatornivellier anzusehen. Mit diesem optischen Schema ist bei allen heutigen Digitalnivellieren weiterhin eine optische Ablesung möglich.

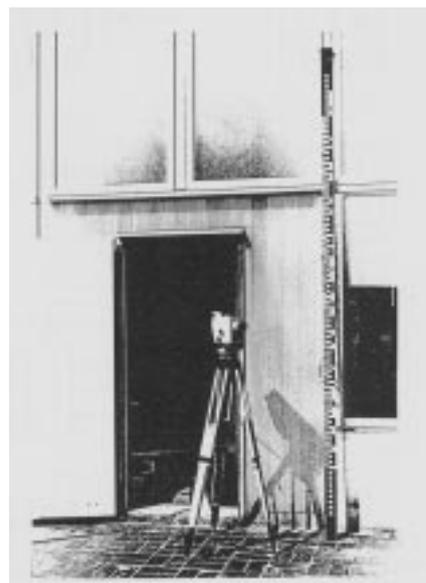


Abb. 2: Das Dresdener Digitalnivellier (SCHLOSSER 1984)

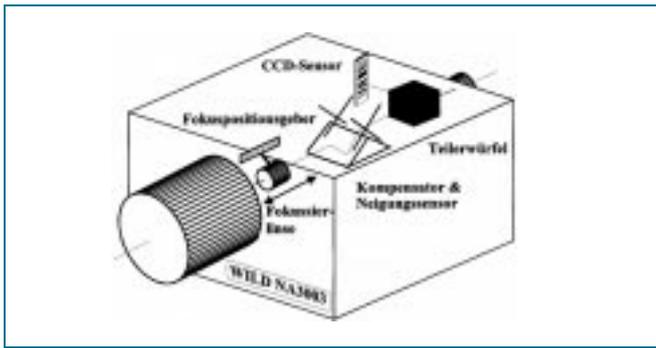


Abb. 3: Optischer Aufbau von heutigen Digitalnivellieren am Beispiel der Leica NA2002/3003-Baureihe

3 Die grundlegenden Informations- und Bildverarbeitungstechnologien bei digitalen Nivellieren

Wie bei vielen anderen geodätischen Messverfahren kann auch das Digitalnivellierverfahren als ein optischer Informationstransfer zwischen der Nivellierlatte (Quelle) und dem Digitalnivellier als Empfänger (Senke) beschrieben werden (Abb. 4). Interessanterweise werden dabei die auch aus anderen Messtechnologien bekannten Modulationsverfahren, wie Biphasenmodulation, analoge und digitale Amplitudenmodulationen verwendet.

4 Die verschiedenen Lattencodes

Die Codierung der Nivellierlatte und der Auswerteprozess sind bei den einzelnen Firmen schon allein aus patentrechtlichen Gründen völlig unterschiedlich. Die Problematik eines für das Nivellement geeigneten Codes kann am Beispiel einer Entwicklung am Neuen Technikum Buchs (NTB) gezeigt werden. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde dort ein digitales Nivellier gebaut [SCHMID und FÜRER 1987]. Bei diesem Instrument wird ein Lattenbild mit einem flächenhaften Code auf ein CCD-Array abgebildet. Wie auch bei der „Bonner Konstruktion“ muss bei dieser Entwicklung der Maßstab mittels einer Zoomoptik angepasst werden. Trotz dieser Zoomoptik konnte nur in einem Entfernungsbereich zwischen 20 m und 30 m gemessen werden. Diese Arbeit zeigt, dass die jeweiligen Herstellerfir-

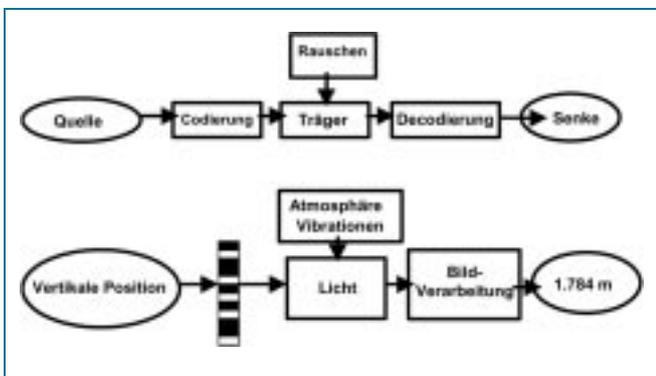


Abb. 4: Informationsübertragung beim digitalen Nivellierverfahren

men für das digitale Nivellierverfahren einen speziellen Code entwickeln mussten, der neben pseudostochastischen Eigenschaften im gesamten Distanzbereich von 1,5 m–100 m eine eindeutige Abbildung ohne aufwendige Zoomoptik ergibt. Ebenso ist bei allen Herstellern der Code so aufgebaut, dass er mit einem CCD-Zeilensensor in digitale Informationen umgeformt werden kann. Gleichermäßen sollten die Codes durch redundante Informationen gegenüber kleineren Störungen unempfindlich sein.

Der Leica Lattencode ist als Binärcode zu bezeichnen, da er nur aus schwarz-weiß Elementen aufgebaut ist (Abb. 5). Der vollständige Code umfasst 2000 Elemente auf einer Lattenlänge von 4050 mm. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Grundelement $4050/2000 = 2025$ mm breit ist. Da die Auswertung des Lattencodes mittels Korrelationsmethode erfolgt, wurde als Codemuster ein nicht-periodischer pseudostochastischer Code gewählt. Dieser Code besitzt zudem spezielle Eigenschaften, die es erlauben, das Leica Korrelationsverfahren in einem Distanzbereich von 1,8 m–100 m einzusetzen.

Der so genannte Biphasencode der Firma Zeiss beruht darauf, dass nach jedem Bit ein Helligkeitswechsel stattfindet und somit jedes Bit des Codes als Messintervall genutzt werden kann (Abb. 5). Eins- und Nullbits werden dadurch unterschieden, dass die Nullbits in der Intervallmitte einen zusätzlichen Helligkeitswechsel haben, der natürlich auch noch bei der grössten Messentfernung erkannt werden muss. Der Zeiss-Code beruht auf einem Grundraster von 2 cm (= 1 Bit) und ist so aufgebaut, dass bereits aus einem minimalen Lattenabschnitt von 30 cm die eindeutige Lage des Messbildes bestimmt werden kann. Da der Code und damit auch die Geometrie der einzelnen Striche zueinander bekannt sind, kann mit der nachfolgenden Feinmessung die Lage einzelner Kanten des vorgenannten Codes ausgewertet werden. Dieser im Grundcode ebenfalls enthaltene Bi-Phasen-Code hat eine optimale Verteilung über das gesamte Gesichtsfeld, so dass bei einem minimalen Gesichtsfeld mindestens 15 Übergänge (Kanten) geometrisch erfasst werden können, aus deren Mittelung (Oversampling) sich die hohe Genauigkeit ergibt. Die ebenfalls im Lattenbild erkennbaren 1–2 mm breiten schwarzen oder weißen Striche werden nur im Nahbereich bis ca. 5 m benötigt.

Topcon verwendet einen Code mit drei ineinandergeschichteten Einzelinformationen. Auf der Nivellierlatte ist ein Referenzmuster R als ein Balkentriple im konstanten Abstand von 3 cm erkennbar (Abb. 5). Zwei weitere Informationen, A und B, sind in den benachbarten Strichen codiert. Hinter dem A- und B-Code verbirgt sich ein Sinussignal mit einer Wellenlänge von $A = \text{ca. } 66$ cm und $B = \text{ca. } 60$ cm, welches als eine sinusförmige Breitenänderung der jeweiligen Striche erkennbar ist. Dabei wird eine minimale Breite von 1 mm nicht unterschritten. Die beiden Sinussignale sind am Lattenanfang um jeweils $\pm \pi$ verschoben, so dass innerhalb des Messbereiches von 4 m immer eine eindeutige Phasendifferenz der beiden Signale A und B vorhanden ist.

Der Sokkia Random Bidirectional Code (RAB) folgt dem Prinzip einer digitalen Strichbreitencodierung mit insgesamt 6 Codes (Abb. 5). Jeder Code ist als Teilungsverhältnis zur grundlegenden Dimension eines Codeelementes

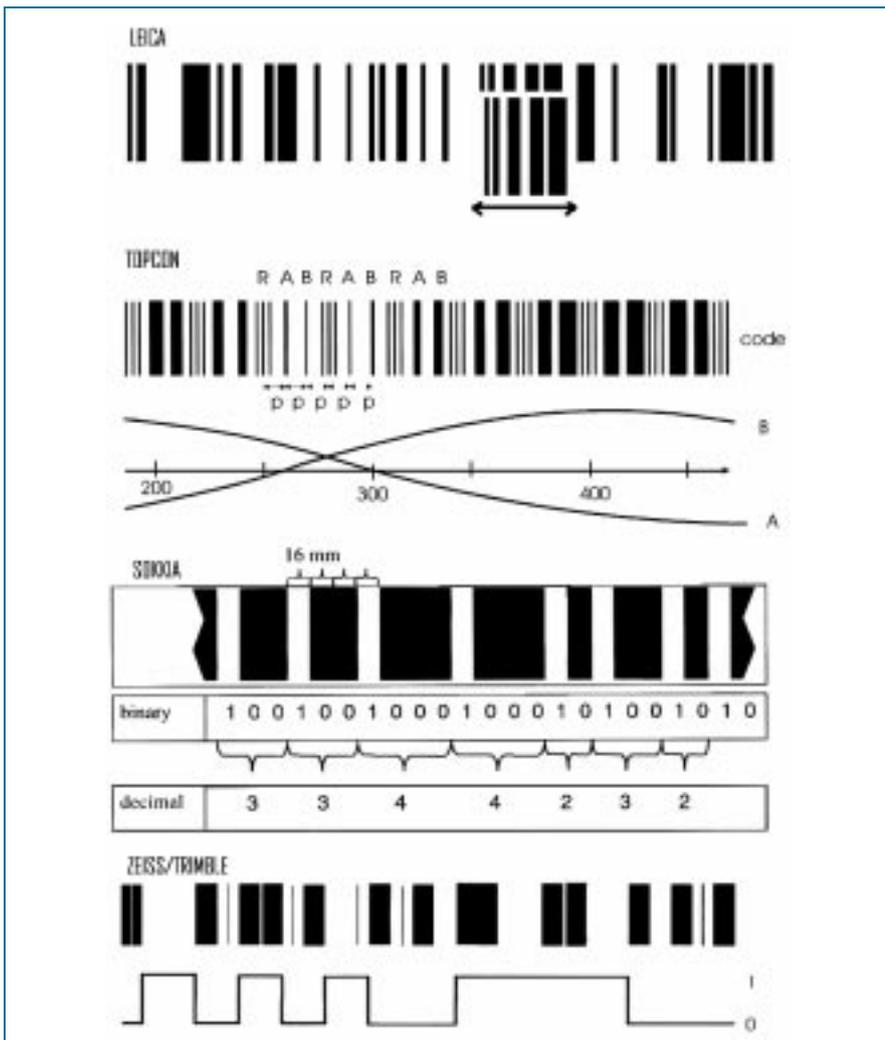


Abb. 5: Die verschiedenen Codes

von 16 mm definiert. Die Balkenbreiten variieren in Sprüngen von 4, 6, 10, 8, 9, 12, 13 mm, so dass insgesamt 7 unterschiedliche Balkenbreiten vorhanden sind. Diese Balkenbreiten stehen in einem definierten Teilungsverhältnis zum Grundraster. Als Funktion des Abstandes Nivellier – Latte wird nur eine bestimmte Anzahl von Pixeln beleuchtet bzw. nicht mehr aufgelöst. Bei einer Brennweite von 250 mm und einer Pixelgröße von 0,01 mm fällt bei 100 m ein 16 mm breiter Balken gerade auf 4 Pixel. Daraus folgt, dass schmalere Balken dann nicht mehr erkannt werden. Auf der anderen Seite nimmt bei größeren Distanzen ein ebenso größerer Lattenabschnitt und damit wiederum mehr Codeinformation an der Auswertung teil, so dass dieser Effekt kompensiert wird (NAGAO und KANAGAWA 1998).

5 Die verschiedenen Auswerteverfahren bei Digitalnivellieren

Bei den derzeitigen Digitalnivellieren lassen sich drei verschiedene Verfahren der digitalen Bildauswertung feststellen:

- Korrelationsverfahren (Wild NA 2002/3003/DN03),
- Positionsmessverfahren (Trimble Zeiss DiNi 10/20),
- Positionsmessverfahren von Sokkia,
- Phasenmessverfahren Topcon DL 101/102).

Die Funktion des Leica Digitalnivelliers basiert auf dem Prinzip der Korrelation. Dabei wird der Code, der dem Instrument „bekannt“ ist, mit dem auf dem Zeilensensor abgebildeten Signal verglichen. Bei der Anwendung des Korrelationsverfahrens im Digitalnivellier ist es notwendig, dass zwei Parameter, nämlich „Höhe“ und „Maßstab“ optimiert werden müssen. Einerseits stellt sich der Höhenunterschied „Instrument – Latte“ als eine Verschiebung des codierten Lattenbildes dar, andererseits ändert sich der Abbildungsmaßstab des Codes als Funktion der Entfernung „Instrument – Nivellierlatte“. Aus diesem Grund ist eine zweidimensionale Korrelationsberechnung notwendig.

Das Zeiss-Digitalnivellierverfahren im DiNi 10/20 arbeitet nach dem Prinzip der Einzelintervallmessung und zeichnet sich vor allem durch die Eigenschaft aus, dass über den gesamten Distanzbereich von 1,5 m – 100 m mit einem minimalen und konstanten Bildfeld von 30 cm gemessen werden kann HUEP (1994), FEIST u.a. (1996). In diesem Bereich dürfen jedoch keine Informationen abgedeckt sein (WOSCHITZ 2003). Das DiNi bestimmt alle Einzelmesswerte aus einem 30 cm langen Lattenabschnitt, der symmetrisch zur Ziellinie liegt, da auf diese Weise die genauesten Messwerte möglich sind. Ein größerer Lattenabschnitt als 30 cm wird zwar zur Kenntnis genommen, aber vermutlich nicht zur Messwertgewinnung herangezogen. Im Lattenendbereich ist es je-

doch denkbar, dass auch hier die gesamte sichtbare Information zur Messung herangezogen wird. Durch die vorgenannte Einschränkung wird sichergestellt, dass bei normaler Aufstellung und ebenem Gelände bodennahe und damit stärker refraktionsbehaftete Lattenteile nicht zur Auswertung gelangen.

Bei Digitalnivellieren von Topcon werden aus Frequenz und Phasenlage der 3 Codemuster zueinander die Distanz und die Höhe ermittelt. Die Distanz wird aus der Frequenz des Referenzcodes R bestimmt, die sich mit wachsender Distanz in der Bildebene erhöht. Die Frequenz und die Phasenlage der drei Signale können dabei über eine Fast Fourier Transformation (FFT) gewonnen werden. Ebenso sind Linearkombinationen der drei Informationen A, B und R zur Genauigkeitssteigerung denkbar. Das Sokkia SDL30 gehört zwar nicht zu den Präzisionsnivellieren, soll jedoch an dieser Stelle als Vertreter der neuesten Digitalnivellierertechnologie aufgenommen werden. Beim Sokkia-Verfahren gibt es, wie auch beim Zeiss-Verfahren, einen Code für die üblichen Distanzen von 3 m–100 m und einen Nahbereichscode ab 1,6 m. Wie auch beim Zeiss-Verfahren spielt die Distanz für die Ermittlung der Ableseung keine Rolle, denn es wird die Position einzelner weißer Balkenmitten in Relation zur Zielachse bestimmt (NAGAO und KANAGAWA 1998). Ausführliche Untersuchungen am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich haben gezeigt, dass diese Methode selbst bei einem minimalen Lattenabschnitt von nur 8 cm auf einer Distanz von 50 m noch einwandfrei eine Ablesung durchführt oder eine entsprechende Fehlermeldung anzeigt. Auch die Untersuchungen von STAIGER (2002) weisen auf die hohe Genauigkeit dieses Instrumentes hin.

6 Die Bedeutung von Tests und Systemkalibrierungen

Hinsichtlich der Leistung von Digitalnivellieren hat Leica als erster Hersteller einen hohen Standard gesetzt. Jedoch haben intensive Untersuchungen an verschiedenen Hochschulen gezeigt, dass – wie auch bei anderen in der Geodäsie neu eingeführten Technologien – spezifische Systematiken auftreten können. So wurde bei der ersten Generation der Leica Nivelliere bei bestimmten Abbildungsverhältnissen bzw. Distanzen festgestellt, dass eine Interferenz zwischen Pixelfrequenz und Codeelementfrequenz auftreten kann (SCHAUERTE 1991), (WOSCHITZ 2003). Bei Topcon-Instrumenten ist der Übergangsbereich zwischen Nah- und Fernbereich bei 8 m und 10 m zu meiden (STAIGER und WITTE 2004). Beim Digitalnivellier von Zeiss ergaben sich systematische Abweichungen als Folge von inhomogenen Beleuchtungsverhältnissen (INGENSAND 2002). Die ausführlichen Untersuchungen von WOSCHITZ (2003) und HEISTER u.a. (2004) zeigen die Bedeutung von Systemkalibrierungen bei Digitalnivellieren.

7 Ausblick

Mit dem Erscheinen von digitalen Nivellierinstrumenten kann man neben der Revolution durch GPS auch in der terrestrischen Messtechnik von einem Technologiesprung

sprechen. Die neuen Digitalnivelliere Leica DNA03/ DNA10, Zeiss Trimble DiNi 12 und Sokkia SDL 30 sind bereits als Instrumente der zweiten Generation anzusehen und viele der in den Kalibrierlabors festgestellten Effekte sind durch Verbesserung der Software und der Hardware eliminiert worden.

8 Literatur

- [1] FEIST, W. u.a. (1996): Die Total Level Station DiNi 10 T – Das erste digitale Nivelliertachymeter. VR 58/1 (Februar 1996), S. 1–7
- [2] HEISTER, H. u.a. (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponenten oder Systemkalibrierung. (2004). In: Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 2005, Heft 6
- [3] HUEP, W.(1994): Neue Entwicklungen im geodätischen Instrumentenbau. Vortrag am IGP der ETHZ im Rahmen des geodätischen Kolloquiums, 10. November 1994
- [4] INGENSAND, H. (1990): Das erste digitale Nivellier der Welt. AVN, Heft 9, 1990, S. 201 ff
- [5] INGENSAND, H. u.a. (1992): Die Digitalnivellierfamilie WILD NA 2002/NA 3000 und ihre Anwendung in der Ingenieurvermessung, Beiträge zum XI. Intern. Kurs für Ingenieurvermessung (September 1992) Zürich, II 14/1–14
- [6] NAGAO, T.; KANAGAWA, J. P.: Elektronisches Nivelliergerät und Nivellierlatte zur (1998) Verwendung bei dem Nivelliergerät. Offenlegungsschrift DE 19723654 A1 29.1.1998
- [7] STAIGER, R. (2002): Instrumentenuntersuchung des Digitalnivelliers SDL 30 von Sokkia, AVN 11/12 (2002) S. 387 ff
- [8] SCHAUERTE, W. (1991): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Digitalnivelliers WILD NA 2000, VR 53/1, S. 45–55
- [9] SCHAUERTE, W. (1995): Auswirkungen spezieller Fehlerinflüsse auf NA-3000-Messungen, BDVI-FORUM 1/1995, S. 17–28
- [10] SCHLOSSER, G. (1984): Automatische Meßwerterfassung beim Nivellement mittels optoelektronischer CCD-Sensoren. Dissertation. Technische Universität Dresden
- [11] SCHMID, R.; FÜRER, T. (1987): Automatisierung bei Nivellierinstrumenten. Diplomarbeit am Neuen Technikum Buchs, Diplomarbeit Oktober 1987
- [12] STAIGER, R. (1998): Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente, AVN 11–12/1998, S. 365–372
- [13] STAIGER, R.; WITTE, B. (2005): Zur Bedeutung der Prüfung von Präzisionsnivellierlatten für die Praxis. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 2005, Heft 6
- [14] WOSCHITZ, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facilities Procedures and Results, TU Graz, Shaker-Verlag, Aachen
- [15] WOSCHITZ, H. (2005): Systemkalibrierung: Effekte von Digitalen Nivelliersystemen. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 2005, Heft 6
- [16] ZETSCHKE, H. (1966): Beiträge zur Konstruktion von Geodätischen Feldinstrumenten mit digitaler Datenausgabe. DGK Reihe C. Nr.88, München 1966

Anschrift des Verfassers
 Prof. Dr. H. INGENSAND,
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,
 ETH Höggerberg HIL D 43.2,
 CH-8093 Zürich,
 ingensand@geod.baug.ethz.ch,
 www.geometh.ethz.ch