

Neue digitale Nivelliertechniken und ihre Anwendungen

Autor(en): **Ingensand, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **93 (1995)**

Heft 4: **ETHZ : Departement Geodätische Wissenschaften = EPFZ :
Département des sciences géodésiques**

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-235150>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Neue digitale Nivellierverfahren und ihre Anwendungen

H. Ingensand

Im vorliegenden Bericht sollen die verschiedenen digitalen Nivellierverfahren, soweit sie in ihren technischen Einzelheiten bisher bekannt sind, vorgestellt werden. Als 1990 mit dem Wild NA2000 das erste Serieninstrument vorgestellt wurde, war dies ein erster Schritt in die Richtung automatisierter Höhenmessverfahren. Dieser Entwicklungsfortschritt ist mit der messtechnischen Revolution im Bereich der Lagemessung durch das Global Positioning System (GPS) gleichzusetzen. Erst vier Jahre später, zum XX. FIG-Kongress in Australien, wurden dann von Zeiss und Topcon weitere Digitalnivelliere vorgeführt, die in dieser Veröffentlichung beschrieben werden sollen.

L'article suivant traite des divers procédés de nivellement numériques dans la mesure où leurs détails techniques sont connus aujourd'hui. La fabrication en série du premier instrument Wild NA2000 en 1990 était un premier pas dans la direction du procédé du nivellement automatisé. Ce progrès dans le développement se situe au même niveau que la révolution dans le domaine de la mesure de la situation par la méthode du GPS. C'était seulement 4 ans plus tard, lors du XX. Congrès de la FIG en Australie, que Zeiss et Topcon ont présenté d'autres niveaux numériques décrits dans la présente publication.

In questo esposto vengono illustrati vari processi digitali di livellazione, nel dettaglio tecnico attualmente conosciuto. Il primo passo verso l'altimetria automatizzata è stato effettuato nel 1990 quando è stato realizzato il primo strumento di serie, il Wild NA2000. Questo progresso nello sviluppo è paragonabile alla rivoluzione apportata nella tecnica di misurazione dal «global positioning system» (GPS). Sono dovuti passare quattro anni prima che la Zeiss e la Topcon, in occasione del XX Congresso FIG in Australia, presentassero gli altri livelli numerici, illustrati in questa pubblicazione.

1. Automatisierte Höhenmessung

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 als die Messung durch einen erfahrenen Operateur dauerte. Bei Präzisionsnivellieren war jedoch der elektronischen Erfassung der Planplattenposition ein gewisser Erfolg beschieden (Zeiss RENI 002). Allerdings musste bei dieser Konstruktion weiterhin die Grobposition an der Latte abgelesen und eingetippt werden. Andere Impulse in Richtung einer automatisierten Höhenbestimmung kamen vor allem durch die Weiterentwicklungen in der Elektronik in den 70er Jahren. Die Erfindung des Lasers führte zur Entwicklung von Rotationslasernivellieren mit entsprechenden Positionssensoren. Der folgende «Stammbaum» der Entwick-

lungen soll eine Übersicht über die verschiedenen prinzipiellen Entwicklungen geben, wobei eine deutliche Y-Struktur zu erkennen ist. Der eine Ast deutet in Richtung der Rotationslaserverfahren, der andere in Richtung der hier angesprochenen digitalen Nivelliere.

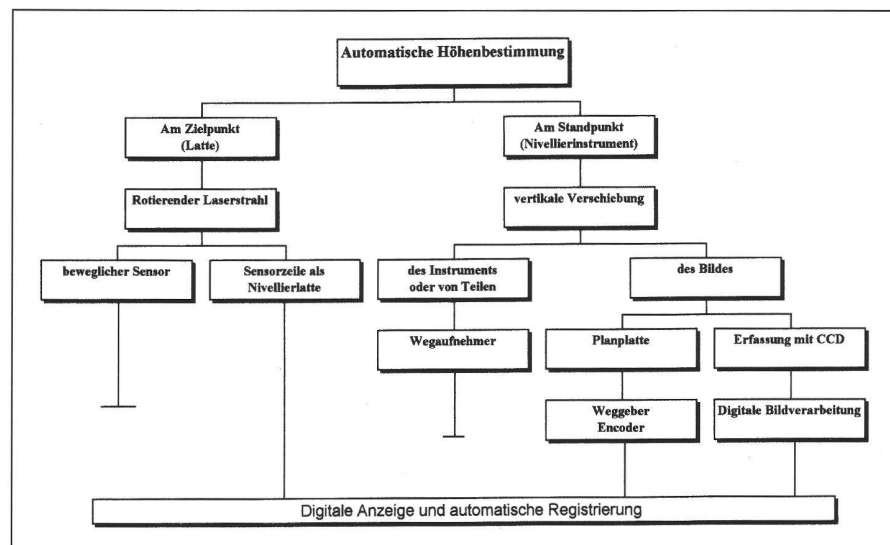


Abb.1: Übersicht automatisierte Höhenmesssysteme.

2. Technologien

Es lassen sich heute zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren beschreiben:

- Aktive Verfahren, bei denen mit einem Laser – heutzutage eine Laserdiode – als Lichtquelle ein positionsempfindlicher Detektor am Zielpunkt eine Höheninformation gibt.
- Passive Verfahren, bei denen im Regelfall ein vom Tageslicht beleuchtetes Muster (Code) auf einer Nivellierlatte in der Bildebene des Nivelierinstrumentes mit lichtempfindlichen elektronischen Sensoren empfangen wird.

Aktive Verfahren findet man heute meist in Kombination mit Rotationslasernivellieren. Bei diesen, hauptsächlich im Baubereich eingesetzten Technologien, wird ein rotierender Laserstrahl von einem Sensor oder von einer Nivellierlatte, die eine lichtempfindliche Diodenzelle trägt (NEDO), erfasst. Die Stabilisierung des Laserhorizontes wird dabei von Zweiachskompensatoren gewährleistet. Digitale Nivellierverfahren sind als passive Verfahren anzusprechen, da sie mit dem sichtbaren oder infraroten Anteil des Tageslichtes arbeiten und, abgesehen von Messungen in der Dunkelheit, keine zusätzlichen Beleuchtungen benötigen.

3. Entwicklungen bis zu den heutigen Digitalnivellieren

Als legitimer Vorläufer der heutigen Digitalnivelliere ist die Bonner Entwicklung von Prof. Zetsche zu nennen, die bereits 1966 [1] alle grundlegenden Merkmale des elektronischen Nivellierverfahrens beschreibt. Die Abbildung eines speziellen Lattemusters in der Bildebene, die Erfassung, Verschiebung und Anpassung des Massstabes als Funktion der Entfernung sowie der optischen Übertragungsfunktion werden erstmals in einem Laborinstrument reali-

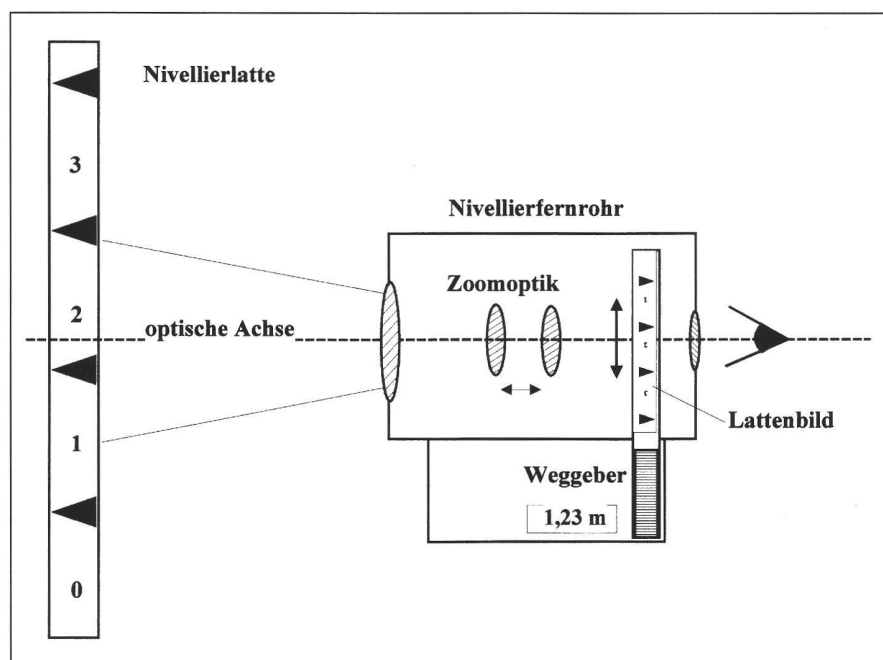


Abb. 2: Grundprinzip des Bonner «Digitalnivelliers».

sirt. 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 mit 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.

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), die sich heute in jeder Videokamera befindet, sah man erstmals eine Chance, ein Lattenbild in der Bildebene eines Messfernrohres in digitale Informationen umzuformen. Die CCD-Technologie wurde unter anderem ab Mitte der 80er Jahre in Winkelabgriffen für elektronische Theodolite (z.B. Wild TC 1600) und als Positionssensoren für Neigungsgeber in elektronischen Theodoliten (Topcon) eingesetzt.

Neben der eingangs erwähnten Entwicklung der Fa. Leica soll an dieser Stelle die Forschungsarbeit der TU Dresden erwähnt werden, die zusammen mit der Firma Carl Zeiss (Jena) durchgeführt wurde. Eine Entwicklung, die instrumentell auf dem Zeiss Ni002 basierte und einen CCD-Zeilensensor mit 1024 lichtempfindlichen Elementen (Pixeln) nutzte, wurde 1982 begonnen und erst 1988 zugunsten anderer Entwicklungen eingestellt. Diese Erfahrungen sind sicherlich die Basis der neuesten Entwicklung von Zeiss (Abb. 3).

4. Grundprinzipien der heutigen digitalen Nivellierverfahren

Gemeinsames Merkmal aller heutigen Digitalnivelliere ist es, dass sie optisch auf den Kompensatornivellieren aufbauen.

Daher sind digitale Nivelliere auch als eine Kombination von digitaler Kamera und Kompensatornivellier anzusehen. Aus diesem Grund ist bei allen heutigen Digitalnivellieren weiterhin eine optische Ablesung möglich, indem der Zielstrahl einerseits den üblichen Strahlengang durchläuft, andererseits durch einen Teilerwürfel in eine zweite Bildebene auf den CCD-Sensor gelenkt wird.

Die Codierung der Nivellierlatte und der Auswerteprozess sind bei den einzelnen Firmen schon allein aus patentrechtlichen Gründen völlig unterschiedlich. Die Problematik eines geeigneten Codes kann am Beispiel einer Entwicklung am Neuen Technikum Buchs (NTB) gezeigt werden. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde dort 1987 ein digitales Nivellier gebaut [3]. 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 und 30 Metern gemessen werden. Diese Arbeit zeigt, dass die jeweiligen Herstellerfirmen für das digitale Nivellierverfahren einen speziellen Code entwickeln mussten, der neben pseudostochastischen Eigenschaften im gesamten Distanzbereich von 1,5–100 m eine eindeutige Abbildung ohne aufwendige Zoomoptik ergibt. Eben-



Abb. 3: Das digitale Nivellier DiNi 10 von Zeiss.

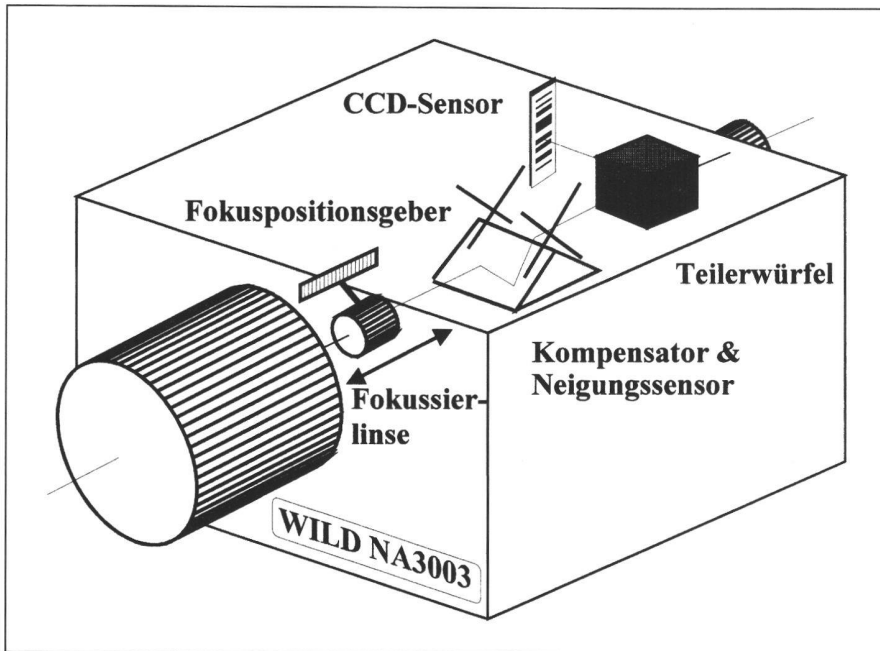


Abb. 4: Prinzipieller optischer Aufbau von heutigen Digitalnivellieren am Beispiel der Wild NA2002/3003-Baureihe.

teprozesses wird dieser Bereich eingeschränkt, indem aus der Position der Fokussierlinse (Abb. 4) ein erster Näherungswert für die Distanz abgeleitet wird. In diesem Bereich werden dann mit einer reduzierten 1 Bit-Korrelation weitere Näherungswerte für den Höhenunterschied und die Distanz abgeleitet. Anschliessend wird die Feinkorrelation durchgeführt, die auch die Intensität des empfangenen Signals als 8 Bit-Wert miteinbezieht [2].

5.2 Topcon

Das digitale Nivellier von Topcon ist zum gleichen Zeitpunkt wie das Zeiss-Nivellier vorgestellt worden. Es ist im Design, der Software und den weiteren technischen Merkmalen dem Wild-Nivellier sehr ähnlich.

so ist bei allen Herstellern der Code so aufgebaut, dass er mit einem einfacheren CCD-Zeilensensor in digitale Informationen umgeformt werden kann.

5. Die verschiedenen Auswerteverfahren bei den heutigen Digitalnivellieren

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

- Korrelationsverfahren (Wild NA2002/3003)
- geometrisches Positionsmessverfahren (Zeiss DiNi10/20)
- Phasenmessverfahren (Topcon DL101/102).

5.1 Leica

Beim Wild NA2000, welches 1990 als erstes Instrument auf den Markt kam, basiert die Auswertung auf einer zweidimensionalen Korrelation des Lattencodes. Dabei wird der Code, der dem Instrument ja bekannt ist, mit dem auf dem Zeilensensor abgebildeten Signal korreliert. Da das Bild sowohl in der Höhe, als auch im Abbildungsmaßstab variiert, ist es notwendig, dass beide Parameter optimiert werden. Der Höhenunterschied «Instrument – Nivellierlatte» stellt sich als eine vertikale Verschiebung des Codes dar; der Abbildungsmaßstab ändert sich als Funktion der Distanz. Aus dem Gesamtmessbereich von 0–4,05 m für die Höhe und dem Distanzbereich von 1,8–100 m lässt sich ableiten, dass im gesamten Bereich 50 000 Korrelationskoeffizienten berechnet und ausgewertet werden müssten. Zur Reduktion der Zahl der Korrelationen und Geschwindigkeitssteigerung des Auswer-

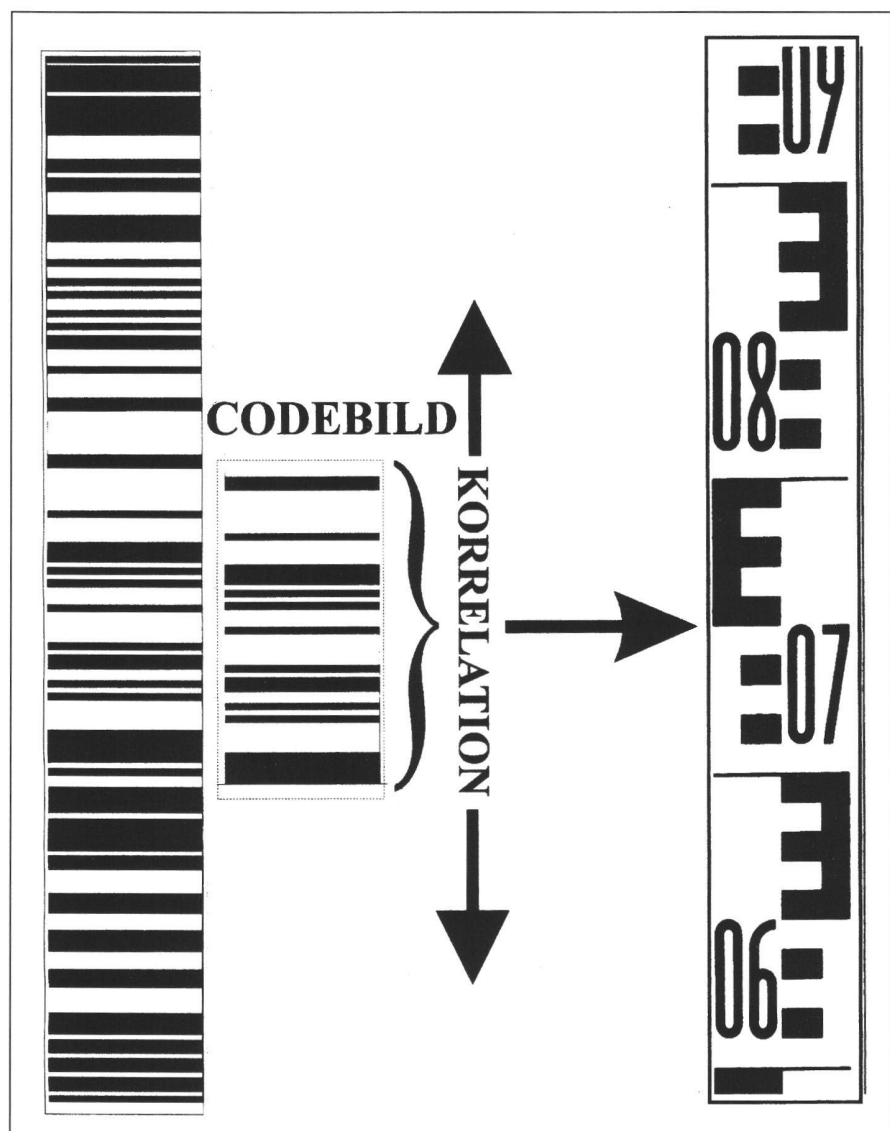


Abb. 5: Grundprinzip der Korrelation beim Wild-Digitalnivellier.



Abb. 6: Das Topcon DL101.

Topcon verwendet einen Code mit drei ineinandergeschachtelten Einzelinformationen. Auf der Nivellierlatte ist ein Referenzmuster R als ein Balkentripel im konstanten Abstand von 3 cm erkennbar. 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 $A = \text{ca. } 33 \text{ cm}$ und $B = \text{ca. } 30 \text{ cm}$, 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 vier Metern immer eine eindeutige Phasendifferenz der beiden Signale A und B vorhanden ist. Aus Frequenz und Phasenlage der 3 Codemuster zueinander werden 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.

5.3 Das Zeiss-Verfahren

Das Zeiss-Digitalnivellierverfahren im DiNi 10/20 zeichnet sich vor allem durch die Eigenschaft aus, dass über den gesamten Distanzbereich von 1,5–100 m mit einem

arbeitet das Zeiss-Nivellierverfahren in zwei Stufen mit einer Grob- und einer anschließenden Feinmessung: Der 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 ist, kann mit der nachfolgenden Feinmessung die Lage einzelner Kanten des vorgenannten Codes ausgewertet werden. Diese sogenannte Bi-Phasenmessung beruht darauf, dass nach jedem Bit ein Helligkeitswechsel stattfindet. 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 benötigt.

6. Leistungsvergleich

Hier hat Leica als erster Hersteller von Digitalnivellieren einen Standard gesetzt. So ist bei allen Instrumenten eine Auslösetaste im Bereich des Seitentriebs und der Fokussierung zu finden. Während sich jedoch Wild und Topcon auf ein zweizeiliges Display beschränken, findet man bei

minimalen und konstanten Bildfeld von 30 cm gemessen werden kann. Soweit bisher bekannt geworden ist [4],

Merkmal	TOPCON DL 101	WILD NA 3003	ZEISS DiNi10
Genauigkeit mm/Km Doppel-nivellement mit Invarlatten	0,4 mm	0,4 mm	0,3 mm
Distanzmessung (Auflösung)	1 cm	1 cm	1 cm
Kompensator			
– Bauform	Pendel	Pendel	Pendel
– Einspielgenauigkeit	0,3"	0,3"	0,2"
– Arbeitsbereich	$\pm 15'$	$\pm 15'$	$\pm 15'$
Messzeit	4 s	4 s	4 s
Messbereich (Invarlatte)	2–60 m	1,8–60 m	1,5–100 m
Bedienungskonzept	Menu	Menu mit Funktions-tasten	Menu
Display	2 zeilig	2 zeilig	4 zeilig
Arbeitszeit/Batterie	10 Stunden	8 Stunden	1 Tag
Gewicht mit Batterie	2,8 kg	2,5 kg	3,0 kg
Messfeld	keine Angabe	2°	minimal 30 cm
Datenspeicherkapazität (Datensätze/Speichermodul)	2400	500	2000

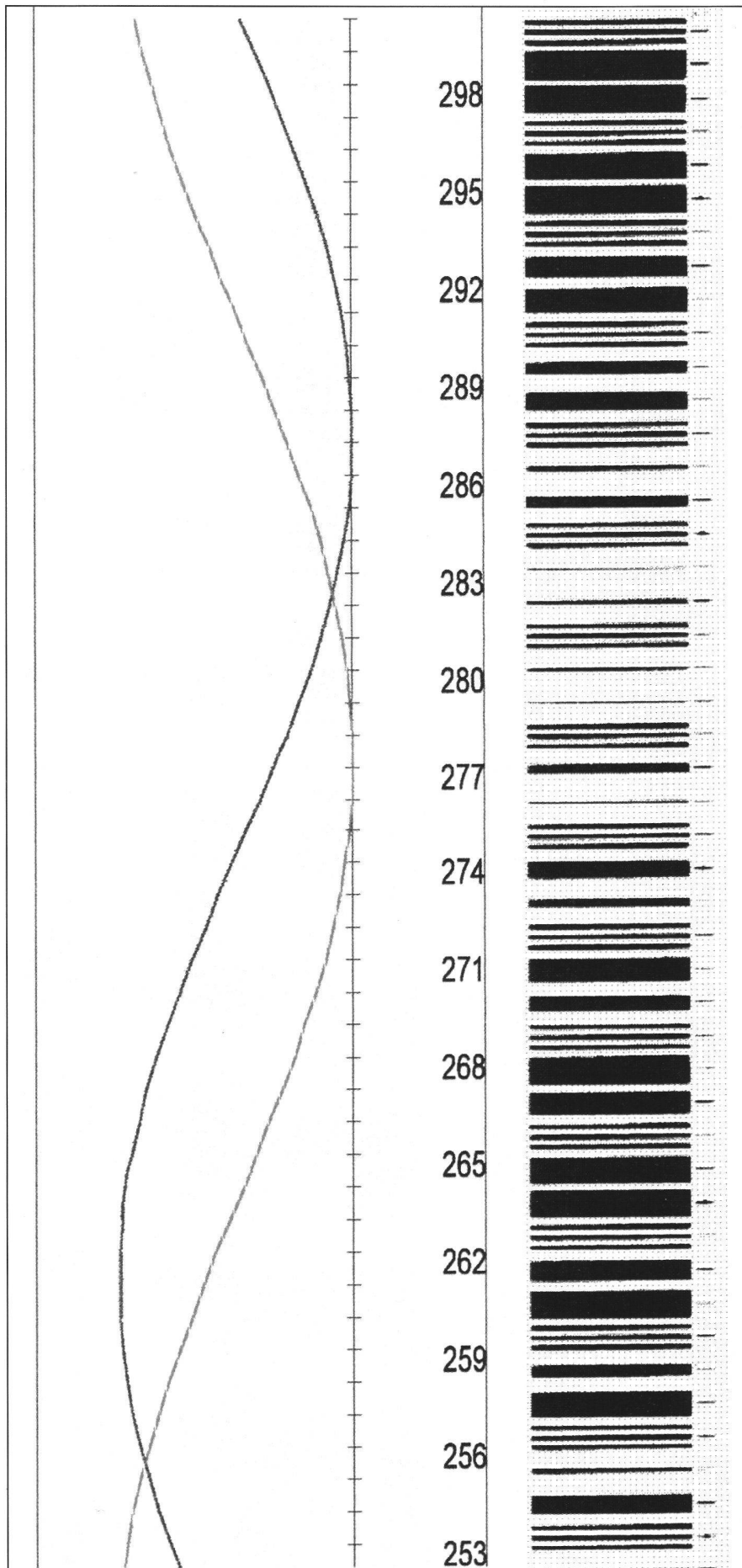


Abb. 7: Grundprinzip des Topcon Codes.

Zeiss bereits ein vierzeiliges Display. Auch das Bedienungskonzept mit Funktionstasten ist bei diesem Instrument als fortschrittlich zu bezeichnen. Zeiss erhebt mit seinen Genauigkeitsangaben von $S_{NIV} = 0,2 \text{ mm/km}$ Doppelnivellement den Anspruch, das derzeit genaueste Digitalnivellier zu produzieren.

Alle Instrumente weisen eine serielle Schnittstelle RS232 auf, um sie an externe Datenerfassungs- oder Steuerrechner anschliessen zu können. Die Steckbuchse ist jedoch mit dem oberen Teil des Instrumentes verbunden, so dass das Anschlusskabel mitgedreht werden muss. Ebenso besitzen alle Instrumente einen internen oder einsteckbaren Speicher. Die On-Board-Software kann bei allen Instrumenten ein Liniennivellement mit Seitenblicken und individuellen Nummern abspeichern und bereits im Feld auswerten.

Die einzelnen Leistungsmerkmale können aus der folgenden Tabelle ersehen werden.

7. Neue Anwendungsbereiche und Weiterentwicklungen

Neben den üblichen Anwendungen im geometrischen Linien- oder Flächennivellement werden digitale Nivelliere zunehmend bei der permanenten Beobachtung von Bauwerken eingesetzt. So wurde bereits 1990 die Sicherung und Rekonstruktion der Inntalbrücke bei Kufstein über mehrere Monate mit einem Digitalnivellier überwacht. Eine der jüngsten Anwendungen ist die permanente Deformationskontrolle des Kraftwerkes Eglisau, welches z.Z. renoviert und gesichert wird. Mit zwei Wild NA3000-Instrumenten werden seit einem Jahr die relativen Hebungen von Pfeilern während der Betoninjektionen beobachtet. Diese Messanlage ist von der Firma Solexperts (Schwarzenbach) installiert worden. Dabei wurde auch wiederum der Vorschlag des Verfassers aufgegriffen, digitale Nivelliere mit Motoren für den Seitentrieb und die Fokussierung auszurüsten. In Zusammenarbeit mit der Firma Solexperts und dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETHZ wird zur Zeit ein motorisiertes Digitalnivellier entwickelt, welches permanent mehrere Ziele einschliesslich von Referenzpunkten erfassen kann. Dies bringt den Vorteil, dass man die Stabilität des Standpunktes analysieren und Refraktionseinflüsse im Bereich der Messanlage modellieren kann.

Auch in der Industrievermessung werden digitale Nivelliere zunehmend eingesetzt. Neben der vertikalen Verschiebung, wie beim Nivellement, können durch optische Vorsätze, wie Pentaprisma oder Umkehrsystem, Relativverschiebungen in anderen Ebenen erfasst werden.

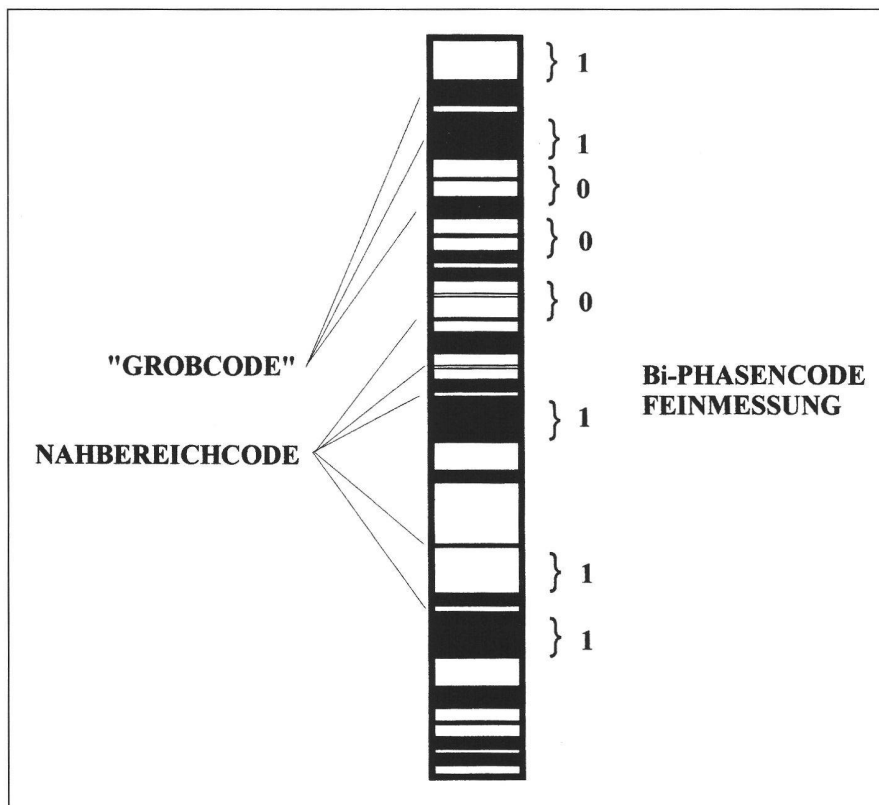


Abb. 8: Der Zeiss-Code.

8. 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 Digi-

talnivelliere Wild NA3003, Zeiss DiN10 und Topcon DL 101 sind bereits als Instrumente der zweiten Generation anzusehen, die in Zukunft zunehmend die manuellen optischen Nivellierverfahren ersetzen werden.

Die unterschiedlichen Messtechnologien

der einzelnen Hersteller, mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen, werden zur Zeit am IGP in vergleichenden Untersuchungen beurteilt. Zu diesem Zweck wurde auch eine neue Nivellementteststrecke auf dem Höggerberg in der Nähe der ETHZ errichtet, bei der alle Lattenstandpunkte durch Bolzen vermarktet sind, um die nivellementstypischen systematischen Fehler zu minimieren. Die Ergebnisse dieser vergleichenden Untersuchungen, die auch intensive Labortests einschliessen, werden Gegenstand einer weiteren Veröffentlichung sein.

Literatur:

- [1] H. Zetsche: Beiträge zur Konstruktion von Geodätischen Feldinstrumenten mit digitaler Datenausgabe. DGK Reihe C. Nr. 88, München 1966.
- [2] H. Ingensand: Das erste digitale Nivellier der Welt. AVN, Heft 9, 1990, S. 201 ff.
- [3] R. Schmid, T. Fürer: Automatisierung bei Nivellierinstrumenten. Diplomarbeit am Neuen Technikum Buchs, Oktober 1987.
- [4] W. Huep: Neue Entwicklungen im geodätischen Instrumentenbau. Vortrag am IGP der ETHZ im Rahmen des geodätischen Kolloquiums, 10. November 1994.
- [5] Carl Zeiss AG: Prospekt Zeiss DiNi 10/20.
- [6] Topcon: Prospekt DL 101/102.

Adresse des Verfassers:
 Prof. Dr. Hilmar Ingensand
 Institut für Geodäsie und
 Photogrammetrie
 ETH Höggerberg
 CH-8093 Zürich