

XIV. Internationaler Kongreß
der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie
Hamburg 1980
Kommission II/IV

Helmut Rüdener

Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen
Universität Hannover, West Germany

ANALYTISCHE PLOTTER-PROGRAMME ZUR OBJEKTIVEN ON-LINE
PUNKTDICHTENBESTIMMUNG IN DIGITALEN HÖHENMODELLEN

Zusammenfassung

Die Genauigkeit Digitaler Höhenmodelle wird primär von Punktdichte und Geländecharakter bestimmt. Die Interpolationsmethode hat nur einen sekundären Einfluß. Da der Erfassungs- und Verarbeitungsaufwand stark von der Punktmenge abhängt, besteht ein Interesse, nur die für eine definierte Genauigkeit der Geländerepräsentation notwendige Punktmenge zu erfassen. In dem Bericht werden Verfahren und Programme für rechnergestützte und analytische Auswertegeräte beschrieben, welche eine in Genauigkeit und Punktdichte optimale Erfassung ermöglichen. In experimentellen Tests wird die Leistungsfähigkeit der Verfahren nachgewiesen.

Abstract

The accuracy of digital height models (DHM) is primarily influenced by the point-density and the terrain-type. The influence of the interpolation method is less important. The amount of the needed time for data-acquisition and data processing depends strongly on the number of points. That is why there is a great interest in reducing the data to a number which is adequate for a predefined accuracy in terrain-representation. The report describes procedures and programs for computer-aided and analytical instruments, which allow data-acquisition in optimal point-density. An experimental test shows the efficiency of the procedures.

1. E i n l e i t u n g

Die heutigen photogrammetrischen Auswertegeräte ermöglichen durch Hard- bzw. Softwarekomponenten eine weitgehende automatisierte Erfassung von Geländehöhen zur Verarbeitung in "Digitalen Geländemodellen" (DGM)¹⁾. Bei automatischer lagemäßiger Positionierung der Meßmarke (Profile, Raster) obliegt dem Auswerter nur noch die höhenmäßige Nachführung.

Keine Unterstützung leisten die Auswertegeräte bisher bei der Wahl der Stützpunktdichte. Diese Aufgabe ist allerdings von essentieller Bedeutung, da zum einen der Erfassungs- und Verarbeitungsaufwand stark von der Punktmenge abhängt und zum andern die Genauigkeit Digitaler Höhenmodelle primär von Punktdichte und Geländecharakter bestimmt wird. Es besteht somit ein Interesse, die für eine definierte Genauigkeit der Geländerepräsentation notwendige und hinreichende Punktmenge zu erfassen.

Mit rechnergestützten und rechnergesteuerten Auswertegeräten (Analytische Plotter) kann mit entsprechender Software die bislang auf Erfahrung beruhende und somit subjektive Bestimmung der Punktdichte durch objektive Methoden ersetzt werden, die eine in Genauigkeit und Aufwand optimale Erfassung ermöglichen.

1) Die Begriffe "Digitales Geländemodell" (DGM) und "Digitales Höhenmodell" (DHM) werden synonym verwendet.

Ausgehend von Erfahrungen aus systematischen Untersuchungen zur digitalen Geländehöhenerfassung und zum Genauigkeitsverhalten Digitaler Geländemodelle, wurden für das Analytische Auswertegerät AP/C-3 von O.M.I. Auswerteprogramme mit rechnerunterstützter Punktdichtenbestimmung entwickelt und auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft.

Da die vorgestellten Programme weder auf bestimmte analytische Gerätetypen noch auf bestimmte Interpolationsalgorithmen bei der Weiterverarbeitung der Daten beschränkt sind, stellen sie einen allgemeinen Software-Baustein für analytische Auswertegeräte dar.

2. G r u n d l a g e n

Zunächst werden für die Verfahrensentwicklung wesentlichen Ergebnisse einer Untersuchung verschiedener vorhandener Erfassungsverfahren für Geländehöhen und deren Weiterverarbeitung in DGM-Programmen dargestellt. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsauftrags des Bundesministers für Verkehr durchgeführt (/1/, /2/).

- Primäre Einflußparameter der Genauigkeit der Geländerepräsentation m_h in Digitalen Geländemodellen sind die Gelände­krümmung K_m , der Stützpunkt­abstand a sowie die Meßgenauigkeit m_0 (Abb. 1):^m

Krümmung: (2. Ableitung)	$K = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right)^2}$	m_0 ... Meßfehler c ... Konstante hier: $c = 0.20$ K_m ... mittl. Krümmung a ... Punktabstand
Genauigkeit der Geländerepräsentation im DGM:	$m_h^2 = m_0^2 + (c \cdot K_m \cdot a)^2$	(1)

Abb. 1: Genauigkeit der Geländerepräsentation in Digitalen Geländemodellen

- Einfache Interpolationsverfahren (z. B. lineare Interpolation) zeigen gegenüber komplexen Algorithmen nur Genauigkeitseinbußen von durchschnittlich 20 %.
- Die schrittweise Messung eines in der Lage automatisch angesteuerten regelmäßigen Stützpunktrasters stellt gegenüber anderer Verfahren (topographisch verteilte Einzelpunkte, Schichtlinien, in kontinuierlicher Weise abgetastete Profile) die schnellste und mit genaueste Erfassungsmethode dar. Kontinuierlich abgetastete Profile werden insbesondere merklich ungenauer, je größer Meßmarkengeschwindigkeit und Geländeneigung sind.

3. B e s c h r e i b u n g d e r V e r f a h r e n

Bei der Anwendung der schrittweisen Rastermessung zur Erfassung eines Gebietes muß zunächst geprüft werden, ob homogene Gelände­strukturen vorliegen, die mit einer einheitlichen Rasterweite erfaßt werden können. Ist dies der Fall, so können Verfahren angewendet werden, in denen aus repräsentativen, in dichter Punktfolge gemessenen Testprofilen die Punktdichte abgeleitet wird, mit der anschließend das gesamte Gebiet flächenhaft zu erfassen ist.

Bei inhomogenen Geländebeziehungen, bei denen auch eine Einteilung in größere gleichstrukturierte Einzelflächen nicht möglich ist, sind solche Tests zur Punktdichtenbestimmung nicht erfolgreich. Hierfür wird ein Verfahren vorgeschlagen, in dem eine iterative automatische Stützpunktverdichtung entsprechend den lokalen Geländebeziehungen vorgenommen wird.

3. 1 Punktdichtenermittlung aus Geländeprofilen

3. 1. 1 Verfahren der sukzessiven Profilausdünnung

Zur Ableitung der notwendigen Stützpunktdichte werden Testprofile in sehr dichter Punktfolge - z. B. 1 m - in beiden Koordinatenrichtungen gemessen. Durch den Übergang von der flächenhaften zur linienhaften Betrachtung des Geländes wird der Anteil des Testaufwands am Gesamtaufwand minimal gehalten.

Durch fortgesetztes Ausdünnen der Profilpunkte ergeben sich neue Profile mit zunehmenden Höhenfehlern gegenüber dem Ausgangsprofil. Die Punktverbindung in den neuen ausgedünnten Profilen erfolgt dabei wahlweise linear oder mit einer "Spline-Funktion". (Abb. 2 zeigt die Ermittlung der Höhendifferenzen gegenüber einer linearen Punktverbindung). Durch Vorgabe einer Fehler-schranke ergibt sich dann ein Punktabstand, der ein Maß für die Punktdichte bei der anschließenden flächenhaften Erfassung liefert.

Dieses einfache Verfahren hat den Vorteil, daß es für den Auswerter gut durchschaubar ist. Mit einer Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen und mit Angaben von Stellen im Profil, an denen zu hohe Abweichungen auftreten, läßt sich gleichzeitig die Einhaltung der Homogenität der Geländestruktur kontrollieren (Abb. 3).

Die Ergebnisse eines empirischen Tests zeigen, daß eine Prognose der in einer DGM-Interpolation zu erwartenden Höhenfehler mit Hilfe von Untersuchungen an Testprofilen nach beschriebenem Verfahren erfolgreich ist.

In Abb. 4 sind für verschiedene Geländeklassen und Punktabstände die in Profilen und aus flächenhaften Interpolationsberechnungen ermittelten Höhenfehler dargestellt. Insbesondere bei schwierigen Geländebeziehungen empfiehlt es sich, die für eine definierte Zielgenauigkeit notwendige Punktdichte aus mehreren Testprofilen zu ermitteln. Die Art des Interpolationsansatzes (hier: lineare Interpolation oder Splines in den Testprofilen, Interpolation mit "gleitenden Flächen" bei der flächenhaften Interpolation) ist dabei nicht relevant.

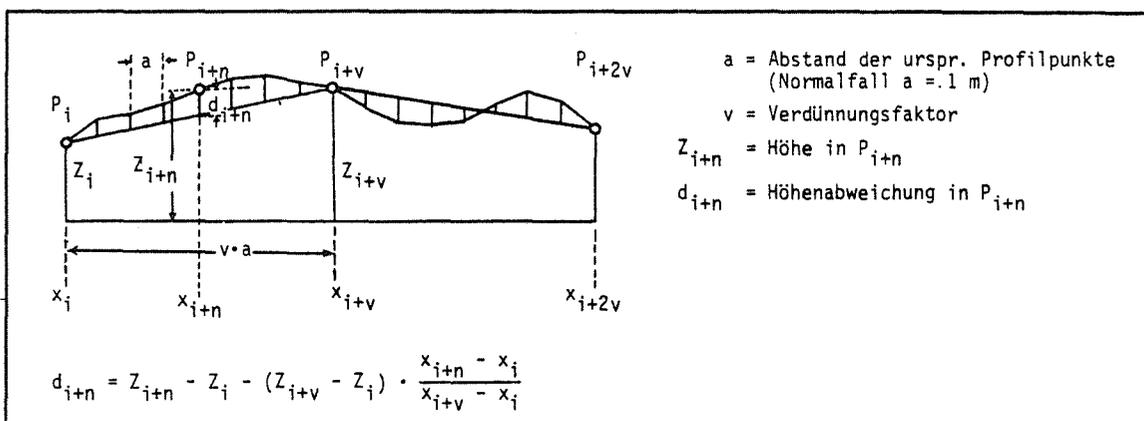


Abb. 2: Ermittlung der Stützpunktdichte durch "fortgesetzte Ausdünnung" (linearer Ansatz)

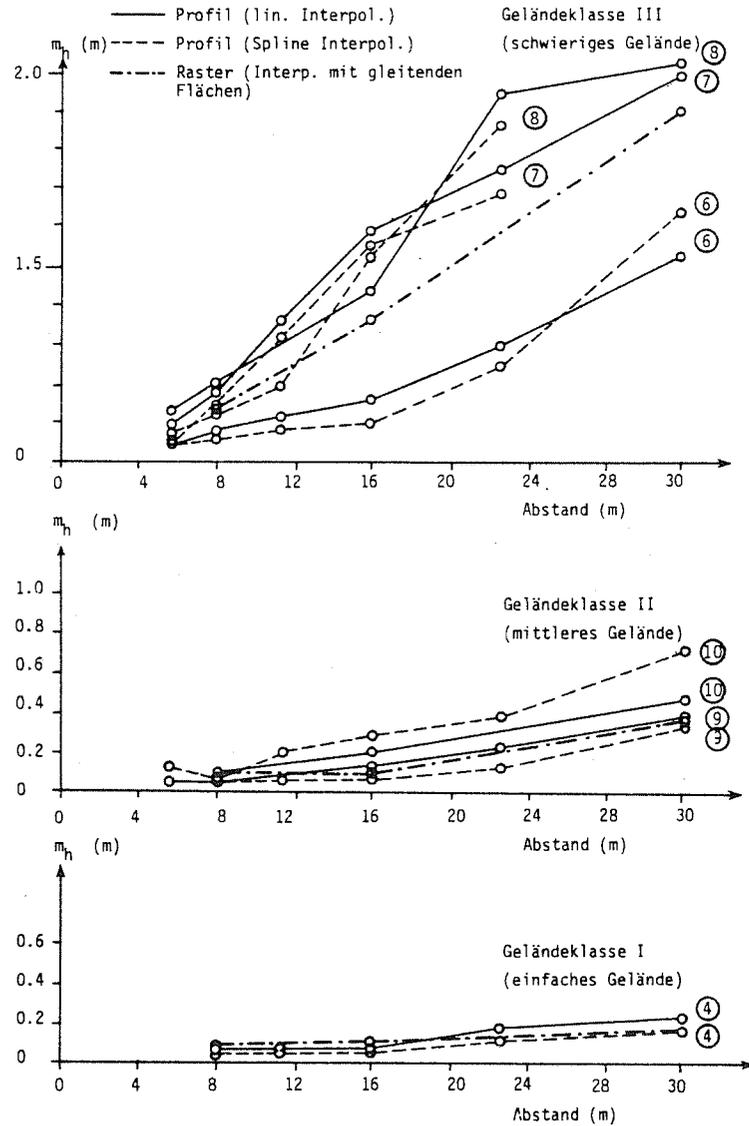


Abb. 4: Verhältnis zwischen Höhengenaugigkeit und Stützpunktabstand bei Profil- und flächenhafter Interpolation (rasterförmige Punktanordnung)

FEHLERVERTEILUNG		(VERD. FAKTOR = 16)
ABWEICHUNGEN BIS	-5.00	0
ABWEICHUNGEN BIS	-3.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	-2.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	-2.00	0
ABWEICHUNGEN BIS	-1.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	-1.00	0
ABWEICHUNGEN BIS	-0.70	3
ABWEICHUNGEN BIS	-0.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	-0.40	1
ABWEICHUNGEN BIS	-0.30	6
ABWEICHUNGEN BIS	-0.20	5
ABWEICHUNGEN BIS	-0.10	15
ABWEICHUNGEN BIS	0.00	190
ABWEICHUNGEN BIS	0.10	222
ABWEICHUNGEN BIS	0.20	65
ABWEICHUNGEN BIS	0.30	13
ABWEICHUNGEN BIS	0.40	2
ABWEICHUNGEN BIS	0.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	0.70	0
ABWEICHUNGEN BIS	1.00	0
ABWEICHUNGEN BIS	1.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	2.00	0
ABWEICHUNGEN BIS	2.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	3.50	0
ABWEICHUNGEN BIS	5.00	0
ABWEICHUNGEN GR.	5.00	0
=====		
		512
QUAD. MITTL. HOEHENFEHLER		0.110
EINF. MITTL. HOEHENFEHLER		0.066
ABWEICHUNGEN GR	3 MH	
STRECKE	DH	
194.00	-0.38	
195.00	-0.70	
196.00	-0.88	
197.00	-0.78	
198.00	-0.49	
413.01	-0.36	
434.01	-0.34	

Abb. 3: Programmausgabe "Fehlerverteilung" bei der Punktdichtenbestimmung in Testprofilen durch "sukzessive Ausdünnung"

3. 1. 2 Fourier - Transformation

In einem anderen Verfahren zur Ermittlung der Stützpunktdichte aus Testprofilen wird das Geländeprofil als eine periodische Funktion $f(x)$ (Schwingung) mit der Periode T aufgefaßt, die sich näherungsweise durch eine trigonometrische Summe darstellen läßt:

$$s(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_k a_k \cos k\omega x + \sum_k b_k \sin k\omega x \quad (2)$$

Die Koeffizienten a_k, b_k sind die Fourierkoeffizienten der gegebenen Funktion.

Die Fourierreihe läßt sich auch in der Form schreiben:

$$s(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_k A_k \sin(k\omega x + \phi_k) \quad (3)$$

Dann ist

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{und} \quad \text{tg } \phi_k = \frac{a_k}{b_k} \quad (4)$$

Die maximal darstellbare Frequenz f_N ergibt sich aus dem Stützpunktabstand a des Testprofils:

$$f_N = \frac{1}{2a} \quad (\text{Nyquist-Frequenz}) \quad (5)$$

Ein mit sehr geringem Punktabstand abgetastetes Testprofil (um den Mittelwert reduziertes Signal, Abb. 5) kann nun spektral zerlegt werden, d. h. jeder darstellbaren Frequenz wird ein Amplitudenwert A_k^2 zugeordnet (Abb. 6 zeigt ein solches "Power-Spektrum" mit logarithmischer Ordinate für die A_k^2 -Werte).

Im Power-Spektrum kann nun die Frequenz f_s bestimmt werden, ab der die Gesamtheit der Amplitudenwerte der nachfolgenden höheren Frequenzen für eine definierte Zielgenauigkeit nicht mehr relevant sind. Entsprechend (5) kann dann wiederum auf den notwendigen und hinreichenden Stützpunktabstand geschlossen werden.

Abb. 7 zeigt zunächst die inverse Fouriertransformation (Fouriersynthese) nach Nullsetzen der Amplitudenwerte der Frequenzen $> f_s$ (Filterung).

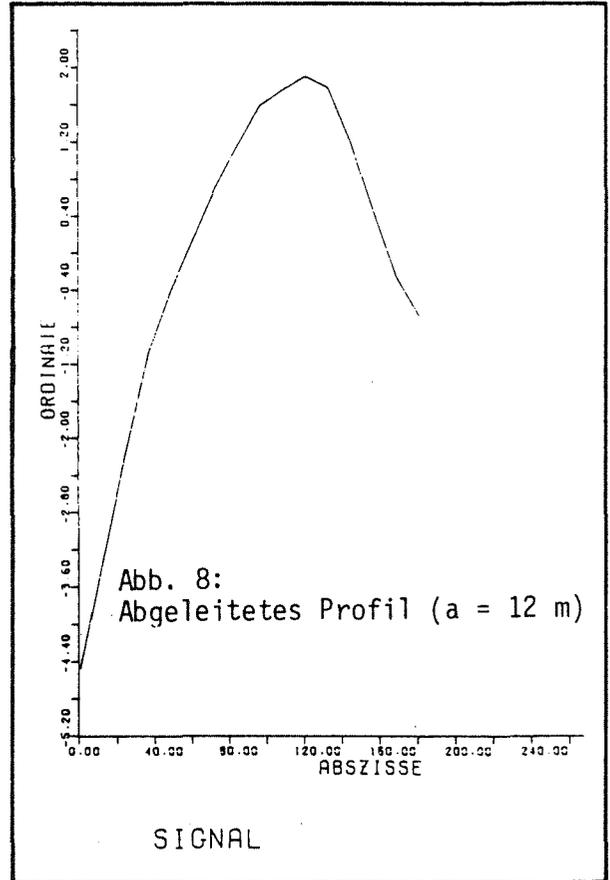
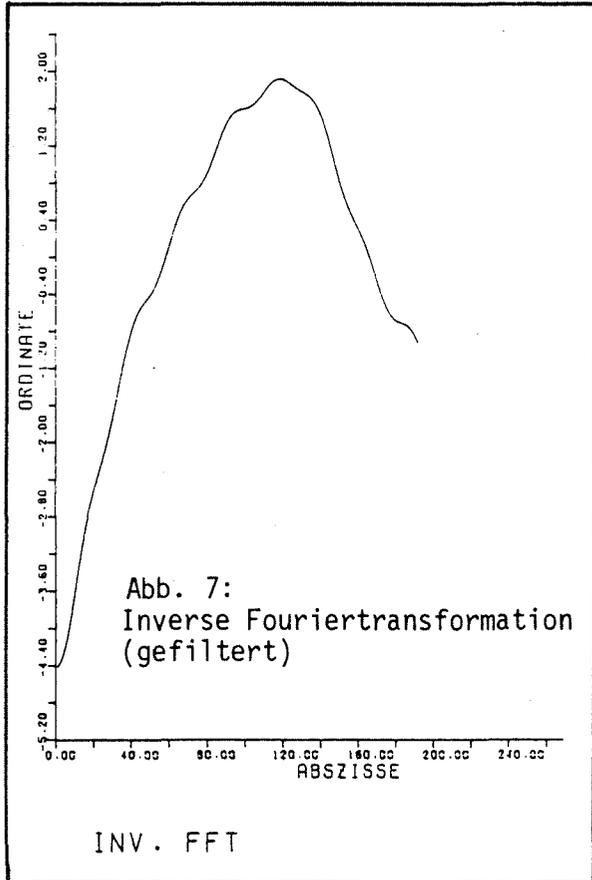
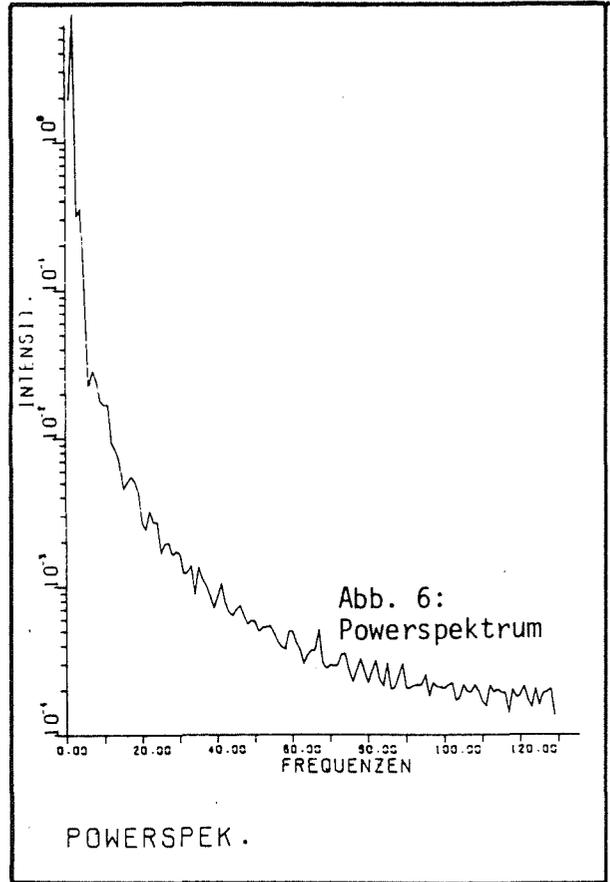
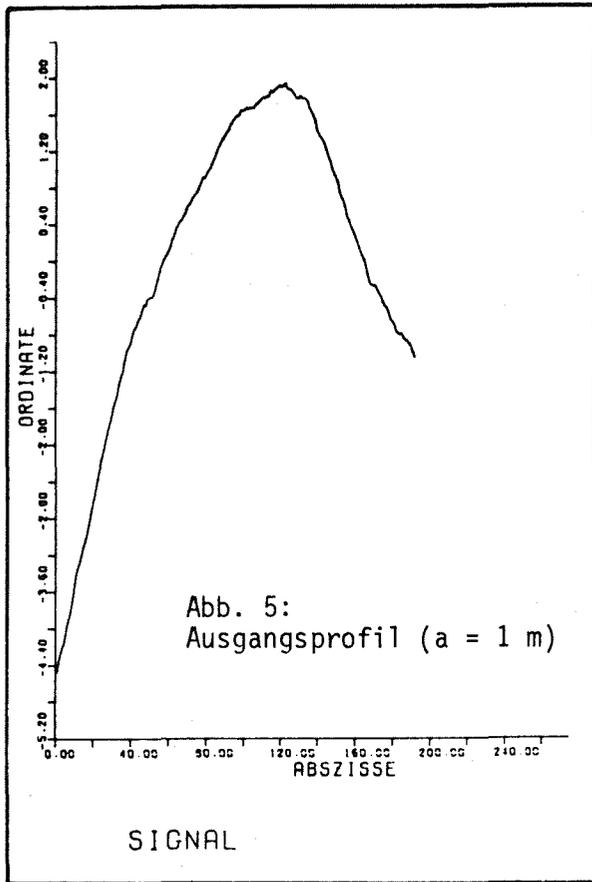
In Abb. 8 ist das Geländeprofil mit dem aus der Frequenz f_s abgeleiteten hinreichenden Punktabstand dargestellt.

3. 2 Automatische Stützpunktverdichtung bei inhomogenem Gelände

Bei inhomogenen Geländebeziehungen kann keine einheitliche Stützpunktdichte angegeben werden, die für eine definierte Genauigkeit der Geländerepräsentation auch lokal notwendig und hinreichend ist.

Es wird deshalb zunächst ein grobes Stützpunktraster gemessen, dessen Maschenweite noch nicht an allen Stellen ausreicht. Falls vorhanden, werden auch Bruchkanten digitalisiert.

Zwischen benachbarten Stützpunkthöhen ist nun eine Beziehung herzustellen, welche ein Maß für die in einer Interpolationsberechnung zu erwartende



lokale Höhengenaugigkeit darstellt ¹⁾.

Ein solches Maß stellt die in Formel (1) angegebene Gelände­krümmung dar, welche für jeden Punkt des groben Ausgangsrasters aus den Nachbarhöhen er­mittelt werden kann und damit ein sehr lokal wirksames Kriterium darstellt.

Aus einem lokalen, nach Koordinatenrichtungen getrennt ermittelten Krümmungs­wert wird nun nicht sofort nach (1) der endgültige Punktabstand ermittelt, sondern es findet in einem iterativen Prozeß eine lokale Halbierung des Rasterabstandes solange statt, bis die nach den Krümmungswerten zu erwar­rende Höhengenaugigkeit innerhalb einer vorgegebenen Schranke S_k liegt.

$$S_k = \pm \frac{1}{0,2 a} (m_h^2 \text{ soll} - 0,76 m_o^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

a ... aktuelle Rasterweite

$m_h \text{ soll}$... Zielgenauigkeit

m_o ... Meßgenauigkeit

Nach der Verdichtung in einer Richtung erfolgt eine Umsortierung sämtlicher Stützpunkte - auch der neu gemessenen Verdichtungspunkte - in Querrichtung, wobei sogenannte "Sortierschläuche" gebildet werden, die die Breite des geringsten Punktabstands besitzen. Dadurch werden gegebenenfalls auch die Innenräume des groben Rasters mit Verdichtungspunkten belegt aber gleich­zeitig eventuell vorhandene anisotropen Gelände­verhältnisse berücksichtigt, was ein unnötiges Anwachsen der Anzahl der Verdichtungspunkte verhindert. Bruchkanten und auszusparende Flächen werden bei entsprechender Kennzeichnung ebenfalls beachtet.

Das lagemäßige Ansteuern der Verdichtungspunkte geschieht beim Analytischen Plotter automatisch. Läßt man zusätzlich über die Handräder des AP eine manuelle Modifikation der Lage einzelner Stützpunkte des Basisrasters oder der Verdichtungspunkte zu, so ist die hohe Erfassungsgeschwindigkeit der halb­automatischen Rastererfassung mit der Flexibilität der individuellen Er­fassung nach topographischen Gesichtspunkten kombiniert.

Im folgenden wird die Leistungsfähigkeit der automatischen Punktverdichtung an einem Beispiel dargestellt.

Ein Testgelände mit variierender Struktur wurde mit einem 32 m-Basisraster ²⁾ und zusätzlichen Bruchkanten erfaßt (Abb. 9). Die daraus abgeleiteten Schichtlinien ³⁾ zeigen, daß diese Rasterweite noch nicht an allen Gelände­stellen ausreicht.

Die Punkte der automatischen Verdichtung und die daraus abgeleiteten Schicht­linien sind in Abb. 10 dargestellt.

Als minimaler Abstand der Verdichtungspunkte waren 8 m zugelassen, was zur Darstellung der schwierigsten Teile notwendig war.

Zum Vergleich wurde ein regelmäßiges Stützpunktraster mit dieser konstanten Rasterweite von 8 m verarbeitet (Abb. 11).

1) Die Grundidee dieses Verfahrens geht auf Makarovič /3/ zurück, der den Begriff "progressive sampling" benutzt

2) Festgestellt mit Testprofil (Kap. 3.1.1)

3) Zur Interpolation der Schichtlinien wurde das DGM-Programm "TASH" des Lehr­gebiets für Topographie und Kartographie der Universität Hannover verwendet

Die Schichtlinienverarbeitungen des verdichteten Rasters und des regelmäßigen 8 m-Rasters zeigen eine gute Übereinstimmung.

Aus Kontrollhöhen ermittelte Höhenfehler ergeben auch keine wesentlichen Genauigkeitsunterschiede der beiden Verarbeitungen.

Die Anzahl der Stützpunkte beträgt allerdings beim regelmäßigen 8 m-Raster insgesamt 1 700; die automatische Punktverdichtung benötigte weit weniger als 1/3, nämlich nur ca. 500 Punkte.

4. S c h l u ß

Die vorgestellten Verfahren zur objektiven Punktdichtenbestimmung für Digitale Geländemodelle stellen eine notwendige Komponente zur Unterstützung des Auswerters dar, wie sie an Analytischen Plottern möglich ist.

Die Beispiele zeigen, daß mit rechnerkontrollierten Erfassungsverfahren, die eine Beurteilung des jeweiligen auszuwertenden Geländes on-line ermöglichen, eine Minimalisierung des Aufwands in Erfassung und Verarbeitung unter gleichzeitiger Einhaltung genauigkeitsmäßiger Anforderungen an die Ergebnisse erreicht werden kann.

Literatur

- /1/ Rüdener, H.: Problemanalyse und Untersuchungen zur zweckmäßigsten photogrammetrischen Datenerfassung für die digitale Verarbeitung zu straßenbaulichen Zwecken.
Forschungsauftrag 2.012 G 74 C des Bundesministers für Verkehr, 1978
- /2/ Rüdener, H.: Experimentelle Genauigkeitsanalyse Digitaler Höhenmodelle.
Presented Paper, Komm. IV, ISP-Kongreß Hamburg 1980
- /3/ Makarovič, B.: Progressive Sampling for Digital Terrain Models.
ITC-Journal, 1973 - 3.

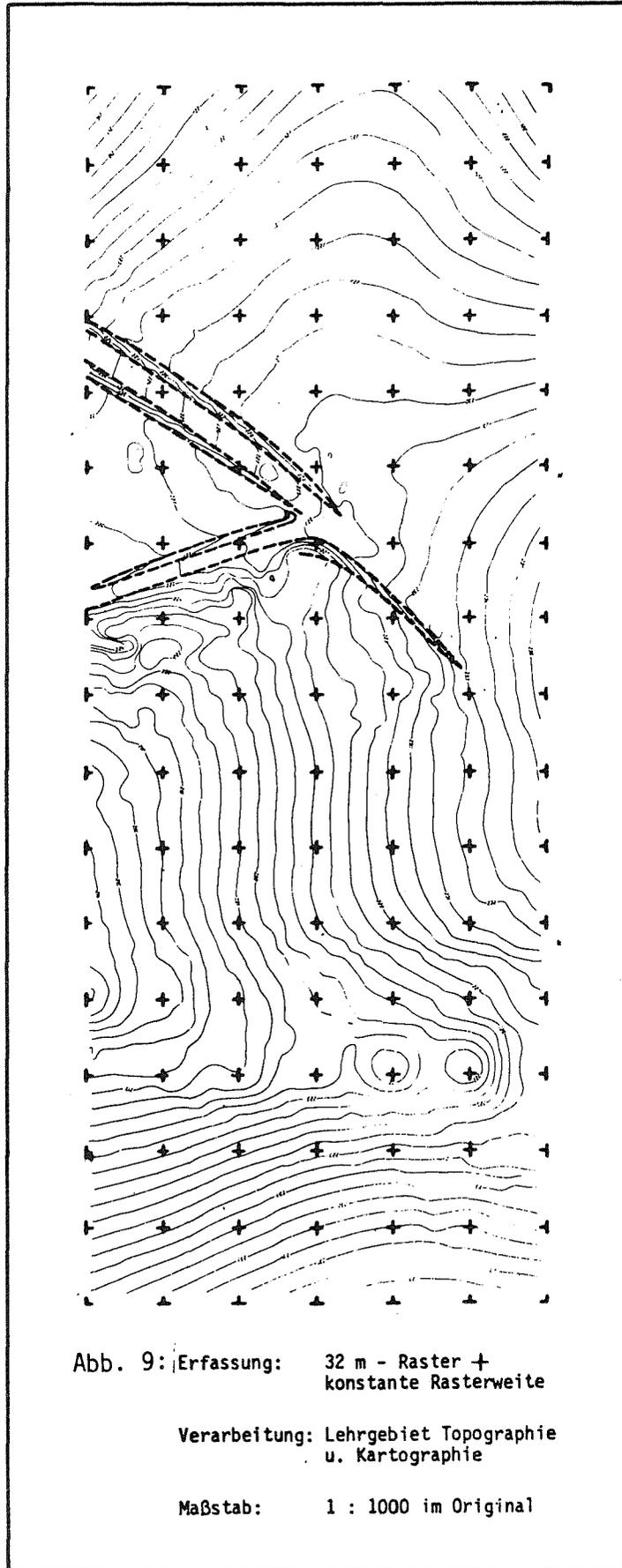
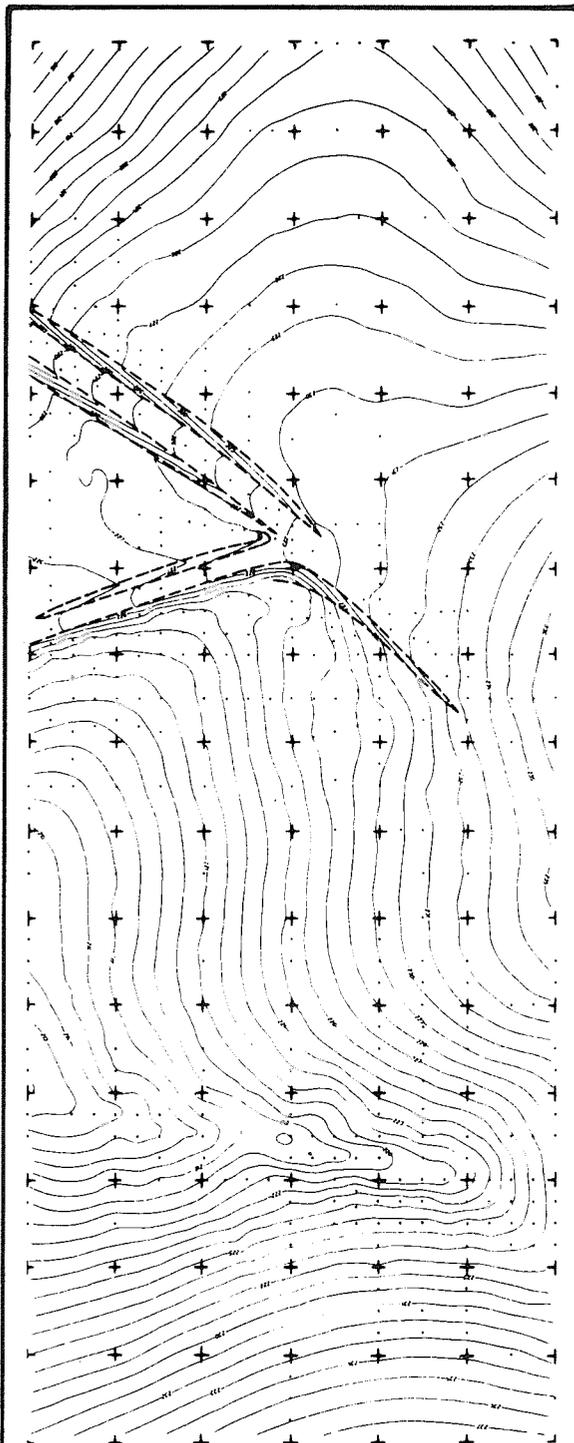


Abb. 9: Erfassung: 32 m - Raster +
konstante Rasterweite

Verarbeitung: Lehrgebiet Topographie
u. Kartographie

Maßstab: 1 : 1000 im Original



Erfassung: Automatische Rasterverdichtung

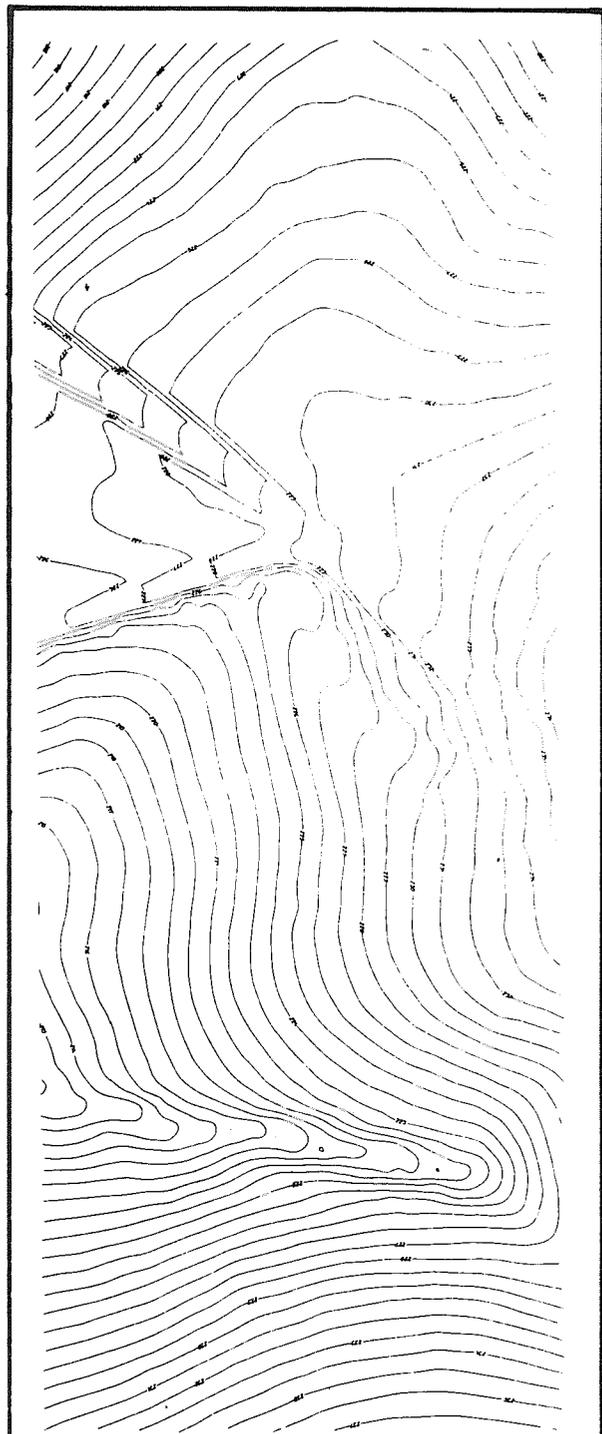
$a_{\max} = 32 \text{ m} +$

$a_{\min} = 8 \text{ m} \cdot$

Verarbeitung: Lehrgebiet Topographie
u. Kartographie

Maßstab: 1 : 1000 im Original

Abb. 10



Erfassung: 8 m - Raster
konstante Rasterweite

Verarbeitung: Lehrgebiet Topographie
u. Kartographie

Maßstab: 1 : 1000 im Original

Abb. 11