

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

Helmut Rüdener
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen
Universität Hannover, West-Germany

EXPERIMENTELLE GENAUIGKEITSANALYSE DIGITALER HÖHENMODELLE

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Genauigkeit digitaler Höhenmodelle (DHM) werden in einem experimentellen Test interpolierte und reale Gelände­flächen in digitaler (Höhendifferenzen an Kontrollpunkten) und analoger Form (Schichtlinien, Querprofile) verglichen. Die Genauigkeitsergebnisse werden als Funktion verschiedener Parameter (insbesondere Punktdichte, Erfassungsverfahren und Geländetyp) dargestellt. Die Kenntnis des Genauigkeitsverhaltens digitaler Höhenmodelle gestattet sodann Rückschlüsse auf optimale Erfassungsverfahren.

Abstract

An experimental accuracy-test for digital height models (DHM) was made. Therefore the interpolated surface of a test area was compared with the real terrain surface in digital (control-points) and analogous form (contours, cross-sections). The accuracy-results are presented as a function of various parameters (point-density, acquisition-mode, terrain-type, interpolation method) and conclusions are made for an optimal acquisition-procedure.

1. Einleitung

Der Einsatz von Meßinstrumenten mit digitaler Registrierung und die automatische Weiterverarbeitung der Daten ermöglichen heute integrierte Erfassungs- und Verarbeitungsverfahren, in denen ein kontinuierlicher Datenfluß vom Meßgerät bis zur Ergebnisdarstellung in on-line oder off-line Verarbeitung vorhanden ist.

Ein Beispiel ist die digitale Erfassung von Gelände­flächen und die sich anschließende rechnerische Bearbeitung.
Anwendungsgebiete sind hier die Topographie und der Straßenentwurf.

Die Erfassung der Geländedaten kann entweder terrestrisch mit Registriertachymetern oder mit photogrammetrischen Auswertegeräten erfolgen.

Abb. 1 zeigt das Blockdiagramm eines solchen integrierten Erfassungs- und Berechnungssystems für die photogrammetrische Datenerfassung und die Verarbeitung der Daten für Entwurfszwecke im Straßenbau.

Die photogrammetrische Datenerfassung kann aus dem Ziehen von Höhenschichtlinien bestehen oder aus der Messung von Einzelpunkten, wobei zu unterschei-

den ist zwischen Punkten zur Lagedarstellung und nach topographisch-morphologischen Gesichtspunkten verteilten Höhenpunkten. Die höhenmäßige Erfassung kann des weiteren bestehen aus der Messung eines regelmäßigen Stützpunktrasters oder aus dem Abfahren von Profilen. Eine direkte Messung von Projektdaten stellt für Straßenbauzwecke die Messung von Achsquerschnitten dar.

Nach der Transformation der Daten in ein übergeordnetes Koordinatensystem werden diese über eine standardisierte Schnittstelle einem entsprechenden Verarbeitungsprogramm zugeführt.

Die Untersuchungen, über die hier berichtet werden, betreffen ausschließlich die Höheninformation. Die dabei beschrifteten Wege sind im Blockdiagramm durch Doppelstriche gekennzeichnet.

Für den Bereich der Verarbeitung und Darstellung von Geländehöhen ist das "Digitale Geländemodell (DGM)¹⁾ ein zentraler Baustein.

Mit entsprechenden Rechenalgorithmen werden dort aus einem Stützpunktfeld die Höhen von beliebigen Zwischenpunkten interpoliert, die im allgemeinen in einem engmaschigen Gitter angeordnet sind.

Aus dem DGM können sodann in weiteren Bearbeitungsschritten Folgeprodukte abgeleitet werden, wie Achsquerschnitte und Höhenschichtlinien. Des weiteren können auch Steuerdaten für die digitale Orthophotoherstellung berechnet werden.

An diese Folgeprodukte werden seitens der Anwender genauigkeits- und qualitätsmäßige Anforderungen gestellt, welche naturgemäß den Forderungen an die bisher konventionell erzeugten Produkte entsprechen.

Den Untersuchungen liegt nun folgende Situation zugrunde:

Seit ca 10 Jahren liegt eine Vielzahl von komplexen Programmen zur Verarbeitung Digitaler Geländemodelle sowie besonders im photogrammetrischen Bereich ein Angebot von verschiedenen Geräten und Verfahren zur höhenmäßigen digitalen Datenerfassung vor, ohne daß systematisch untersucht worden wäre, welchen Einfluß insbesondere die Datenerfassung auf das Genauigkeitsverhalten der Verarbeitungsergebnisse und auf den Gesamtaufwand dieser digitalen Verfahren hat.

Diese Information ist jedoch wesentlich für die praktische Anwendung.

Die Komponente des Interpolationsalgorithmus, dem vornehmlich das bisherige Interesse galt, ist dabei sicherlich nicht zu vernachlässigen. Vergleiche zeigen auch, daß verschiedene Interpolationsansätze an einzelnen Stellen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können; es geht aber auch aus allen bisher durchgeführten Untersuchungen hervor, daß es die Datenerfassung ist, welche das potentiell erreichbare Qualitätsniveau angibt und die verschiedenen Interpolationsverfahren dieses vorgegebene Niveau nur mehr oder weniger gut realisieren.

In der Untersuchung wird deshalb experimentell unter Verwendung eines Testgebiets die Leistungsfähigkeit von photogrammetrischen Verfahren zur Erfassung von Höhendaten für die Verarbeitung in "Digitalen Geländemodellen" untersucht und zwar durch eine systematische Analyse der auf diesem Wege erreichbaren Genauigkeit der höhenmäßigen Geländerepräsentation und durch die Bestimmung des Zeitaufwands der verschiedenen Verfahren.

Eingebettet in die Untersuchungen war ein Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr, der speziell die photogrammetrische Datenerfassung für die

1) Zur exakten Abgrenzung von der Lagedarstellung ist auch der Begriff "Digitales Höhenmodell" (DHM) gebräuchlich

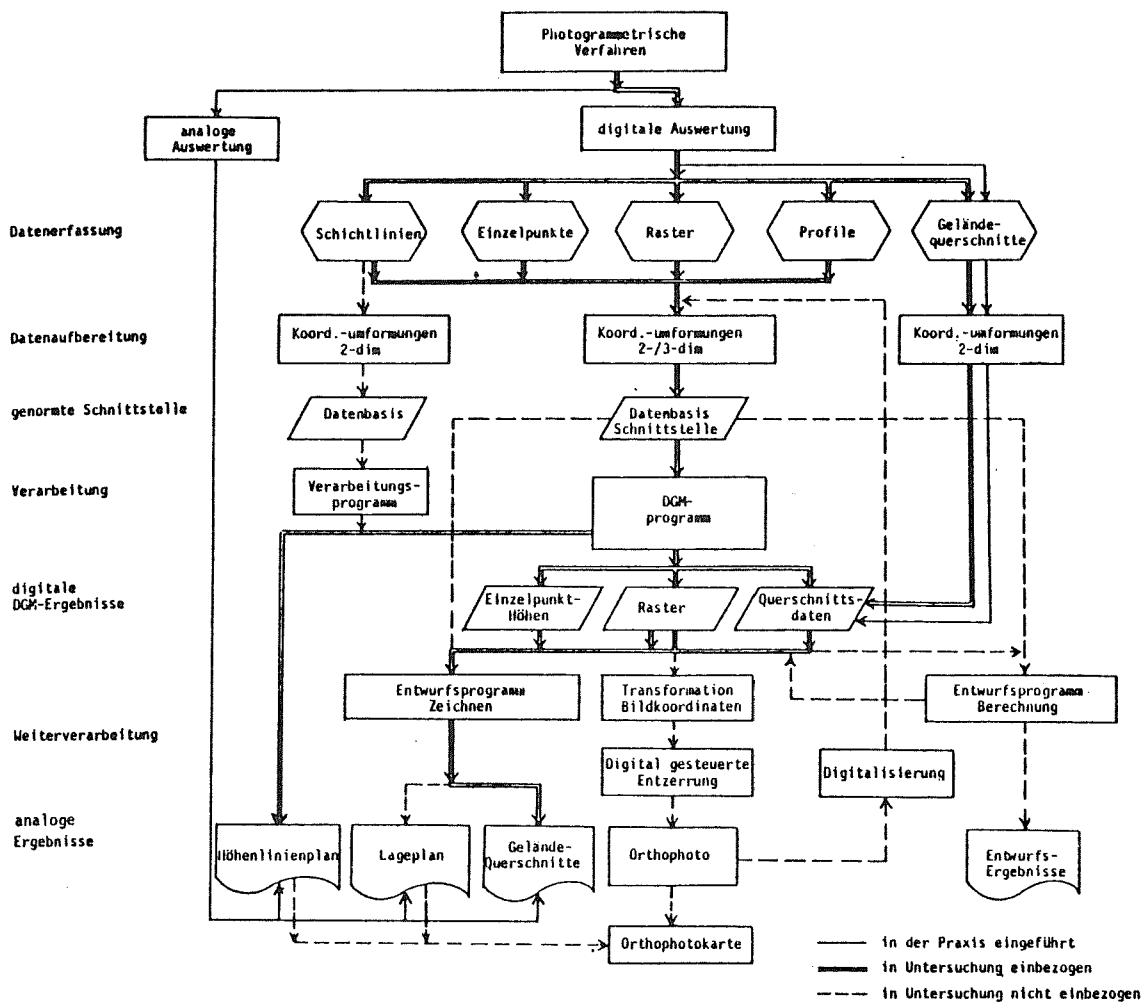


Abb. 1: Photogrammetrische Strukturdatenerfassung in einem integrierten Straßenbau - Entwurfssystem

digitale Verarbeitung zum Zwecke des Straßenentwurfs zum Inhalt hatte /1/.

Dies wird in der Anlage der experimentellen Untersuchung berücksichtigt werden durch:

1. großmaßstäbiges Bildmaterial,
2. Berechnung straßenbaurelevanter Ergebnisse wie Achsquerschnitte aus dem DGM unter Beachtung der hohen, im Dezimeterbereich liegenden Genauigkeitsforderungen bei der Beurteilung.

2. Beschreibung des Experiments

Die einzelnen Komponenten, die als genauigkeitsbeeinflussend anzusehen sind, sind in Abb. 2 dargestellt.

Die Genauigkeit der Stützpunkthöhen, also die Meßgenauigkeit, wird beeinflusst durch die Art der Punktregistrierung, durch das benutzte Auswertegerät sowie in bekannter Weise durch den Bildmaßstab.

Die Stützpunktdaten werden dann einem Interpolationsprogramm zugeführt, wobei sich die Genauigkeit der dort interpolierten Höhen aus der Meßgenauigkeit

der Stützpunkte ableiten läßt.

Diese Bestimmungsgenauigkeit stellt jedoch noch keinen relevanten Wert für die Genauigkeit dar, mit der dieses interpolierte Punktfeld das tatsächliche Gelände darstellt.

Die Genauigkeit der Geländerepräsentation - und auf die kommt es letztlich an - wird sicherlich noch beeinflußt vom Gelände selbst und der Dichte und Anordnung der Stützpunkte.

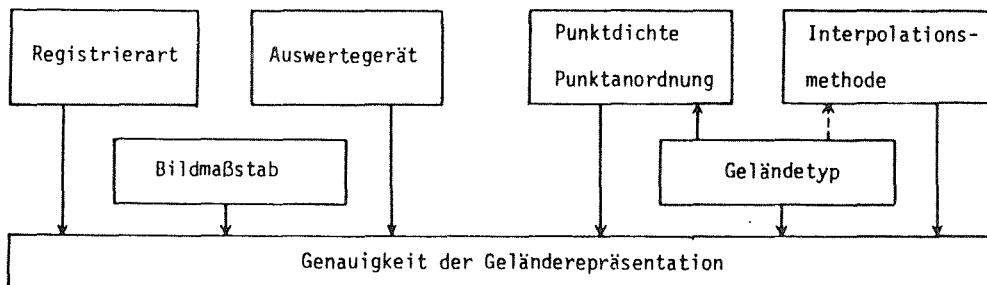


Abb. 2: Genauigkeitsparameter der Geländerepräsentation

Zur Untersuchung der verschiedenen Parameter wurde das Testgebiet "Spitze" bei Köln in Zusammenarbeit mit dem Landschaftsverband Rheinland eingerichtet (Abb. 3). Es ist ca. 0,5 km² groß und weist eine stark variierende Geländestruktur auf (mittlere Geländeneigung ca. 7°).

Der gewählte Bildmaßstab war 1 : 4 000. Das Testgebiet wird damit von 2 Modellen überdeckt. Dieser Maßstab hat sich für die Planung im Straßenbau zur Festlegung der erforderlichen Höhen und zur hinreichenden Erkennung von Details bewährt.

Da die absolute Genauigkeit der interpolierten digitalen Geländemodell-Resultate von größtem Interesse war, wurde gleichzeitig ein zweiter Bildflug im Maßstab 1 : 1 800 ausgeführt, um die Auswertung der 1 : 4 000 Bilder zu vergleichen.

An Auswertegeräten kamen bei der Untersuchung 4 Geräte zum Einsatz, und zwar

- 2 Analoggeräte mit Hardware-Registriereinheiten.
(Es waren 1 Zeiss Planimat und ein Wild A 10)
- 1 Analoggerät mit Rechnerunterstützung durch einen angeschlossenen frei-programmierbaren Rechner. Der Datenfluß geht dabei nur vom Auswertegerät zum Rechner.
- 1 rechnergesteuertes, analytisches Auswertegerät - sog. Analytischer Plotter - mit einem geschlossenen Regelkreis. Der Rechner arbeitet hier als Prozeßrechner.

Hier stand der AP/C-3 von O.M.I. zur Verfügung, der für die Geländehöhen-erfassung an der Universität Hannover speziell programmiert worden ist.

Die verschiedenen Arten der photogrammetrischen Geländehöhen-erfassung können nach der Art der Bewegung der Meßmarke im Stereomodell und der Art der Punkt-messung klassifiziert werden (Abb. 4).

Die Erfassung eines regelmäßigen Rasters bedeutet, daß die Punkte automatisch in der Lage angefahren werden, wobei die Geschwindigkeit der Meßmarke eine trapezoidische Funktion darstellt. Der Auswerter muß nur die Höhe bei ruhender Meßmarke manuell einstellen und die Registrierung auslösen wobei gleichzeitig der nächste Punkt angefahren wird.

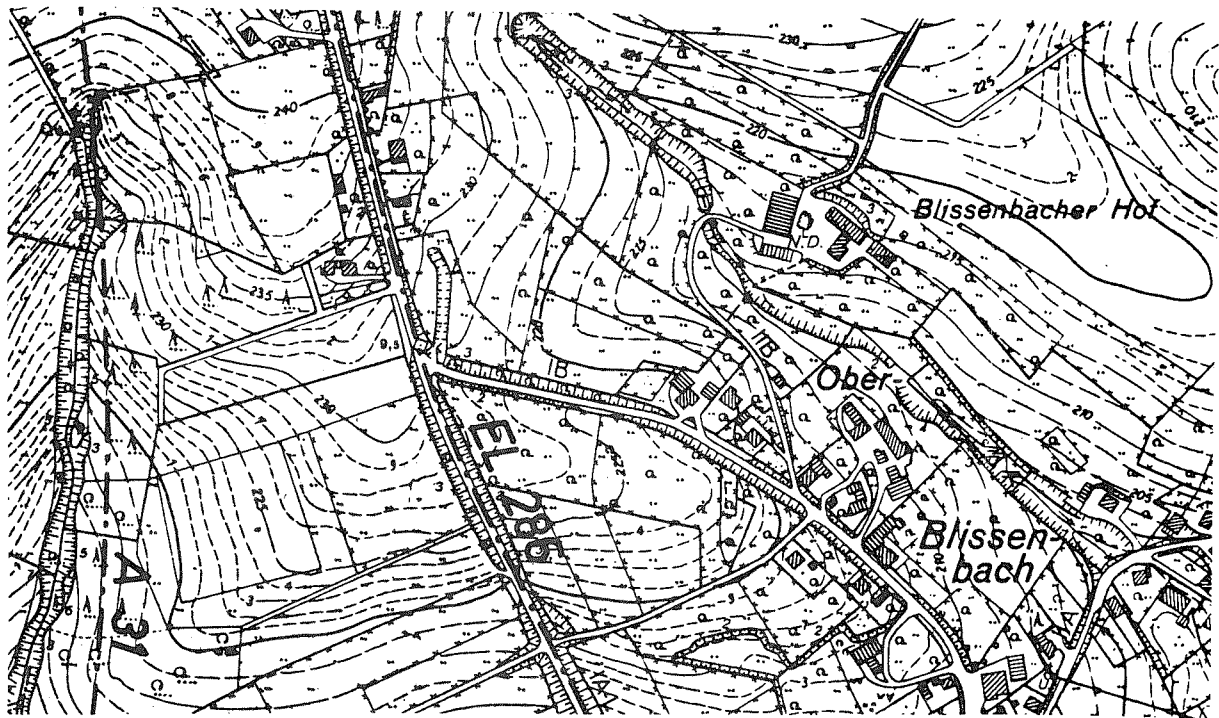


Abb. 3: Ausschnitt des Testgebiets (Deutsche Grundkarte 1 : 5 000)

Registriermethode	Bewegung der Meßmarke		Art der Punktmessung	
	manuell	halbautomat.	statisch	dynamisch
Raster		x	x	
Profile		x		x
Höhenlinien	x			x
Einzelpunkte	x		x	

Abb. 4: Einteilung der digitalen Registriermethoden

Unter Digitalisierung im Profil versteht man eine kontinuierliche automatische Abtastung von in der Lage festgelegten Profilrichtungen mit konstanter oder variabler Geschwindigkeit, wobei die Höhen automatisch in konstanten räumlichen, zeitlichen oder höhenmäßigen Intervallen registriert werden.

Die manuellen Methoden der Erfassung von Schichtlinien und von nach topographisch-morphologischen Gesichtspunkten verteilten Einzelpunkten bedürfen keiner weiteren Erklärung.

Zur Verarbeitung der erfaßten Daten wurden zwei DGM-Programmsysteme verwendet:

Das erste ist das Programm von Messerschmitt-Bölkow-Blohm in München, welches eine kubische Fläche auf ein Dreiecknetz aus Stützpunktverbindungen auf deterministische Weise bestimmt.

Das zweite Programm ist das Stuttgarter Schichtlinienprogramm "SCOP" von Kraus, welches die lineare Prädiktion verwendet.

Zusätzlich dazu wurden auch lineare Interpolationsprogramme eingesetzt.

Zur Bestimmung der Höhengenaugigkeit wurden ca. 800 Kontrollpunkte photogrammetrisch im Bildmaßstab 1 : 1 800 gemessen. Diese Höhen wurden als quasi wahre Vergleichswerte für die später interpolierten Höhen herangezogen.

Die an unabhängigen Kontrollpunkten ermittelte Genauigkeit von 0.02 m in der Lage und 0.03 m in der Höhe rechtfertigt diese Maßnahme.

Die Punkte wurden in drei Geländeklassen eingeteilt:
und zwar in

1. einfaches Gelände, 2. mittleres Gelände, 3. schwieriges Gelände,
wobei die Einteilung qualitativ nach dem Grad der Bewegtheit des Geländes erfolgte und somit sicher eine stark subjektive Komponente aufweist.

Zusätzliche Kontrollpunkte wurden in Gebieten mit natürlichen und künstlichen Bruchkanten und in bebauten Gebieten gemessen.

Ein zweiter Vergleich bestand in der Gegenüberstellung von gemessenen und gerechneten Geländequerschnitten einer vorgegebenen Straßenachse.

Schließlich wurden die interpolierten Schichtlinien im Kartierungsmaßstab 1 : 1 000 mit der Kontrollauswertung der Tiefbefliegung verglichen und zwar auf zwei verschiedene Arten:

1. Es wurde die geometrische Höhengenaugigkeit aus den Lageabweichungen ermittelt.
2. Zusätzlich wurde die Richtigkeit der Schichtlinien in bezug auf die morphologische Wiedergabe überprüft; dies geschah visuell, da es hierfür keine andere in der Aussage zufriedenstellende Vergleichsmethode gibt.

3. Ergebnisse des Experiments

3. 1 Vergleich der Datenerfassung

Der erste Schritt der Analyse der DGM-Repräsentationsgenauigkeit stellt der Vergleich der Datenerfassungsgenauigkeit dar. Von dieser kann angenommen werden, daß sie die maximal erreichbare Genauigkeit darstellt. Bei der dynamischen Profilmessung ist die Erfassungsgenauigkeit mit der Abtastgeschwindigkeit und damit mit dem Zeitaufwand korreliert. Da der Vergleich des Zeitaufwands für die praktische Anwendung von Interesse ist, wird dieser für alle Verfahren zusätzlich zu den Erfassungsgenauigkeiten dargestellt.

Die Untersuchung der Erfassungsgenauigkeit ergab für die Einzelpunkt- und die schrittweise Rastermessung den geringsten mittleren Fehler von + 0.07 m, was etwas mehr als 0.1 ‰ der Flughöhe entspricht. Die anderen Erfassungsarten wiesen größere Fehlerwerte auf: bei der Digitalisierung der Schichtlinien ergab sich + (0.13 + 0.4 tan α) m, also mindestens 0.2 ‰ hg. Insbesondere wurde die kontinuierliche Profilmessung merklich ungenauer, je größer Meßmarkengeschwindigkeit und Geländeneigung waren.

Das Diagramm (Abb. 5) zeigt die verschiedenen Profilabtastungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Geländeneigung und Höhenfehler. Als Ergebnis zeigt sich, daß nur eine niedrige Abtastgeschwindigkeit erlaubt ist, wenn die Genauigkeit von etwa 0.2 ‰ der Flughöhe eingehalten werden soll. Für einen Mittelwert von 7 ‰ für die Geländeneigung, welcher für das Testgebiet charakteristisch ist, wurde eine mittlere Geschwindigkeit von

0.6 mm/s im Bild als akzeptabel gefunden. Die maximal erlaubte Geschwindigkeit von 2 mm/s konnte verlässlich nur in einfachem und flachem Gelände angewandt werden.

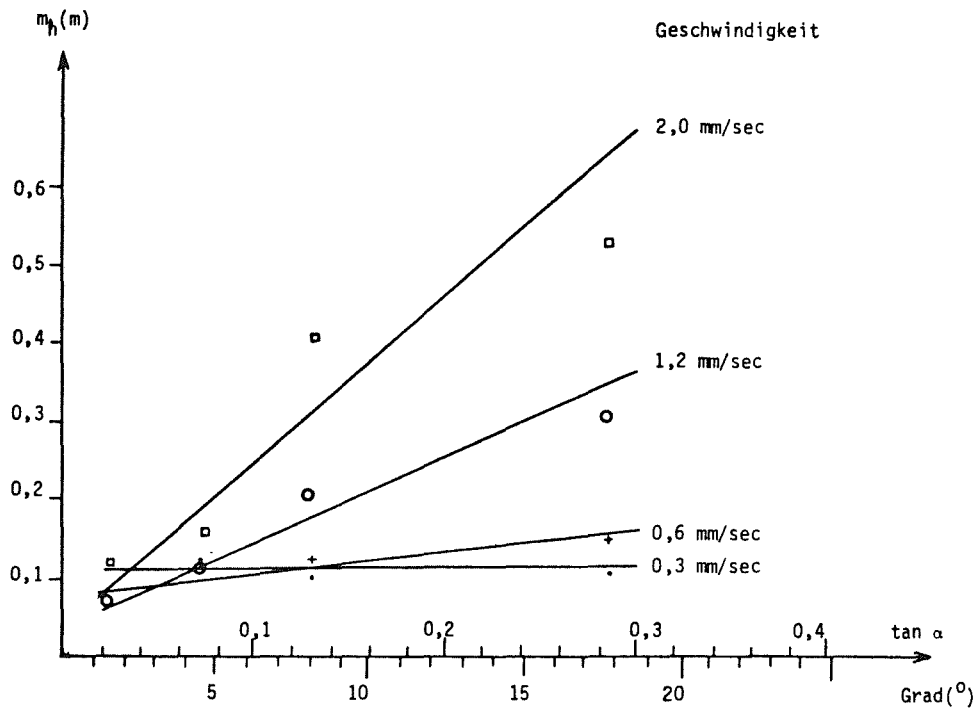


Abb. 5: Absoluter mittlerer Höhenfehler von Profilen in Abhängigkeit von Meßmarkengeschwindigkeit und Geländeneigung. ($M_b = 1 : 4000$)

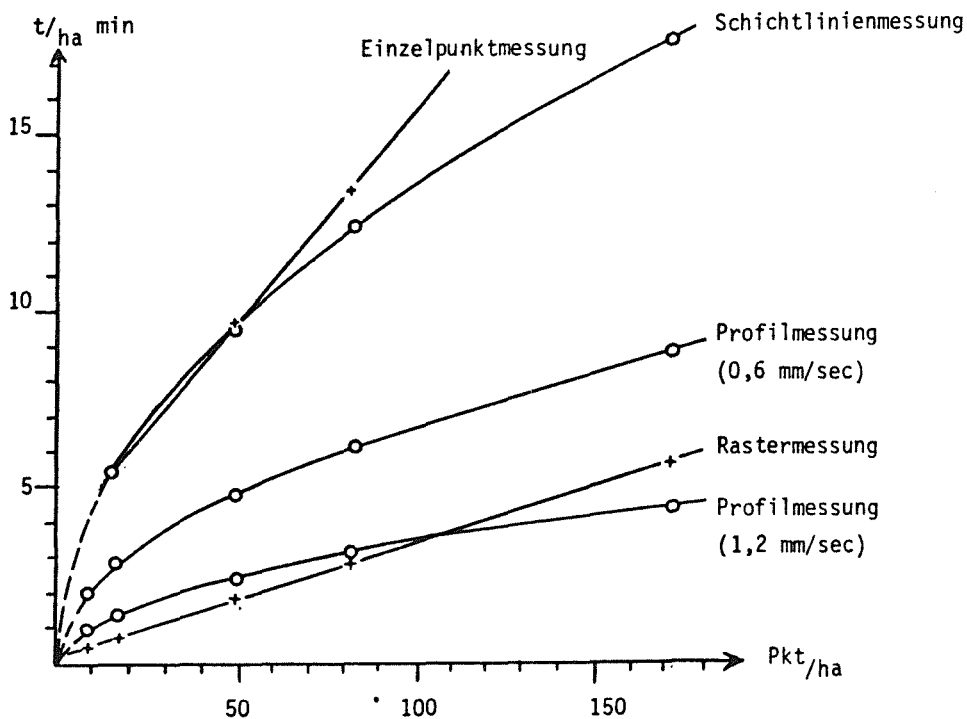


Abb. 6: Zeitvergleich von Raster-, Profil-, Einzelpunkt- und Schichtlinienmessung.

In Abb. 6 sind die verschiedenen Erfassungszeiten pro Hektar in Abhängigkeit von der Punktdichte dargestellt.

Beim Zeitaufwand zeigt sich ein deutlicher Vorteil der halbautomatischen Rastermessung. Diese kann für die dargestellten Punktdichten bis zu 8-mal schneller sein als die Messung von Einzelpunkten und Schichtlinien. Sie ist außerdem durch die genannte Einschränkung in der Geschwindigkeit bei der Profilabtastung dieser zeitlich überlegen¹⁾.

Die halbautomatische Messung eines regelmäßigen Punktrasters hat sich somit in bezug auf die Datenerfassung als die schnellste und mit genaueste Methode erwiesen.

3.2 Vergleich der Genauigkeit der Interpolationsergebnisse

Die Ergebnisse des Genauigkeitsvergleichs interpolierter Höhenpunkte in verschiedenen Geländeklassen sowie des Vergleichs interpolierter Querprofile und Schichtlinien sind in den Tabellen des Schlußberichts des Forschungsauftrags /1/ enthalten. Sie sind dort im Detail diskutiert. Insgesamt wurden ca. 160 000 Stützpunkte erfaßt und 28 Datensätze verarbeitet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die absolute mittlere Genauigkeit von interpolierten Punkten die Meßgenauigkeit der Stützpunkte erreichen kann.

Hierbei konnten wiederum die besten Ergebnisse durch die statischen Erfassungsmethoden erzielt werden, da diese wie schon erwähnt die höchste Meßgenauigkeit erbrachten.

In Abb. 7 sind die mittleren Höhenfehler der Kontrollpunkte für verschiedene Dichten eines regelmäßigen Stützpunktrasters und für verschiedene Geländetypen dargestellt.

Z. B. beträgt die erreichte Genauigkeit der Geländerepräsentation ausgehend von einem 8 m-Raster in einfachem Gelände ± 0.07 m, was in etwa der Meßgenauigkeit der Punkte entspricht. Bei schwierigem Gelände werden bei gleicher Rasterweite ± 0.20 m erreicht.

Die Abhängigkeit vom Punktabstand erweist sich als linear, wobei der Geländecharakter die Steigung der Regressionsgeraden beeinflusst. Die aus der Gesamtheit der Höhendifferenzen der 800 Kontrollpunkte ermittelten Koeffizienten c_0 und c_1 der Regressionsgeraden $m_h = \pm (c_0 + c_1 a)$ mit der Rasterweite a nehmen die in Abb. 8 dargestellten Werte an.

Dabei muß einschränkend gesagt werden, daß sie zunächst nur für den Bereich der untersuchten Stützpunktabstände und für das hier vorhandene Gelände gelten können.

Bei der Digitalisierung von Geländeflächen durch eine halbautomatische Rastermessung ist also für jeden Geländetyp eine bestimmte Rasterweite erforderlich.

Um z. B. den Fehler geringer als 20 cm zu halten, wurde ein Stützpunktraster von 30 m in einfach strukturiertem Gelände des Testgebietes als ausreichend ermittelt. In leicht hügeligem Gelände war das erforderliche Rasterintervall etwa 15 bis 20 m. In schwierigem Gelände wurde ein enges Raster mit einer Weite von <10 m für notwendig befunden.

Andere Datenerfassungsmethoden reagieren bei uneinheitlich strukturiertem Gelände weniger empfindlich, da dort die Punktdichte lokal variiert werden

1) Unter der Voraussetzung, daß der mittlere Punktabstand auf den Profilen bzw. Linien selbst mit dem Profil- bzw. mittleren Linienabstand übereinstimmt.

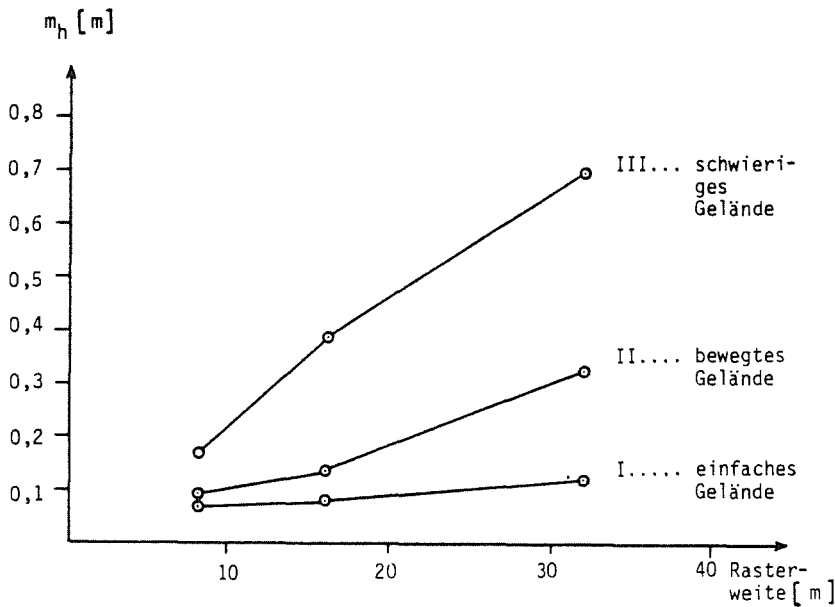


Abb. 7: Verhältnis von Rasterweite und mittl. Höhenfehlern im DGM

Geländeklasse	c_0 [m]	c_1
I (einfaches Gel.)	0,05	0,002
II (bewegtes Gel.)	0,01	0,010
III (schwieriges Gel.)	0,02	0,020

Abb. 8: Koeffizienten der Regressionsgeraden von mittl. Höhenfehlern und Rasterweiten

kann. Allerdings sind diese Variationsmöglichkeiten nicht zufriedenstellend. Sie sind entweder subjektiv (Einzelpunkte), neigungsabhängig (Schichtlinien) oder richtungsbezogen und abhängig von der Variation der Abtastgeschwindigkeit (kontinuierliche Profile mit Registrierung in Zeitinkrementen).

Die Verarbeitung der Daten mit linearen Interpolationsprogrammen ergab, daß durch die Einfachheit der mathematischen Behandlung die Genauigkeit nicht wesentlich abnimmt. Der Interpolationsalgorithmus erwies sich bei der Betrachtung von mittleren Höhendifferenzen zwischen Gelände- und Interpolationsflächen als nicht relevant.

In Abb. 9 und Abb. 10 wird am Beispiel von Geländequerschnitten einer Straßenachse das Verhalten der interpolationsbedingten Höhendifferenzen dargestellt.

Querschnitte und auch Höhenschichtlinien stellen Punktverbände dar, wo auch die Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Punkte von Bedeutung sind. Wie man an den aufgetragenen Höhendifferenzen in Abb. 9 erkennen kann, zeigen die interpolationsbedingten Fehler ein lokal-systematisches Verhalten.

In Abb. 10 wird dieses Verhalten nochmals an den Autokorrelationskoeffizienten der Höhendifferenzen aller Querschnitte gezeigt: die Korrelation zwischen benachbarten

Beispiele für die Schichtliniengenauigkeit als Funktion der Geländeneigung sind in den nächsten beiden Abbildungen 11 und 12 gezeigt. Die Fehlerverteilung der Analogauswertung ist dort ebenfalls angegeben. Offenbar hängt die Genauigkeit automatisch berechneter Schichtlinien viel mehr von der Geländeneigung ab, als dies bei Schichtlinien, die im Auswertegerät manuell gemessen worden sind, der Fall ist.

In Gebieten mit leicht geneigtem Gelände sind die interpolierten Schichtlinien im allgemeinen genauer als die manuell gezogenen. Bei steilerem Gelände ist dies umgekehrt.

Dieser Effekt kann erklärt werden durch die Schwierigkeiten, die Meßmarke in ebenem Gelände entlangzuführen, während es leicht ist, eine Schichtlinie an einem steilen Hang zu verfolgen.

Eine Überprüfung der Fehlergeraden zeigt allerdings für die vorliegenden Werte mit Ausnahme der extremen Neigungen nur eine schwache Abhängigkeit der Höhengenaugigkeit von der Neigung.

Es ist wiederum überraschend, daß die Höhengenaugigkeit der einfachen linearen Interpolation fast äquivalent ist mit den komplizierteren Interpolationsmethoden.

Alle bisher gemachten Genauigkeitsangaben stellen Mittelwerte dar. Daran gemessen konnte ein Einfluß der Punktanordnung und Interpolationsmethode nicht deutlich erkannt werden.

Unterschiede in Interpolationsansatz und Punktanordnung konnten nur an Einzelformen bei der Begutachtung der morphologischen Richtigkeit von Schichtlinien eindeutig erkannt werden.

Insbesondere für Schichtliniendarstellungen bedürfen Bruchkanten einer besonderen Berücksichtigung in Erfassung und Verarbeitung.

Topographisch verteilte Einzelpunkte waren bei gleicher Punktdichte nicht grundsätzlich besser in der Wiedergabe von Details als die rasterförmige Stützpunktanordnung.

Ein eindeutiger Vorteil einer der beiden verwendeten höheren Interpolationsprogramme war in bezug auf die morphologisch richtige Detaildarstellung insgesamt nicht gegeben. Einfache Verfahren zeigten hier allerdings mindere Qualität.

Für eine ausführlichere Betrachtung wird auf den Schlußbericht /1/ verwiesen. Dort sind interpolierte Schichtlinien aus verschiedenen Stützpunktanordnungen und Interpolationsalgorithmen an einzelnen Geländeformen zusammen mit der direkten Auswertung des Bildmaßstabs 1 : 1 800 dargestellt und diskutiert.

Der Nachteil aller digital errechneten Schichtlinien ist, daß unsichere Gebiete wie bebauter Gelände oder bewaldete Zonen nicht durch gestrichelt gezeichnete Signaturen als unsicher bestimmte Erfassung in der Eddarstellung gekennzeichnet werden.

Zusammengefaßt konnte in der Untersuchung grundsätzlich festgestellt werden, daß die automatische Verarbeitung von Geländedaten Ergebnisse von hoher Qualität und Genauigkeit liefern kann, die den konventionell erstellten Ergebnissen nur wenig nachstehen.

Insbesondere bietet die halbautomatische Messung eines regelmäßigen Stützpunktrasters die meisten Vorteile bezüglich der Meßgenauigkeit und dem Erfassungsaufwand.

Die Genauigkeit der Geländerepräsentation erwies sich als linear abhängig vom Stützpunktstand, wobei der Geländecharakter den Regressionskoeffizienten beeinflußt. Die Bestimmung des Geländetyps ist allerdings noch subjektiv.

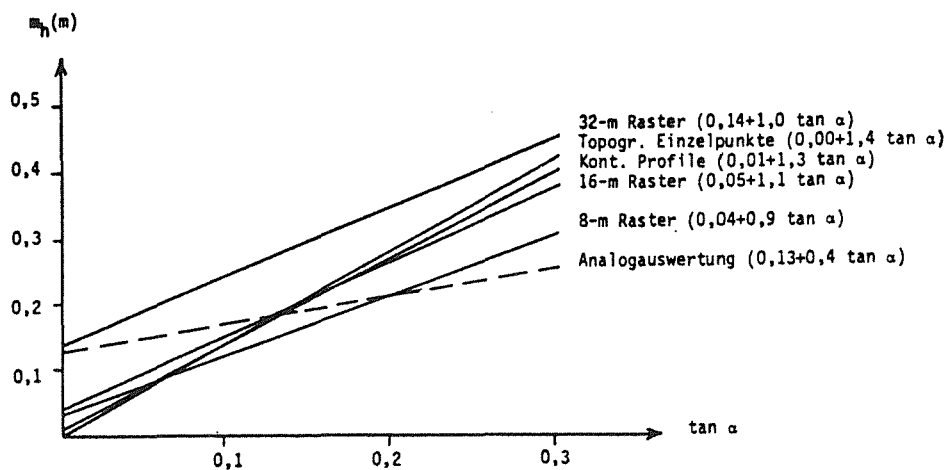


Abb. 11: Schichtlinienvergleich nach Koppe
(Verarbeitung mit MBB-Programm)

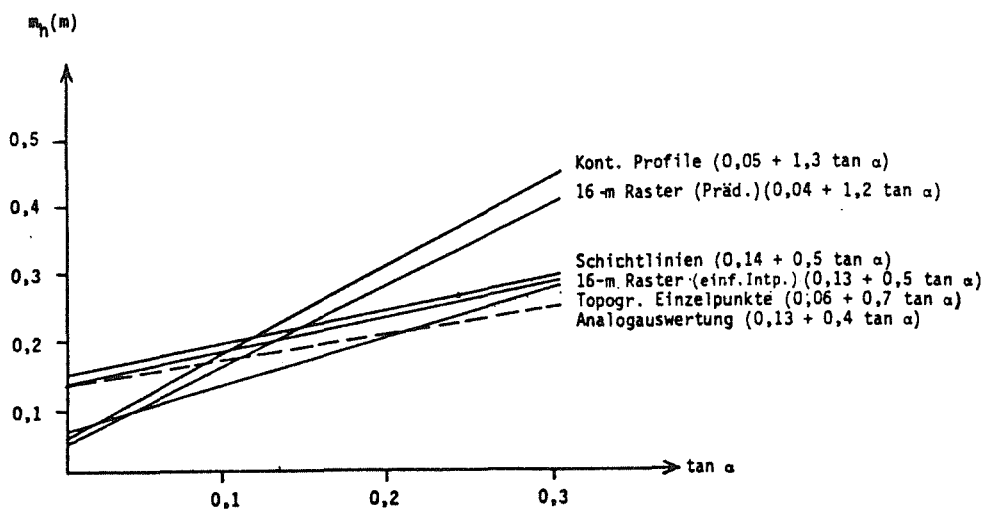


Abb. 12: Schichtlinienvergleich nach Koppe
(Verarbeitung mit Stuttgarter Höhenlinienprogramm)

Das Ziel muß also sein, einen Geländeparameter zu ermitteln, welcher ein Maß für die Regressionskoeffizienten (Steigung der Regressionsgeraden) von Stützpunktabstand und Repräsentationsgenauigkeit darstellt und dadurch die bisher verwendete subjektive Geländecharakterisierung auf objektive, d. h. meßbare Weise ersetzt.

Bei der Untersuchung verschiedener Parameter konnte ein guter linearer Zusammenhang zwischen der Gelände­krümmung und der Höhengenaugkeit festgestellt werden.

Als weiterer Indikator für in Interpolationsberechnungen zu erwartende Höhenfehler erwies sich die Varianz eines in Größe und Anzahl genormten

Stützpunktfeldes gegen eine Polynomfläche 2. Ordnung ¹⁾.

Die Geländekrümmung stellt dabei eine anschaulichere und natürlichere Geländecharakterisierung dar. Sie ist außerdem geeignet, das Gelände an lokalen Stellen zu charakterisieren, was im großmaßstäbigen Bereich zur Darstellung von Kleinformen wichtig ist.

Die zu erwartende Genauigkeit m_h digitaler Höhenmodelle kann nun näherungsweise angegeben werden als Funktion der Geländekrümmung K_m , des Stützpunktabstands a und dem empirisch bestimmten Proportionalitätsfaktor c (hier 0.2). Dazu ist noch der Meßfehler m_o zu addieren:

$$m_h^2 = m_o^2 + (c \cdot K_m \cdot a)^2$$

m_o ... Meßfehler

c ... Konstante (hier: $c = 0.20$)

K_m ... mittl. Krümmung

a ... Stützpunktabstand

4. Schluß

Das in den Untersuchungen entwickelte Genauigkeitsmodell Digitaler Höhenmodelle zeigt, daß bei gegebenen Geländebeziehungen der Stützpunktabstand der entscheidende Parameter darstellt.

In den meisten Fällen der Praxis wird es so sein, daß versucht werden muß, die lokalsystematische Fehlerkomponente zu vermeiden, wenn das Ergebnis genauigkeitsmäßig mit einer direkten Erfassung konkurrieren soll.

Um die Genauigkeit der Geländerepräsentation in Digitalen Höhenmodellen mit minimaler Punktdichte an die Meßgenauigkeit der Stützpunkte heranzuführen, ist eine objektive Bestimmung der Punktdichte, die auch den lokalen Geländebeziehungen entspricht, notwendig. Dazu sind Verfahren erforderlich, die bei der Messung im auszuwertenden Modell eine rechnerische Analyse ermöglichen. In /2/ werden solche Verfahren zur objektiven Punktdichtenbestimmung für rechnerunterstützte und rechnergesteuerte Auswertegeräte (Analytische Plotter) beschrieben und untersucht.

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.: Analytische Plotter-Programme zur objektiven Punktdichtenbestimmung in Digitalen Höhenmodellen. Presented Paper, Komm. II/IV, ISP-Kongreß Hamburg 1980

1) Die berechneten Korrelationskoeffizienten von Krümmung bzw. Varianz und interpolationsbedingten Höhenfehlern lagen zwischen 0.7 und 0.8. Die Linearität der Regressionsgeraden sowie die Abweichung der Geradensteigung von $\beta = 0$ waren beide signifikant.