

ERFAHRUNGEN MIT DEM STUTTGARTER HÖHENLINIENPROGRAMM

Von W. Stanger, Stuttgart

1. Einleitung

Vor zwei Jahren wurde das Stuttgarter Höhenlinienprogramm SCOP im Lehrgang "Numerische Photogrammetrie" (24. - 26.1.1973) an der Technischen Akademie Eßlingen vorgestellt [11]. Zu diesem Zeitpunkt waren einfachere Ansätze zur Automation der Höhenlinieninterpolation bereits fertig entwickelt (z.B. [14]). Anspruchsvollere Ansätze wie die Interpolation nach kleinsten Quadraten bzw. die lineare Prädiktion waren ebenfalls bekannt und programmtechnisch in Versuchsversionen realisiert.

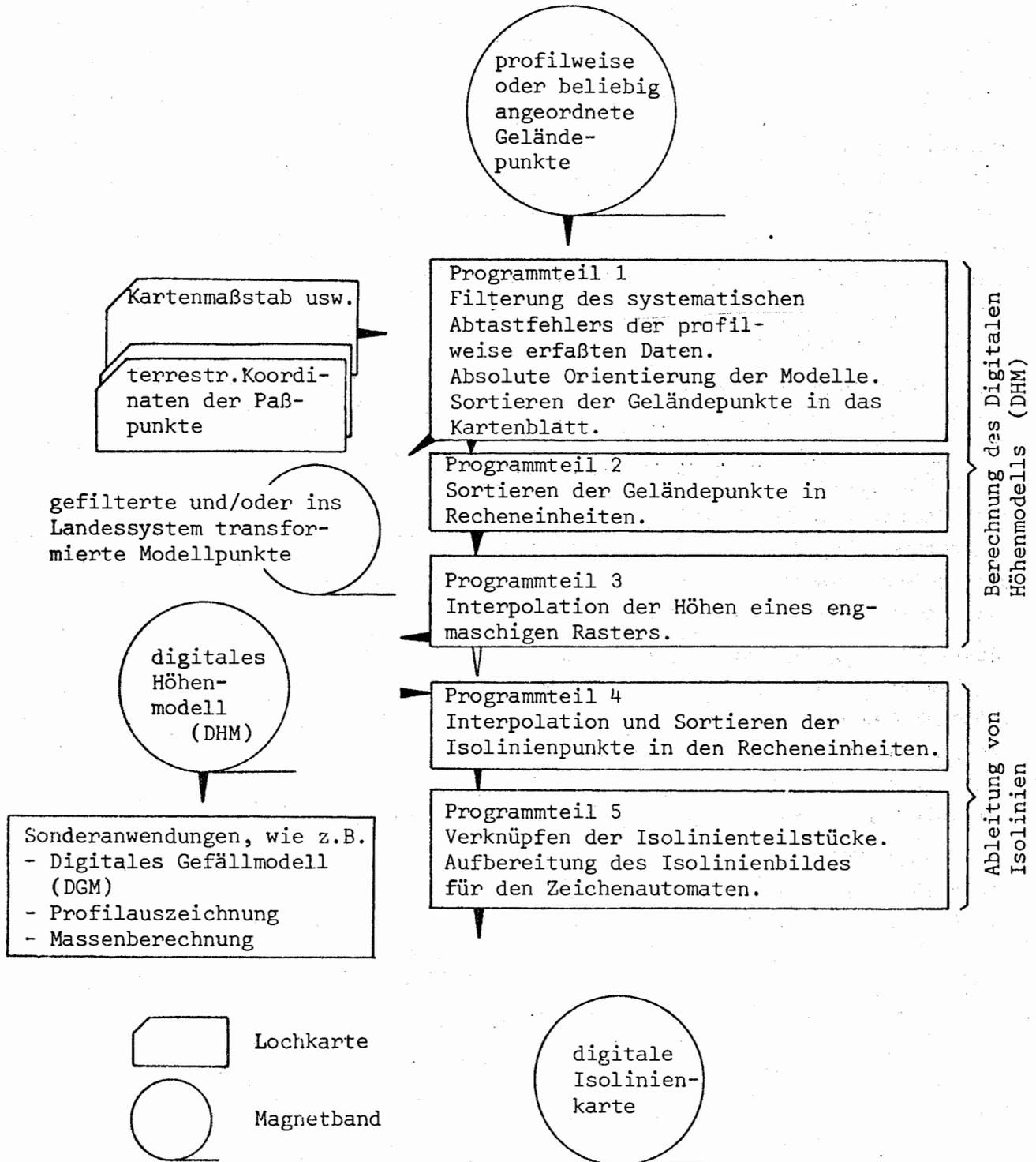
Nur wenige konnten sich damals vorstellen, daß die Höhenlinieninterpolation, die Erfahrung und topographische Interpretationsfähigkeit voraussetzt, ein geeignetes Einsatzgebiet für die Automation ist. Große Reserve bestand auch gegenüber Interpolationsansätzen wie der linearen Prädiktion. Es wurde bezweifelt, daß sich eine Geländeoberfläche überhaupt mit statistischen Methoden beschreiben läßt. Vielleicht trug dazu bei, daß sich dieser Ansatz einer geometrischen Deutung verschließt. Ferner schien der erforderliche hohe numerische Aufwand eine wirtschaftliche Anwendung der Methode in Frage zu stellen.

Durch die enge Verbindung der automatischen Höhenlinieninterpolation mit benachbarten Bereichen, wie z.B. mit der digitalen Grundrißdarstellung über die Datenerfassung, erkennen wir, wie schwer dieses wichtige Teilgebiet der Kartographie scharf abgegrenzt werden kann. Programmierung, Erprobung und Beurteilung der Ergebnisse der Versuchsauswertungen durch den kartographisch geschulten Praktiker und seine Vorschläge beeinflussen sich fortwährend.

Aus diesen Gründen kann hier nur ein Zwischenbericht über diese Entwicklung gegeben werden. Den Anfang sollen die praktischen Erfahrungen mit dem Programmsystem SCOP machen.

FLUSSDIAGRAMM

des Stuttgarter Höhenlinienprogramms (SCOP)



2.2 Interpolation der Höhenwerte

Das Kartenblatt wird in kleinere Teilgebiete, sogenannte Recheneinheiten (REen) zerlegt. Die Interpolation der Höhen des regelmäßigen Rasters mit Hilfe der linearen Prädiktion wird im Programmteil 3 recheneinheitenweise durchgeführt. Vorweg wird mit einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen eine Trendfläche in Form eines Polynoms niederen Grades durch alle Stützpunkte einer RE gelegt. Dieser Trend stellt die Großformen des Geländes dar. Die verbleibenden Kleinformen als Differenzhöhen zwischen Trendfläche und wahrer Geländeoberfläche werden mit der linearen Prädiktion behandelt. Dazu wird über die Differenzhöhen empirisch der Verlauf der Kovarianzfunktion bestimmt, wobei bei stetigen Geländeoberflächen eine Glockenkurve angenommen wird. Über die Kovarianzfunktion werden die Kovarianzen zur Lösung der bekannten Grundgleichung

$$h' = (C(\overline{P_1 P_1}) \dots C(\overline{P_n P_n})) \begin{pmatrix} V & C(\overline{P_1 P_2}) \dots C(\overline{P_1 P_n}) \\ C(\overline{P_1 P_2}) & V & C(\overline{P_2 P_n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C(\overline{P_1 P_n}) & C(\overline{P_2 P_n}) \dots & V \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} = c \cdot c^{-1} h$$

bestimmt. Als Ergebnis erhalten wir die Differenzhöhe im Rasterpunkt. Durch Addition der Höhe der Trendfläche ergibt sich die gesuchte Höhe des Rasterpunktes.

2.3 Datenerfassung

2.3.1 Punktgruppen bei der Digitalisierung

Im Programm werden folgende Punktgruppen unterschieden:

- a) Flächenbeschreibende Massenpunkte. Sie können profilweise, rasterförmig oder unregelmäßig verteilt erfaßt sein.
- b) Linienhafte Punktfolgen entlang geomorphologisch hervorragender Linien, wie
 - Bruchlinien, die Flächen unterschiedlicher Geländeneigung trennen,
 - Strukturlinien, die als Formlinien z.B. entlang von Bergrücken oder Talmulden gemessen werden.
- c) Markante Höhenpunkte an topographisch hervorragenden Punkten wie Sattel, Kuppen, Mulden.
- d) Singuläre Punkte, z.B. auf kleineren Dämmen oder in Einschnitten liegend.

Über Kennziffern erfolgt eine Unterscheidung der verschiedenen Punktgruppen. Die Punktgruppe a), b) und c) können, entsprechend ihrer Aufnahmege nauigkeit, verschiedene Gewichte erhalten und werden somit bei der Interpolation der Rasterhöhen unterschiedlich angehalten. Direkt digitalisierte Höhen- oder Formlinien können als Strukturlinien oder als Massenpunkte eingeführt werden.

Die singulären Punkte der Gruppe d) werden nicht zur Höheninterpolation herangezogen, sondern lediglich im Höhenlinienplan ausgezeichnet.

2.3.2 Allgemeine Grundsätze bei der Digitalisierung

Bei konventionellen Tachymeteraufnahmen werden Informationen über die Geländeoberfläche in zweifacher Form festgehalten: Zum einen durch tachymetrisch bestimmte Einzelpunkte, zum anderen durch zusätzliche Informationen, die im Feldbuch festgehalten werden. Dies können Geländegerippe-, Form- oder Falllinien oder Höhenangaben bei Böschungen und Stützmauern sein. Ist ein gleichmäßig geneigter Hang nur durch weitabständige Profile aufgemessen, so lautet die Zusatzinformation gleichmäßig geneigte Ebene.

Fallen bei einer automatischen Auswertung diese Informationen ersatzlos weg, so ist unser mathematischer Ansatz zur Höheninterpolation nicht ausreichend. Entweder muß er geändert werden oder ein Teil der Zusatzinformationen muß durch eine vermehrte Registrierung von Einzelpunkten und der Rest durch Registrierung von Punkten mit vorweg festgelegten Eigenschaften aufgefangen werden. Dies bedeutet, daß z.B. in gleichmäßig geneigten Flächen auch bei tachymetrischer Aufnahme für großmaßstäbige Auswertung ca. 5 - 10 Punkte/ha gemessen werden. Erst durch die Höhe aller Stützpunkte erhält die Methode den Hinweis, daß es sich hier um eine gleichmäßig geneigte Fläche handelt.

Bei der Tachymetrie kann dies zu einem gewissen zusätzlichen Aufwand bei der Aufnahme führen, der aber beim Einsatz von selbstregistrierenden elektronischen Tachymetern nicht erheblich sein dürfte. In der Photogrammetrie ist dieser Mehraufwand bei der Einzelpunktmessung, insbesondere aber bei einer profilweisen Abtastung, vernachlässigbar. Die einsatzfähigen Registriergeräte bieten dabei Registrierung nach konstantem Weg- oder Zeitintervall. Als besonders vorteilhaft hat sich die Verwendung eines konstanten Zeitintervalls herausgestellt, da der Operateur die Abfahrgeschwindigkeit an die Schwierigkeit des Geländes anpassen und damit in stark bewegtem Gelände automatisch mehr Punkte registrieren wird.

2.4 Datenaufbereitung

2.4.1 Filterung des systematischen Abtastfehlers

Geländepunkte, die beim profilweisen Abtasten von Stereomodellen registriert wurden, können vom systematischen Anteil des Abtastfehlers befreit werden, der als Umkehreffekt beim Profilieren bekannt ist. Diese Filterung des Abtastfehlers erfolgt nach der Methode der Filterung nach kleinsten Quadraten [10].

Voraussetzung ist, daß ein rechteckig abgegrenzter Bereich eines Modells mit Profilpunkten bedeckt ist. Automatisch werden REen festgelegt, in welche die Profilpunkte eingespeichert werden, getrennt nach Hin- und Rückprofilen. Beide Stützwertgruppen definieren jeweils eine, im Falle der Fehlerfreiheit dieselbe Geländeoberfläche. Eine statistische Analyse beider Gruppen von Profilpunkten liefert Aufschluß darüber, ob ein Abtastfehler vorliegt und gegebenenfalls wie groß er ist. Voraussetzung für die sinnvolle Durchführung dieser Analyse ist, daß in jeder RE ca. 80 - 170 Stützpunkte vorliegen. Übersteigt die Stützpunktanzahl in einzelnen REen die vorgegebenen Feldgrenzen, so verkleinert das Programm selbständig die REen.

Vom Programm wird ein geschätzter mittlerer Abtastfehler eingelesen, der z.B. über |13| ermittelt werden kann. Kann in der Analyse kein Abtastfehler festgestellt werden, wird die Filterung übersprungen. Übersteigt der sich aus der Analyse ergebende Abtastfehler den geschätzten um ein Mehrfaches, so wird ein grober Abtastfehler vermutet und der Lauf abgebrochen.

Versuchsauswertungen zeigten, daß der geschätzte Abtastfehler auch in solchen REen überschritten werden kann, in denen Böschungen und Geländeabsätze genähert parallel zur Profilrichtung verlaufen. Die im Gelände vorhandenen Höhenunterschiede werden hier wohl teilweise als Abtastfehler gedeutet. Das Programm enthält deshalb eine Obergrenze, bis zu der gefiltert werden darf. Weitere Untersuchungen sind hier noch durchzuführen.

2.4.2 Absolute Orientierung

- Um markante Höhenpunkte an topographisch wichtigen Stellen, wie z.B. Kuppen und Mulden, lagemäßig richtig setzen zu können, ist es auch im flachen Gelände erforderlich, daß das photogrammetrische Modell genähert vorhorizontiert ist. Unter dieser Voraussetzung wird in SCOP eine zweistufige Höheneinpassung vorgenommen. Auf eine ebene Helmerttransformation folgt eine mittlere Z-Verschiebung mit allen Höhenpaßpunkten. Anschließend wird das Modell noch in beiden Koordinatenrichtungen gekippt, bis die Quadratsumme der Restklaffen in allen Höhenpaßpunkten ein Minimum ist.

Stellen sich in einem ersten Lauf die Modellkoordinaten von Lage- oder Höhenpaßpunkten, die auf Magnetband stehen, als fehlerhaft heraus, so können diese Paßpunkte in einem zweiten Lauf durch einfaches Einfügen einer Datenkarte bei der Transformation unberücksichtigt bleiben, ohne daß das Magnetband korrigiert werden muß. Bei Vollpaßpunkten können Lage und Höhe getrennt oder zusammen ausgeschlossen werden.

2.5 Möglichkeiten zum Erkennen von Restfehlern der Orientierung und grober Meß- oder Registrierfehler

2.5.1 Überprüfung der Modellorientierung

Normalerweise werden in einem ersten Lauf Fehler in den Paßpunkten aufgedeckt. Mit dem Ergebnis des Wiederholungslaufes wird die Höheninterpolation des Rasters durchgeführt.

In Gebieten, in denen Stützpunkte aus 2 oder mehr Modellen liegen, werden die Stützpunkte überprüft, ob sie alle innerhalb gewisser festgelegter Grenzen dieselbe Geländeoberfläche beschreiben. Werden diese Grenzen überschritten, so deutet dies auf Restfehler in der Orientierung der Einzelmodelle hin; ein Fehlerausdruck wird ausgegeben.

Die Durchführung der Überprüfung ist identisch mit der unter 2.5.2 beschriebenen.

Als Richtschnur empfehlen wir, die Modellüberlappungen auf den doppelten mittleren Punktabstand zu beschränken. Werden sie weiter ausgedehnt, steigt der Rechenaufwand unnötigerweise.

Vom Programm wird ein geschätzter mittlerer Abtastfehler eingelesen, der z.B. über |13| ermittelt werden kann. Kann in der Analyse kein Abtastfehler festgestellt werden, wird die Filterung übersprungen. Übersteigt der sich aus der Analyse ergebende Abtastfehler den geschätzten um ein Mehrfaches, so wird ein grober Abtastfehler vermutet und der Lauf abgebrochen.

Versuchsauswertungen zeigten, daß der geschätzte Abtastfehler auch in solchen REen überschritten werden kann, in denen Böschungen und Geländeabsätze genähert parallel zur Profilrichtung verlaufen. Die im Gelände vorhandenen Höhenunterschiede werden hier wohl teilweise als Abtastfehler gedeutet. Das Programm enthält deshalb eine Obergrenze, bis zu der gefiltert werden darf. Weitere Untersuchungen sind hier noch durchzuführen.

2.4.2 Absolute Orientierung

- Um markante Höhenpunkte an topographisch wichtigen Stellen, wie z.B. Kuppen und Mulden, lagemäßig richtig setzen zu können, ist es auch im flachen Gelände erforderlich, daß das photogrammetrische Modell genähert vorhorizontiert ist. Unter dieser Voraussetzung wird in SCOP eine zweistufige Höheneinpassung vorgenommen. Auf eine ebene Helmerttransformation folgt eine mittlere Z-Verschiebung mit allen Höhenpaßpunkten. Anschließend wird das Modell noch in beiden Koordinatenrichtungen gekippt, bis die Quadratsumme der Restklaffen in allen Höhenpaßpunkten ein Minimum ist.

Stellen sich in einem ersten Lauf die Modellkoordinaten von Lage- oder Höhenpaßpunkten, die auf Magnetband stehen, als fehlerhaft heraus, so können diese Paßpunkte in einem zweiten Lauf durch einfaches Einfügen einer Datenkarte bei der Transformation unberücksichtigt bleiben, ohne daß das Magnetband korrigiert werden muß. Bei Vollpaßpunkten können Lage und Höhe getrennt oder zusammen ausgeschlossen werden.

2.5 Möglichkeiten zum Erkennen von Restfehlern der Orientierung und grober Meß- oder Registrierfehler

2.5.1 Überprüfung der Modellorientierung

Normalerweise werden in einem ersten Lauf Fehler in den Paßpunkten aufgedeckt. Mit dem Ergebnis des Wiederholungslaufes wird die Höheninterpolation des Rasters durchgeführt.

In Gebieten, in denen Stützpunkte aus 2 oder mehr Modellen liegen, werden die Stützpunkte überprüft, ob sie alle innerhalb gewisser festgelegter Grenzen dieselbe Geländeoberfläche beschreiben. Werden diese Grenzen überschritten, so deutet dies auf Restfehler in der Orientierung der Einzelmodelle hin; ein Fehlerausdruck wird ausgegeben.

Die Durchführung der Überprüfung ist identisch mit der unter 2.5.2 beschriebenen.

Als Richtschnur empfehlen wir, die Modellüberlappungen auf den doppelten mittleren Punktabstand zu beschränken. Werden sie weiter ausgedehnt, steigt der Rechenaufwand unnötigerweise.

gelegte Grenzen, die z.B. in Beziehung zu den eingegebenen Filterbeträgen stehen, so kann in diesem Stützpunkt ein grober Meß- oder Registrierfehler vermutet werden. Die Punktkoordinaten werden ausgedruckt.

Die Prädiktion in dieser RE kann ohne diesen Stützpunkt wiederholt werden, wobei gegebenenfalls auch die Berechnung des Trendpolynoms wiederholt werden muß.

Der Vorteil dieser Methode gegenüber dem ersten Vorschlag liegt darin, daß die Berechnung gezielt nur dort wiederholt wird, wo ein grober Fehler vermutet wird. Ferner tritt das Problem der Punktidentifizierung gar nicht auf.

Dieser Ansatz ist programmtechnisch realisiert, muß aber noch untersucht werden.

2.5.3 Praktische Erfahrung mit groben Meß- oder Registrierfehlern

Bis heute wurden mit SCOP unter anderen 9 Kartenblätter mit 10 photogrammetrischen Modellen ausgewertet, die bei der Firma Wild, parallel zur Orthophotoherstellung, profilweise abgefahren wurden. Die digitalisierten Geländepunkte wurden mit dem EK8 direkt auf Magnetband gespeichert. Bei der Überprüfung der ausgewerteten Höhenlinien konnten wir keine groben Unstimmigkeiten feststellen, die den sicheren Schluß auf Registrier- oder grobe Meßfehler zugelassen hätten.

Nicht ganz so günstig sind unsere Erfahrungen bei der Auswertung von Tachymeteraufnahmen, die mit einem Reduktionstachymeter ohne direkte Registrierung durchgeführt wurden. Diese Messungen müssen zunächst abgelocht und über ein Vorprogramm ins Landesnetz transformiert werden. Hier ist es wichtig, daß der Aufnahmeingenieur die Kontrollzeichnung anhand seiner Kenntnis der Örtlichkeit überprüft. Der Anteil der grob falschen Punkte lag z.B. bei der Aufnahme Krähenbühl (s. Tabelle 1) bei einer Gesamtzahl der Stützpunkte von 1 630 bei 43, was 2.6 Prozent entspricht. Sicherlich kann dieser Prozentsatz durch die Verwendung von selbstregistrierenden elektronischen Tachymetern noch gesenkt werden.

Als positiv wurde vom Auftraggeber bei der Durchsicht der Kontrollzeichnung bewertet, daß bei der automatischen Auswertung die groben Fehler deutlicher hervortreten, als wenn sie bei einer manuellen Interpolation bereits stärker ausgeglichen worden wären.

2.6 Berechnung eines Digitalen Höhenmodells

In einem ersten Programmabschnitt werden aus den Höheninformationen beliebig verteilter Stützpunkte die Höhen eines regelmäßigen, engmaschigen Rasters berechnet. Diese Rasterhöhen werden als Digitales Höhenmodell (DHM) bezeichnet und auf Magnetband abgespeichert. Die Interpolation der Rasterhöhen erfolgt mit Hilfe der linearen Prädiktion.

Zunächst wollen wir aber die Frage erörtern: Ist es überhaupt sinnvoll, die Höhen eines Rasters zu rechnen, oder sollen wir unsere Höhenlinien direkt aus den Höhenwerten der Stützpunkte durch eine iterative Prädiktion ableiten, wie dies Lauer vorschlägt ?

2.6.1 Vorteile und Nachteile der Einschaltung eines Höhenrasters zur Ableitung von Höhenlinien im Vergleich zur direkten Ableitung aus den ursprünglichen Stützwerten.

Betrachten wir zunächst die Frage des Speicherplatzes. Bei den Stützpunkten sind pro Punkt 3 Koordinaten abzuspeichern, beim Raster nur die Höhe. Die Lage der Rasterpunkte wird über das konstante Rasterintervall berechnet. Nehmen wir den mittleren Rasterabstand zu $1/3$ des Stützpunktabstandes an, erhalten wir als Verhältnis Anzahl der Stützpunkte / Anzahl der Rasterpunkte $\approx 1/9$. Zum Archivieren beträgt das Verhältnis der erforderlichen Speicherplätze somit $1/3$.

Wollen wir an einem Punkt mit bekannten Lagekoordinaten aus den gespeicherten Werten die Höhe entnehmen, was bei einer qualifizierten Aufbereitung des Höhenlinienbildes häufig erforderlich ist, so müssen wir bei der Speicherung der Stützpunkte ein Suchprogramm einschalten. Aus sämtlichen Stützpunkten sind jedesmal die benachbarten herauszusuchen.

Im Gegensatz dazu bietet das Raster über seine regelmäßige Lage zusätzliche Ordnungsmerkmale. Ein direkter Zugriff zum gewünschten Höhenwert ist über das bekannte Rasterintervall möglich.

Bei der Ableitung von Höhenlinien ist der Rechenaufwand bei beiden Ansätzen abhängig vom Verhältnis der Anzahl der Höhenlinienpunkte / Anzahl der Stütz- bzw. Rasterpunkte. Durch die Notwendigkeit eines iterativen Vorgehens bei der direkten Prädiktion von Höhenlinienpunkten dürfte der dazu erforderliche Rechenaufwand den für die Einschaltung eines Raster erforderlichen erreichen, bevor die Anzahl der Höhenlinienpunkte mit der Anzahl der Rasterpunkte gleichzieht.

Die große Bedeutung eines regelmäßigen Höhenrasters ergibt sich aus seinen zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten, wie z.B.

- Ableitung verschiedener Höhenlinienintervalle
- Trassenentwurf und Optimierung
- Massenberechnung
- Ableitung von Längs- und Querprofilen
- Ableitung von Steuerungsdaten für einen digital gesteuerten Orthoprojektor. Wurden für ein bereits beflogenes Gebiet Rasterhöhen berechnet, so kann mit ihrer Hilfe die Orthoprojektion einer Neubefliegung automatisch durchgeführt werden.
- Ableitung eines digitalen Gefällmodells und von Gefällstufenkarten.

Der Weg über die Berechnung der Rasterhöhen bietet eine günstige Möglichkeit, die zufälligen Meßfehler der Stützpunkte zu berücksichtigen. Die dichtgelegenen Rasterhöhen werden als DHM auf Magnetband gespeichert und stehen als wichtiger Teil einer digitalen Karte für weitere Berechnungen zur Verfügung. Die zentrale Stellung des regelmäßigen Rasters rechtfertigt auch den im Vergleich zu einem einfachen Interpolationsansatz erhöhten Rechenaufwand der linearen Prädiktion zur Bestimmung der Rasterhöhen.

2.6.2 Einige Bemerkungen zur praktischen Berechnung des regelmäßigen Höhenrasters

Beim Grundprogramm, das hier besprochen wird, können vorweg in vorhandene Bruchlinien zusätzliche Punkte linear eingerechnet und als Stützpunkte eingeführt werden. Als Verdichtungsabstand verwenden wir eine Entfernung von ca. $2/3$ des mittleren Stützpunktabstandes. Dadurch wird erreicht, daß Bruchkanten besser angehalten werden. Ein gewisses Oberschwingen in der unmittelbaren Nachbarschaft kann allerdings erst mit einer mathematisch exakten Behandlung der Bruchkanten verhindert werden. Auf die dazu erforderlichen Programmzusätze wird im nächsten Vortrag ausführlich eingegangen.

Die Wahl des Rasterabstandes wird sinnvollerweise in ein vernünftiges Verhältnis zum mittleren Stützpunktabstand gebracht, der sich meist nach der Vielfalt der Geländeformen richtet. Nach unseren Erfahrungen hat sich ein Verhältnis Rasterabstand / mittlerer Stützpunktabstand von $1/3$ bis $1/4$ bewährt. Wird der Rasterabstand bedeutend kleiner gewählt, so steigt der Rechenaufwand beträchtlich an, ohne daß sich die Qualität des Ergebnisses deutlich verbessert. Ist er zu groß, so gehen zu viele Details verloren.

Die Stützpunktzahl pro RE sollte mindestens 30 betragen. Nur so sind die Mindestvoraussetzungen für die verwendete Statistische Methode gegeben. Liegen in einer RE mehr als 200 Stützpunkte, so mittelt das Programm eng benachbarte Massenpunkte.

Die Überlappung der REen ist ungefähr mit dem anderthalbfachen mittleren Stützpunktabstand anzusetzen.

Bei der Festlegung des Trendpolynoms in der RE ist eine möglichst gute Anpassung an die Geländeoberfläche anzustreben. Dazu stehen Polynome 2. und 1. Grades zur Auswahl. Bei Auswertungen im Flachland mit geringen Höhenunterschieden wird das Polynom 1. Grades, im bewegten Gelände ein Polynom 2. Grades verwendet. Die hier angeführten Parameter können über eine Datenkarte oder vom Programm aus festgelegt werden.

Als Filterbetrag für die Massenpunkte setzen wir aufgrund unserer Erfahrungen ungefähr $1/3$ des geschätzten mittleren Höhenfehlers an, da die tatsächlichen Filterbeträge das Dreifache des eingegebenen Filterbetrages deutlich übersteigen können.

Bei tachymetrischen Geländeaufnahmen ist eine generelle Geländerauhigkeit von ca. 1 dm zu berücksichtigen. Auch bei Aufnahmen mit registrierenden elektronischen Tachymetern setzen wir 2 - 3 cm als Filterbetrag an.

2.7 Ableiten von Höhenlinien aus dem digitalen Höhenmodell

Die Ableitung von Höhenlinien im DHM erfolgt durch lineare Interpolation zwischen den Rasterpunkten. Da nicht vorausgesetzt werden kann, daß das gesamte DHM im Kernspeicher des Rechners Platz findet, wird die Berechnung unterteilt und in REen durchgeführt.

Die Größe einer RE kann entweder vom Programm bestimmt werden oder über eine Datenkarte eingelesen werden.

Ursprünglich wurden die mehr organisatorisch gelagerten Fragen im Zusammenhang mit dem Ableiten von Höhenlinien aus dem DHM als relativ leicht zu lösend angesehen im Vergleich zur Prädiktion der Rasterhöhen. Im Laufe der praktischen Erprobung dieses Programmteils ergaben sich dann manche besseren Lösungsmöglichkeiten.

Als Beispiel dafür soll das Zusammensetzen der interpolierten Einzelpunkte zu zusammenhängenden Höhenlinienteilstücken dienen. Die Einzelpunkte wurden hauptsächlich mit Hilfe von Entfernungskriterien zusammengefügt. Ergab sich in einem ersten Durchlauf kein plausibler Linienverlauf, wurde das Höhenraster durch eine Rasterhalbierung verdichtet und die Berechnung wiederholt.

Der zum Verdichten erforderliche Speicherplatz und die zur Wiederholung benötigte Rechenzeit wird eingespart, wenn im Raster streng nach geometrischen Überlegungen vorgegangen wird. Dabei wird z.B. auch in der unmittelbaren Nachbarschaft von markanten Höhenpunkten der Verlauf der Höhenlinien auf diese abgestimmt. Bei großem Rasterabstand werden geschlossene Höhenlinien um einen markanten Höhenpunkt auch dann interpoliert, wenn sie vollständig innerhalb eines einzigen Rasterfeldes liegen.

Als weiterer Inputparameter sind neben Höhenlinien- und Zählhöhenlinienintervall der Kartenmaßstab vorgesehen. Werden aus demselben DHM Höhenlinienpläne in verschiedenen Maßstäben abgeleitet, so kann die Ausgabe der Zeichnung bereits im endgültigen Zeichenmaßstab erfolgen. Eine Änderung des Maßstabes am Plotter, die meist mit Schwierigkeiten verbunden ist, fällt weg.

Zur Beschleunigung einer Kontrollzeichnung oder für eine grobe Generalisierung besteht die Möglichkeit, nur jeden n-ten Rasterpunkt zur Interpolation heranzuziehen.

Interessieren nur Höhenlinien in einem vorgegebenen Ausschnitt eines vorliegenden DHMs, kann die Höhenlinienauswertung auf einen rechteckigen Ausschnitt begrenzt werden. Eine Unterteilung eines Kartenblatts wird sinnvollerweise auch dann vorgenommen, wenn die Ausdehnung des Blattes sehr groß bzw. der Rasterabstand sehr klein ist oder die Anzahl der interpolierten Höhenlinienpunkte wie im Kartenblatt 62476248 (s. Tabelle 1) mit 153 000 sehr hoch liegt. Zu betonen ist, daß dieses Aufteilen im Endprodukt praktisch nicht zu sehen ist. Die Einzelabschnitte werden auf derselben Folie graviert, wobei der Betrag der Nullpunktverschiebung im Rechenprotokoll auf $\frac{\text{mm}}{100}$ ausgedruckt wird und am Zeichenautomat eingegeben wird. Dadurch ist ein klaffenfreier Übergang sichergestellt.

2.8 Aufbereiten der Höhenlinienkarte für den Zeichenautomaten und Auszeichnen

Beim kartographischen Aufbereiten der Höhenlinienkarte wurden kleinere Ergänzungen in Programmen vorgenommen. So können z.B. sehr kleine geschlossene Höhenlinien beim Auszeichnen unterdrückt werden. Singuläre Punkte auf Dämmen oder in Einschnitten werden mit einer eigenen Signatur ausgezeichnet.

Beim Auszeichnen des Magnetbandes am Zeichenautomat sind lediglich die Werkzeuge in der Reihenfolge zu montieren, wie sie im Schreibmaschinendruck jeweils angefordert werden.

3. Einige grundsätzliche Überlegungen zur Entwicklung von SCOP

In den vergangenen Jahren wurden auch an anderen Stellen weitere Programmsysteme zur Interpolation von Isolinien entwickelt (z.B. [1], [2], [3], [4], [5]), die teilweise mit statistischen Methoden arbeiten. Varianten der Anwendung der linearen Prädiktion zur Höheninterpolation schlugen Koch [6] und Lauer vor. Hier sollen nochmals die grundsätzlichen Überlegungen bei der Konzeption von SCOP dargelegt und mit anderen Ansätzen verglichen werden.

3.1 Ausgangssituation bei der Konzeption des Programmsystems SCOP

Der Anstoß zur praxisreifen Entwicklung der von Prof. Kraus vorgeschlagenen Anwendung der linearen Prädiktion zur Höheninterpolation kam von der Firma Wild im Jahre 1971. Sie wollte im Zusammenhang mit der Orthophotoherstellung Höhenlinien zur Ergänzung des Orthophotos ableiten. Die Höhenlinien sollten aus einer großen Anzahl von Einzelpunkten, die während der profilweisen Abtastung des Modells automatisch registriert wurden, auf rechnerischem Wege abgeleitet werden. Selbstverständlich war auch an die Verarbeitung beliebig verteilter, photogrammetrisch bestimmter Einzelpunkte, wie z.B. in Waldgebieten, gedacht.

Als Datenerfassungsmethode stand somit ursprünglich die Photogrammetrie im Vordergrund. Die damit zusammenhängenden Komplexe wie Filterung des systematischen Schleppfehlers bei profilweiser Abtastung des Modells, Behandlung des zufälligen Meßfehlers bei photogrammetrischer Einzelpunktmessung und von Stützpunkten mit widersprüchlichen Höhen in Modellüberlappungsbereichen bestimmten entscheidend den programmtechnischen Ansatz für die lineare Prädiktion und den organisatorischen Aufbau des Programms.

Im Lauf der Zeit wurden dann auch Beispiele mit tachymetrisch erfaßten Geländepunkten bearbeitet. Aufgrund der veränderten Ausgangssituation, wie z.B. große Maßstäbe, gezielte, weiträumige Punktauswahl im Gelände nach anderen Kriterien als in der Photogrammetrie, wurden dafür Ergänzungen im Programm eingefügt.

3.2 Anwendung der linearen Prädiktion zur Höheninterpolation

Im Gegensatz zu Lauer interpoliert Koch, wie wir, zunächst die Höhen eines regelmäßigen Rasters.

Koch ging bei der Konzeption seines Programms hauptsächlich von einer Anwendung in großen Maßstäben und von den Anforderungen aus, die bei der Auswertung von tachymetrischen Geländeaufnahmen und bei ingenieurtechnischen Aufgaben wie z.B. im Braunkohletagebau anfallen. Als das mit dem Verfahren der gleitenden Schräg-

ebene erzielte Ergebnis für topographische Anwendungen nicht völlig zufriedenstellend ausfiel, wurde die Methode durch die lineare Prädiktion ergänzt. Für jede zu interpolierende Rasterhöhe wird eine ausgleichende Schrägebene mit Hilfe der Höhen von bis zu 20 umliegenden Stützpunkten so berechnet, daß diese gleitende Schrägebene durch den Stützpunkt verläuft, falls der Rasterpunkt in den Stützpunkt wandert. Ebenfalls für jede zu interpolierende Höhe wird eine Kovarianzfunktion mit Hilfe des Abstands der nächstliegenden Stützpunkte neu bestimmt. Dieser Ansatz ist die Folgerung aus seiner Annahme, daß der Ingenieur im Gelände den Abstand der Meßpunkte danach auswählt, wie rasch sich die Geländeformen ändern.

Im Stuttgarter Höhenlinienprogramm wird diese Annahme nicht gemacht. Hier wird lediglich verlangt, daß die Geländeoberfläche durch die Stützpunkte ausreichend charakterisiert ist. Darüber hinaus sind aber weitere Stützpunkte zugelassen und erwünscht, da sie die Oberflächeninformation vergrößern. Dieser Ansatz ist im Hinblick auf eine vollautomatische Datenerfassung in der Photogrammetrie, z.B. beim profilweisen Abfahren von Modellen mit Hilfe von Korrelatoren, sinnvoll. Wenn hier Stützpunkte nach konstantem Zeit- oder Wegintervall automatisch registriert werden, so stehen ihre Lage und ihre Abstände in keinem direkten Zusammenhang mehr mit einer Änderung der Geländeformen. Als Konsequenz daraus bestimmen wir die Kovarianzfunktion in kleinen Teilgebieten eines Kartenblattes, unseren Recheneinheiten, empirisch aus den Stützwerten selbst. Ihre Größe wird so gewählt, daß sie durchschnittlich 40 - 100 Stützpunkte enthalten. Diese Punktzahl ist erforderlich, um die empirische Bestimmung der Kovarianzfunktion überhaupt sinnvoll durchführen zu können. Eine weitere Vergrößerung der Stützpunktzahl würde für die Interpolation der einzelnen Rasterhöhe keine deutliche Verbesserung mehr bringen. Der Rechenaufwand für die Interpolation würde jedoch stark ansteigen.

Zur Prädiktion der Höhe eines Rasterpunktes werden alle Stützpunkte der RE herangezogen, was zu einer homogenen Geländeoberfläche und damit zu einer guten Scharungsplastik führt. Während bei der Methode der gleitenden Schrägebene eine differentielle Unstetigkeit im Höhenlinienverlauf durch die Verwendung anderer Stützpunkte von einem Rasterpunkt zum benachbarten eintreten kann, tritt bei uns dieser Wechsel nur am Rand der RE ein. In jeder RE werden deshalb Stützpunkte in einem Überlappungsbereich zu den benachbarten REen zur Interpolation mitverwendet.

Streng genommen ist die Verwendung einer einzigen Kovarianzfunktion in einer flächenhaft ausgedehnten RE nur dann erlaubt, wenn dort homogene und isotrope Korrelationseigenschaften vorliegen, d.h., die Kovarianz zwischen zwei Stützpunkten muß von ihrer Lage im Interpolationsgebiet und von der Richtung ihrer Verbindungsgeraden unabhängig sein.

Untersuchungen an simulierten inhomogenem und anisotropem Gelände innerhalb einer RE führten nur zu geringfügigen Verfälschungen im Höhenlinienverlauf und bestätigen, daß die lineare Prädiktion verhältnismäßig unempfindlich gegen Fehlannahmen in den Varianz-Kovarianzverhältnissen ist [7], [8].

Auch diese Überlegungen führen somit zu dem Schluß, die RE nicht unnötigerweise auszudehnen, da dies nur ein inhomogenes oder anisotropes Verhalten innerhalb der RE begünstigen kann. Für nicht ausschlaggebend halten wir jedoch, ob Koch zur Interpolation einer Rasterhöhe bis zu 20 Stützpunkte heranzieht und folglich in diesem Gebiet Homogenität und Isotropie voraussetzt, oder ob wir, normalerweise bei dichterem Stützpunktabstand, zwischen 40 und 100 Stützpunkte verwenden.

In [9] führt Koch aus, daß die "Höhen der Meßpunkte für die Interpolation als fehlerfrei angesehen werden [können], da sowohl bei terrestrischen als auch photogrammetrischen Geländeaufnahmen die gewünschte Höhengenaugigkeit durchweg erreicht wird". Selbstverständlich wird man das Aufnahme- und Auswerteverfahren nach der gewünschten Höhengenaugigkeit ausrichten. Das ändert aber nichts daran, daß ein Punkt im Gelände selten genauer als auf 1 dm definiert ist oder daß die Annahme der Fehlerfreiheit der Meßpunkte z.B. für Bildmaßstäbe um 1:50 000 wohl kaum mehr gilt.

Wir gehen davon aus, daß jede Einzelpunktmessung mit zufälligen Meßfehlern behaftet ist und diese bestmöglich korrigiert werden sollen. Einen guten Ansatz dazu sehen wir in der Prädiktion mit Filterung in der RE, da hier in kleinen Teilgebieten flächenhaft gearbeitet wird.

Wenn auch der zweistufige Aufbau im Koch'schen Ansatz logisch erscheint und insbesondere für ingenieurtechnische und großmaßstäbige topographische Höhenlinienauswertungen sehr leistungsfähig sein dürfte, halten wir unsere Konzeption im Bereich der automationsfreundlichen photogrammetrischen Datenerfassung mit ihren großen Datenmengen für sinnvoll und gerechtfertigt. Dies bedeutet natürlich nicht, daß alle Fragen abschließend geklärt sind. Weitere Untersuchungen und Erprobungen werden noch erforderlich sein.

4. Oberblick über verschiedene bearbeitete Beispiele

Zur Erinnerung soll hier nochmals betont werden, daß die in Tabelle 1 aufgeführten Höhenlinienauswertungen mit dem Grundprogramm von SCOP ohne die exakte Behandlung der Geländebruchkanten berechnet wurden. Insbesondere in mittleren Kartenmaßstäben, wie z.B. bei den beiden amerikanischen Beispielen im Maßstab 1:24 000 (Kartenblatt Nr. 4547 und 62476248, Tabelle 1), kommt das Abknicken der Höhenlinien an den Felsgraten sehr deutlich zum Ausdruck. Besonders beeindruckt die sehr gute Scharungsplastik, die schon fast die Wirkung einer Schummerung erzielt.

5. Genauigkeit der Höhenlinien

5.1 Geometrische Genauigkeit

Wie bereits in [11] ausgeführt und durch weitere Studienarbeiten an unserem Institut bestätigt wurde, wird die geometrische Genauigkeit, wie sie in amtlichen Fehlergrenzen festgelegt ist, durch diese automatisch abgeleiteten Höhenlinien durchweg eingehalten. Neuere unabhängige Untersuchungen beim Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (Kartenblatt Rauenberg, Tabelle 1) und beim NRC in Canada (Kartenblatt 3533 und 3335, Tabelle 1) bestätigen dies nochmals.

5.2 Morphologische Richtigkeit

Während im Gelände mit sich kontinuierlich ändernder Neigung die morphologische Wiedergabe der Höhenlinien als zufriedenstellend bezeichnet werden kann, bleiben an Geländekanten mit plötzlichem Neigungswechsel, wie z.B. an größeren Böschungen, in den hier gezeigten Beispielen noch einige Wünsche offen. Ähnlich verhält es sich mit scharf eingeschnittenen Flußtälern (Kartenblatt 62476248, Tabelle 1), wo im Talgrund abflußlose Senken auftreten, die geomorphologisch unwahrscheinlich sind. Auch die fehlende oder mangelhafte Wiedergabe von Kleinformen, von Hohlwegen und Erosionsrinnen gehören dazu.

Über das Einarbeiten der Behandlung der Bruchkanten in das Grundprogramm und die damit erzielte deutliche Verbesserung der morphologischen Richtigkeit wird im folgenden Aufsatz E. Abmus berichten. K. Kraus wird im übernächsten Aufsatz nochmals auf die erreichte Genauigkeit der Höhenlinien zurückkommen und die Ergebnisse mit Zahlen belegen.

6. Wirtschaftlichkeit der automatischen Höhenlinienableitung

Die Kosten für die automatische Ableitung von Höhenlinien mit SCOP werden anhand von 2 Kartenblättern mit den Kosten für eine Analogauswertung verglichen.

Bei der automatischen Ableitung von Höhenlinien ist neben Digitalisierung und Berechnung das Auszeichnen der Karte am Zeichenautomaten als Kostenfaktor zu beachten. Uns stand dazu eine ältere Anlage Coragraph DC2 der Firma Contraves zur Verfügung, die verhältnismäßig langsam arbeitet. Da z.B. der einsatzfähige neue Automat von Contraves oder andere vergleichbare Zeichenautomaten um den Faktor 2 - 4 schneller sind, setzen wir im folgenden nur 1/3 der tatsächlich benötigten Gravierzeit des Zeichenautomaten an.

Der Vergleich soll anhand der Deutschen Grundkarte Rauenberg 1:5000 und des Kartenblatts 62476248, Maßstab 1:24 000, durchgeführt werden. Die statistischen Daten der Beispiele enthält Tabelle 1.

Projekt	Dem.	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Ar. oder Karten- Intervalle	Rechenzeit Teil I ¹⁾ Teil II ²⁾	[ss] ³⁾ Summe
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19
121122		ph	M	1	1: 7 500	1: 3 750	P	6 000	6 000	5 m	44 400	1: 2 500	2 m	470	170	640	
21072106		ph	M	1	1: 32 000	1: 13 333	P	6 500	6 500	20 m	39 000	1: 10 000	10 m	300	120	420	
6631667		ph	M	1	1: 30 000	1: 15 000	P	3 800	3 800	20 m	43 300	1: 10 000	5 m			420 +)	
3523		ph	M	1	1: 10 000	1: 5 000	P	10 500	700	5 m	66 200	1: 2 500	2,5 m	30 400		830 +)	
3335		ph	M	1	1: 10 000	1: 5 000	P	11 700	800	5 m	66 200	1: 2 500	2,5 m			870 +)	
4547		ph	M	2	1: 80 000	1: 20 000	P	16 500	550	120 ft	142 300	1: 24 000	120 ft			1 090 +)	
62476248		ph	M	1	1: 120 000	1: 60 000	P	9 800	9 250	120 ft	133 700	1: 24 000	40 ft	153 000	890 +)	1 650 +)	
AOC		ph	M	1	1: 10 000	1: 5 000	Er	3 300		6/4 m	42 000	1: 2 000	2 m			400	
Güstler Hof	DG	ph	L				Ep	2 000		12,5 m	26 600	1: 5 000	0,5 m			190	
Ottersdorf-S	DK	ph	L				Ep	2 800		12,5 m	26 600	1: 5 000	0,5 m			270	
Gerste	DK	ph	L	2	1: 12 000		Ep	3 500	1650	12,5 m	26 600	1: 5 000	0,5 m			380	
Sallingen-W	DK	ph	L	8	1: 8 000	1: 5 000	Ep	1 950		12,5 m	26 600	1: 5 000	1 m			380	
Dahlekarp	DK	ph	L	6	1: 8 000	1: 5 000	Ep	1 900	550	12,5 m	26 600	1: 5 000	1 m			270	
Kl. Lessen	DK	ph	L	7	1: 8000	1: 5 000	Ep	2 230	770	12,5 m	26 600	1: 5 000	1 m			260	
Klausfeld-W	DK	ph	M	8		1: 6 000	Ep	3 950		12,5 m	26 600	1: 5 000	0,5 m			190	
Jurgingen		Kta	L				E	1 030		10 m	8 400	1: 2 500	1,25 m			140	
Fauerberg	DK	ph	L	2	1: 12 500	1: 5 000	Ep	4 500		10 m	40 400	1: 5 000	2,5 m			520	
Wiesental	DK	ph/ta	L	2	1: 12 500	1: 5000	Ep	3 000	650	12,5 m	25 900	1: 5 000	0,5 m			270	
Albenau		ta	L				E	400		4 m	10 300	1: 1 000	2 m			170	
Abtegründ I		ta	L				E	1 000		1,5 m	26 000	1: 500	1 m			250	
Abtegründ II		ta	L				E	820		2 m	17 400	1: 500	1 m			140	
Krähenbühl		ta	L				E	1 630		2,5/2 m	28 000	1: 500	0,5 m			360	
Bosse		ta	L				E	790		2,5 m	40 000	1: 1 000	0,5 m			280	
Lackau-S		ta	L				E	770		12,5 m	4 700	1: 5 000	0,5 m			140	
Hilchen		ta	L				E	350		4 m	10 000	1: 1 000	1 m			90	

ph = photogrammetrisch
 ta = tachymetrisch
 Kta = registrierender Tachymeter
 M = Magnetband
 L = Lochkarte
 P = profilweise
 E = Einzelpunkte
 Ep = Einzelpunkte, profilähnlich
 Er = Einzelpunkte, rasterähnlich

1) Interpolation des rasterförmigen Digitalen Höhenmodells (DHM)
 2) Ableitung von Höhenlinien aus dem DHM
 3) Systemkurven (KS) der CTC 6600 des Regionalen Rechenzentrums der Universität Stuttgart
 (In der Spaltenzeit sind CP und IO enthalten)
 +) mit Filterung des systematischen Abstrahlers

Tabelle 1

Tabelle 2

Kartenblatt	Rauenberg		62476248	
	Zeit- aufwand	Kosten [DM]	Zeit- aufwand	Kosten [DM]
6.1 <u>Automatische Ableitung von Höhenlinien</u>				
6.1.1 Datenerfassung (Orientieren und Digitalisieren)	42 h	2.400	4 h	220
6.1.2 Ableiten von Höhenlinien mit SCOP (Ableiten von Zwischenhöhenlinien)	520 SS (350 SS)	710 (480)	1650 SS	2.240
6.1.3 Gravur am Zeichenautomaten	1.5 h	150	7 h	700
6.1.4 Summe ca. (mit Zwischenhöhenlinien)		3.260 (3.740)		3.160
6.2 <u>Analogauswertung und kartographische Überarbeitung</u>				
6.2.1 Photogrammetrische Analogauswertung	69 h	3.170	80 h	3.680
6.2.2 Kartographische Überarbeitung und Gravur	28 h	350	50 h	620
6.2.3 Summe ca.		3.520		4.300

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, wurde das Blatt Rauenberg durch photogrammetrische Einzelpunktmessung digitalisiert, das Kartenblatt 62476248 durch profilweises Abfahren. Von den bei Kartenblatt 62476248 angesetzten 4 h für die Datenerfassung dauerte das profilweise Abfahren 2 h 40 min. (Profilabstand im Modell 1,5 mm, mittlerer Registrierabstand im Profil 3,2 mm). Die Kosten für das Digitalisieren (ein Auswerter mit Planimat + Ecomat bzw. mit A8 + EK8) wurden mit 55 DM/h angesetzt.

Für die DGK Rauenberg war für das gesamte Kartenblatt ein Höhenlinienintervall von 2,5 m vorgegeben. Entsprechend dem Zeichenschlüssel der Deutschen Grundkarte sollte im flachen Gelände auf ein Intervall von 1 m übergegangen werden. Wir benötigen deshalb einen 2. Rechenlauf, ausgehend vom abgespeicherten DHM, zur Ableitung des 1 m Intervalls, das ebenfalls für das gesamte Kartenblatt abgeleitet wurde. Die dafür notwendige Rechenzeit und die Rechenkosten sind in Tabelle 2 in Klammern angegeben. Als Kosten für die Rechenzeit werden die kommerziellen Sätze von 1,35 DM/SS eingesetzt. Die Benützung des Zeichenautomaten wird mit 100 DM/h angesetzt.

Während für die DGK Rauenberg eine photogrammetrische Analogauswertung hergestellt wurde, konnte der Aufwand für eine Analogauswertung für das Blatt 62476248 nur geschätzt werden. Mit seiner Ausdehnung von 0,49 x 0,58 m² bedeckt es genähert dieselbe Fläche wie Kartenblatt 4547 (Tabelle 1). Für dieses Blatt wurden 200 ft Höhenlinien analog abgefahren, was ca. 16 h in Anspruch nahm. Zur Ableitung von 40 ft Höhenlinien wären somit ca. 80 h erforderlich. Diese Zeit nehmen wir für das Kartenblatt 62476248 an. Als Kosten für einen Auswerter am B8 oder Planicart werden 46 DM/h angesetzt.

Der Zeitaufwand für die kartographische Überarbeitung und die Gravur ist für beide Blätter geschätzt. Bei der DGK Rauenberg wurde sie im Vergleich zu einer württembergischen Höhenflurkarte, für die ca. 20 h anzusetzen sind, auf 28 h geschätzt. Entsprechend der Fläche der beiden Kartenblätter wurde der Aufwand für das Blatt 62476248 zu 50 h geschätzt. Die Dichte der Höhenlinien ist in beiden Blättern vergleichbar.

Wenn wir einige Details außer Betracht lassen, wo an der automatisch erstellten Gravur noch nachträglich vielleicht retuschiert werden muß, können wir feststellen, daß bei der Deutschen Grundkarte Rauenberg der finanzielle Aufwand einer Analogauswertung mit anschließender Gravur dem einer automatischen Höhenlinienableitung etwa vergleichbar ist. Eine Reserve scheint hier bei der automatischen Ableitung noch in dem verhältnismäßig großen Aufwand für die Digitalisierung zu liegen. (Er soll teilweise mit der geringen praktischen Erfahrung des Auswerters zusammenhängen). Versuche mit einer profilweisen Abtastung beim Landesvermessungsamt Niedersachsen haben gezeigt, daß bei einer Abfahrgeschwindigkeit von 2.5 mm/sec. nur ca. 50 % des Zeitaufwandes einer punktweisen Messung benötigt wird [16]. Gleichzeitig reicht die Höhengenaugigkeit gut aus, um mit automatisch interpolierten Höhenlinien den Genauigkeitsanforderungen der Deutschen Grundkarte 1:5000 zu genügen.

Beim Kartenblatt 62476248 senkt die automatische Ableitung der Höhenlinien die Kosten um ca. 25 % im Vergleich zur Analogauswertung. Selbstverständlich hängt dies u.a. auch mit dem Höhenlinienintervall von 40 ft zusammen. Der Übergang auf das doppelte Intervall von 80 ft z.B. würde bei der automatischen Auswertung die Rechenzeit um ca. 380 SS, die Gravur um ca. 3.5 h und die Kosten um ca. 870 DM senken, bei der Analogauswertung wären jedoch 40 h oder ca. 1840 DM einzusparen und bei der Gravur ca. 310 DM.

Der hohe Anteil der Rechenkosten bei der automatischen Höhenlinienableitung beim Kartenblatt 62476248 ist in der profilweisen Registrierung mit der erforderlichen Filterung des Schleppfehlers, der hohen Stützpunktdichte und dem engen Raster (rund 1.5 mm Rasterabstand in der Karte) begründet.

7. Ausblick

Wenn wir die Entwicklung der letzten 2 Jahre auf dem Gebiet der automatischen Ableitung von Höhenlinien betrachten, so fällt auf, daß sich der Schwerpunkt der Diskussionen entscheidend verlagert hat. Herrschten anfangs noch grundsätzliche Zweifel über die Möglichkeit einer qualifizierten automatischen Höhenlinieninterpolation vor, so stehen wir heute bereits mitten im Erprobungsstadium.

Institutionen, die sich routinemäßig mit der Herstellung von Höhenaufnahmen befassen, gingen erfreulicherweise schnell dazu über, die Leistungsfähigkeit der neuen Methoden an Beispielen aus ihrer laufenden Produktion zu überprüfen. Für topographisch qualifizierte Auswertungen werden dazu anspruchsvolle theoretische Interpolationsansätze, wie die Interpolation nach kleinsten Quadraten oder lineare Prädiktion, bevorzugt verwendet. Neuere Untersuchungen [15] bestätigen diese Wahl.

Die Leistungsfähigkeit des 1973 vorgestellten Stuttgarter Höhenlinienprogramms, seine Wirtschaftlichkeit und eine praktikable Handhabung wurden weiter ausgebaut und in der Bearbeitung verschiedener Testbeispiele in den vergangenen zwei Jahren unter Beweis gestellt. Im Mittelpunkt der Diskussionen steht heute überwiegend die Wiedergabe von Kleinformen, von Geländeunstetigkeiten. Einerseits läßt sich aus dieser Entwicklung eine breite Anerkennung der Methode erkennen, andererseits bestärkte es uns darin, die Wiedergabe von Bruchkanten einer umfassenden Lösung im Rahmen des bestehenden Programms zuzuführen.

Die Lösung dieses Fragenkomplexes wurde als Ergänzung zum bestehenden Grundprogramm entworfen. Über die damit erzielten Verbesserungen wird im folgenden Aufsatz ausführlich berichtet werden.

Literatur

- [1] Hoffmann, O.: A new photogrammetric plotting system (MBB).
Presentation at the XII th International Congress of
Photogrammetry, Ottawa 1972.
- [2] Chiles, J.P., Delfiner, P.: Reconstitution par Krigeage de la surface
topographique à partir de divers schemas d'échantillonnage
photogrammétrique.
Symposium de la Commission IV de la Société internationale
de photogrammétrique, Paris 1974.
- [3] Bour, G., Coulomb, R.: Une expérience de chaîne complète de production
de courbes de niveau assistée par ordinateur.
Symposium de la Commission IV de la Société internationale
de photogrammétrique, Paris 1974.
- [4] Olea, R.: Contour Mapping Using Universal Kriging.
Journal of geophysical research, Vol. 79, No. 5, February 1974,
P. 695-702.
- [5] Briggs, I.C.: Machine contouring using minimum curvature.
Geophysics, Vol. 39, No. 1, February 1974, P. 39-48.
- [6] Koch, K.R.: Höheninterpolation mittels gleitender Schrägebene und
Prädiktion.
Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 12/1973, S. 229-232.
- [7] Abmus, E., Kraus, K.: Die Interpolation nach kleinsten Quadraten.
Prädiktionswerte simulierter Beispiele und ihre Genauigkeit.
DGK, Reihe A, Heft Nr. 76, München 1974, 73 Seiten.
- [8] Kraus, K.: Untersuchung zur Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten
Quadraten.
ZfV 99, S. 198-205, 1974.
- [9] Koch, K.R.: Digitales Geländemodell und automatische Höhenlinienzeichnung.
ZfV 98, S. 346-352, 1973.
- [10] Kraus, K.: Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützwert-
gruppen. ZfV 98, S. 146-153, 1973.
- [11] Stanger, W.: Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und
Ergebnisse.
Numerische Photogrammetrie, Sammlung Wichmann, Neue Folge,
Band 5, S. 255-282.
- [12] Kraus, K.: Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie.
BUL 40, S. 3-8, 1972.
- [13] Schneider, H.: Untersuchungen am Orthoprojektor GZ1 über die Höhen-
genauigkeit der Profilschraffenmethode.
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 162,
München 1971, 115 Seiten.
- [14] Brunken, G.: Automatische Zeichnung von Höhenlinienplänen.
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 173,
München 1972, 95 Seiten.
- [15] Schut, G.H.: Evaluation of some interpolation methods.
Presented paper, Commission III, Symposium of the International
Society of Photogrammetry, Stuttgart 1974.
- [16] Jacobsen, K.: Profilweise Höhenmessung für die Deutsche Grundkarte
(DGK5).
BUL 42, S. 131-133, 1974.