

Vom Geländemodell zum Geländebild: Die Synthese von Schattenbildern

H. Hügli

La synthèse d'images consiste à éclairer artificiellement un objet de couleur uniforme et à reproduire les intensités ainsi créés sous forme d'image. L'ordinateur peut ainsi créer des images réalistes d'objets qui n'existent pas ou pas encore; il peut simuler visuellement des expériences trop chères ou trop dangereuses. On montre ici l'application de ce procédé à un modèle numérique du relief de la Suisse, donné par ses cotes sur une grille rectangulaire de 250 m de côté. Le produit est une carte d'ombre de l'ensemble de la Suisse, avec ou sans ombre portée, représentant le relief avec réalisme. On peut de même synthétiser des cartes d'ombre avec un éclairage quelconque, simulant soit une position du soleil, soit une source lumineuse artificielle. Les applications vont de la cartographie à la géomorphologie. Une des nombreuses autres représentations possibles du modèle est illustrée ici par la carte des pentes de la Suisse. Des possibilités plus grandes encore sont offertes par la synthèse de vues perspectives: elle donne la possibilité de représenter un relief quelconque, vu sous une direction et un angle quelconques. Les exemples présentés illustrent différentes méthodes de représentation. Finalement, par les résultats obtenus, par le matériel et le temps de calcul nécessaires, la synthèse d'images est jugée mûre pour l'application.

1. Einleitung

Unter Computer-Graphik versteht man die automatische Erzeugung von graphischen Produkten. Nach der Art,

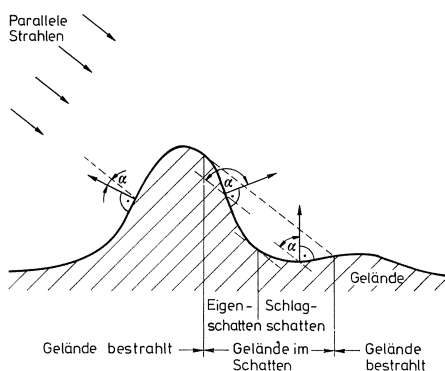


Abb. 1 Prinzip der Schattierung. Je nach Orientierung wird die Oberfläche mehr oder weniger bestrahlt.

wie diese Produkte aussehen, kann man die Computer-Graphik in zwei Hauptgebiete unterteilen, welche mit unterschiedlichen Techniken arbeiten. Die erste Produktart heisst Strichzeichnung und umfasst die Pläne, die technischen Zeichnungen. Dazu gehört die Vektortechnik mit ihren typischen Geräten: Koordinatograph, x-y Plotter, x-y Röhre. Die zweite Produktart heisst Bild und ist dadurch gekennzeichnet, dass die Intensitäten Halbtoncharakter haben und die Flächen aufgefüllt sind. Typische Bilder sind Fotos, Satellitenbilder. Geräte wie der Scanner, der Linienplotter und die Fernsehöhre gehören zu diesem Gebiet, welches mit dem Begriff Raster-Technik bezeichnet wird [1].

Die Vektortechnik hat sich heute in vielen Bereichen durchgesetzt. Dass auch die Raster-Technik heute für die Anwendung reif ist, zeigen folgende Ergebnisse über die Synthese von Schattenbildern.

Die Schattierung ist eine alte und bewährte Methode zur bildmässigen Darstellung von dreidimensionalen Objekten. Dabei wird das Objekt mit einer Lichtquelle beleuchtet und die resultierenden Intensitäten abgebildet. Dieses Verfahren ist der Schlüssel zur Darstellung von dreidimensionalen Objekten in der Rastertechnik. Aus den Objektkoordinaten und unter Angabe einer Lichtquelle synthetisiert der Computer das Objekt- oder Schattenbild.

Ein Traum der Leute, welche die Bildsynthese anwenden, ist die sehr rasche Fabrikation von Bildern, welche Objekte realistisch darstellen.

Die Bildsynthese ist nützlich bei der realistischen Darstellung von zukünftigen Objekten (Autokarosserie, Hochbau in der Altstadt, Autobahn), bei der Darstellung von sehr komplizierten Objekten (Vorbereitung und Hilfe bei einer Gehirnoperation) und bei der Simulation von teuren oder gefährlichen Abläufen (Flugsimulation).

Die Anwendung der Schattierung auf echte Gelände wurde schon früh vorgesehen [2] und erforscht [3] mit dem Ziel, die kartographische Schattierung automatisch zu erzeugen. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten wegen Mangel an Geländedaten und guten Darstellungsmöglichkeiten nicht weiter verfolgt werden. Das erste synthetische Schattenbild der gesamten Schweiz wurde 1977

erstellt [4], [5] (Abb. 5). Es basiert auf einem digitalen Geländemodell mit 250 m Maschenweite. Ähnliche Schritte wurden in Frankreich verfolgt [6], und ein vergleichbares Computerbild vom Montrose (Colorado) wurde 1978 in den USA veröffentlicht [7].

Im folgenden wird gezeigt, wie die Schattierung für die Synthese von Bildern eingesetzt wird. Das Verfahren wird auf ein Geländemodell der Schweiz angewendet, und realistische Schattenbilder werden vorgestellt. Später wird auf die Möglichkeit der Synthese von perspektivischen Schattenbildern eingegangen, und auch hier werden Beispiele gezeigt. Zum Schluss soll eine kurze Aufwandabschätzung die definitive Überzeugung der Reife der Bildsynthese für die Praxis vermitteln.

2. Schattierung

In der Abbildung 1 sind die beiden Ursachen der Helligkeitsschwankungen auf einer beleuchteten Fläche eingetragenen.

Der Eigenschatten ist der Ausdruck dafür, dass sich die Helligkeit eines beleuchteten Flächenelementes durch Rotation verändert. Die Helligkeit eines Flächenelementes ist abhängig von der relativen Orientierung der Fläche zum einfallenden Strahl. Falls die Fläche von hinten beleuchtet wird, ist die Helligkeit null.

Der Ausdruck für die Helligkeit lautet also:

$$h = \begin{cases} h_0 \cdot \cos \alpha & \text{falls } \cos \alpha \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

mit dem Winkel α zwischen Normale zur Oberfläche und einfallendem Lichtstrahl.

Dieses einfache Gesetz gilt zwar physikalisch nur für einen Lambert-Strahler. Es gibt trotzdem gute Resultate. Vollständigere Modelle sind in [8] zu finden.

Der Schlagsschatten entsteht dann, wenn der Lichtstrahl zu einem Flächenelement von einem anderen Flächenteil unterbrochen wird. Die entsprechende Helligkeit wird dadurch reduziert auf:

$$h' = \begin{cases} \varepsilon \cdot h & \text{bei Schlagsschatten} \\ h & \text{sonst} \end{cases} \quad 0 \leq \varepsilon < 1$$

Der Aufwand bei der rechnerischen Ermittlung von Eigenschatten und Schlagschatten ist recht unterschiedlich. Indem der Eigenschatten von den einzigen Eigenschaften des entsprechenden Flächenelementes abhängig ist, muss bei der Ermittlung des Schlagschattens jeweils die gesamte Fläche berücksichtigt werden. Der Eigenschatten stützt sich auf die lokalen Eigenschaften der Fläche und wird einfach durch sequentielle Bearbeitung der Flächenhöhen ermittelt. Hingegen ist die Berechnung des Schlagschattens, wegen seines globalen Charakters, mit einem grösseren Aufwand verbunden. Abbildung 2 zeigt die hier verwendete Methode, welche auf dem Prinzip der Ausbreitung eines Schattenprofils beruht. Von der Lichtquelle ausgehend bildet sich dieses Schattenprofil beim ersten begegneten Flächenprofil und pflanzt sich dann mit den Lichtstrahlen über die gesamte Fläche fort. Beim Vorbeilaufen an jedem Flächenprofil erfährt es eine entsprechende Änderung. Gleichzeitig wird aus dem Vergleich von Flächen- und Schattenprofil der Schlagschatten ermittelt.

Abbildung 3 ist ein Beispiel des Schattenbildes einer geometrischen Fläche. Die Fläche wird geometrisch als eine Funktion $z(x,y)$ definiert und dann schattiert. Zuerst wird der Eigenschatten berechnet, dann der Schlagschatten überlagert. Selbstverständlich können die einzelnen Schatten auch separat erzeugt werden. Empfindungsmässig sorgt der Eigenschatten für den plastischen Eindruck des dargestellten Körpers, indem der Schlagschatten eine geometrische Beziehung zwischen den Körpern zu schaffen vermag. Z. B. kann b) als zwei in der Luft schwebende Körper interpretiert werden, hingegen sind in d) die beiden Körper eindeutig nebeneinander und auf einer Grundfläche liegend zu sehen.

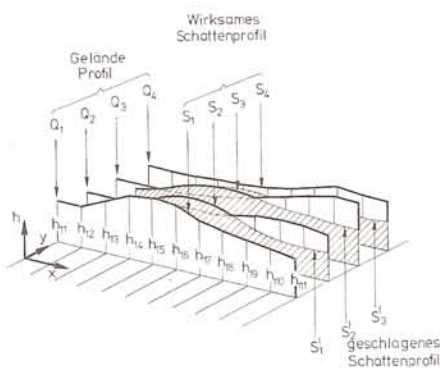


Abb. 2 Prinzip der Berechnung des Schlagschattens. Das Gelände wird in die Profile $Q_1 \dots Q_{11}$ zerlegt. Ein Schattenprofil wandert durch das Gelände und definiert jeweils ein geschlagenes Schattenprofil S' , bevor es wieder durch Kombination mit Q zum wirksamen Schattenprofil S wird.

3. Schattenkarten

Im folgenden wird die Anwendung der Schattierung auf eine reelle Geländefläche beschrieben. Praktisch wird die Geländefläche durch die Menge der Höhenknoten über einem Stützstellennetz definiert. Je dichter die Stützstellen, je besser ist die Geländebeschreibung. Das verwendete Geländemodell umfasst die ganze Schweiz und besteht aus den digitalisierten Höhenknoten auf

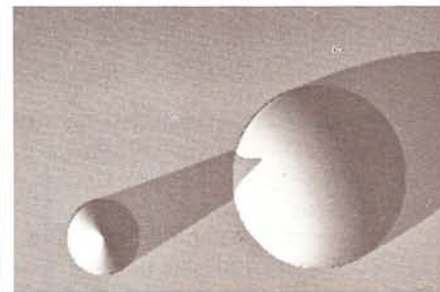
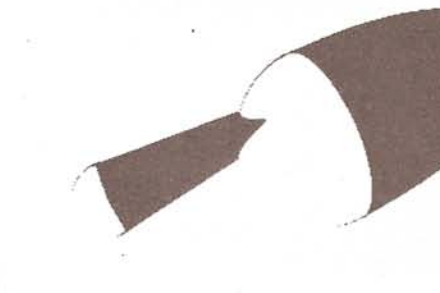
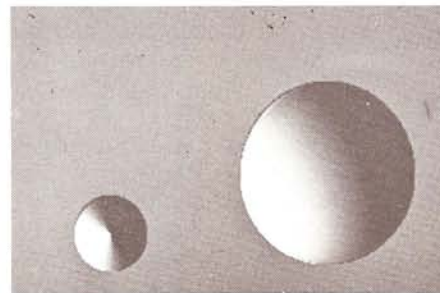
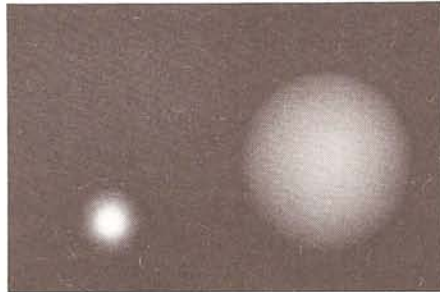


Abb. 3 Die Schattierung eines Modells: Die geometrische Fläche (Kegel und Halbkugel) wird analytisch definiert und der Schattierung unterworfen.

- Höhenbild des Modells vor der Schattierung. Die Höhe wird direkt als Bildhelligkeit dargestellt.
- Eigenschatten des Modells nach dem \cos -Gesetz. Die Lichtquelle befindet sich links unten.
- Schlagschatten des Modells.
- Vollständige Schattierung des Modells bestehend aus der Kombination von Eigen- und Schlagschatten.

einem quadratischen Maschennetz mit 250 m Maschenweite. Abbildung 4 ist die bildliche Darstellung dieser Höhenknoten, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen Bildhelligkeit und Höhe im Gelände existiert. Zwar gilt dunkel für tiefe und hell für hohe Gebiete. Die Tatsache, dass die geometrische Anordnung der Punkte derjenigen der Landeskarte entspricht, wird im Wort Höhenkarte ausgedrückt. Selbstverständlich ist die wahrnehmbare Helligkeit des Bildes nicht in der Lage, die Höhenskala mit voller Auflösung zu reproduzieren. Auch wenn dem so wäre, würde das Bild trotzdem keinen befriedigenden Eindruck des Reliefs liefern, was auch zu erwarten war.

Mit dem Ziel, das Relief realistisch darzustellen, wurde die Schattierung des Geländemodells vorgenommen (Abb. 5 und 6). Ein wichtiger Parameter bei der Schattierung ist die Wahl der Lichtquelle. Beliebige Lichtrichtungen können gewählt werden, wobei nicht alle Richtungen sinnvoll sind. Je nach Anwendung wird man z. B. eine natürliche Sonnenrichtung oder eine künstliche «unmögliche» Lichtrichtung vorziehen. Auch von Ort zu Ort unterschiedliche Lichtrichtungen sind im Prinzip möglich, was aber zu Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Schlagschatten führt.

Es existiert eine visuelle Zweideutigkeit der Schattenkarten, welche bewirkt, dass z. B. derselbe Bildteil einmal als Berg mit westlicher Beleuchtung, dann aber als Tal mit östlicher Beleuchtung interpretiert wird. Das Umschalten zwischen beiden Interpretationen ist möglich. Dieser Effekt kommt manchmal wegen der unkonventionellen, obschon natürlichen Beleuchtungsrichtung zum Ausdruck (Abb. 5). Die in der Kartographie übliche Beleuchtung von oben links (NW) wird in Abbildung 6 dargestellt.



Abb. 4 Höhenbild des Geländemodells der Schweiz vor der Schattierung. Die Höhenknoten werden direkt als Bildhelligkeit wiedergegeben. Das Geländemodell besteht aus rund 1000×1500 Höhenknoten im Abstand von 250 m und bedeckt eine Fläche von ca. $100\,000 \text{ km}^2$. Die unbekanntesten Höhen ausserhalb der Schweiz wurden willkürlich auf Meereshöhe gesetzt.

Ausser der Kartographie, wo die Anwendungsmöglichkeiten offensichtlich sind, sollte dieses Verfahren Fortschritte in manchen Bereichen ermöglichen: Für die Geomorphologie steht eine neutrale Gelände­fläche zur Verfügung, deren Strukturen durch Verschiebung der Lichtquelle fast beliebig verstärkt oder abgeschwächt werden können. Die Schattenzone der Satellit- und Flugbilder können kompensiert werden. Eine Karte der künftigen und direkten Versorgung des Landes mit einem geostationären Fernsehsatelliten wurde schon erstellt [9].

4. Neigungskarten

Eine spezielle Schattenkarte ist diejenige mit senkrechter Beleuchtung. Horizontale Flächen sind hell, steile Hänge erscheinen dunkel. Es entsteht eine Art Pseudo-Neigungskarte mit Helligkeit

$$h_1 = h_0 \cdot \cos \alpha$$

Ein ähnliches Aussehen und eine lineare Abhängigkeit zwischen der Neigung $\sin \alpha$ und der Helligkeit bietet die Neigungskarte der Schweiz in Abbildung 7, welche nach der Formel:

$$h_2 = h_0 (1 - \sin \alpha)$$

berechnet wurde. Diese mit dem Computer erstellte synthetische Neigungskarte liegt sehr nahe bei den geographischen Karten, die früher in der Böschungsschraffen- oder Böschungsschummertechnik erstellt wurden [10]. Es ist selbstverständlich, dass diese Darstellung weniger für den Realismus des Reliefs als für ihre innere Bedeutung, eine Karte der Neigungen, geeignet ist.

5. Perspektivische Schattenbilder

Die bis jetzt erwähnten Schattenbilder und Schattenkarten stellen eigentlich jeweils die Projektion der beschatteten dreidimensionalen Gelände­fläche auf eine horizontale Grundebene dar. Es sind die realistischen Geländeansichten für einen Beobachter im Unendlichen, der senkrecht auf das Gelände schaut. Dieser Spezialfall wird nun verallgemeinert. Es interessiert die Synthese des Bildes, welches die Sicht eines beliebigen Beobachters im Raum simuliert. Ein Beobachter am Ort (x_0, y_0, z_0) schaut in die Blickrichtung (α, β) durch ein quadratisches Fenster mit Öffnung φ . Der Winkel γ beschreibt den übrigen Freiheitsgrad, die Rotation des starr verbundenen Systems Beobachter-Fenster um die Blickachse. Die so definierte Abbildung des Geländes wird als perspektivisches Schattenbild bezeichnet. Es entsteht durch Zentralprojektion des Geländes bezüglich des Beobachtungsortes.

Die vollständige Synthese von perspektivischen Geländebildern findet in

mehreren Schritten statt: Die Schattierung, die perspektivische Transformation, das Clipping, das Erkennen der sichtbaren Flächen, das Bildauffüllen [11]. Das ganze Syntheseverfahren wurde auf einem interaktiven Computer-

system implementiert und auf das oben beschriebene Geländemodell der Schweiz angewendet. Damit können Schattenbilder von beliebigen Orten in beliebige Richtungen generiert werden (Abb. 8 und 9).

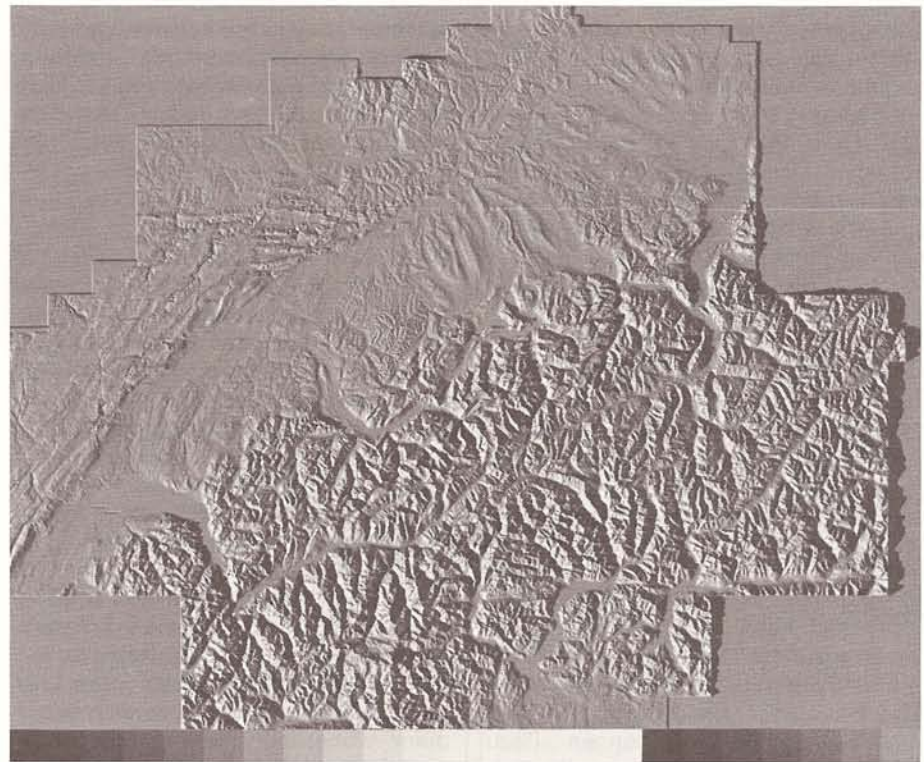


Abb. 5 Schattenkarte der Schweiz mit Eigen- und Schlagschatten. Die Beleuchtung von SW entspricht der natürlichen Sonnenlage bei Tag- und Nachtgleiche um 16h (Azimut = 247°, Höhenwinkel = 20°). Man beachte die Schlagschatten im unteren Rhonetal. An den Modellgrenzen entstehen riesige Schlagschatten auf Meereshöhe.

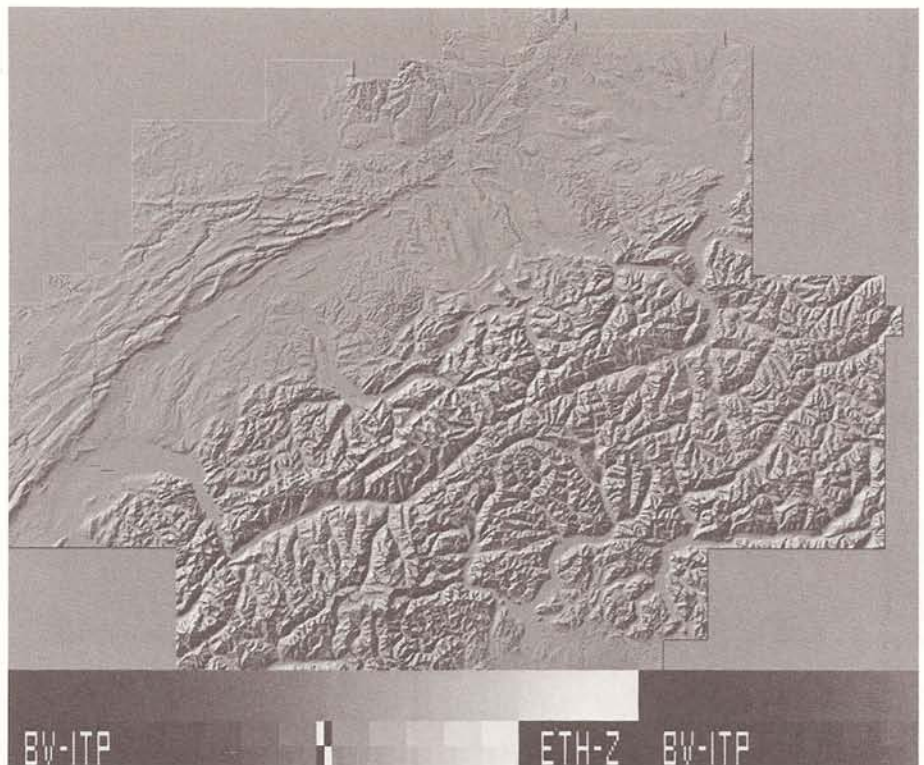


Abb. 6. Schattenkarte der Schweiz mit NW-Beleuchtung und ohne Schlagschatten. Diese Schattierung entspricht der Beleuchtung, wie sie in der Kartographie verwendet wird. Der Vergleich mit Abbildung 5 zeigt, dass durch die Beleuchtungsänderung sehr verschiedene Strukturen erscheinen. Der Jura ist ein gutes Beispiel dafür.

Abbildung 8 ist das Beispiel eines Schattenbildes, welches die Synthesetechnik mit Dreiecken verwendet. Im Gelände werden durch jeweils 3 Höhenkoten dreieckige Flächen definiert. Jedes Dreieck wird dann schattiert und in die Bildebene projiziert. Da bei dieser Methode 3 Eckpunkte die Dreiecksflächen genau definieren, entsteht ein exaktes Bild einer aus Facetten bestehenden Geländefläche.

Abbildung 9 ist ein Stellvertreter der sanften Technik. Das Verfahren basiert auf den viereckigen Geländeflächen, welche durch das Maschennetz definiert sind. Die Schattierung wird zuerst für jeden Eckpunkt bestimmt. Dann wird das Viereck perspektivisch transformiert. Schliesslich findet erst beim Viereckauffüllen die Interpolation zwischen den Helligkeiten in den Ecken statt. Diese Technik garantiert auch sanfte Übergänge zu den Nachbarflächen.

Unter den zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten ist der Flugsimulator wohl die attraktivste. Grundsätzlich bietet die Technik der Bildsynthese die Möglichkeit, die Sicht aus dem Cockpit zu simulieren. Der Flugzeug- oder Helikopterpilot kann künstliche Sichtflüge im simulierten Gelände durchführen. Die wichtige Voraussetzung für diese Anwendung ist, die Bilder genügend schnell berechnen zu können. Dazu braucht es speziell geeignete Parallelrechner. Solche sind heute für die Landung auf der Piste im Einsatz. Für 1980 ist ein Gerät vorgesehen, das bis 8000 Kanten in Echtzeit bearbeiten kann [12].

Einige Anwendungsbeispiele sind: Darstellung einer Autobahn, eines Staudammes, einer Brücke im Gelände, Synthese und automatische Beschriftung von Panoramakarten, Schattenbild einer Gegend als Träger für weitere Informationen, z. B. im Zusammenhang mit einem Landinformationssystem. Für manche denkbare Anwendungen sind Geländemodelle mit höherer Auflösung notwendig. Es besteht Anlass zur Hoffnung, dass solche in naher Zukunft erstellt werden.

6. Rechananlage

Um eine Vorstellung des Rechenaufwandes für die Bildsynthese zu vermitteln, werden im folgenden die verwendeten Rechenmöglichkeiten beschrieben und einige typische Rechenzeiten angegeben. Beansprucht wurden sowohl der Grosscomputer der ETHZ als auch das institutseigene Minicomputer-System, welches hauptsächlich aus einem Allzweck-Minicomputer mit RTE-Betriebssystem und zusätzlichen Bild-Ein- und Ausgabemöglichkeiten besteht (Abb. 10). Wegen der grossen anfallenden Datenmenge wurden die Schattenkarten meistens auf dem Grosscomputer berechnet, dagegen die perspektivischen Schattenbilder mit dem Minicomputer, wobei man die angebotenen interaktiven Möglichkeiten besonders schätzt. Die Berechnung der Schattenkarten erfolgt in einem einzigen sequentiellen Durchlauf durch die Höhendaten. Bei gegebenem Algorithmus ist die tota-

le Rechenzeit proportional zur Anzahl Bildpunkte. Bei der Synthese der Schat-



Abb. 8 Perspektivisches Schattenbild mit der Dreieckstechnik. Blick von Tour d'Ai (137/567,5/3000) nach Norden (Öffnungswinkel = 62° , Bodenneigungswinkel = 20°). Beleuchtung von SW. Sichtbar sind in der Bildmitte die Pointe d'Aveneyre und hinten von links nach rechts: Rochers de Naye, Cape aux Moines, Dent de Cordon, Vanil Carré. Am Ort des heutigen Lac de l'Hongrin ist auf dem Bild noch der Talboden sichtbar.

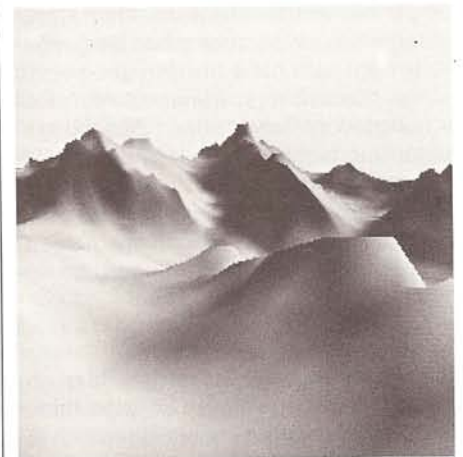


Abb. 9 Perspektivisches Schattenbild mit der sanften Technik. Blick vom Faulhorn (169,5/643,25/3000) in Richtung ESE (Öffnungswinkel = 62° , Bodenneigungswinkel = 10°). Die Beleuchtung entspricht jener bei Tag- und Nachtgleiche um 13h (Azimut = 200° , Höhenwinkel = 41°). Sichtbar sind im Vordergrund die Reetikette und im Hintergrund von links nach rechts: Grosse Scheidegg, Wetterhorn, Lauteraarhorn und Schreckhorn, Mittellegigrat.



Abb. 7 Neigungskarte der Schweiz. Die optische Dichte ist proportional zur örtlichen Neigung des Geländes. Insbesondere beachte man die flachen Gletscher.

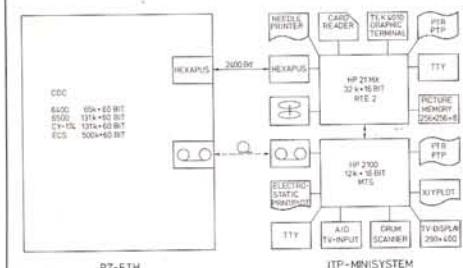


Abb. 10 Rechnerkonfiguration.

tenkarte (Eigen- und Schlagschatten) von Abbildung 5, mit ihren 1000×1500 Bildpunkten, beträgt die Rechenzeit auf dem Grosscomputer 400 Sekunden, d. h. 0,26 ms pro Punkt im Durchschnitt. Die gewonnenen Daten werden via ein Magnetband auf den Minicomputer übertragen, wo dann die eigentliche fotografische Aufzeichnung stattfindet.

Die perspektivischen Schattenbilder werden direkt auf dem Minicomputer berechnet und auf einem Fernsehschirm dargestellt. Der Rechenaufwand ist sehr unterschiedlich. Normalerweise wird von einem Geländeausschnitt ausgegangen, der durch entsprechende Transformationen in die Bildebene projiziert wird. Dementsprechend steigt die Rechenzeit mit der Anzahl Geländestützpunkte einerseits und der der Bildelemente andererseits. Vor allem ist aber die Rechenzeit sehr stark abhängig von der Komplexität der Bilder, welche z. B. den Flächenverdeckungsfaktor oder den Clippingverlust umfasst. Das Schattenbild der Abbildung 9 stützt sich auf ein 11,25×11,25 km grosses Gelände mit 46×46 Stützpunkten. Die Bildebene besteht aus einem Bildspeicher mit 256×256 Bildpunkten. Für dieses typische Bild beträgt die Rechenzeit auf dem Minirechner 500 s.

7. Zusammenfassung

Die Bildsynthese wurde an Hand eines Geländemodells der Schweiz demonstriert. Die erzeugten Schattenkarten ergeben einen guten plastischen

Eindruck des reinen Reliefs, und zwar unabhängig von der Bodennatur oder Bodenbedeckung. Eine grosse Flexibilität bietet die Möglichkeit, die Beleuchtungsrichtung beliebig zu wählen. Auf diese Weise können alle Sonnenlagen aber auch künstliche Lichtquellen simuliert werden. Ein anderer Aspekt der Schattenkarte ist die physikalische Bedeutung der dargestellten Helligkeit als Bestrahlungsstärke des Bodens. Selbstverständlich können aus einem Geländemodell auch viele andere Informationen gewonnen werden. Die Neigungskarte der Schweiz ist ein Beispiel dafür.

Aufwendiger ist die Synthese von perspektivischen Schattenbildern. Damit wird aber die Möglichkeit geboten, beliebige Geländeteile unter beliebigen Blickrichtungen, Sichtwinkeln und Entfernungen zu generieren. Die Beispiele zeigen zwei Verfahren zur Darstellung der Geländeoberfläche. Je nach Anwendung wird man zwischen dem modellgetreuen Facettenbild und dem realistischen sanften Bild wählen müssen.

Für die Bildsynthese eignet sich ein Allzweck-Minicomputersystem mit der Möglichkeit, Halbtonbilder darzustellen. Damit können sowohl Schattenkarten als auch perspektivische Schattenbilder produziert werden. Die Bildsynthese ist somit reif für die Anwendung.

Der Verfasser dankt Herrn Prof. Dr. E. Baumann für die Unterstützung dieser Arbeit. Ebenfalls sei Herrn PD Dr. T. Celio für viele wertvolle Anregungen gedankt.

Adresse des Verfassers:
H. Hügli, dipl. El. Ing. ETH
Institut für Technische Physik,
ETH-Hönggerberg,
CH-8093 Zürich

Literatur

- [1] Ware Myers, «Interactive Computer Graphics: Poised for Takeoff?», Computer, January 1978, p. 60-74
- [2] Yoeli P.: «Analytische Schattierung», Kart. Nachrichten, Jg. 14, Nr. 4, 1965/b, S. 142-148
- [3] Brassel K.: «Modelle und Versuche zur automatischen Schräglightschattierung», Diss. Universität Zürich, 1973
- [4] Celio T. und Graf J.P.: «Elektronische Erstellung von Bestrahlungs- und Beschattungskarten dreidimensionaler Gegenstände», Mitteilungen GFF, Nr. 1/2, Juni 1977, S. 37-39
- [5] Celio T.: «Bildverarbeitung», 40 Jahre AFIF, Sonderschrift, September 1977, S. 33-35
- [6] Lévy F.: «Le traitement automatisé de l'image», Interphotothèque no. spécial 33-34, décembre 1977, p. 293-301
- [7] Batson R.M., Edwards K. and Eliason E.M.: «Computer-Generated Shaded-Relief Images», Optronics Journal, No. 6, November 1978, p. 1-4
- [8] Blinn J.F.: «Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures», Computer Graphics, Vol. 11, Summer 1977
- [9] Celio T. und Graf J.P.: «Schattenkarte von Fernsehsatelliten», Mitteilungen GFF, Nr. 1/2, Juni 1978, S. 42-43
- [10] Karte 1:750 000 Vorarlberg und Südtirol. Militär. Geogr. Institut, Wien, 1883
- [11] Newman W.M. and Sproull R.F.: «Principles of Interactive Computer Graphics», Mc. Graw-Hill, 1973
- [12] Harvey J.F.: «Current Trends and Issues in Visual Simulation», Proceedings of SPIE, Vol. 162, 1978, p. 2-5

Die Zentral- und Diagonalenbedingungen in ebenen Streckennetzen

N. F. Danial

On peut obtenir les conditions dans un réseau de distances en le divisant en systèmes centraux. Chaque système central fournit alors une équation de condition dont les coefficients peuvent être déterminés par construction géométrique.

On peut simplifier et contrôler les calculs en appliquant la méthode du travail minimum. On considère alors les distances mesurées comme les barres droites et élastiques d'un treillis. Chaque système central contient une barre surabondante. En coupant cette dernière, on supprime une liaison et le treillis se détend. La déformation résultante est l'écart de fermeture linéaire de l'équation de condition. Si l'on applique sur la

barre coupée une charge virtuelle de + 1, les autres barres sont mises sous tension. L'article montre que les tensions sont numériquement égales aux coefficients de l'équation de condition.

La méthode est générale et ne s'applique pas qu'aux systèmes centraux. Pour les réseaux de distances avec de longues diagonales par exemple, on peut obtenir les équations de condition sans subdivision en systèmes centraux et sans introduire d'observations fictives. Cette possibilité est montrée à l'aide d'un exemple numérique.

Les distances entre points fixes reçoivent des poids infinis afin qu'elles ne soient pas modifiées par la compensation.

Einleitung

Streckennetze können vermittelnd oder bedingt ausgeglichen werden. Im allgemeinen zieht man die Methode der bedingten Beobachtungen vor, weil weniger Bedingungen auftreten als Unbekannte in der vermittelnden Ausgleichung. Die Zahl der Bedingungen ist sehr leicht zu ermitteln. Sie ist genau dieselbe wie die Anzahl der Seitengleichungen in einem entsprechenden Triangulationsnetz. Jedes Streckennetz kann in eine Anzahl von Zentralfiguren zerlegt werden. Eine Zentralfigur stellt eine einfach überbestimmte Konfiguration von Strecken dar und liefert deswegen eine Bedingung. Diese wird normalerweise durch die Winkelsummen-