

# Shape from Shading

## 3D-Höhenmodell aus 2D-Foto mit Schattenwurf

Dipl.-Ing. (FH), Kapt.(AG) Wolf Scheuermann

Forschungskontor  
Hamburg 2020

### Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Ziel.....	2
3. Methode.....	3
3.2. Idee des Verfahrens.....	3
3.2. Vorbereitung des Fotos.....	4
3.3. Numerische Integration.....	4
3.4. Korrekturen.....	5
3.4.1. Streifenfilter.....	6
3.4.2. Überhöhung der Höhen.....	8
4. Darstellung der Höhen des Geländemodells.....	10
4.1. Ableitung (= Beleuchtung) des Höhenreliefs.....	10
4.2. Fehler des DGM.....	11
5. Weitere Abbildungen des DGM.....	13
6. Kontrollrechnung.....	14
7. Schluß.....	15
Anhang.....	17
Qbasic™-Programm.....	17

# 1. Einleitung

Es gibt verschiedene Methoden, um aus Fotos Information über die dreidimensionale Struktur der dargestellten Objekte zu gewinnen. Die hier angewendete Methode heißt Shape-from-Shading und bezeichnet die Ausnutzung der Schattierungen und Helligkeitsänderungen eines einzigen Fotos, um die dreidimensionale Gestalt der Darstellung zu errechnen.

Der menschliche visuelle Cortex ist evolutiv zu dieser Auswertung in der Lage und läßt sich auch durch Helligkeit oder Farbe der Oberfläche nicht stören, wie das folgende Bild des Mondkraters Eratosthenes zeigt.



*Bild 1: Fotografische Aufnahme des Mondkraters Eratosthenes.*

Wir sind, bei angenommenem Lichteinfall von links, ohne weiteres in der Lage, Erhebungen und Berge zu erkennen und die Form des Kraters selbst als einer Schüssel ähnelnd wahrzunehmen. Auch die Wölbung der Mondoberfläche läßt sich erahnen.

Es ist aber nicht Ziel dieser Arbeit, etwa mittels Evolutionsstrategie oder künstlicher Intelligenz, basierend auf neuronalen Netzen, dieses Ergebnis zu erreichen. Wir beschränken uns auf eine viel einfachere – und zugegebenermaßen auch nicht vollständig korrekt arbeitende – Methode.

## 2. Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist die Berechnung der Höhenschichten eines Fotos, wie etwa des Bildes 1.

Das angewendete Verfahren ist einfach und direkt und wird mit seinen Vor- und Nachteilen beschrieben und die Resultate werden vorgestellt.

# 3. Methode

Um das Foto leicht bearbeiten zu können verwenden wir das Grafikformat PGM (Portable Grey Map). Auch die Ergebnisse der Bearbeitung lassen sich, in diesem ASCII-Format abgelegt, mit jedem Grafikprogramm, das dieses Format lesen kann, veranschaulichen.

Hier wird das Foto in 256 Graustufen von Schwarz (0) bis Weiß (255) im Intervall [0,255] wiedergegeben mit einem simplen Header: Nach einer einleitenden Zeile und einem Quellennachweis geben die drei folgenden Zahlen die Anzahl der Spalten, der Zeilen und den Wert der höchsten Graustufe wieder. Dann folgen die Grauwerte der Pixel zeilenweise ohne Unterbrechung von links nach rechts und von oben nach unten gescannt.

```
P2
# Created by QBasic
400 327
255
78 81 79 81 81 78 81 79 81 80 81 83 85 84 82 79 84 81 80 82 83 82 81 81
83 84 90 88 89 92 88 89 88 83 85 84 86 88 82 81 80 81 81 79 76 76 79 81
77 77 77 76 76 75 76 76 75 80 78 75 75 77 78 80 76 79 77 81 82 79 81 78
80 78 74 79 82 82 88 89 94 86 84 82 75 70 71 72 74 73 78 76 75 76 73 75
80 75 75 73 74 78 74 75 75 74 77 73 73 75 71 70 73 73 74 76 76 75 77 80
73 74 74 72 72 74 74 73 67 72 72 74 73 70 74 72 73 75 71 74 74 71 73 69
72 71 74 73 68 68 72 72 74 72 71 72 73 72 73 74 77 73 77 74 69 73 73 75
75 76 79 74 72 76 75 78 81 76 78 76 76 78 76 81 77 78 81 83 86 85 83 81
78 82 80 77 78 78 77 79 74 74 69 73 75 72 74 72 74 75 70 ...
```

Bild 2: Beginn des Fotos aus Bild 1 im PGM-Format (ERATOST0.PGM).

## 3.2. Idee des Verfahrens

Das Bild wird zeilenweise ausgewertet. Die Idee der Methode lässt sich einfach beschreiben: Betrachtet man das Höhenprofil einer Zeile als Graph der Funktion einer Variablen, so ergibt die Ableitung dieser Funktion nach dieser Variablen das von links beleuchtete Bild des Höhenzuges mit Schattenwurf:

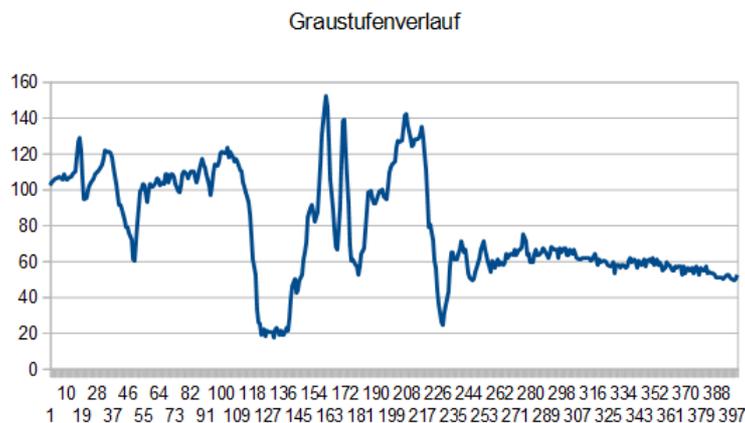


Bild 3: Schattierungsverlauf der Bildzeile durch den Zentralberg den Kraters.

Umgekehrt erhalten wir somit durch Integration dieser Kurve das Höhenprofil der Zeile.

### 3.2. Vorbereitung des Fotos

Hier beginnen nun die ersten Schwierigkeiten:

Die (numerische) Ableitung der Kurve (Zeile im Foto) wird im Prinzip durch die Differenz benachbarter diskreter Werte (Pixel Values) approximiert. Sind die Werte gleich, geht es also eben weiter, so ist die Differenz Null. Geht es aufwärts, ist die Differenz positiv, geht es dagegen abwärts, negativ. Nun gibt es im Graustufenbild keine negativen Pixelwerte. Alle Werte müssen deshalb angehoben sein. Als idealen Nullwert definieren wir die mittlere Graustufe mit dem Wert 128. Die Schattierungen könnten sich vom Minimalwert (0, schwarz) bis zum Maximalwert (255, weiß) erstrecken. Es stellte sich heraus, daß der Verzicht auf die volle Ausnutzung dieses Intervalls von Vorteil ist.

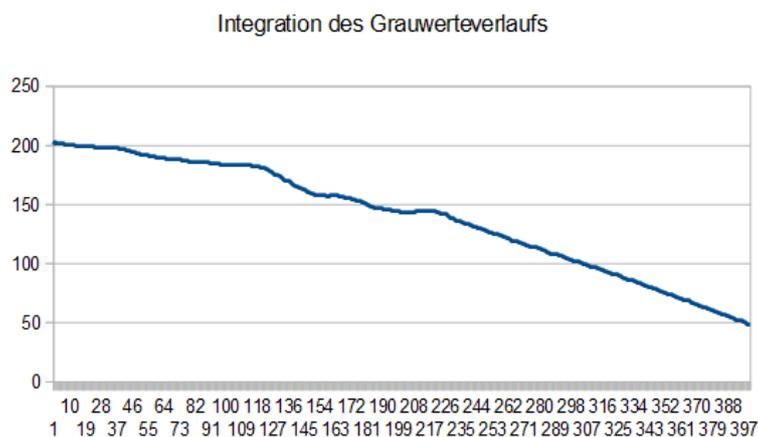
Daraus ergeben sich einige Kriterien, die das Foto vor der Auswertung erfüllen muß: Das Foto muß so gedreht werden, daß es von links beleuchtet erscheint. Es sollte von mittlerer Helligkeit sein und der Kontrast sollte nicht zu hoch sein. Fotos von Oberflächen mit verschiedenen Farben sind nicht geeignet.

Das sind Bedingungen, die nur durch Augenmaß und ungefähr erreichbar sind, wenn der Aufwand nicht zu groß werden soll. Das Foto wird im PGM-Format gespeichert

### 3.3. Numerische Integration

Jede Zeile des Fotos betrachten wir also als die Ableitung des Höhenprofils dieser Zeile. Die numerische Integration addiert fortlaufend die Grauwerte auf und ordnet die Summe dem jeweiligen Pixel zu. Kleine Fehler addieren sich so natürlich zu großen auf.

Wenn der mittlere Grauwert des Fotos nicht dem Nullniveau (128) entspricht, zeigt sich das in der Schiefe des Höhenprofils. Soll das Ergebnis als Bild anschaulich gemacht werden, so müssen die Werte auf das mittlere Niveau angehoben und auf das Intervall  $[0,255]$  normiert werden:



*Bild 4: Normierte Integration der Graustufenkurve aus Bild 3 ohne sonstige Korrektur.*

Das vollständige Bild der Integration ist auf der folgenden Seite zu sehen.

Es ist die erste Andeutung eines digitalen Geländemodells (DGM) zu erkennen. Die Höhenzüge des Kraters werden erkennbar. Je heller das Bild, desto höher ist das Gelände.

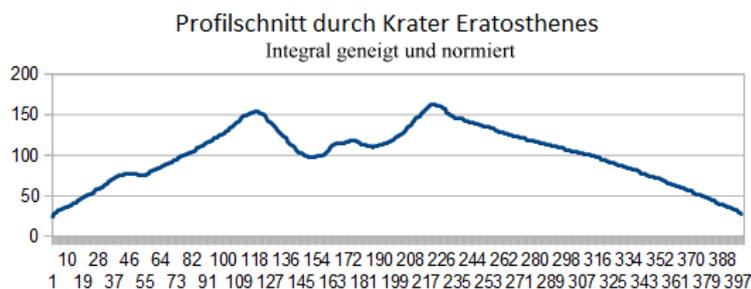


*Bild 5: Unkorrigierte, normierte Integration.*

### 3.4. Korrekturen

Um das DGM besser nacharbeiten zu können werden für jede Zeile folgende Korrekturen angebracht: Der Abstand des Pixels am linken Rand zum Grauwert des Nullniveau (Null = 128) wird bestimmt und die gesamte Zeile um diesen Wert angehoben oder abgesenkt, damit der Linke Rand dem Nullniveau entspricht. Das mag einige unvermeidbare Artefakte im Bild erzeugen, aber der Nutzen überwiegt.

Auch der Abstand des rechten Pixels jeder Zeile zur Null wird berechnet und damit die Schiefe der Zeile beseitigt. Das Ergebnis für unsere Zeile aus Bild 4 sieht nun so aus:



*Bild 6: Korrigierte Integration des Höhenprofils.*

Das so korrigierte DGM ist da beste, was mit dieser simplen Methode erreicht werden kann. Nicht alle Koppelfehler der numerischen Integration können dadurch beseitigt werden, insbesondere wird durch die Randkorrektur eine artifizielle Wölbung herbeigeführt.

Da jede Zeile für sich berechnet wurde, ohne Verbindung oder Korrelation mit den Nachbarzeilen ergibt sich eine typisch streifige Struktur, die nichts mit der Realität zu tun hat.

Leichte weitere Verbesserungen erzielen wir durch die Anwendung von Grafikfiltern in pixel-orientierten Grafikprogrammen.

Hier ist nun das vollständige DGM nach der ersten Berechnung vor der Weiterbearbeitung mit Filtern in einem Grafikprogramm:

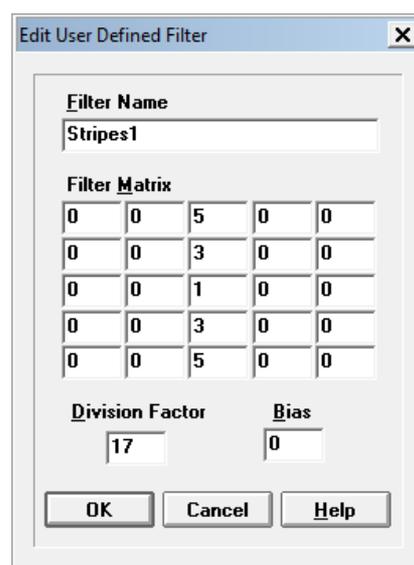


*Bild 7: Erstes vollständige DGM*

Gut zu erkennen sind die nach wie vor erhaltenen Streifen von einem Höhenprofil zum nächsten. Mit einfachen Grafikfiltern kann dieser Effekt etwas abgemildert werden.

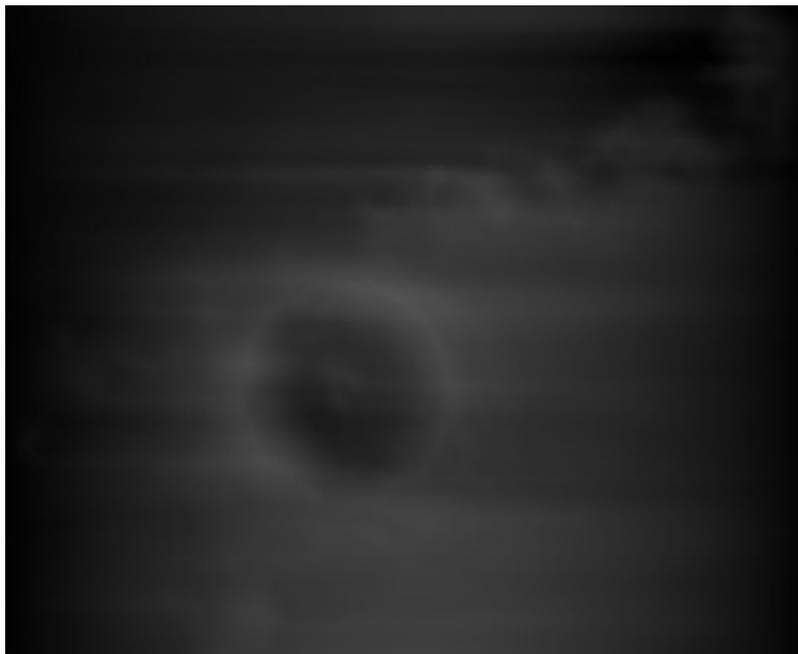
### 3.4.1. Streifenfilter

Zuerst wenden wir einen gewichteten Streifenfilter an, der vertikal die weiter entfernten Streifen höher gewichtet, als die näheren.



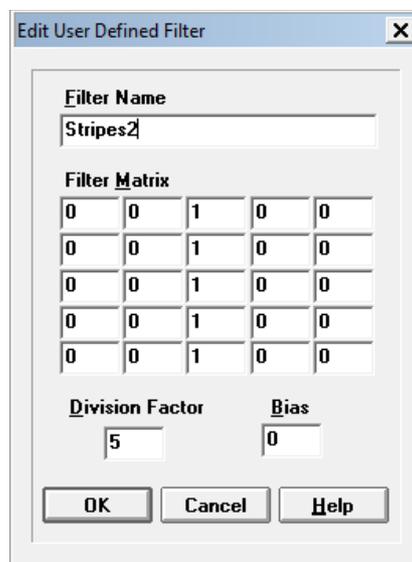
*Bild 8: Gewichteter Streifenfilter.*

Dieser Filter gleicht die Streifen etwas aneinander an, wie das folgende Bild zeigt.



*Bild 9: DGM nach Anwendung des gewichteten Streifenfilters.*

Um das Höhenmodell noch etwas zu glätten lassen wir einen weiteren Streifenfilter darüber laufen, der vertikal den Mittelwert von fünf Streifen berechnet und dem mittleren Streifen zuordnet.



*Bild 10: Mittelwertstreifenfilter.*

Grobe, feinteilige Streifigkeit wird damit beseitigt, eine Restwelligkeit des Modells bleibt jedoch erhalten.

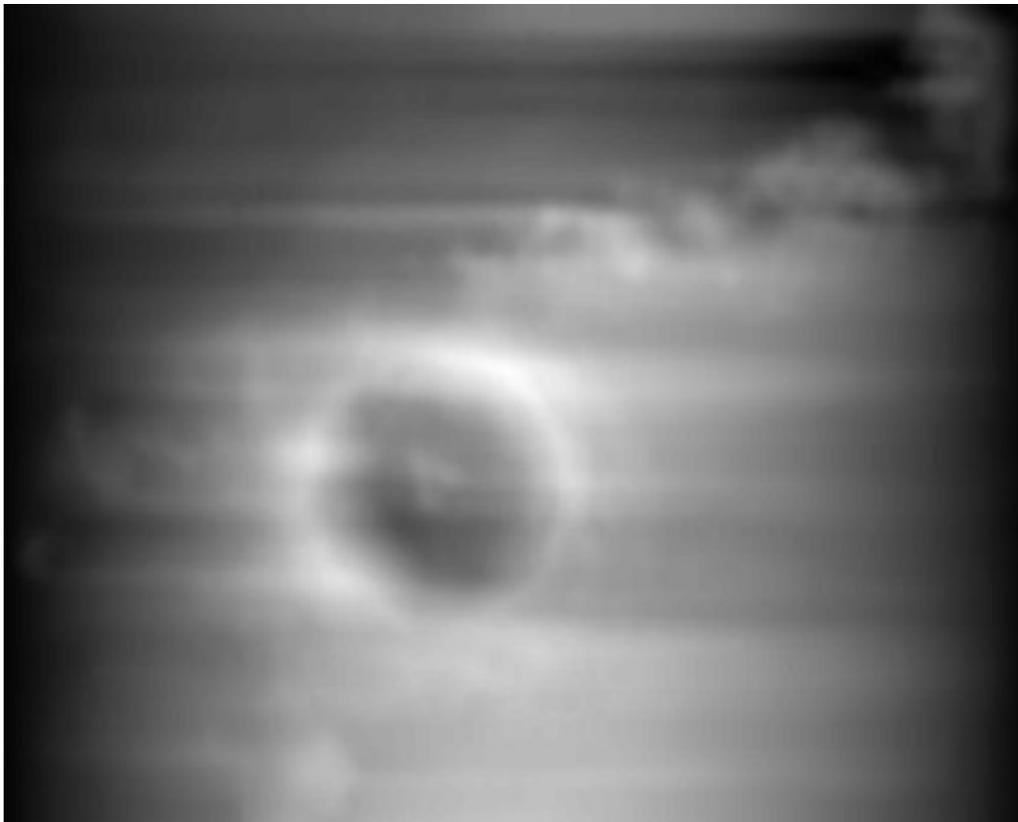


*Bild 11: Erstes Geländemodell des Mondkraters Eratosthenes.*

Abgesehen von den genannten Fehlern, können die Graustufen dieses DGM zwar Geländehöhen zugeordnet werden, haben aber keine Bezugsfläche und sind nicht maßstäblich.

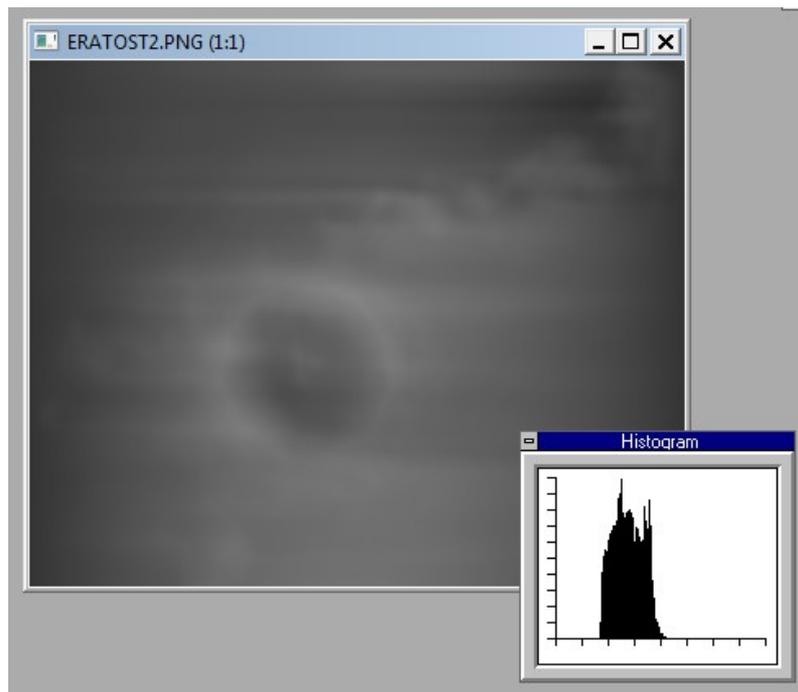
### **3.4.2. Überhöhung der Höhen**

Wollen wir ein möglichst detailliertes Höhenmodell schaffen, so ist es ratsam das volle Graustufenintervall zu nutzen.



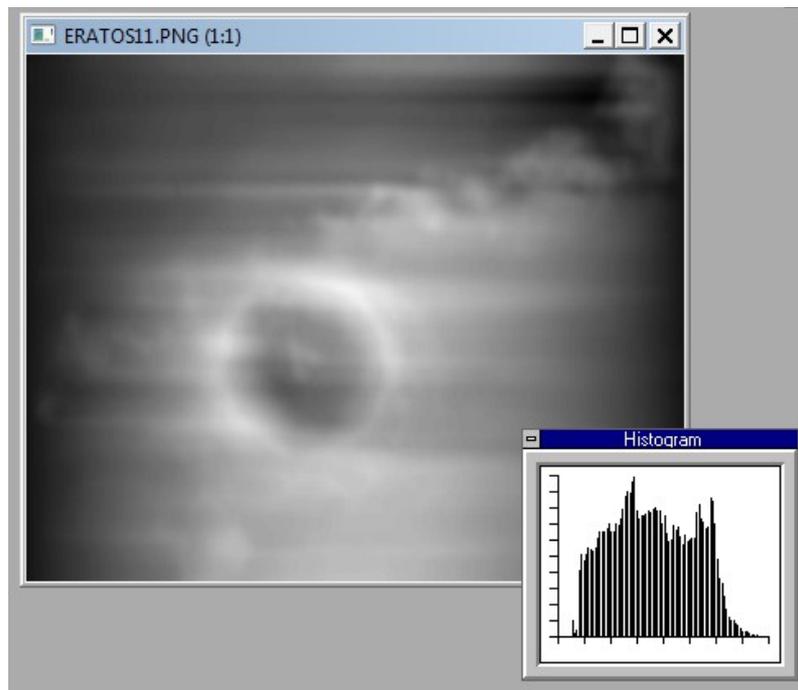
*Bild 12: Momentan bestes Digitales Geländemodell des Mondkraters Eratosthenes.*

Wir benutzen dazu mitgelieferte Histogrammfilter des Grafikprogramms oder justieren manuell Helligkeit und Kontrast möglichst optimal.



*Bild 13: Graustufenhistogramm des Original-DGM.*

Das Graustufenintervall  $[0,255]$  ist im Original-DGM nicht voll ausgenutzt.



*Bild 14: Nachjustiertes Graustufenbild des DGM.*

Letztlich durch ausprobieren von Veränderungen der Parameter Helligkeit und Kontrast ist das gesamte Graustufenintervall ausgenutzt.

Damit erhalten wir unser momentan bestes Digitales Geländemodell des Mondkraters Eratosthenes.

## 4. Darstellung der Höhen des Geländemodells

Zwar stellen die Graustufen des DGM eine erste Visualisierung des Geländes dar, aber eine recht unanschauliche.

Durch zeilenweise Ableitung des Höhenreliefs erzielen wir eine Beleuchtung des DGM, die leichter zu verstehen ist und gegebenenfalls eine Umarbeitung in ein reales Höhengichtmodell erlaubt. Auch die Möglichkeit des 3D-Drucks stehen natürlich offen.

### 4.1. Ableitung (= Beleuchtung) des Höhenreliefs

Wir verwenden folgenden horizontal arbeitenden Ableitungsfiler (wir haben ihn "Relief-Filer" genannt), der die Differenz der Grauwerte zweier benachbarter Pixel einer DGM-Zeile gewichtet dem mittleren Pixel zuordnet. Das behält die Lokalisierung der Höhen bei.

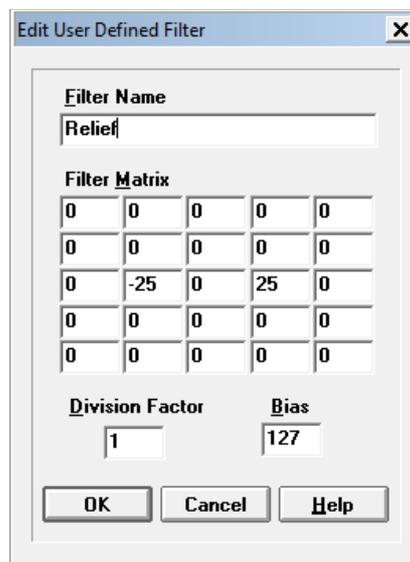


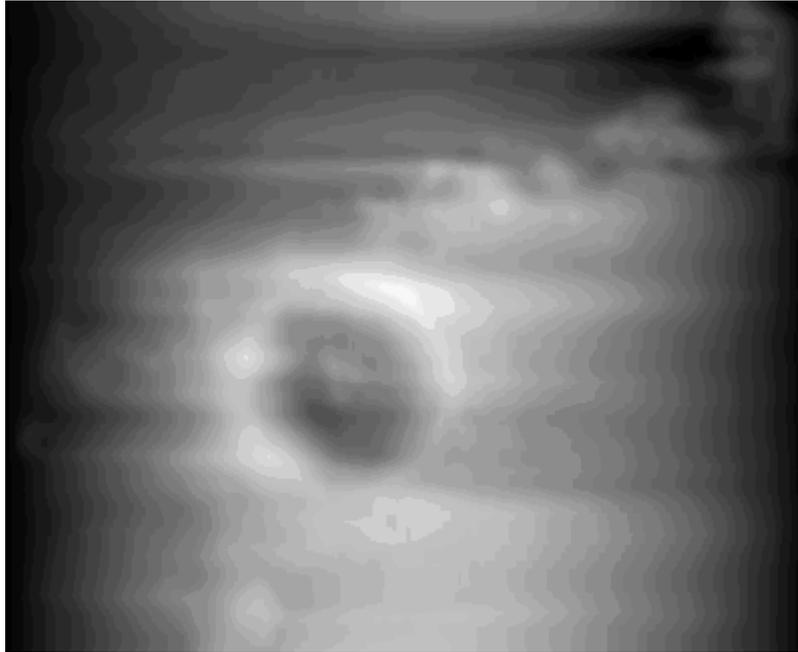
Bild 15: Filter zur Ableitung des Höhenprofils.

Umgesetzt in ein Graustufenbild ergibt es die flache Beleuchtung des Geländemodells mit Licht einfall von links. Der Vergleich mit dem Originalfoto zeigt die Ähnlichkeit:



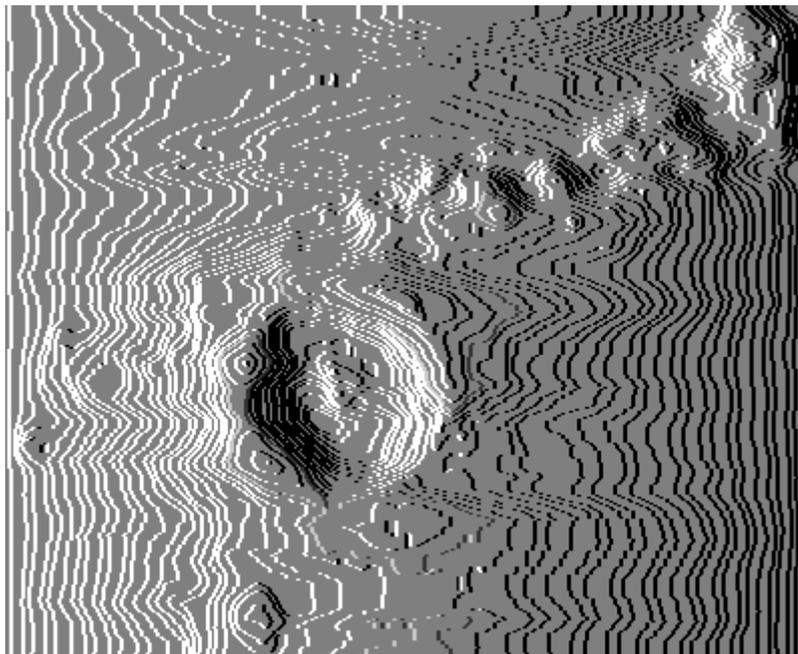
Bild 16: Abgeleitete (= beleuchtete) Höhenprofile (links) im Vergleich mit der Originalaufnahme.

Um ein einfacheres Höhengschichtmodell zu erhalten, reduzieren wir die Anzahl der Farben.



*Bild 17: DGM mit reduzierter Graustufenanzahl.*

Durch Anwendung des Relief-Filters erhalten wir eine Darstellung des Digitalen Geländemodells in erkennbaren Höhengschichten.

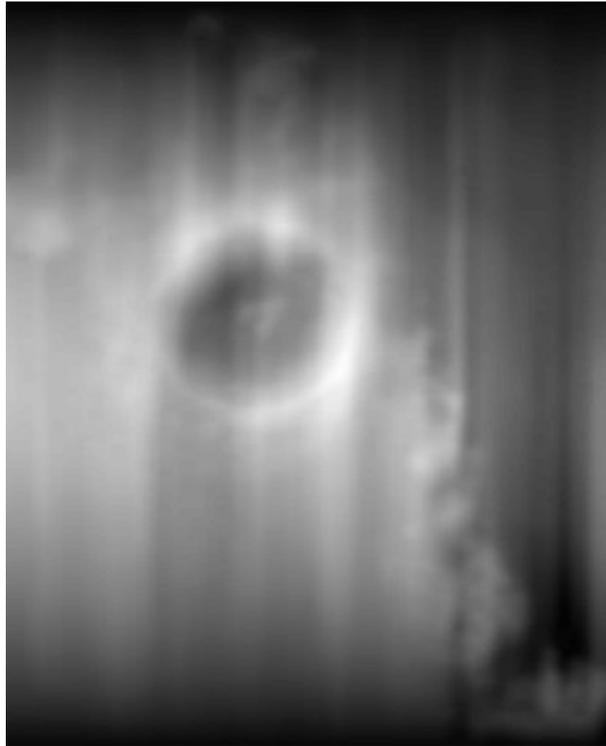


*Bild 18: Höhengschichtendarstellung des DGM.*

## 4.2. Fehler des DGM

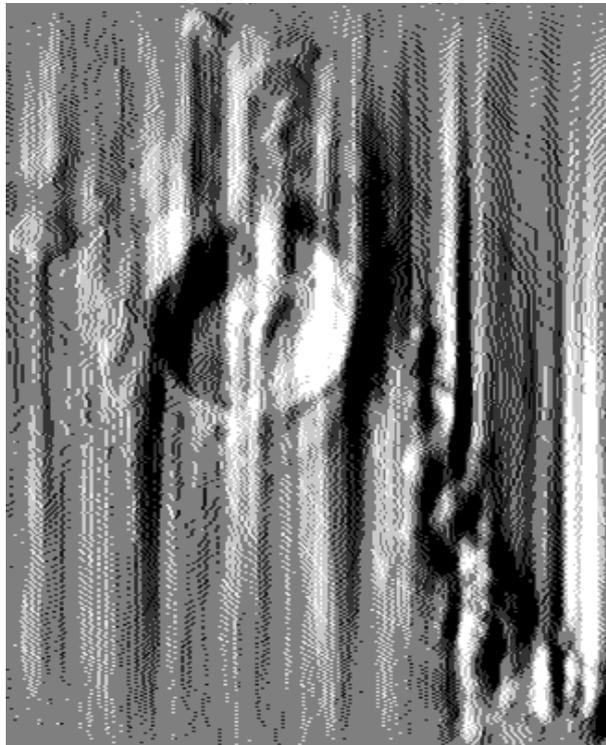
Auch wenn das Resultat plausibel erscheint, enthält das DGM doch auf der Methode beruhende Artefakte. Es hat eine nicht der Realität entsprechende Welligkeit.

Besonders gut wird das sichtbar, wenn wir das DGM um 90° drehen und dann beleuchten, wie es auf der folgenden Seite gezeigt wird.



*Bild 19: Um 90° im Uhrzeigersinn gedrehtes DGM.*

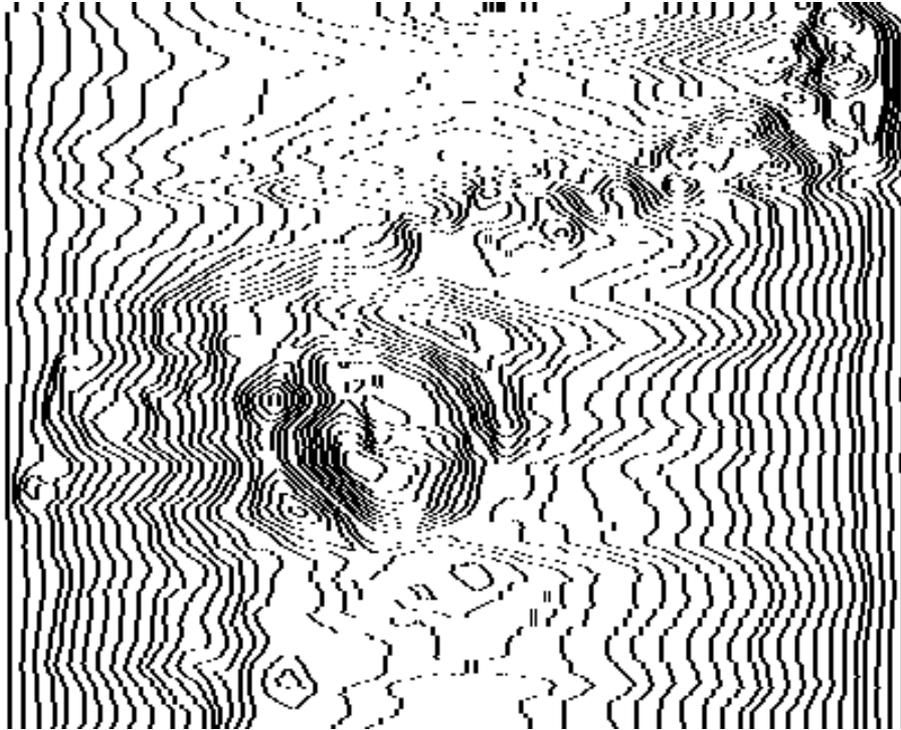
Die Beleuchtung des gedrehten DGM macht die Welligkeit noch deutlicher sichtbar. Es bedarf noch der Entwicklung einer Methode, diese zu beseitigen.



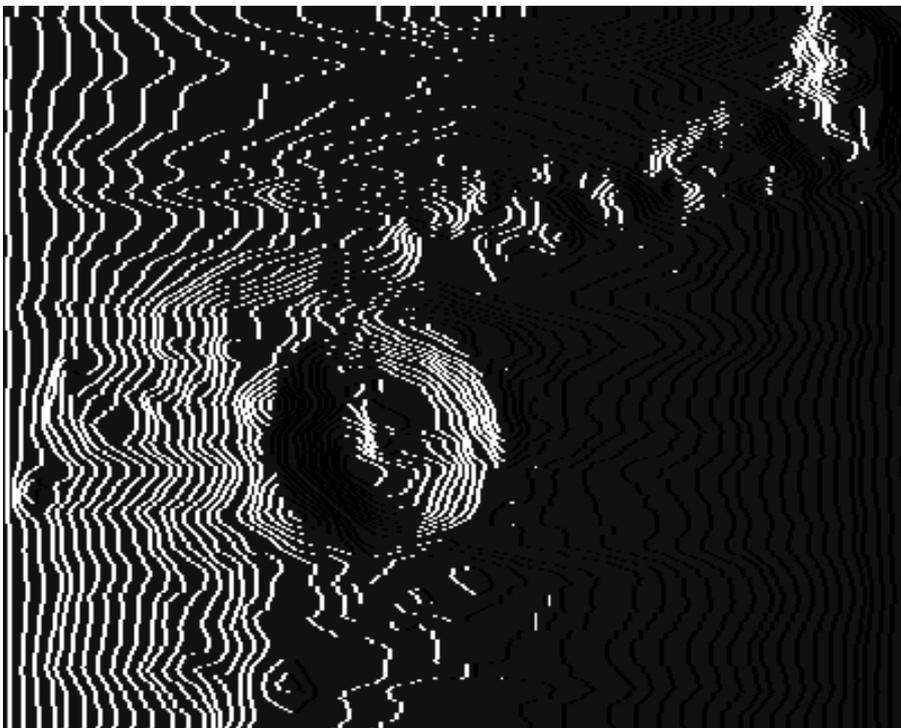
*Bild 20: Beleuchtetes (abgeleitetes), gedrehtes DGM.*

## 5. Weitere Abbildungen des DGM

Aus dem DGM lassen sich weitere Darstellungen des Geländes herleiten, wie z.B. Höhenlinienkarten oder schlicht ästhetische Bilder.



*Bild 21: Höhenlinienkarte des Mondkraters Eratosthenes.*

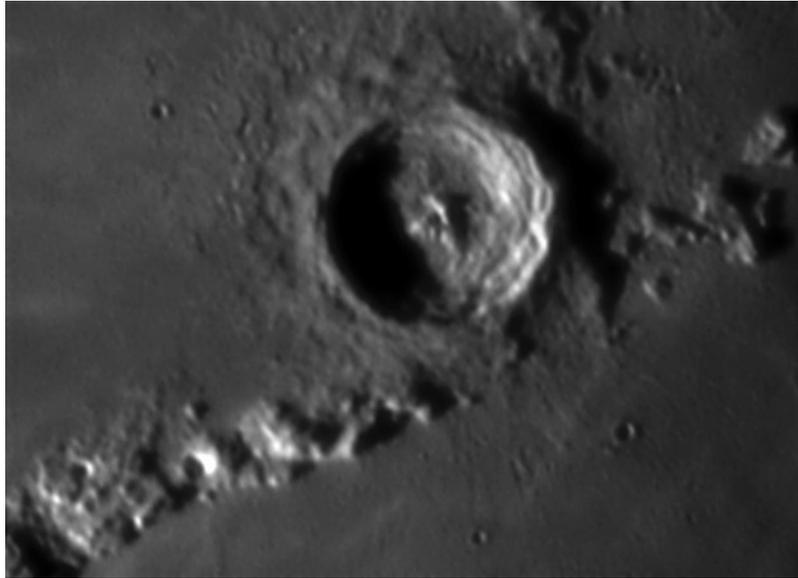


*Bild 22: Dekorative Darstellung des Mondkraters Eratosthenes.*

## 6. Kontrollrechnung

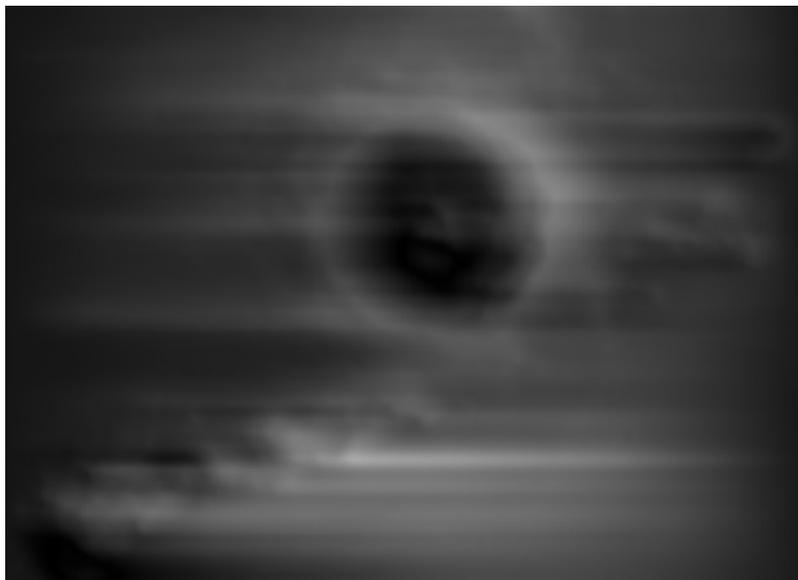
Zur Kontrolle – und in der heimlichen Hoffnung, die Welligkeit des DGM damit korrigieren zu können – berechneten wir ein weiteres Foto desselben Mondkraters in einem ähnlichen Ausschnitt, jedoch mit Beleuchtung von der anderen Seite.

Zur Vorbereitung mußte das Foto so gedreht werden, daß der Lichteinfall von links zu kommen scheint.



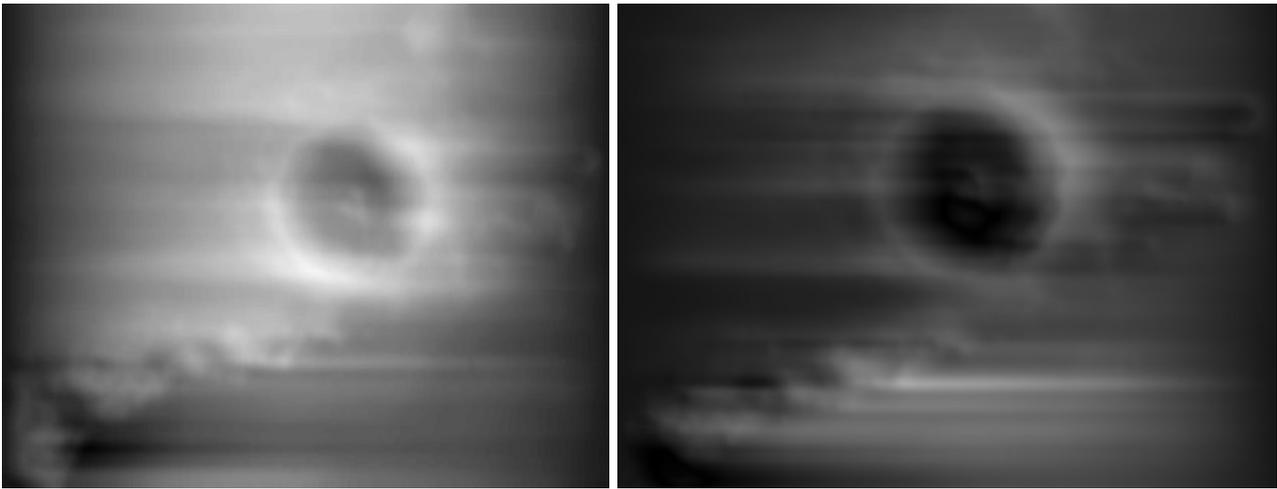
*Bild 23: Vorbereitetes Kontrollfoto.*

Nach Durchlaufen der beschriebenen Prozeduren unserer Methode erhalten wir das Geländemodell:



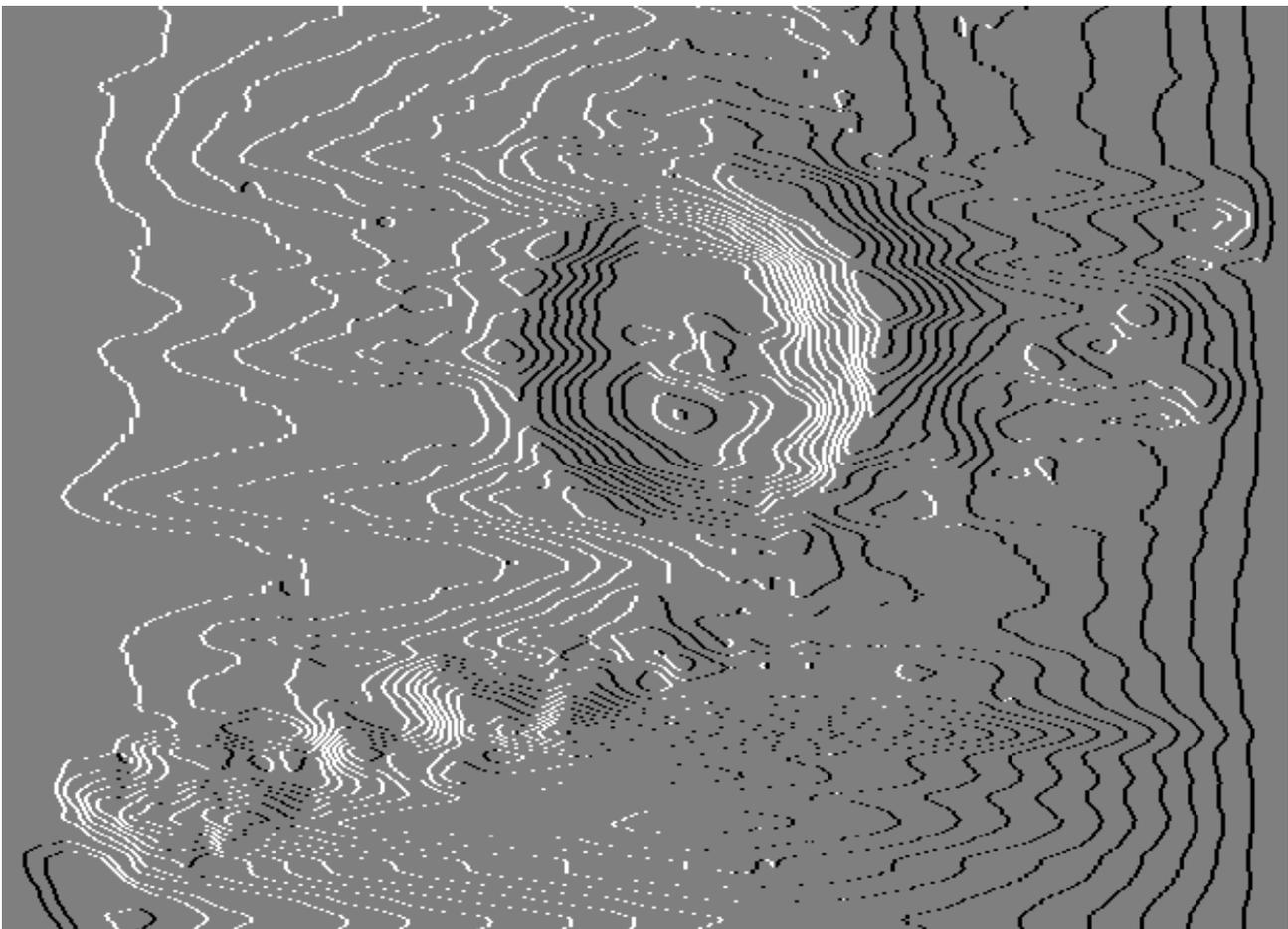
*Bild 24: Alternatives Geländemodell.*

Der Vergleich mit unserem ersten Geländemodell zeigt aber, daß die systemimmanente Welligkeit des Verfahrens sich an exakt denselben Stellen wiederfindet, das alternativ berechnete Geländemodell also nicht zur Korrektur des ersten, etwa durch Überlagerung, geeignet ist.



*Bild 25: Vergleich von erster Berechnung (links, gedreht) mit Kontroll-Berechnung des DGM.*

Das Höhengichtbild des zweiten Digitalen Geländemodells ist dennoch sehr anschaulich:



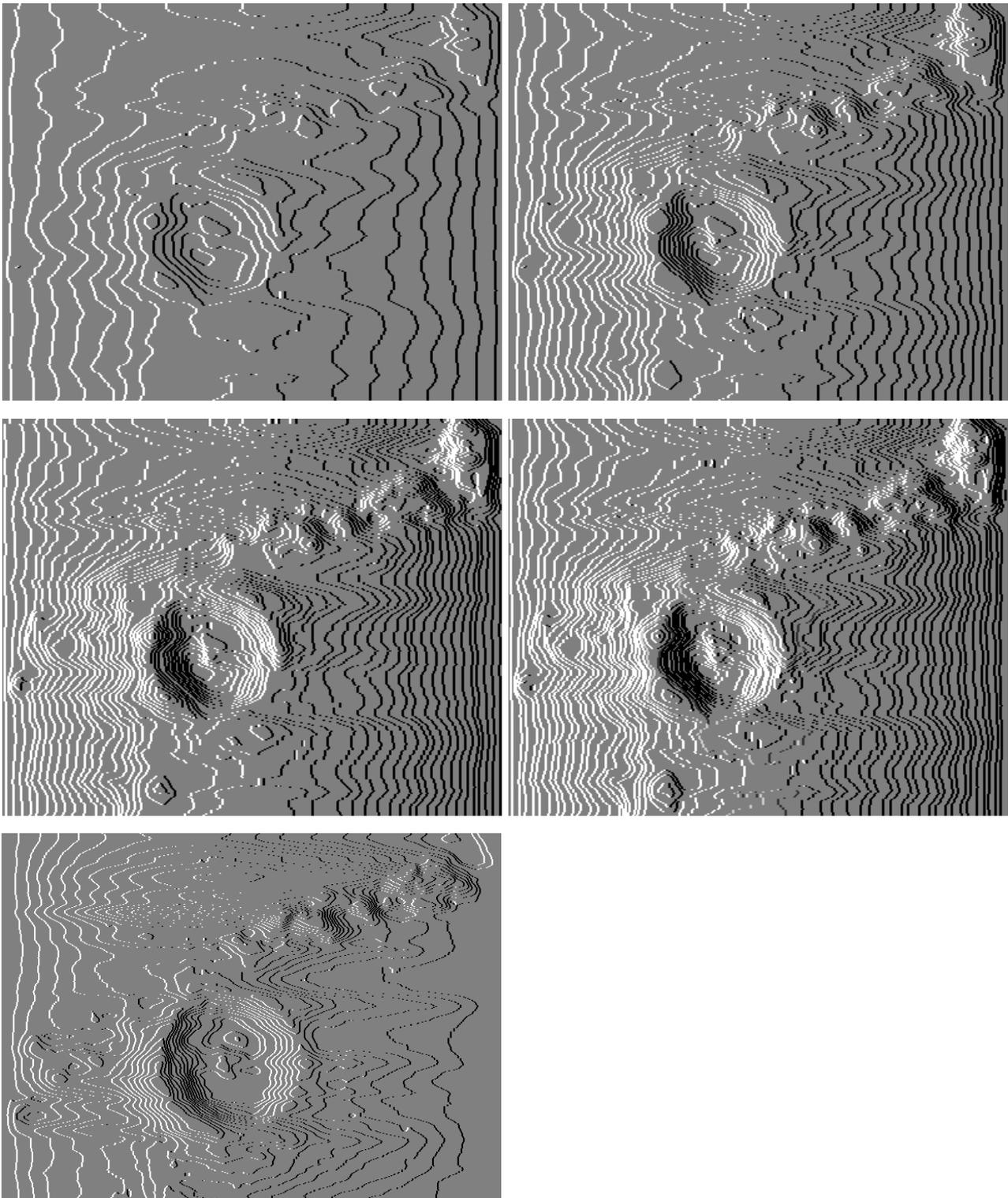
*Bild 26: Höhengichtendarstellung des alternativen DGM.*

## **7. Schluß**

Zum Abschluß sei, statt eines Schlußwortes noch eine Sammlung von Varianten der Höhengichtdarstellung durch Modifikation der Parameter (z.B. Der Anzahl der Graustufen) des

Bearbeitungsprozesses gezeigt.

Die in Zukunft notwendigen Verbesserungen des Verfahrens dürften nach der obigen Beschreibung klar sein.



*Bild 27: Sammlung von Höhenschichtendarstellungen des Geländemodells des Mondkraters Eratosthenes.*

# Anhang

## Qbasic™-Programm

Mit dem folgenden Programm wurde die erste korrigierte und normierte Version des Digitalen Geländemodells berechnet.

```
'Shape from Shading
'Kapt. Wolf Scheuermann
'30.09.2020, 24.03.2007

DIM Relief(700)

'Hoehennormierungsfaktor
F = 50
'Nullniveau
N = 50

CLS 'Clear Screen

'PGM-Bild, ohne Steuerzeichen, von links beleuchtet
OPEN "ERATOST0.PGM" FOR INPUT AS #1

PRINT "PGM-Datei mit Texteditor in ASCII-Textfile umgewandelt? Gut!"
PRINT

'Shape from Shading
OPEN "SHAPE.PGM" FOR OUTPUT AS #2
  LINE INPUT #1, Zeile$
  PRINT Zeile$
  PRINT #2, Zeile$
  LINE INPUT #1, Zeile$
  PRINT Zeile$
  PRINT #2, Zeile$
  INPUT #1, Spalten, Zeilen, Farben
  PRINT Spalten; Zeilen; Farben
  PRINT #2, Spalten; Zeilen; Farben

'neutraler Grauwert
Null = 128
```

```

FOR j = 1 TO Zeilen
  'Neue Zeile
  INPUT #1, Shade
  Relief(1) = Shade - Null
  FOR i = 2 TO Spalten
    INPUT #1, Shade
    'Integration des schattierten Bildes
    Relief(i + 1) = Shade - Null - Relief(1) + Relief(i)
  NEXT
  PRINT ". "; 'Lebenszeichen

  'Reliefschiefe und Woelbung beseitigen
  FOR i = 1 TO Spalten
    Relief(i) = Relief(i) - (i / Spalten) * (Relief(Spalten) - Null)

    'Normieren und anheben
    Relief(i) = N + Relief(i) / F

    'DTM schreiben
    PRINT #2, INT(Relief(i) + .5); 'DTM
  NEXT
  PRINT #2, ""
NEXT
CLOSE #2
CLOSE #1

END

```