

2.5D-Diskontinuitäten in der Geländemodellierung und spezielle Aspekte bei Delaunay-Triangulationen

Ulrich Lenk

Zusammenfassung

Der Artikel geht auf Einwände ein, die in dem Beitrag von Briese und Kraus (2003) zu einer Veröffentlichung des Autors (Lenk 2003) zum Thema der Triangulation von Vermessungsdaten (dabei speziell von Laserscannerdaten) gemacht wurden. Ferner wird der Aufsatz von Briese und Kraus kommentiert. Dieser Beitrag ergänzt in diesem Sinne auch den betreffenden Beitrag von Lenk (2003). Es wird auf neutrale Fälle von Delaunay-Triangulationen und die Berechnung von bedingten Delaunay-Triangulationen eingegangen. Das Konzept der Störungen in einem Geländemodell (Diskontinuitäten in der 2.5D-Oberfläche) wird diskutiert. Dieses ist für eine fachlich korrekte Modellierung der Geländeoberfläche im Bereich von senkrechten Wänden (Hafenmauern, Spundwänden, Prallhängen an Gewässern u. a.) notwendig.

Summary

The article discusses objections that are raised by Briese and Kraus in response to a former publication of the present author that dealt with triangulations of surveying data (in particular laser scanning data). In addition the contribution of Briese and Kraus, i. e. their approach to the topic of data reduction at hand, will be discussed in more detail. Within this sense the article of Lenk (2003) will be supplemented with respect to details that were treated with minor priority. Neutral cases of Delaunay Triangulations will be discussed as well as constrained Delaunay-Triangulations. The new concept in terrain modeling which is coined »faults« is introduced. Whereas the 2.5D-surface is continuous at structural information such as breaklines, the concept of faults allows for modeling 2.5D-discontinuities (e. g. vertical walls, quay walls, geological faults).

1 Einleitung

Der Autor hat in dieser Zeitschrift einen Artikel über »Triangulationen und Adaptive Triangulationen – ein Verfahren zur Ausdünnung unregelmäßig verteilter Masspunkte in der Geländemodellierung« mittels *Delaunay-Triangulationen* (DT) und *adaptiven Delaunay-Triangulationen* (ADT) publiziert (Lenk 2003), gegen dessen Inhalte in dem Beitrag von Briese und Kraus (2003) teilweise Einwände erhoben werden.

Der Beitrag von Lenk (2003) sollte bei der Leserschaft der zfv ein gesteigertes Bewusstsein für die besonderen Eigenschaften von Vermessungs- und Geodaten hervorgerufen, um bei der Entwicklung von Software diese Eigen-

schaften für effiziente Algorithmen vorteilhaft zu nutzen. Hierzu wurden in dem Artikel effiziente Vorgehensweisen für die Berechnung der folgenden geometrischen Konstrukte für 2(.5)D-Vermessungsdaten beschrieben:

1. die konvexe Hülle (*convex hull*, CH) eines 2D-Punkthaufens,
2. die DT eines 2D-Punkthaufens sowie
3. die ADT einer 2.5D-Punktmenge.

Aus Gründen der prägnanten Darstellung der Thematik und des vorgegebenen Seitenvolumens konnten nicht alle Aspekte, die im Kontext der Verarbeitung von Vermessungsdaten (z. B. Laserdaten) zur Erstellung von *Digitalen Geländemodellen* (DGM) oder triangulierten DGM (*triangular irregular networks*, TIN) entstehen, in der gebührenden fachlichen Tiefe betrachtet werden. Letztendlich ist der Autor eines Artikels immer nur dafür verantwortlich, was er schreibt und wie er dies selbst nach bestem Wissen und den üblichen Deutungsregeln versteht, und nicht für das, was von einem Leser rein subjektiv interpretiert wird. Die Bewertung variiert mit der Betrachtungsweise des Beobachters, die u. a. auch aus den eigenen Perspektiven und Ansätzen bzw. Erfahrungen resultiert. Sie kann sogar spekulativen Charakter haben. So finden Schlussfolgerungen über nicht Geschriebenes statt. Dieser Perspektivismus ergibt sich schon aus methodologischen Gründen – und zwar sowohl im alltäglichen Verständnis als auch beim wissenschaftlichen Rezipieren (Lenk, H., 1998; 1993a/b). Die Ausführungen von Briese und Kraus (2003) erinnern den Autor in ihrer fachlich-lebhaften Art an ähnliche Beiträge von Herrn Prof. Kraus, in denen zum fachlichen Gedankenaustausch aufgerufen wurde (z. B. Kraus, 1991; 1986).

Eine Bemerkung zum Begriff der Fächerecholote erscheint dem Autor angemessen, bevor auf Details der Kommentare von Briese und Kraus sowie deren Beitrag eingegangen wird: Fächerecholote werden von Briese und Kraus (2003) anscheinend auf den Einsatz in der »Flusssohlenvermessung« beschränkt und vom Autor selber im wahrsten Sinn des Wortes etwas globaler gefasst. Der prozentuale Anteil von Fächerecholoten in der Binnengewässervermessung ist gegenüber dem Einsatz in den marinen Bereichen Küstengewässer und Hochsee mit Sicherheit deutlich geringer. In Lenk (2003) wird daher auch ein Datensatz aus der Nordsee verwendet. Insofern ist es für den Autor (u. a. als Hydrographen) nicht nachvollziehbar, wie Briese und Kraus bei ihrer »Analyse der Lenk'schen Publikation« auf die Beschränkung des Einsatzes von Fächerecholoten auf Binnengewässer kamen.

2 Detaillierte Kommentare und Analyse zum Beitrag von Briese und Kraus (2003)

Im nachfolgenden Teil soll auf die einzelnen Einwände von Briese und Kraus (2003) näher eingegangen werden.

Triangulation von Laserscannerdaten

Die Ausführungen von Briese und Kraus könnten den Anschein erwecken, dass die DT von Laserscannerdaten aus fachlicher Sicht nicht empfehlenswert ist. Hier möchte der Autor zu bedenken geben, dass es für bestimmte Anwendungen und Verfahren durchaus von Interesse sein kann, Laserdaten zu triangulieren, z. B. im Zusammenhang mit der Extraktion von Objekten aus (Roh-)Laserdaten (vgl. Hofmann 2003; s. a. Axelsson 2000). Insofern kann es aus fachlicher Sicht durchaus ein Interesse daran geben, für diesen Zweck effiziente Triangulationsmethoden zu entwickeln. Mit der Extraktion von Objekten aus den Rohdaten ist auch die Berechnung der Bodenpunkte verbunden, die zur Beschreibung der Geländeoberfläche benötigt werden. Es ist allerdings richtig, dass bei Lenk (2003) nicht zwischen Boden- bzw. Geländepunkten und Objektpunkten differenziert wird; dies war nicht das Ziel des Beitrags (s. o.). Allerdings, und hier denkt der Autor wieder etwas globaler (um nicht zu schreiben universaler), mag es auch Gebiete im Universum geben, in denen es wenig Gebäude und/oder (eine vernachlässigbare) Vegetation gibt. In dem Fall könnte man, eine gewisse Qualität der Daten vorausgesetzt (vgl. Dorninger et al. 2003), aus fachlicher Sicht gegebenenfalls auch eine direkte ADT berechnen.

Eliminierung von Originaldaten ohne Verwendung für das Endergebnis

Der »Einwand« von Briese und Kraus, dass bei einer ADT Originaldaten ohne Verwendung für das Endergebnis »eliminiert« werden, ist natürlich richtig. Durch Eliminierung von redundanten Beobachtungen geht Genauigkeitspotential verloren, oder anders ausgedrückt, es liegt in der Natur der Geodäten (der Autor ist selber Geodät), zur Genauigkeitssteigerung möglichst viele Beobachtungen in das Endergebnis einfließen zu lassen. Allerdings ist das Ziel von Lenk (2003) u. a. genau die Datenausdünnung gewesen und nicht die Erstellung eines hochgenauen Geländemodells, eine Thematik, an der ohne Zweifel am IPF Wien mit großem Erfolg gearbeitet wird. Die Frage, welcher Ansatz zu wählen ist, sollte aus der subjektiven Sicht des Autors anwendungsbezogen durch einen Nutzer der Verfahren erfolgen.

Effizienz und Laufzeitverhalten

Briese und Kraus bemerken an einigen Stellen, dass Triangulationen »rechenintensiv« sind, ohne dies weiter zu begründen oder auszuführen, die Aussage hat daher zumindest in der vorliegenden Form rein spekulativen Charakter. Es werden weder konkrete Laufzeitvergleiche zwischen dem Ansatz von Briese und Kraus und einer

adaptiven Triangulation gemacht, noch wird begründet oder analysiert, warum der rasterbasierte Ansatz effizienter arbeiten soll.

Vor dem Hintergrund, dass Ausgleichsrechnungen im Allgemeinen kubische Prozesse darstellen (d. h. mit $O(n^3)$ laufen, das gilt im Allgemeinen für die damit verbundenen Matrizenmultiplikationen sowie die notwendigen Inversionen von Matrizen) und DT sich in den klassischen Algorithmen bereits in $O(n \log n)$ berechnen lassen, bezweifelt der Autor, ob ein rasterbasierter Ansatz wirklich schneller ist. Konkrete Vergleiche mit vergleichbaren Rahmenbedingungen wären hier von Interesse, würden Aufklärung schaffen und damit der weiteren objektiven Erkenntnis dienen. Dabei müsste beachtet werden, dass DT häufig global berechnet werden und SCOP facettenbasiert arbeitet, was in einer kleinen Zahl n für die Abschätzung der Komplexität resultiert. Man kann jedoch auch facettenbasierte Triangulationen berechnen, in denen eine Gitterinterpolation vorgenommen wird. Auf dieser Grundlage wäre die Messung miteinander vergleichbarer Laufzeiten möglich. Der Autor erlaubt sich, Briese und Kraus auf seine Ausführungen in Lenk (2001c) hinzuweisen, in denen Verfahren zur schnellen Matrizenmultiplikation durch Verringerung der Sekundärspeicherzugriffe diskutiert werden. Diese Ansätze werden in Lenk (2001b) noch verbessert. Damit könnte das Verfahren von Briese und Kraus gegebenenfalls noch laufzeittechnisch weiter optimiert werden, da sie ohnehin nach eigenen Angaben einen erweiterten Speicherbedarf für ihre Anwendungen haben (ein solcher ist für das vom Autor vorgestellte Verfahren der schnelleren Matrizenmultiplikation ebenso erforderlich).

An anderer Stelle (Abs. 5) führen Briese und Kraus auf, dass die verbrauchte Rechenzeit von 4,75 Minuten für eine 68-prozentige Reduktion beeindruckend ist. Ohne die Leistung, die hinter der Entwicklung des Ansatzes steckt, in Frage stellen zu wollen, sei darauf hingewiesen, dass Maurer bereits im Jahr 2000 (Maurer 2000) bei der Verwendung des Ansatzes der ADT bzw. des Programms von Garland und Heckbert (1995) ähnliche Rechenzeiten nennt. Maurer verwendete einen Pentium II-Rechner mit 300 MHz und schreibt, dass die Rechenzeit für einige Millionen Punkte drei bis vier Minuten betrug. Der Korrektheit halber sei darauf hingewiesen, dass Maurer nur 0,5 bis 1 % der Originalpunkte in sein Netz einfügte, was allerdings gegengerechnet werden muss mit der Takt rate des verwendeten Prozessors gegenüber der Taktrate, die bei Briese und Kraus verwendet wurde. Nach Meinung des Autors kann hier ohne direkten Vergleich keine klare Aussage getroffen werden, welcher Ansatz der schnellere ist. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass DT in ihren Laufzeiten sehr stark vom verwendeten Algorithmus und der Datenstruktur abhängen. Ein entsprechender Artikel des Autors mit dem Arbeitstitel »Performanceaspekte für Delaunay-Triangulationen und Laufzeitvergleiche« ist gegenwärtig in Vorbereitung.

Behandlung von Geländekanten

Dieser Kommentar ist insofern berechtigt, als dass in Lenk (2003) Geländekanten als gegeben betrachtet werden, um sie gegebenenfalls als bedingte Kanten in eine Triangulation einzurechnen. Die Extraktion von Geländekanten aus Laserdaten bildet klar nicht den Schwerpunkt in Lenk (2003), sie wird aber neben den Ausführungen von Briese und Kraus (2003) z. B. auch von Sui (2002a/b) behandelt.

Bei näherer Betrachtung der Eigenschaften der ADT ist es im Übrigen klar, dass sich Geländekanten in der ADT bilden, ohne dabei die Berechnung einer bedingten Delaunay-Triangulation (*constrained Delaunay triangulation*, CDT) zu erfordern, sofern im Bereich der Geländekante mit hinreichender Dichte abgetastet wurde. Unter anderem auch deshalb wurde die Berechnung von CDT nur am Rand behandelt. Dies soll jedoch weiter unten nachgeholt werden. Briese und Kraus hingegen müssen die Geländekanten explizit extrahieren, weil diese sich in einem Gitter der praxisüblichen Gitterweite nicht mehr mit hinreichender Genauigkeit darstellen lassen und deshalb mittels der hybriden Datenstruktur in das Gitter-DGM integriert werden müssen.

Da Briese und Kraus darauf verweisen, dass die Darstellung der Geländemodellierung bzgl. Geländekanten in Lenk (2003) nicht vollständig war, möchte der Autor darauf aufmerksam machen, dass Briese und Kraus ihrerseits das Konzept der Störungen (Diskontinuitäten in der 2.5D-Modellierung des Geländes) in ihrem Beitrag nicht einmal erwähnen, obwohl es zumindest Herrn Prof. Kraus durch seine Teilnahme an dem Workshop, wo es vorgestellt wurde (Lenk und Kruse 2000; s. a. Lenk und Kruse 2002), bekannt ist. Daher soll das Konzept der Störungen unten ebenso beschrieben werden, um es einem breiteren Leserkreis als bisher vorzustellen.

Risiken bei »Datenreduktion« durch Berechnung des Gitters und Filterung der »Nicht-Geländepunkte«

Aus dem Artikel von Briese und Kraus könnte der Eindruck entstehen, die Daten einer Ausdünnung eines geglätteten Gitters seien einer ADT von Rohdaten vorzuziehen. Dem müsste der Autor dann widersprechen, wenn nicht eine anwendungsbezogene Differenzierung vorgenommen wird. Es ist mit Sicherheit für die meisten Anwendungen bei der Laserabtastung wünschenswert, eine effektive Filterung von Geländepunkten gegenüber Vegetationspunkten oder Gebäudepunkten o. ä. vorzunehmen, wie sie von Briese und Kraus eindrucksvoll und überzeugend dargestellt wird. Im Bereich der hydrographischen Vermessung jedoch ist eine Filterung von Punkten der höchsten Höhe in ihrer Umgebung direkt mit einer Gefährdung der Sicherheit der Schiffbarkeit entsprechender Gewässer mit allen ihren Konsequenzen verbunden. Hier muss vor einer Filterung zusätzliche Information hinzugenommen werden, z. B. eine entsprechende Aufnahme mit einem Seitenansichtsonar (Sidescan-Sonar, vgl. Ingham und Abbott 1992). Die ADT ist sensitiv für (globale

und lokale) Extrema im Gelände und hat daher bei entsprechenden Anwendungen nicht nur Vorteile gegenüber der Glättung des DGM, sondern ist objektiv betrachtet einfach notwendig. Sie wird daher auch in der Praxis der Gewässervermessung eingesetzt (z. B. Wirth 2000).

Am Rande bemerkt sei im Übrigen, dass es auch Navigationsinstrumente für Luftfahrzeuge gibt, die auf der Grundlage der Laserabtastung (Abstandsmessungen) arbeiten. Hier die »Ausreißer« gegenüber den Geländepunkten zu filtern bedeutet, die gewünschten Daten zu eliminieren. Es ist also klar, dass eine anwendungsbezogene Eingrenzung gemacht werden muss, an welcher Stelle welches Verfahren sinnvoll eingesetzt werden sollte.

Die »Datenreduktion im Geländemodell« und »Der Reduktionsprozess«

Briese und Kraus siedeln die Berechnung des Gitter-DGM unter dem Absatz der Datenreduktion an und beschreiben dort die Arbeitsweise von SCOP zur Bewältigung großer Datenmengen. Sicherlich kann man eine derartige Betrachtungsweise der Thematik haben. Aus subjektiver Sicht des Autors jedoch wird bei der Berechnung eines Gitters keine kontrollierte Datenreduktion vorgegeben. Die Vorgabe einer Gitterweite muss vielmehr aus einer umfassenden Analyse erfolgen (vgl. Fritsch 1992) und orientiert sich u. a. an der kleinsten darzustellenden Reliefform.

Die Datenreduktion von Briese und Kraus setzt auf dem berechneten Gitter-DGM auf. Der Ansatz erinnert in seinem Ergebnis an einen Quadtree (z. B. Samet 1990). Den Nachteil, den der Autor im Beitrag von Briese und Kraus sieht, liegt u. a. darin, dass beim Übergang von einem Niveau zum nächsten nicht nur ein Punkt eingefügt wird, wie bei einer ADT, sondern gleich fünf. Es müssen weiterhin Regeln für die Anzahl von Punkten innerhalb des niedrigsten Niveaus bzw. entlang der Seite einer derartigen Niveaokachel für die Möglichkeit der hierarchischen Zerlegung eingehalten werden, was eine Einschränkung der Verwendbarkeit des Ansatzes, eine zusätzliche Anforderung an das Gitter oder einen anderen Mehraufwand darstellt. Zudem kann bei Briese und Kraus im Randbereich der Daten keine Ausdünnung erfolgen, weil dort keine Krümmungsmaße berechnet werden können. Es sei darauf hingewiesen, dass bei einer ADT allein die vertikalen Abstände der Punkte zur derzeit realisierten Oberfläche ausschlaggebend sind, und die Oberfläche deckt auch den Randbereich ab. Konkret kann der Abstand auch für einen Punkt berechnet werden, der auf der CH (z. B. O'Rourke 1998) des Datensatzes liegt.

Da Briese und Kraus nach ihrer Datenreduktion noch eine DT durchführen (die unten diskutiert wird) sei bereits hier im Kontext der Datenreduktion darauf hingewiesen, dass diese DT besonders effizient mit dem in Lenk (2003) beschriebenen Verfahren erfolgen kann. Unter der sehr wahrscheinlich gegebenen Voraussetzung, dass die ausgedünnten Punkte durch Traversierung der Facetten selektiert werden können (oder ohne wesentlichen Mehr-

aufwand entlang einer raumtraversierenden Kurve abgearbeitet werden können), würden sich die Voraussetzungen für das Verfahren in Lenk (2003) ergeben. Mit dieser Argumentation wird zudem klar, dass auch der Schritt der Datenreduktion von Briese und Kraus mit einer ADT berechnet werden könnte (natürlich mit einem anderen funktionalen Ansatz). Bei einer ADT wird nur ein Punkt pro Iteration eingefügt, daher ist zu vermuten, dass im Endergebnis die Gesamtpunktmenge der ADT geringer ausfällt als bei dem Verfahren von Briese und Kraus.

Abschließend zu diesem Diskurs sei darauf hingewiesen, dass der Ansatz der eigentlichen Datenreduktion in Lenk (2003) nicht nur auf regelmäßige Gitter, sondern insbesondere auch auf unregelmäßige Punkthaufen anwendbar und damit wesentlich allgemeiner einsetzbar ist als der rasterbasierte Ansatz von Briese und Kraus.

Die Delaunay-Triangulation

Briese und Kraus berechnen in ihrem Artikel nach dem Datenreduktionsschritt eine DT und kommentieren sie mit der Aussage, dass »die Dreiecke verhältnismäßig gut geformt sind«. Diese Aussage ist objektiv betrachtet wertlos. In der Abb. 5 von Briese und Kraus wird die DT einer Punktmenge dargestellt. Mit der Festlegung der Punktmenge ist eine DT bereits bestimmt, wenn man von den neutralen Fällen absieht, die gelöst oder speziell behandelt werden müssen. Insofern ist eine Aussage über die Form der Dreiecke, die aus einer Punktmenge gebildet werden, objektiv vollständig redundant mit der Information, welches Triangulationskriterium (gegebenenfalls mit Nebenbedingungen) gewählt wurde (vgl. Hoschek und Lasser 1992). Auf die neutralen Fälle, von denen sich etliche in ihrem Beispieldatensatz befinden, gehen die Autoren jedoch nicht ein, es ist damit kein eindeutiges Ergebnis. Vertiefte Ausführungen hierzu, die teilweise auch morphologisch motiviert sind, sollen daher weiter unten gemacht werden. Eine ähnliche Argumentation hinsichtlich der Aussagekraft einer Bemerkung über die Form von Dreiecken gilt im Übrigen auch für die CDT, welche in ihrer konkreten Ausprägung durch die Vorgabe einer Punktmenge und einer Kantenmenge bereits definiert ist. Unterstellt man Briese und Kraus, dass für sie lange spitze Dreiecke schlecht geformt wären, so gibt es durchaus Fälle (z.B. bei der Flusssohlenvermessung mittels Querprofilen), in denen derartige Dreiecke wünschenswert oder notwendig sind, da hier die DT versagt (z.B. Rippa 1992; s. a. Garland und Heckbert 1995). Dies führt in den Bereich von datenabhängigen Triangulationen (*data dependent triangulations*, DDT (z. B. Dyn et al. 1990)), der hier aus Platzgründen und vor dem Hintergrund der Prägnanz des Artikels nicht weiter diskutiert werden soll.

Im Übrigen führen Briese und Kraus aus, dass entlang einer in das Dreiecksnetz zu integrierenden Geländekante ein Puffer gelegt werden sollte, in dem die Gitterpunkte eliminiert werden sollen, »damit an den Geländekanten keine schlecht geformten Dreiecke entstehen«. Der Autor

gibt bei einer derartigen Vorgehensweise zu bedenken, dass hierbei Punkte ohne Kontrolle des Qualitäts- bzw. Approximationskriteriums gelöscht werden. Zudem bestätigt diese Anmerkung die oben geführte Diskussion, dass eine Triangulation (und damit die Form der Dreiecke) nur durch Veränderung der Eingangspunktmenge beeinflusst werden kann, sofern das Triangulationskriterium (gegebenenfalls mit Nebenbedingungen) festgelegt wurde, denn an dieser Schraube drehen Briese und Kraus hier, um ein subjektives, nicht näher definiertes Formkriterium für Dreiecke zu erfüllen.

3 Neutrale Fälle bei Delaunay-Triangulationen und Catalanische Zahlen

Das Thema der neutralen Fälle wird ausführlich in Lenk (2001a/b) behandelt. Hier soll ein kurzer Auszug zu der Thematik gegeben werden. Ein neutraler Fall der DT entsteht, wenn das *Delaunay-Kriterium* (DK) keine Entscheidung liefern kann, wie die Vermaschung der Punkte erfolgen soll. Es liegen also mehr als drei Punkte auf einem gemeinsamen Kreis, wie es z. B. für die vier Punkte einer Gitterzelle der Fall ist.

Abb. 1 veranschaulicht die Situation für die zwei möglichen Kombinationen in einer Gitterzelle. Dabei bezeichnen die x_i und y_i die Koordinaten der Punkte in der Ebene, die z_i deren Höhe und d die mit dem Gitter assoziierte Gitterweite. Je nachdem, in welcher Orientierung die Diagonale innerhalb einer Gitterzelle gelegt wird, ergeben sich im Allgemeinen lokal in der Gitterzelle unterschiedliche Eigenschaften des Reliefs, wie es durch die skizzierten perspektiven Ansichten der Zelle angedeutet ist.

In Lenk (2001a/b) werden folgende Kriterien zur Lösung der neutralen Fälle diskutiert:

1. regelmäßige Vermaschungsmuster,
2. Volumen-Optimierung, differenziert nach maximalem und minimalem Volumen oder Optimierung der Volumendifferenz zu einer polynominalen Fläche,
3. Länge der Raumdiagonalen (minimal oder maximal),
4. räumlicher Flächeninhalt der Dreiecke (minimal oder maximal),
5. lokale Optimierung der Differenz der Oberflächenrauhigkeiten (minimale oder maximale Differenz der lokalen Rauigkeiten).

Während das erste Kriterium »Regelmäßige Vermaschungsmuster« noch ohne zusätzliche Information (das Höhenattribut der Punkte) auskommt, basieren die anderen Ansätze darauf, dass es sich bei den Punkten um 2.5D-Punkte handelt, die eine (Gelände-)Oberfläche beschreiben. Die entstehenden Triangulationen können morphologisch interpretiert werden. Es muss allerdings betont werden, dass auch die auf der 2.5D-Information basierenden Optimierungskriterien einen neutralen Fall auf-

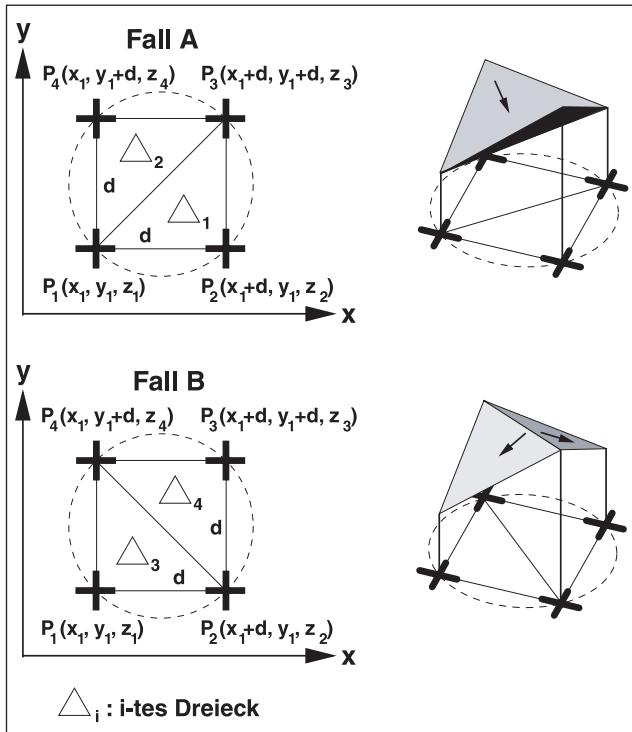


Abb. 1: Dreieckskombinationen innerhalb der Gitterzelle

weisen. In diesem Fall hilft zur Lösung nur eine Konvention, wie sie das erste Optimierungskriterium darstellt. Eine Konvention hat beim Ausrichten der Diagonalen keinen »neutralen Fall«.

Die nähere Untersuchung der Optimierungskriterien zeigt übrigens: Das Kriterium der Minimierung der lokalen Rauigkeitsdifferenz entspricht dem Kriterium der Maximierung des Oberflächeninhalts. Entsprechendes gilt für die Maximierung der lokalen Rauigkeitsdifferenz, die einer Minimierung des Oberflächeninhalts entspricht. Diese Identität hat eine interessante Parallele in der Natur. Die Summe der Rauigkeiten und damit die Energie der Gitterzelle ist nach Rippa (1990) konstant. Wählt man die maximale Rauigkeitsdifferenz als Kriterium, so erzielt ein Dreieck ein Minimum an Neigung und Energie, während das andere eine maximale Neigung und Energie hat.

Die entstehende Oberfläche hat nicht nur die lokal maximale Rauigkeitsdifferenz, sie bildet eine Oberfläche mit lokal minimaler Fläche. Hier finden sich vergleichbare Phänomene in der Physik, z. B. dass eine Seifenblase (Annäherung an eine Kugel) dazu tendiert, mit minimaler Oberfläche ein Maximum an Volumen zu umschließen. Die Kugel bildet auch eine Grundfigur für die Approximation der Erdoberfläche. Für weiterführende Interpretationen der Optimierungskriterien wird auf Lenk (2001a/b) verwiesen. Dieser Auszug soll nur aufzeigen, mit welchen Gedankengängen man die möglichen Triangulationen bei neutralen Fällen der DT bearbeiten kann.

Die Anzahl der möglichen Triangulationen eines konvexen Polygons wird, nebenbei bemerkt, mit einer ganzzahligen Zahlenfolge (1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, 16796, 58786, ...; wobei die ersten zwei Zahlen für

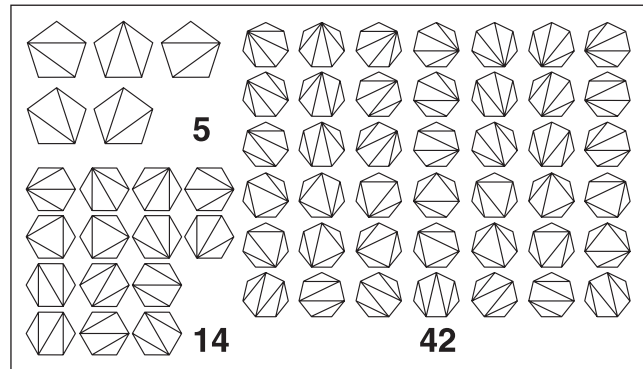


Abb. 2: Mögliche Triangulationen der konvexen Polygone: Fünfeck, Sechseck und Siebeneck

den neutralen Fall der DT nicht von Bedeutung sind, vgl. Abb. 1 und 2), den *Catalanischen Zahlen* (auch *Segner Zahlen* genannt), beschrieben, wie schon Euler 1753 feststellte (vgl. Sloane und Plouffe 1995). Stanley (1999) gibt eine umfassende Übersicht über weitere Phänomene, die mit den Catalanischen Zahlen beschrieben werden können (z. B. die Anzahl der möglichen Kombinationen bei der Verteilung von Klammerpaaren bei der Multiplikation).

4 Bedingte Delaunay-Triangulationen

Die bedingte Delaunay-Triangulation (CDT) kann auf verschiedene Weisen berechnet werden, von denen hier eine (nicht notwendigerweise vollständige) Auswahl vorgestellt wird.

4.1 Direkte Berechnung bedingter Delaunay-Triangulationen

Eine solche Vorgehensweise wird z. B. von Chew (1989) beschrieben. Es handelt sich um einen *Divide & Conquer*-Algorithmus mit einer Laufzeit von $O(n \log n)$. Dabei werden die zu vermaschenden Punkte entlang einer Koordinate sortiert, in Streifen eingeteilt und diese einzeln trianguliert, bevor die Ergebnisse im *merge*-Schritt wieder zusammengeführt werden. Zur Erhaltung der bedingten Kanten werden für diese Schnittpunkte mit den Trennungslinien der Streifen berechnet, die später im *merge*-Schritt wieder aus der CDT entfernt werden. Der Algorithmus ist jedoch sehr komplex und nur unter erheblichem Aufwand zu implementieren (Klein 1995).

4.2 Indirekte Berechnung bedingter Delaunay-Triangulationen

Dagegen ist es einfacher, zunächst eine DT zu berechnen, welche auch die Endpunkte der Zwangsseiten enthält, und die zu integrierenden Kanten nachträglich in das Dreiecksnetz einzurechnen. Bei dieser Einrechnung kann

entweder ein Löschen derjenigen Dreiecke vorgenommen werden, die von der zu integrierenden Kante geschnitten werden. Die dabei entstehenden zwei Polygone werden im Anschluss daran jeweils mit einer Polygontriangulation (z. B. O'Rourke 1998) unter Verwendung der DK trianguliert, wobei die Zwangskante dann nicht umgeklappt werden darf. Eine andere Variante, die auch in der Geländemodellierung verwendet wird, bildet die Zwangseiten sequentiell (Abb. 3). Buziek (1994; 1990) stellt diese sequentielle Kantenbildung vor, bei der schrittweise die Diagonalen von Vierecken, die aus zwei adjazenten Dreiecken bestehen, umgeklappt werden, bis die zu bildende Kante in das Dreiecksnetz integriert ist. Nach jedem einzelnen Schritt liegt stets ein Dreiecksnetz vor. Bei der Umbildung eines Vierecks muss berücksichtigt werden, ob es sich um ein konvexes Viereck handelt, d. h., ob die Diagonale des Vierecks umgeklappt werden kann. Andernfalls muss zunächst mit dem sich anschließenden Viereck, welches von der zu bildenden Kante geschnitten wird, fortgefahren werden. Diese Vorgehensweise ist z. B. im Programmsystem TASH realisiert (Buziek et al. 1992). Zusätzlich muss beim Umklappen von Diagonalen beachtet werden, ob es sich bei dem »Viereck« nicht um ein degeneriertes Viereck handelt, dessen CH ein Dreieck bildet. In dem Fall kann die Diagonale nicht einfach umgeklappt werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wird auch von De Florian und Puppo (1992) diskutiert.

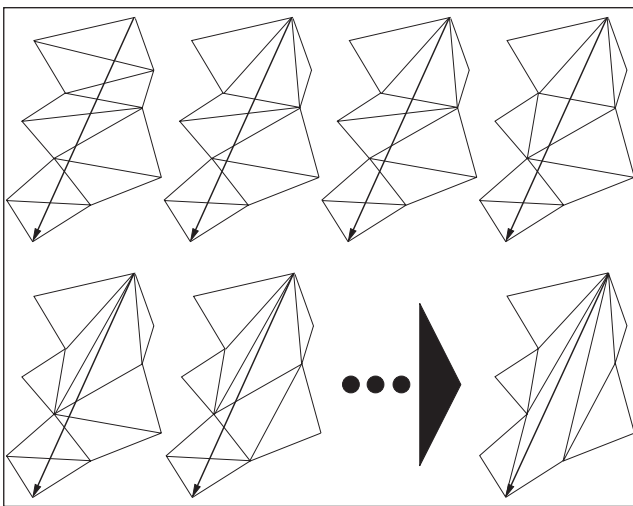


Abb. 3: Sequentielle Kantenbildung zur Berechnung einer bedingten Delaunay-Triangulation

4.3 Bedingte Delaunay-Triangulation hybrider Geländemodelle

Eine sehr effiziente Variante der Dreiecksvermaschung eines hybriden DGMs wird von Lenk (2001a/b) aus dem Kontext der Integration von Höhenmodellen mit 2D-GIS-Daten abgeleitet. Ein hybrides Geländemodell zeichnet sich dadurch aus, dass in Gitterzellen, in denen Strukturinformationen wie Geländekanten vorliegen, eine lokale Dreiecksvermaschung berechnet wird (Abb. 4).

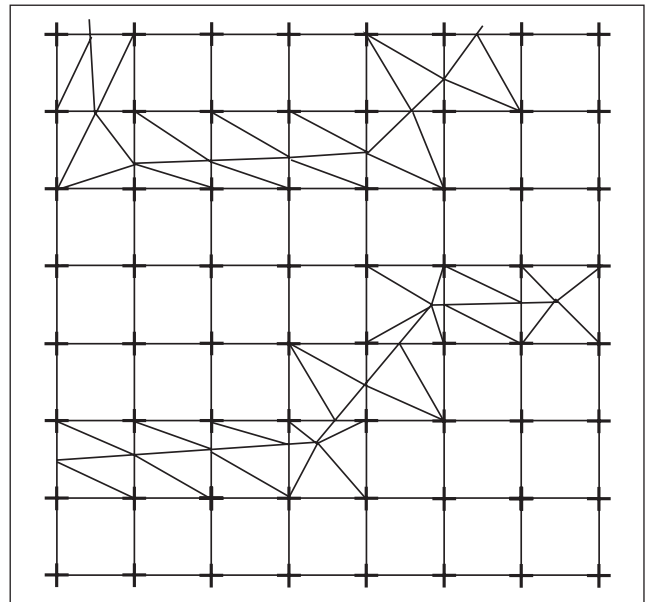


Abb. 4: Hybrides Datenmodell in der Geländemodellierung: lokale Dreiecksvermaschung der Gitterzellen im Bereich von vorhandener Strukturinformation

Diese Modellierung wurde bereits von Kruse (1979) vorgestellt, wenngleich damals der Begriff des hybriden Geländemodells noch nicht geprägt war. Bei der Triangulation des hybriden Geländemodells wird zunächst das Gitter sehr effizient über Indexberechnungen trianguliert (es erfolgt dabei keine Prüfung des DK), bevor die Kanten sukzessiv eingerechnet werden. Bei dieser Einrechnung wird die Topologie der aus einer Kette von Punkten bestehenden Geländekante zur Effizienzsteigerung genutzt. Nur für den ersten Punkt der Kette wird der Einfügeort im Dreiecksnetz gesucht, wobei zunächst sehr effizient über Koordinatenvergleich in eines der beiden Dreiecke der Gitterzelle gesprungen und dann weitergesucht wird (z. B. mit dem in Lenk, 2003, beschriebenen Verfahren der topologischen Wanderung, vgl. a. Kraus, 2000. Das Verfahren gewährleistet die Suche auch nach bereits vorgenommenen Änderungen im TIN in dem Bereich, solange keine Dreiecke gelöscht, sondern nur geändert werden). Dieser Punkt wird eingefügt. Danach reduzieren sich die in Abb. 3 von Lenk (2003) dargestellten möglichen geometrischen Örter des nächsten einzufügenden Punktes der Geländelinie auf die in Abb. 5 dargestellten Örter (Lenk, 2001b), da mindestens ein inzidenten Dreieck des eingefügten Punktes bekannt ist. Mit diesem Verfahren (das übrigens auch für unregelmäßige Punkthaufen variiert werden kann) werden die Geländekanten unter der Berechnung der Schnittpunkte zwischen den Geländekanten und den Kanten, die aus der Gittervermaschung resultieren, quasi wie mit einer Nähmaschine in das Dreiecksnetz »eingenäht«. Für die Integration von Geländekanten in ein TIN wird die Höhe der Schnittpunkte aus den Höhen der Punkte der Geländekante abgeleitet.

Dagegen wird bei der Integration von 2D-GIS-Geometrien in ein TIN die Höhe der Schnittpunkte aus dem TIN interpoliert, da die Einrechnung der 2D-Geometrien die

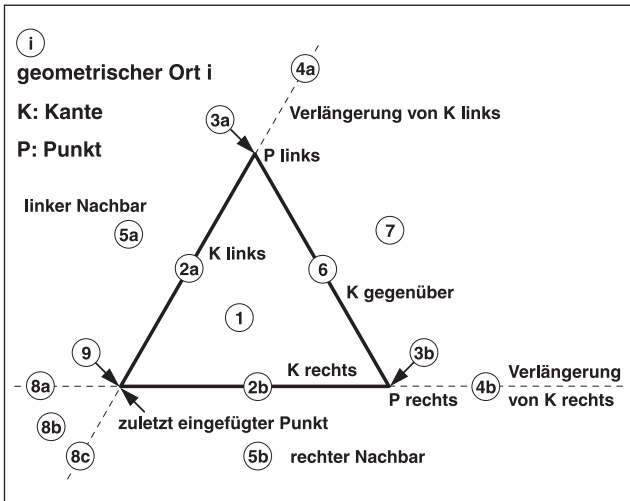


Abb. 5: Radial-topologische Suche um den zuletzt eingefügten Punkt

Form der Geländeoberfläche nicht verändern darf, ein Qualitätskriterium, welches von Klötzer (1997) aufgestellt wurde. Dieses Kriterium wird jedoch von einigen Verfahren in der Literatur (z. B. Pilouk 1996, vgl. Pilouk und Kufoniya 1994; Pilouk und Tempfli 1993) nicht eingehalten. Abb. 6 zeigt einen Bereich aus der Leineau südlich von Hannover, in dem nach diesem Verfahren 2D-ATKIS-Daten in das Gitter-DGM eingerechnet wurden (Grundlagen der Darstellung: ATKIS-Daten der LGN).

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass eine Datenreduktion in beiden Datensätzen (Gitter-DGM und 2D-GIS-Daten bzw. im ATKIS-Basis-DLM) sehr sinnvoll ist. Ein umfassende Untersuchung hierzu findet sich bei Lenk (2001b; s. a. Lenk und Heipke 2002).

5 Das Konzept der Störungen in der Geländemodellierung

Die Ausführungen in diesem Kapitel lehnen sich an Lenk und Kruse (2002; 2000) an. Die bislang traditionell in der Geländemodellierung verwendeten Datenmodelle des Gitter-DGM, des hybriden DGM und des TIN sind für eine Vielzahl von Anwendungen einsetzbar. Einige Phänomene jedoch, die insbesondere in der Hydrologie und Fließgewässerplanung vorkommen, können mit diesen Ansätzen nicht oder nur mit gewissen Einschränkungen realisiert werden. Dabei handelt es sich um Unstetigkeiten in der 2.5D-Kontinuität der Oberfläche, wie sie im Bereich von Spundwänden oder Kai-, Hafen- und Stau-mauern oder anderen Artefakten im Gewässerbereich vorkommen. Andere Beispiele aus der Geologie sind geologische Störungen. Entsprechend werden diese linienhaften Erscheinungen als Störungen bezeichnet. Ihre Knickpunkte haben keine definierte Höhe. Störungen in einem DGM führen dazu, dass an ihnen Versätze (Unstetigkeiten) in den abgeleiteten Niveaulinien auftreten. Im Bereich von Kantenlinien haben Niveaulinien demgegenüber Knickpunkte, sind aber stetig. Abb. 7 zeigt den Bereich einer geologischen Störung.

Falls die bei einem Projekt verwendete DGM-Software eine derartige Modellierung nicht zulässt, ist es zur Umgehung dieser Problematik ein häufig angewandter Trick, an Stelle eines Punktes in einer Störungslinie zwei Stützpunkte einzuführen, die sehr dicht (im Allgemeinen wenige cm) beieinander liegen. Jeweils einer dieser Stützpunkte wird einem der beiden Horizonte an der Störungslinie zugewiesen und mit einem entsprechenden Höhenattribut versehen. Allerdings stellt diese Umgehung der Problematik letztendlich eine unsaubere Modellierung dar, die insbesondere bei der Ableitung von

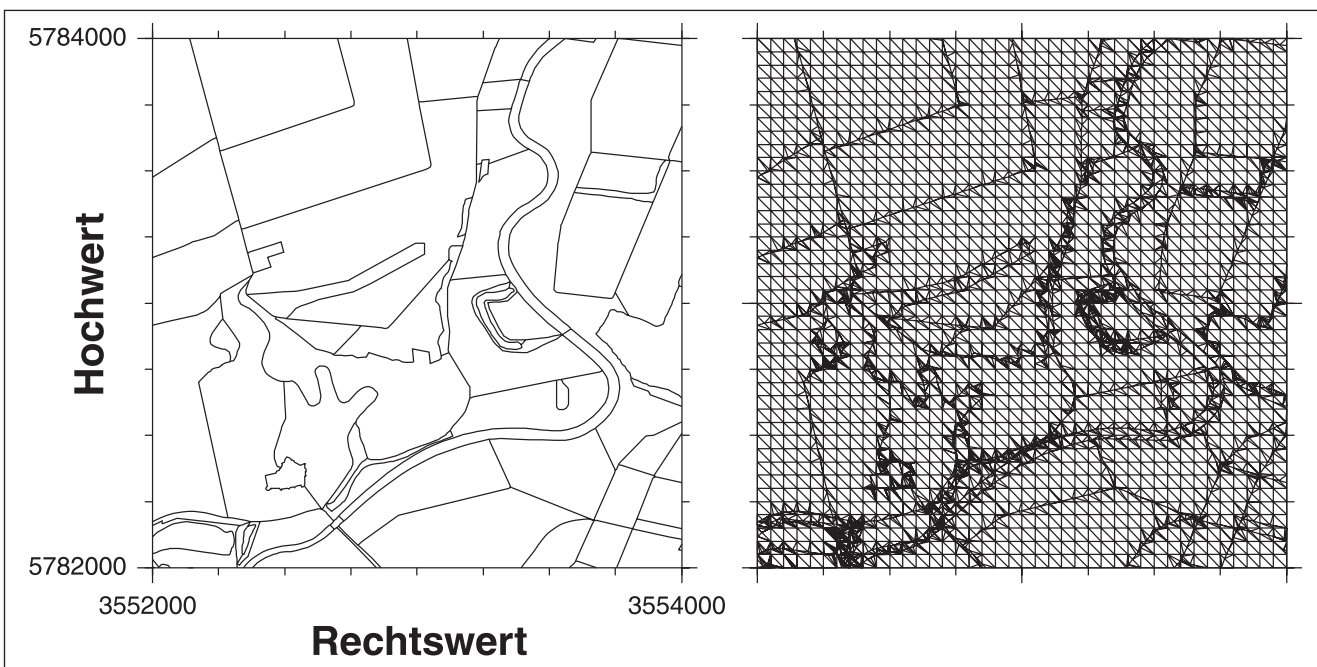


Abb. 6: Trianguliertes Gitter-DGM mit eingerechneten 2D-ATKIS-Daten

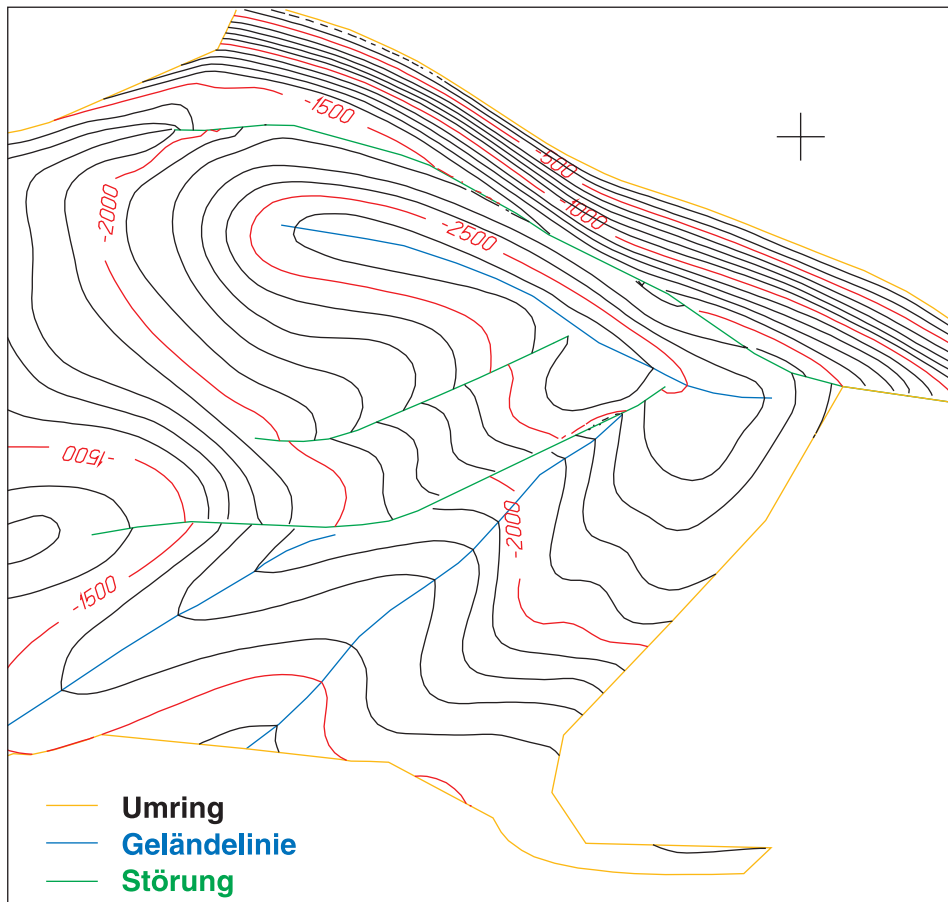


Abb. 7: Geologisches Niveaulinienbild mit Störungen

Folgeprodukten zu Schwierigkeiten führen kann. Richtiger ist es daher vielmehr, Störungen bereits als Konzept im Rahmen der Implementierung einer DGM-Software zu berücksichtigen. Als einziges dem Autor bekanntes Produkt ist das Programmsystem TASH, das am Institut für Kartographie und Geoinformatik der Universität Hannover entwickelt wird, in der Lage, an derartigen Stellen eine korrekte Modellierung des Geländes in Verbindung mit einem hybriden Datenmodell zu ermöglichen.

6 Fazit

Ohne jeden Zweifel beschreibt der Artikel von Briese und Kraus einen äußerst interessanten Ansatz der Filterung der Geländeoberfläche aus Laserabtastungen. Ebenso sind die Ausführungen über die Extraktion von Geländekanten ein wichtiger Beitrag zum aktuellen Thema der strukturierten Modellierung des Reliefs. Die Ausführungen über Geländemodellierung und im Speziellen Triangulationen bei Briese und Kraus sind jedoch aus der subjektiven Sicht des Autors nicht vollständig, da sie wichtige algorithmische Aspekte und fachliche Hintergründe nicht abdecken. Der Autor hofft, dass er diese Lücken wenn nicht schließen, dann doch wenigstens verkleinern konnte und dabei der Leserschaft der zfv ein wenig mathematische Unterhaltung aus der algorithmischen Geometrie und der Kombinatorik bieten konnte. Ein Vorteil

der Datenreduktion von Briese und Kraus durch progressive sampling ist für den Autor bislang nicht erkennbar, solange keine vergleichenden Studien vorgelegt werden. Diese sollten zumindest Laufzeiten als auch die Ergebnisse (Anzahl der Punkte) zum Thema haben. Unter Berücksichtigung der oben geführten Argumentation stellt die Kombination der Verfahren von Briese und Kraus (2003) (Berechnung der Geländepunkte aus den Laserrohdaten, gegebenenfalls Extraktion der Geländekanten) und von Lenk (2003) (Datenreduktion durch Adaptive Triangulation, gegebenenfalls mit Einrechnen von Strukturinformation) einen sowohl in fachlicher als auch algorithmischer Sicht interessanten Ansatz zur Geländemodellierung dar. Dabei ist es selbstverständlich, dass die Genauigkeit des Gitter-DGM und die Approximationsgenauigkeit bei der Datenreduktion aufeinander abgestimmt sein müssen. Falls die Approximationsgenauigkeit der Datenreduktion schlechter gewählt wird als die Genauigkeit des Gitter-DGM, bringt dessen Berechnung dann nicht mehr viel. Dann gibt es hochgenaue (ehemalige) Gitterpunkte und dazwischen gilt die Approximationsgenauigkeit. Oder könnte man dann vielleicht doch auf die Berechnung des Gitters verzichten? Aus der subjektiven Sicht des Autors sollte ein Anwender der Verfahren unter kritischer Beurteilung der Anforderungen seiner Aufgabe selber entscheiden können, welches Verfahren er nehmen möchte, ohne durch eine Software auf vorgefertigte Verarbeitungsschritte eingeschränkt zu sein.

Feststellungen und Dank

Die in Lenk (2003) sowie hier dargestellten Arbeiten, Ergebnisse sowie Meinungen sind auf der Grundlage privater Forschung und tlw. mit Unterstützung durch ein Stipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) während der Zeit des Autors am IfK/ikg der Uni Hannover entstanden. Für die Diskussion ist allein der Autor unter den in Abs. 1 aufgeführten Einschränkungen verantwortlich, jedoch nicht für deren subjektive Interpretation (s. o.).

Mein besonderer Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. I. Kruse, ikg, für seine Entwicklungen im Bereich der Geländemodellierung, an die DBU sowie die Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) für die Überlassung von ATKIS-Daten.

Literatur

- Axelsson, P.: DEM Generation from Laser Scanner Data using adaptive TIN Models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam 2000.
- Briese, C., Kraus, K.: Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle. *zfv* 128, S. 312–317, 2003.
- Buziek, G.: Analyse und Optimierung hydrographischer Punktfelder als Grundlage der Modellierung des Unterwasserreliefs. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover Nr. 197. Diss., Univ. Hannover, 1994.
- Buziek, G.: Neuere Untersuchungen zur Dreiecksvermaschung. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen (NaKaVerm), Reihe I, Heft Nr. 105, S. 41–51, 1990.
- Buziek, G., Grünreich, D., Kruse, I.: Stand und Entwicklung der digitalen Landschaftsmodellierung mit dem Topographischen Auswertesystem der Universität Hannover (TASH). *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 90(2), S. 84–88, 1992.
- Chew, L.P.: Constrained Delaunay triangulations. *Algorithmica* 4, S. 97–108, 1989.
- Dorninger, P., Briese, Ch., Jansa, J., Mandlbürger, G.: Modellierung der Marsoberfläche aus Laserscannerdaten. 12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Herbert Wichmann Verlag, Hrsg. Chesi und Weinhold, S. 21–30, 2003.
- Dyn, N., Levin, D., Rippa, S.: Data dependent triangulations for piecewise linear interpolation. *IMA J. Numerical Analysis* 10, S. 137–154, 1990.
- De Floriani, L., Puppo, E.: An On-Line Algorithm for Constrained Delaunay Triangulation. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing* 54, S. 290–300, 1992.
- Fritsch, D.: Zur Abschätzung des kleinsten Diskretisierungsintervalls bei der DGM-Datenerfassung. *ZfV* 117, S. 367–377, 1992.
- Garland, M., Heckbert, P. S.: Fast Polygonal Approximation of Terrains and Height Fields. Techn. Bericht CMU-CS-95-181, School of Computer Science, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, 1995.
- Hofmann, A.D.: Untersuchungen im 1D- und 2D-Parameterraum von Punktwolken aus Flugzeuglaserscannerdaten. Tagungsband der 23. Wiss.-Techn. Jahrestagung der DGPF, Bochum, 9.–11. Sept. 2003.
- Hoschek, J., Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. B. G. Teubner, Stuttgart, 1992.
- Ingham, A.E., Abbott, V.J.: *Hydrography for the Surveyor and Engineer*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1992.
- Klein, R.: Netzgenerierung impliziter und parametrisierter Kurven und Flächen in einem objektorientierten System. Diss., Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 1995.
- Klötzer, F.: Integration von triangulierten digitalen Geländemodellen und Landkarten. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Informatik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, 1997.
- Kraus, K.: *Photogrammetrie, Bd. 3, Topographische Informationssysteme*. Dümmler, Köln, 2000.
- Kraus, K.: Anmerkungen zum Aufsatz von R. Finsterwalder über die Genauigkeit digitaler Geländemodelle. *ZfV* 116, S. 26–27, 1991.
- Kraus, K.: Anmerkungen zum Aufsatz von F. Steidler über DGM-Interpolation. *Bildmessung und Luftbildwesen* 54, S. 129–131, 1986.
- Kruse, I.: TASH – Ein System zur EDV-unterstützten Herstellung topographischer Grundkarten. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen (NaKaVerm), Reihe I, Heft Nr. 79, S. 95–107, 1979.
- Lenk, H.: Interpretationskonstrukte. Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1993a.
- Lenk, H.: Philosophie und Interpretation, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1993b.
- Lenk, H.: Einführung in die Erkenntnistheorie – Interpretation – Interaktion – Intervention. Fink Verlag, München, 1998.
- Lenk, U.: Triangulationen und Adaptive Triangulationen – ein Verfahren zur Ausdünnung unregelmäßig verteilter Massenpunkte in der Geländemodellierung. *zfv* 128, S. 47–56, 2003.
- Lenk, U., Heipke, C.: Ein 2.5D-GIS-Datenmodell durch Integration von DGM und DSM mittels Triangulationen – theoretischer und praktischer Vergleich von Algorithmen und ihrer Ergebnisse. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 3/2002, S. 205–216, 2002.
- Lenk, U.: Quadratgittertriangulationen und Optimierungsstrategien zur Lösung der neutralen Fälle in Delaunay-Triangulationen. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie* 20, S. 59–86, 2001a.
- Lenk, U.: – 2.5D-GIS und Geobasisdaten – Integration von Höheninformation und Digitalen Situationsmodellen. *Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover* Nr. 244 u. DGK, Reihe C, Nr. 546. Diss., Univ. Hannover, 2001b.
- Lenk, U.: Schnellere Multiplikation großer Matrizen durch Verringerung der Speicherzugriffe und ihr Einsatz in der Ausgleichsrechnung. *zfv* 126, S. 201–207, 2001c.
- Lenk, U., Kruse, I.: Digitale Geländemodellierung und Bearbeitung hydrographischer Projekte mit TASH. *Hydrographische Nachrichten* 65:10–15; und *Hydrographische Nachrichten* 66:5–10, 2002.
- Lenk, U., Kruse, I.: *Digitale Geländemodellierung – Grundlagen, Methoden und ihre kritische Bewertung*. Bundesanstalt für Gewässerkunde – Reihe Veranstaltungen 3/2000, »Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen«, 2000.
- Maurer, T.: Automatisierte Erstellung von Finite-Elemente-Netzen für die zweidimensionale Strömungssimulation durch problemangepasste Ausdünnung von Rasterdaten der Geländehöhe. Bundesanstalt für Gewässerkunde – Reihe Veranstaltungen 3/2000, »Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen«, 2000.
- Pilouk, M.: *Integrated Modelling for 3D GIS*. PhD Thesis, ITC Publication Series No. 40, Enschede, The Netherlands, 1996.
- Pilouk, M., Kufoniyi, O.: A relational data structure for integrated DTM and multitheme GIS. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Vol. 30, Part 3/2, Munich, Germany, S. 670–677, 1994.*
- Pilouk, M., Tempfli, K.: An integrated DTM-GIS data structure: a relational approach. In: *Proceedings 11th International Symposium on Computer Assisted Cartography (AUTOCARTO 11)*, 30.10.–01.11.93, Minneapolis, Minnesota, USA, S. 278–287, 1993.
- Rippa, S.: Long and thin triangles can be good for linear interpolation. *SIAM J. Numer. Anal.* 29, S. 257–270, 1992.
- Rippa, S.: Minimal roughness property of the Delaunay Triangulation. *CAGD* 22, S. 489–497, 1990.
- O'Rourke, J.: *Computational Geometry in C*. Cambridge University Press, Cambridge, NY, 1998.
- Samet, R.: *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1990.
- Sloane, N.J.A., Plouffe, S.: *The Encyclopedia of Integer Sequences*. Academic Press, San Diego, 1995.
- Stanley, R.P.: *Enumerative Combinatorics, Vol. 2*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Sui, L.: Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Diss., Techn. Univ. Berlin, 2002a.
- Sui, L.: Ableitung topographischer Strukturlinien aus Laserscannerdaten mit Methoden der Bildverarbeitung. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 6/2002, S. 423–434, 2002b.
- Terribilini, A.: Maps in transition: development of interactive vector-based topographic 3D-maps. In: *Proc. 11th General Assembly of ICA, Vol. 1, Ottawa, S. 993–1001, 1999.*
- Wirth, H.: Qualitätsgesicherte Erfassung und Auswertung von Daten der Gewässersohle. Bundesanstalt für Gewässerkunde – Reihe Veranstaltungen 3/2000, »Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen«, 2000.

Anschrift des Autors

Dr.-Ing. Ulrich Lenk, PgDipHS
c/o EADS Dornier GmbH
Dept. IRIS2, 88039 Friedrichshafen
Tel.: 07545-8-8075, Ulrich.Lenk@dornier.eads.net