

Neue Untersuchungen zur Integration von DGM und DSM mittels Triangulationen zur Berechnung integrierter 2.5D-Landschaftsmodelle

Ulrich Lenk & Christian Heipke

Zusammenfassung

Der Artikel untersucht verschiedene bestehende Ansätze zur Integration von triangulierten Geländemodellen (triangular irregular networks, TIN) und Digitalen Situationsmodellen (DSM) zur Ableitung eines integrierten 2.5D-Datenmodells. Es wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der gegenüber den bestehenden Ansätzen explizit alle geometrischen Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt (DSM-Punkte auf TIN-Kanten und partielle Kollinearitäten zwischen Kanten des TIN und des DSM). Dieser hat darüber hinaus algorithmische Vorteile, da er bestehende topologische Strukturen in den Eingangsdatenbeständen nutzt. Eine geometrische Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die neue Vorgehensweise (wie auch zwei der drei vorher diskutierten Ansätze) zu redundanten Daten im Ergebnis führt. Es werden daher das Datenmodell mit minimaler Anzahl von Knoten vorgestellt sowie Algorithmen, mit denen dieses berechnet werden kann. Es wird exemplarisch ein Vergleich der entstehenden Datenvolumina gegeben.

Abstract

The article investigates several existing methods to integrate triangulated irregular networks (TIN) with digital situation models (2D GIS data). A new method is introduced which in contradistinction to existing methods considers all possible geometric combinations between input data sets (2D points on TIN edges, partial collinearity between edges of input data sets, degenerated quadrilaterals with a triangle as its convex hull). Besides these features, the new procedure has algorithmic advantages as it utilises existing topologies explicitly. A geometric analysis reveals that the new algorithm leads to redundant data (as indeed do two of the three other discussed methods). Therefore, the data model with minimal number of nodes is introduced as well as algorithms to compute it. Examples are given to highlight resulting data volumes of the different approaches.

1 Einleitung

Ein gegenwärtiger Forschungsschwerpunkt in der Geoinformatik ist die Weiterentwicklung der Datenmodelle von Geo-Informationssystemen (GIS) durch Berücksichtigung der Höhenkomponente. Bisher wird diese in GIS i. Allg. als Digitales Geländemodell (DGM) getrennt von der Lageinformation (2D-Situationsmodell, d. h. Digitales Situationsmodell, DSM; vgl. Hake & Grünreich, 1994) modelliert. Ein Beispiel ist das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS), beim dem die Erdoberfläche zweidimensional in diskrete Objekte eingeteilt und durch die Objektbereiche 1000-5000 und 7000 modelliert wird, während das Relief zur Beschreibung der Geländeform durch das DGM und weitere Zusatzinformationen im Objektbereich 6000 modelliert wird.

Während die Entwicklung von 3D-Datenstrukturen häufig im Zusammenhang mit 3D Stadtmodellen thematisiert wird, ist die landesweite 2.5D-Modellierung der Landschaft seltener Gegenstand der Forschung. Dabei ist gerade diese vor dem Hintergrund der Kompatibilität mit den bestehenden Geobasisdatenbeständen und der damit einhergehenden Investitionssicherung interessant.

Zwei Formen der 2.5D-Integration werden von Lenk (2001b) untersucht und bewertet. Dabei handelt es sich zum einen um das Verfahren auf der Grundlage von Polynomflächenobjekten, das eine Verallgemeinerung der heute bei GIS-Analysen üblichen Höhenschichtobjekte darstellt. Mit letzteren wird das Relief auf der Grundlage von Höhenlinien in Schichten diskretisiert. Polynomflächenobjekte erweitern diesen Ansatz, indem als Funktionen für Objekte nicht nur konstante Höhen (Polynome 0.-ten Grades), sondern auch höhere Polynome zugelassen werden. Das andere kritisch betrachtete Verfahren beruht auf Triangulationen. Die Untersuchungen in Lenk (2001b) zeigen, dass das Verfahren mittels Triangulationen gegenüber dem mit Polynomflächenobjekten Vorteile aufweist, da es sich besser in bestehende Verfahren der Datenerfassung, der raum- und zeitbezogenen Datenmodellierung und -verwaltung, der Analyse sowie der Visualisierung einfügt. Diese Eigenschaften sind für Polynomflächenobjekte nur eingeschränkt gegeben. Dieser Beitrag beschränkt sich daher auf die Integration von DSM und DGM mittels Triangulationen.

2 Grundlagen

2.1 Terminologie

Einige Termini wurden bereits in Abschnitt 1 genutzt und sollen nun noch näher spezifiziert werden. Unter einem 2.5D-Modell wird die eindeutige Zuweisung eines Höhenwertes zu einer Lagekoordinate verstanden. Dies ist gegenüber dem 3D-Modell eine Einschränkung, da mit letzterer Form auch multiple Höhenwerte möglich sind, wie sie z. B. für Stadtmodelle (vertikale Wände, Überbauungen, Brücken, Tunnel etc.) notwendig sind. Unter einem DSM wird das Digitale Situationsmodell verstanden, mit dem die Landschaft rein zweidimensional dargestellt wird. Dem gegenüber steht das Digitale Landschaftsmodell (DLM), mit dem hier die höherdimensionale Modellierung der Landschaft gemeint ist. Häufig werden die Begriffe DSM und DLM

synonym verwendet (z. B. Harbeck, 2000), hier werden die Begriffe jedoch getrennt voneinander betrachtet, um die Unterschiede bzgl. der Dimensionalität der Ansätze zu verdeutlichen.

2.2 Voraussetzungen aus der digitalen Geländemodellierung mittels Triangulationen

Grundlagen der Geländemodellierung mittels Triangulationen bzw. Delaunaytriangulationen (DT) und bedingten (constrained) Delaunaytriangulationen (CDT) finden sich in den Standardlehrbüchern der GIS-Literatur bzw. den Lehrbüchern der algorithmischen Geometrie. Das Delaunaykriterium (DK) ist für eine Triangulation erfüllt, wenn sich innerhalb der Umkreise der Dreiecke der Triangulation keine weiteren Punkte der Triangulation befinden.

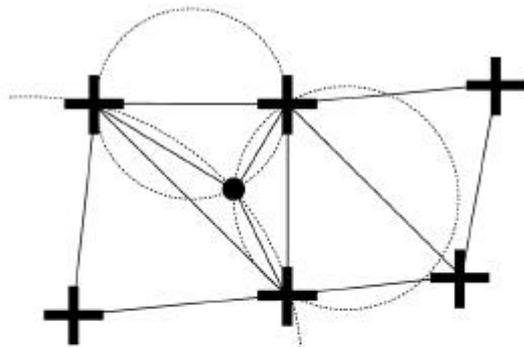
Degenerierte Fälle, in denen sich mehr als drei Punkte auf dem Umkreis befinden, werden z. B. von Lenk (2001a) behandelt. Insbesondere die CDT ist für die Berechnung integrierter Modelle wichtig.

Einen ausgezeichneten Überblick zu Triangulationen i. Allg. und DT geben Bern & Eppstein (1995). Aus dem Bereich der Geländemodellierung finden sich bei Kraus (2000) umfangreiche Darstellungen, und Monographien stellen z. B. die Arbeiten von Schneider (1998), Aumann (1994) oder Buziek (1994) dar.

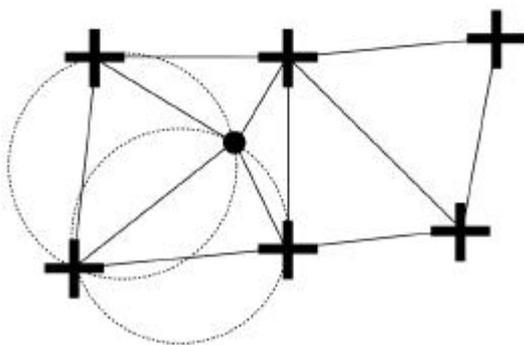
Ein wichtiger Algorithmus, der u. a. für die Integration von DSM und DGM verwendet wird, ist das inkrementelle Einfügen eines Punktes in eine bestehende Triangulation. Entsprechende Verfahren für eine DT werden z. B. von de Berg et al. (1997) vorgestellt. Zunächst muss hierfür der Einfügeort des Punktes lokalisiert werden. Über Verfahren zur Suche des Einfügeortes eines Punktes in einem Dreiecksnetz berichten u. a. Devillers et al. (2001), Devillers (1997), Guibas et al. (1992) und Boissonnat & Teillaud (1986). Ein einzufügender Punkt kann in ein Dreieck (Bild 1, 1.), auf eine bereits bestehende Kante (Bild 1, 2.) oder, falls es sich nicht um geometrisch disjunkte Punktmengen handelt, auf einen existierenden Punkt fallen. Im ersten Fall (Punkt liegt in Dreieck) werden von dem Punkt zu den Eckpunkten des betreffenden Dreiecken neue Kanten eingefügt (Bild 1, 1. a) und die drei Kanten des Einfügedreiecks bzw. die betreffenden Dreiecke rekursiv hinsichtlich des DK überprüft (Bild 1, 1. b). Beim Einfügen auf einer Kante wird diese geteilt, und es werden von dem einzufügenden Punkt zu den in den inzidierenden Dreiecken gegenüberliegenden Punkten neue Kanten instanziiert (Bild 1, 2. a). Danach werden die vier Kanten, die in den neuen (oder geänderten) Dreiecken gegenüberliegen, bzw. die betreffenden Dreiecke wie im ersten Fall rekursiv überprüft (Bild 1, 2. b). Ein Punkt, der zusätzlich in eine Triangulation eingefügt wird, wird auch Steinerpunkt genannt (Bern & Eppstein, 1995).

Inkrementelles Einfügen eines Punktes

1.) in ein Dreieck

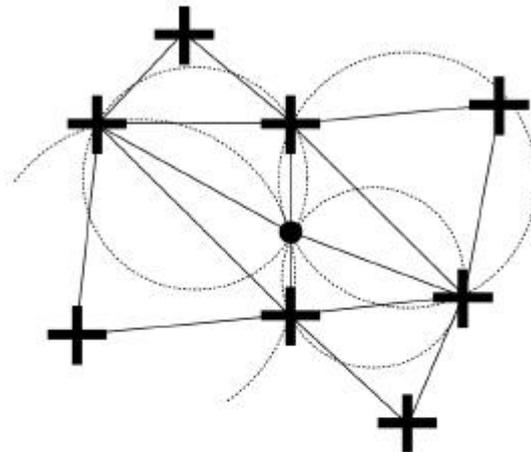


a.) Initiale Überprüfung von drei Dreiecken

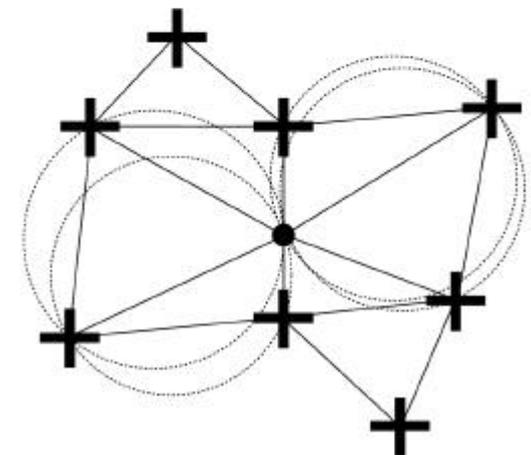


b.) Rekursive Überprüfung geänderter Dreiecke

2.) auf einer Kante



a.) Initiale Überprüfung von vier Dreiecken



b.) Rekursive Überprüfung geänderter Dreiecke

Bild 1 – Inkrementelles Einfügen eines Punktes in eine Delaunay-Triangulation. (Datei: inkrment)

2.3 Simpliciale Komplexe

Der Ansatz der objektstrukturierten Landschaftmodellierung mittels Dreiecken ist auch unter dem Stichwort der Simplicialen Komplexe bekannt. Diese bilden ein theoretisches Fundament, das nicht auf zwei bzw. drei Dimensionen beschränkt ist. Für jede Dimension gibt es ein minimales Objekt, welches Simplex genannt wird. Für die Dimension 0 ist dies der Punkt, der 0-Simplex. Entsprechend stellt eine Kante zwischen zwei 0-Simplexen einen 1-Simplex dar und ein Dreieck einen 2-Simplex (vgl. Bild 2). Objekte, die aus mehreren Simplexen zusammengesetzt sind, werden Simpliciale Komplexe (SK) genannt. Das bedeutet, dass ein Dreiecksnetz ein 2-simplicialer Komplex (2-SK, vgl. Bild 2) ist und ein räumlicher Körper, der aus Tetraedern zusammengesetzt ist, einen 3-SK darstellt.

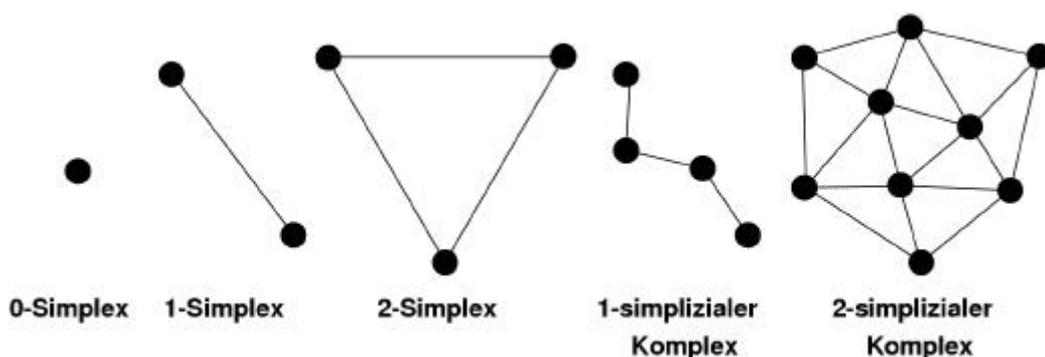


Bild 2 – Simplexe und Simpliziale Komplexe. (Datei: simplicl)

Für weitere grundlegende Definitionen wird auf entsprechende Literatur der Topologie verwiesen (z. B. tom Dieck, 2000; Jänich, 1984). Im Zusammenhang mit GIS werden SK u. a. von Worboys (1995) und Egenhofer et al. (1989) behandelt. 3D-Modellierungen mit SK werden von Pilouk (1996) und Breunig (2000, 1996) vorgestellt, wobei Breunig (2000) auch temporale Aspekte berücksichtigt.

2.4 Allgemeines integriertes Datenmodell

Das allgemeine Datenmodell, das mit einer dreiecksbasierten Modellierung der Landschaft verbunden ist, wird mit Bild 3 in der Unified Modeling Language (UML, Booch et al., 1998) beschrieben. Ein punktförmiges Objekt wird einem Knoten (0-Simplex) im integrierten Modell zugeordnet. Ein linienförmiges Objekt wird durch eine oder mehrere Kanten (bzw. 1-SK) und ein flächenhaftes Objekt durch ein oder mehrere Dreiecke im Datenbestand, d. h. 2-SK, repräsentiert. Der Einfachheit halber wird hier auf weitere Beziehungen wie Überführungsrelationen, wie sie z. B. im ATKIS-Datenmodell enthalten sind, verzichtet. Erweiterungen sind ohne Probleme möglich (z. B. Chen et al., 2000) und sollen daher hier nicht ausgeführt werden.

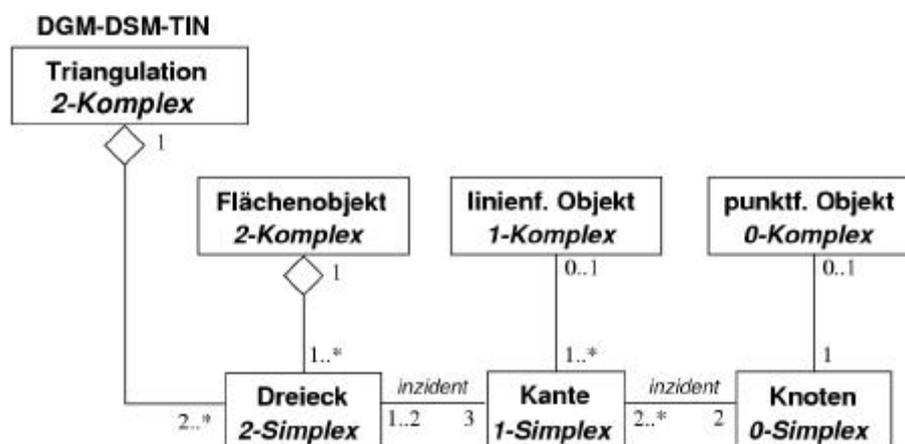


Bild 3 – 2.5D-GIS-Datenmodell mittels Simplizialer Komplexe. (Datei: umltri)

3 Bestehende Ansätze zur Berechnung eines integrierten Modells

3.1 Anforderungen an ein integriertes Modell

Berücksichtigt man, dass die Eingangsdaten DSM und DGM mit einer gewissen Genauigkeit erhoben wurden, so muss bei einer Integration der beiden Datensätze gesichert sein, dass sich die Qualität der Modellierung nicht verschlechtert. Das bedeutet, dass die Form der 2D-Geometrien erhalten bleiben muss bzw. diese in einem integrierten Modell enthalten sein müssen, und die Geländeoberfläche, die durch das DGM beschrieben wird, darf sich hinsichtlich ihrer geometrischen Form durch den Integrationsprozess nicht verändern. Man kann in letzterem Fall von der Forderung nach der Invarianz der Oberflächenform sprechen.

Neben diesen Kriterien sollte das entstehende Datenvolumen des integrierten Modells betrachtet werden, da einige Autoren (z. B. Klötzer, 1997; Egenhofer et al., 1989) die bei der Integration entstehende große Datenmenge als nachteilig für den Ansatz ansehen.

3.2 Das Verfahren von Pilouk (1996)

Pilouk (1996; s. a. Pilouk & Tempfli, 1994a, 1994b, 1993; Pilouk & Kufoniyi, 1994) beschreibt sein Verfahren zur Berechnung eines integrierten Modells wie folgt, wobei die Darstellung vereinfacht und nur unter den Aspekten der 2.5D-Modellierung wiedergegeben wird:

- Strukturierung von 2D-Daten räumlich begrenzter Objekte.
- Bezug von Geländedaten im Gitter- oder TIN-Datenformat.
- Interpolation der Höhenkoordinate für jeden Knoten in den 2D-Daten, der noch keine Höheninformation besitzt.
- Falls es sich bei den Geländedaten um ein Gittermodell handelt, wird dies nun in ein TIN überführt, ggf. kann eine Datenreduzierung durchgeführt werden.
- Bildung der Vereinigungsmenge der Knoten des TIN mit den Knoten der 2D-Daten.
- Alle 2D-Objekte werden durch bedingte Triangulation in das TIN integriert, wobei die Kanten der 2D-Daten als Bedingungen in die Triangulation eingeführt werden.

Das Ergebnis ist eine objektstrukturierte 2.5D-Modellierung der Erdoberfläche durch 2-SK.

3.3 Der Ansatz von Klötzer (1997)

Das Verfahren von Klötzer (1997; s. auch Klötzer & Plümer, 1997) wurde vor dem Hintergrund der Arbeiten von Plümer & Gröger (1997) entwickelt, die einen landkartenbasierten Ansatz der Modellierung von Geodaten diskutieren. Im Gegensatz zu den analogen Medien der Kartographie handelt es bei den "Landkarten" dort um zweidimensionale graphentheoretische Konstrukte zur Geodatenmodellierung, die hier nicht weiter diskutiert werden (vgl. Plümer & Gröger, 1997).

Klötzer (1997) erweitert das Konzept der Landkarte auf der Grundlage von Triangulationen um die Höhenkomponente und fordert, dass die Oberflächenform des DGM-TIN durch die Integration der Landkarten nicht verändert werden darf (vgl. Abs. 3.1). Seine Vorgehensweise dabei ist wie folgt:

- a.) Inkrementelles Einfügen aller Knoten der Landkarte in das DGM-TIN unter Wiederherstellung der DT.
- b.) Einrechnen der Kanten der Landkarte in das DGM-TIN unter Berechnung von Schnittpunkten (Steinerpunkten) zwischen den bereits bestehenden Kanten im TIN und den Landkartenkanten. Das Delaunaykriterium (DK) ist nach dem Einfügen der Punkte nicht mehr gültig, da eine Überprüfung des DK unterbleibt.

Unglücklicherweise ist durch die Wiederherstellung der DT in Schritt a.) ein Verfahrensfehler gegeben, da durch diese Wiederherstellung eine Veränderung der Oberflächenform des DGM-TIN an den Enden der Landkartenkanten verursacht wird. Falls jedoch die Überprüfung des DK unterbleibt, so handelt es sich um ein Verfahren, das der von Klötzer (1997) gestellten Anforderung der Invarianz der Oberflächenform an eine Integration entspricht. Daher wird diese Vorgehensweise bei der weiteren Diskussion als das korrigierte Verfahren nach Klötzer (1997) bezeichnet.

Ein ähnliches Verfahren der Einrechnung von Geometrien in einen 2-SK wird von Egenhofer et al. (1989) beschrieben, wobei diese nur ein 2D-Datenmodell diskutieren und nicht eine Erweiterung bestehender 2D-Datenstrukturen um die Höhenkomponente verfolgen. Daher soll hier auf dieses Verfahren nicht weiter eingegangen werden, es wird in Lenk (2001b) ausführlich diskutiert.

3.4 Das Verfahren von Abdelguerfi et al. (1997)

Ein weiteres Verfahren der Integration von 2D-Geoinformation mit TIN stellen Abdelguerfi et al. (1997) vor. Ihre Arbeiten bewegen sich vor dem Hintergrund, dass für die Modellierungs- und Simulationsarbeiten der US-Streitkräfte deren bisher verwendetes ebenenbasiertes Datenaustauschformat Vector-Product-Format (VPF) als nicht mehr ausreichend eingestuft wird. Sie stellen einen erweiterten Ansatz, das Extended-Vector-Product-Format (EVPF) vor. Dabei wird jedem flächenhaften Objekt (polygon) eine Anzahl von Dreiecken zugewiesen. Ihre Vorgehensweise ist wie folgt (Abdelguerfi et al., 1997):

- a.) Bestimmung der Dreiecke, die Punkte des jeweiligen Objektumrings enthalten.
- b.) Verschneidung des Objektes mit diesen Dreiecken. Es entstehen ein oder mehr Teilpolygone auf der Grundlage der DGM-TIN-Kanten.
- c.) Polygontriangulation der entstehenden Teilpolygone (child polygons) mit einem Verfahren, das bei O'Rourke (1998) beschrieben wird.

3.5 Diskussion der bestehenden Ansätze

Berücksichtigt man, dass die Forderung der Invarianz der Geländeoberfläche durch die Integration von DSM und DGM-TIN erfüllt werden soll, so muss das Verfahren von Pilouk (1996) für diesen Zweck kritisch betrachtet werden. Durch das Einführen der DSM-Kanten als bedingte ungeteilte Kanten kann es zu deutlichen Veränderungen in der Oberflächenform kommen, wie leicht an einem Beispiel dargestellt werden kann. Angenommen, eine Straße durchquert ein Tal in Querrichtung und als Knoten gibt es nur Punkte auf den angrenzenden Bergrücken. In diesem Fall wird das Tal durch den Algorithmus von Pilouk (1996) von einem neu entstandenen Damm geteilt werden. Durch das Verfahren von Pilouk (1996) wird nur gesichert, dass die 2D-Geometrien in dem integrierten Modell repräsentiert sind, die Oberflächenform des Geländes verändert sich jedoch. Die Vorgehensweise von Pilouk (1996) kann daher nur zum Ziel führen, wenn DGM und DSM gemeinsam bereits als 2.5D-DLM, z. B. photogrammetrisch erfasst werden. In diesem Fall ist jedoch keine Integration mehr notwendig. Das Datenvolumen des Ansatzes von Pilouk (1996) ergibt sich durch einfache Bildung der Vereinigungsmenge der Punkte des DSM und des DGM.

Das korrigierte Verfahren nach Klötzer (1997) und die Vorgehensweise von Abdelguerfi et al. (1997) erfüllen dem gegenüber die Forderung nach der Invarianz der Oberflächenform, da bei ihnen die DSM-Kanten durch existierende TIN-Kanten geteilt werden, allerdings haben sie algorithmische Defizite und berücksichtigen nicht explizit alle geometrischen Kombinationsmöglichkeiten, die sich bei der Integration von DSM und DGM-TIN ergeben können. Das jeweilige entstehende Datenvolumen der Ansätze ergibt sich als Vereinigungsmenge der DSM- und der DGM-Punkte zuzüglich der Menge der zu berechnenden Schnittpunkte. Diese kann nur für den Algorithmus von Abdelguerfi et al. (1997) näher spezifiziert werden. Es handelt sich dabei aufgrund der verwendeten Verschneidung um die Menge der Schnittpunkte zwischen Kanten des DSM und des DGM-TIN.

Für den korrigierten Algorithmus von Klötzer (1997) ergibt sich die Menge der Schnittpunkte zwischen den Kanten des DSM und den Kanten des bereits mit dem Einfügen des DSM-Punkte erweiterten TIN. Es werden sich daher mehr Schnittpunkte als bei Abdelguerfi et al. (1997) ergeben, da mehr Schnittpunktkandidaten zur Verfügung stehen. Die erwähnten Restriktionen der beiden Ansätze werden im Folgenden detaillierter ausgeführt.

3.5.1 Spezielle geometrische Konstellationsmöglichkeiten

Eine Situation, die bei der Integration von DGM-TIN und DSM auftreten kann, ist die partielle Kollinearität von Kanten in den Eingangsdatensätzen. Dies impliziert, dass Knoten sich an geometrisch identischen Positionen in der Ebene befinden können bzw. ein Knoten auf eine bestehende Kante des jeweils anderen Datensatzes fallen kann. Weiter können degenerierte Vierecke auftreten, deren konvexe Hülle ein Dreieck bildet. Insbesondere die geometrische Identität von Punkten ist ein Fall, der in der algorithmischen Geometrie kaum erwähnt wird, da die Ansätze dort von disjunkten Punkten in der Ebene ausgehen. Diese Fälle werden bei Klötzer (1997) nicht berücksichtigt bzw. vom Ansatz her ausgeschlossen. Die Vorgehensweise von Abdelguerfi et al. (1997) ist hier in ihrer Stabilität und Robustheit direkt abhängig von der Implementierung der Verschneidungsoperation. Falls diese Fälle nicht berücksichtigt werden, kann es zu fehlerhaften Ergebnissen kommen.

3.5.2 Algorithmische Aspekte

Neben den Aspekten der Robustheit der Ansätze zeigen die Verfahren algorithmische Defizite, da alle bisher existierenden Ansätze der Integration von DGM-TIN und DSM die existierenden Datenstrukturen nicht für eine effiziente Vorgehensweise nutzen. Klötzer (1997) fügt zunächst alle Knoten der Landkarte in das DGM-TIN ein, bevor die Integration der Landkartenkanten erfolgt. Hierfür muss die Zugriffsdatenstruktur im Dreiecksnetz entsprechend häufig genutzt werden. Die räumliche Zugriffszeit im Dreiecksnetz stellt das Hauptunterscheidungsmerkmal bei inkrementellen Einfügeoperationen dar, da das beeinflusste Gebiet für einen einzufügenden Punkt für alle verschiedenen Verfahren gleich ist (z. B. Devijver & Dekesel, 1982). Über räumliche Suchverfahren in Dreiecksnetzen berichten u.a. Devillers et al. (2001) und Devillers (1997). Durch das Einfügen eines Punktes einer Linie in ein Dreiecksnetz ist mindestens ein Dreieck bekannt, das sich in der Nähe des nächsten Punktes der Linie befindet. Dieses Dreieck kann als guter Startwert für eine topologische Wanderung im Dreiecksnetz (vgl. Devillers et al., 2001) genutzt werden, um schnell ohne Nutzung der räumlichen Zugriffsdatenstruktur des Dreiecksnetzes den Einfügeort des nächsten Punktes der Linie im Dreiecksnetz zu finden. Dabei wird dann zum einen die existierende Linientopologie der DSM-Geometrie sowie die Topologie des vorhandenen Dreiecksnetzes vorteilhaft genutzt.

Beim Ansatz von Abdelguerfi et al. (1997) verhält sich dies anders, da die Autoren eine ganz unterschiedliche Vorgehensweise nutzen. Zunächst werden alle Dreiecke bestimmt, in denen die Punkte des Umrings von einem Objekt liegen. Es ist in der Quelle nicht näher beschrieben, wie dies vorgenommen wird. Allerdings muss hier eine initiale räumliche Zuordnung von Dreiecken zu dem zu verschneidenden Objekt erfolgen. Für eine effiziente Berechnung einer Verschneidung muss weiter vor der eigentlichen Verschneidung eine Sortierung der Daten erfolgen, z. B. in aufsteigender Richtung einer Koordinatenlinie, damit die Verschneidung mit einem ausgabesensitivem Verfahren berechnet werden kann (vgl. de Berg et al., 1997). Da nunmehr die Knoten entlang einer Koordinatenlinienrichtung bearbeitet werden, kommt es auch hier nicht zu einem Einsatz der existierenden Topologien im Dreiecksnetz bzw. in der 2D Geometrie. Das bedeutet, dass die klassische Verschneidung eines Dreiecksnetzes mit flächenhaften 2D Geometrien hinsichtlich ihrer Effizienz kritisch betrachtet werden muss.

4 Ein neuer Algorithmus zur Integration von DGM und DSM

Aus diesen Erkenntnissen heraus wurde ein neuer Algorithmus entwickelt, der sich gegenüber den bekannten Ansätzen durch die konsequente Nutzung existierender Topologien beim Einrechnen von 2D Geometrien in ein TIN hervorhebt. Zusätzlich berücksichtigt er alle geometrischen Kombinationsmöglichkeiten, die beim Zuordnen von zwei unabhängig erhobenen Datensätzen auftreten können.

4.1 Grundlegendes Prinzip

Das grundlegende Funktionsprinzip des Ansatzes wird mit den Bildern 4 und 5 dargestellt. Durch Berechnung der Determinanten, die aus dem Anfangspunkt A und dem Endpunkt B einer Kante und einem dritten Punkt C berechnet wird, kann ermittelt werden, ob sich C links, rechts oder auf der Kante A-B befindet (O'Rourke, 1998). Im ersten Fall ist die Determinante größer Null, im zweiten Fall kleiner Null und im dritten Fall identisch Null. Aus der Kombination der möglichen Ergebnisse *liegt_links*, *liegt_rechts* und *liegt_auf* der drei Determinanten, die mit den gerichteten Kanten K0, K1 und K2 des Dreiecks P0-P1-P2 in Bild 4 jeweils mit einem zu untersuchenden Punkt berechnet werden, kann somit bestimmt werden, wo sich ein Punkt bezogen auf das Dreieck P0-P1-P2 befindet.

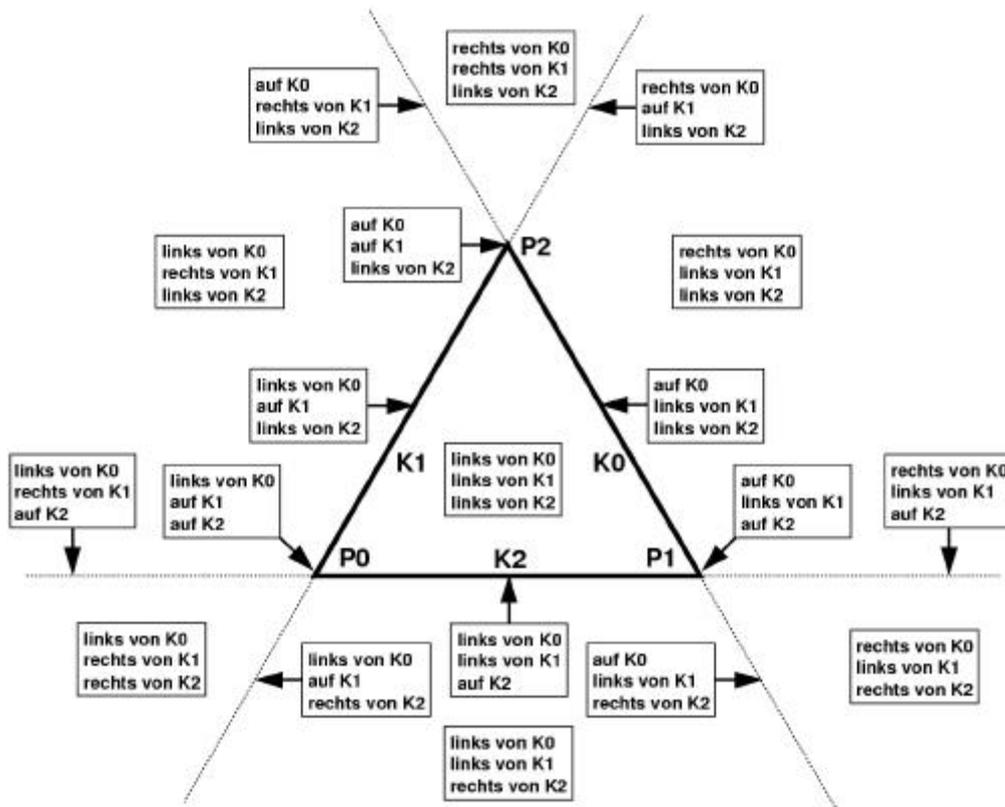


Bild 4 – Mögliche relative Örter eines Punktes bezogen auf ein Dreieck. (Datei: trilocat)

Fasst man einige dieser geometrischen Örter zusammen, so ergibt sich die Situation in Bild 5. Der Horizont um einen eingefügten Punkt (Bild 5, Ort 9) wird durch die inzidierenden Dreiecke in Sektoren eingeteilt. Mit den Determinanten, die mit den gerichteten Kanten eines inzidierenden Dreiecks und dem nächsten einzufügenden Punkt der Linie berechnet werden, kann bestimmt werden, in welchem der 9 prinzipiell möglichen geometrischen Örter (mit Unterfällen) sich der Einfügeort des Punktes C befindet. Falls er nicht im Sektor des Dreiecks liegt, mit dem die Determinanten berechnet wurden, rotiert das Verfahren unter Nutzung der Topologie um den aktuellen Punkt und testet den zu prüfenden Linienpunkt mit einem der adjazierenden Dreiecke (Fälle 5a/b und 8a/b/c). Da die Fortbewegung im Dreiecksnetz (und auch die Rotation um den Punkt) die Topologie des TIN nutzt, wird der Algorithmus hier als radial-topologischer Algorithmus (RTA) bezeichnet. Mit ihm können stückweise lineare 2D-Geometrien in ein Dreiecksnetz eingerechnet werden, indem dieses entlang der 2D-Geometrien traversiert wird. Dabei werden die Höhen der 2D-Punkte bzw. der berechneten Schnittpunkte zwischen 2D-Geometrien und bestehenden Dreieckskanten (Fall 7, es wird ein Schnittpunkt mit der Kanten gegenüber berechnet) linear im TIN interpoliert. Falls eine partielle oder vollständige Kollinearität zwischen dem aktuell einzufügenden Liniensegment 9-C und Kanten im DGM-TIN existiert, wird diese mit dem beschriebenen Verfahren aufgedeckt bzw. beim Einrechnen des Liniensegmentes berücksichtigt (Fälle 2a/b, 3a/b und 4a/b). Im Fall 1 befindet sich der Punkt C im inzidierenden Dreieck selber und im Fall 6 auf der Kante, die dem zuletzt eingefügten Punkt in dem Dreieck gegenüberliegt.

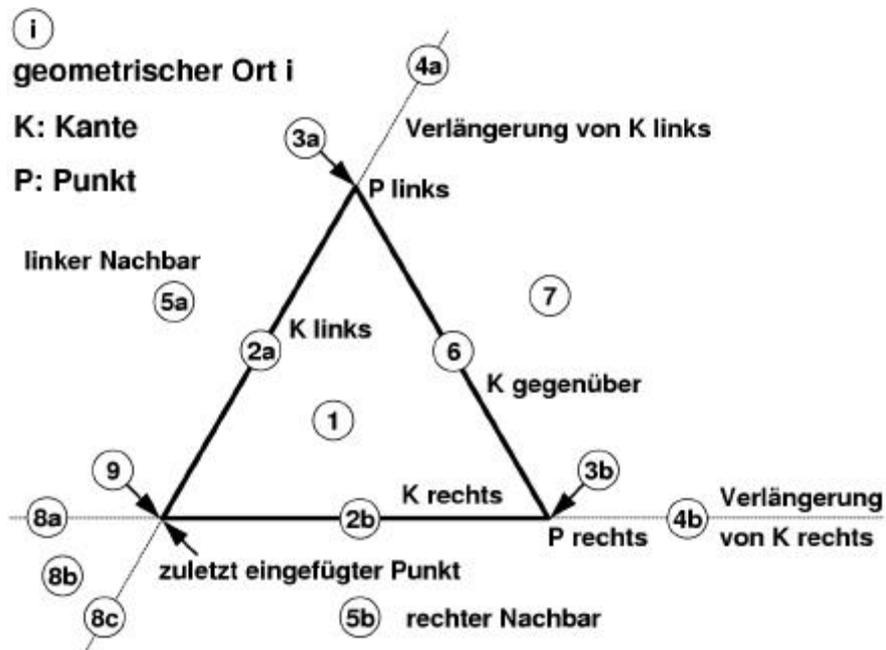


Bild 5 – Schema des radial-topologischen Algorithmus. (Datei: radialto)

4.2 Geometrische Analyse

Bei der grundlegenden Erläuterung des RTA wurde nur ein einzelnes Dreieck, das den entsprechenden Sektor im Horizont des inzidierenden zuletzt eingefügten Punkt bildet, betrachtet. Nun soll anhand von Bild 6 a.) untersucht werden, wie sich der RTA bei der Navigation im TIN, also in einem größeren Verbund von Dreiecken verhält. Eine DSM-Geometrie tritt von Nordosten in ein DGM-TIN-Dreieck ein. Die Punktnummern in Bild 6 a.) wurden in der Reihenfolge des Einfügens vergeben, diese kann anhand von Bild 5 nachvollzogen werden.

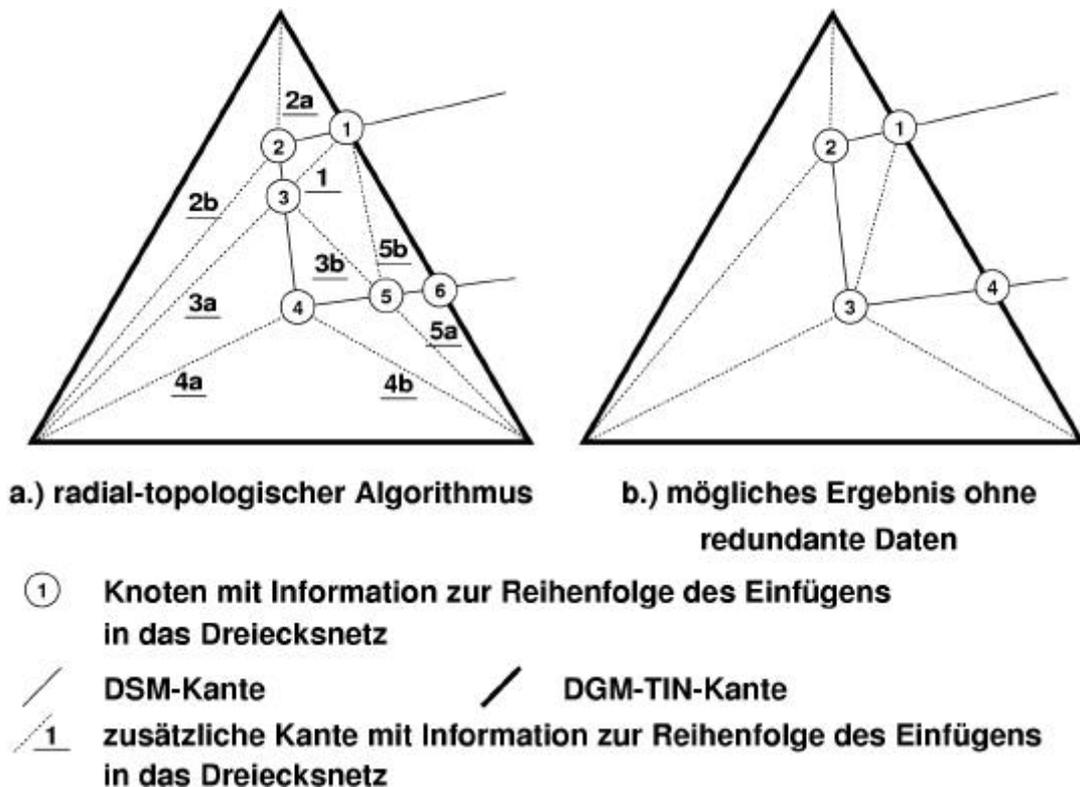


Bild 6 – Geometrische Analyse des radial-topologischen Algorithmus. (Datei: radtopa)

Zunächst wird Punkt 1 als Eintrittsschnittpunkt zwischen der DSM-Geometrie und dem DGM-Dreieck angelegt. Danach wird Punkt 2 als Knickpunkt der DSM-Geometrie eingefügt und im Anschluss Punkt 3 als Schnittpunkt zwischen der Kante, die beim Einfügen von Punkt 1 angelegt wird, bestimmt. Äquivalent wird dann Punkt 4 als Knickpunkt der DSM-Geometrie eingefügt und Punkt 5 wieder als Schnittpunkt der DSM-Geometrie mit der

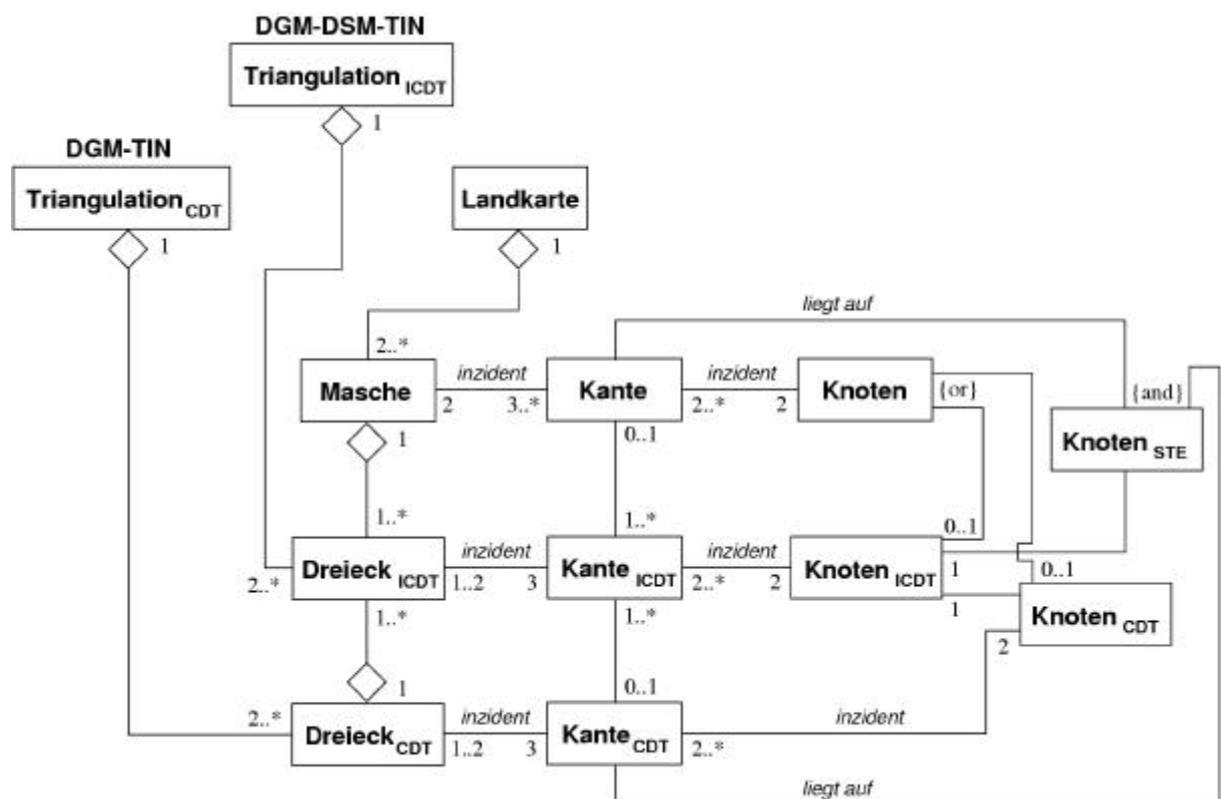
Kante, die beim Einfügen von Punkt 3 eingeführt wurde. Abschließend verlässt die DSM-Geometrie den Bereich des ursprünglichen DGM-Dreiecks im Schnittpunkt 6. Die eingefügten Punkte gilt es nun näher zu untersuchen. Die Punkte 1 und 6 werden als Schnittpunkte der DSM-Kante mit den Kanten des originären Dreiecks berechnet und sind damit zur morphologischen Beschreibung der DSM-Geometrie notwendig, das sich in ihnen die Geländeform entlang der DSM-Geometrie ändert. Die Punkte 2 und 4 stellen Knickpunkte dar, die zur lagemäßigen Beschreibung der DSM-Geometrie erforderlich sind. Sie bilden einen Teil der Tessellation der Ebene in Objekte. Nur die Punkte 3 und 5 sind weder zur Tessellation der Ebene noch zur morphologischen Beschreibung des Geländes notwendig. Sie stellen daher redundante Daten dar. Ebenso wie beim korrigierten Algorithmus von Klötzer (1997) ist das mit dem RTA entstehende Datenvolumen von der Menge der Schnittpunkte abhängig, die aufgrund der Berechnung von Schnittpunkten mit Kanten des bereits erweiterten TIN nicht näher spezifiziert werden kann. Ein mögliches redundanzfreies Ergebnis ist mit Bild 6 b.) gegeben. Ein alternatives Ergebnis wäre eine Triangulation, in der die Diagonale im Viereck 1-2-3-4 nicht von Punkt 1 nach Punkt 3 gelegt ist, sondern von Punkt 2 nach Punkt 4. Da alle Punkte im ursprünglichen DGM-TIN-Dreieck koplanar sind, führen diese beiden Alternativen zu einer identischen Oberflächenform des Geländes.

5 Das Datenmodell mit minimaler Anzahl von Knoten und seine Berechnung

5.1 Datenmodell

Aus den oben dargestellten Untersuchungen ist ersichtlich, dass ein Steinerpunkt im Modell mit minimaler Anzahl von Knoten nur eingeführt werden darf, wenn er als Schnittpunkt zwischen der einzufügenden DSM-Geometrie und einer Kante des originären DGM-TIN berechnet wird. Ein Schnittpunkt mit Kanten, die im Verlauf des Einrechnens der DSM-Geometrie gebildet werden, ist nicht zulässig. Die Anzahl der Knoten und damit das entstehende Datenvolumen des integrierten Modells ist auf diese Art eindeutig festgelegt. Das Ergebnis in seiner geometrischen Form ist eindeutig, da die Oberflächenform des Geländes nicht verändert wird. Die Tessellation der Ebene in flächenhafte Objekte ist ebenso eindeutig, da alle Kanten des DSM durch eine oder mehr Teilkanten im integrierten Modell repräsentiert sind. Eine Eindeutigkeit der Tessellation der Ebene in entsprechende Dreiecke ist ohne Einführung weiterer Kriterien nicht gegeben, wie an dem in Bild 6 dargestellten Beispiel veranschaulicht wurde.

Bild 7 beschreibt das entsprechende Datenmodell in der UML. Die Schnittpunktbedingung der Steinerpunkte ist als {and}-Bedingung zwischen ihren inzidierenden Kanten des DSM und des DGM eingeführt. Das DGM-TIN wird zur morphologisch qualitativ hochwertigen Geländemodellierung als CDT berechnet, bei der Strukturinformation wie Kantenlinien etc. berücksichtigt werden (z. B. Buziek, 1994). Das integrierte Modell (DGM-DSM-TIN) wird als integrierte CDT (ICDT) bezeichnet, in der gegenüber der CDT weitere Bedingungen zum Erhalt der Oberflächenform des Geländes bzw. zur Repräsentation der Kanten des DSM durch (Teil-)Kanten im integrierten Modell eingeführt sind.

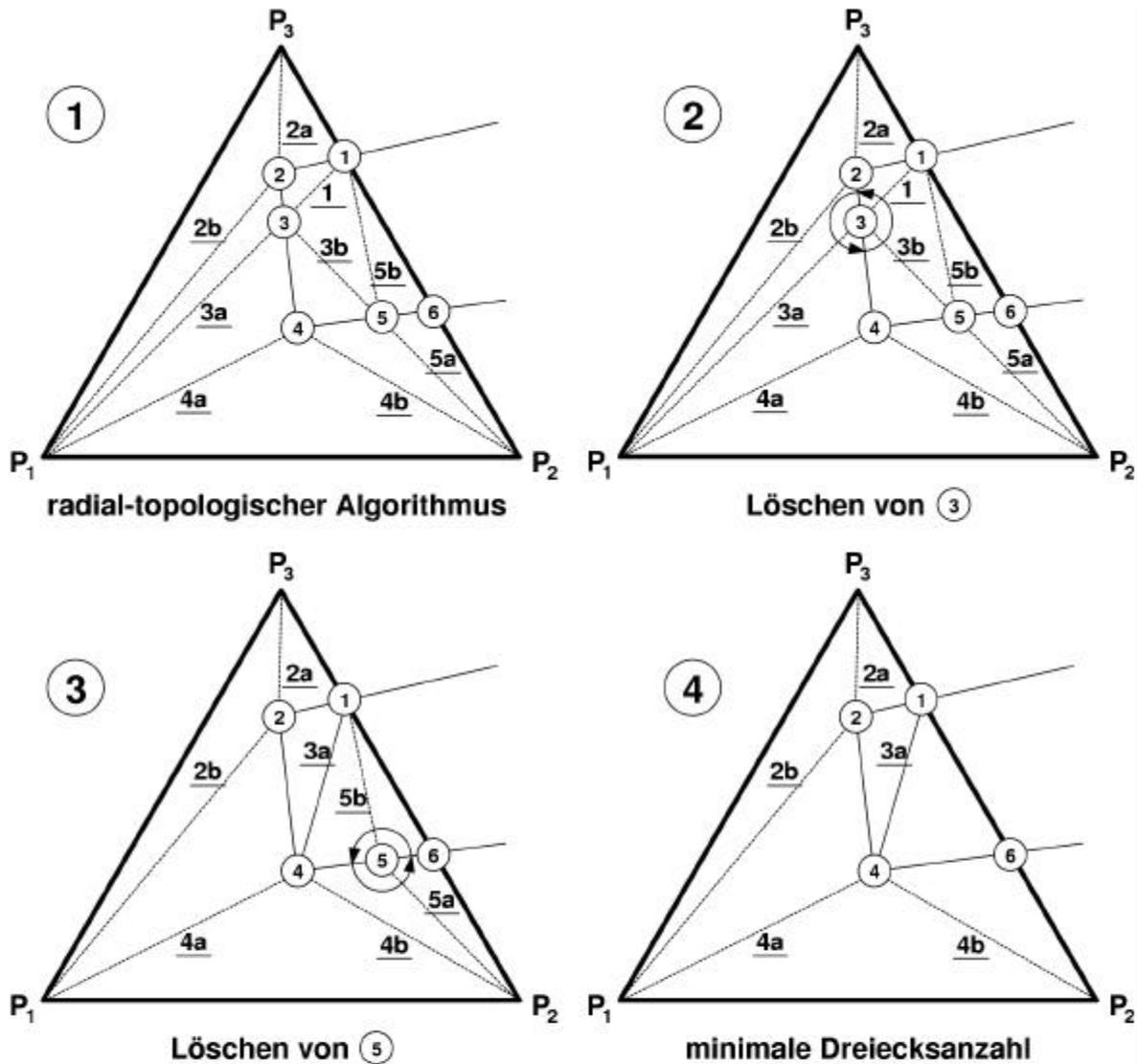


5.2 Algorithmen zur Berechnung des minimalen Modells

Prinzipiell ist bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der ICDT zwischen direkten und indirekten Verfahren zu unterscheiden. Ein möglicher Algorithmus zur direkten Berechnung der ICDT ist mit dem Verfahren von Abdelguerfi et al. (1997) gegeben. Die Anzahl der Schnittpunkte ist durch die Berechnung der Verschneidung eindeutig. Es gelten die oben angegebenen Restriktionen hinsichtlich der Berücksichtigung möglicher geometrischer Konstellationen und der algorithmischen Effizienz des Ansatzes.

Nachdem der RTA als effizientes Verfahren der Integration von DSM und DGM vorgestellt wurde, liegt es nahe, diesen hinsichtlich seiner Eignung für eine Modifikation zu untersuchen. Bei der direkten Berechnung ist ein Problem, dass der Anfangspunkt einer DSM-Geometrie i. Allg. nicht auf die Kante eines Dreiecks des DGM-TIN fällt. Zur Vermeidung redundanter Information muss beim Auftreffen der DSM-Geometrie auf eine Kante des DGM-TIN überprüft werden, ob vorher redundante Knoten berechnet wurden. Diese müssten dann gelöscht werden. Für den Fall, dass die DSM-Geometrie in dem zu verlassenden Dreieck ihren Startpunkt hat, muss die hineinragende DSM-Teilgeometrie beim Löschen erhalten bleiben, damit nach Abschluss der Integration die DSM-Geometrie vollständig im integrierten Modell enthalten ist. Im weiteren Verlauf kann dann mit dem einfachen RTA fortgefahren werden, wobei immer beim Verlassen eines Dreiecks des originären DGM-TIN getestet werden muss, ob vorher redundante Knoten gebildet wurden, ggf. müssen sie gelöscht werden. Dies kann dadurch erfolgen, dass aus der originären DSM-Teilgeometrie und dem DGM-TIN-Dreieck in Verbindung mit den Schnittpunkten zwischen diesen die lokale Dreiecksvermaschung mit einer Polygontriangulation redundanzfrei berechnet wird. Die Behandlung der Teilgeometrien an den Enden ist jedoch nur mit einer aufwendigen Datenstruktur und der Berücksichtigung von etlichen Sonderfällen möglich.

Ein andere Möglichkeit ist mit einem indirekten Verfahren gegeben. Zunächst wird mit dem RTA ein Zwischenmodell berechnet, aus dem im Anschluss redundante Daten entfernt werden. Zu löschende Knoten werden bei der Berechnung des Zwischenmodells als solche markiert, wenn bei der Berechnung eines Schnittpunktes (Bild 5, Fall 7) die {and}-Bedingung in Bild 7 nicht eingehalten wird, oder sie müssen anderweitig durch Kollinearitätstests gefunden werden. In beiden Fällen wird das Zwischenmodell zum Löschen entlang der DSM-Geometrien traversiert. Das Löschen von Punkten wird in Bild 8 veranschaulicht. Wenn das Löschverfahren auf einen zu löschenden Punkt trifft, wird unter Nutzung der Topologie des Zwischenmodells einmal um diesen rotiert, um die inzidierenden geometrischen Elemente in Puffern zu speichern. Nach dem Löschen des Punktes werden beide Seiten der wiederhergestellten (Teil-)Kante unter Verwendung der gepufferten Elemente mit einer Polygontriangulation (siehe z. B. O'Rourke, 1998; de Berg et al., 1997) neu vermascht, wobei die topologischen Beziehungen zum umgebenden TIN hergestellt werden müssen.



- 1** zusätzliche Kante mit Information zur Reihenfolge des Einfügens in das Dreiecksnetz
- ①** Knoten mit Information zur Reihenfolge des Einfügens in das Dreiecksnetz
- 2D-Kante (DSM)** **Kante des DGM-TIN-Dreiecks**
- 3a** beim Löschen von **③** geänderte Kante

Bild 8 –Löschen der redundanten Punkte im integrierten TIN von Bild 6 a. (Datei: loeschen)

Bei dieser Vorgehensweise ist zu berücksichtigen, dass es in dem Polygon aufgrund der Berechnung von Schnittpunkten entlang einer DSM-Kante zu kollinearen Punkten kommen kann. Eine mögliche Situation wird in Bild 9 angedeutet. Es handelt sich bei den Punkten 1 und 2 um Schnittpunkte, die bei einem ersten Schnitt einer DSM-Geometrie mit dem Dreieck P_1, P_2 und P_3 berechnet wurden. Bei den Punkten 15 und 22 handelt es sich um DSM-Punkte, 13, 16, 19 und 24 sind weitere Schnittpunkte von DSM-Geometrien mit den initialen DGM-Dreiecksanten. Als erste zusätzliche Geometrie wird die Kante von 1 nach P_2 eingefügt. Bei den weiteren Schnitten kommt es zur Berechnung der redundanten Punkte 14, 20, 21 und 23. Eine Verifizierung der abgebildeten Kanten kann unter Verwendung der Bilder 5 und 6 erfolgen. Als erstes wird der Knoten 14 gelöscht. Dessen inzidente Kanten und Dreiecke führen zu dem Polygon 13, 23, 22, 21, 20 und 15, das trianguliert werden muss. In diesem ist die Punktfolge 22-21-20 kollinear.

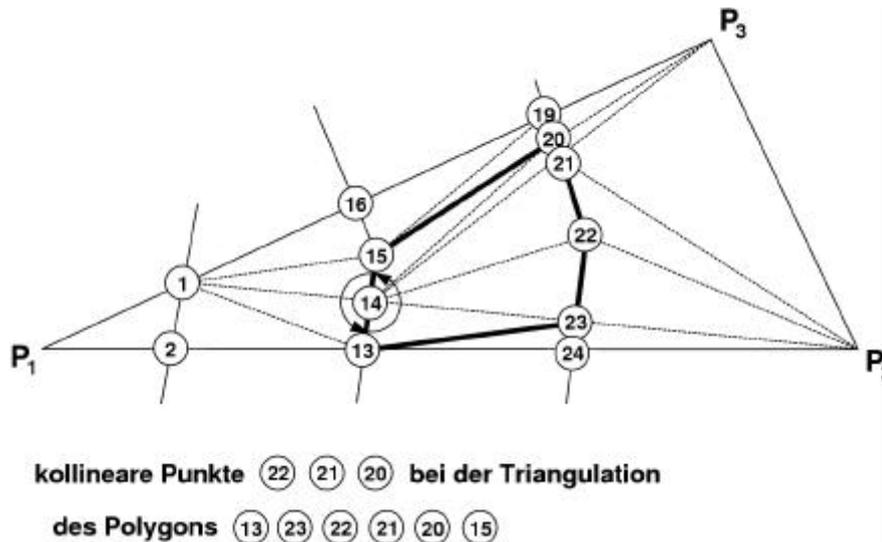


Bild 9 – Kollineare Punktfolge beim Löschen von Punkten im integrierten TIN. (Datei: polygon)

Kollineare Punktfolgen im zu triangulierenden Polygon können z. B. unter Verwendung von Determinanten (s. o.) identifiziert werden. Entsprechend muss das Polygontriangulationsverfahren in der Lage sein, eine gültige lokale Dreiecksvermaschung unter Beachtung der Kollinearitäten zu erzeugen.

Das Verfahren ist damit in der Lage, das minimale integrierte Modell zu berechnen, wobei für jede linienhafte DSM-Geometrie die räumliche Zugriffsdatenstruktur des TIN genau zweimal genutzt wird. Demgegenüber benötigt der einfache RTA nur einen räumlichen Zugriff für jede DSM-Geometrie und bei dem korrigierten Verfahren nach Klötzer (1997) erfolgt ein räumlicher Zugriff für jeden DSM-Punkt (also auch für die Knickpunkte), bevor die Anfangspunkte von DSM-Kanten erneut aufgesucht werden müssen, damit die Integration der DSM-Kanten in das integrierte Modell erfolgen kann.

6 Weitere Aspekte zum Datenvolumen und zur Datenreduktion in integrierten Modellen

Neben der Datenreduktion, die algorithmisch bedingte redundante Daten berücksichtigt, ist auch eine Vereinfachung der Eingangsdaten DGM und DSM bzw. eine Überprüfung der Eingangsdaten hinsichtlich Redundanz unter Einführung von Schwellwerten zweckmäßig. Dies ist auch vor dem Hintergrund sinnvoll, dass durch die Wahl von einheitlichen Schwellwerten eine vertikal und horizontal homogene Genauigkeitssituation erzielt werden kann.

Für die Datenreduktion in DGM-TIN bestehen mit adaptiven Triangulationen praxisreife Verfahren, sie werden u. a. von Lenk & Kruse (2001), Terribilini (1999), Abdelguerfi et al. (1997) und Garland & Heckbert (1995) beschrieben. Terribilini (1999) und Abdelguerfi et al. (1997) berücksichtigen dabei die adaptive Triangulation großer Punkthaufen durch Einteilung in Bearbeitungsgebiete (Kacheln, *tiles*). Die Zusammenführung der Teilergebnisse beruht auf bedingten Triangulationen.

Ein bekanntes Linienvereinfachungsverfahren ist der Douglas-Peucker-Algorithmus (Douglas & Peucker, 1973), weitere werden u. a. von Weibel (1997) aufgeführt. Auf die Problematik der Einhaltung von Nachbarschaftsbeziehungen bei Vereinfachungen im Sinne einer Generalisierung des Datenbestände wird hier nicht eingegangen.

Während die Datenreduktion in Triangulationen, die auf Gitterdaten basieren, auf den wesentlichen Unterschieden der Datenmodelle Gitter bzw. TIN beruhen, liegt die Ursache der Datenreduktion von Linien in Punkten, die redundant erfasst wurden, z. B. durch manuelle Digitalisierung oder automatische Digitalisierung mit entsprechend kleineren Schwellwerten (Toleranzen). Ggf. ist daher in diesen, falls sie nach der Digitalisierung in dieser Hinsicht prozessiert wurden, keine Redundanz mehr vorhanden.

Bei vergleichenden Untersuchungen zeigt sich, dass die Datenreduktion im DGM-TIN aus Gitterdaten den größten Anteil an Redundanz in den Eingangsdaten besitzt. Es ist möglich, eine Datenreduktion um bis zu 90 % und mehr zu erzielen, wenn als Schwellwert die angegebene Gitterpunkthöhenangauigkeit verwendet wird. In den DGM-Beispielen hier handelt es sich um DGM5-Daten der Genauigkeitsstufe 1, deren maximale Abweichung mit 1 m angegeben wird (Washausen, 1992). Als DSM lagen ATKIS-Daten vor, deren Lagegenauigkeit mit 3 m spezifiziert ist (AdV, 1989). Tabelle 1 enthält eine Übersicht über die erzielte Datenreduktion durch Vereinfachung in den Eingangsdaten für ein Testgebiet in der Leineau südlich von Hannover. Als Schwellwerte wurden die Genauigkeitsspezifikation des DGM und die des DSM gewählt. Als Verfahren kamen die adaptive Triangulation nach Garland & Heckbert (1995) in einer eigenen Implementierung und das Linienvereinfachungsverfahren von Douglas & Peucker (1973) in der Implementierung von Hershberger &

Snoeyink (1992) zum Einsatz. Ähnliche Ergebnisse wurden in Abhängigkeit der Morphologie und der Redundanz in manuell digitalisierten Daten für andere Gebiete ermittelt.

Art der Daten	Schwellwert [m]	Knoten abs.	Knoten in % vom vollen Datensatz
Volles trianguliertes Gitter, 12.5 m Gitterweite	0	25921	100
Adaptives TIN	1	1103	4.3
Adaptives TIN	3	265	1.0
Volles DSM	0	1608	100
Vereinfachtes DSM	1	947	58.9
Vereinfachtes DSM	3	620	38.6

Tab. 1: Datenvereinfachung in Eingangsdaten.

Bild 10 soll anhand einer überhöhten perspektiven Darstellung die morphologischen Eigenschaften des Testgebietes mit der Ausdehnung von 2 km x 2 km veranschaulichen. Das Bild 11 zeigt in 11 a.) das ATKIS-DSM25/1, das mit einem Wert von 1 m für den Douglas-Peucker-Algorithmus vereinfacht wurde und mit 11 b.) die adaptive Triangulation, die auf der Grundlage eines 12.5-m-Gitters mit einem Schwellwert von 1 m berechnet wurde. Ein sichtbarer Unterschied gegenüber dem vollständigen Datensatz ist für das DSM nicht erkennbar, daher wird dieser hier nicht dargestellt. Das Bild 12 zeigt entsprechende Abbildungen für verwendete Schwellwerte von 3m. Während bei den beiden ausgedünnten DSM kaum ein Unterschied erkennbar ist, zeigt sich ein solcher deutlich zwischen den adaptiven Triangulationen. Während für den Schwellwert von 1 m das Gewässerbett der Leine noch erkennbar ist, so ist dies bei Verwendung eines Schwellwertes von 3 m nicht mehr der Fall. Dadurch ergeben sich sehr große Dreiecke im DGM-TIN, die nahezu über die ganze Aue gehen.

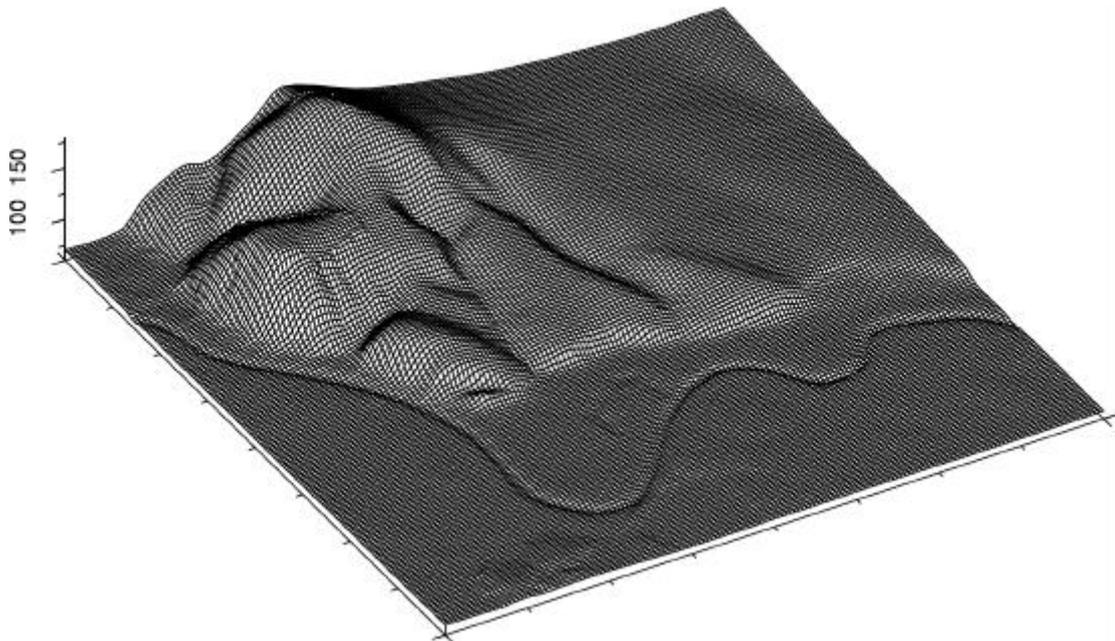
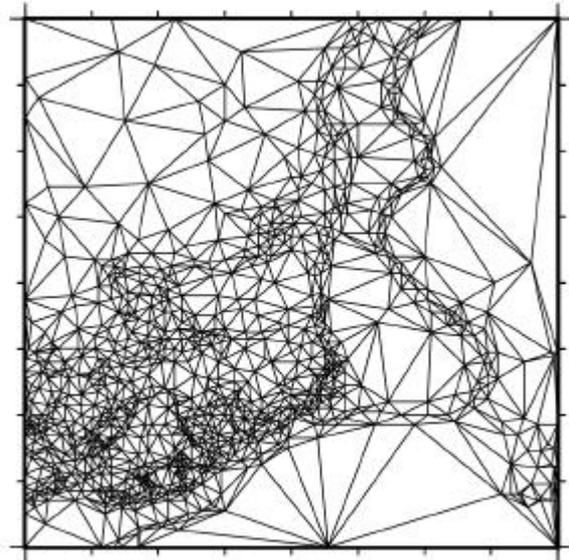


Bild 10 – Perspektive Ansicht des Testgebietes in der Leineaue südlich von Hannover. (Datei: dgmleine)



a.) vereinfachtes DSM (Tol.: 1m)

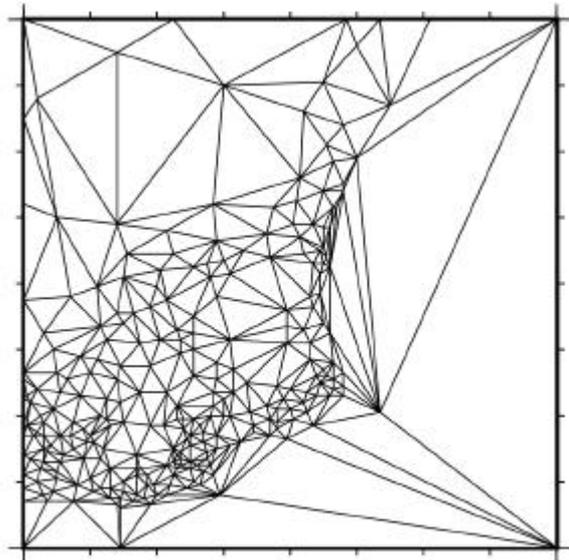


b.) adaptives DGM-TIN (Tol.: 1m)

Bild 11 – Vereinfachtes DSM und adaptives DGM-TIN, Schwellwerte 1 m, im Leinegebiet. (Datei: leindat1)



a.) vereinfachtes DSM (Tol.: 3m)



b.) adaptives DGM-TIN (Tol.: 3m)

Bild 12 – Vereinfachtes DSM und adaptives DGM-TIN, Schwellwerte 3 m, im Leinegebiet. (Datei: leindat3)

7 Ergebnisse von Testrechnungen

Zum Vergleich der Ergebnisse der vorgestellten Algorithmen wurden für das Testgebiet in der Leineau verschiedene integrierte Modelle auf der Grundlage der vorgestellten Daten berechnet. Bild 13 a.) zeigt das graphische Ergebnis der Integration für den RTA und Bild 13 b.) entsprechend für den korrigierten Algorithmus von Klötzer (1997). Bild 14 stellt das redundanzfreie Modell dar. Die Modelle wurden auf der Grundlage der vereinfachten Eingangsdaten in Bild 11 (Schwellwert 1m) berechnet. Der korrigierte Algorithmus von Klötzer (1997) wurde nicht direkt in seiner beschriebenen Form implementiert, sondern auf der Grundlage des RTA, wobei vor dessen Anwendung alle Punkte des DSM inkrementell eingefügt und alle weiteren Steinerpunkte mit dem RTA berechnet wurden. Mit dieser Vorgehensweise ergibt sich das Ergebnisdatenvolumen des korrigierten Ansatzes von Klötzer (1997).

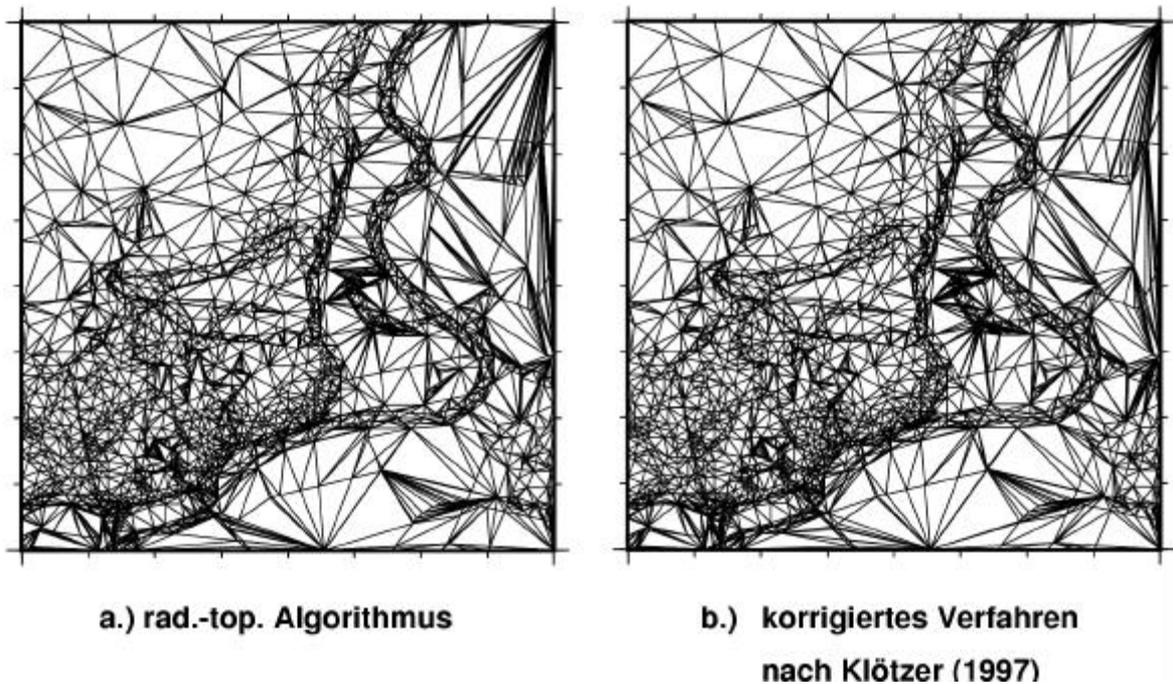


Bild 13 – Morphologisch identische integrierte Modelle mit dem RTA und dem korrigierten Ansatz nach Klötzer (1997) für die Daten in Bild 11. (Datei: rtakloe1)

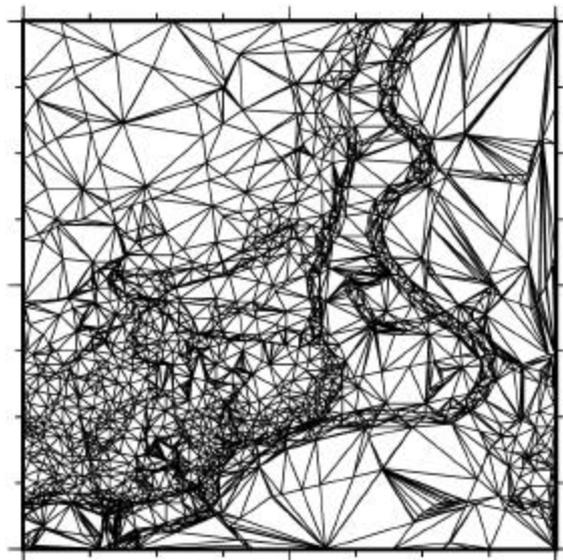


Bild 14 – Minimales integriertes Modell mit morphologisch identischen Eigenschaften gegenüber Bild 13. (Datei: minmod1)

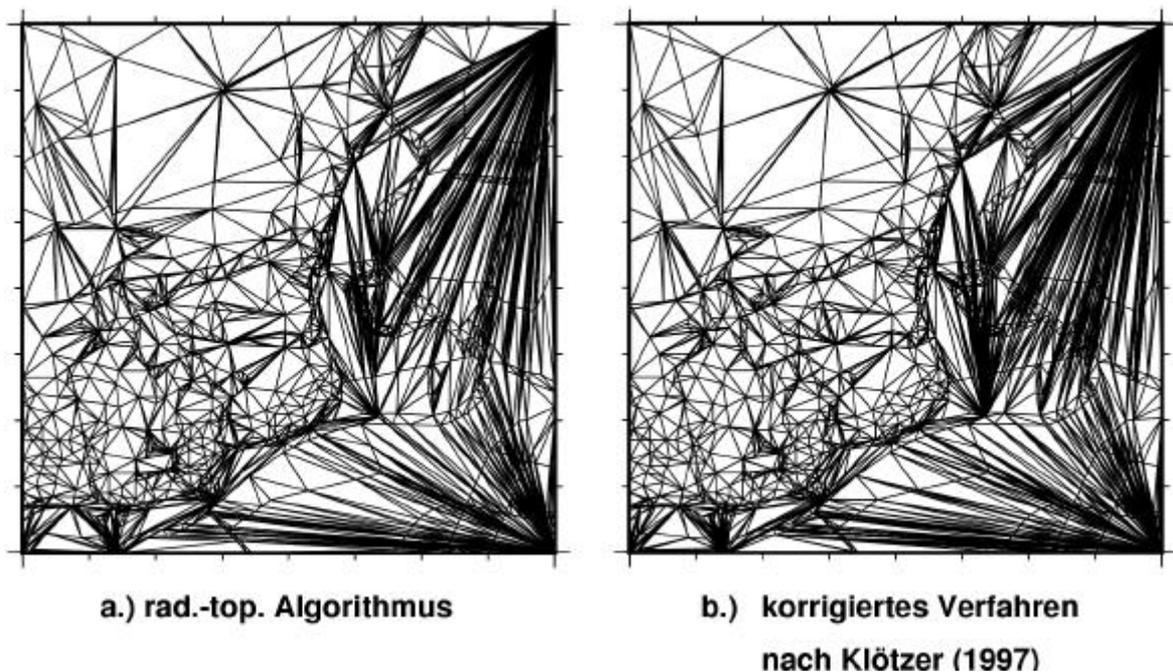


Bild 15 – Morphologisch identische integrierte Modelle mit dem RTA und dem korrigierten Ansatz nach Klötzer (1997) für die Daten in Bild 12. (Datei: rtakloe3)

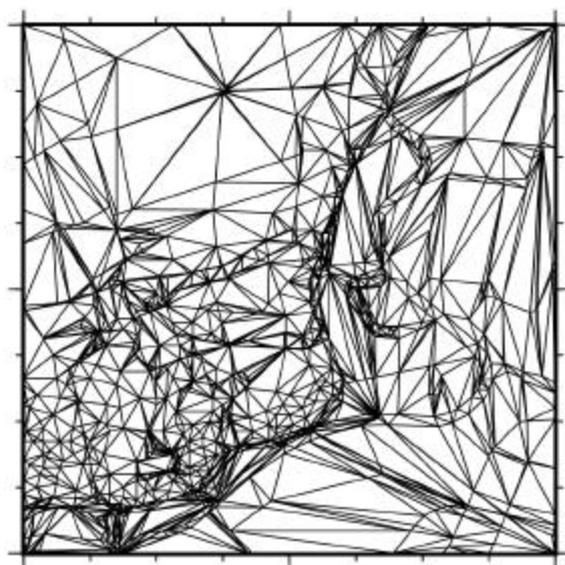


Bild 16 – Minimales integriertes Modell mit morphologisch identischen Eigenschaften gegenüber Bild 15. (Datei: minmod3)

Das höhere Datenvolumen, das durch den Ansatz von Klötzer gegenüber dem RTA entsteht, ist nur teilweise erkennbar. Die beiden Modelle in Bild 13 zeigen im Vergleich zum minimalen Modell in Bild 14 jedoch eine deutlich höhere Knotendichte. Der Unterschied wird in den Ergebnissen der weiterführend vereinfachten Datensätzen noch deutlicher erkennbar, die in den Bildern 15 und 16 für den Schwellwert von 3 m dargestellt sind. Zum besseren Vergleich werden in Tabelle 2 absolute Punktmengen für die verschiedenen Verfahren und die zwei gewählten Stufen der Vereinfachung angegeben.

Es zeigt sich, dass der korrigierte Ansatz von Klötzer (1997) für die Beispiele zu dem größten Datenvolumen führt. Das Maß an Redundanz sowohl für den RTA als auch für den korrigierten Ansatz nach Klötzer (1997) nimmt mit der Größe der Dreiecke im DGM-TIN zu, da in diesem Fall beim Einrechnen lange Kanten gebildet werden, die wiederum Schnittpunktskandidaten während des weiteren Einrechnens von Geometrien sind. Vor allem bei dem korrigierten Ansatz von Klötzer (1997) zeigt sich dieser Effekt. Durch das Einfügen von Punkten in die großen Dreiecke ohne Wiederherstellung des DK entstehen aufgrund der hohen Punktdichte entlang der DSM-Geometrien viele lange schmale Dreiecke. Weitere Beispiele mit höherer Reliefenergie und daraus resultierenden kleineren Dreiecken im DGM-TIN bestätigen diese Beobachtung. In diesem Fall verringert sich die Unterschied zwischen den Ergebnissen des RTA und des korrigierten Ansatzes von Klötzer (1997). Das

redundante Datenvolumen des RTA erreicht mehr als 50 % vom Gesamtvolumen. Berücksichtigt man, dass der vorwiegende Teil der Reliefs nicht aus gebirgigen Gebieten mit entsprechend kleinen Dreiecken im adaptiven TIN besteht, so sollte bei der Erstellung integrierter Modelle das minimale Modell genutzt werden.

Schwellwert [m]	Algorithmus	Knoten abs
1	Minimales Modell	3143
1	RTA	3863
1	Klötzer	3985
3	Minimales Modell	1314
3	RTA	2905
3	Klötzer	3899

Tab. 2: Datenvolumen verschiedener Algorithmen für morphologisch identische integrierte Modelle in zwei Vereinfachungsstufen für das Testgebiet Leine.

Tabelle 3 veranschaulicht den Effekt der Datenausdünnung durch adaptive Triangulationen bzw. den Douglas-Peucker-Algorithmus in den Eingangsdatensätzen gegenüber einem integrierten Modell, das mit einem vollen triangulierten Gitter und dem vollständigen DSM berechnet wurde. Es zeigt sich, dass bei Verwendung der Genauigkeitsspezifikation des DGM5 eine Datenreduktion von mehr als 90 % möglich ist. Hierbei wird der geringe, durch die Vereinfachung entstehende geometrische Fehler des DSM gegenüber der bekannten geometrischen Genauigkeit von 3 m (AdV, 1989) als vernachlässigbar betrachtet.

Art der Daten	Schwellwert [m]	Knoten abs.	Knoten in % vom vollen Modell
Trianguliertes 12.5 m Gitter, volles DSM	0	34166	100
Adaptives TIN, vereinfachtes DSM	1	3143	9.2
Adaptives TIN, vereinfachtes DSM	3	1314	3.8

Tab. 3: Minimale integrierte Modelle in zwei Stufen der Vereinfachung im Vergleich mit einem vollständigen Modell für das Testgebiet Leine.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es wurden verschiedene Wege zur Berechnung von integrierten triangulierten Landschaftsmodellen aufgezeigt sowie deren Ergebnisse verglichen. Es zeigt sich, dass es bedingt durch die verwendeten Algorithmen zu einer hohen Redundanz im integrierten Modell (deutlich mehr als 50 %) kommen kann. Daher wird die Verwendung des redundanzfreien Modells empfohlen. Weiter zeigt sich, dass eine Vereinfachung der Eingangsdaten sinnvoll ist, da hiermit in Abhängigkeit der Morphologie ohne Genauigkeitsverlust gegenüber den Datenspezifikationen eine Datenreduktion um mehr als 90 % und eine gegenseitig abgestimmte Genauigkeitssituation erzielt werden kann.

Verfahrensbedingt handelt es sich bei den beschriebenen Vorgehensweisen um Methoden, die ähnlich wie eine Verschneidung von Geodaten arbeiten. Bisher wurde eine geometrisch-semantische Konsistenz der Daten vorausgesetzt. Ggf. sollte in einer Erweiterung der beschriebenen Ansätze daran gedacht werden, eine Konsistenzüberprüfung der Daten während der Integration vorzunehmen. Denkbar sind z. B. Neigungsschwellwerte für Straßen, damit diese im Modell überhaupt befahrbar sind.

Dank

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden mit Mitteln aus dem Stipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, gefördert. Bei den verwendeten topographischen Grundlagen handelt es sich um ATKIS-DGM5 und DSM25/1 Daten der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

Literatur

Abdelguerfi, M., Cooper, E., Wynne, C. & Shaw, K. (1997): An Extended Vector Product Format (EVPF) suitable for the representation of three-dimensional elevation in terrain databases. *Int. J. Geographical Information Science*, 11(7):649-676.

- AdV (Hrsg.) (1989): ATKIS-Gesamtdokumentation. Hannover, Bonn.
- Aumann, G. (1994): Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien. Dissertation, Technische Universität München, DGK, Reihe C, Nr. 411, München.
- de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M. & Schwarzkopf, O. (1997): Computational Geometry - Algorithms and Applications. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg u.a.
- Bern, M. & Eppstein, D. (1995): Mesh Generation and Optimal Triangulation. In: Du & Hwang (1995), 47-123.
- Boissonnat, J. & Teillaud, M. (1986): A hierarchical representation of objects: The Delaunay tree. In: Proc. 2nd Annu. ACM Sympos. Comput. Geom., 260-268.
- Booch, G., Rumbaugh, J. & Jacobsen, I. (1998): Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts u.a.
- Breunig, M. (2000): On the way to Component-Based 3D/4D Geoinformation Systems. Lecture Notes in Earth Sciences 94, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York u.a.
- Breunig, M. (1996): Integration of Spatial Information for Geo-Information Systems. Lecture Notes in Earth Sciences 61, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York u.a.
- Buziek, G. (1994): Analyse und Optimierung hydrographischer Punktfelder als Grundlage der Modellierung des Unterwasserreliefs. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 197. Dissertation, Universität Hannover.
- Chen, J., Sun, M. & Zhou, Q., 2000: Expression and Visualization of Cloverleaf Junction in a 3-Dimensional City Model. *GeoInformatica* 4: 375-386.
- Devijver, P. A. & Dekesel, M. (1982): Insert and delete algorithms for maintaining dynamic Delaunay triangulations. *Pattern Recognition Letters* 1(2):73-77.
- Devillers, O. (1997): Improved Incremental Randomized Delaunay Triangulation. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Sophia Antipolis, Rapport de recherche no 3298.
- Devillers, O., Pion, S. and Teillaud, M. (2001): Walking in a Triangulation. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Sophia Antipolis, Rapport de recherche no 4120.
- tom Dieck, T. (2000): Topologie. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Douglas, D. H. & Peucker, T. K. (1973): Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a line or its caricature. *The Canadian Cartographer* 10(2):112-122.
- Du, D. Z. & Hwang, F. K. (Eds.) (1995): Computing in Euclidean Geometry (2nd Edition). Lecture Notes Series on Computing, Vol. 4, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong.
- Egenhofer, M. J., Frank, A. U. & Jackson, J. P., 1989: A Topological Data Model for Spatial Databases. In: Proceedings First Symposium SSD'89, Santa Barbara, California, USA, 271-286.
- Garland, M. & Heckbert, P. S. (1995): Fast Polygonal Approximation of Terrains and Height Fields. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Technical Report CMU-CS-95-181.
- Guibas, L., Knuth, D. E. & Sharir, M. (1992): Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams. *Algorithmica* 7(4):381-413.
- Hake, G. & Grünreich, D. (1994): Kartographie. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Harbeck, R. (2000): Das topographische Geoinformationssystem ATKIS - Stand und Entwicklung aus Sicht der AdV. DVW-Schriftenreihe 39/2000:9-21, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Hershberger, J. & Snoeyink, J. (1992): Speeding up the Douglas-Peucker Line-Simplification Algorithm. Technischer Bericht UBC CS TR-92-07, Department of Computer Science, University of British Columbia, Vancouver.
- Jänich, K. (1984): Topologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg u.a.
- Klötzer, F. (1997): Integration von triangulierten digitalen Geländemodellen und Landkarten. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Informatik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- Klötzer, F. & Plümer L. (1997): Homogene Verknüpfung des digitalen Geländemodells mit ATKIS-DLM-Daten. Vortrag bei der 34. Sitzung der Arbeitsgruppe "Automation in der Kartographie (AGA)" am 7./8. Oktober 1997 an der TU Dresden.
- Kraus, K., 2000: Photogrammetrie, Bd. 3, Topographische Informationssysteme. Dümmler Verlag, Köln.
- van Kreveld, M., Nievergelt, J., Roos, Th. & Widmayer, P. (Eds.) (1997): Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems. Lecture Notes in Computer Science 1340, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg u.a.
- Lenk, U. (2001a): Quadratgittertriangulationen und Optimierungsstrategien zur Lösung der neutralen Fälle in Delaunay-Triangulationen. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie* 20: 59-86.
- Lenk, U. (2001b): – 2.5D GIS und Geobasisdaten – Integration von Höheninformation und Digitalen Situationsmodellen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 244 und Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 546. Dissertation, Universität Hannover, im Druck.
- Lenk, U. & Kruse, I. (2001): Multibeam data processing: Data Reduction, Adaptive Triangular Meshing and Comments Resulting from Brouns et al. (THJ No. 101, 2001). *The Hydrographic Journal* 102:9-14.

- O'Rourke, J. (1998): Computational Geometry in C. 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Pilouk, M. (1996): Integrated Modelling for 3D GIS. PhD Thesis, ITC Publication Series No. 40, Enschede, The Netherlands.
- Pilouk, M. & Kufoniyyi, O. (1994): 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, 670-677.
- Pilouk, M. & Tempfli, K. (1994a): Integrating DTM and GIS using a relational data structure. In: Proceedings GIS'94, Vol. 1, Vancouver, Canada, 163-169.
- Pilouk, M. & Tempfli, K. (1994b): An object oriented approach to the unified data structure of DTM and GIS. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXX, Part 4, Athens, Georgia, USA, 672-679.
- Pilouk, M. & Tempfli, K. (1993): An integrated DTM-GIS data structure: a relational approach. In: Proceedings 11th International Symposium on Computer Assisted Cartography (AUTOCARTO 11), Minneapolis, Minnesota, USA, 278-287.
- Plümer, L. & Gröger, G. (1997): Achieving Integrity in Geographic Information Systems - Maps and Nested Maps. *GeoInformatica* 1(4): 345-367.
- Schneider, B. (1998): Geomorphologisch plausible Rekonstruktion der digitalen Repräsentation von Geländeoberflächen aus Höhenliniendaten. *Geoprocessing Series* Vol. 35. Dissertation, Universität Zürich.
- Terribilini, A. (1999): Maps in transition: development of interactive vector-based topographic 3D-maps. In: Proceedings of the 11th General Assembly of International Cartographic Association and the 11th International Cartographic Congress, Vol. 1, 993-1001, Ottawa, Canada.
- Washausen, M. (1992): Digitale Geländemodelle in Niedersachsen - Qualität, Aufbau, Nutzung -. *Nachrichten der Niedersächs. Vermessungs- und Katasterverwaltung* 42(3): 177-203.
- Weibel, R. (1997): Generalization of Spatial Data: Principles and Selected Algorithms. In: van Kreveld et al. (1997), 99-152.
- Worboys, M. F., 1995: GIS - A Computing Perspective. Taylor & Francis, London, Philadelphia.