Die Automatisierung grafischer Detailreduktion und der Beitrag der Fuzzy-Logik

A. Christidis

Mannesmann VDO AG

Abstract. Zur Vermeidung von Rechenzeit-Engpässen werden in Sichtsystemen grafische Objekte in mehreren Detaillierungsstufen (Levels of Detail, LODs) eingesetzt. Für entfernte und periphere Darstellungen werden dann Modelle mit reduziertem Detailgehalt verwendet; deren manuelle Modellierung erfordert einen hohen Arbeitsaufwand, vor allem wenn es sich um Objekte handelt, die häufigem Wechsel unterworfen sind (z.B. Automodelle). Naheliegend sind daher die seit über einem Jahrzehnt laufenden Bestrebungen, den LOD-Generierungsprozeß zu automatisieren. Nach anfänglichen Ansätzen auf der Basis des Subsampling konzentrieren sich nun die interessantesten von ihnen auf die Ermittlung von Eckpunkten eines grafischen Objektes, die jeweils mit einem Nachbar-Eckpunkt verschmelzen und somit die dazwischenliegende Objekt-Kante und die angrenzenden zwei Polygone kollabieren lassen können. Als wichtigstes Kriterium für eine solche Verschmelzung gilt bislang die Länge der Kante zwischen den zu eliminierenden Polygonen.

Die hier vorgestellte Methode geht von wesentlich mehr Kriterien aus und soll die spätere Berücksichtigung weiterer offenlassen; da die LOD-Generierung nicht zur Laufzeit erfolgt, ist die damit verbundene Steigerung der Rechenzeit nicht von Belang. Schwierig gestaltet sich dagegen bei wachsendem Kriterienkatalog die Priorisierung bzw. die Gewichtung der einzelnen Kriterien. Hier erweist sich die Fuzzy-Logik als probates Hilfsmittel, das eine adäquate Behandlung des Problems ermöglicht.

1 Einleitung

Die rasante Verbreitung der Computer-Grafik in den letzten drei Dekaden brachte eine ständig wachsende Anzahl neuer Anwendungsgebiete hervor. Die dabei ersonnenen Algorithmen und Techniken wurden immer aufwendiger, und ihr Rechenzeit-Bedarf wuchs schneller als ihre konzeptionelle Optimierung und die Leistungssteigerung moderner Rechner zuließen. Für die inzwischen etablierten Sehgewohnheiten gelten deshalb Rechenzeit-Engpässe als typische Begleiterscheinungen von Grafik-Anwendungen.

Lange vor der Entstehung der heutigen, in Rechenintensität praktisch unbegrenzt steigerungsfähigen grafischen Systeme stießen bereits die frühen rechnergestützten technischen Zeichungen (später CAD) an Grenzen einer besonderen Art: Bei der Wiedergabe größerer Zeichnungen wurde, je nach eingestelltem Maßstab, nicht unerhebliche Rechenzeit für Operationen im Sub-Pixel-Bereich aufgewendet - also für Objektteile [1], die aufgrund der klein

[1] Die anderweitig (z.B. [2]) konsequent eingehaltene begriffliche Trennung zwischen ‚Modellen' als kinetisch und logisch zusammenhängenden und ‚Objekten' als prinzipiell konvexen grafischen Einheiten entfällt im Rahmen dieses Textes, weil die so definierten Objekte nicht Gegenstand dieser Abhandlung sind. Die beiden Wörter werden im hiesigen Kontext als Synonyme verwendet für bildhaft darstellbare Konstruktionen, die als geometrische Beschreibungen vorliegen.

gewählten Darstellung sämtlich auf einen Bildpunkt fielen und somit letztlich nicht darstellbar waren; zudem ergab sich an solchen Stellen ein verstärkter Verschleiß der Ausgabegeräte (Display, Drucker). Zur Abhilfe wurden Teile einer Zeichnung, deren Auflösung über jene der Ausgabemedien hinausging, vereinfacht oder ausgelassen, etwa als Adaption der Auslassung von Schnittstellen mehrerer Geraden in konventionellen Zeichnungen.

Die Entwicklung erster Flugsimulatoren ab Anfang der 70er Jahre stellte die Computer-Grafik vor eine neue Dimension dieses Problems: Aspekte einer verbesserten Orientierung und Immersion des Betrachters legten eine Datenbasengenerierung und -verwaltung nahe, die ihrerseits nahezu unabhängig von der Position des Augenpunktes ein gleichmäßig besetztes Bild gewährleisten würden [1]. Vor dem Hintergrund der geforderten Echtzeitfähigkeit verschoben sich damit die Güte-Kriterien gegenüber den früheren CAD-Anwendungen merklich: Aus dem Anspruch auf eine korrekte Bildwiedergabe wurde jener auf Darstellung wiedererkennbarer Szenen. Der Detailreichtum trat zunehmend als Regelgröße in den Hintergrund; die Generierung und Darbietung grafischer Modelle in mehreren Detaillierungsstufen (Levels of Detail, LODs) nützte nun eher der Steuerung der Bildfülle, während der Sub-Pixel-Bereich faktisch nicht mehr tangiert wurde.

2 Wege zur automatischen Detailreduktion

Die Besonderheiten der Datenbasengenerierung für Simulatoren forderten und förderten die Automatisierung auf diesem Gebiet, vor allem weil die Generierung von Gelände-Modellen sich meist auf satellitenübermittelte Daten der DMA (Defense Mapping Agency) stützte [3]. Die Fülle dieser Daten war manuell kaum zu bewältigen, ebenso wie die Generierung vereinfachter Modell-Versionen für entfernte Darstellungen (LODs); letztere stellte zudem eine verhältnismäßig gutartige Automatisierungsaufgabe dar, denn die betroffenen Höhenprofile waren wenigstens in Höhenrichtung konvex. So entstanden etwa ab Mitte der 80er Jahre recht effiziente Methoden erst zur Offline-, später auch zur Online-Generierung meist von Gelände-LODs (z.B. [4, 5, 6, 7, 8]). Gleichzeitig wurde beim Einsatz der generierten LODs der Aspekt der Sichtbarkeit durch jenen der Auffälligkeit abgelöst.

Neue Impulse und Schwerpunkte erhielt die einschlägige Forschung in den 90er Jahren einerseits durch die verstärkte Einführung verteilter interaktiver Simulationssysteme (Distributed Interactive Simulation, DIS), andererseits durch die Vernetzung grafischer Systeme im Rahmen von virtuellen Welten und Internet- Anwendungen [9, 10]. Wesentliche Aspekte waren dabei die Verbindung heterogener Rechner mit z.T. erheblichen Leistungsunterschieden, die Übertragung aufwendiger Grafiken in einer Codierung, die einen sukzessiven Bildaufbau empfängerseitig erlaubt und die parallele Existenz mehrerer Augenpunkte (Stereoskopie, Copilot, Gegenverkehr) mit jeweils eigener LOD-Verwaltung innerhalb derselben Szene. Die LOD-Verwaltung (und im Vorgriff darauf auch die LOD-Generierung) erhielt, neben den unterschiedlich positionierten Augenpunkten, neue Parameter wie die Leistungsfähigkeit des jeweils beteiligten Rechners, die Übertragungsgeschwindigkeit der Verbindung oder Kenngrößen der Übertragungsfolge (bei sukzessive übertragenen Objekten). Durch die Kommunikationskomponente in den neuen Systemen gewannen außerdem AOI- Ansätze (Area Of Interest) zur LOD-Verwaltung an Bedeutung, weil nunmehr angenommen werden mußte, daß das Gegenüber (Partner, Gegner) und seine Umgebung die mit Abstand größte Aufmerksamkeit auf sich ziehen würden, unabhängig etwa von der Entfernung oder von visuellen Kriterien wie Form, Farbe etc.. In den daraus hervorgegangenen Vereinfachungsalgorithmen wurden immer häufiger allgemein strukturierte grafische Objekte behandelt, was im Ver-

gleich zu Verfahren für die ausschließliche Gelände-Behandlung der Fachwelt immer mehr Aufmerksamkeit abrang.

Auch wenn die heute verfügbaren Verfahren zur automatischen LOD-Generierung meist nicht solche Ergebnisse liefern, die ohne Nachbearbeitung durch den Menschen verwendet werden könnten, sind sie durchaus in der Lage, die Vorzüge ihres Einsatzes deutlich zu machen, nämlich Flexibilität bei Änderung der grafischen Modelle (z.B.: neue Automodelle in einer Straßenszene, die auch neue LODs brauchen), bei Modifizierung der Hardware (Verschiebung der Kriterien zur Einsparung von Rechenzeit), ja sogar bei Wechsel zu Zielgruppen (verschiedene Nutzer wie Piloten, Fahrer oder Designer mit unterschiedlichen Sehgewohnheiten und Interessen).

Die gegenwärtig am meisten diskutierten und erfolgversprechenden Ansätze zur automatischen LOD-Generierung (z.B. [11, 12, 13]) beziehen sich auf polygonal definierte Objekte, berücksichtigen Objekt-Konkavitäten, arbeiten - anders als vor einigen Jahren [14] - unabhängig von der Reihenfolge der Speicherung und bilden LODs aus bereits vorhandenen Eckpunkten des jeweiligen Original-Objektes. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen [15], nämlich in Verfahren,

- die das Original-Objekt mit einem räumlichen Gitter durchsetzen und in jeder Volumeneinheit (wählbarer Größe) maximal einen Eckpunkt zulassen (Vertex Clustering);
- solche, die iterativ Objekt-Eckpunkte entfernen und die dadurch entstehenden Löcher mit einer reduzierten Anzahl von Dreiecken schließen (Vertex Decimation);
  und schließlich
- jene, die, ebenfalls iterativ, Objekt-Eckpunkte jeweils mit einem ihrer Nachbarn entlang ihrer gemeinsamen Kante verschmelzen lassen (Edge Contraction, oft auch Edge Collapsing).

Durch die Wahl der Verschmelzungskriterien und die Festlegung der Abbruchbedingungen bieten die Verfahren der letzten Gruppe die vergleichsweise effektiveren Mechanismen zur Kontrolle über die Wirkungsweise und das Ergebnis der Detailreduktion; sie lassen sich zudem am ehesten auf offene Gitternetzmodelle mit Rändern (non-manifold) anwenden. Deshalb sind in dieser Gruppe die elaborierten Algorithmen mit den eher nachvollziehbaren Ergebnissen zu finden. Aufgrund ihrer Komplexität sind sie jedoch oft nicht echtzeitfähig, sondern dienen vielmehr zur Off-line-Generierung vereinfachter Objekt-Versionen oder zur Bestimmung von Vereinfachungssequenzen (Selective Refinement). Dieser Gruppe ist auch die nachfolgend beschriebene Methode zuzurechnen.

3 Grundlegende Betrachtungen und Zielsetzungen

Wie schon erwähnt wurde, handelt es sich bei dem hier erörterten Verfahren um eine Edge-Contraction-Methode. In groben Zügen besteht also die Aufgabe darin, unter den Eckpunkten (auch Knoten genannt) eines grafischen Objektes nacheinander diejenigen zu ermitteln, die ihre Rolle (im Sinne der Topologie) an einen Nachbarn abtreten und selbst eliminiert werden können bei minimaler Veränderung des visuellen Eindrucks des Gesamtobjektes (Bild 1).

Die Generierungsmethode wurde bereits im Entwurfstadium maßgeblich durch eine Reihe grundlegender Entscheidungen beeinflußt, die im folgenden kurz beleuchtet werden. Sie betreffen die drei Kernfragen jedes technischen Problems, nämlich:

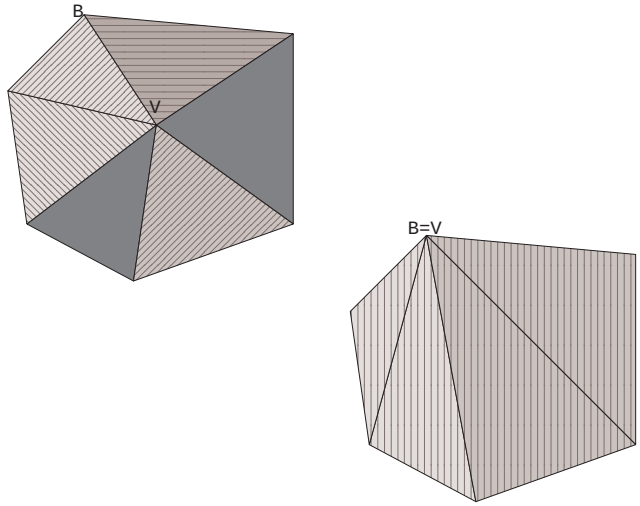

Bild 1: Iteration bei der LOD-Generierung nach einer Edge-Contraction-Methode: Grafisches Objekt vor und nach Kontraktion der Kante VB und Löschung des Eckpunktes V.

(i) Welche Motivation steht hinter dieser Entwicklung - bzw.: Was kennzeichnet Anwendungen, denen die hier erörterte Methode zugedacht ist?

(ii) Welches Ziel soll erreicht werden - bzw.: Woran ist unter mehreren Vereinfachungsresultaten die effizientere Lösung des Problems zu erkennen?

(iii) Welches Vorgehen führt zum unter (i) erklärten Ziel - bzw.: Nach welchen Kriterien erkennt man Punkte, die miteinander verschmelzen können?

Im Gegensatz zur letzteren werden die ersten beiden Fragen häufig ungenügend beachtet.

Eine Untersuchung der Literatur im Sinne der Frage (i) ergibt, daß der weitaus größte Teil der bis dato entwickelten Verfahren entweder der Terrain-Modellierung für Flugsimulatoren oder der „Einzelbildbetrachtung“ (Viewer u.ä.) im Rahmen virtueller Welten galt. So unterschiedlich die beiden Applikationstypen sein mögen, so ähnlich wirken sich ihre Anforderungen in diesem Punkt aus: Wie in [16] treffend festgestelt wird, geht es meist um die Reduktion der Polygonzahlen von Modellen von 10^6 auf 10^4, was zwar beachtlich ist, aber für eine Reihe von Projekten sich dennoch außerhalb der Spannweite bewegt. Betroffen davon sind neben Computerspielen auch die Flugsimulation im Lande- und Start-Bereich und vor allem die High-End-Fahrsimulation, bei der mit einer Vielfalt weniger detaillierter Modelle Bildfülle und Immersion erreicht werden sollen, während sich die simulierte (meist kultivierte) Umgebung viel häufiger als in der Flugsimulation wandelt und/oder neue (neu zu modellierende) Gebiete erschlossen werden. An diese Lücke wendet sich das nachstehend besprochene Verfahren, mit dem Anspruch, Modelle mit (im Regelfall) wenigen Hundert Eckpunkten praktisch auf Null zu reduzieren, in einer Schrittfolge, die an fast jeder beliebigen Stelle zur Definition neuer LODs angehalten werden kann. Für den zu implementierenden

Algorithmus bedeutet dies wesentlich strengere Maßstäbe bei der Überprüfung der einzelnen Vereinfachungsschritte und -entscheidungen.

Bezüglich Frage (ii) gilt in der aktuellen Fachdiskussion meist der Umfang der Einsparung an Flächen (und nicht etwa an Eckpunkten, Texturen, Speicherplatz, Rechenzeit o.a.) als Kriterium für den Vergleich zweier Ansätze: Verfahren werden als besser angesehen, wenn sie für eine gegebene Auflösung (d.h.: Entfernung zum Augenpunkt) mit weniger Dreiecken eine gleich anmutende (d.h. auf die gewählte Distanz nicht oder kaum unterscheidbare) Version des Originals erzeugen. Diese Betrachtungsweise ist für den gegewärtigen Stand der Diskussion nachvollziehbar, sie läßt aber außer acht, daß je nach eingesetzter Hardware (z.B. Art und Anzahl spezialisierter ICs) und Wahl der Darstellung (im Extremfall: Drahtmodelle) der Rechenaufwand zur Bilderzeugung durchaus auch von anderen Größen abhängt. So ist damit zu rechnen, daß die in Zukunft anstehende Vereinfachung texturierter Objekte zwar nicht die zugrundeliegenden Philosophien erschüttern, wohl aber neue Kriterien einführen und das Gewicht vorhandener verschieben. Im Vorgriff auf antizipierte Entwicklungen wurde hier als universelle Regelgröße der Begriff ‚Darstellungselement' (DE) eingeführt; zu verstehen ist darunter eine geeignete Zusammenstellung von Operationen, die zur Darstellung von Grafik benötigt werden (für Transformation, Texturierung, Beleuchtung, Rasterisierung, Pixelsetzen etc.) und von der tatsächlich eingesetzten Hardware je Zeiteinheit maximal geleistet werden können. Diese Definition dient lediglich dazu, Güte- und Abbruchkriterien in Abhängigkeit von der benutzten Hardware und der zu bewältigenden Aufgabe zu formulieren und schafft dadurch eine Flexibilität, die inzwischen auch von anderen Autoren (z.B. [17]) aufgegriffen wurde.

Frage (iii) betrifft den eigentlichen Algorithmus-Entwurf und steht naturgemäß bei allen Entwürfen im Mittelpunkt des Interesses; denn hierin besteht der qualitative Unterschied zwischen den konkurrierenden Denkweisen. Während die älteren dieser Verfahren (s.o.) mit dem einfachen Höhen(differenz)vergleich in ihren Vermessungsdaten auskamen, sind die heutigen wesentlich abstrakter angesetzten Methoden auf deutlich elaboriertere Entscheidungskonzepte angewiesen. So definiert H.Hoppe [9] eine Energie-Funktion zur Gewichtung der Vereinfachungskriterien, während S.Melax [13] u.a. aus Gründen der Echtzeitfähigkeit auf gute Erfahrungen bei Verschmelzungen lediglich von Nachbarn mit dem kürzesten euklidischen Abstand verweist. Als Maß zur Quantifizierung der Abweichung zwischen Detaillierungsstufen wird häufig der Hausdorff-Abstand [18] verwendet, der (verbal wiedergegeben) die kürzeste Messung für die längste Entfernung zwischen zwei beliebigen Kurven oder Hüllen liefert (Bild 2).

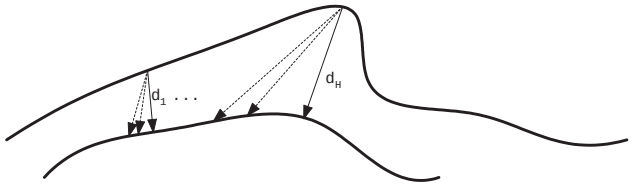

Bild 2: Einseitiger Hausdorff-Abstand (d_H) einer Kurve von einer anderen.

Im Rahmen des hier besprochenen Projektes sind auch bezüglich dieser Frage eigene Wege beschlossen worden, die nachfolgend erläutert werden.

4 Die LOD-Generierungsstrategie

Für die LOD-Generierungsstrategie war zunächst die Entscheidung wichtig, einen Vereinfachungsalgorithmus nach geometrischen Gesichtspunkten zu formulieren: Interaktive Einflußnahmen oder sonstige taktische Vorgaben sollten erst bei Verknüpfung mit einem konkreten Einsatzszenario Einzug halten, zumal in Zusammenhang mit AOI-Anwendungen (Interaktionspartner, Aktionsmittelpunkt, deren Auffälligkeit nicht nur geometrischen Kriterien gehorcht). Die so entstandenen LODs sollten gewissermaßen den Eindruck eines entfernten grafischen Objektes auf den unvorbereiteten Betrachter widerspiegeln, wobei bewußt sein sollte, daß dies strenggenommen auf rein geometrischem Wege kaum gelingt (s.a. [17]). Denn sicher (und nicht „natürlich“) ist davon auszugehen, daß sich der zeitgenössische Betrachter nicht etwa auf die überdimensionierten Räder eines Traktors, sondern auf dessen Führerhaus konzentriert, ebenso wie beim Anblick einer bewegten Abrißbirne nicht mehr das Führerhaus, sondern der geometrisch weit unbedeutendere Massenpunkt am Ende des schwingenden Seils interessiert.

Eine weitere Entscheidung grundsätzlicher Art bestand darin, den euklidischen bzw. den Hausdorff-Abstand nicht als dominierende Kriterien zuzulassen. Im Hintergrund steht die Überzeugung, daß letzlich nicht eindimensionale Ausdehnungen über die Auffälligkeit der damit assoziierten Objekte oder Objektteile entscheiden. Krasses Beispiel dafür wäre ein Segeldampfer mit eingezogenen Segeln: Die Masten sind trotz ihrer Länge für den entfernten Betrachter am schwierigsten erkennbar. Die Reihe der Beispiele läßt sich unschwer erweitern um Stadtkulissen mit Strom- und Sendemasten, Gebäude-Antennen, Fahnenmasten oder -stangen u.s.f.. Man gelangt vielmehr zu dem Schluß, daß es auf die flächigen retinalen Belegungen der einzelnen Modelle und ihrer Teile im Verhältnis zueinander ankommt.

Die hier vertretene Sichtweise betrachtet jeden Eckpunkt eines grafischen Objektes zunächst isoliert als die Spitze eines pyramidenähnlichen Objektteiles (der im folgenden als Pyramidal bezeichnet wird), dessen Existenz mit der Existenz seiner Spitze (d.h. mit dem betrachteten Eckpunkt) verbunden ist: Verschmelzung (merging) des Eckpunktes mit einem seiner Nachbarn durch Kontraktion der dazwischenliegenden Kante hat visuell die gleiche Wirkung wie Abtrennung („Abschlagen“) des Pyramidals; ein sehr einfaches Beispiel hierfür wäre die Vereinfachung eines Gebäudes durch „Einebnung“ seiner flachen Dachkuppel, d.h. durch die Verschmelzung der Kuppelspitze mit einem der Eckpunkte an der Basis. Ein Maß für die Eignung dieser Maßnahme (gegenüber dem Abschlagen anderer Ecken des Objektes) wäre die „Größe“ der Kuppel.

Eine nähere Betrachtung ergibt, daß i.a. weder die Definition der Größe eines solchen Pyramidals, noch die Automatisierung der Wahl eines Verschmelzungspartners triviale Aufgaben sind, wie Bild 3 demonstriert: Die Eckpunkte an der Basis sind i.d.R. nicht komplanar; ihre Zusammenfassung zu einem Teilobjekt würde meist in das Rest-Objekt hineinragen, und deshalb könnten Verschmelzungskriterien von Merkmalen beeinflußt werden, die ständig verdeckt sind (vor der Detailreduktion ebenso wie danach).

Die Tendenz zur Bildung von Konkavitäten ist offensichtlich umso geringer, je näher der gewählte Verschmelzungspartner beim betrachteten Eckpunkt liegt; dabei ist mit „Nähe“ nicht der euklidische Abstand gemeint (in Bild 3 vetreten durch Punkt B). Für kleinste Veränderung stehen vielmehr solche Verschmelzungskandidaten, die Ebenen aufspannen, zu denen vom betrachteten Punkt aus das jeweils kürzeste Lot gefällt wird (Punkt A in Bild 3), sofern sich der Lotfuß innerhalb des Polygons befindet, das diese Nachbarn definieren.

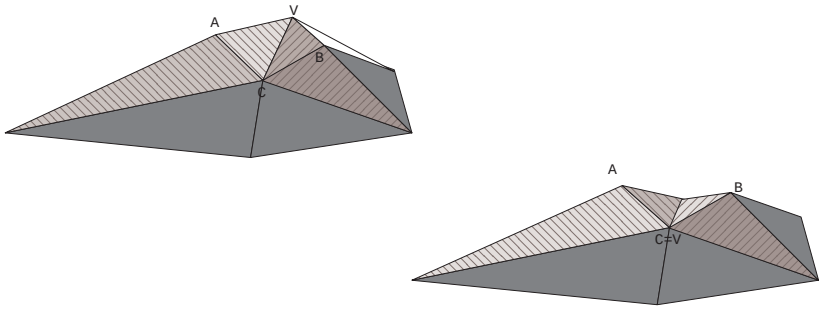

Bild 3: Die Spitze V des konvexen Pyramidals hat zum Punkt B die kürzeste Kante; C spannt mit anderen Nachbarn von V die Ebene auf, von der V den kürzesten Abstand hat; A gehört zum nächsten Polygon der Nachbarn von V, in dem der Fuß des Lotes von V liegt. Die Verschmelzung von V mit C erzeugt Konkavitäten (die Umkehrung gilt hier nicht).

5 Der Reduktionsalgorithmus

Eine intensivere Auseinadersetzung mit dieser Problematik führte schließlich zu folgendem Ansatz:

Zu jedem Eckpunkt V des zu vereinfachenden Objektes werden alle Nachbarn ermittelt, die über Kanten mit ihm verbunden sind (Star Polygon in [5]); zu jeder der Ebenen, die diese Nachbarn definieren, wird von V aus das Lot gefällt und dessen Länge und Fuß ermittelt. Befindet sich der Fuß außerhalb des Polygons, das die zu dieser Ebene gehörigen Nachbarn definieren, wird diese Ebene nicht weiter berücksichtigt. Von den übrigen Ebenen wird die mit dem kürzesten Lot ausgesucht. Die dazugehörigen Eckpunkte sind die einzigen, die als Verschmelzungskandidaten für V in Frage kommen.

Für die Fortführung der Vereinfachungsaufgabe innerhalb der so ermittelten engeren Auswahl potentieller Verschmelzungskandidaten genügen geometrische Kriterien nicht allein. Vielmehr sollen nun (zumal bei gleichem Abstand mehrerer Kandidaten von dem zu entfernenden Punkt) auch Farbgrenzen berücksichtigt werden: Kantenkontraktion soll möglichst entlang Farbgrenzen stattfinden, damit nicht unnötig Farben gemittelt werden oder ganz verschwinden müssen (Bild 4).

Die Vielfalt der Kriterien, die in die Verschmelzungsentscheidungen eingehen, legte es nahe, (in Anlehnung an [5]) den Begriff der Signifikanz eines Punktes zu adoptieren. Subsummiert wird darunter eine Matrix mit denjenigen Eigenschaften eines Punktes, welche den Entscheidungsprozeß beeinflussen. In der ersten Implementierung enthielt die Signifikanz eines jeden Punktes folgende Daten:

- Anzahl der Nachbarn, die über Kanten mit diesem Punkt verbunden sind
- Indizes der potentiellen Verschmelzungspartner (p.V., s.o.) jeweils mit Kennung (Flag), ob die gemeinsame Kante eine Farbgrenze markiert
- Fläche des Polygons, das von den p.V. aufgespannt wird

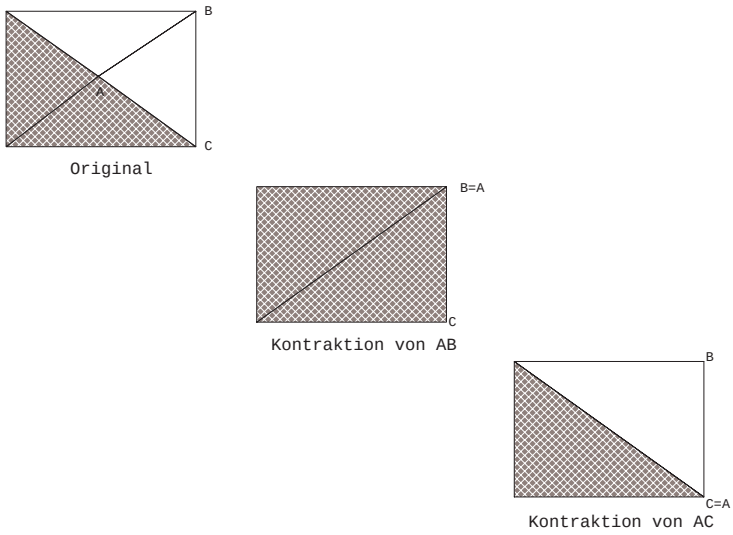

Bild 4: Kontraktion von Objektkanten entlang der Farbgrenze (AC) erhält die Farben des Originals, bei Kontraktion quer dazu (AB) können Farben verlorengehen.

- Lotlänge zur Ebene der p.V. mit Kennung (Flag), ob der Lotfuß innerhalb des Polygons der p.V. liegt
- Kennungen zur Sperrrung, Aktualisierung u.ä. (s.u.)

Zu dieser Signifikanz-Definition gehört eine (weiter unten erklärte) Metrik, die es erlaubt, die Signifikanzen von Eckpunkten zu vergleichen und zu ordnen. Dadurch ist eine maximale Flexibilität erlangt, sowohl was die Auswahl der Kriterien als auch was deren Gewichtung und Verknüpfung anbelangt.

Der Vereinfachungsprozeß erfolgt iterativ in zwei Durchgängen, die sich ständig abwechseln:

Im ersten Durchgang werden zu jedem Punkt die Größen berechnet, die zu seiner Signifikanz gehören und in die entsprechende Aufstellung (Matrix) eingetragen.

Im zweiten Durchgang werden die Signifikanzen aller Objektpunkte miteinander verglichen. Beginnend mit dem Punkt minimaler Signifikanz (s.u.) werden dann nacheinander Ecken mit immer höherer Signifikanz zur Löschung vorgenommen.

Steht einmal fest, daß ein Eckpunkt V (mit der z.Z. niedrigsten Signifikanz) eliminiert werden soll, gestaltet sich die Suche nach einem Verschmelzungskandidaten wie folgt weiter:

Alle Nachbarn von V (Star Polygon) erhalten einen Sperrvermerk (Flag) für den laufenden Durchgang und dürfen bis zum nächsten Durchgang dieses Typs (unabhängig von ihrer Signifikanz) nicht mit anderen Punkten verschmelzen und gelöscht werden. (Diese Maßnahme soll verhindern, daß die am wenigsten „kantige“ Stelle am Objekt erst vollkommen eben wird, bevor andere Stellen überhaupt untersucht werden.)

Von den wie oben ermittelten potentiellen Verschmelzungskandidaten wird jener mit dem kürzesten euklidischen Abstand zum betrachteten Punkt gewählt. Sind es mehrere, so wird

nachgeprüft, ob Farbgrenzen vorliegen; wenn ja, wird (wie oben geschildert) die Kante entlang der Farbgrenze zusammengezogen, andernfalls wird der erste an der Reihe genommen.

Sind alle Objektpunkte einmal auf diese Weise behandelt worden, so wird der erste Durchgang wiederholt, indem die Sperrvermerke aufgehoben werden und die Signifikanzmatrizen aktualisiert werden.

Vor jeder Entfernung eines Punktes wird überprüft, ob die zuvor gesetzten Vereinfachungsziele erreicht worden sind. Dazu dienen einerseits die Anzahl der eingesparten bzw. verbleibenden Darstellungselemente (z.Z.: Flächen), andererseits die längste als nächstes vernachlässigte Ausdehnung (z.Z.: Lotlänge), deren Werte als Abbruchkriterien nützen. Wird speziell das Kriterium der längsten Lotlänge detektiert, so werden die restlichen Punkte des Objektes (mit niedrigerer Signifikanz und daher mit größeren Lotlängen) übersprungen und ein weiterer Durchgang gestartet. Hintergrund dieser Maßnahme ist die Möglichkeit, daß unter den Punkten, die bei der letzten Runde gesperrt wurden und deshalb nicht eliminiert werden konnten, auch solche sein könnten, die den gesetzten Schwellenwerten genügen könnten.

Um nach jeder Kantenkontraktion ein intaktes Objekt vorliegen zu haben, wird im Anschluß an jede Verschmelzung eine Überprüfung statt: Lose gebliebene Punkte und Kanten oder auf eine Kante zusammengefallene Flächen werden gelöscht, komplanar gewordene Dreiecke werden ggf. zusammengefaßt im Rahmen einer Plausibilitätsüberprüfung.

Nach dem bisher Gesagten ist es einfach, die angewandte Metrik zum Vergleich der Punkt-Signifikanzen zu erklären: Minimale Signifikanz haben demnach Punkte mit dem kürzesten Lot zum Polygon ihrer potentiellen Verschmelzungskandidaten (innerhalb dessen der Fuß des Lotes liegen muß). Bei Gleichheit vor diesem Kriterium hat die geringere Signifikanz der Punkt mit den wenigsten Nachbarn. (Hintergrund ist der Wunsch, möglichst wenig Nachbarn auf einmal sperren zu müssen, wenn topologisch ohnehin feststeht, daß bei einer Kantenkontraktion genau zwei Dreiecke schließlich gelöscht werden können.) Ist nach geometrischen Kriterien kein Unterschied zwischen der Signifikanz zweier Punkte erkennbar, so wird die niedrigere Signifikanz demjenigen Punkt zugeordnet, der zwischen den Kanten seines Star Polygons möglichst wenig Farbwechsel hat oder sonst unter seinen potentiellen Verschmelzungskandidaten die Möglichkeit zur Verschmelzung hat, ohne dadurch eine (oder zwei) Farbe(n) vom Objekt zu entfernen. Ansonsten werden Punkte als gleich signifikant behandelt und der Reihe nach eliminiert.

Die Wirkung der bislang erörterten Regeln ist beispielhaft in Bild 5 an einem einfachen Objekt wiedergegeben.

6 Fuzzy-Erweiterungen

Eine experimentelle, noch unvollständige Implementierung des obigen Reduktionsalgorithmus zeitigte intuitiv nachvollziehbare und für die Zukunft vielversprechende Ergebnisse. Der anfängliche Anspruch, eine Dominanz eindimensionaler Kriterien nicht zuzulassen, ist jedoch soweit nur bedingt gelungen: Betrachtet man etwa das oben erwähnte Beispiel eines Segeldampfers, der sich mit eingezogenen Segeln entfernt, so fallen Masten (als sehr lange und schmale Kegel modelliert) wie erwartet relativ bald weg. Dies geschieht aber nur, weil sie in ihrer kleinsten Dimension (in der Breite) immer weiter vereinfacht werden, bis sie schließlich unter die Schwelle der allgemeinen Plausibilitätsüberprüfung fallen und (als Objektteil vernachlässigbarer Breite) entfernt werden. Widmet man dieser Angelegenheit mehr Aufmerksamkeit, so stellt man fest, daß die Plausibilitätsüberprüfung und die dort definierten

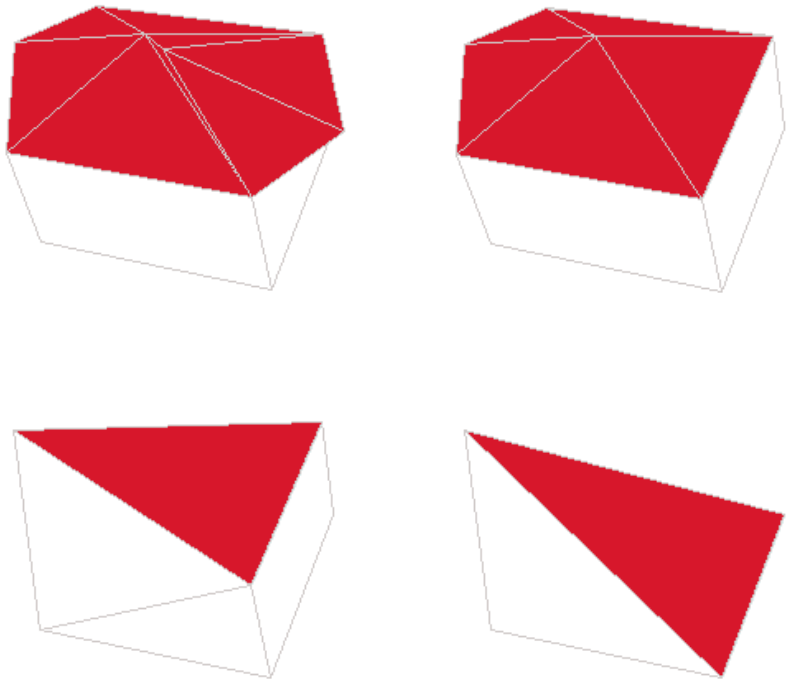

Bild 5: Anwendungsbeispiel zur besprochenen LOD-Generierung an einem Objekt mit 12 Punkten und 14 Flächen. An den Dachrändern ist die Eignung der Mehode auch für offene Gitternetzmodelle (non-manifold) zu erkennen.

Schwellen die einzige Möglichkeit bieten, das Vereinfachungsverhalten der besprochenen Methode zu steuern. Daher können z.B. Auswirkungen von Diesigkeit oder Dunkelheit nur über diesen Parameter beeinflußt werden, der ursprünglich für die Anpassung des Algorithmus an die optische Auflösung des Sichtsystems vorgesehen war. Zudem bietet das so konzipierte System keine Möglichkeit der Kategorisierung zwischen ähnlich strukturierten Objekten (z.B.: breite Sendemasten vs. schmale Sendetürme).

Die Bedeutung einer Berücksichtigung zwei- und dreidimensionaler Kriterien und Schwellen kann eingängig anhand von Anwendungen wie Bild 6 vorgeführt werden. Die Detailreduktion der dort abgebildeten Skyline wurde an Bedingungen gekoppelt, nämlich, daß ihre LODs aus Rechtecken (bzw. Quadern) bestehen sollten. Dadurch wird die Wirkung der o.a. „Einebnung“ gewissermaßen verdoppelt, da zu jedem entfernten Pyramidal auch das Komplement zum Quader folgen muß. (Programmtechnisch bedeutet das ein verändertes Setzen der bereits erwähnten Sperrvermerke.) Hier kommt jedoch die Unsicherheit zum Tragen, zu welchem Teil jeweils die Höhe oder Flächigkeit zur Auffälligkeit der Objekte (bzw. Objektteile) beitragen.

Ein außerordentlich leistungsfähiges Instrument zur Behandlung solcher Fälle hat L.Zadeh mit der Fuzzy-Logik vorgestellt [19, 20]. Danach handelt es sich im Fall von Bild 6 um die linguistischen Variablen ‚Höhe‘ und ‚Fläche‘, mit denen die gleichnamigen physikalischen Größen der grafischen Objekte über Zugehörigkeitsfunktionen verbunden sind; aus ihnen soll

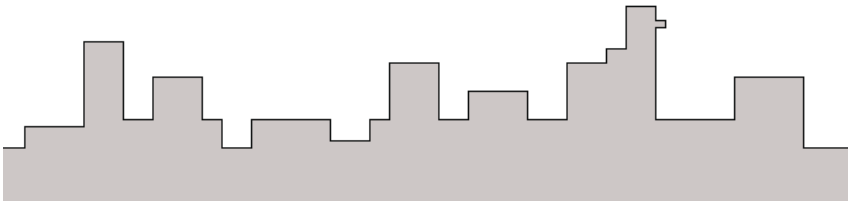

Bild 6: Skyline als Objekt der Detailreduktion: Großflächige Strukturen können ähnlich signifikant sein wie hohe.

unscharf auf die Auffälligkeit von Objekten (d.h. hier: auf die Signifikanz - s.o.) geschlossen werden. Voraussetzung dafür ist zunächst eine Fuzzy-Regelbasis, die (mit diesen linguistischen Variablen in den Prämissen der einzelnen Regeln) zu Konklusionen führt, welche wiederum die Zugehörigkeit der jeweiligen Objekte zur linguistischen Variable ‚Signifikanz' betreffen. Tabelle 1 enthält die zwei hier verwendeten Regeln.

Tabelle 1: Fuzzy-Regelbasis für die LOD-Generierung zur Skyline nach Bild 6

Regeln	**Prämissen**		**Konklusion**
	WENN **Lage des Eckpunktes:**	**UND** **aufgespannte Fläche:**	**DANN** **Eckpunkt-Signifikanz:**
1	niedrig	eher groß	hoch
2	hoch	eher klein	niedrig

Die mit diesen Daten erfolgenden Berechnungen sind der Literatur entnommen (z.B. [21]) und der Anschauung halber in Bild 7 zeichnerisch [22] wiedergegeben worden: Zuerst werden die Zugehörigkeitsfunktionen (hier als linear angenommen und daher als Rampen) eingezeichnet. Für jeden betrachteten Eckpunkt, der die Höhe h hat und die Fläche a stützt, werden dann an den jeweiligen Abszissen die dazugehörigen Werte eingetragen. Von den Zugehörigkeitswerten zu jeder Regel wird (im Sinne einer möglichst gesicherten Aussage) der niedrigste genommen; er gibt den Wert der Zugehörigkeitsfunktion auf der Seite der Konklusion (Signifikanz) an. Die Fläche unter der Signifikanz-Rampe bis zu diesem Wert markiert das Gewicht, den diese Regel für den behandelten Eckpunkt erhält. Von den beiden so erhaltenen Flächen wird schließlich der Schwerpunkt berechnet; seine Abszisse markiert die gesuchte Signifikanz, seine Ordinate deren Zugehörigkeitswert (als Maß für die Sicherheit dieser Aussage).

In Bild 8 sind einige detailreduzierte Versionen der Skyline nach Bild 6 mit dem hier geschilderten Verfahren wiedergegeben.

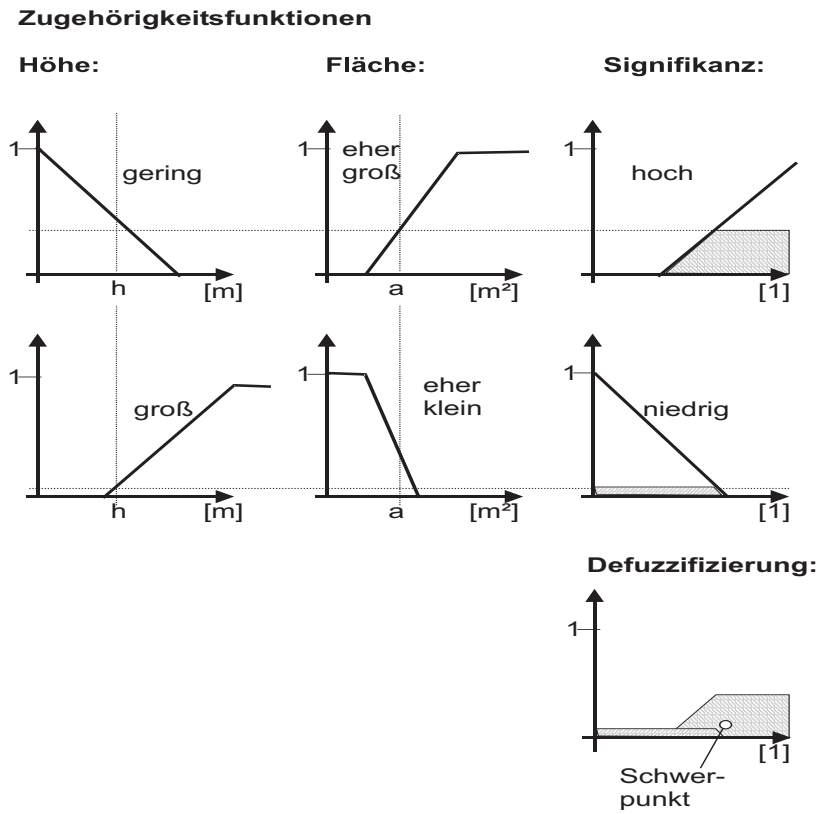

Bild 7: Ermittlung der Signifikanz für einen Eckpunkt der Höhe h, der eine Fläche der Größe a begrenzt, nach den Regeln von Tab. 1.

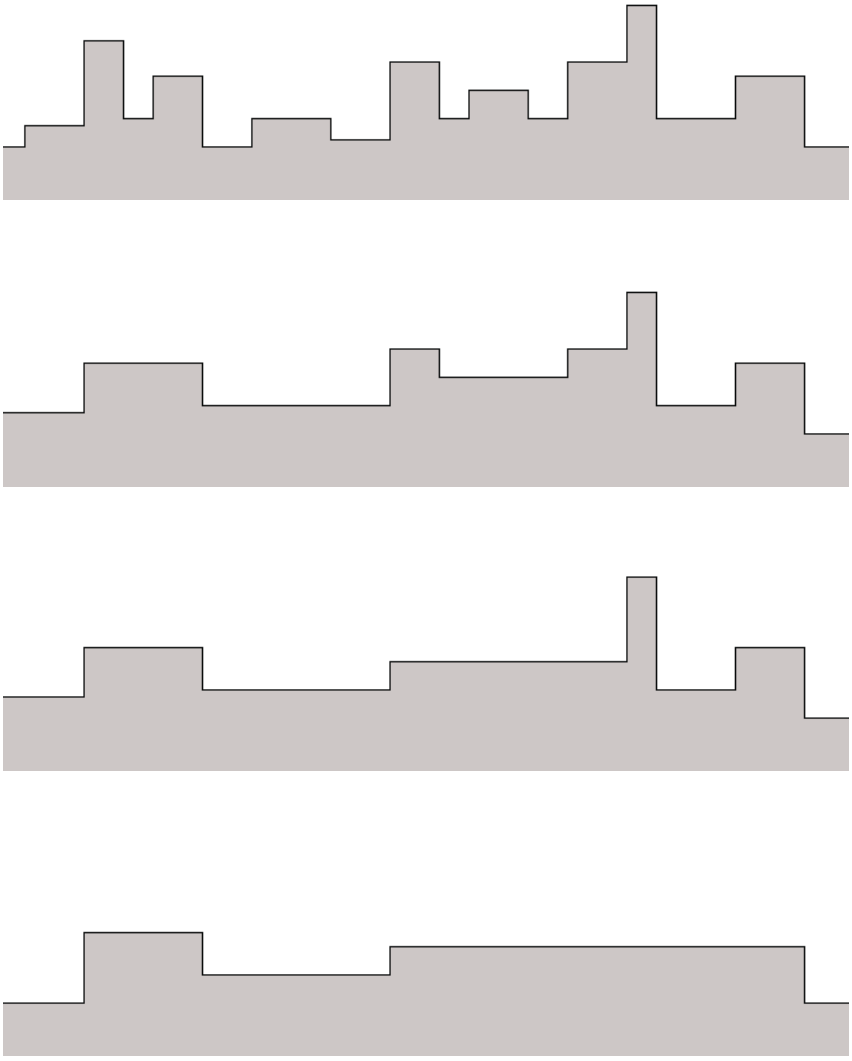

Bild 8: Detailreduktion für die Skyline nach Bild 6 nach dem Verfahren Bild 7.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Verfahren zur automatisierten LOD-Generierung wurde vorstehend beschrieben; es wirkt nach der Methode der Kanten-Kontraktion und beschränkt sich auf bereits vorhandene Punkte. Der damit verbundene Anspruch besteht darin, eine Methode zur Detailreduktion zu entwickeln, die unter Einbeziehung einfacher Kriterien und Merkmale flexible und nachvollziehbare Ergebnisse liefert. Dazu wurde die Palette der in die Berechnung eingehenden Kriterien quantitativ und qualitativ erweitert. Objektmerkmale, deren einzige gemeinsame Eigenschaft die Auffälligkeit in ihrer Umgebung ist, werden mit Hilfe der Fuzzy-Logik gewichtet. Erste Anwendungsbeispiele bestätigen die Eignung dieser Methode.

Der Beitrag versteht sich als Vorschlag bzw. Skizze einer noch nicht abgeschlossenen Entwicklung mit der Intention, in der Fachöffentlichkeit die Diskussion über einen vielversprechenden Ansatz zu eröffnen. Insbesondere im Bereich der Integration der unscharfen Logik muß noch einiges geleistet werden. Wichtig ist, das Kriterium der Farbe grafischer Objekte bzw. Objektteile in die Fuzzy-Inferenz einzubeziehen, ähnlich wie bisher die visuelle Wirkung von Höhe und Fläche miteinander verknüpft werden konnte. Beispielhafte Anwendung dazu wäre ein Kinder-Karussel, das in Bewegung eine wahrnehmungsoptimierte Detailreduktion erfährt mit adäquater Gewichtung von Formen und Farben. Für die Findung geeigneter Ansätze wird langfristig der Einsatz neuronaler Netze angebracht sein.

Das vorgestellte Verfahren konzentriert sich auf zusammenhängende Objektteile und geht vorerst auf die Zusammenfassung disjunkter Objektteile („Aggregation“ [15]) nicht ein, obwohl feststeht, daß dies notwendiger Bestandteil zukünftiger Konzepte sein wird. Bei Datenbasen für Simulatoren erweitert sich dieser Aspekt auf die Zusammenfassung unterschiedlicher Objekte: Die LOD-Generierung für einen Wald beispielsweise ist nicht zwingend identisch mit der Summe der individuellen LOD-Generierungen für die dazugehörigen Bäume. Für künftige Anwendungen muß auch eine stärkere Verknüpfung der LOD-Generierung mit der LOD-Verwaltung eruiert werden. Bereits am Beispiel der oben verwendeten Skyline ist erkennbar, daß der Kontext der Objektdarstellung den Bedarf an Detailreduktion entscheidend mitbestimmt: LODs für einen grell gefärbten Geländewagen in einer Nachfahraufgabe oder im Gegenverkehr, in der Stadtszene oder im Urwaldszenario brauchen jeweils nicht nur unterschiedliche Zuschaltbedingungen, sondern auch unterschiedliche Generierung; gleichzeitig entstehen durch das Multiresolution Modeling und Morphing [12, 23] wichtige Techniken, die die Handhabung solcher vielfachen LOD-Hierarchien ermöglichen. Erste wichtige Ansätze für die LOD- Verwaltung mit Hilfe der Fuzzy-Logik sind bereits an der Universität Wuppertal vorgestellt worden [17].

Literatur

[1] Mayer, N.L.; Cosman, M.A.: Enhancing the Computer Generated Illusion. Proceedings IITSC Conference 1984

[2] Christidis, A.: Entwicklungsstand von LOD-Verwaltung und -Generierung. Interner Bericht der AITEC GmbH & Co., August 1991 (unveröffentlicht)

[3] Schachter, B.J.: Computer Image Generation. John Wiley & Sons, 1983

[4] Ferguson, R.L.; Economy, R.; Kelly, W.A.; Ramos, P.P.: Continuous Terrain Level of Detail for Visual Simulation. Proceedings Image V Conference, 1990

[5] Scarlatos, L.L.: A Refined Triangulation Hierarchy for Multiple Levels of Terrain Detail. Proceedings Image V Conference, 1990

[6] Devarajan, V.; Fuentes, R.; McArthur, D.E.: An Approach to Multiple Levels of Detail Generation from Digital Terrain Elevation Data Using Wavelet Transforms. Proceedings 7th International Training Equipment Conference, 1996

[7] Delépine, Ch.: Online Terrain Level of Detail. Proceedings 8th ITEC, 1997

[8] Wilkerson, H.; Brown, T.C.: Scene Realism: The Synergy of Data Base Technology and CIG Hardware. Proceedings I/ITSC 1988 (Texturen als LOD)

[9] Hoppe, H.; DeRose, T.; Duchamp, T.; McDonald, J.; Stuetzle, W.: Mesh Optimization. SIGGRAPH 93 Proc., 1993.

[10] Roehle, B.: Channeling the Data Flood. IEEE Spectrum March 1997

[11] Garland, M.: Quadric-Based Polygonal Surface Simplification, Dissertation, Carnegie Mellon University, Mai 1999

[12] Klein, R.; Krämer, J.: Building Multiresolution Models for Fast Interactive Visualization. Seminararbeit, Universität Tübingen, 1998

[13] Melax, S.: Polygon Reduction - 503 Project. http://www.cs.ualberta.ca/ melax/polychop/

[14] Astheimer, P; Pöche, M.-L.: Interactive Level-of-Detail Generation. Computer Graphics topics 1/94

[15] Garland, M.; Heckbert, P.S.: Surface Simplification Using Quadric Error Metrics. SIGGRAPH 97 Proc., 1997.

[16] Melax, S.: A Simple, Fast, and Effective Polygon Reduction Algorithm. Game Developer Magazin, Nov.98

[17] Schlender, D.: Anforderungen an die Detailstufenverwaltung in virtuellen Simulationsumgebungen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 10, Nr. 597, VDI-Verlag 1999

[18] Preparata, F.P.; Shamos, M.I.: Computational Geometry: An Introduction. Springer-Verlag, New York 1985

[19] Zadeh, L.: Fuzzy Sets. Inform. Control, vol. 8, 1965

[20] Zadeh, L.: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol SMC-3, no.1, 1973

[21] Jaanineh, G; Maijohann, M.: Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control. Vogel Buchverlag 1996

[22] Spies, M.: Unsicheres Wissen. Spektrum Akademischer Verlag 1993

[23] Lee, A.W.; Dobkin, D.; Sweldens, W.; Schröder, P.: Multiresolution Mesh Morphing. SIGGRAPH 99 Proc., 1999.