

Ralf Stüber

Generalisierung von
Gebäudemodellen unter
Wahrung der visuellen
Richtigkeit

© 2005 beim Autor - Alle Rechte vorbehalten

Satz und Gestaltung:
Institut für Kartographie und Geoinformation
der Universität Bonn

ISSN 1615-9101

D 98

Generalisierung von Gebäudemodellen unter Wahrung der visuellen Richtigkeit

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 9. Dezember 2004

von

Dipl.-Ing. Ralf Stüber

aus Neuwied

Heft 32 der Schriftenreihe des
Instituts für Kartographie und Geoinformation der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Referent: Professor Dr.-Ing. D. Morgenstern
Korreferent: Professor Dr. L. Plümer
Tag der mündlichen Prüfung: 25. November 2005

Zusammenfassung

Generalisierung von Gebäudemodellen unter Wahrung der visuellen Richtigkeit

Im Einklang mit der Weiterentwicklung sowohl der Geoinformationssysteme (GIS) als auch der Hardwaretechnik eröffnen sich neue Möglichkeiten der Ableitung dreidimensionaler Präsentationen von Geodaten, insbesondere von Gebäudedaten. Solche Visualisierungen schaffen zunächst einen signifikanten Mehrwert dieser Daten und sind darüber hinaus ein wichtiges Werkzeug für die Dokumentation, Vermarktung und planerische Begleitung städtebaulicher Interessensgebiete.

Mit der Entwicklung von automatisierten Verfahren zur Erstellung dreidimensionaler georeferenzierter Stadtmodelle erweitern sich die Möglichkeiten der großflächigen und hoch detaillierten Erzeugung derartiger Modelle. Als Resultat sind diese Visualisierungen hochkomplex und der durch sie entstehende Mehrwert steigt mit der Breite der Öffentlichkeit, der sie zugeführt werden können.

Daraus folgt die Notwendigkeit, solche dreidimensionalen Präsentationsmodelle erstens auf handelsüblicher Hardware mit verbreiteter Software betrachten zu können und zweitens die dorthin zu transferierende Datenmenge möglichst gering zu halten. Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Problemstellung, indem

1. eine kartographisch geprägte Bestimmung von Mindestgrößen mit dem Ziel erfolgt, objektive Kriterien dafür zu entwickeln, welche Inhalte unter dem Aspekt der *visuellen Richtigkeit* transportiert und präsentiert werden müssen;
2. Strategien für eine automatisierte Generalisierung der Darstellungsobjekte, basierend auf den zuvor genannten Mindestgrößen, entwickelt werden;
3. Datenstrukturen erarbeitet werden, die eine sowohl für die Verwaltung als auch für den Zugriff optimale Speicherung der so aufbereiteten Präsentationsdaten erlauben.

Dabei liegt der besondere Fokus dieser Arbeit auf den Gebäudeobjekten als Hauptelement von dreidimensionalen Stadtmodellen.

Es wird die Möglichkeit aufgezeigt, sowohl stationäre als auch verteilte Präsentationen von räumlichen Stadtmodellen in hoher Granularität und räumlicher Ausdehnung durchzuführen. Die exemplarische Erprobung des Verfahrens in verschiedenen Stadtgebieten zeigt insbesondere in Gebieten dichter städtischer Bebauung vielversprechende Ergebnisse.

Abstract

The generalization of models of buildings combined with the preservation of visual correctness

Thanks to the development not only of geo-information systems (GIS) but also of new hardware technology, it is now possible to present geo-data relating to buildings in three-dimensional form. These visualizations significantly increase the value of these data and are in addition an important tool for the documentation, marketing and planning of various aspects of the built environment. The development of mechanized procedures has increased possibilities for the production of three-dimensional geo-referential urban models which are both largescale and highly detailed. These visualizations are necessarily highly complex, and their value is increased the more the public has access to them. It is therefore necessary, firstly, to be able to view these three-dimensional models on commercially available hardware with widely accessible software and, secondly, to be able to keep the datasets to be transferred as small as possible. The present investigation doctoral thesis tackles this problem

1. by determining cartographically the smallest possible dimensions with the aim of developing objective criteria to convey and present information in a visually correct manner;
2. by developing strategies for a mechanical generalization of the objects to be presented, based on the above-mentioned minimal dimensions;
3. by elaborating structures for the storing of presentational data in such a way as to allow for the best possible access to and management of them.

This thesis therefore lays particular emphasis on buildings as the principal element in three-dimensional urban models. It demonstrates how to create both stationary and dispersed spatial urban models with a high degree of details and of spatial expansion. Tests carried out on this procedure in various urban environments have yielded, particularly in densely built-up areas, very promising results.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Minimaldimensionen und Mindestgrößen	15
2.1	Einführung	15
2.2	Mindestgrößen in der Realwelt	17
2.2.1	Mindestgröße von Objekten	17
2.2.2	Wahrnehmung räumlicher Tiefe und Größe	19
2.2.3	Bewertung der räumlichen Tiefenkriterien	23
2.3	Mindestgrößen in der Bildschirmdarstellung	26
2.3.1	Vergrößerungsfaktor der Bildschirmdarstellung	26
2.3.2	Bildschirmauflösung	27
2.4	Mindestgröße als Darstellungskriterium	29
3	Detaillierungsgrade für 3D-Gebäudemodelle	31
3.1	Einführung	31
3.2	Definition von LoD-Stufen	32
3.2.1	Differenzierung nach Herstellungs- und Anwendungsgesichtspunkten	32
3.2.2	Distanzabhängiger Detaillierungsgrad	33
3.2.3	Differenzierung auf Grund von Sichtbarkeit und Orientierung	34
3.2.4	Höhenabhängiger Detaillierungsgrad	35

3.2.5	Differenzierung auf Grund inhaltlicher Attributierung	36
3.3	Zonenweise Variation des Detaillierungsgrades	37
3.4	Objektweise Variation des Detaillierungsgrades	38
3.5	Schlussfolgerung	38
4	Generalisierung im Kontext von 3D-Gebäudemodellen	41
4.1	Einführung	41
4.2	Der Begriff der visuellen Richtigkeit	44
4.3	Untersuchung kartographischer Generalisierungsoperationen	45
4.3.1	Rein geometrische Generalisierung	45
4.3.2	Geometrisch-begriffliche Generalisierung	48
4.4	Vereinfachung und Datenreduktion in der Computergrafik	51
4.4.1	Nicht invasive Vereinfachungsalgorithmen	52
4.4.2	Invasive Vereinfachungsalgorithmen	55
4.5	Schlussfolgerung	57
4.5.1	Verwendung kartographischer Generalisierungsoperationen	57
4.5.2	Verfahren der Computergrafik	59
4.5.3	Generalisierungsmethoden der Kartographie und der Computergrafik im Vergleich	60
5	Erzeugung niedriger Detaillierungsgrade	63
5.1	Stand der Forschung im zweidimensionalen Bereich	63
5.2	Stand der Forschung im dreidimensionalen Bereich	65
5.3	Ausgangssituation und Zielsetzung	67
5.4	Besondere Aspekte im dreidimensionalen Kontext	69
5.4.1	Der Einfluss der wechselnden Perspektive	69
5.4.2	Die Anwendung der Mindestgrößen	70
5.4.3	Geometriotypwechsel	71

5.5	Algorithmus	72
5.5.1	Die Separation von Objektteilen	73
5.5.2	Strukturierung des Separationsergebnisses	75
5.5.3	Generalisierung der Dachformen	78
5.5.4	Zusammenfassung	79
5.6	Generalisierung als iterativer Prozess	82
5.7	Strukturierung versus Zusammenfassung	83
5.7.1	Erläuterung an einem Beispiel	84
5.8	Schlussfolgerung	87
6	Vereinfachung von Texturinformationen	89
6.1	Einführung	89
6.2	Zur Notwendigkeit der Generalisierung	90
6.3	Reduktion der Auflösung von Texturbildern	91
6.4	Texturgröße in Abhängigkeit der Betrachtungsentfernung	92
6.5	Diskussion anhand eines Beispiels	93
6.6	Schlussfolgerung	96
7	Datenbankbasierte Speicherung multiskalierter Stadtmodelle	97
7.1	Anforderungen	97
7.2	Inhalt der Datenbank	99
7.2.1	Datenzugriff	102
7.3	Angewendete Datenstrukturen	104
7.3.1	Der Baum der Modellobjekte	104
7.3.2	Räumliche Struktur	106
7.3.3	Verknüpfung der Modellobjekte mit der räumlichen Struktur	109
7.3.4	Semantische Struktur	109

7.3.5	Zugriff auf die Modelldaten	110
7.3.6	Anpassung an das Darstellungsumfeld	113
7.4	Datenmodell	114
7.5	Zusammenfassung	117
8	Fazit	119
	Literaturverzeichnis	123
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	133

Kapitel 1

Einleitung

Durch die aktuellen Entwicklungen in der Geodatenverarbeitung und der Computertechnik ergeben sich neue Möglichkeiten, diese Daten in noch stärkerem Maße nutzbringend zu verwerten. Die Herstellung von dreidimensionalen Gebäudedarstellungen ist eine dieser sich neu etablierenden Nutzungen. Diese erfreuen sich zum Beispiel in den Anwendungsbereichen Stadtmarketing oder in raumbezogenen Planungsverfahren einer stetig steigenden Nachfrage.

Aus diesen Interessen und den damit verbundenen Anforderungen resultieren für Geoinformationssysteme (GIS) eine Reihe neuer Aufgaben- und Problemstellungen. Es wird die mitunter aufwändige Integration von diversen Datengrundlagen notwendig. Des Weiteren sind neue Daten zu integrieren oder vorhandene zu veredeln. Dies macht die Vorbereitung und die Herstellung dreidimensionaler Darstellungen sowohl zeit- als auch kostenaufwändig. Deshalb beschränkt sich die Erzeugung solcher virtueller Darstellungen bisher meistens auf Planungsvorhaben und städtebauliche bzw. landschaftsplanerische Situationen, die von besonderer Bedeutung sind. Daher geht deren räumliche Ausdehnung nicht oder nur geringfügig über diesen Interessensfokus hinaus.

Aktuelle automatisierte Verfahren zur Erstellung dreidimensionaler Stadt- und Landschaftsmodelle ermöglichen es jedoch, größere und zugleich detailliertere Modelle herzustellen und datenbankgestützt zu verwalten.

Durch eine effiziente Ausnutzung bereits vorhandener Geobasisdaten gelingt es, den Zeitbedarf für die Herstellung und damit auch die diesbezüglichen Kosten in einem überschaubaren Rahmen zu halten. Auf Grund dieser neuen Entwicklungen ergibt sich die Nachfrage nach räumlich ausgedehnteren Modellen, die aus Gründen der Präsentation eines

stärkeren Detaillierungsgrades (auch LoD¹ genannt) bedürfen. Diese Forderung birgt daher einen Konflikt: Insbesondere bei der derzeit für den Standard-Anwender verfügbaren Hardware ist die maximal darstellbare Größe von hoch detaillierten Modellen beschränkt. Soll zudem eine Verbreitung der dreidimensionalen Präsentationen über das Internet im Bereich des Möglichen bleiben, ist wegen der begrenzten Übertragungs- und lokalen Rechnerkapazitäten auf eine effiziente ziel- und aufgabengerechte Beschreibung der Präsentationsdaten zu achten (Koppers, 2000).

Das Spannungsfeld zwischen hohem Detaillierungsgrad und der Größe der Modelle wird im Allgemeinen durch variable Detaillierungsgrade innerhalb eines Darstellungsmodells gelöst. Dies hat zur Folge, dass Bereiche untergeordneten Interesses oder nur in der Ferne sichtbare Gebiete in ihrem Detaillierungsgrad deutlich reduziert werden. Bisher begegnet diese Vorgehensweise dem Betrachter allerdings nur dann, wenn es sich bei dem Präsentationsmodell um eine manuell und einzeln angefertigte Darstellung handelt. Sowohl der von der Bedeutung der Objekte abhängige maximale Detaillierungsgrad als auch das von der Betrachtungssituation abhängige LoD wird hier bei der manuellen Erfassung der Objekte festgelegt. Die Wahl der Detailstufen unterliegt den Erfahrungswerten des Erfassers und besitzt daher den Charakter eines heuristischen Handelns. Die Einführung multipler Detaillierungsgrade als Lösung der Darstellungsproblematik von dreidimensionalen Landschaftsmodellen ist auch für automatisch aus Geodatenbanken abzuleitende Modelle anzustreben. Dazu ist es notwendig, objektive Kriterien zu ermitteln, nach denen die zu zeigenden Realweltobjekte im Hinblick auf ihre sinnvolle Darstellungsqualität im Kontext der jeweiligen Betrachtungssituation bewertet werden können. Entsprechend ihrer Bewertung sollen die zu präsentierenden Objekte dann einem in hohem Maße automatisch ablaufenden Prozess zugeführt werden, der dann die Darstellungsobjekte hinsichtlich ihrer verschiedenen Detaillierungsgrade erzeugt.

Problemstellungen dieser Art werden in der kartographischen Begriffswelt unter dem Oberbegriff der Generalisierung zusammengefasst. Da die kartographischen Ausdrucksformen mehr auf zweidimensionale Darstellungen hin ausgerichtet sind, berücksichtigen die etablierten Methoden der Generalisierung im wesentlichen die topographischen Besonderheiten von Objekten, die im Zusammenhang mit der Abbildung von Geländemodellen entstehen. Trotzdem bieten einige Methoden der Generalisierung eine hinreichende Eignung, auch in dem neuen, dreidimensionalen Umfeld anwendbar zu sein. Ziel und Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Methoden der kartographischen Generalisierung auf ihre Verwendbarkeit in

¹Level of Detail

dreidimensionalen Darstellungsräumen hin zu überprüfen und bei einer grundsätzlichen Eignung an die veränderten Bedürfnisse anzupassen. Das beinhaltet sowohl die Methoden selbst, als auch die Kriterien, anhand derer die Methoden angewendet werden. Als Beispiel seien Mindestgrößen im Bereich der Vereinfachung genannt.

Die dahingehend überprüften und modifizierten Generalisierungsmethoden sollen anschließend zu einem einheitlichen Konzept vereinigt werden, welches den fachlichen Rahmen für die automatisierte Herstellung und Speicherung von dreidimensionalen Landschaftsdarstellungen mit variablem Detaillierungsgrad bildet. So sollen schlussendlich Präsentationen ermöglicht werden, die bei gleichem Datenvolumen qualitativ hochwertiger sind sowie einen größeren und / oder detailreicheren Ausschnitt der Realwelt abbilden.

Kapitel 2

Minimaldimensionen und Mindestgrößen

Für die im weiteren Verlauf der Arbeit zu entwickelnden Verfahren zur Strukturierung und Generalisierung von Gebäudemodellen sind Kriterien zu bestimmen, auf deren Basis die Generalisierung objektiv durchgeführt werden kann. Ein wesentliches Kriterium ist die Mindestgröße von Darstellungsobjekten beziehungsweise Teilen davon. Diese Mindestgrößen werden an dieser Stelle anhand der Minimaldimensionen hergeleitet.

Der Objektbegriff wird im Kontext dieser Arbeit im Sinne eines kartographischen Objektes verwendet. Es handelt sich also nicht um die bloße Instanz einer Datenbankklasse, sondern um ein ausgestaltetes, präsentierbares Objekt. Demzufolge werden die Begriffe Objekt, Darstellungs- und Präsentationsobjekt synonym verwendet, sofern dies im speziellen Zusammenhang nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet wird.

2.1 Einführung

Die klassische Kartendarstellung stellt ein Zeichensystem dar, dessen Zeichen Informationen über die Raumbezüge und Eigenschaften von Objekten liefern (Hake, 1994).

Dagegen handelt es sich bei dreidimensionalen Stadtmodellen um kartenverwandte Darstellungen. Durch eine zentralperspektivische Projektion der Realweltobjekte entsteht für den Betrachter ein realitätsnaher Eindruck der dargestellten Situation. Die anhand der physiologisch begründeten Minimaldimensionen definierten kartographischen Mindestgrößen be-

ziehen sich auf die Bedürfnisse der Kartengrafik und nicht auf die von dreidimensionalen Gebäudemodellen. Ausgehend vom normalen menschlichen Sehvermögen stellen die Mindestgrößen festgelegte Grenzwerte dar, bei deren Unterschreitung die Karteninformation nicht mehr eindeutig oder nur noch unvollständig entnommen werden kann.

Im Unterschied dazu wird dem Betrachter im Falle der 3D-Stadtmodelle kein Zeichensystem angeboten, sondern eine möglichst naturgetreue, verkleinerte Abbildung von Realweltobjekten. Das hat weitreichende Konsequenzen für die Bestimmung von Mindestgrößen in 3D-Modellen:

- Die Mindestgrößen beziehen sich hier nicht auf kartographische Zeichen oder Signaturen, die die Realweltobjekte repräsentieren, sondern auf die Objekte selbst. Es sind sowohl die Objekte im Ganzen als auch Teile davon betroffen.
- Auf Grund der zentralperspektivischen Abbildung und der frei wählbaren Standorte und Blickrichtungen erscheinen die Darstellungsobjekte im Auge des Betrachters in unterschiedlichen Größen. Unter Zuhilfenahme weiterer Tiefenkriterien wie zum Beispiel Verdeckungen (vgl. Abschnitt 2.2.2) erkennt der Betrachter diese als unterschiedlich entfernt. Dafür muss jedes Objekt in einem individuellen Maßstab dargestellt werden. Dieser Maßstab ergibt sich aus der Distanz des Objekts zum gewählten Standpunkt des Betrachters.

Ziel ist es also, Mindestgrößen für die Objekte bzw. deren Details in Abhängigkeit ihrer Betrachtungsentfernung zu finden.

Dies soll in zwei Stufen erfolgen.

1. Die Mindestgrößen in der Realwelt:

Bis zu welcher Größe kann ein Betrachter Objekte, Objektstrukturen und -details in einer realen Betrachtungssituation erkennen und unterscheiden ?

2. Die Mindestgrößen in der Bildschirmdarstellung:

Überträgt man die Analyse in der Realwelt auf andere Abbildungsmedien, wie zum Beispiel den Computer-Bildschirmen, so ist zu erwarten, dass sich diese Größen verändern. Dies folgt aus der Tatsache, dass die Mindestgrößen dem Betrachtungsmedium angepasst werden müssen. Insbesondere für die Darstellung mit

Computer-Bildschirmen vergrößern sich die Mindestgrößen auf Grund der geringeren Auflösung deutlich (Brunner, 2000).

2.2 Mindestgrößen in der Realwelt

2.2.1 Mindestgröße von Objekten

Die in der Kartographie definierten Mindestgrößen grafischer Formen beziehen sich auf den üblichen Leseabstand einer Handkarte, den Arnberger (1975) mit 25cm beziffert. Aus diesen metrisch definierten Mindestgrößen lässt sich somit der zugehörige Sehwinkel und somit auch die Mindestgröße von geometrischen Formen in Abhängigkeit der Betrachtungsentfernung berechnen. Dieser Sehwinkel lässt sich mit

$$\tan \sigma = \frac{G}{g} \quad \text{bzw.} \quad \sigma = \arctan \frac{G}{g} \approx \frac{G}{g} \quad (2.1)$$

berechnen, wobei G die Gegenstandsgröße, g die Gegenstandsweite und σ den Sehwinkel bezeichnet.

Weiterhin gibt Arnberger (1975) Mindestgrößen für Geometrien mit ver-

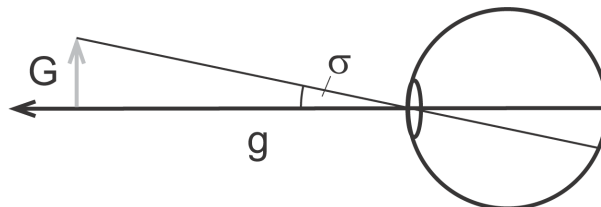


Abbildung 2.1: Der Sehwinkel

schiedenen Kontrasten zur Umgebung an. Er unterscheidet zwischen reinem Schwarz-Weiß-Kontrast und unterschiedlichen Helligkeits- und Farbgewichtsunterschied. Die letzteren Werte werden in Tabelle 2.1 herangezogen, um den oben angesprochenen Sehwinkel als Richtgröße abzuschätzen. Der Schwarz-Weiß-Kontrast eignet sich nicht, weil er im normalen Sichtumfeld der Realwelt und unter normalen optischen Verhältnissen nicht oder nur in Ausnahmefällen auftritt. Bei der hier interessanten Betrachtung von ausgedehnteren Objekten in größerer Entfernung wird der ohnehin schon schwächer anzunehmende Kontrast auf Grund der atmosphärischen Perspektive deutlich herabgesetzt.

Geometrie	Mindestgr. bei wenig Kontrast [mm]	Sehwinkel [min]	Mindestgröße in m im Betrachtungsabstand von				
			10 m	50 m	100 m	1000 m	5000 m
Linie	0.10	1.38	0.004	0.02	0.04	0.40	2.00
Punkt	0.43	5.91	0.017	0.09	0.17	1.72	8.60
Kreisscheibe	0.80	11.00	0.032	0.16	0.32	3.20	16.00
Kreis	1.10	15.13	0.044	0.22	0.44	4.40	22.00
Quadrat, voll	0.70	9.63	0.028	0.14	0.28	2.80	14.00
Quadrat hohl	0.98	13.48	0.039	0.20	0.39	3.92	19.60
Rechteck, voll	0.48	1.10	0.019	0.10	0.19	1.92	9.60
		6.60	0.044	0.22	0.44	4.40	22.00
		15.13					
Flächenabstand	0.37	5.04	0.015	0.073	0.15	1.47	7.34

Tabelle 2.1: Mindestgrößen für größere Betrachtungsabstände

Neben dem aus den Mindestgrößen berechneten Sehwinkel σ_{min} für die ausgewählten Geometrien sind der Tabelle 2.1 die Mindestgrößen für die Entfernungen von $10m$, $50m$, $100m$, $1000m$ und $5000m$ hinzugefügt, um die Größenordnungen zu verdeutlichen. Dabei wird ein linearer Zusammenhang zwischen Mindestgröße und Betrachtungsentfernung angenommen.

Durch die Umstellung der Formel 2.1 nach G und dem der Tabelle zu entnehmenden Sehwinkel σ_{min} ergibt sich ein Kriterium für die Mindestgröße eines entfernt gelegenen Objektes bzw. von Teilen dieses Objektes. Anhand dieser elementaren geometrischen Grundformen ist es möglich, die Erkennbarkeit von Objekten in der Realwelt abzuschätzen. Die als Kriterium dienende Größe wird dabei in Form eines minimalen Sehwinkels festzulegen sein. Oben angegebene Sehwinkel müssen noch im Hinblick auf die Bildschirmdarstellung modifiziert werden.

2.2.2 Wahrnehmung räumlicher Tiefe und Größe

Für die Erklärung der menschlichen Wahrnehmung räumlicher Tiefe und Größe hat sich in der Wahrnehmungspsychologie der Ansatz der mehrfachen Tiefenkriterien (Rock, 1985) durchgesetzt. Dieser geht davon aus, dass zur Auswertung der räumlichen Ausprägung der Umgebung möglichst viele Informationen ausgewertet werden. Goldstein (1997) unterscheidet vier Gruppen von Tiefenkriterien:

1. Okulomotorische Tiefenkriterien

In dieser Gruppe werden die so genannten Aspekte der Konvergenz und der Akkomodation zusammengefasst. Konvergenz ist die Information, die aus dem Konvergenzwinkel der Sehachsen resultiert. Die Akkomodation resultiert aus dem Fokussieren der Augenlinsen auf das betrachtete Objekt. Beide Faktoren spielen lediglich im Nahbereich eine Rolle (Abb. 2.2).

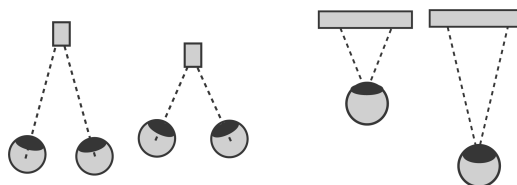


Abbildung 2.2: Konvergenz (links) und Akkomodation

2. Monokulare Tiefenkriterien

Die monokularen Tiefenkriterien sind Kriterien, die auch mit einem Auge wirksam sind. Es sind zu nennen:

- Verdeckung von Objekten
Verdeckt ein Objekt ein zweites, so ist es das näher liegende.

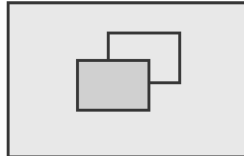


Abbildung 2.3: Verdeckung

- Relative Größe im Blickfeld
Sind alle sonstigen Kriterien identisch, so befindet sich das größere Objekt näher am Betrachter.

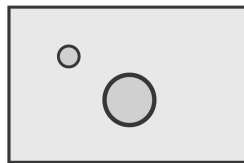


Abbildung 2.4: Relative Größe

- Relative Höhe im Blickfeld
Je näher sich ein Objekt am Horizont befindet, um so höher ist seine Position im Blickfeld des Betrachters.



Abbildung 2.5: Relative Höhe

- Atmosphärische Perspektive
Entfernte Objekte erscheinen durch den Einfluss der Atmosphäre weniger scharf konturiert und kontrastreich als nahe gelegene.



Abbildung 2.6: Atmosphärische Perspektive

- Gewohnte Größe von Gegenständen
Von bekannten Gegenständen existieren Erfahrungswerte, was deren Größe in Abhängigkeit von der Entfernung betrifft. Auf diese Weise wird eine Abstandseinschätzung ermöglicht.



Abbildung 2.7: Gewohnte Größe

- Lineare Perspektive
Alle parallelen Linien einer zweidimensionalen Abbildung vereinigen sich in einem von drei Fluchtpunkten. Sie nähern sich also in wachsender Entfernung einander an.



Abbildung 2.8: Lineare Perspektive

- Texturgradient
Hat eine Oberfläche ein einheitliches Muster, so wird dieses mit wachsender Entfernung immer dichter.

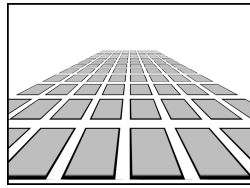


Abbildung 2.9: *Texturgradient*

- Licht und Schatten

Durch den Wechsel von Licht und Schatten kann ebenfalls auf die räumliche Ausprägung eines Objektes geschlossen werden. Eine Erhebung, die aus einer Wand herausragt, ist oben heller als unten. Für eine Vertiefung gilt das Gegenteil. Die Voraussetzung dafür ist die vom Gehirn vorausgesetzte Beleuchtung des Objektes von oben (Hubel, 1989).



Abbildung 2.10: *Licht und Schatten*

3. Bewegungsindizierte Tiefenkriterien

Unter diesem Oberbegriff subsumieren sich die Bewegungsparallaxe und das fortschreitende Zu- oder Aufdecken von Flächen. Die Bewegungsparallaxe ist für nahe gelegene Objekte größer als für entfernte. Der zweite Aspekt baut auf dem monokularen Kriterium der Verdeckung auf und besagt, dass aus der Veränderung dieser Verdeckungen Rückschlüsse über den Objektabstand gezogen werden können.

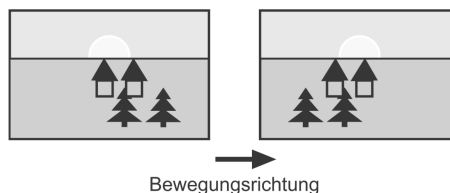


Abbildung 2.11: *Bewegungsparallaxe bei unterschiedlich weit entfernten Objekten*

4. Querdisparation und stereoskopisches Sehen

Durch den Abstand der Augen zueinander entstehen auf der jeweiligen Netzhaut leicht unterschiedliche Bilder. Die Auswertung dieser Unterschiede entspricht exakt dem stereoskopischen Messprinzip der Photogrammetrie. Das stereoskopische Sehen stellt neben der Auswertung der Akkomodation und des Konvergenzwinkels bei der Betrachtung eines Objekts die einzige wirkliche „Messung“ des Auges dar. Diese Fähigkeit wird in Abschnitt 2.2.3.4 eingehend untersucht.

2.2.3 Bewertung der räumlichen Tiefenkriterien

In den folgenden Abschnitten werden die vorgestellten räumlichen Tiefenkriterien im Hinblick auf die dreidimensionale Darstellung von Gebäudemodellen bewertet. Ziel ist es, deren Einflüsse und Grenzen zu erkennen, damit sie beim Aufbau von dreidimensionalen Gebäudemodellen berücksichtigt werden können.

2.2.3.1 Okulomotorische Tiefenkriterien

Sowohl die Information aus der Konvergenz der Sehachse als auch die Stärke der Akkomodation sind nur in einem Bereich von wenigen Metern für die räumliche Wahrnehmung verwertbar. Die okulomotorischen Tiefenkriterien sind für die Bewertung der Wahrnehmungsschwellen in der Ferne unbedeutend. Dies folgt aus der Tatsache, dass bereits ab einer Entfernung von $5m$ auf unendlich akkomodiert wird (Leyendecker, 1993).

2.2.3.2 Monokulare Tiefenwahrnehmung

Die monokulare Tiefenwahrnehmung gründet ausschließlich auf einer Leistung des Gehirns. Deshalb sind im Gegensatz zu den *messenden* Kriterien keine quantitativen Aussagen über deren Geltungsbereich zu treffen. Sie zeichnet sich allerdings dadurch aus, dass sie auch dann einen Tiefeneindruck bietet, wenn nur ein Auge benutzt wird. Die monokularen Tiefenkriterien ermöglichen es, dass auch zweidimensionale Abbildungen räumliche Informationen liefern. Bei einer generalisierten dreidimensionalen Darstellung ist es also dringend erforderlich, diese Tiefenkriterien zu erhalten, um die räumliche Wirkung der Präsentation nicht zu beeinträchtigen.

2.2.3.3 Bewegungsindizierte Tiefenkriterien

Die bewegungsindizierten Tiefenkriterien spielen bei der 3D-Modellableitung und bei deren Betrachtung eine große Rolle. Diese Kriterien kommen bei interaktiven Darstellungen von räumlichen Zusammenhängen zum Tragen. Nur dreidimensional ausgestaltete Objekte verschieben sich relativ zum Betrachter und zueinander, wenn dieser seine Position ändert. Somit stellt dieser Aspekt räumlicher Tiefenwahrnehmung den Unterschied zwischen dreidimensional ausgeprägten Anordnungen von Objekten und statischen Darstellungen dar.

2.2.3.4 Stereoskopische Tiefenwahrnehmung

Wie der monokularen Auflösung des Auges sind auch der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung physiologische Grenzen gesetzt. Die stereoskopische Sehschärfe des Menschen beträgt etwa 5 bis 10 Winkelsekunden (Kraus, 1997). Um diesen Betrag muss sich der kleinste noch wahrnehmbare Winkel $d\gamma = \gamma_{P_1} - \gamma_{P_2}$ unterscheiden, damit zwei Punkte als unterschiedlich entfernt wahrgenommen werden können (siehe Abb. 2.12).

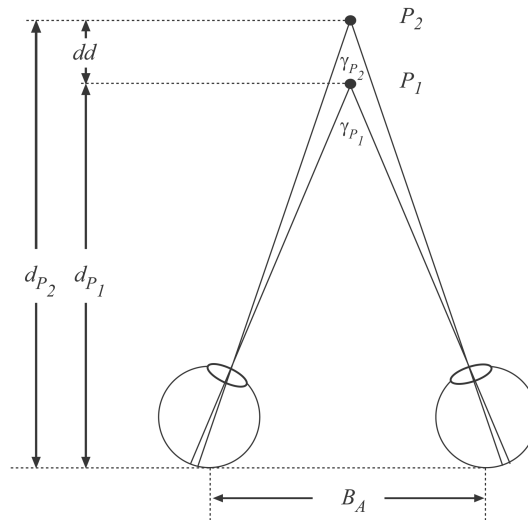


Abbildung 2.12: Das stereoskopische Sehen.

Der Abstand dd längs der Blickrichtung, den ein Punkt P_2 haben muss, um von einem Punkt P_1 in seinem Abstand unterscheidbar zu sein, berechnet sich als Funktion $f(d_{P_1}, d_\gamma)$ zu

$$dd = f(d_{P_1}, d_\gamma) = d_{P_1} - d_{P_2} = d_{P_1} - \frac{\frac{B_A}{2}}{\tan(\frac{\gamma_{P_1} + d_\gamma}{2})} \quad (2.2)$$

$$\text{mit } \gamma_{P_1} = \arctan\left(\frac{B_A}{2d_{P_1}}\right),$$

wobei B_A den Abstand der Augen bezeichnet. Für diesen werden in der Literatur übereinstimmend $6,5\text{cm}$ angesetzt. Die Tabelle 2.2 zeigt den Mindestabstand dd für ausgewählte Abstände d_{P_1} .

d_{P_1} [m]	γ_{P_1} [gon]	$dd = f(d_{P_1}, 5'')$ [m]	$dd = f(d_{P_1}, 10'')$ [m]
1	4,1366	0,0004	0,0007
5	0,8276	0,0093	0,0186
10	0,4138	0,0372	0,0740
50	0,0828	0,9153	1,7976
100	0,0414	3,5953	6,9410
200	0,0207	13,8819	25,9619
300	0,0138	30,1867	54,8539
400	0,0103	51,9237	91,9159
500	0,0083	78,5807	135,8163
600	0,0069	109,7079	185,4980
700	0,0059	144,9086	240,1112
800	0,0052	183,8318	298,9647
900	0,0046	226,1659	361,4907
1000	0,0041	271,6327	427,2187

Tabelle 2.2: Stereoskopische Abstandsauflösung

Man sieht, dass die Genauigkeit der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung mit wachsendem Abstand vom Betrachter rapide abnimmt. Bewegen sich die kleinsten wahrnehmbaren Tiefenunterschiede im Abstandsbereich von wenigen Metern noch im Submillimeterbereich, so betragen sie im Abstand von 100m bereits deutlich über drei Meter. In einer Entfernung von 1000m , muss ein stereoskopisch trennbarer Punkt schon eine Abstandsdifferenz von über 270m aufweisen.

2.3 Mindestgrößen in der Bildschirmdarstellung

2.3.1 Vergrößerungsfaktor der Bildschirmdarstellung

Bei der Bildschirmdarstellung dreidimensionaler Stadtmodelle handelt es sich um eine möglichst naturgetreue Reproduktion des optischen Eindrucks einer Realweltsituation. Das heißt, dass das Blickfeld des virtuellen Betrachters auf dem Bildschirm wiedergegeben wird. Da der gesamte Bildschirm nur einen kleinen Sehwinkel und somit nicht das gesamte Blickfeld abdeckt, wird die Darstellung verkleinert (siehe Abb. 2.13).

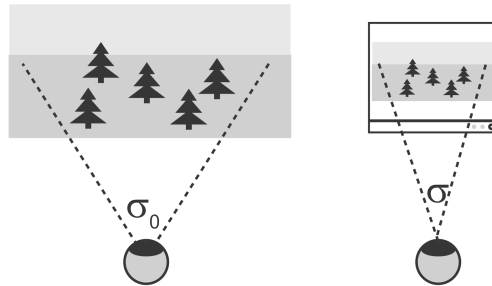


Abbildung 2.13: Verkleinerung durch die Bildschirmdarstellung

Dieser Sachverhalt lässt sich analog zum Vergrößerungsverhalten von optischen Instrumenten angeben. Dort vergleicht man den Sehwinkel eines Objektes ohne Instrument mit dem, den man mit Hilfe des Instrumentes erhält. Die optische Vergrößerung eines Instruments Γ wird durch den Zusammenhang

$$\Gamma = \frac{\tan \sigma}{\tan \sigma_0} \quad (2.3)$$

beschrieben. σ_0 bezeichnet den Sehwinkel, unter dem das Objekt mit unbewaffnetem Auge im Abstand von 25cm gesehen wird, σ steht für den Sehwinkel, unter dem das Objekt mit Hilfe des optischen Instruments wahrgenommen wird.

Um die auftretende Verkleinerung in Grenzen zu halten und eine naturgetreu anmutende Perspektive zu erhalten, wird nicht das gesamte Gesichtsfeld dargestellt, sondern nur ein Ausschnitt von $\sigma_0 = 60\text{gon}$. Dieser Sichtbereich wird auf der Fläche des Bildschirms wiedergegeben. Unter Berücksichtigung des für Bildschirme üblichen Betrachtungsabstandes von $50 - 60\text{cm}$ (Neudeck, 2001) ergeben sich für heute gebräuchliche

Bildschirmgrößen die in Tabelle 2.3 dargestellten Sehwinkel und Vergrößerungsfaktoren.

Die dargestellten Objekte werden demnach im Vergleich zur Wirklichkeit halb so groß auf der Retina abgebildet. Diese Tatsache bedingt eine Reduktion der im vorhergehenden Abschnitt ermittelten Mindestgrößen für die Darstellung (vgl. Tabelle 2.1), da sich der Sehwinkel eines jeden Objektes durch die Multiplikation mit dem Vergrößerungsfaktor Γ reduziert.

sichtb. Diagonale d_{BS} ["]	$\sigma_{Höhe}$ [gon]	σ_{Breite} [gon]	$\bar{\sigma}$ [gon]	Γ
14	25,7	32,9	29,3	0,36
15	27,3	34,9	31,1	0,39
16	28,9	36,7	32,8	0,41
17	30,4	38,5	34,5	0,44
18	31,9	40,2	36,1	0,46
19	33,4	41,9	37,6	0,49
20	34,9	43,4	39,2	0,51
21	36,2	45,0	40,6	0,54

Tabelle 2.3: Vergrößerungsfaktoren verschiedener Bildschirmgrößen

2.3.2 Bildschirmauflösung

Neben der verkleinerten Abbildung ist die Auflösung der Bildschirme ein wichtiger Aspekt der Bestimmung von Mindestgrößen für darzustellende Objekte. Die Anzahl der Bildpunkte auf der sichtbaren Fläche der Bildschirme liegt lediglich zwischen 800 x 600 und 1600 x 1200 Punkten. Das bedeutet, dass die Größe der einzelnen Punkte zwischen $0,21 \cdot 0,21mm^2$ bis $0,31 \cdot 0,31mm^2$ liegt. Die Bildpunktgröße entspricht dem Abstand zweier Bildpunkte, der bei Lochmaskenbildschirmen Dotpitch und bei Streifenmasken Grillpitch genannt wird. Jeder Bildpunkt setzt sich aus drei Subpixeln zusammen, welche jeweils einen der RGB-Farbwerte repräsentieren (Neudeck, 2001).

Sowohl Röhrenbildschirme als auch LCD-Monitore liegen in diesem Bereich der Bildpunktgröße. Für die folgenden Abschätzungen soll daher die mittlere Bildpunktgröße von $0,26mm^2$ angenommen werden.

Vor diesem Hintergrund gibt Neudeck (2001) Mindestgrößen sowohl für Positionssignaturen als auch für Flächen an. Obwohl bei der Darstellung

von den im Kontext dieser Arbeit betrachteten, fotorealistischen dreidimensionalen Gebäudemodellen keine Signaturierung erfolgt, sind auch diese Mindestgrößen von Interesse und werden auszugsweise in Tabelle 2.4 wiedergegeben. Die Berechnung der Sehwinkel als Funktion der Pixelgrößen erfolgte mit der Formel

$$\sigma = \arctan \left(\frac{n_{pcl} d_{pcl}}{g_{Abst}} \right) \quad (2.4)$$

mit n_{pcl} = Pixelanzahl, d_{pcl} = Pixelgröße,
 g_{Abst} = Betrachtungsabstand (60cm).

Positionssignatur	min. Bildpunktmaße		σ_{min}	
	a	b	a [']	b [']
Quadrat, gefüllt	6	6	10,7	10,7
Rechteck, gefüllt	6	8	10,7	14,3
Bildhaftes Zeichen	15-30	15-30	26,8	53,6
Flächen gl. Ausdehnung	12	12	21,5	21,5
Flächen ungl. Ausdehnung	5-6	20	21,5	35,8

Tabelle 2.4: Mindestgrößen von Positionssignaturen nach Neudeck (2001)

Diese Mindestgrößen werden später die Grundlage für die Bestimmung von Sichtbarkeitsintervallen für Objekte und Objektteile sein.

Für die räumlich ausgeprägten, untexturierten Objekte sind die Mindestgrößen der Bildschirmdarstellung von Flächen relevant. Flächen, deren Ausdehnung in beide Richtungen etwa gleich ist, sind gut erkennbar, wenn sie von einem Quadrat mit 12 Pixeln Kantenlänge noch umschlossen werden. Gestreckte Flächen bedürfen einer Größe von 20 Punkten in eine Richtung und 5 bis 6 Punkten in die andere Richtung, um erkannt werden zu können. Dabei ist zu beachten, dass diese Angaben für kontrastreiche Darstellungen gelten. Ist das nicht der Fall, was für die 3D-Modelldarstellung anzunehmen ist, so müssen 110 bis 130% der ursprünglichen Werte angesetzt werden (Neudeck, 2001). Somit ergeben sich für die weiteren Betrachtungen Mindestgrößen von 16 x 16 Pixel für symmetrische Flächen und 26 x 16 Pixel für gestreckte Flächen.

2.4 Mindestgröße als Darstellungskriterium

Zusammenfassend sollen die aus den vorangegangenen Abschnitten gewonnenen Erkenntnisse an dieser Stelle zu einem geschlossenen Beurteilungskriterium vereinigt werden. Man kommt zu einem einfachen und schnell berechenbaren Entscheidungskriterium, wenn man die Mindestgrößen für die Bildschirmdarstellung ebenfalls in minimale Sehwinkel σ_{min} überführt. Dann lässt sich die Frage nach der Darstellbarkeit eines Objektes als Funktion der Gegenstandsgröße G , der Gegenstandsweite g und der sichtbaren Bilddiagonalen d_{BS} formulieren.

$$\sigma_{min} < \sigma_{Bildschirm} = \arctan \left(\frac{G}{g} \right) \Gamma \quad (2.5)$$

mit $\Gamma = f(d_{BS})$

Setzt man den minimalen Sehwinkel und den Sehwinkel des Objektes gleich, so lässt sich die minimal erforderliche Gegenstandsgröße in der Realwelt in Abhängigkeit des Betrachtungsabstandes unter Berücksichtigung des Abbildungsverhaltens des Bildschirms ausdrücken:

$$G_{min} = g \tan \left(\frac{\sigma_{min}}{\Gamma} \right) \quad (2.6)$$

Bei Objekten mit signifikant unterschiedlicher Ausdehnung in verschiedene Richtungen muss der Vergleich für beide Ausdehnungen durchgeführt werden. Die Grenzwerte σ_{min} sind in der Tabelle 2.4 aufgelistet.

Die Mindestgrößen der Objekte in der Realwelt müssen bei der Selektion für die Darstellung nicht mehr berücksichtigt werden, da diese deutlich über dem liegen, was auf einem Bildschirm wiedergegeben werden kann. Wenn auf diesen Objekten bzw. Objektteilen zweidimensionale Strukturen in Form von Bildtexturen abgebildet werden, so sind diese Strukturen ebenfalls im Hinblick auf die benötigte Darstellungsqualität zu untersuchen (siehe Kapitel 6).

Kapitel 3

Detailierungsgrade für 3D-Gebäudemodelle

Um das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Konzept der variablen Detaillierungsgrade einordnen und bewerten zu können, werden nachfolgend bereits bekannte und praktizierte Konzepte für die Anwendung von Detaillierungsgraden vorgestellt. Dazu werden an dieser Stelle sowohl unterschiedliche Definitionen für LoD-Stufen als auch verschiedene Konzepte für deren Einsatz in der Darstellung von 3D-Gebäudemodellen beschrieben.

3.1 Einführung

Die Verwendung unterschiedlicher Detaillierungsgrade ist im Zusammenhang mit der dreidimensionalen Modellierung von Landschaftsmodellen ein bekanntes und bewährtes Mittel, um

1. den Herstellungsaufwand zu begrenzen,
2. den Rechenaufwand während der Modelldarstellung zu reduzieren oder
3. eine bestmögliche Kombination von Modellqualität in Verbindung mit einer guten Performance und Skalierbarkeit zu erzielen.

Im Falle der Begrenzung des Herstellungsaufwandes wird ein fester Detaillierungsgrad eingeführt, der der Bedeutung des Projekts sowie dessen

zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen entspricht.

Soll ein großflächiges, objektreiches Modell dargestellt werden, welches hinsichtlich seiner Auflösung mit der gegebenen Hardwaretechnik nur unvollkommen präsentiert werden kann, so muss eine generalisierte, weniger detaillierte Darstellung gewählt werden.

Kommen diese Varianten nicht in Frage, das heißt weder die Modellqualität noch die räumliche Ausdehnung dürfen eingeschränkt werden, so müssen neue Wege beschritten werden. Im Ergebnis müssen den im 3D-Modell präsentierten Objekten Repräsentationen in verschiedenen Detailstufen zugewiesen werden, die in Abhängigkeit der Betrachtungssituation dargestellt werden. Auf Grund der derzeit fehlenden Automatismen wird jedoch der Herstellungsaufwand, aus dem höchsten Detaillierungsgrad die benötigten niedrigeren generieren, deutlich erhöht.

Als Grundlage für solche Automatismen werden im Folgenden verschiedene Anwendungsszenarien von LoDs vorgestellt.

3.2 Definition von LoD-Stufen

In der Literatur finden sich vielerorts Beispiele für Abgrenzung von Detaillierungsgraden. Die Schwerpunkte liegen zum einen in der Beschreibung, welche Objekte bzw. Objektarten in den einzelnen Stufen zur Ansicht kommen. Zum anderen wird angegeben, nach welchen Kriterien mit entsprechenden Schwellenwerten verschiedene LoD-Zonen bestimmt werden können. In diesem Abschnitt soll eine Reihe derartiger Einteilungen im einzelnen vorgestellt werden.

3.2.1 Differenzierung nach Herstellungs- und Anwendungsgesichtspunkten

Verschiedenen LoDs werden bestimmte Merkmale zugeordnet, die in den einzelnen Stufen zur Darstellung kommen. So unterscheiden Schilcher et al. (1999) und in gleicher Weise Bill (1997) drei wesentliche LoD-Stufen, die wie folgt festgelegt werden:

- LoD1:
Rekonstruktion der Gebäude als Hüllkörper aus Grundriss und Gesamthöhe ohne Dachform. Das Modell wird auch als „Klötzchen-Modell“ bezeichnet. Diese niedrigste Stufe des Detaillierungsgrades wird im Allgemeinen als ausreichend für die Darstellung in den Maßstäben 1:250.000 bis 1:10.000 angesehen.

- LoD2:
Den aus Grundriss und Gebäudehöhe rekonstruierten Gebäudeobjekten (LoD1) werden zusätzlich die Dächer modelliert. Die Fassaden können hier ergänzend mit einer Textur belegt werden. Dieser mittlere LoD findet in den Maßstäben 1:10.000 bis 1:500 Anwendung. Zusätzliche Darstellungen von Straßeneinrichtungen und Objekten im Grünbereich sind möglich.
- LoD3:
Die Gebäudeobjekte werden hier realitätsnah erzeugt. Zusätzlich werden die Straßenmöblierung und die erweiterte Vegetation dargestellt. Die Gebäudeobjekte werden mit einer Fototextur versehen. Auf Grund der großen Datenmengen ist hier nur eine projektbezogene Realisierung zu verwirklichen. Derartig detaillierte Modelle können im Maßstab 1:1.000 bis 1:50 eingesetzt werden.

Die aufgeführte Einteilung ist zum einen durch den Herstellungsprozess zu begründen. Während die Modellherstellung im Detaillierungsgrad LoD1 automatisch möglich ist, so werden für die höheren LoDs in zunehmendem Maß manuelle Arbeitsschritte erforderlich.

Zum anderen wird diese Einteilung von planerischen Maßstabsebenen bzw. Themen vorgegeben. So erfordert die Analyse der übergreifenden Strukturen einer Stadt eine deutlich geringer detaillierte Objektausgestaltung als die Bewertung der Ausstattung eines städtebaulichen Ensembles (Bill, 1997). Neben diesen festgelegten LoD-Stufen sind auch Mischformen denkbar, die Merkmale der einzelnen genannten Stufen kombinieren.

3.2.2 Distanzabhängiger Detaillierungsgrad

Ein weiteres Kriterium für die Wahl des Detaillierungsgrades eines Objektes ist der Betrachtungsabstand. Hier werden vier Detaillierungsbereiche, auch Maßstabsbereiche genannt, unterschieden (Koppers, 2000):

1. Entfernungsbereich bis $300m$
2. Entfernungsbereich von $300m$ bis $1000m$:
3. Entfernungsbereich von $1000m$ bis $2000m$:
4. Entfernungsbereich über $2000m$

Der Detaillierungsgrad nimmt mit wachsendem Betrachtungsabstand ab. Die Strukturen werden zunehmend grober und im Abstand von mehr als 2km hält Koppers (2000) den Verzicht auf die Objektvisualisierung für praktikabel. Allgemein anwendbare Angaben, welche Objekte oder Objektbestandteile in Abhängigkeit der Situation darzustellen oder wegzulassen sind, werden nicht getroffen.

3.2.3 Differenzierung auf Grund von Sichtbarkeit und Orientierung

In Abhängigkeit der aktuellen Betrachtungssituation wird der benötigte Detaillierungsgrad für jedes Objekt bestimmt (Mori et al, 1999). Der neue Aspekt dieser Betrachtungsweise ist die Beurteilung der Sichtbarkeit anhand der Orientierung.

Jedes Objekt wird basierend auf der aktuellen Betrachtungsposition und der Blickrichtung im Hinblick auf seine notwendige Ausprägung bewertet.

Daraus ergibt sich eine heterogene Struktur von Detaillierungsgraden,

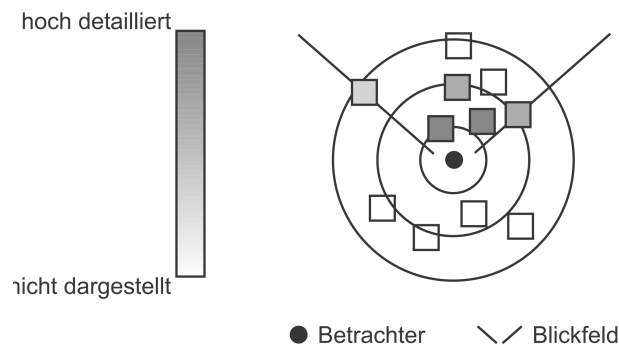


Abbildung 3.1: LOD-Verteilung anhand der Betrachtungssituation

wie in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. Objekte die sich nicht im Blickfeld des Betrachters befinden oder durch andere Objekte verdeckt sind (hell dargestellt) werden nicht visualisiert. Objekte, die sichtbar sind, werden mit abnehmender Betrachtungsdistanz zunehmend detailliert präsentiert (dunklere Darstellung).

Diese Variante ist an die Methoden der Computergrafik angelehnt, die in einem eigenen Abschnitt ausführlicher behandelt werden.

3.2.4 Höhenabhängiger Detaillierungsgrad

Danahy (1999) differenziert nach der Höhe des virtuellen Betrachters über der Geländeoberfläche und teilt in folgende Bereiche ein :

1. Schrägsichten aus einer Höhe über $200m$ (aerial camera views) :

Solche Perspektiven ermöglichen einen strategischen Überblick über das präsentierte Gebiet. Für die Darstellung reichen stark abstrahierte Modelle aus.

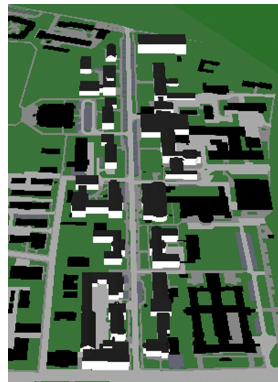


Abbildung 3.2: Ansicht aus großer Höhe

2. Schrägsichten aus einer Höhe zwischen $200m$ und $2m$ (elevated oblique camera views):

Diese Ansichten erlauben die Analyse von ausgedehnten räumlichen Anordnungen. Bei sinkender Betrachtungsentfernung ist eine Erhöhung des Detaillierungsgrades erforderlich. Während die Differenzierung des Bereichs nach oben nachvollziehbar ist, wirft die Grenze nach unten Fragen auf. Der Bereich von wenigen zehn Metern Betrachtungshöhe gleicht in seinen Anforderungen bezüglich des Detaillierungsgrades eher dem Bereich der natürlichen menschlichen Perspektive. Ein Grund dafür ist, dass Höhen dieser Größenordnung beim Blick aus einem Fenster zur alltäglichen Wahrnehmung des Menschen gehören. Daraus resultiert der gleiche Detailanspruch wie im folgenden Fall der menschlichen Umgebungswahrnehmung.

3. Menschliche Umgebungswahrnehmung mit Betrachtungshöhen zwischen $1,8m$ und $1m$ (eye-level experience).



Abbildung 3.3: Ansicht aus mittlerer Höhe

Eine Betrachtung dieser Art simuliert die optische Sinneswahrnehmung der Personen, die sich im Modellbereich befinden. Derlei Betrachtungssituationen erfordern den höchstmöglichen Detaillierungsgrad. Fassaden und Dachformen müssen detailliert dargestellt werden. Bepflanzung und sonstige Straßenumöbel sind für ein realistisches Erscheinungsbild unabdingbar.



Abbildung 3.4: Ansicht aus der menschlichen Umgebungswahrnehmung

3.2.5 Differenzierung auf Grund inhaltlicher Attributierung

Der Grad der Ausgestaltung orientiert sich an der semantischen Bedeutung einzelner Objekte. So werden nach diesem Verfahren zum Beispiel

Nebengebäude weniger detailliert ausgestaltet als das zugehörige Hauptgebäude. Das Unterscheidungsmerkmal kann aber auch auf Gebiete von unterschiedlichem Interesse angewendet werden. Diese Variante kommt zum Tragen, wenn ein städtebaulich interessanter Bereich realitätsnah dargestellt werden soll. Zur Einordnung in die Umgebung reicht es dann aus, diese mit einem deutlich niedrigeren Detaillierungsgrad abzubilden.

3.3 Zonenweise Variation des Detaillierungsgrades

Die im vorangegangenen Text beschriebenen Kriterien werden zum Teil dazu verwendet, einen wohldefinierten Detaillierungsgrad für ein Modell zu bestimmen. Zum anderen können insbesondere die geometrischen Ansätze wie z.B. Distanz- oder Höhenabhängigkeit zur Definition von Zonen gleichen Detaillierungsgrades verwendet werden. Solche Zonen können entweder statisch oder flexibel ausgeprägt sein.

Eine statische Einteilung bedeutet im Allgemeinen, dass um einen räumlich definierten Interessensfokus in festgelegten Abständen konzentrische Zonen gleicher Detaillierung festgelegt werden. Das hat zur Folge, dass die Darstellung in ihrer Qualität abnimmt, wenn sich der Betrachter vom Ort des besonderen Interesses entfernt. Sofern es sich um ein Modell handelt, dessen Zweckbestimmung ausschließlich punktuell ist, reicht diese Vorgehensweise vollkommen aus.

Bei einer dynamischen Variation der LoD-Zonen verschieben sich deren Grenzen zur Zeit der Präsentation des Modells. Grundlage dafür ist immer die aktuelle Betrachtungssituation. Das bedeutet, dass die Position und die Blickrichtung des Betrachters in die Definition der Zonengrenzen einfließen. Die Bestimmung der Grenzen kann dann anhand der bereits vorgestellten Kriterien erfolgen. Da die dort beschriebenen Verfahren keine Grenzen bzw. Vorschriften für deren Berechnung vorgeben, sind die Mindestgrößen und Berechnungsmethoden aus Kapitel 2 anwendbar.

Zusammenfassend betrachtet stellt die Einteilung eines Modells in Zonen gleichen Detaillierungsgrades eine starke Vereinfachung der Realität dar. Um eine optimale Darstellung zu erzielen, muss der Detailreichtum der Zone den Objekten angepasst werden, die dem Betrachter am nächsten liegen. Folglich haben die am weitesten entfernten Objekte der gleichen Zone eine unnötig hohe Auflösung. Erstrebenswert ist es daher, eine kontinuierliche Reduktion der Darstellungsgüte der Objekte zu ermöglichen. Daraus folgt, dass die Bestimmung der Detaillierungsgrade objektweise

erfolgen muss. Diese Strategie soll im folgenden Abschnitt skizziert werden.

3.4 Objektweise Variation des Detaillierungsgrades

Der Detaillierungsgrad einzelner Objekte kann analog zu den LoD-Zonen statisch sein und trotzdem objektweise variieren. Ursachen sind meist unterschiedliche Bedeutung der einzelnen Objekte oder einfach ein unterschiedlicher Stand der Bearbeitung. Diese Sachverhalte sind im Zusammenhang mit dem Prozess der Generalisierung ohne Bedeutung. Gleichwohl muss dieser mögliche Zustand der Ausgangsdaten in den zu entwickelnden Konzepten berücksichtigt werden.

Vielmehr ist die flexible Variation der Darstellungsgüte einzelner Objekte von Interesse. Auf diese Weise kann eine kontinuierliche Reduktion der Detaillierung des Modells ausgehend vom Standpunkt des Betrachters erreicht werden. Dazu ist es notwendig, dass für die Objekte verschiedene Erscheinungsformen vorliegen und diese darüber einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad erhalten. Zu den einzelnen Varianten des Objektes müssen weiterhin sich nicht überschneidende Betrachtungsdistanzen vorliegen, die festlegen, wann welche Variante darzustellen ist. Auf diese Weise kann zu jeder Betrachtungsdistanz eine passend detaillierte Darstellung gewählt werden.

3.5 Schlussfolgerung

Den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Definitionen für Detaillierungsgrade liegen unterschiedliche Kriterien zu Grunde. Für ein automatisierbares Verfahren zur LoD-Generierung eignen sich von diesen nur die berechenbaren geometrischen Kriterien. Die dort definierten Schwellenwerte scheinen allerdings nach heuristischen Verfahren festgelegt worden zu sein, so dass diese sinnvoll und aus Gründen der Automatisierung durch die Erkenntnisse aus dem Kapitel 2 ersetzt werden. Der dort entwickelte formale Zusammenhang zwischen Darstellbarkeit auf der einen, Betrachtungsabstand und Objektgröße auf der anderen Seite stellt die objektive Grundlage für die Ausprägung eines Objektes in einer bestimmten Betrachtungssituation dar.

Somit können die einzelnen Darstellungsobjekte in Abhängigkeit der Betrachtungssituation evaluiert und entsprechend visualisiert werden. Daraus ergibt sich ein distanzabhängiger, objektweise differenzierter und flexibler Detaillierungsgrad. Es folgt, dass der Begriff des Detaillierungsgrades sich vom Status einer Vorschrift zur Beschreibung eines Zustands wandelt. In den vorstehend vorgestellten Vorgehensweisen werden Detaillierungsgrade definiert, dem gemäß die dargestellten Modelle bzw. Objekte modelliert werden. Im Gegensatz dazu stellt der Detaillierungsgrad bei der variablen, von der Betrachtungssituation abhängigen Ausgestaltung der Objekte einen Objektstatus dar. Dieser beschreibt den aktuellen Zustand eines Objektes, der sich mit jeder Bewegung eines Objektes ändern kann.

Daraus leitet sich das Ziel dieser Arbeit ab: Die Herstellung und Speicherung einer LoD-Struktur für die 3D-Präsentation. Dazu wird in Kapitel 5 ein Konzept entwickelt, das die objektweise Variation des Detaillierungsgrades beschreibt.

Kapitel 4

Generalisierung im Kontext von 3D-Gebäudemodellen

Durch die in Kapitel 3 vorgenommene Analyse der verschiedenen Definitionen von Detaillierungsgraden kann als Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass eine distanzabhängige, objektweise und flexible Variation des Detaillierungsgrades notwendig ist, um 3D-Stadtmodelle hoher Auflösung und großer räumlicher Ausdehnung präsentieren zu können. Diese Variation soll unter Berücksichtigung der Mindestgrößen aus Kapitel 2 erfolgen. Die Existenz und die Einführung von Mindestgrößen in den Ableitungsprozess sprechen für den Einsatz kartographischer Methoden. Diese haben zum heutigen Zeitpunkt zwar einen Fokus auf Gebäude- und Siedlungsdarstellungen, behandeln diese Sachverhalte aber ausschließlich im zweidimensionalen Bereich. Demgegenüber stehen die Methoden der Computergrafik, die zwar im dreidimensionalen agieren, aber kein kartographisches Wissen berücksichtigen.

Die Aufgabe dieses Kapitels ist es daher, die vorhandenen Methoden und Techniken sowohl der Kartographie als auch der Computergrafik im Hinblick auf die Anwendbarkeit im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit vergleichend zu untersuchen.

4.1 Einführung

Die Datengrundlage für die Ableitung von dreidimensionalen Stadt- und Landschaftsmodellen wird in der kartographischen Modelltheorie als Primärmodell oder digitales Landschaftsmodell (DLM) bezeichnet. Ein

DLM stellt eine maßstabsunabhängige Beschreibung der erfassten Situation durch Instanzen von Klassen, beschreibenden Attributen und vektorgeometrischen Informationen dar.

Aus dem Herstellungsprozess einer 3D-Darstellung geht ein Sekundärmodell, welches auch als digitales kartographisches Modell (DKM) bezeichnet wird, hervor. Ein solches DKM stellt eine bildhafte Beschreibung der Realwelt dar. Im klassischen Fall ist das DKM eine grafik- und maßstabsbezogene Aufbereitung des zugrunde liegenden Primärmodells oder eines digitalen Landschaftsmodells (DLM).

Als Tertiärmodell bezeichnet man schlussendlich das Abbild der Realität, das der Betrachter durch das Studium des Sekundärmodells bezieht.

Der Schritt vom Primär- zum Sekundärmodell kann eine semantische Generalisierung beinhalten, da im Sekundärmodell nur die Informationen relevant sind, die für die Visualisierung oder allgemein die kartographische Ausgestaltung zwingend benötigt werden. Dies sind geometrische und semantische Daten, die Lage und Ausgestaltung der darzustellenden Datenbankobjekte bestimmen. Somit können beim Übergang vom Primär- zum Sekundärmodell darüber hinausgehende thematische Inhalte wegfallen. Dieser Schritt, der eine semantische Generalisierung darstellt, wird im Kontext dieser Arbeit nicht behandelt. Als Basis für den im folgenden zu entwickelnden Generalisierungsprozess dient ein kartographisches Modell.

Bei dem DKM eines dreidimensionalen Stadtmodells ist die *bildhafte* Beschreibung der Realwelt das Ziel. Es handelt sich nicht um eine grafisch codierte Aufbereitung der zu präsentierenden Inhalte sondern um eine möglichst naturgetreue Nachbildung des visuellen Eindrucks der Realweltobjekte. Im Unterschied zu dem klassischen DKM existiert bei der Präsentation virtueller Stadtmodelle kein einheitlicher Maßstabsbezug. Der Grund dafür ist die Zentralprojektion in Verbindung mit unterschiedlichen Betrachtungsentfernungen der verschiedenen Objekte (vgl. Abschnitt 2.1). Daher müssen für jedes darzustellende Objekt verschiedene Detaillierungsgrade, also Maßstabsbezüge, verwaltet werden, auf die in Abhängigkeit vielfältiger Parameter zurückgegriffen werden kann. Da die Objekte

1. im Hinblick auf ihre visuelle Erscheinung und
2. auf Grund von (kartographischen) Mindestgrößen

manipuliert werden, liegt der Fokus dieser Arbeit ausschließlich auf der kartographischen Generalisierung. Diese behandelt im Gegensatz zur Datenbank- oder Modellgeneralisierung, welche aus einem gegebenen

Datensatz einen reduzierten Datensatz erzeugt, die visuelle Präsentation der räumlichen Situation (Sester, 2001).

Die kartographische Generalisierung begründet sich zum einen durch die begrenzte Darstellungsfläche des gegebenen Darstellungsmediums und zum anderen durch die Signaturierung der Karten. Das gilt unabhängig davon, ob es sich um eine analoge oder eine Bildschirmkarte handelt. Ihr Ziel ist es, ein ansprechendes und lesbares Kartenbild auf dem Papier oder dem Bildschirm zu erhalten. Obwohl als eine der Ursachen für die Generalisierung dreidimensionaler Stadtmodelle ebenfalls die begrenzte Darstellungsgröße der Objekte gilt, unterscheidet sich die Zielsetzung erheblich. Die Tatsache, dass sich die Größe der Präsentationsobjekte durch fotografische Verkleinerung bis zur Unkenntlichkeit reduziert, entspricht der Zielsetzung der visuell richtigen (vgl. Abschnitt 4.2) Abbildung. Denn entfernt sich der Betrachter in der Realwelt von einem Gegenstand, so kann er immer weniger an Details, also Informationen erkennen.

Das angestrebte Ziel einer dreidimensionalen Generalisierung von Gebäudemodellen lautet daher, genau so viele Objektdetails zur Darstellung zu bringen, wie es für den aktuellen Betrachtungsmaßstab eines Objektes notwendig ist. Das heißt, dass nicht mehr erkennbare Objekte und Objektteile aus der Präsentation entfernt werden sollen. Im Gegensatz zur herkömmlichen kartographischen Generalisierung ist es folglich nicht das Ziel, mit dem gegebenen Zeichenraum einen höchst möglichen Informationsgehalt zu vermitteln, sondern ein visuell richtiges Abbild der Realweltsituation zu erzeugen. Oberstes Prinzip der hier angestrebten Generalisierung der dreidimensionalen Stadtmodelle ist somit der Erhalt der *visuellen Richtigkeit* (vgl. Abschnitt 4.2).

Im Hinblick auf diese Zielsetzung ist im Folgenden zu prüfen, ob die komplette Methodik der kartographischen Generalisierungsoperationen (vgl. Hake, Grünreich, Meng 2002) zur Anwendung kommen muss. Schürer (2002) stellt fest, dass der klassische kartographische Generalisierungsprozess zum überwiegenden Teil nur interaktiv lösbar ist, was vor allem durch das Problem, gestalterische und ästhetische Operationen zu formalisieren, begründet wird.

Die spezielle Zielsetzung der visuellen Richtigkeit erlaubt die im folgenden untersuchte Annahme, dass beim Ableiten niedrigerer Detaillierungsgrade auf einen Teil der herkömmlichen Generalisierungsoperationen verzichtet werden kann. Wird diese Annahme bestätigt, so ist die Möglichkeit zur automatisierten Generalisierung erneut zu prüfen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Operationen der kartographischen Generalisierung auf ihre Notwendigkeit im Bereich der dreidimensionalen Stadtmodelle geprüft. Darüber hinaus werden

grundlegende Ansätze von Vereinfachungsstrategien aus der Computergrafik vorgestellt. Als Schlussfolgerung ergibt sich dann die Kombination von anzuwendenden Operationen und Verfahren, die im anschließenden Kapitel formalisiert werden sollen.

4.2 Der Begriff der visuellen Richtigkeit

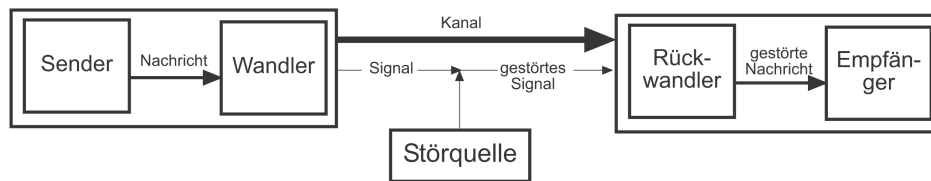
Der Begriff der visuellen Richtigkeit wird im Folgenden als Bewertungsmaßstab für die anzuwendenden Generalisierungsoperationen eingeführt. Unter einer visuell richtigen Abbildung soll eine Darstellung verstanden werden, die dem Betrachter ein Tertiärmodell erlaubt, das kongruent ist zu dem durch die Betrachtung der Realwelt erzeugten Eindruck. Das bedeutet, dass bei gleicher Position des Betrachters und gleicher Blickrichtung ein identisch erscheinender visueller Eindruck produziert wird. Im Sinne der kartographischen Modelltheorie (siehe Abbildung 4.1) wird die Realwelt durch einen Sender ersetzt, der die in ein virtuelles Modell verwandelten Daten über den visuellen Kanal an den Empfänger weiterleitet. Dieser nimmt die Daten auf und bildet auf dieser Grundlage sein Tertiärmodell.

Der Kanal zwischen Sender und Empfänger ist immer durch Störquellen belastet. Eine davon ist die Abbildungsqualität des Bildschirms. Diese wird in Kapitel 2 genutzt, um die Darstellung ohne Einfluss auf das Tertiärmodell des Betrachters vereinfachen zu können. In aller Regel und im Rahmen der folgenden Betrachtung wird dabei ein normalsichtiges menschliches Auge vorausgesetzt. Das bedeutet, dass die virtuelle Präsentation genau die Objekte in dem Detaillierungsgrad umfasst, die ein realer menschlicher Betrachter im realen Umfeld erkennen würde.

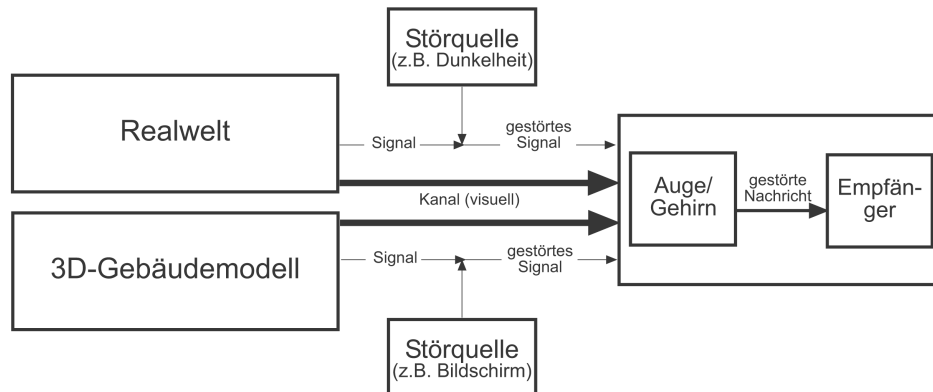
Die visuelle Richtigkeit kann darüber hinaus auch für Sonderfälle gelten. Wenn die virtuelle Darstellung so modifiziert wird, dass sie der Wahrnehmung mit einem Sehfehler entspricht, so ist die Darstellung für diesen Spezialfall, also einen Betrachter mit eben dieser Einschränkung visuell richtig.

Gleiches gilt für optische Instrumente. Stimmt man die Visualisierung auf einen Betrachter ab, der ein optisches Instrument, zum Beispiel ein Fernglas benutzt, so ist die Darstellung auch für diesen Fall als visuell richtig anzusehen.

In beiden Sonderfällen gelten dann andere Mindestgrößen, weshalb sich die Auflösung der virtuellen Modelle anpassen muss.



a) Kartographische Informationsübertragung nach Hake (1994)



b) Übertragung auf die Betrachtung der Realwelt und Gegenüberstellung mit 3D-Gebäudemodellen

Abbildung 4.1: Informationsübertragung im Vergleich

4.3 Untersuchung kartographischer Generalisierungsoperationen

4.3.1 Rein geometrische Generalisierung

4.3.1.1 Vereinfachen

Die Operation des Vereinfachens erzeugt Folgeobjekte, deren geometrische Komplexität, also deren Anzahl an Punkten, Kanten und Flächen reduziert ist. Die charakteristische Form der Objekte bleibt dabei erhalten. Im zweidimensionalen Bereich existiert eine Fülle von automatisierten Ansätzen und Algorithmen für die Vereinfachung von Linien und Gebäudegrundrissen (z.B. Douglas & Peucker 1973, Berger 1974, Meyer 1989, Bobrich 2001). Ziel dieses Prozesses ist es, die digitalen Datenbestände nicht mit geometrischen Details zu belasten, die im Zielmaß-

stab der kartographischen Ausgabe ohnehin nicht mehr darstellbar sind. Zusätzlich wird durch die vereinfachten Geometrien die Lesbarkeit im kleineren Folgemaßstab verbessert.

Aus Kapitel 2 geht hervor, dass Objekte oder Objektteile oberhalb ei-

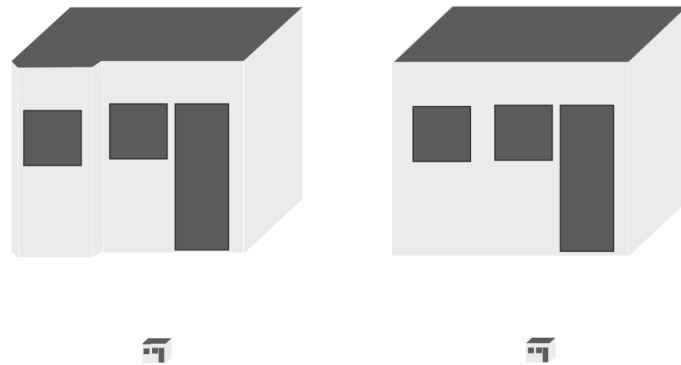


Abbildung 4.2: Vereinfachung

ner von ihrer Größe abhängigen Distanz nicht mehr wahrnehmbar sind. Geometrien, die nicht mehr erkennbar sind, sollen durch den Generalisierungsschritt der Vereinfachung entfernt werden.

Durch diese Operation würden die großen Datenmengen, die bei der Speicherung von virtuellen Stadtmodellen vorliegen, erheblich reduziert. Der Bedarf eines reduzierten Datenvolumens ist auf Grund der durch die Hardware vorgegebenen Rahmenbedingungen dringend erforderlich.

Erschwerend kommt hinzu, dass eine Distribution auf dem Wege des Internets eine noch größere Reduktion der Datenmenge erfordert (Gartner, 1999). Zwar hat sich die Situation seit dem punktuell verbessert, weil zum Beispiel durch DSL auch für private Nutzer schnelle Internet-Zugänge verfügbar sind. Insgesamt bleibt aber die Anbindung der Mehrheit der Anwender an Multimedia-Anwendungen, Virtual-Reality und ähnliche Verfahren unbefriedigend.

4.3.1.2 Vergrößern

Das Vergrößern oder Betonen ist ein Mittel der kartographischen Generalisierung, um Objekte, die gemessen an ihrer Größe nicht mehr zur Darstellung kommen dürfen, zu erhalten. Ein Grund dafür ist die semantische Bedeutung eines Objektes, die es für die gegebene Thematik der kartographischen Darstellung wichtig macht. Auch Objekte, die für die Orientierung oder die Erfassung eines räumlichen Gesamtzusammenhangs

wichtig sind, müssen gegebenenfalls erhalten bleiben. Die grafische Umsetzung der Vergrößerung erfolgt entweder durch die einfache Skalierung der Objektgeometrie, durch die Skalierung einer vereinfachten Geometrie des Objektes oder durch seinen Austausch gegen eine entsprechend dimensionierte Signatur.

Auf den Kontext der dreidimensionalen Stadtmodelle sind die oben genannten Beweggründe für die Vergrößerung von Objekten nicht übertragbar. Ziel ist es, einen naturgetreuen Eindruck der Realwelt zu vermitteln. Die Erkennbarkeit von Realweltobjekten nimmt mit wachsender Betrachtungsentfernung bis zur Unkenntlichkeit hin ab. Die Vergrößerung von einzelnen Objekten steht dem Ziel einer realistischen Darstellung der Objekte diametral gegenüber. Sowohl die Größe und Sichtbarkeit der betroffenen Objekte als auch die Größenverhältnisse der Objekte würden verfälscht, wodurch das Prinzip der visuellen Richtigkeit verletzt würde. Soll mit Hilfe eines dreidimensionalen Stadtmodells die Wirkung eines Planungsobjektes innerhalb eines städtebaulichen Bestandes analysiert werden, so würde dies nach der Durchführung von Vergrößerungen nicht mehr möglich sein. Somit scheidet die Vergrößerung als Generalisierungsoperation im hier gegebenen Kontext aus.

4.3.1.3 Verdrängen

Das Verdrängen ist eine direkte Folge des Vergrößerns (Hake, 2002). Vergrößert man ein Objekt, so belegt es zwangsläufig Raum, den es in der Realwelt oder in den Daten des Ausgangsmaßstabs nicht einnimmt. Dieser Raum kann durch andere Objekte belegt sein, die ebenfalls dargestellt werden müssen, so dass ein grafischer Konflikt entsteht. Ein klassisches Beispiel stellt eine Straße mit angrenzender Bebauung dar.

Das Verdrängen von Objekten, im genannten Beispiel die Bebauung auf Grund der grafischen Vergrößerung der Straße, löst diesen Konflikt auf Kosten der Lagerichtigkeit der Gebäude. Ein automatisierbarer Verdrängungsansatz, der eine konfliktfreie Lösung liefert, ist jedoch trotz umfangreicher Untersuchungen noch nicht in Sicht (Meng, 2001).

Da, wie im vorigen Abschnitt dargelegt, im Zusammenhang mit dreidimensionalen Stadtmodellen kein Vergrößern erfolgt, entfällt die Notwendigkeit des Verdrängens von Objekten im Sekundärmodell.

4.3.2 Geometrisch-begriffliche Generalisierung

4.3.2.1 Zusammenfassen

Das Zusammenfassen ist eine Operation mit der Folge, dass die Anzahl von Objekten reduziert wird. Zusammengefasst werden Objekte, wenn sie einzeln betrachtet die Mindestgrößen für die Darstellung unterschreiten aber als Gruppe erhalten bleiben sollen. Ein weiterer Grund ist, dass der Abstand zwischen zwei Objekten so klein wird, dass er die Mindestgröße für Abstände unterschreitet. Werden dafür geeignete benachbarte Objekte zusammengefasst, so ergibt sich deren sinnvolle, wahrnehmbare Repräsentation. Sind die Objekte topologisch benachbart, so entsteht das aggregierte Objekte durch einfaches Weglassen der gemeinsamen Kante. Gibt es zwischen den Objekten hingegen einen Abstand, müssen die Objekte in zueinander verschoben oder vergrößert werden, so dass ein Zusammenwachsen erreicht wird (Sester, 2001).

Die Generalisierungsoperation des Zusammenfassens kommt für die Anwendung in der Detailreduktion von dreidimensionalen Stadtmodellen in Betracht. Nimmt man eine Häuserzeile als Beispiel, so ist es offensichtlich, dass es einen Schwellenwert für den Betrachtungsabstand gibt, ab dem die einzelnen Häuser optisch nicht mehr voneinander zu trennen sind.

Auch wenn die Gebäude durch einen Zwischenraum getrennt sind, ist diese Trennung ab einem gegebenen Abstand nicht mehr wahrnehmbar. Dies ist dann der Fall, wenn der Abstand schmaler ist als die zugehörige Objektfläche. Dann ist es ohne Beeinträchtigung des realistischen Eindrucks in der Darstellung möglich, diese Gebäude zusammenzufassen.



Abbildung 4.3: Zusammenfassung

Darüber hinaus wird in Abbildung 4.3 deutlich, dass unter Umständen nur Teile des Gebäudes zusammengefasst werden können. Im abgebildeten Beispiel ist eine Zusammenfassung der Gebäudekörper sinnvoll. Das führt zur Einsparung von vier Wandgeometrien, nämlich den beiden Zwischenwänden und jeweils einer Vorder- und Rückwand, die durch Zusammenfassung entfallen. Die separaten Giebel- und Dachflächen müssen hingegen erhalten bleiben, bis auch diese visuell nicht mehr erkennbar voneinander zu trennen sind.

4.3.2.2 Auswählen

Durch die Methode des Auswählens wird nur eine Teilmenge der Objekte in den Folgemaßstab übernommen. Die Selektionskriterien können entweder thematischer oder geometrischer Natur sein. Eine thematische Selektion liegt beispielsweise vor, wenn zwar Wohngebäude aber keine zugehörigen Garagen übernommen werden. Als geometrisches Kriterium ist als Beispiel die Unterschreitung einer Mindestfläche zu nennen.

Im Fall der Generalisierung von dreidimensionalen Stadtmodellen ist diese Operation nicht anwendbar. Um das Prinzip der visuellen Richtigkeit nicht zu verletzen, darf kein Objekt aus der Darstellung entfallen, das zum visuell richtigen Gesamtbild beiträgt. Das bedeutet, dass kein sichtbares Objekt allein aus thematischen Gründen ausgeblendet werden darf. Das ist am Beispiel der oben genannten thematischen Selektion offensichtlich. Stellt man sich eine Kettenhausbebauung vor und lässt die Garagen entfallen, so entsteht ein optisch und nicht zuletzt semantisch falsches Abbild der Situation (Abb. 4.4).

Allerdings kann das Mittel der Auswahl und Selektion der geometrischen Prüfung von Objekten auf ihre Darstellbarkeit hin vorangestellt werden. Dies ist dann möglich, wenn eine Objektart auf Grund ihrer natürlichen Beschaffenheit von Hause aus jegliche Mindestgrößen unterschreitet.

4.3.2.3 Klassifizieren bzw. Typisieren

Die Methode der Klassifizierung stellt eine Zusammenfassung auf der semantischen Ebene eines Modells dar. Beim Übergang von einem digitalen kartographischen Modell zu einem Modell mit geringerer Auflösung kommt es vor, dass Objektklassen mit anderen in einer gemeinsamen Klasse zusammengeführt werden (Schürer, 2002). So ist es beispielsweise denkbar, dass im Ausgangsmodell für Land- und Kreisstraßen separate Klassen existieren, die im Modell kleineren Maßstabs in einer Klasse „außerörtliche Straßen“ aufgehen. Dabei soll, trotz des Entfernens einer Teilmenge

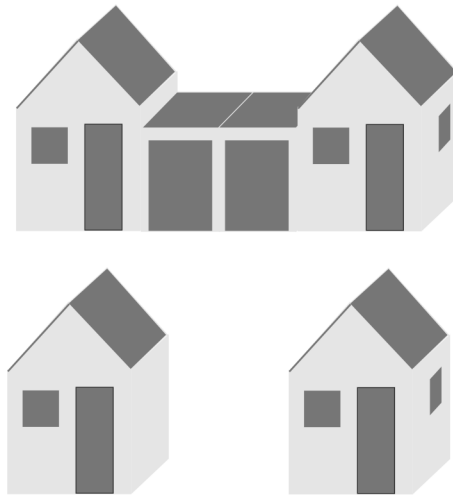


Abbildung 4.4: Auswahl

von Objekten deren typische Struktur erhalten bleiben. Enthält eine Reihe von Häusern zum Beispiel eine Baulücke, so soll diese charakteristische und unter Umständen auch thematisch bedeutungsvolle Eigenschaft auch nach der Generalisierung erkennbar bleiben (Sester, 2001).

Durch die Klassifizierung bzw. Typisierung wird zum einen das Datenmodell vereinfacht und zum anderen der Bedarf an kartographischen Signaturen in der Darstellung des Folgemaßstabs reduziert. Daraus folgt, dass durch die Klassifikation nur Objekte zusammengefasst werden können, die semantisch passend sind. So können Straßen und Wege in eine weniger exakt definierte Klasse übergehen, eine Straße und ein Fluss dagegen nicht. Die Klassifizierung stellt somit eine Restriktion der Zusammenfassung dar.

Die Generalisierung visuell richtiger Stadtmodelle bedarf keiner Klassifizierung. Es kann nur das zusammengefasst werden, was optisch untrennbar wird. Dabei ist es nicht von Interesse, ob die zusammengesetzten Objekte aus der gleichen oder aus semantisch verknüpfbaren Klassen stammen.

4.3.2.4 Bewerten

Die Operation des Bewertens geht der Vergrößerung voran. Die Entscheidung, ob ein Objekt bzw. eine Objektart vergrößert dargestellt werden soll, hängt von deren semantischer oder topologischer Bedeutung ab. Da im Falle der dreidimensionalen Stadtmodelle auf das Mittel der Vergröße-

rung verzichtet wird, erfolgt auch keine Bewertung der Objekte.

4.4 Vereinfachung und Datenreduktion in der Computergrafik

Die interaktive 3D-Computergrafik wird von geometrischen Modellen beherrscht, die aus Polygonen aufgebaut sind. Bevorzugt kommen dabei Dreiecke zur Anwendung. Ein Grund dafür ist die nur wenig komplexe Mathematik, die benötigt wird, um solche Modelle zu handhaben. Außerdem lassen sich polygonale Modelle aus allen erdenklichen Daten erzeugen, die für eine dreidimensionale Darstellung in Betracht kommen. Als Beispiel können

- Punktwolken, die von Laserscannern erzeugt werden,
- Strömungsdaten aus der Meteorologie,
- Implizite Flächen, die durch mathematische Formeln beschrieben werden,
- Spline- bzw. (NURBS)-basierte Modelle, die zum Beispiel von Programmen für die 3D-Modellierung erzeugt werden

genannt werden.

Die Darstellung von Stadtmodellen bedarf einer großen Zahl von Polygonen, die die Kapazität der verfügbaren Hardware oft übersteigt. Das gilt insbesondere dann, wenn eine interaktive Darstellung gefordert ist, was eine Bildwiederholungsfrequenz von mindestens 20Hz (Frames per second) erfordert. Um die Darstellung dieser Modelle zu beschleunigen, werden verschiedene Techniken eingesetzt, die man in invasive und nicht-invasive Verfahren einteilen kann. Diese unterscheiden sich darin, dass invasive Techniken das Modell modifizieren, wohingegen nicht invasive Methoden keine Veränderungen am Modell vornehmen. Um die Unterschiede zwischen diesen Verfahren und vorgenannten kartographisch basierenden Methoden aufzeigen zu können, werden nachfolgend einige Beispiele für derartige Techniken kurz vorgestellt.

4.4.1 Nicht invasive Vereinfachungsalgorithmen

Nicht invasive Techniken beschleunigen die grafische Darstellung, indem sie unsichtbare Polygone bestimmen und aus der Darstellung eliminieren. Eingangsparameter in die notwendigen Berechnungen sind neben den zu visualisierenden Polygonen auch die Position und die Orientierung des fiktiven Betrachters bzw. der virtuellen Kamera. Daraus folgt, dass die Berechnungen nur zur Laufzeit der Präsentation erfolgen können. Unterschieden werden drei Arten der Elimination verdeckter Flächen:

4.4.1.1 Backface-Culling

Ist ein Körper geschlossen, so ist seine Rückseite nicht sichtbar, wenn man voraussetzt, dass keine transparenten Flächen vorliegen. Flächen dieser Art werden mittels Backface-Culling ermittelt und aus der Darstellung entfernt. Um ein rückseitiges Polygon zu sein, muss für den Winkel θ

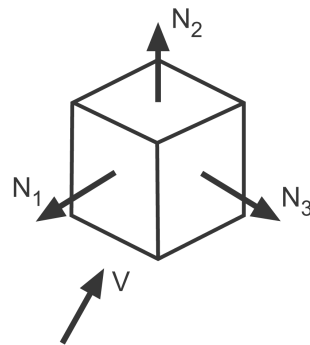


Abbildung 4.5: Backface-Culling

zwischen seiner Normalen \mathbf{N} und dem Vektor der Blickrichtung \mathbf{V} gelten: $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$ (vgl. Abbildung 4.5). Daraus folgt, dass eine rückseitige Wand genau dann vorliegt, wenn gilt

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{V} > 0. \quad (4.1)$$

4.4.1.2 Frustrum-Culling oder Windowing

Beim Frustrum-Culling werden anhand der gegebenen Betrachterposition und -orientierung Objekte, die hinter diesem liegen, aus der Darstellung entfernt. Die Bestimmung für das Frustrum-Culling lässt sich stark ver-

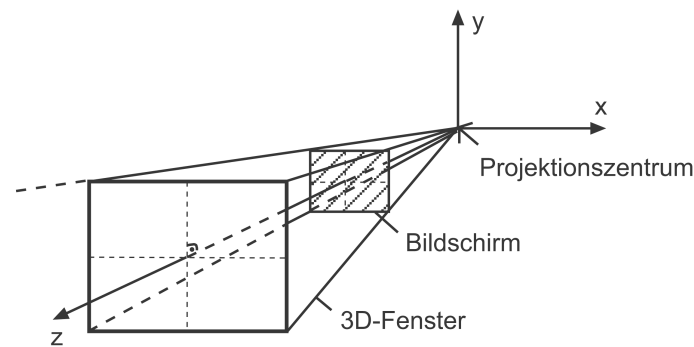


Abbildung 4.6: Frustrum-Culling oder Windowing

einfachen, wenn man das Projektionszentrum der Zentralprojektion für die Berechnung in den Koordinatenursprung legt und die Ebene $z = 1$ als Projektionsebene mit den Grenzen $x = \pm 1$ und $y = \pm 1$ definiert. Dann kann das sichtbare Volumen durch die Gleichungen

$$\frac{z}{x} \geq 1; \frac{z}{-x} \geq 1; \frac{z}{y} \geq 1; \frac{z}{-y} \geq 1 \quad (4.2)$$

beschrieben werden. Ist eine der Gleichungen nicht erfüllt, so liegt der Punkt nicht innerhalb des Gebietes, das der Betrachter aus der jeweiligen Perspektive wahrnimmt, woraus sich die folgende im Hinblick auf die Rechenzeit optimierte Bedingung für die Darstellung im Modell ergibt (Encarnaço, 1975):

$$(z - x \geq 0) \wedge (z + x \geq 0) \wedge (z - y \geq 0) \wedge (z + y \geq 0) \quad (4.3)$$

4.4.1.3 Occlusion-Culling

Die Operation des Backface-Cullings beseitigt Polygone, die nicht sichtbar sind, weil sie die Rückseite eines soliden Körpers bilden. Es gilt aber auch, Flächen zu filtern, die dem Betrachter zwar zugewandt sind, aber durch andere näher gelegene Objekte verdeckt sind. Für die Lösung dieses Problems existieren eine Reihe von Algorithmen, von denen an dieser Stelle der Z-Buffer-Algorithmus als Beispiel für ein Depth-Buffer-Verfahren und der Warnock-Algorithmus stellvertretend für die Flächenkohärenz-Algorithmen vorgestellt werden sollen:

- Z-Buffer-Algorithmus:
Beim Z-Buffer-Algorithmus, auch Depth-Buffer-Algorithmus genannt, werden zwei Matrizen gespeichert. Die Matrix $Farbwert[x, y]$

enthält für jedes Pixel des Displays den darzustellenden Farbwert. In der Matrix $Distanz[x, y]$ wird der Abstand des zugehörigen Polygons zur Projektionsebene abgelegt. Zur Initialisierung werden alle Werte der Farbwert-Matrix auf die Hintergrundfarbe gesetzt und die zugehörigen Entfernungen auf den Wert Unendlich.

Anschließend werden für jedes Polygon alle Bildpunkte $[x, y]$ bestimmt, die nach der Projektion auf die Bildebene innerhalb der Grenzen des Polygons liegen. Für diese Polygone wird die Distanz z berechnet. Wenn $z < Farbwert[x, y]$ ist, dann wird der Farbwert des Polygonpunktes in die Farbwertmatrix eingetragen.

Nach Durchlauf aller Polygone enthält die Farbwertmatrix das korrekt projizierte Bild der darzustellenden Polygone.

- Warnock-Algorithmus (vgl. Newman 1981):
Der Warnock-Algorithmus ist ein Beispiel für ein Objektraum-Verfahren. Der Test, ob ein Polygon ganz oder teilweise zur Darstellung kommt, wird vollständig anhand der Geometrie des Objektraums vollzogen. In der Anwendung des Warnock-Verfahrens werden drei Arten von Polygonen unterschieden (siehe Abb. 4.8a):
 1. Außerhalb liegende Polygone (disjoint polygons) liegen vollständig außerhalb des betrachteten Darstellungsfensters.
 2. Schneidende Polygone (intersecting polygons) liegen ganz oder teilweise innerhalb des Fensters.
 3. Umgebende Polygone (surrounder polygons) enthalten das Betrachtungsfenster vollständig.

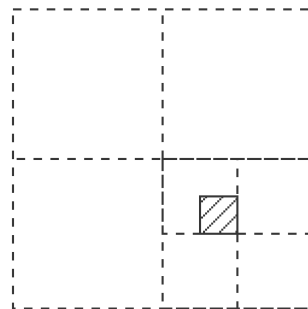


Abbildung 4.7: Rekursive Unterteilung des Darstellungsfensters

Basierend auf dieser Klassifizierung wird folgender rekursiver Algorithmus ausgeführt:

Im ersten Schritt werden alle Polygone aus der Darstellungsliste entfernt, die der ersten Kategorie angehören. Anschließend werden umgebende Polygone detektiert. Der Abstand des nahegelegensten wird dann als z_{max} gesetzt und alle Polygone, deren Entfernung $z > z_{max}$ ist, werden aus der Liste entfernt. Daraufhin wird geprüft, ob sich die für die Darstellung verbliebenen Polygone überlappen. Falls nicht, liegt ein eindeutiger Fall vor und die Polygone können gezeichnet werden. Wenn wie in Abbildung 4.8 **b)** Überlappungen vorliegen, so kann keine eindeutige Entscheidung getroffen werden. Dann wird das betrachtete Darstellungsfenster wieder geviertelt (siehe Abb. 4.7) und der Ablauf erneut durchgeführt. Diese Rekursion wird durchgeführt, bis ein eindeutiger Fall gemäß Abbildung 4.8 **c)** vorliegt und die Objekte gezeichnet werden können.

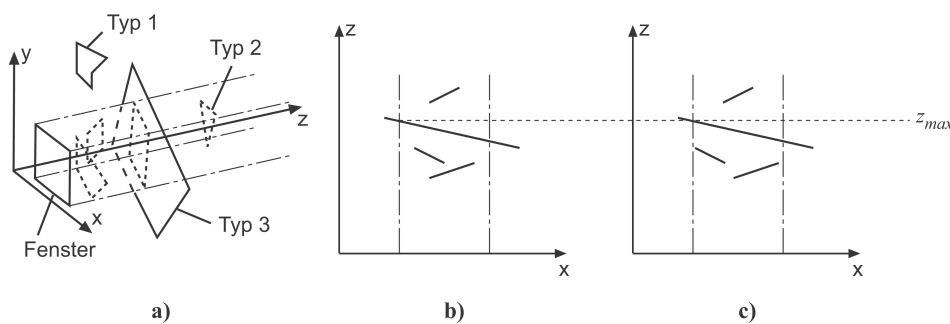


Abbildung 4.8: Analyse eines Fensters

4.4.2 Invasive Vereinfachungsalgorithmen

Als invasive Techniken sind Vereinfachungsalgorithmen zu nennen, die die Anzahl der Polygone des Modells reduzieren. Dies erfolgt objektweise, muss nicht zur Laufzeit erfolgen sondern kann auch im Vorfeld stattfinden. Algorithmen dieser Art vereinfachen das Polygonnetz eines Objektes durch die sukzessive Entfernung einzelner Punkte (Vertexe) bei anschließender neuer Triangulierung der entstandenen Lücken. Das Maß der Auflösungsreduktion wird durch verschiedene Kenngrößen, die in den Algorithmus eingehen, bestimmt.

Drei elementare Vertreter dieser Verfahren sollen an dieser Stelle skizziert werden. Sie stellen die Basis für eine Fülle hochspezialisierter Algorithmen dar, die entweder direkt auf diesen Ansätzen aufbauen oder aber ähnliche Strategien verfolgen. Das Fehlerquadrat-Matrix-Verfahren

(Quadric-Error-Metrics) wurde von Garland und Heckbert (1997) vorgestellt. Bei diesem Algorithmus werden Punktpaare mit Hilfe einer Fehlermatrix analysiert und zusammengefasst. Ein weiterer Vertreter ist das

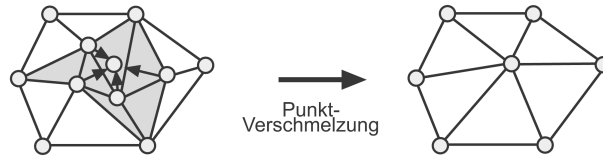


Abbildung 4.9: Zusammenfassung von Punkten

„Vertex-Clustering“-Verfahren (Rossignac, Borrel, 1993). Dort erhält jeder Punkt des Objektes eine Gewichtung. Diese hängt von der Krümmung des Objektes und der Größe der angrenzenden Flächen ab. Anschließend wird ein 3D-Gitter über das Objekt gelegt. Das Polygonnetz wird dann in jeder Gitterzelle auf den Punkt mit der höchsten Gewichtung reduziert. Das Maß der Reduktion hängt von der Maschenweite des 3D-Gitternetzes ab.

Ein zur Laufzeit des Modells anzuwendendes Verfahren stellt die „hierarchische, dynamische Vereinfachung“ dar (Luebke et al., 1997). In einem vorbereitenden Schritt wird das Polygonnetz in eine hierarchische Baumstruktur überführt. Diese beinhaltet alle Punkte und Kanten des Modells. Jeder Knoten der Baumstruktur enthält einen oder mehrere Punkte, die zu einem *repräsentativen* Punkt kollabieren, wenn der Detailreichtum an dieser Stelle reduziert werden soll. Der repräsentative Punkt gehört wiederum zu einem Knoten mit einer Punktgruppe, die wiederum durch einen charakteristischen Punkt dargestellt wird. Nähert sich der Betrachter einem Objekt so werden die dortigen Knoten nach einander aufgeklappt und die Strukturen werden feiner. Im umgekehrten Fall werden die detaillierten Knoten eingeklappt und der zugehörige repräsentative Punkt übernimmt die Darstellung. Dreiecke, deren Punkte entfallen, können gelöscht werden.

Alle genannten Verfahren sind nicht Topologie erhaltend. Für ein Gebäude mit Innenhof könnte das bedeuten, dass dessen Formcharakter bei der Abstraktion nicht erhalten bleibt.

Die genannten Beispiele sollen den Grundcharakter dieser Techniken verdeutlichen. Es existieren eine Fülle von weiteren Verfahren, die auf den genannten Methoden aufbauen oder in ähnlicher Weise funktionieren. Als weitere Verfahren seien genannt:

- Simplification Envelopes (Cohen et al. 1996),

- Progressive Meshes (Hoppe, 1996),
- Image-Driven Simplification (Lindstrom, Turk, 2000),
- Voxel-Based Objekt Simplifikation (He et al. 1995).

4.5 Schlussfolgerung

4.5.1 Verwendung kartographischer Generalisierungsoperationen

Vor dem Hintergrund der Einführung des Aspektes der „*visuellen Richtigkeit*“ reduziert sich die Zahl der beim Ableiten niedrigerer Detaillierungsgrade anzuwendenden Generalisierungsoperationen erheblich. Als wichtigster Operator der Generalisierung virtueller Realitäten stellt sich die Vereinfachung heraus. Auf Basis der in Kapitel 2 entwickelten Mindestgrößen wird die geometrische Komplexität der Objekte mit Hilfe dieser Operation an die jeweilige Betrachtungssituation angepasst. Für die Automatisierung existiert eine Fülle von Ansätzen und Algorithmen (vgl. McMaster, Shea, 1992), die auf ihre Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit auf dreidimensionale Aufgabenstellungen geprüft werden müssen.

Die geometrischen Operationen des *Vergrößerns* und *Verdrängens* kommen nicht zur Anwendung. Sie stellen eine Verfälschung des visuellen Abbildes der Realität dar. Während die isolierte Vergrößerung von Objekten durch Skalierung leicht zu realisieren wäre, stellt der Wegfall der Generalisierungsmethode des *Verdrängens* als Folge der Vergrößerung eine erhebliche Erleichterung der Generalisierungsaufgabe dar. Es gibt selbst im zweidimensionalen Umfeld keinen Verdrängungsansatz, der automatisch zu einer konfliktfreien Lösung führt (Meng, 2001).

Die *Zusammenfassung* von Objekten kommt ebenfalls als Operation in Betracht. Die hier zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten und der Umfang der Anwendbarkeit bedürfen einer eingehenden Prüfung. Ansätze zur automatisierten Lösung dieses Problems werden von Lal (2001) beschrieben.

Legt man rein visuelle Kriterien an das Ergebnis der generalisierenden Maßnahmen an, so kann die Methode der *Auswahl* nur im Vorfeld nützlich sein. Da keine sichtbaren Objekte anhand ihrer semantischen Beschaffenheit eliminiert werden dürfen, kann durch eine Auswahl lediglich Rechenzeit gespart werden, indem Objekte aussortiert werden, die grundsätzlich

keinen Beitrag zum visuellen Gesamteindruck liefern.

Auch die *Klassifizierung bzw. Typisierung* ist semantischen Ursprungs. Sie vereint nicht optisch sondern inhaltlich Gleichartiges. Bei der Visualisierung eines virtuellen Modells ist es aber unerheblich, ob zwei Gebäudeobjekte der gleichen Klasse, zum Beispiel Wohngebäude, angehören, wenn es zu entscheiden gilt, ob diese zusammengefasst werden können. Daraus folgt, dass die Klassifizierung ebenfalls nicht für die automatische Generalisierung von 3D-Gebäudemodellen in Frage kommt.

Auch auf die *Bewertung* kann verzichtet werden, da sie als Grundlage der entfallenden Operationen Vergrößerung und Typisierung dient.

Diese Diskussion ist als Übersicht nochmals in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Operation	Bemerkung	Bedeutung
Vereinfachen	Hauptmittel zur Entfernung der durch Verkleinerung entfallenden Objektteile.	sehr wichtig
Vergrößern	Konträr zur Zielsetzung.	entfällt
Verdrängen	Folge des Vergrößerns.	entfällt
Zusammenfassen	Möglich, allerdings mit neuen (3D-) Restriktionen	wichtig
Auswählen	Als Vorselektion möglich.	weniger wichtig
Klassifizieren	Semantisch motiviert.	entfällt
Typisieren	Sichert semantische Richtigkeit auf Kosten der geometrischen Richtigkeit.	entfällt
Bewerten	Semantische Unterfütterung des Vergrößerns und Typisierens.	entfällt

Tabelle 4.1: Übersicht der Generalisierungsoperationen

4.5.2 Verfahren der Computergrafik

Die Verfahren der Computergrafik unterteilen sich in nicht invasive und invasive Verfahren. Als nicht invasive Methoden wurden im Abschnitt 4.4.1 Backface-, Occlusion- und Frustrum-Culling beschrieben. Diese Verfahren haben gemeinsam, dass sie entweder auf die gesamte Szene angewendet werden oder zur Laufzeit der Präsentation erfolgen. Das hat folgende Konsequenzen:

1. Da die Algorithmen auf die gesamte Szene angewendet werden, muss die komplette Szene auf den Präsentationsrechner übertragen werden. Die Verfahren beschleunigen somit zwar die grafische Performance der Modelle aber sie wirken nicht dem Engpass in der Datenübertragung entgegen.
2. Auch wenn die Culling-Verfahren eine deutliche Verbesserung der Darstellungsgeschwindigkeit mit sich bringen, kosten sie vor und während der Laufzeit ebenfalls hohe Rechenleistung. So müssen zum Beispiel für die Ausführung des Backface-Cullings die Normalen aller Flächen des Modells berechnet werden.

Ein wesentlicher Vorteil der nicht invasiven Methoden ist, dass sie lediglich unsichtbare Geometrien aus der Darstellung entfernen. Darüber hinaus sind sie absolut unabhängig von jeder invasiven Vereinfachungsoperation anwendbar. Daraus folgt, dass sich die nicht invasiven Methoden hervorragend für die Darstellung virtueller Stadtmodelle eignen. Sie können aber nicht den Bedarf nach vereinfachenden bzw. generalisierenden Techniken decken, weil sie das Problem der Übertragung großer Datenmengen unberührt lassen. Dies ist kein Widerspruch, da da sie nach einem Generalisierungsprozess effizient auf den reduzierten Datenmengen eingesetzt werden können.

Die invasiven Verfahren der Computergrafik setzen an der gleichen Stelle an wie die der Generalisierung. Sie operieren objektweise und können im Vorfeld des Renderns ausgeführt werden. Aus diesem Grund konkurrieren die invasiven Verfahren nicht mit den nicht invasiven Verfahren der Computergrafik, sondern sie ergänzen sich, wie weiter oben erwähnt. Auf Grund der Ähnlichkeit zwischen der ebenfalls invasiv wirkenden kartographischen Generalisierung und den invasiven Verfahren der Computergrafik werden diese Vorgehensweisen im Folgenden vergleichend betrachtet.

4.5.3 Generalisierungsmethoden der Kartographie und der Computergrafik im Vergleich

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt ausgeführt, setzen die invasive Vereinfachung der Computergrafik und die kartographische Generalisierung an der gleichen Stelle an. Durch aktive Veränderung der Geometrien der Modelldaten wird die geometrische Komplexität reduziert. An den Beispielen aus Abschnitt 4.4.2 wird deutlich, dass die Methoden der Computergrafik ihren Ursprung in der Datenverarbeitungstechnik haben. Die Parameter, die das Verhalten des Vereinfachungsschrittes steuern, sind mathematischer bzw. statistischer Natur oder leiten sich aus Erfahrungswerten ab. Zur ersten Gruppe gehören beispielsweise die Verfahren von Garland und Heckbert (1997). Das „Vertex-Clustering-Verfahren“ stellt hingegen einen Vertreter der zweiten Gruppe dar. Zwar werden die Gitterpunkte im ersten Schritt anhand der Krümmung gewichtet, aber das Maß der Vereinfachung wird durch die Größe der Voxel bestimmt, die das 3D-Gitter zur Auswahl der verbleibenden Punkte hat.

Die zusammenfassende Betrachtung der Wirkungsweise der computergrafischen Verfahren ergibt, dass sie erstens glättend wirken und zweitens die nicht Form bildenden Punkte aus dem Netz entfernen. Diese Vorgehensweise ist im Falle von üblichen Gebäuden nicht effektiv. Diese bestehen aus Flächen, die mehr oder minder eben sind und in den meisten Fällen durch annähernd rechte Winkel miteinander verbunden sind. Solche ebenen Flächen bieten kein Einsparungspotenzial an Stützpunkten, und eine Glättung der rechtwinkligen Verbindungen führt zu unerwünschten Ergebnissen.

In der Kartographie stellen die kartographischen Mindestgrößen die Basis der Generalisierung dar. In Kapitel 2 wurden diese für die dreidimensionale Darstellung von Stadtmodellen basierend auf den physiologisch bedingten Minimaldimensionen hergeleitet. Diese Mindestgrößen lassen sich nicht mit den Methoden der Computergrafik verknüpfen, da deren Parameterwelt wie oben beschrieben statistisch mathematischer Natur ist. Daher ist deren gezielte Anwendung unter kartographischen Gesichtspunkten der Generalisierung nicht möglich.

Viele Verfahren der Computergrafik sind nicht Topologie erhaltend. Auch diese Eigenschaft ist für die Generalisierung im kartographischen Sinne nicht tragbar. Haben zwei Gebäude gemeinsame Wände, so kann nicht gewährleistet werden, dass dieses Merkmal nach der Vereinfachung beider Objekte erhalten bleibt. Darüber hinaus ist bei der Anwendung dieser Verfahren nicht sicher gestellt, dass beim Wechsel in eine niedrigere Detailstufe die charakteristische Form erhalten bleibt. Darüber hinaus folgen

die Methoden der Computergrafik dem Bestreben, allgemeingültig zu sein (Mayer, 2000). Daraus folgt, dass die Charakteristika von bestimmten Objektklassen, die entweder zu einem besseren Vereinfachungsergebnis beitragen oder den Aufwand der Algorithmen reduzieren, nicht berücksichtigt werden.

Damit die Vereinfachung von virtuellen Stadtmodellen kartographischen Ansprüchen genügen kann, müssen also Vorgehensweisen gefunden werden, die die Einhaltung und Anwendung der in Kapitel 2 abgeleiteten kartographisch motivierten Mindestgrößen ermöglichen. Die Kartographie bietet einige für diesen Kontext nutzbringende Methoden an. Im folgenden Kapitel soll daher ein Verfahren entwickelt werden, das die Generierung verschiedener Abstraktionsgrade (LoDs) anhand kartographischer Methoden und unter Berücksichtigung kartographischer Mindestgrößen mit dem Ziel, die visuelle Richtigkeit der damit abgeleiteten Modelle zu erhalten.

Kapitel 5

Erzeugung niedriger Detaillierungsgrade

Für die Erzeugung niedrigerer Detaillierungsgrade in 3D-Gebäudemodellen ist nunmehr ein automatisierbares Verfahren zu entwickeln, welches zum einen die Mindestgrößen aus Kapitel 2 heranzieht und zum anderen die Zielsetzung distanzabhängiger, objektweiser und flexibler Detaillierungsgrade aus Kapitel 3 umsetzt. Da dafür die kartographischen Verfahren, wie in Kapitel 4 dargelegt, gut geeignet erscheinen, werden zunächst bestehende Verfahren für Gebäude- und Siedlungsdarstellungen aus dem zwei- und dreidimensionalen Bereich vorgestellt, um darauf aufbauend ein eigenes Konzept zu entwerfen.

5.1 Stand der Forschung im zweidimensionalen Bereich

Seit jeher liegt ein besonderes Augenmerk der Generalisierung auf der Behandlung von Gebäude- und Siedlungsdarstellungen. Ein Grund dafür ist die besondere Bedeutung, die solche Gebiete für einen Großteil der kartographisch geprägten Anwendungen haben. Darüber hinaus weisen Siedlungen und die darin enthaltenen Gebäude charakteristische Eigenschaften auf, die sich wesentlich von anderen topographischen Objekten, wie z.B. Wasserläufen oder Straßen unterscheiden.

Diese Charakteristika, wie Geradlinigkeit und Rechtwinkligkeit von Wänden, müssen zum einen erhalten bleiben. Sie erlauben zum anderen Annahmen, die notwendigerweise in den Prozess der Generalisierung

einfließen. Das macht sich Staufenbiel (1973) zu Nutze und erstellt für die Generalisierung von großmaßstäbigen Gebäudegrundrissen ein Regelwerk, welches exakt vorgibt, wie mit Seitenwänden zu verfahren ist, deren Seitenlängen zu kurz sind, um erkennbar dargestellt zu werden. Berger (1974) behandelt das Problem im Hinblick auf kleinere Maßstäbe, insbesondere den Übergang von der topographischen Karte im Maßstab 1:25.000 (TK25) in den Maßstab 1:50.000. Hier liegen schon im Ausgangszustand stark formvereinfachte Gebäude vor, so dass das Hauptaugenmerk seiner Arbeit auf der Zusammenfassung und Typisierung der Siedlungsstrukturen liegt.

Grünreich (1985) stellt dem Ansatz von Staufenbiel eine geometrisch begriffliche Generalisierung voran. Dabei werden unter Berücksichtigung des Objektschlüsselkatalogs (OSKA) der AdV¹ Objekte zusammengefasst, bevor die Formvereinfachung durchgeführt wird.

Beim Ansatz von Meyer (1989) werden die Gebäude nach ihrer Form klassifiziert. Neben der Rechteckform werden L-, T-, U- und Z-artige Grundrisse differenziert. Diese Formen werden mit Hilfe von Korrelationsverfahren der Bildverarbeitung detektiert. Die Kenntnis der elementaren Gebäudeform erleichtert die Beibehaltung dieser Charakteristika im generalisierten Modell.

Eine weiteres Verfahren zur Vereinfachung von Gebäudedaten stellt Mayer (2000) vor. Er bedient sich dabei der Erkenntnisse der Scale-Space-Theorie, die ihren Ursprung in der Signaltheorie hat. Dort werden die Daten systematisch vereinfacht und „hoch frequente“ Details werden entfernt. Der Scale- oder auch Maßstabsparameter $\sigma \in R_+$ beschreibt dabei die aktuelle Maßstabsebene. Mit dieser Größe wird also das Maß der Generalisierung festgelegt. Ein solcher Scale-Space lässt sich auch auf der mathematischen Morphologie definieren. Die elementaren Operationen des morphologischen Scale-Space sind Erosion, Dilation, Öffnung und Schließung. Mit Hilfe dieser Operationen können Formelemente eines als Polyeder modellierten Gebäudes erkannt werden und in Abhängigkeit des Maßstabsparameters σ eliminiert werden.

Einen weiteren Beitrag zur Generalisierung insbesondere von Gebäuden und Siedlungsdarstellungen liefert Sester (2000). Hier werden die von Staufenbiel propagierten Regeln zur Formvereinfachung der Gebäudegrundrisse zur Herstellung einer Näherungslösung für die Generalisierung genutzt. Anschließend wird das Modell parametrisiert, indem man die Gebäude in Abschnitte entlang ihrer Hauptachsen überführt. Diese Parameter werden dann nach der Methode der kleinsten Quadrate neu geschätzt. Dazu werden die ursprünglichen Kanten als Funktion dieser

¹Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD

Parameter formuliert. Durch die Ausgleichung wird erreicht, dass der generalisierte Grundriss optimal an den ursprünglichen Gebäudegrundriss angepasst wird.

Bobrich (2002) beschreibt das Programmsystem „Change“ als Methodensammlung zur Generalisierung. Dieses enthält ein Modul namens „Buildings“, das für die Generalisierung von Gebäudeumrissen zuständig ist. Nach einer Konsistenzprüfung der Ausgangsdaten auf Selbstschnitte und Überprüfung der Orthogonalität erfolgt die Vereinfachung und Zusammenfassung der Gebäudegrundrisse.

5.2 Stand der Forschung im dreidimensionalen Bereich

Der zunehmende Bedarf an dreidimensionalen Modellen und Präsentationen erfordert die Ausweitung der zuvor genannten Strategien auf diesen Bereich. Erfolgt die Generalisierung zum Zwecke der Präsentation der Modelle, so wird das ohnehin schon komplexe Feld der kartographischen Generalisierung nochmals erschwert. So verwundert es nicht, dass sich die einzelnen Beiträge oftmals nur mit ausgewählten Teilaspekten der Problematik befassen.

So untersuchen Lal und Meng (2001) insbesondere das Problem der Aggregation. Es werden Bedingungen definiert, die für die Zusammenfassung von Gebäuden von Bedeutung sind. Unterschieden werden Bedingungen für einzelne Gebäude und Gebäudegruppen. Für einzelne Gebäude sind das im einzelnen:

- Die Gebäude sollen nah an ihrer Ausgangsposition verbleiben und dabei ihre Orientierung und ihre charakteristische Form behalten.
- Ihre Größe muss ein gegebenes Mindestvolumen überschreiten, um dargestellt zu werden. Hat ein Gebäude allerdings eine besondere Funktion, zum Beispiel zur Orientierung, so sollte es erhalten bleiben.
- Das äußere Erscheinungsbild, wie Textur und/oder Farbe sollten erhalten bleiben.

Im Bezug auf Gruppen von Gebäuden werden folgende Bedingungen genannt:

- Die Topologie muss erhalten bleiben.
- Die Orientierung der Gebäude relativ zueinander soll beibehalten werden.
- Die Struktur der Gebäudeanordnung soll charakteristisch bleiben.
- Gebäude, die eine besondere Form haben, sollen so dargestellt werden, dass sie erkennbar bleiben.
- Gebäude, die sich in ihrer Funktion deutlich unterscheiden, sollen nicht zusammengefasst werden.

Sester (2002) untersucht die Generalisierung in Bezug auf bestimmte Anwendungsgebiete. So werden generalisierende Maßnahmen eingesetzt, um die Orientierung und das Auffinden eines Objektes zu erleichtern. Zu diesem Zweck werden nicht relevante Objekte in ihrer Form vereinfacht und zusammengefasst. Im Gegensatz dazu wird das hervorzuhebende Objekt nicht vereinfacht, sondern mittels Skalierung betont.

Auch Thiemann (2002) beschreibt einen Ansatz zur Generalisierung von dreidimensionalen Gebäudedaten. Grundlegend für die dort beschriebenen Methoden ist die Vorgabe, dass keine fotorealistischen Darstellungen Ziel der Bemühungen sind, sondern kartographischen Standards genügt werden soll. Für die geometrische Vereinfachung wird ein Verfahren der Computergrafik (Garland, Heckbert et. al., 2001) eingesetzt. Durch Verschneidung der Objekte mit deren eigenen Begrenzungsflächen werden erhabene oder eingeschnittene Gebäudeteile extrahiert, ggf. entfernt oder aufgefüllt. Darüber hinaus werden Strategien zur Zusammenfassung und Typisierung präsentiert. Um die zu speichernden Datenmengen möglichst gering zu halten, wird eine differentielle Speicherung der einzelnen Detaillierungsgrade vorgeschlagen, wie in Abbildung 5.1 verdeutlicht wird. Auf diese Weise kann die Datenmenge reduziert werden.

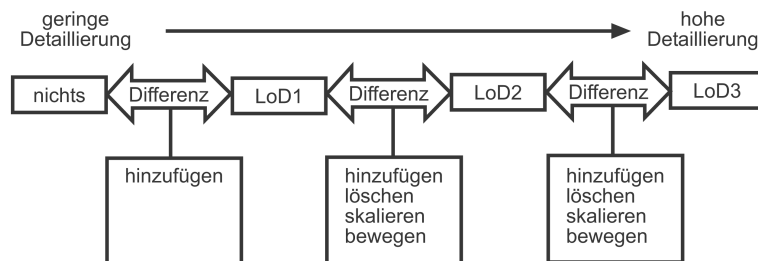


Abbildung 5.1: Differentielle Übertragung von LoDs

Einen Ansatz aus dem Bereich der Photogrammetrie stellt Kada (2002) vor. Vor der eigentlichen Generalisierung werden reguläre Strukturen (parallele Kanten, rechtwinklige Schnitte und planare Dachflächen) analysiert. Die Notwendigkeit dieser vorhergehenden Analyse entsteht in diesem Fall durch die photogrammetrisch ermittelte Datengrundlage, die diese Bedingungen auf Grund von Messungenauigkeiten nicht exakt repräsentiert. Anschließend erfolgt die Generalisierung, die wie beim Verfahren nach Sester (2000) nach der Methode der kleinsten Quadrate erfolgt.

Terribilini (2001) legt sein Augenmerk ausschließlich auf die Variation des Detaillierungsgrades der Geländeoberfläche. Dabei handelt es sich in der Regel um eine triangulierte Punktwolke, so dass die beschriebenen Verfahren an die computergrafischen Methoden aus Abschnitt 4.4 angelehnt sind.

5.3 Ausgangssituation und Zielsetzung

Anwendungsbereiche für generalisierte bzw. LoD-strukturierte Gebäudemodelle sind großflächige Gebiete mit einer entsprechend hohen Anzahl von Objekten. Dies sind überwiegend in ihrer Struktur heterogene Gebäude. Die Spannweite der zu erwartenden Formen reicht von Garagen als einfache Quader über Einfamilien- und Reihenhäuser als Polyeder meist geringer Komplexität bis hin zu architektonisch anspruchsvollen Gebäuden oder historischen Prachtbauten.

Die verschiedenartige Beschaffenheit der Gebäude ist ein Grund für die verschiedenen Methoden, mit denen die unterschiedlichen Typen bevorzugt erfasst werden. Weitere Gründe dafür sind unterschiedliche Mengen von Gebäuden sowie zeitliche, finanzielle und technische Beweggründe. Daraus resultieren zum einen unterschiedliche Datenformate, in denen die Objekte vorliegen. Das können zum einen bekannte 3D-Datenformate wie VRML², Java3D oder 3D-Studio Max sein, aber auch Datenbankinhalte wie ALKIS³ sind als Datengrundlage geeignet. Zum anderen ergeben sich aus den genannten Gründen unterschiedliche Detaillierungsgrade, in denen die Objekte erfasst werden.

Diese heterogene Datengrundlage soll durch im folgenden zu entwickelnde Methoden behandelt werden können, mit dem Ziel

²Virtual Reality Modeling Language (<http://www.w3d.org>)

³Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem der AdV

- die stufenweise Vereinfachung der Geometrien basierend auf den in Kapitel 2 hergeleiteten Mindestgrößen vorzunehmen und
- das Ergebnis in Datenstrukturen (vgl. Kapitel 7) zu übertragen, die für die progressive, d.h. von der Darstellungssituation abhängige, Übertragung der Modelle auf Client-Rechner in verteilten Umgebungen abgestimmt sind.

Durch die Anwendung der oben genannten Methodik werden die Ausgangsdaten sowohl generalisiert als auch migriert, was sich wie folgt begründen lässt:

1. $LoD_n \rightarrow LoD_{n-1}$:

Dieser Aspekt spiegelt den eigentlichen Generalisierungsschritt wieder. Aus einem Objekt gegebenen Detaillierungsgrades wird ein in seiner Granularität reduziertes und für die Weiterverarbeitung entsprechend strukturiertes multiskaliges Modell erzeugt, das sich zur Speicherung in einer multiskaligen Datenbank eignet.

2. $LoD_n \rightarrow LoD_n$:

Durch den vorgenannten Generalisierungsprozess wird ein Eingangsobjekt in seine Objektteile zerlegt. Die Aggregation der Objektteile ergibt wieder das Ausgangsobjekt. Somit ergibt sich durch die Generalisierung gleichzeitig eine Migration der Objekte in die vorgesehene Datenstruktur (vgl. Kapitel 7).

Obwohl die im Folgenden beschriebenen Methoden nicht auf möglicherweise vorhandene semantische Informationen in den Ausgangsdaten zurückgreifen, werden folgende Annahmen bezüglich der Beschaffenheit von Gebäuden getroffen:

- Gebäude sind fest mit der Erdoberfläche verbunden.
- Gebäude bestehen aus einem Gebäudekörper, der von Flächen begrenzt wird, die näherungsweise senkrecht sind und
- einem Dachaufbau, der das Gebäude nach oben abschließt. Dieser wird nach oben durch beliebig geneigte Flächen und nach unten durch horizontale Flächen begrenzt. Das Vorhandensein eines Dachaufbaus ist fakultativ, da ansonsten ein Flachdach angenommen wird.

5.4 Besondere Aspekte der Gebäudegeneralisierung im dreidimensionalen Kontext

5.4.1 Der Einfluss der wechselnden Perspektive

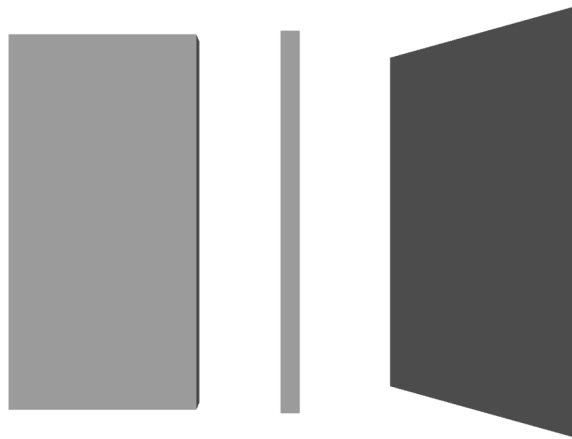


Abbildung 5.2: Einfluss der wechselnden Perspektive

Im Hinblick auf die Darstellung in interaktiven Präsentationsmodellen muss beachtet werden, dass die Modellobjekte aus wechselnden Perspektiven betrachtet werden. Diese reichen von der Perspektive eines virtuellen Spaziergängers bis hin zur Vogelperspektive. So kann die scheinbare Größe und damit die Sichtbarkeit eines Volumenelements, dessen Ausdehnung sich in verschiedenen Richtungen deutlich unterscheidet, in Abhängigkeit von der aktuellen Perspektive stark differieren. Das lässt sich in Abbildung 5.2 leicht nachvollziehen. So kann ein Vordach wegen seiner geringen Bauhöhe beispielsweise aus der Perspektive eines Fußgängers nicht erkannt werden. Von oben betrachtet ist das Objektteil wegen seiner großen Grundfläche bei gleicher Betrachtungsdistanz noch gut erkennbar. Gleiches gilt auch für Brücken und Überführungen, wobei bei diesen erschwerend hinzukommt, dass diese Geometrien wichtige topologische Informationen tragen. Ein Beispiel für den umgekehrten Fall sind Mauern, die auf Grund ihrer geringen Tiefe aus der Höhe schnell unsichtbar werden, aber für den virtuellen Fußgänger erkennbar bleiben und für die visuelle und sachliche Richtigkeit der Darstellung von großer Bedeutung sind.

5.4.2 Die Anwendung der Mindestgrößen

In der zweidimensionalen Generalisierung sind kartographische Mindestgrößen das entscheidende Kriterium der geometrischen Generalisierung. So werden im Falle von Gebäuden Kanten des Grundrisses ermittelt, deren Länge im Zielmaßstab die Mindestgröße unterschreiten. Diese werden entfernt und der Umring des Gebäudes wird nach bestimmten Algorithmen geschlossen. Allgemeiner formuliert werden im 2D-Bereich eindimensionale also $n-1$ -dimensionale Objektteile für den Ansatz der Generalisierungsoperation herangezogen.

Somit lässt sich der Ansatz der Mindestgrößen auf die Generalisierung dreidimensionaler Gebäudedarstellungen übertragen. Das Kriterium für die Entscheidung, ob ein Element für einen gegebenen Detaillierungsgrad generalisiert werden muss oder nicht, sind hier also Flächen.



Abbildung 5.3: *Unterschiedliche Bewertung von Objektteilen gleicher Größe*

Volumen, die nicht generalisiert werden dürfen, müssen als minimale Voraussetzung eine Fläche enthalten, deren Hauptachsen die Mindestgröße erreichen oder überschreiten. Darüber hinaus muss diese Fläche umgangssprachlich formuliert freistehend sein. Das gilt in Abbildung 5.3 für die Mauer neben dem Gebäude. Formal gesprochen treffen die Normalengeraden der beiden Mauerflächen, die die Mindestgrößen überschreiten, nicht auf ein anderes Objektteil des Gebäudes.

Direkt vor dem Haus ist ein Objektteil angebaut, das die gleichen Ausmaße hat, wie die angrenzende Mauer. Hier treffen die Normalengeraden der beiden großen Begrenzungsflächen auf den Gebäudekörper und sind somit nicht zu berücksichtigen. Für die Beurteilung der Sichtbarkeit sind

die wesentlich kleineren Seitenflächen heranzuziehen, deren Normalenvektoren weder das Gebäude noch den Boden treffen. Daraus folgt, dass der Anbau früher ausgeblendet werden darf als die Mauer, obwohl die Form und die Größe mit der benachbarten Mauer übereinstimmen.

Es können also auch Volumen entfernt oder vereinfacht werden, die eine Fläche aufweisen, die die Mindestgrößen überschreitet. Damit wird den im vorigen Abschnitt angesprochenen wechselnden Perspektiven Rechnung getragen.

Im Fall von Einbuchtungen sind zwei Fälle zu unterscheiden (siehe Abb. 5.4). Der erste Fall, nämlich eine ausgesparte Ecke, wird durch die Aufteilung in zwei Gebäudeteile gelöst, die dann in die weitere Analyse eingehen. Der zweite Fall betrifft eine Einbuchtung innerhalb einer Wand. In diesem Fall ist das Aussparungsvolumen für die Bestimmung der Darstellbarkeit heranzuziehen (Abb. 5.4).

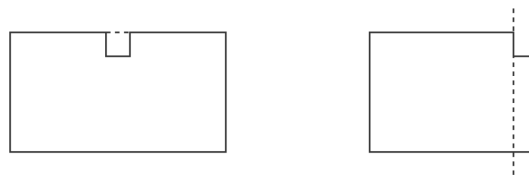


Abbildung 5.4: Unterscheidung von Einbuchtungen

5.4.3 Geometrietyppwechsel

Wird der Detailreichtum von Objektbeschreibungen und -darstellungen im Zuge der Generalisierung reduziert, so kann dies einerseits durch Vereinfachung der gegebenen Geometrie unter Beibehaltung des Geometrietyps erfolgen. Andererseits ist auch ein Wechsel des Geometrietyps möglich. Im zweidimensionalen Umfeld können somit flächenhafte Geometrien sowohl auf linienhafte als auch auf punkthafte Geometrien reduziert werden. Linienhafte Geometrien können zu punkthaften konvertiert werden.

Erweitert auf volumenhafte Objektgeometrien (v) resultieren neue mögliche Typwechsel auf die drei kleinerwertigen Geometrietypen. Nicht von Interesse sind punkthafte Objekte im Bereich der Darstellung. Zwar gibt es eine Reihe von dreidimensionalen Objekten, die in der Datenbank von ihrem Grundriss her punkt- oder linienhaft gespeichert werden, jedoch sind für den generalisierenden Eingriff in die Visualisierung die zu *präsen-tierenden* Geometrien von Interesse. Diese sind im Kontext dreidimensionaler Stadtmodelle volumen- oder flächenhaft. Daraus folgt, dass der zu



Abbildung 5.5: Geometriotypwechsel (volumenhaft nach flächenhaft) am Beispiel einer Mauer

betrachtende Geometriotypwechsel der von volumenhaften zu flächenhaften Objekten ist.

Die Reduktion eines Körpers auf eine Fläche ist genau dann sinnvoll, wenn ein Körper vorliegt, der in eine Richtung eine sehr geringe Ausdehnung hat. Dann reicht die Repräsentation durch eine Fläche aus, wodurch sich die in der Präsentation darzustellenden Flächen drastisch reduzieren lassen, wie in Abbildung 5.5 deutlich wird. Diese ist in der Frontansicht im rechten Teil der Abbildung ein unverzichtbares Element, welches weithin erkennbar ist. Betrachtet man die Situation hingegen aus der Vogelperspektive (rechte Seite), so ist die Mauer wegen der geringen Tiefe schon frühzeitig nicht mehr erkennbar. Somit kann der Mauerkörper ohne Beeinträchtigung der visuellen Richtigkeit als einfache Flächengeometrie dargestellt werden.

5.5 Algorithmus

Wie bereits im Abschnitt 5.3 formuliert, sollen als Ergebnis des Vereinfachungsalgorithmus nicht nur vereinfachte und zusammengefasste Geometrien für die niedrigeren Detaillierungsgrade erzeugt werden. Die Erzeugung von Repräsentationen für verschiedene LoDs, die von einander unabhängig sind, würde im Falle multiskalierter Präsentationsmodelle dazu führen, dass für ein Objekt jeweils ein komplettes Modell für jeden Detaillierungsgrad vom Server zum Client übertragen werden muss. Um das zu verhindern, sollen außerdem Differenzen zwischen den einzelnen Detaillierungsgraden bzw. Detaillierungszuständen isoliert werden, um beim Wechsel von einer LoD-Zone in die nächste nur diese laden bzw. entladen zu können.

Daraus folgt, dass Objektteile T_i , die beim Übergang vom LoD_n nach LoD_{n-1} wegfallen, isoliert werden müssen. Als Ergebnis dieser Bemühungen erhält man den Hauptteil O und die Objektteile T_i .

5.5.1 Die Separation von Objektteilen

Das Auffinden und Separieren orientiert sich am Algorithmus von Garland, Heckbert et al. (2001). Der Algorithmus detektiert und trennt untergeordnete Objektteile von beliebigen Polyedern. Lässt man die isolierten Objektteile weg, so erhält man eine vereinfachte Repräsentation des Polyeders. Die Grundidee des Verfahrens ist, dass jede Fläche eines Polyeders den Raum in drei Regionen einteilt, nämlich *innerhalb (IN)*, *darauf liegend (ON)* und *außerhalb (OUT)*. Abbildung 5.6 zeigt die Vorgehensweise in der Grundrissdarstellung. Der Bereich *darauf liegend (ON)* wurde zur Verdeutlichung ausgedehnt. Aus der Einteilung in die oben genannten Zonen ergeben sich eindeutig ein Grundkörper und ein Objektteil.

Es gibt aber auch Merkmale, insbesondere Einbuchtungen an Ecken, die

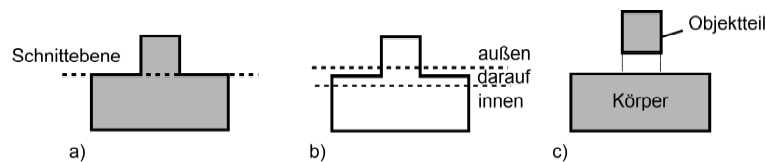


Abbildung 5.6: Die Trennung von Objektteilen

nicht mit einer einzelnen Schnittebene ermittelt werden können. Für diese Fälle muss mit einer zweiten adjazenten Schnittebene gearbeitet werden, wie die untenstehende Abbildung 5.7 verdeutlicht. Im Schritt a) sind hier zwei adjazente Schnittebenen zu erkennen, die den Objektraum wiederum in innen- und außen liegende Bereiche unterteilen. Die so doppelt klassifizierte Flächen des Polyeders werden nun in einen Cluster-Graphen (c) eingetragen, wobei adjazente Flächen, die die gleiche Klassifizierung haben, ein Cluster bilden. Diese Cluster sind gleichbedeutend mit möglichen Objektteilen, wobei die Knoten mit den Flächen drei und sechs ungültig sind, weil sich aus den beinhalteten Flächen zuzüglich der Schnittebenen kein Körper bilden lässt. Aus den Flächen der anderen beiden Knoten des Graphen ist das möglich, und es lassen sich die beiden in d) dargestellten Objektteile bilden. Die Klassifizierung in Hauptkörper und Objektteil wird, sofern benötigt, anhand weiterer Kriterien wie zum Beispiel dem Volumen der Körper vornehmen.

Nach dieser anschaulichen Beschreibung der Vorgehensweise sollen nun die einzelnen Schritte des hier angestrebten erläutert werden. Ausgangsdaten seien geschlossene Polyeder:

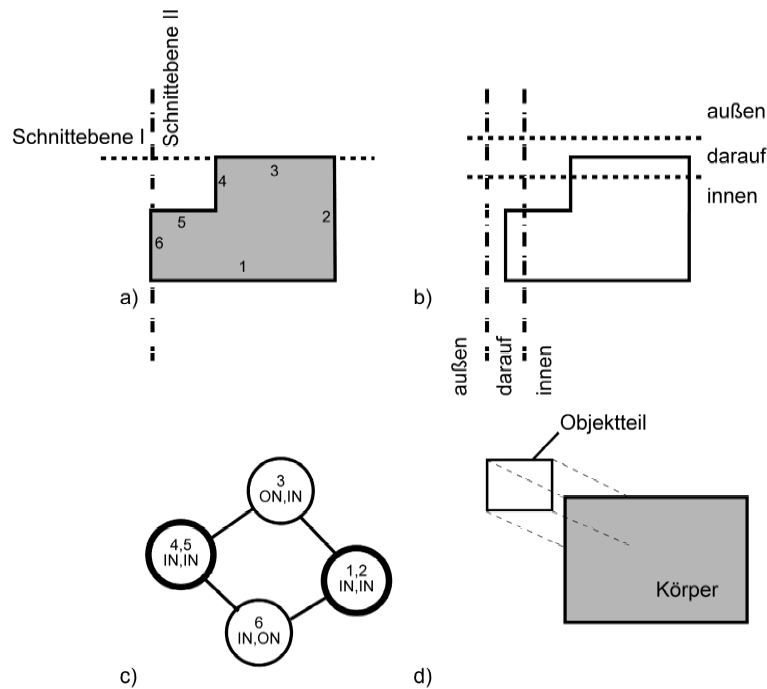


Abbildung 5.7: Detektion von Eckversprüngen

1. Eingangsdaten:
Damit Objektteile extrahiert werden können, müssen die zu verarbeitenden Körper konkav sein. Die durch die Separation erzeugten Anbauteile sind immer konvex.
2. Aufspaltung:
Der behandelte Körper wird mit einer oder mehrerer seiner Begrenzungsflächen verschnitten. Die von diesen Flächen geschnittenen Flächen werden aufgespalten. Das heißt, sie werden so zerlegt, dass zwei Flächen entstehen, die lediglich von der betreffenden Schnittebene berührt werden. Die maximale notwendige Anzahl von Schnittebenen liegt bei drei (Garland, Heckbert et al. 2001).
3. Klassifizieren:
Jede Fläche wird wie oben beschrieben in die Kategorien *IN*, *ON* und *OUT* eingeteilt.
4. Bildung des Cluster-Graphen:
Jeder Knoten des Cluster-Graphen beinhaltet adjazente, identisch klassifizierte Flächen des Ausgangskörpers. Die Verbindungen der Knoten bilden wiederum die Adjazenz dieser Gruppen ab. Dieser

lässt sich aus dem Adjazenzgraphen ableiten, indem alle Verbindungen zwischen gleich nach nach *IN*, *OUT* und *ON* bewerteten Flächen eliminiert und die Knoten zusammengefasst werden.

5. (Teil-)objekte ermitteln:
Nicht alle Knoten des Cluster-Graphen ergeben ein Objektteil. Das gilt nur für diejenigen Knoten, die gleich klassifiziert sind und die sich mit Hilfe der Schnittebenen zu einem geschlossenen Objekt ergänzen lassen. Die Feststellung, welches Objekt den Hauptteil und welches den Nebenteil darstellt, ist an dieser Stelle noch nicht relevant.
6. Lücken schließen:
Nachdem der Polyeder bezüglich der betrachteten Schnittebene(n) in zwei Objektteile aufgespalten wurde, liegen zwei Sätze von Flächen vor, die nicht geschlossen sind. Diese werden dann mit Hilfe der Schnittebenen geschlossen.
7. Ergebnisdaten:
Als Ergebnis erhält man eine Sammlung von Objektteilen mit jeweils einem booleschen Operator (Vereinigung oder Differenz), der das Objektteil als Anbauteil oder als Einbuchtung identifiziert.

Diese Sammlung von Objektteilen muss anschließend in eine hierarchische Struktur überführt werden. Dieser Schritt wird im folgenden Abschnitt erläutert.

5.5.2 Strukturierung des Separationsergebnisses

Durch die Untersuchung aller Flächen des Objektes wird dieses in Objektteile zerlegt. Um diese für die Speicherung in einer LoD-Struktur verwenden zu können, müssen diese Objektteile strukturiert werden. Dafür gelten folgenden Regeln:

1. Der größte Objektteil ist das Wurzelobjekt.
2. Objektteile müssen mit ihren untergeordneten Objektteilen eine adjazente Fläche haben.
3. Ein untergeordnetes Objektteil ist immer kleiner als sein übergeordnetes. Als Maß für die Größe eines Objektes ist der Rauminhalt des Boundingvolumens ausreichend.

Als Ergebnis erhält man eine Baumstruktur (Abbildung 5.8), in der jeweils ein Objekt von seinem Hauptteil ausgehend immer weiter verfeinert wird. So entspricht die Summe aller Teile, der am höchsten detaillierte Präsentation des Objektes und durch sukzessives Weglassen der tieferen Knoten ergeben sich die niedrigeren Detaillierungsgrade.

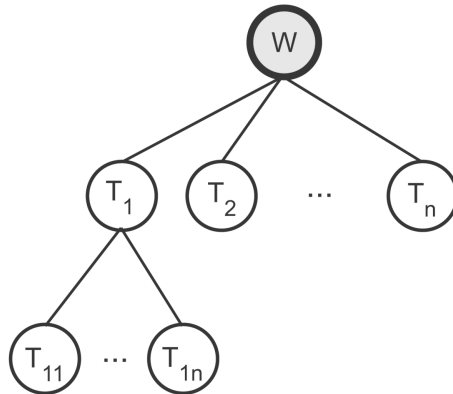


Abbildung 5.8: Strukturierung der Objektteile

Anschließend können für die einzelnen Objektteile Sichtbarkeitsbereiche ermittelt werden. Dabei liegt es auf der Hand, dass das Wurzelement das längste Intervall hat, also die größte maximale Sichtweite erhalten muss. Nimmt der Betrachtungsabstand ab, so werden immer mehr Objektteile eingeblendet, wodurch sich der Detaillierungsgrad des Objektes und damit des Modells sukzessive erhöht. Anhand der in Kapitel 2 zusammengestellten Mindestgrößen lassen sich die maximalen Sichtweiten für jedes Objektteil individuell bestimmen. Durch die Einführung einer Untergrenze für die maximale Sichtweite lässt sich eine Vereinfachung unmittelbar realisieren. Unterschreitet die maximale Sichtweite diesen Wert, so werden die Objekte nicht in die Präsentationsdaten übernommen, wodurch eine vereinfachte Variante des Objektes entsteht. Somit kann der Generalisierungsschritt der Vereinfachung die Strukturierung des Objektes nutzen, indem die maximale Stufe bis zu der die Objektteile in die Visualisierung aufgenommen werden, reduziert wird.

Darüber hinaus wird der Wurzelknoten als Wurzel eines Einzelobjektes markiert, damit das Gebäude in entsprechende Verwaltungsstrukturen eingeführt werden kann (vgl. Abschnitt 7.3.4). Weiterhin wird eine Kennzeichnung benötigt, bei welchen Elementen des Gebäudes es sich um selbständige Teile handelt. Ein selbständiges Objekt oder Objektteil zeichnet sich dadurch aus, dass es alleine im Modell stehen kann. Im Beispiel aus Abbildung 5.9 trifft das nur auf das Hauptgebäude zu. Al-

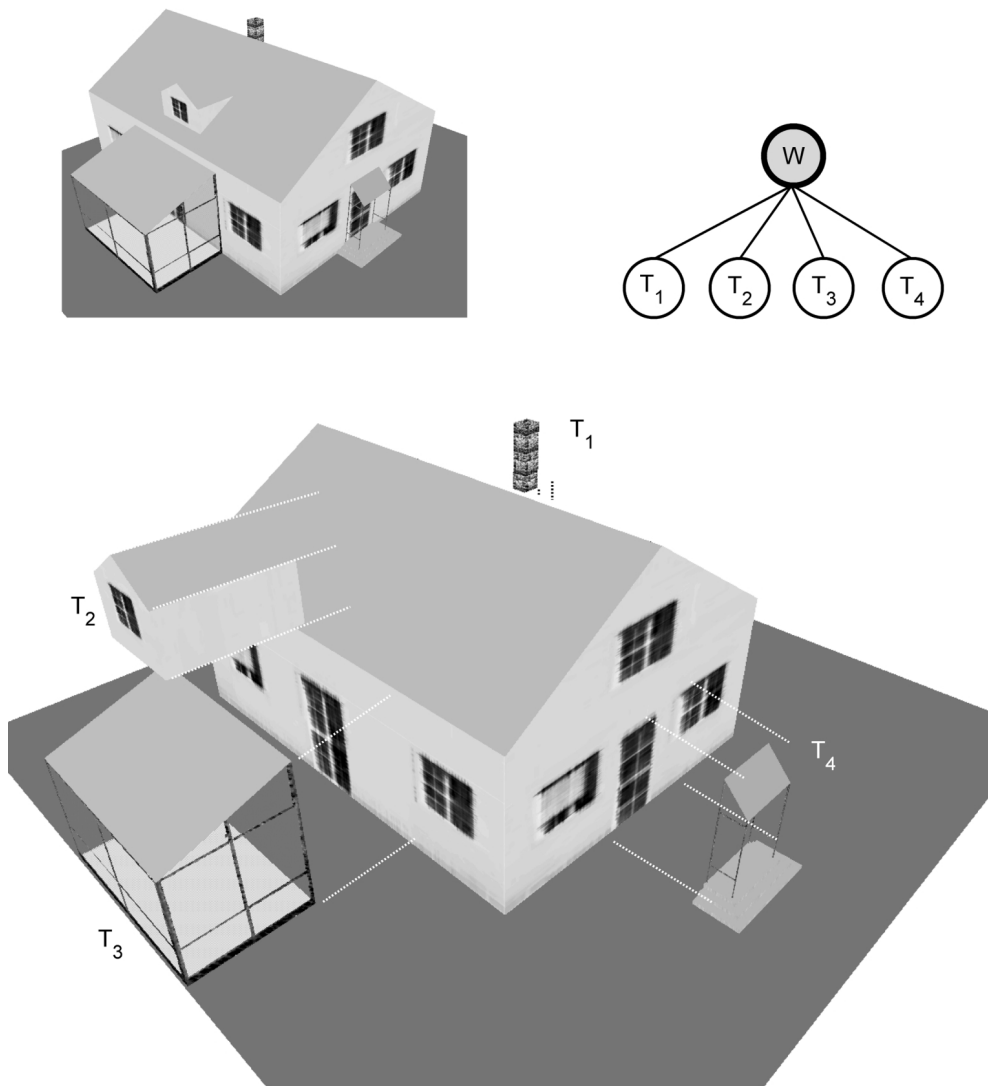


Abbildung 5.9: Beispiel für die Strukturierung eines Hauses

le anderen Objekte ergeben für sich alleine keine sinnvolle Darstellung. Als Rückgabe einer räumlichen Anfrage kommen daher nur selbständige Objekte in Frage (siehe auch Abschnitt 7.3.5.1).

5.5.3 Generalisierung der Dachformen

Die Dachformen stellen einen Sonderfall bei der Anwendung des beschriebenen Algorithmus dar. Zwar lassen sich mit dem bisher beschriebenen Vorgehen untergeordnete Strukturen wie Dachgauben, Schornsteine usw. separieren und strukturieren, aber die Dachform in ihrer Gesamtheit kann nicht analysiert werden. Da Dachkonstruktionen einen erheblichen Teil zur Komplexität eines Gebäudes beitragen, können diese nicht vernachlässigt werden. Zur Lösung des Problems sind zwei Varianten denkbar. Der Algorithmus kann entweder durch einen vor- oder nachgeschalteten Prozess ergänzt werden oder an sich manipuliert werden. Die erste Variante ist weniger vorteilhaft, weil erstens ein weiterer Algorithmus entwickelt und letztlich implementiert werden muss und weil zweitens die Ergebnisse dieses Schrittes in die Objektteilstruktur des Bauwerks einbezogen werden müssen. Zu bevorzugen ist daher der Weg, den beschriebenen Algorithmus zu ergänzen, um eine in sich geschlossene und kompakte Lösung zu erhalten.

Die Lösung des Problems ist die Einführung einer oder mehrerer Hilfsflächen, die

- im Gegensatz zu den anderen betrachteten Flächen innerhalb des Gebäudekörpers liegen,
- durch die Oberkanten des aufgehenden Mauerwerks definiert werden.

Fügt man diese Fläche oder Flächen in die Bearbeitungsmenge des Vereinfachungsalgorithmus ein, so werden die Dachformen vom restlichen Gebäudekörper getrennt. Da die Hilfsfläche im Gegensatz zu den restlichen Flächen keine Grenzfläche des Gebäudevolumens darstellt und die separierten Objektteile sich nicht zwingend in der Größe unterscheiden, muss die Entscheidung, welcher Teil über- und welcher untergeordnet zu strukturieren ist, gesondert getroffen werden. Dies ist aber unschwer möglich, da die Hilfsfläche immer zumindest annähernd parallel zur Erdoberfläche liegt und Dachkonstruktionen separiert werden. Diese liegen naturgemäß oberhalb der Hilfsfläche und der Gebäudekörper unterhalb. Die zweite Besonderheit bei der Separation ist die Tatsache, dass zum

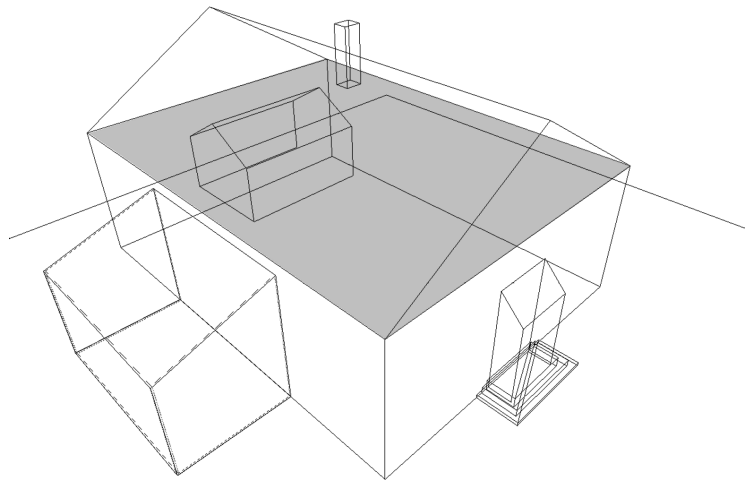


Abbildung 5.10: Hilfsfläche zur Trennung von Dachaufbauten

Beispiel im Falle von Dachüberständen Flächen der Dachkonstruktion durch die Hilfsfläche geteilt werden können. Die Trennung dieser Flächen ist zu ignorieren, so dass der Dachstuhl inklusive seiner Überstände vom Gebäuderumpf getrennt wird.

5.5.4 Zusammenfassung

5.5.4.1 Zusammenfassung auf Grund gleichen Sichtbarkeitsintervalls

Durch die Generierung verschiedener LoD-Stufen entsteht ein Spannungsfeld zwischen optimal vereinfachten 3D-Modellen und der Minimierung der zu übertragenden Datenmengen. Ursache für das Problem ist die Vereinfachung von Objekten, die dazu führen kann, dass beim Wechsel von einem LoD zum nächsten Geometrien entfernt und neue übertragen werden müssen. Diesem Problem wurde durch die Strukturierung und Hierarchisierung der Objektteile entgegengetreten.

In der Folge darf diese Zerlegung und Strukturierung durch die Zusammenfassung nicht aufgehoben werden. Damit das Mittel der Zusammenfassung als probates Mittel für die Modellvereinfachung Anwendung finden kann, müssen die Voraussetzungen für dessen Anwendung im hiesigen Kontext angepasst werden. Die Tatsache, dass zwei Objekte oder Objektteile eine gemeinsame Kante bzw. Fläche haben, reicht als alleinige Voraussetzung nicht aus. Im Sinne des Strukturierungskonzeptes darf

die Zusammenfassung nur dann erfolgen, wenn die in Frage kommenden Objekte eine annähernd gleiche Lebensdauer im Modell haben. Das bedeutet, dass deren Sichtbarkeitsintervall die gleichen Grenzen hat und die betrachteten Objekte somit zur gleichen Zeit ein- und ausgeblendet werden.

Da eine exakt gleiche Lebensdauer zweier angrenzender Objekte in der Realwelt nicht zu erwarten ist, muss für diesen Sachverhalt ein Schwellenwert Δ definiert werden. Die Größe dieses Schwellenwerts hängt von der absoluten Entfernung der jeweiligen Grenzen des Sichtbarkeitsintervalls ab. Es ist offensichtlich, dass im Nahbereich geringere Toleranzen als in entfernteren Bereichen zugelassen werden können. Aus dem Abschnitt 2.2.3.4 geht hervor, dass die minimale Entfernung zweier Objekte entlang der Blickrichtung, die notwendig ist, um den Tiefenunterschied wahrzunehmen, nicht linear ansteigt. Dieser Zusammenhang wird durch die Formel 2.2 auf Seite 25 quantifiziert. Somit ergibt sich für den gesuchten Schwellenwert

$$\Delta = f(d_{P_1}, d_\gamma) = d_{P_1} - d_{P_2} = d_{P_1} - \frac{\frac{B_A}{2}}{\tan\left(\frac{\gamma_{P_1} + d_\gamma}{2}\right)} \quad (5.1)$$

Zusammenzufassen sind demnach Objekte, deren Sichtbarkeitsintervall sich um weniger als Δ unterscheidet. Daraus folgt, dass auf Grund der Zusammenfassung keine Geometrien doppelt übertragen werden müssen. Diese Regel soll an zwei Beispielen verdeutlicht werden: Das linke Beispiel



Abbildung 5.11: Vergleich von Kettenhaus- und Reihenhausbebauung

in Abbildung 5.11 zeigt eine Kettenhausbebauung, in der sich Garagen mit Wohnhäusern abwechseln. Es ist offensichtlich, dass die Garagen bei fortschreitender Reduktion der Detaillierung vor den Wohngebäuden aus der Darstellung entfallen werden. Die Bedingung der gleichen Lebensdauer ist damit nicht erfüllt, und auf eine Zusammenfassung der Garagen mit den zugehörigen Wohngebäuden ist zu verzichten. Diese hätte nämlich zur Folge, dass ein für das Sichtbarkeitsintervall A zusammengefasstes Darstellungsobjekt *Wohngebäude plus Garage* für das Intervall $B > A$ ein neues Objekt *Wohngebäude ohne Garage* transferiert werden muss.

Zusammengefasst werden müssen allerdings die Garagen. Diese haben einzeln betrachtet eine identische Größe, so dass die Bedingung der gleichen Lebensdauer erfüllt ist. Diese Operation ist nicht nur hinsichtlich des Datenvolumens von großer Bedeutung. Vielmehr ist die zusammengefasste Geometrie auch für die Beurteilung der Sichtbarkeit entscheidend. Erst wenn im Beispiel die Gesamtheit der beiden Garagen nicht mehr sichtbar ist, wachsen die beiden Wohngebäude zusammen und die Garagen sind zu entfernen. Daraus folgt, dass nach jeder Zusammenfassung die Lebensdauer der neuen Objekte bestimmt und anschließend die Möglichkeit, dieses Objekt anderweitig zusammenzufassen, geprüft werden muss. Auf die beiden Wohngebäude ist die Regel der gleichen Lebensdauer anzuwenden. Beide haben eine in der Größenordnung gleiche Lebensdauer. Darüber hinaus sind sie, nachdem die zugehörigen Garagen nicht mehr erkennbar sind, visuell benachbart. Das bedeutet, dass sie ab diesem Zeitpunkt analog zu den Garagen behandelt werden müssen. Die Objekte müssen zusammengefasst werden, und diese vereinigte Geometrie muss zur Beurteilung der Sichtbarkeit herangezogen werden. Im zweiten Fall (Abb. 5.11 rechts) handelt es sich um eine geschlossene Reihenhausbebauung. Die angrenzenden Objekte haben eine einheitliche Größe, so dass ihre Lebensdauer bezüglich der Detaillierungsgrade ebenfalls gleich ist. Die Zusammenfassung dieser Gebäude ist von vorne herein möglich und sinnvoll. Bei einer erheblichen Einsparung von darzustellenden Geometrien werden gleichzeitig weniger Daten übertragen. So werden die Budgets der Datenübertragung und der zu rendernden Geometrien entlastet.

5.5.4.2 Zusammenfassung auf Grund gegenseitiger Abhängigkeit

In seltenen Fällen kann ein Objektteil nicht ohne einen anderen dargestellt werden. Im Beispiel aus Abbildung 5.9 gilt das insbesondere für die Dachgaube (T2). Nach der Durchführung der Strukturierung wird diese in das aufgehende Mauerwerk und die Dachform unterteilt. Durch die Verschneidung mit dem Hauptdach ist das umgebende Volumen (Bounding-Box) des Dachs größer als das des Mauerwerks. Das führt dazu, dass das Dach vor dem Mauerwerk zur Darstellung kommt. Daraus ergäbe sich eine inkonsistente, nicht geschlossene Darstellung des Bauwerks. Im Falle von Modellableitungen, die ausschließlich der visuellen Richtigkeit folgen, ist dies nicht problematisch, da nur das nicht dargestellt wird, was ohnehin nicht sichtbar ist. Die Inkonsistenz ist in diesem Fall nicht erkennbar.

Schränkt man die visuelle Richtigkeit aber zu Gunsten der Performance ein (vgl. 7.3.6), so trifft dies nicht mehr zu. Durch die Ausblendung noch sichtbarer Geometrien tritt das Problem auf, dass das Mauerwerk vor dem Dach ausgeblendet wird und Gebäude nicht korrekt erscheinen. Aus diesem Grund müssen die beiden Objektteile miteinander verknüpft werden. Da diese Verknüpfung ein gemeinsames Ein- und Ausschalten beim Übergang zwischen den Detaillierungsgraden der Objektteile zur Folge hat, wird diese durch Zusammenfassung der Objekte realisiert.

5.6 Generalisierung als iterativer Prozess

Ein Ergebnis des vorangegangenen Abschnitts lautet, dass für die Beurteilung der Sichtbarkeit von Objekten die Zusammenfassung von Objekten, die angrenzend und von gleicher Größe sind, notwendig ist. Das bedeutet, dass die Klassifizierung von Objektteilen, die durch die Strukturierung entstanden ist, erst nach der Zusammenfassung im Hinblick auf ihren sichtbaren Entfernungsbereich erfolgen kann. Für die Zusammenfassung müssen die Objektteile aber schon vorliegen. Daraus folgt, dass die Zusammenfassung in den Strukturierungsprozess integriert werden muss. Darüber hinaus hängt die Frage, ob zwei Objekte zusammengefasst werden müssen, von der Betrachtungsentfernung ab. Während der Sachverhalt im Falle zweier Doppelhaushälften ohne Berücksichtigung eines Darstellungsmaßstabs eindeutig ist, wachsen Objekte, die nicht unmittelbar angrenzend sind, erst mit wachsendem Betrachtungsabstand also geringerer Darstellungsgröße zusammen.

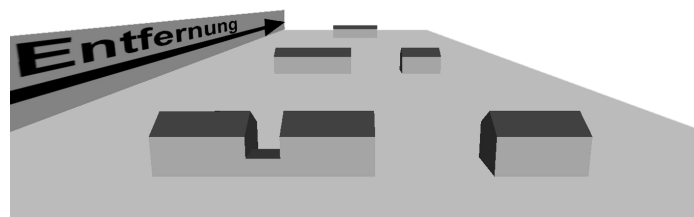


Abbildung 5.12: Iterative Zusammenfassung von Objekten

Daraus folgt, dass sich der Prozess der Vereinfachung und Zusammenfassung nicht in einem Schritt vollziehen lässt, sondern iterativ erfolgen muss:

1. Strukturierung aller Objekte nach dem im Abschnitt 5.5.1 vorgestellten Verfahren.
2. Iteration über die Betrachtungsdistanzen:
 - Zusammenfassung von Objekten, die nach vorgenannten Kriterien zusammengefasst werden können.
 - Prüfung aller Objektteile auf Ihre Darstellbarkeit und Streichung bei negativen Ergebnis, also Unterschreitung der Mindestgrößen.

5.7 Strukturierung versus Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zunächst Verfahren für die Strukturierung - also Zerlegung von Objekten - und anschließend Konzepte für die Zusammenfassung von Objekten entwickelt.

Um die zu übertragende Datenmenge möglichst gering zu halten, werden die Objekte so zerlegt, dass nur die Differenzen zwischen den Darstellungen unterschiedlicher Granularität übertragen werden müssen. Im Gegensatz dazu werden Objekte, die optisch nicht trennbar sind, zusammengefasst. Auch wenn auf Grund der Regeln für die Zusammenfassung die Strukturierung der Objekte keinesfalls aufgehoben wird, sind die Strategien gegenläufig. Objekte, die aus einer Zusammenfassung hervorgegangen sind, müssen vollständig ausgetauscht werden, wenn sich der Betrachter nähert und die Bedingungen für die Zusammenfassung somit nicht mehr gegeben sind. Das Zusammenwirken der beiden Vorgänge Strukturierung und Zusammenfassung ist daher ein Kompromiss, der allerdings auf Grund der folgenden Überlegungen kein Problem darstellt:

- Es müssen nur diejenigen zusammengefassten Objekte gegen mehrere einzelne Objekte ausgetauscht werden, die wegen des Betrachtungsmaßstabs zusammengefasst wurden. Objekte bzw. Objektteile, die ohne Berücksichtigung des Betrachtungsmaßstabs vereinigt wurden, müssen nicht mehr getrennt werden. Dafür ist die Regel, nur Objekte mit gleichem Sichtbarkeitsbereich zu verwenden, verantwortlich. Nähert man sich diesen Objekten, so werden nur die aus der Strukturierung resultierenden Feinheiten differentiell ein- oder wieder ausgeblendet. Daraus folgt, dass in keinem Fall zwei höher

detaillierte Varianten eines Objektes transferiert werden müssen, wodurch das zu transferierenden Datenvolumen drastisch reduziert wird.

- Der Problemfall des Austauschs ganzer Objekte tritt nur dann auf, wenn eine Zusammenfassung als Folge eines kleinen Betrachtungsmaßstabs durchgeführt wurde. Daraus folgt, dass nur Objekte ausgetauscht werden, die keine hohe Darstellungsgüte mehr aufweisen. Diese haben die Eigenschaft, dass ihre Geometrien einfach sind und die zugehörigen Texturen entweder sehr klein sind oder schon durch einen mittleren Farbwert ersetzt wurden (vgl. Kapitel 6).

5.7.1 Erläuterung an einem Beispiel

Die oben definierte Iteration wird nun an einem Beispiel veranschaulicht. Dafür werden zwei Gebäudegruppen, die jeweils aus zwei durch Doppelgaragen getrennten Doppelhäusern bestehen, in diese Betrachtungsweise integriert. Deren Struktur stellt sich uneinheitlich dar, da in der praktischen Anwendung keine einheitliche Struktur vorausgesetzt werden kann. Der Grund dafür sind (regional) unterschiedliche bzw. verschieden ausgelegte Erfassungsvorschriften. Darüber hinaus basiert die Objektstrukturierung der zu Grunde gelegten Basisdaten auf Besitzverhältnissen (vgl. Abb 5.13), so dass nicht die visuell zusammenhängenden Objekte gruppiert werden (Abb. 5.14).

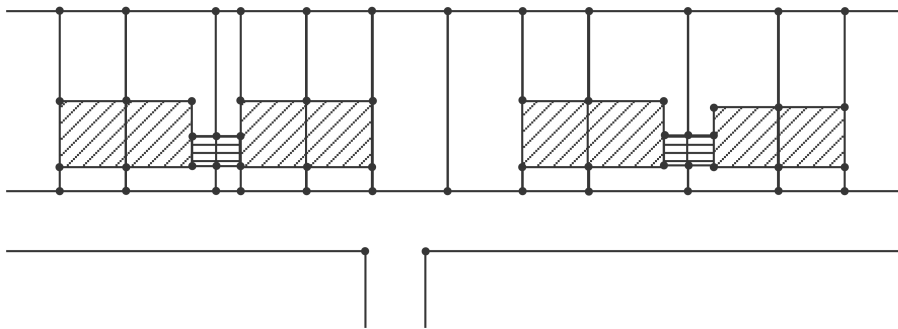


Abbildung 5.13: Situation im Grundriss

- Ausgangssituation:

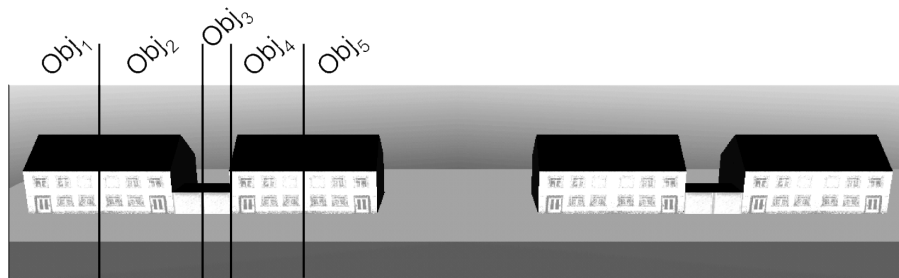


Abbildung 5.14: Ausgangssituation

- Im ersten Schritt erfolgen die Zusammenfassungen, die ohne Berücksichtigung eines Maßstabs durchgeführt werden können. Dabei werden die Doppelhaushälften zusammengefasst. Sie haben eine gemeinsame Fläche und stimmen in ihrem Sichtbarkeitsbereich überein. Die einzelne Garage (*Objekt₃*) bleibt zunächst isoliert, weil diese mit *Objekt₁₂* zwar eine gemeinsame Fläche hat, aber ein unterschiedliches Sichtbarkeitsintervall (Abb. 5.15).

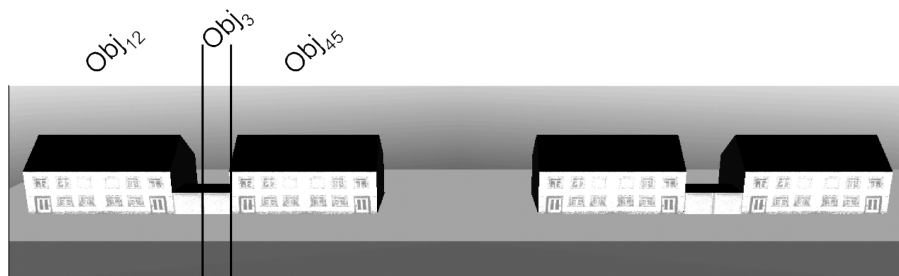


Abbildung 5.15: Erste Zusammenfassung

- Aus der nun folgenden Strukturierung der Objekte ergibt sich die an *Objekt₂* angebaute Garage als Objektteil (Abb. 5.16), das im folgenden Schritt der Zusammenfassung mit der einzelnen Garage (*Objekt₃*) vereint wird. Die zweite Gruppe von Objekten geht durch diesen Prozess in die gleiche Struktur über (Abb. 5.17).

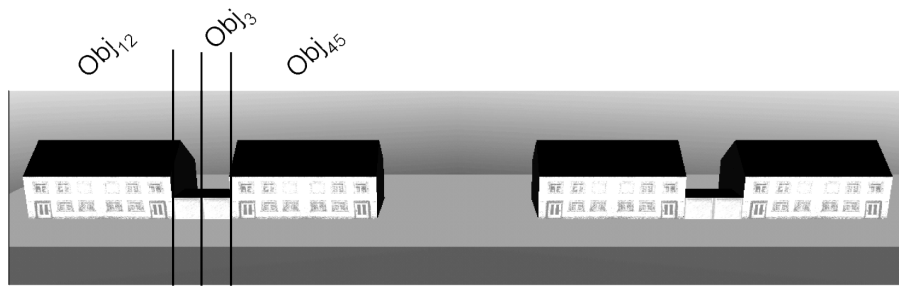


Abbildung 5.16: Strukturierung der Objekte

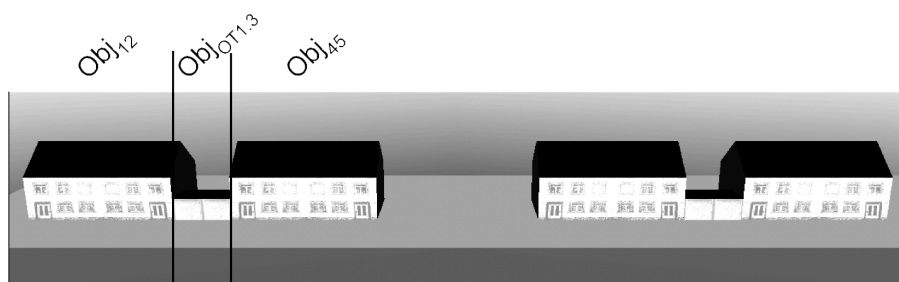


Abbildung 5.17: Zweite Zusammenfassung

- Jede Gruppe besteht aus zwei Objekten gleicher Lebensdauer, die durch zwei kleinere Objekte, den Garagen, mit kürzerem Sichtbarkeitsintervall getrennt werden. Beide Gruppen sind getrennt durch den Freiraum in der Mitte, der kleiner ist als die Objekte selbst. Daraus folgt, dass die zusammengefassten Garagen am Ende ihres Sichtbarkeitsbereichs erstens ausgeblendet werden und die angrenzenden Doppelhäuser zweitens zusammenwachsen, also zusammengefasst werden können. (Abb. 5.18)



Abbildung 5.18: Wegfall von Objekten mit Zusammenfassung bei größerer Betrachtungsentfernung

- Erhöht man den Betrachtungsabstand weiter, so wird schließlich der Abstand der beiden Objektgruppen nicht mehr erkennbar sein, so dass auch die beiden Gruppen zusammengefasst werden können (Abb. 5.19).



Abbildung 5.19: Weitere Zusammenfassung bei gewachsenem Betrachtungsabstand

5.8 Schlussfolgerung

Mit Hilfe des in diesem Kapitel vorgestellten Verfahrens lassen sich beliebige Gebäudeobjekte generalisieren und strukturieren. Abgesehen von der Annahme, dass es sich bei den behandelten Objekten um Gebäude handelt, die auf dem Erdboden stehen, werden keinerlei semantische Informationen hinzugezogen. Daraus resultiert die Unabhängigkeit von speziellen Datenmodellen als Voraussetzung für den Generalisierungsprozess. Neben der Strukturierung der Einzelgebäude wird eine Zusammenfassung durchgeführt, die visuell nicht unterscheidbares vereint. Als Ergebnis sowohl der Generalisierung und Strukturierung als auch der Zusammenfassung erhält man eine Baumstruktur, die sich ausgehend von den Aggregaten, also Gruppen von Gebäuden bis hin zu kleinsten Objektteilen verfeinert. Diese Baumstruktur wird zentraler Bestandteil der in Kapitel 7 zu entwickelnden Datenstrukturen sein.

Kapitel 6

Vereinfachung von Texturinformationen

Der exakten geometrischen Ausgestaltung von Objekten sind Grenzen gesetzt. Die Gründe dafür liegen zum einen im Erfassungsaufwand und zum anderen in der begrenzten Anzahl von darstellbaren Geometrien während der Präsentation.

Belegt man die Darstellungsgeometrien mit einem Rasterbild, auch Textur genannt, lässt sich eine wesentliche Erhöhung der Qualität der Visualisierung erreichen. Auf diese Weise können feinste, in ihrem Grundcharakter zweidimensionale Strukturen dargestellt werden, wie zum Beispiel die Steine einer gemauerten Fassade.

6.1 Einführung

Wegen der begrenzten optischen Tiefenauflösung des Auges können auch in geringen Maßen dreidimensionale Ausprägungen durch Texturen ausreichend plastisch wiedergegeben werden. Dieser plastische Eindruck ergibt sich durch die anhand des Bildes auswertbaren monokularen Tiefenkriterien (siehe Abschnitt 2.2.2).

Die Texturierung führt zu einer deutlichen Reduktion der darzustellenden Geometrien. Der Nachteil ist, dass die großen Datenmengen, die durch Rasterdaten erzeugt werden, die Übertragungszeiten der Modelle vom Server zum Client verlängern. Darüber hinaus müssen auch die Rasterdaten während der interaktiven Darstellung der 3D-Modelle permanent manipuliert werden. Der resultierende Rechenaufwand hängt von den

Pixelmaßen der Bilder ab, so dass eine Optimierung der Bildgröße auf Grund der Betrachtungssituation bzw. -distanz sinnvoll ist.

6.2 Zur Notwendigkeit der Generalisierung

Reduziert man die Größe der Texturbilder, so resultiert daraus ein Informationsverlust. Der Grund dafür ist die sinkende Zahl der Bildpunkte, die die Information tragen.

Die Reduktion der Auflösung entspricht bei konstanter Größe der Bildpunkte dem Vorgang der fotografischen Verkleinerung. Für einen gegebene Menge von Informationen steht immer weniger Raum zur Verfügung. Es ergibt sich das in der Kartographie bekannte Problem des Maßstabswechsels von Karten:

Der Raum, den ein Objekt in der Karte eines Folgemaßstabs einnimmt, wird so klein, dass das Auge die vollständige geometrische Form nicht mehr auflösen kann. Der Grund dafür ist die Unterschreitung der Mindestgrößen. Im Falle von digitalen Darstellungen auf Bildschirmen vergrößert sich diese Problematik erheblich, weil deren Auflösungsverhalten erheblich schlechter ist als das analoger Medien (Neudeck, 2001). Da eine Darstellung mit unkenntlichen Bestandteilen im Falle einer Karte als kartographischem Zeichensystem nicht sinnvoll ist, wird zwischen folgenden Optionen gewählt :

- Man beachtet das *Prinzip der Lesbarkeit*, was eine Vergrößerung des Objektes bedingt. Diese unmaßstäbliche Darstellung wirkt einschränkend auf das *Prinzip der Richtigkeit*.
- Man verzichtet auf die Wiedergabe. Das schränkt das *Prinzip der Vollständigkeit* ein.

Diesen Überlegungen (Hake, 1994) liegt das Bestreben zu Grunde, trotz reduzierten Raumes oder reduzierter Datenmenge ein Höchstmaß an Informationen zu vermitteln. Dieses Ziel wird durch generalisierende Maßnahmen angestrebt.

Im Falle der Texturen liegen Rasterbilder vor, die in aller Regel fotografische Abbildungen der Realweltobjekte enthalten. Es handelt sich also nicht um ein Zeichensystem im Sinne einer Kartengrafik. Aus diesem

Grund entfällt die Notwendigkeit, die Lesbarkeit dieser Zeichen und somit den Zugang zu diesen codierten Informationen zu erhalten.

Die Tatsache, dass mit wachsendem Betrachtungsabstand und damit der Verkleinerung des Maßstabs immer weniger Details erkennbar sind, entspricht dem Prinzip der visuellen Richtigkeit. Generalisierende Maßnahmen würden im Gegensatz dazu stehen, da sie Sachverhalte erkennbar machen, die in der Realität nicht mehr erkennbar wären, da das menschliche Auge sie nicht mehr auflösen kann.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass keine Generalisierungstechniken notwendig und sinnvoll sind, um die Auflösung der Texturen den Anforderungen der Anwendung entsprechend zu reduzieren. Da die Informationsverluste, die mit der fotografischen Verkleinerung verbunden sind, der Realität und damit dem gewünschten Verhalten der virtuellen Darstellung entsprechen, sind die Methoden der Bildverarbeitung den Strategien der Generalisierung vorzuziehen.

6.3 Reduktion der Auflösung von Texturbildern

Die digitale Bildverarbeitung bietet eine Reihe von Algorithmen zur geometrischen Umbildung von Rasterbildern. Diese Verfahren, auch Resamplingverfahren genannt, werden für die Umsetzung von geometrischen Transformationen und zur Auflösungsreduktion genutzt. Sie unterscheiden sich in ihrer Güte und im zu veranschlagenden Rechenaufwand, wie der Tabelle 6.1 zu entnehmen ist.

Resamplingmethode	Interpolationsumgebung	Anz. Additionen/ Multiplikationen	Interpolationsfehler
Nächste Nachbarschaft	1x1	1	15,7%
Bilineare Interpolation	2x2	8	3,7%
Bikubische Splines	4x4	110	0,3%
Lagrangepolynome	4x4	80	0,3%

Tabelle 6.1: Resamplingverfahren nach Wiesel (1991)

Bei der Beurteilung der Verfahren ist alleine der Qualitätsaspekt von Bedeutung. In Anlehnung an die LoD-Zoneneinteilung aus dem vorangegan-

genen Kapitel werden für die jeweiligen Detaillierungsgrade im Preprocessing Texturen berechnet, so dass der Rechenzeit für das Resampling keine Bedeutung beigemessen werden muss. Daher ist nur die Qualität des verwendeten Resampling-Verfahrens von Bedeutung. Somit sind die Verfahren höherer Ordnung, d.h. bikubische Splines und Lagrangepolynome, trotz der höheren Rechenzeiten zu bevorzugen.

6.4 Texturgröße in Abhängigkeit der Betrachtungsentfernung

Wegen der Sichtbarkeitsintervalle der einzelnen Objekte ergibt sich für jedes Darstellungsobjekt ein minimaler Betrachtungsabstand. Auf Grund der Sichtbarkeitsintervalle (vgl. Kapitel 5), die für jedes Objekt bzw. jeden Objektteil vorliegen, ist der minimale Abstand, ab dem das Objekt dargestellt wird, bekannt.

Aus diesem Mindestabstand lässt sich mit Hilfe der Formel 6.1 die maximal benötigte Größe einer Textur ermitteln.

$$n_{pcl} = \frac{\tan \sigma \cdot g_{Abst}}{d_{pcl}} \quad \text{mit} \quad \sigma = \arctan \left(\frac{G}{g} \right) \Gamma. \quad (6.1)$$

Dabei stehen

- n_{pcl} für die Anzahl der Pixel,
- g_{Abst} für den Betrachtungsabstand zum Bildschirm,
- d_{pcl} für die Pixelgröße,
- G für die Gegenstandsgröße,
- g für die Gegenstandsweite.

Diese Berechnung ist jeweils für die Breite und die Höhe der zu texturierenden Fläche durchzuführen. Ist diese Fläche nicht viereckig, so ist ihre Bounding-Box, also ihr umschließendes Viereck, als Näherung für die Fläche ausreichend. Abgesehen von der variablen Objektgröße und der minimalen Gegenstandsweite sind alle auftretenden Variablen konstant innerhalb eines Präsentationsmodells. Dadurch reduziert sich der Berechnungsaufwand während der Modellerstellung deutlich.

Die Tabelle 6.2 wendet die hergeleiteten Formeln unter der Annahme eines Bildschirms mit 17-Zoll sichtbarer Diagonale, einem Betrachtungsabstand von 50cm und einer Pixelgröße von 0.26mm^2 an.

So ergibt sich zum Beispiel für eine Wand mit einer Breite von 10m

Min. Abstand	Ausdehnung [pcl]				
	5 m	10 m	15 m	20 m	50 m
5 m	687	1010	1167	1258	1440
10 m	395	687	880	1010	1315
100 m	42	84	125	166	395
400 m	11	21	31	42	105
1000 m	4	8	13	17	42

Tabelle 6.2: Texturgrößen in Abhängigkeit der Entfernung und der Ausdehnung

und einer Höhe von 5m im Abstand von 10m eine Bildgröße von 687×395 Punkten. Die Tatsache, dass einige Werte die angenommene Bildschirmauflösung von 1280×1024 Punkten überschreiten, stellt nicht die Richtigkeit der Berechnungen in Frage. In diesen Fällen füllt schon ein Teil des Objekts den kompletten Bildschirm aus. Deswegen wird in dieser Situation nur ein Teil der Fassade dargestellt, so dass die Größe der Textur die Bildschirmauflösung überschreiten muss, um für jeden Bildschirmpunkt ein Pixel bereitzustellen.

Ergibt sich für die Fläche eine maximale Pixelgröße, die die Mindestgröße für eine texturierte Darstellung unterschreitet, so muss auf eine Texturierung verzichtet werden. Die Geometrie ist dann mit dem mittleren Farbwert der Textur darzustellen.

6.5 Diskussion anhand eines Beispiels

Die Tatsache, dass die Methoden der Rasterbildverarbeitung, wie zum Beispiel die bikubische Interpolation, für eine visuell richtige Modelldarstellung ausreichen, soll anhand eines Beispiels verifiziert werden. Zu diesem Zweck wurde eine Fassade mit einer Kleinbildkamera¹ aus Distanzen zwischen 15m und 1000m fotografiert. Es wurde ein Normalwinkel-Objektiv verwendet, um das reale Gesichtsfeld eines

¹Nikon F-301 mit dem Objektiv Nikkor 50mm/1.8, Film: Fuji ISO-100

Betrachters möglichst naturgetreu wiederzugeben. Als Fassade wurde der Nord-West-Flügel des Poppelsdorfer Schlosses in Bonn gewählt. Dieser hat den Vorzug, dass er in Richtung der Nußallee zumindest teilweise bis zu einem Kilometer weit sichtbar ist.

Durch die Aufnahmen der Fassade aus zunehmender Distanz soll der ständig abnehmende Informationsgehalt dokumentiert werden, der aus der wachsenden Betrachtungsentfernung resultiert. In Abbildung 6.1 werden die Originalaufnahmen der Fassaden aus den verschiedenen Entfernungen denen gegenübergestellt, die mit Hilfe der bikubischen Interpolation in ihrer Auflösung reduziert wurden. In Abbildung 6.1 Bild *a*) stellt die Aufnahme aus nächstmöglicher Distanz dar. Unterhalb folgen im linken Teil die Fassadentexturen aus den Originalaufnahmen. Diesen werden auf der rechten Seite die Ergebnisse der Bildverarbeitung gegenübergestellt. Bei den Aufnahmen aus größerer Entfernung wurde noch eine Vergrößerung hinzugefügt, um einen besseren Vergleich zu ermöglichen.

Aus der Gegenüberstellung lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen :

1. Die Qualität der rechnerisch durch bikubische Interpolation reduzierten Bilder ist der Qualität der Originalaufnahmen nicht nur ebenbürtig, sondern überlegen. Das erklärt sich durch die Tatsache, dass mit zunehmender Aufnahmeentfernung störende atmosphärische Einflüsse wie Luftflimmern und Dunst eine Rolle spielen. Diese reduzieren den Bildkontrast, der wesentlichen Einfluss auf das Auflösungsvermögen der Aufnahmen hat (Kraus, 1997). Insbesondere die Vergrößerung der Aufnahme aus der Entfernung von 1000m zeigt deutlich, dass die rechnerisch reduzierte Textur die Struktur der Fassade erheblich besser wiedergibt als das Original.
2. Die festgestellte Qualitätsverbesserung widerspricht für sich alleine genommen dem Prinzip der visuellen Richtigkeit, da atmosphärische Einflüsse nicht berücksichtigt werden. Wenn solche Texturen in Präsentationen verwendet werden, die atmosphärische Erscheinungen in die Darstellung einbeziehen, wird die visuelle Richtigkeit dadurch wieder hergestellt. Ist das nicht der Fall, so kann die Qualität der Bilder durch die Manipulation von Kontrast und Helligkeit herabgesetzt werden, so dass der korrekte optische Eindruck unter Berücksichtigung der Atmosphäre wieder erreicht wird.

Ausgangssituation	
	
natürliche Verkleinerung	bikubische Bildreduktion
	
Entfernung 50m	
	
Entfernung 100m	
	
Entfernung 400m (original und 3x vergrößert)	
	
Entfernung 1000m (original und 3x vergrößert)	

Abbildung 6.1: Vergleich von natürlicher Verkleinerung und bikubischer Bildreduktion

6.6 Schlussfolgerung

Bildtexturen sind im Sinne der visuellen Richtigkeit nicht zu generalisieren. Der Grund dafür ist, dass der Verlust von Informationen, der sich durch die Verkleinerung eines Bildes ergibt, der Realität entspricht. Daher reicht es aus, die Bildgröße in Bildpunkten durch einfache Interpolationsverfahren wie z.B. der bikubischen Reduktion zu reduzieren.

Kapitel 7

Datenbankbasierte Speicherung multiskalierter Stadtmodelle

Um die im Verlauf dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse nutzbringend einsetzen zu können, müssen die erzeugten generalisierten und strukturierten Daten über ein entsprechendes Datenmodell abgebildet werden und in den sich daraus ergebenden Datenstrukturen verwaltet werden. Die diesbezüglich zu stellenden Anforderungen sind als Rahmenbedingungen für die Definition eines entsprechenden multiskalierten 3D-Datenmodells zu verwenden.

7.1 Anforderungen

Für die Speicherung von multiskalierten Stadtmodellen sind die folgenden Aspekte von entscheidender Bedeutung:

- **Verfügbarkeit und Erreichbarkeit:**
Eines der Ziele der Erstellung von 3D-Stadtmodellen ist es, diese einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung zu stellen. Dazu müssen die Daten entsprechenden Diensten verfügbar gemacht werden, die einen Zugriff aus verteilten Umgebungen und eine ortsunabhängige Erreichbarkeit gewährleisten.
- **Fortführung und Nachhaltigkeit:**
Um die Nachhaltigkeit der generalisierten Daten zu sichern, müssen

diese einer effizienten Fortführung unterzogen werden. Neben den eigentlichen Präsentationsdaten müssen dafür weitere Informationen, wie zum Beispiel die Verknüpfung zu den entsprechenden Geobasisdaten der öffentlichen Verwaltung, in den Datenbestand aufgenommen werden, um darüber einen gezielten Zugriff und inhaltlichen Abgleich zu ermöglichen.

- Portierbarkeit:
Um die Offenheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen zu sichern, müssen die Modelldaten in andere Systeme und Umgebungen übertragbar sein.
- Datenmenge:
Es müssen große bis sehr große Datenbestände gespeichert werden können, ohne das Laufzeit- und Zugriffsverhalten zu beeinträchtigen.

Die Realisierung der vorgenannten Aspekte ist genau dann sichergestellt, wenn die Verwaltung und Fortführung von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen datenbankgestützt erfolgt. Diese Datenbank sollte ein offenes normenkonformes (ISO-Normenreihe 19100) und objektorientiertes System darstellen, damit erstens eine freie Modellierung aller benötigten Strukturen erfolgen kann, und um zweitens eine Nachhaltigkeit gegenüber zukünftigen Entwicklungen und Anforderungen zu sichern. In einer solchen Umgebung ist eine Datenstruktur zu etablieren, die drei wesentliche Elemente abbildet:

1. Die räumliche Struktur des Modells:
Diese Eigenschaft ist von besonderer Bedeutung, um ortsspezifische Anfragen effizient behandeln zu können. Dieser Aspekt ist insbesondere für die Bereitstellung der Daten bzw. Stadtmodelle mit Hilfe von Inter- und Intranettechniken unabdingbar.
2. Die hierarchische Struktur der Modellobjekte:
Mit Hilfe der im vorangegangenen Kapitel entwickelten Verfahren werden alle Darstellungsobjekte in eine hierarchische Struktur zerlegt. So wird ein Objekt in seine Teile aufgespalten, die je nach Betrachtungsabstand beziehungsweise gewünschtem Detaillierungsgrad zur Präsentation gelangen. Diese unter kartographischen Gesichtspunkten motivierte Hierarchie muss, wie in Kapitel 5 dargestellt, unter dem Aspekt der Visualisierung hergestellt werden. Vorhandene Strukturen, die ein digitales Landschaftsmodell (DLM)

repräsentieren (z.B. Gröger, Kolbe und Plümer 2004, sowie Averdung 2004), sind ideale Eingangsdaten für den kartographischen Generalisierungs- und Strukturierungsprozess. Allerdings sind Aggregationen dort nicht visuell, also durch die Darstellung, bedingt, sondern beruhen auf Verwaltungseinheiten. Das gilt insbesondere auch für weitere grundlegende Datenbestände wie ALKIS.

Untergeordnete Objekte und Objektteile werden dem nominellen Hauptobjekt zugeordnet. Damit ist nicht gewährleistet, dass die visuellen Verhältnisse korrekt wiedergegeben werden. So bilden zum Beispiel die einander angrenzenden Garagen zweier verschiedener Hauptgebäude eine visuelle Einheit, werden aber auf der Ebene eines DLMs den zugehörigen Hauptgebäuden zugeordnet.

3. Die Beziehung zu den Objekten der Ausgangsdaten:

Um die Mechanismen der Fortführung, die ohnehin auf den Basisdaten wie ALK oder ALKIS greifen, nutzbar machen zu können, ist es erforderlich, eine Referenz auf die jeweils zugehörigen Objekte der Basisdaten mitzuführen. Mit Hilfe dieser Verknüpfung können dann diejenigen Fortführungen, die bei der Pflege der zu Grunde liegenden Datenbestände durchgeführt werden, auf den Inhalt der Modelldatenbanken übertragen werden.

7.2 Inhalt der Datenbank

Neben den Ergebnissen der Generalisierung, also den generalisierten und strukturierten Gebäuden, sind noch die im Folgenden beschriebenen Inhalte in der Datenbank abzulegen oder zu referenzieren. Das bedeutet, dass auch Objekte aus fremden Datenbeständen im präsentierten Modell zur Ansicht kommen können. Daher werden einheitliche Strukturen und Schnittstellen bzw. Dienste konzipiert, die den Austausch und damit die Einbeziehung von konformen Elementen in beliebige Präsentationsmodelle ermöglichen (Gröger, Kolbe 2003).

Die Einbindung über Dienste ist in allen Fällen, in denen keine Gebäude betroffen sind, ohne resultierende Einschränkungen möglich. Im Falle von Gebäuden ist je nach Beschaffenheit der eingebundenen Daten ein anderes oder fehlendes Verhalten bezüglich der Mehrskaligkeit hinzunehmen. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die fremden Objekte dem Strukturierungsprozess zugeführt werden (vgl. Abschnitt 5.3), um anschließend in der vorliegenden Datenbank gespeichert zu werden.

Unabhängig von der Art der Speicherung, also ob direkt als Objekt oder

als Referenz auf einen Fremddatenbestand, sind die Strukturen für folgende Präsentationselemente in der Datenbank anzulegen:

- Terrain (Untergrund):

Der Untergrund also die Erdoberfläche ist die Grundlage jedes präsentierten Modells. Ohne diesen ist keine Visualisierung von Stadtmodellen denkbar. Das Terrain setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

1. Das Höhenmodell :

Dieses trägt die Reliefinformation. Es spiegelt die dreidimensionale Struktur der Erdoberfläche wieder. Diese Informationen können auf zwei unterschiedliche Arten repräsentiert werden (Terriblini 2001). Die erste Variante sind regelmäßige Strukturen, also Rastermodelle (Grids). Dort werden an schachbrettartig angeordneten Punkten Höhen festgehalten, die so Form und Verlauf der Oberfläche wiedergeben.

Die zweite Variante sind unregelmäßige Strukturen, so genannte TINs¹. Dabei werden an unregelmäßig, in Abhängigkeit der Geländeform verteilten Punkten Höhen gespeichert. Diese Punkte sind so miteinander verknüpft, dass sich ein Dreiecksnetz ergibt. Der Vorteil dieser Methode ist die geländeabhängige Modellierung, da die Höhenpunkte sowohl in der Lage als auch in der Dichte auf die Beschaffenheit des Geländes abgestimmt werden können.

2. Die Oberfläche des Höhenmodells:

Neben der geometrischen Beschaffenheit des Geländes ist auch die Art und Nutzung der Oberfläche von Interesse. Diese Informationen können wiederum auf zwei Arten dargestellt werden. Erstens können Rasterinformationen auf das Gelände projiziert werden. Dabei handelt es sich meistens um Luftbilder. Es können aber auch Karten zur Anwendung kommen, die besondere thematische Informationen transportieren. Als Beispiel sei ein Flächennutzungsplan genannt.

Darüber hinaus können vektorielle Daten benutzt werden. Diese liegen insbesondere dann vor, wenn für die Herstellung der Modelle amtliche Daten, wie ALK, ALKIS oder ATKIS², herangezogen werden. Dann können zum Beispiel Nutzungsarten

¹Triangulated Irregular Network

²Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem

als für die Gestaltung der vektoriiellen Bodentextur verwendet werden.

Auch für das Terrain ist eine multiskalige Repräsentation sinnvoll. Diesem speziellen Thema widmet sich Terriblini (2001) ausführlich.

- Gebäude:
Sie sind im Falle von Stadtmodellen der zentrale Bestandteil der Datenbank. Auf der Struktur dieser Daten liegt das Hauptaugenmerk der nachfolgenden Abschnitte.
- Straßenmöbel:
Straßenmöbel sind fest mit dem Untergrund verbundene Gegenstände, die das Straßenbild prägen. Das sind zum Beispiel:
 - Bäume,
 - Straßenlaternen,
 - Statuen,
 - Bushaltestellen,
 - Litfasssäulen,
 - Brunnen.

Diese sind zu speichern oder zu referentiell in das 3D-Modell zu integrieren. Zudem muss analog zu den Objekten und Objektteilen der Gebäude ihre Lebensdauer definiert werden. Anhand der Maße der Objekte ist festzulegen, ab und bis zu welchem Betrachtungsabstand die Darstellung erfolgen soll.

Eine Besonderheit im Vergleich zu den Gebäuden ist die Tatsache, dass viele dieser Straßenmöbel identisch ausgestaltet sind. Beispielsweise sind die Straßenlaternen einer Straße im Allgemeinen vollkommen gleich, so dass nicht für jeden Ort eine eigenes Darstellungsobjekt existieren muss. Anders formuliert heißt das, dass jedem dieser Objekte mehrere Orte im Modell zugeordnet werden können, um eine Datenreduktion zu erreichen.

- Straßenaccessoires:
Hierbei handelt es sich um mobile Bestandteile des Straßenbildes, die für eine realistische Wiedergabe der Örtlichkeit einen wesentlichen Beitrag leisten. Das sind zum Beispiel
 - Fahrzeuge und
 - Fußgänger.

Diese Objekte sind nicht nur örtlich, sondern auch zeitlich variant. Es ist also nur möglich und sinnvoll, diese Objekte exemplarisch in den Modellen zu platzieren. Voraussetzung dafür ist erstens eine Reihe von Prototypen für die Darstellung. Zweitens muss definiert sein, in welchen Bereichen die Objekte platziert werden dürfen und nach welchen Vorgaben sich diese gegebenenfalls bewegen können.

- **Blickpunkte (Points of Interest):**
Mit Hilfe von Blickpunkten kann die Orientierung in den präsentierten Modellen erleichtert werden. Es handelt sich dabei um vorgegebene Standpunkte inklusive einer Blickrichtung, die der Beobachter anhand einer Adresse oder eines geographischen Namens einnehmen kann. Wichtige Objekte der Modelle können so gezielt erreichbar gemacht werden. Die Speicherung hat sich ebenfalls in die räumliche Struktur der Datenbank einzufügen.
- **Dienste:**
Die Interoperabilität der 3D-Daten wird dadurch erreicht, dass webbasierte Dienste den Zugang ermöglichen. Gesteuert über die Verfahren des Filter-Encodings der OGC³ lassen sich normbasiert Präsentationsdaten georeferenziert aus der 3D-Datenbankstruktur abrufen (Altmaier und Kolbe, 2003).
Um solche Daten integrieren zu können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Erstens müssen die zu integrierenden Objekte in ihrer Ausprägung definierten Standards genügen. (Diesem Thema widmet sich zur Zeit im Rahmen der Initiative Geodateninfrastruktur NRW⁴ eine Gruppe von Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung mit dem Namen SIG 3D.)
Zweitens muss für eine gezielte Anfrage auf solche Dienste bekannt sein, welche räumliche Ausdehnung und welche Objektarten von den angemeldeten Diensten bezogen werden können.

7.2.1 Datenzugriff

7.2.1.1 Geschwindigkeit

Eine wesentliche Anforderung, sowohl an die Generalisierung als auch an die Datenspeicherung, ist die effiziente Bereitstellung großflächiger dreidimensionaler Modelle. Die Zugriffsgeschwindigkeit ist vor allem bei der Be-

³Open-GIS-Consortium

⁴kurz: GDI NRW, Internetpräsenz: <http://www.gdi-nrw.org>

antwortung von Anfragen nach Präsentationsmodellen von großer Bedeutung, da diese Anfragen von beliebigen Clients und in beliebiger Häufigkeit erfolgen können. Insbesondere in diesen Fällen gilt es, schnellstmögliche Reaktionszeiten zu erreichen. Im Falle der Fortführung ist die Performance hingegen zweitrangig, da sie in aller Regel seltener erfolgt als lesende Zugriffe für die Generierung von Ansichten. Daraus folgt, dass die Schnelligkeit im Zugriff der Geschwindigkeit bei der Ergänzung und ggf. der Reorganisation der Datenstruktur vorzuziehen ist.

7.2.1.2 Art der Anfragen

Großflächige Stadt- und Landschaftsmodelle werden in aller Regel von Organen der öffentlichen Verwaltung erstellt und verwaltet. Verwendungszwecke dieser Modelle sind zum einen interne Planungsaufgaben und Dokumentationen und zum anderen externe Anwendungen wie Tourismusförderung oder Stadtmarketing.

Daraus resultieren verschiedene Zugriffsszenarien. Für externe Anfragen kommen in erster Linie Internet-Techniken in Frage. Dabei ist darauf zu achten, dass die Zugriffsstrukturen zu gegebenen Standards kompatibel sind. Derzeit steht die Festlegung eines Standards für den internetbasierten Zugriff auf dreidimensionale Stadtmodelle durch die SIG3D⁵ vor der Verabschiedung (Kolbe, Gröger 2003). In der noch unveröffentlichten Spezifikation des so genannten W3DS-Dienstes sind Anfragen in Form einer Kreisscheibe (durch Punkt und Radius) und Bounding-Box (durch je einen Punkt für die linke untere und die rechte obere Ecke) definiert. Darüber hinaus können neben dem vollständigen Modell einzelne Themenbereiche wie zum Beispiel Gebäude, DGM oder Straßenmöbel für die angefragte Fläche angefordert werden. Die eingesetzte Datenstruktur ist gehalten, solchen Anfragen zu genügen.

Besonders interne Anfragen erfolgen des öfteren nicht über den reinen Raumbezug sondern über Identifikatoren. Dabei kann es sich direkt um Objektschlüssel für ein oder mehrere angefragte Objekte handeln. Darüber hinaus sind aber auch Anfragen nach Verwaltungseinheiten oder der räumlichen Ausdehnung von Kartenblättern denkbar.

⁵Spezielle Interessengruppe 3D im Rahmen der Initiative Geobasis.NRW

7.3 Angewendete Datenstrukturen

7.3.1 Der Baum der Modellobjekte

Die 3D-Modellobjekte unterliegen der in Abbildung 5.8 dargestellten Modellstruktur. Während des in Abschnitt 5.6 vorgestellten Vereinfachungs- und Zusammenfassungsverfahrens ordnet sich jedes Objekt einem übergeordneten, größeren Objekt unter. Gleiches gilt für dieses übergeordnete Objekt, bis die Wurzel des Baumes der Modellobjekte erreicht ist.

Am Beispiel städtischer Bebauung ordnet sich jedes Gebäude einem Gebäudeblock, der Gebäudeblock einem Stadtviertel und das Stadtviertel der gesamten Stadt unter, wie in Abbildung 7.1 verdeutlicht wird. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere der Begriff des Stadtviertels nicht als städtische Verwaltungseinheit zu verstehen ist, sondern als ein Gebiet, das ab einem gegebenen Betrachtungsabstand eine optische Einheit bildet.

Auf diese Weise bildet das gesamte Modellgebiet einen orientierten Wurzelbaum, der ausgehend von seinem Wurzelknoten mit zunehmender Stufe seiner Knoten detailliertere und in ihrer räumlichen Ausdehnung kleinere Objekte beinhaltet. Jeder Knoten enthält folgende Informationen:

1. Die Ausgestaltung des Objekts bzw. des Objektteils für die Präsentation.
2. Das Abstandsintervall, innerhalb dessen das Objekt oder Objektteil darzustellen ist.
3. Referenzen zum zugehörigen Objekt der Basisdaten zum Zwecke des optimierten Zugriffs im Fortführungsfall.
4. Weitere Metainformationen, wie Aktualität oder Herkunft der Präsentationsdaten.

Das Intervall, das den Abstandsbereich, in dem das Objekt darzustellen ist, beschreibt, kann entweder offen oder geschlossen sein. Es ist offensichtlich, dass es für alle Objekte einen maximalen Abstand x gibt, bis zu dem sie sichtbar sind. Hat der Abstandsbereich eines Objekts eine Untergrenze, so wird es ab dieser Grenze durch mindestens ein, im Normalfall aber mehrere Objekte, die einen höheren Detaillierungsgrad aufweisen, ersetzt.

In Abbildung 7.1 lässt sich dieser Sachverhalt leicht nachvollziehen. Ein

Baublock als Resultat der Zusammenfassung mehrerer Gebäude wird genau in dem Moment aus der Darstellung genommen, in dem seine detaillierteren Nachfolger zur Darstellung kommen. Auf der anderen Seite geht dieser Block mit mehreren anderen in einem Stadtteil auf, wenn sich der Betrachtungsabstand vergrößert. Das Sichtbarkeitsintervall ist also an beiden Seiten geschlossen.

Sobald die Stufe der Wurzelobjekte, die ausführlich in Kapitel 5 beschrieben wird, erreicht ist, treten offene Intervalle auf. Objekte und Objektteile aus dieser Ebene werden eingeblendet und werden bei weiterer Annäherung nicht mehr ersetzt.

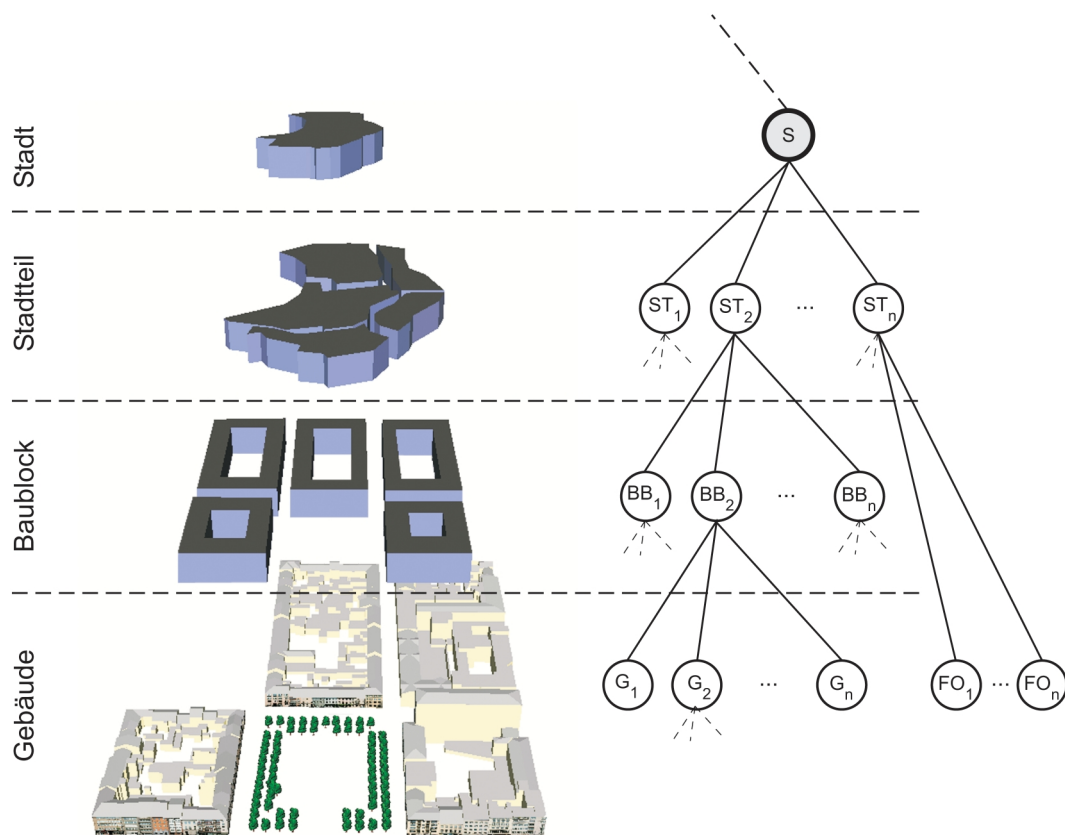


Abbildung 7.1: Beispiel für den Modellbaum eines Stadtgebiets

7.3.2 Räumliche Struktur

In Geoinformationssystemen werden zur Abbildung räumlicher Strukturen Baumstrukturen verwendet. Aufgabe dieser Strukturen ist es, die zu verwaltenden Objekte so zu strukturieren, dass eine möglichst performante Handhabung möglich ist. Damit ist in erster Linie ein schneller Zugriff gemeint; aber auch das Hinzufügen von Objekten und die Verwaltung der Daten muss zeitlich optimiert ablaufen (Worboys, 1995). Insbesondere für die Suche von Mengenbereichen ist dabei die Eigenschaft der Nachbarschaft von besonderer Bedeutung. Das bedeutet, dass Objekte, die im Hinblick auf eine oder mehrere Eigenschaften aufeinander folgen, auch in der Datenstruktur die Eigenschaft der Nachbarschaft repräsentieren.

Im eindimensionalen Fall lässt sich diese Problemstellung sehr einfach lösen, indem die Objektliste nach dem Zugriffskriterium sortiert gespeichert wird. Diese Strategie lässt sich nicht befriedigend auf den mehrdimensionalen Fall übertragen. Aus diesem Grund finden im zwei bzw. mehrdimensionalen Fall Baumstrukturen Anwendung. Als Beispiel dafür sind unter anderen Quad-Trees, Field-Trees, Segment trees, R-Trees, Cell-Trees, BSP⁶-Trees zu nennen. Grundsätzlich können bei diesen Strukturen zwei wesentliche Arten unterschieden werden:

Strukturen wie zum Beispiel der R-tree organisieren sich in Abhängigkeit der gespeicherten Daten. Dem gegenüber stehen Strukturen, die den Raum statisch strukturieren. Als Repräsentanten für beide Strategien werden der R-Tree und der Field-Tree mit den beiden nachfolgenden Abschnitten erläutert:

7.3.2.1 Der R-Tree

Der R-Tree stellt eine Verallgemeinerung des B-Trees in die n -te Dimension. Diese Strukturen reorganisieren sich dynamisch unter Berücksichtigung der hinzugefügten oder gelöschten Daten. Das bedeutet zum einen, dass sich die Struktur der Knoten im Sinne eines ausgeglichenen Baumes reorganisiert und zum anderen, dass sich Form und Größe der einzelnen Knoten ändert. Neben der Tatsache, dass die einzelnen Knoten unterschiedlich groß und verschieden geformt sind, können sich diese auch überlappen. Die Knoten des R-Trees beinhalten Referenzen (Pointer) auf die Objekte, die verwaltet werden.

⁶Binary space partitioning

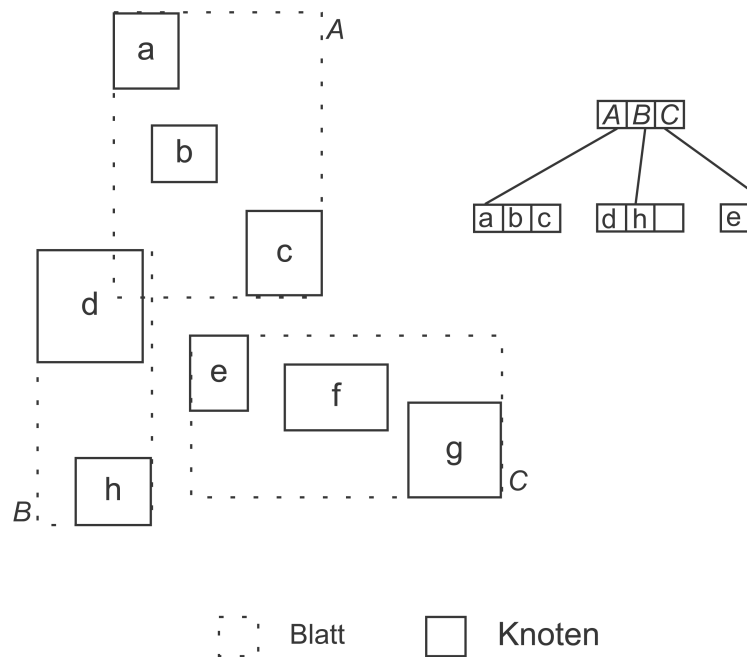


Abbildung 7.2: Beispiel für die Blattanordnung im R-tree

7.3.2.2 Field-Tree und Quad-Tree

Field- und Quad-Tree stehen für Strukturen, die die Ebene mit einem statischen, regelmäßigen Gitter überdecken, wobei sich die einzelnen Gitterelemente rekursiv weiter verfeinern. Diese hierarchische Verfeinerung erfolgt entweder im Vorhinein oder in Abhängigkeit der zu speichernden oder gerade hinzugefügten Daten (Samet, 1994). Wenn die Verfeinerung datenabhängig erfolgt, ist der Baum in Gebieten mit hoher Objektdichte höher als in Bereichen geringer Objektdichte. Im Gegensatz zu den im vorigen Abschnitt beschriebenen Strukturen werden diese Inhomogenitäten nicht ausgeglichen.

Der Quad-tree wird in der Literatur vor allem im Zusammenhang mit der Verwaltung von Rasterdaten genannt. Der Field-Tree weist weitgehend identische Eigenschaften auf, seine Knoten speichern jedoch im Gegensatz zum Quad-Tree Referenzen auf geometrischen Objekten (Worboys, 1995).

Die Eigenschaften von Field- und Quad-Trees sind genau identisch, wenn für die referenzierten Objekte ein Referenzpunkt herangezogen wird bzw. punkthafte Objekte vorliegen. Im Falle von Objekten mit flächenhafter Geometrie, werden diese in den kleinsten umschließenden Field-Tree Block eingeführt. Eine auf diese Weise gefüllte Field-Tree-Struktur wird

auch als CIF-Quad-Tree⁷ bezeichnet (Samet, 1994). So ergibt sich eine hierarchische Struktur der gespeicherten Objekte, die sich aus der Größe der Objekte ergibt. Anhand der genannten Eigenschaften des Quad- bzw.

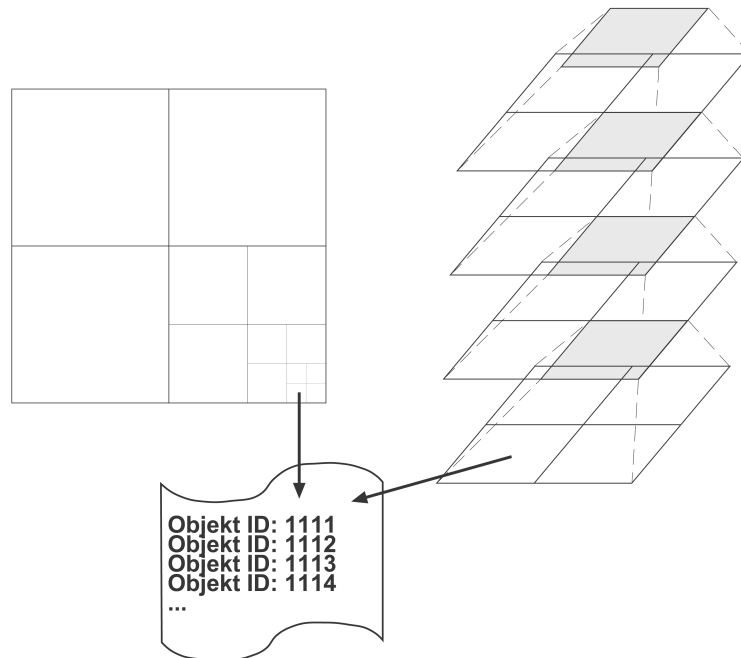


Abbildung 7.3: Field-Tree mit zunehmender Verfeinerung im Süd-Osten

Field-Trees lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Durch die regelmäßige Struktur lassen sich mehrere Bäume, die benachbarte Bereiche repräsentieren, einfach kombinieren.
2. Da eine hierarchische Struktur erzeugt wird und eine analoge Ebenenstruktur vorliegt, lässt sich der in Abschnitt 7.3.1 definierte Baum der Modellobjekte ideal mit dieser Struktur verknüpfen.
3. Die Gebietsaufteilung in definierte Abschnitte kommt der herkömmlichen Praxis der Datenhaltung in der öffentlichen Verwaltung entgegen.
4. Durch die Vorgabe, Objekte in die kleinstmögliche Zelle einzufügen, wächst, anschaulich gesprochen, der Maßstab der enthaltenen Objekte mit der Höhe des Baumes.

⁷CIF steht für Caltech Intermediate Form.

Diese wichtigen Eigenschaften, insbesondere die Abbildung einer Hierarchie, weisen Strukturen wie der R-tree nicht auf, so dass sie für die angestrebte Speicherung von dreidimensionalen Stadt- und Landschaftsmodellen weniger geeignet sind. Die Notwendigkeit, auf einen Field-Tree zurückzugreifen, wird im folgenden Abschnitt 7.3.3 noch einmal verdeutlicht.

7.3.3 Verknüpfung der Modellobjekte mit der räumlichen Struktur

Für die Anfrage nach einem 3D-Modell eines ausgewählten Bereichs genügt es im gegebenen Umfeld nicht, alle Objekte zurückzuliefern, die sich in diesen Bereich befinden. Vielmehr sind als Ergebnis der Anfrage ein oder mehrere Objekte des Baumes der Modellobjekte zu liefern, welche folgende Eigenschaften aufweisen:

- Die Objekte liegen vollständig im angefragten Gebiet oder haben alternativ eine Schnittfläche mit dem Anfragegebiet.
- Es gibt kein Vorgängerobjekt, dass vollständig innerhalb des Gebiets liegt.
- Das Objekt ist ein selbständiges Objekt.

Dem entsprechend muss die Verknüpfung des Objektbaums mit dem Field-Tree realisiert werden. Die selbständigen Objekte werden gemäß der folgenden Strategie in denselben eingeführt: Jedes Objekt wird mit der kleinsten Zelle verknüpft, die es vollständig beinhaltet. Auf diese Weise entsteht eine optimale Struktur, um für beliebige Modellgebiete den oder die entsprechenden Teilbäume des Objektbaumes zu ermitteln und bereitzustellen. Der sich daraus ergebende Datenzugriff wird im Abschnitt 7.3.5.1 beschrieben.

7.3.4 Semantische Struktur

Weder der Baum der Modellobjekte noch der Field-Tree ist für die schnelle Suche von Objekten nach semantischen Kriterien konzipiert. Zwar entspricht der Baum der Modellobjekte annähernd der Verwaltungsstruktur einer Gebietseinheit, aber dieser Zusammenhang kann nicht vorausgesetzt

werden. Offensichtlich ist, dass die Struktur für den Raumbezug keine Hilfestellung für diese Problematik bietet. Der semantische Zugriff ist aber sowohl für die Fortführung der Daten als auch für die Ausgabe von Modellen anhand von Adressen von großer Bedeutung.

Analog zum Field-Tree als Repräsentant der räumlichen Struktur können zur semantischen Suche Index-Strukturen eingeführt werden, die die entsprechenden Modellobjekte referenzieren. Als Beispiel für eine solche Struktur ist der B-tree zu nennen. Strukturen diese Art sind im Bereich der Informatik ausführlich beschrieben, so dass für weiterführende Informationen an die grundlegende Literatur verwiesen wird (z.B. Aho et al., 1985 oder Ottmann und Widmayer, 1996).

7.3.5 Zugriff auf die Modelldaten

7.3.5.1 Räumliche Suche

Wie bereits in Abschnitt 7.3.2 erläutert, müssen für die Beantwortung einer räumlichen Anfrage die größtmöglichen Objekte, die räumlich in dem Anfragegebiet liegen, zurückgeliefert werden. Anders formuliert sind genau diejenigen Objekte zu ermitteln, die vollständig in das Anfragegebiet passen und für die kein Vorgängerobjekt existiert, welches diese Eigenschaft ebenfalls hat.

Folgende Vorgehensweise erlaubt es, diese Menge aus dem vorgestellten Field-Tree zu extrahieren:

1. Suchen der Startzelle, also der kleinsten Zelle Z_n , die das Anfragegebiet vollständig enthält. Das Anfragegebiet ist in der Abb. 7.4 dunkel unterlegt und die ausgewählte Zelle fett umrandet.
2. Ausgabe der enthaltenen Objekte, die im Modellgebiet liegen. Liegt die Zelle komplett im Anfragegebiet, so sind die dort enthaltenen Objekte vollständig auszugeben, sofern sie keinen übergeordneten Vorgänger haben, der schon ausgegeben wurde.
3. Für alle nachfolgenden Zellen von $Z_n, Z_{(n+1)_i}$, die das Anfragegebiet schneiden:
 - (a) Ausgeben der enthaltenen Objekte, die im Modellgebiet liegen.
 - (b) Falls die Zelle vollständig im Gebiet liegt oder es keine Nachfolgezellen mehr gibt, ist die Untersuchung der Zelle beendet, sonst nächste Iteration bei Schritt 3.

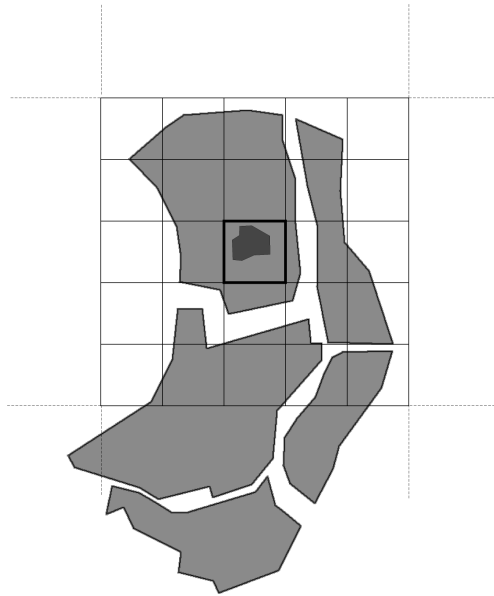


Abbildung 7.4: Suche der Startzelle

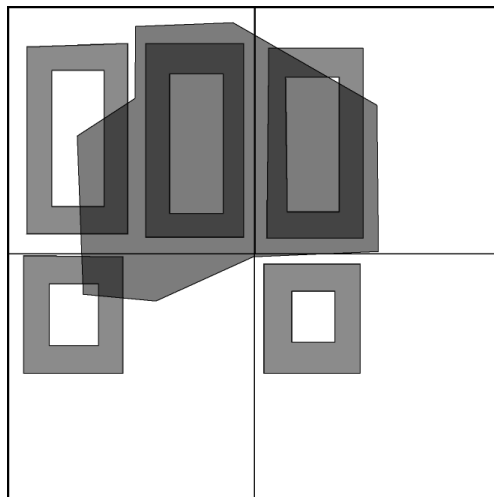


Abbildung 7.5: Untersuchung der nachgeordneten Zellen (Iteration 1)



Abbildung 7.6: Untersuchung der nachgeordneten Zellen (Iteration 2)

Auf diese Weise erhält man die Menge der Objekte, die exakt die selektierte Fläche ausfüllt. Diese Variante hat den Nachteil, dass die gelieferten Objekte unterschiedlichen Detailstufen angehören können. Dieser Nachteil lässt sich beseitigen, indem man zusätzlich zu den im Anfragebereich liegenden Objekten die Objekte ausgibt, die die Modellgrenze schneiden. Die genannte Änderung bringt es mit sich, dass alle Wurzeln der ermittelten Teilbäume die gleiche Stufe im Gesamtbaum der Objekte einnehmen. So entsteht ein einheitlich ausgeprägtes Ausgabemodell. Dieser Vorteil wird durch den Nachteil erkaufte, dass das übermittelte Modell nicht exakt die angefragten Grenzen aufweist, sondern diese überschreitet. Auf Grund der Tatsache, dass sich beide Varianten lediglich in der Selektionsbedingung für die Objekte unterscheiden, ist es unproblematisch, beide alternativ anzubieten.

7.3.5.2 Suche nach semantischen Kriterien

Unter der semantischen Suche ist der gezielte Objektzugriff auf Grund eines beliebigen nicht geometrischen Identifikators zu verstehen. Als Beispiele sind unter anderen Stadt, Stadtteil, Straße und Hausnummer als Objektschlüssel zu nennen. Über entsprechende Indizes gemäß 7.3.4 wird das passende Objekt zurückgeliefert. Zum Zweck der Fortführung kann so zum Beispiel auf ein bestimmtes Objekt zugegriffen werden.

Für die Anfrage eines Präsentationsmodells ist es sinnvoll, die semantische Anfrage in eine räumliche Anfrage mit der Lagekoordinate des Bauwerks

zuzüglich eines Radius, dessen Größe von der gewünschten Umgebungsgröße abhängt, zu überführen. So wird auf einfache Weise nicht nur das einzelne angefragte Objekt sondern auch das Umfeld extrahiert.

7.3.5.3 Zugriff über Themen

Um Daten für bestimmte Themen bereitzustellen, können die Darstellungsobjekte optional einem Thema zugeordnet werden. Das ermöglicht die Unterscheidung verschiedener Anwendungsszenarien. Als Beispiel für die Anwendung von Themen sei die Unterscheidung von Bestand und Planung innerhalb eines Stadtgebietes genannt. In diesem Fall können für den gleichen angefragten Modellbereich unterschiedliche Modelle entsprechend des gewählten Themas zurückgeliefert werden.

Themen können aber auch im Sinne einer kleinräumigen Gliederung benutzt werden, indem sie räumlich zusammenhängende Gebiete wie zum Beispiel Ortsteile miteinander verknüpfen.

7.3.6 Anpassung an das Darstellungsumfeld

Aus der vorliegenden Datenstruktur lassen sich multiskalierte Modelle ableiten, deren situationsabhängiges Verhalten ausschließlich auf der Sichtbarkeit von Objekten basiert. Das Prinzip der *visuellen Richtigkeit* hat, wie zuvor begründet, oberste Priorität. Weitere denkbare Gesichtspunkte werden nicht berücksichtigt. Als Resultat werden möglichst realistische Modelle, die mit möglichst geringen Anforderungen an die Hardware darstellbar sind, bereitgestellt.

Im Abschnitt 3.2 wurden demgegenüber noch eine Reihe von weiteren Gründen für die Einführung verschiedener Detaillierungsgrade vorgestellt, die in der Praxis von Bedeutung sind. Anwendungsgesichtspunkte und die Rechnerleistung des Präsentationsrechners sind dabei an erster Stelle zu nennen. Beide Aspekte können ohne Modifikation der Algorithmen durch die Einführung von zwei Parametern berücksichtigt werden:

1. Anwendungsgesichtspunkte:
Verschiedene Verwendungszwecke erfordern eine unterschiedliche Ausprägung der Modelldaten. Sofern das nicht schon bei der Erfassung der Daten beachtet wurde, kann das auch bei der Ableitung aus diesen Visualisierungsdaten durch einen Parameter LoD_{max} ermöglicht werden.

Zum Beispiel werden für die Berechnung der Funkausbreitung lediglich die Volumina der Objekte benötigt. Durch die entsprechende Wahl des Parameters LoD_{max} kann die Ausprägung des abgegebenen Modells auf das gewünschte Maß reduziert werden.

2. Rechnerleistung:

Mit Hilfe der Generalisierungsmethode wird eine Hierarchie der Darstellungsobjekte erzeugt. Der Wechsel zwischen den einzelnen Stufen wird durch deren Sichtbarkeitsbereich gesteuert. Sollten die so erzeugten Modelle auf dem gegebenen Rechner nicht mit ausreichender Performance dargestellt werden, so kann dies durch Einführung eines Maßstabsfaktors f_m gesteuert werden. Wenn $f_m < 1$ gilt, dann werden alle Objekte und Objektteile entsprechend früher ausgeblendet bzw. durch eine entsprechend weniger detaillierte Version ersetzt. Dadurch kann die Komplexität der aktuell darzustellenden Version der Leistung der verwendeten Hardware angepasst werden.

7.4 Datenmodell

Die im vorangegangenen Abschnitt definierten Datenstrukturen sollen an dieser Stelle anhand des UML-Diagramms in Abbildung 7.7 erläutert werden. Zentraler Bestandteil des Datenmodells sind die Gebäude, ihre Aggregate und ihre Gebäudeteile. Diese drei Klassen leiten sich von der abstrakten Klasse *Gebäudeobjekt* ab und erben die Attribute *Visualisierung*, *SichtbarAb* und *SichtbarBis*. Das Attribut *Visualisierung* referenziert die Darstellungsgeometrien der jeweiligen Objekte mittels einer URL, die den Speicherort auf einem zur Verfügung stehenden Server angibt. Die Attribute *SichtbarAb* und *SichtbarBis* bilden das Sichtbarkeitsintervall des Objektes ab. Zusätzlich besitzen alle Gebäudeobjekte eine *Georeferenzierung*. Diese setzt sich aus einer *BoundingBox*, einer *Skalierung* und einer *Rotation* zusammen. Für die Präsentation wurden diese Parameter bewusst wegen ihrer Anschaulichkeit gewählt. Die Informationen lassen sich auch durch eine Transformationsmatrix ausdrücken.

Darüber hinaus können die Gebäudeobjekte optional mit einem *Thema* verknüpft werden. Diese Klasse besitzt neben ihrer *ID* das boolesche Flag *räumlich*. Bei einem nicht räumlichen Thema, muss bei der Anfrage für ein Modell in jedem Fall auch dessen räumlicher Geltungsbereich angegeben werden. Im Falle eines Themas mit räumlich begrenzendem Charakter ist

ein Präsentationsmodell auch ausschließlich über die Angabe des Themas definiert und kann optional in seiner räumlichen Ausdehnung begrenzt werden.

Die Klasse *Gebäude* beinhaltet alle selbständigen Gebäude. Sie repräsentiert somit die Wurzelknoten der Bäume, welche die in Kapitel 5 beschriebene Generalisierung und Strukturierung der Gebäudeobjekte liefert. Jedes Gebäude kann beliebig viele Objektteile haben, die ihrerseits wieder in Teile aufgeteilt sein können.

Ein Gebäude kann seinerseits einem zusammengefassten Objekt, dem *Gebäudeaggregat*, angehören. Dieses kann sich zum einen aus Gebäuden und zum anderen aus Gebäudeaggregaten zusammensetzen. Somit entspricht dieser Teil des Datenmodells dem Baum der Modellobjekte.

Zur Repräsentation der räumlichen Struktur dient der *FieldTree*. Dieser enthält die informellen Attribute *Bezeichner (ID)*, *Tiefe* und die *Anzahl der Objekte*. Dazu kommen die Operationen *GebäudeEinfügen*, *GebäudeLöschen* für den Aufbau und die Verwaltung der Baumstruktur, sowie *GebäudeImGebiet* für die Suche von Objekten innerhalb eines räumlichen Bereichs. Besondere Bedeutung kommt dabei der Operation *GebäudeEinfügen* zu, da hier die im Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Vorgaben zu befolgen sind.

Die Klasse *FieldTree* ist genau mit einer Instanz der Klasse *Knoten*, die den Wurzelknoten des Baumes darstellt, verknüpft. Die Instanzen der Klasse *Knoten* können jeweils bis zu vier Nachfolgeknoten referenzieren und sind abgesehen vom Wurzelknoten in entgegengesetzter Richtung mit einem Vorgänger verknüpft.

Die *Knoten* referenzieren nun die *Gebäudeaggregate* und die *Gebäude*. Dabei liegt jedes Gebäude und jedes Aggregat in genau einem Knoten des Field-Trees. Die Anzahl der von einem *Knoten* referenzierten Objekte ist nicht begrenzt.

Für die Suche nach semantischen Kriterien können die Gebäude zusätzlich mit Hilfe eines B-Trees indiziert werden. Dies wird durch die Verknüpfung mit der Klasse *BTree* modelliert. Dabei kann jedes Objekt der Klasse *Gebäude* eine oder mehrere Indizes aufweisen, die einen schnellen Zugriff anhand eines Attributwertes ermöglichen.

Zum Zweck der Fortführung können die Gebäude mit Objekten der Basisdaten verknüpft werden. Auf diese Weise ist es möglich die Fortführung der beiden Datenbestände mit einander zu verknüpfen bzw. den Zugriff auf die 3D-Daten über die Objekte der Geobasisdaten zu ermöglichen.

Im Diagramm wurde auf die Darstellung gekapselter Zugriffe auf Privatelemente der Klassen verzichtet, da diese nicht zum Verständnis des Datenmodells beitragen.

7.5 Zusammenfassung

Das in diesem Kapitel hergeleitete Datenmodell ermöglicht es, die Ergebnisse der Generalisierung und Strukturierung von dreidimensionalen Gebäudemodellen in einer Datenstruktur zu verwalten. Diese Struktur ist so konzipiert, dass Anfragen auf die gespeicherten Daten erstens schnell beantwortet und zweitens Modelle in einem der angefragten Gebietsgröße entsprechenden Detaillierungsgrad abgegeben werden können. Durch die anhand der Sichtbarkeitsintervalle aufgebaute Baumstruktur, werden die Modelle in Abhängigkeit der Betrachtungssituation verfeinert.

Kapitel 8

Fazit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Generalisierung und nachfolgenden Präsentation von dreidimensionalen Gebäudemodellen. Die Entwicklungen der jüngeren Zeit, wie automatische Verfahren zur Herstellung von Gebäudemodellen aus Geobasisdaten, ermöglichen deren Generierung mit einer immer größeren Flächendeckung bei zunehmendem Detailreichtum. Neben der wachsenden Leistungsfähigkeit der Hard- und Software etablieren sich neue raumbezogene Datenbestände wie zum Beispiel ALKIS, deren Struktur und Inhalt sich immer besser für die automatisierte Herstellung detailreicher 3D-Gebäudemodelle eignen.

Daraus folgt, dass sich Visualisierungen nicht mehr aus Herstellungsgesichtspunkten auf kleinere Modellgebiete beschränken oder auf für die Realitätsnähe wichtige Details verzichten müssen.

Um einen bestmöglichen Nutzen aus den so aufbereiteten und fortentwickelten Daten zu erhalten, müssen die 3D-Präsentationen einem möglichst breiten Anwenderkreis zugeführt werden können. Dafür ist erstens eine schnelle Übertragbarkeit der Modelle über konventionelle Datenleitungen und zweitens die Lauffähigkeit auf möglichst kostengünstiger Standard-Hard- und Software erforderlich.

Besonders bei der interaktiven Darstellung setzen sowohl die Datenübertragung als auch die Darstellungsressourcen zu enge Grenzen bezüglich der Skalierbarkeit der Modelle. Auch durch zukünftig anzunehmende Weiterentwicklungen oder die Verwendung von kostenaufwändigen Speziallösungen für die Visualisierung werden diese Grenzen nur verschoben aber nicht entfallen.

Diese Problemstellung wird in *Kapitel 1* analysiert und im weiteren Verlauf der Arbeit einem geschlossenen Lösungskonzept zugeführt.

Ausgehend von der Grundidee, dass eine Visualisierung nur mit den Objekten belastet werden muss, die der Betrachter tatsächlich erkennen

kann, werden in *Kapitel 2* Mindestgrößen für das Erkennen von Objekten in der 3D-Präsentation hergeleitet. Grundlage dafür sind die physiologischen Grenzen der menschlichen Wahrnehmung sowie die Eigenschaften der Computerbildschirme als Darstellungsmedium. Anhand der Mindestgrößen wird anschließend der formale Zusammenhang zwischen der Objektgröße und -erkennbarkeit im virtuellen Raum und der Größe in der Realwelt in Abhängigkeit vom Betrachtungsabstand hergestellt. Damit kann anhand der Betrachtungssituation und der Objektgröße objektiv entschieden werden, ob die Darstellung eines Objektes beziehungsweise eines Objektteils erforderlich ist oder nicht. Diese Erkenntnisse sind die Grundlage für die angestrebte Variation der Detaillierungsgrade in den Präsentationsmodellen.

Bereits vorhandene LoD-Konzepte werden anschließend in *Kapitel 3* vorgestellt und diskutiert. Dabei handelt es sich um verschiedene Definitionen von Detaillierungsgraden, die sich entweder auf vollständige Modelle beziehen oder zonenweise variieren. Auf Grund der Feststellung, dass sowohl statische als auch zonenweise variierende LoD-Zonen nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen, wird die objektweise Variation des Darstellungsmaßstabs vorgeschlagen, für die in den folgenden Kapiteln die Grundlagen geschaffen werden.

Um die Basis für die automatisierte Generierung von Darstellungsobjekten zu schaffen, erfolgt in *Kapitel 4* die Untersuchung bekannter Techniken der kartographischen Generalisierung. Darüber hinaus werden ebenso computergrafische Verfahren betrachtet. Deren Wirkungsweisen werden im Hinblick auf das Prinzip der visuellen Richtigkeit analysiert. Der Begriff der visuellen Richtigkeit steht dabei für ein Abbild der Realwelt, das beim Betrachter möglichst exakt den Eindruck erzeugt, den er an gleicher Stelle in der Realwelt erhielte.

Die Untersuchung der kartographischen Generalisierungsoperationen ergibt, dass lediglich die Operationen der Vereinfachung und der Zusammenfassung nicht mit dem Prinzip der visuellen Richtigkeit kollidieren. Alle anderen Operationen, wie zum Beispiel das Betonen und Verdrängen, verletzen das Prinzip der visuellen Richtigkeit, da durch sie die realen Verhältnisse der Darstellungssituation verfälscht werden.

Die Analyse der Methoden der Computergrafik unterscheidet zunächst invasive und nicht invasive Verfahren. Die invasiven Verfahren setzen an der gleichen Stelle an wie die kartographischen Vorgehensweisen, das heißt, sie modifizieren die gespeicherten Modellgeometrien. Der Vergleich ergibt unter anderem, dass die Anwendung der ermittelten Mindestgrößen, das Vorwissen bezüglich der charakteristischen Eigenschaften von Gebäuden und deren Zusammenfassung nur mit den kartographischen Verfahren möglich sind, nicht aber mit den Methoden der Computergrafik. Somit

stellen sich insgesamt die rein computergrafischen Verfahren für die gegebene Aufgabenstellung als weniger geeignet dar.

Die nicht invasiven Verfahren greifen zur Laufzeit der Modellpräsentation und erhöhen zusätzlich die Darstellungsgeschwindigkeit. Sie wirken vollkommen unabhängig von den kartographischen und invasiven Ansätzen, so dass sie eine sinnvolle Ergänzung zur Generalisierung darstellen.

Auf Grund der Tatsache, dass in der kartographischen Vereinfachung sowohl im Rahmen dieser Arbeit, als auch im Allgemeinen Methoden der Computergrafik und der algorithmischen Geometrie (computational geometry) zum Einsatz kommen, bewegen sich die nachfolgenden Verfahren im Bereich der Schnittstelle zwischen kartographischen Methoden und den Verfahren der Informatik. Besonderer Wert wird dabei auf den entscheidenden Einfluss der kartographischen Mindestgrößen gelegt, die Art und Maß der Objektstrukturierung als auch der Generalisierung steuern. Aufbauend auf Mindestgrößen und der Analyse der Generalisierungstechniken in Kapitel 4 wird daraufhin in *Kapitel 5* ein Verfahren für die Generalisierung von Darstellungsobjekten entwickelt. Die Gebäudeobjekte werden dabei in ihre Bestandteile zerlegt. Die Zerlegung erzeugt eine Baumstruktur, deren Wurzel das größte Objektteil repräsentiert. Diesem werden bei wachsendem Darstellungsmaßstab nach und nach die kleineren Objektteile zugeordnet. Somit ergibt sich die detailreichste Darstellung aus der Aggregation der Gesamtmenge der Objektteile. Das hat den Vorteil, dass keine Geometrien doppelt übertragen werden müssen. Bei kleinerem Betrachtungsmaßstab werden die Wurzeln der strukturierten Objekte zusammengefasst. Für die Zusammenfassung wird ein Regelwerk und ein Gesamt Ablauf zusammen mit der Strukturierung der Objektteile erarbeitet, um ein optimales Zusammenwirken der beiden Operationen zu erreichen. So entsteht durch diesen Prozess eine neue Datenstruktur der Objekte, die aus der vorhandenen, verwaltungstechnisch geprägten Hierarchie, eine neue, nach Präsentationskriterien aufgebaute Struktur erzeugt.

Die so verarbeiteten geometrischen Informationen können darüber hinaus durch aufgelegte Rasterinformationen ergänzt werden. *Kapitel 6* widmet sich der Behandlung dieser so genannten Texturen. Die vorgenommenen Untersuchungen zeigen, dass diese Rasterbilder keinen generalisierenden Maßnahmen zugeführt werden müssen. Der Informationsverlust, der sich aus der optischen Verkleinerung der Bilder ergibt, entspricht im Gegensatz zu denkbaren generalisierenden Verfahren dem wirklichen Eindruck in der Realwelt. Somit folgt dieses Verfahren dem Prinzip der visuellen Richtigkeit und bedarf daher keiner Anpassung.

Für die Verwaltung der so hergestellten 3D-Modelle wird in *Kapitel 7* eine Datenbankstruktur für die Speicherung der strukturierten Gebäude-

modelle vorgestellt. Darüber hinaus können weitere für die vollständige Darstellung von Stadtmodellen notwendige Objekte und Verknüpfungen mit externen Diensten für die Anforderung weiterer Darstellungsobjekte abgelegt werden.

Die einzelnen Gebäudeobjekte und deren Objektteile ordnen sich dabei in eine übergeordnete Baumstruktur ein, die die Hierarchie des gesamten Modells repräsentiert und einen orientierten Wurzelbaum darstellt. Durch dessen Kombination mit einem Field-Tree wird ein effizienter und schneller räumlicher Zugriff auf die multiskaligen Gebäudemodelle erreicht.

Somit liegt schlussendlich eine datenbankbasierte Speicherung von Präsentationsdaten vor, die auch über Dienste den Zugriff auf die dreidimensionalen Modelle optimiert. Das äußert sich durch schnellen Zugriff auf die Modelldaten in der Datenbank. Zusätzlich wird die zu transferierende Datenmenge sowohl in der Gesamtmenge minimiert als auch gleichmäßiger über die Betrachtungszeit verteilt, da nicht sofort das komplette Modell übertragen werden muss, sondern in Abhängigkeit des Betrachtungsverhaltens nachgeladen werden kann. Beide Aspekte und damit das Ergebnis der Generalisierung von Gebäudemodellen unter Wahrung der visuellen Richtigkeit führen dazu, dass erheblich großflächigere und zugleich detailliertere Modelle präsentiert werden können und sich darüber hinaus das Ladeverhalten insbesondere bei der Übertragung im Internet deutlich verbessert.

Somit können solche Modelle zukünftig einem breiteren Anwenderkreis zur Verfügung gestellt werden. Daraus resultiert erstens ein Mehrwert für die zu Grunde liegenden Geobasisdaten und zweitens können die Gebäudemodelle selbst einen deutlich größeren Beitrag bei der Unterstützung von Planungsverfahren, der Wirtschaftsförderung und dem Stadtmarketing im Allgemeinen leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] Aho, A. V., Hopcroft, J. E., Ullman, J. D., Data Structures and Algorithms, Addison-Wesley, 1985
- [2] Altmaier, A. and Kolbe, T. H.: Applications and Solutions for Interoperable 3d Geo-Visualization. In: D. Fritsch (ed.): Proceedings of the Photogrammetric Week 2003 in Stuttgart, Wichmann Verlag, 2003.
- [3] Arnberger, E. und Kretschmer I.: Wesen und Aufgabe der Kartographie - Topographische Karten. Band I der Enzyklopädie der Kartographie und ihrer Randgebiete, Wien 1975
- [4] Averdung, C.: Modellierung von 3D-Stadtmodellen mit heterogenen Ausgangsdaten, In: Tagungsband zum Symposium Praktische Kartographie 2004 in Königslutter, Kartographische Schriften, Band 9, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2004
- [5] Berger, A.: Bearbeitungsmodelle für EDV-unterstützte Generalisierung von Streusiedlungs- und Häuserreihengebieten in topographischen Karten. Dissertation, Bonn 1974
- [6] Bill, R.: Virtuelle Realität und GIS im kommunalen Umfeld in ZfV 2002, S. 5-8
- [7] Bill, R. et al.: Datenfusion zur Erstellung realitätsnaher 3D-Geo-Informationssysteme in ZPF 1997, S. 129-137
- [8] Bobrich, J.: Automationsgestützte Generalisierung Topographischer Karten, In:Kartographische Schriften, Band 6, Bonn 2002
- [9] Bobrich, J.: Cartographic Map Generalization In Urban Districts. In: Proceedings of the GIS Research UK, 9th annual Conference, Seite 513-515, 2001

- [10] Brunner, K.: Limitierungen bei der elektronischen Bildschirmanzeige von Karten. In: Schmidt, B., Uhlenkücken, C. (Hrsg.): Visualisierung raumbezogener Daten: Methoden und Anwendungen, Band II, Beiträge zum 3.GeoViSC-Workshop, IfGI-Prints, Heft 8, Münster, S. 35-47
- [11] Campenhausen, C. von: Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung, 2. Auflage, Stuttgart 1993
- [12] Cohen, J., Vershney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F., Wright, W.: Simplification Envelopes, In: Computer Graphics, Vol 30 (Siggraph 96), 1996
- [13] Coors, V., Flick, S.: Integrating Levels of Detail in a Web-based GIS, In: Proceeding of the 6th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, Washington, 1998
- [14] Coors, V.: Feature preserving simplification in Web-based 3D-GIS, 2002
- [15] Danahy, J.: Visualization Data Needs in Urban Environmental Planning and Design. In: Photogrammetrische Woche, 1999
- [16] Douglas, D. und Peucker, T.: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, , In: The Canadian Cartographer 10(2) Seiten 112-122, 1974
- [17] (Encarnaç o, J. L.: Computer-Graphics - Programmierung und Anwendung von Systemen, R.Oldenbourg Verlag, M chen 1975
- [18] (Frank, A.U. und Barrera, R.: The Field-Tree: A Data Structure for Geographic Information Systems. In: Design and Implementation of Large Spatial Databases, First Symposium SSD'89, Santa Barbara 1989
- [19] Gartner, G.: Internet-Kartographie:(R)Evolution oder Sackgasse. In: Kartographische Nachrichten Seite 98-104, 1999
- [20] Garland, M., Heckbert, P.S.: Survey of polygonal surface simplification algorithms. Technical Report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Multi-Resolution Surface Modelling Course Siggraph, 1997, <http://www.cs.cmu.edu/> ph.
- [21] Garland, M., Heckbert, et al.: Finding and removing features from polyhedra. In: Proceedings of DETC'01, 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences, Pittsburg, 2001

- [22] Goldstein, E.: Wahrnehmungspsychologie, Berlin 1997
- [23] Gröger, G., Kolbe, T. H., Plümer, L.: Mehrskalige, multifunktionale 3D-Stadt- und Regionalmodelle. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformtion (PFG) 2/2004
- [24] Gröger, G., Kolbe, T. H.: Interoperabilität in einer 3D-Geodateninfrastruktur. In: Bernhard, Sliwinski, Senkler. Geodaten- und Geodienste-Infrastrukturen - von der Forschung zur Anwendung. Tagungsband der Münsteraner GI-Tage 2003, IfGI Prints 18, Uni Münster 2003
- [25] Hake, G., Grünreich D.: Kartographie, 7.Auflage, Berlin 1994
- [26] Hake, G., Grünreich D., Meng, L.: Kartographie, 8.Auflage, Berlin 2002
- [27] Hoppe, H.: Progressive Meshes, Computer Graphics, Vol 30 (Siggraph 96), 1996
- [28] Hubel, D.: Auge und Gehirn, Heidelberg 1989
- [29] Kada, M.: 3D Generalisierung für die Echtzeitvisualisierung von Landschaftsmodellen, http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2002/dgpf_kada.2002.pdf
- [30] Kolbe, T. H., Gröger G.: Towards unified 3D city models. In: Proceedings of the ISPRS Comm. IV Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II in Stuttgart, 2003
- [31] Koppers, L.: Dynamische Visualisierung von 3D-GIS-Daten auf Basis der Internet-Technologie In: Mitteilungblatt DVW, Landkreis Bayern, 2000, Seite 441 - 457
- [32] Kraus, K.: Photogrammetrie, Band 1, 6. Auflage, Bonn 1997
- [33] Lal, J. und Meng, L.: Rules and constraints for 3D Generalization of Urban Area, In: Acta Geographica Sinica, Vol. 11, Supplement 2001, Beijing, Seite 17-28
- [34] Leyendecker, W. und Grehn, F.: Augenheilkunde, 25. Auflage, Berlin 1993
- [35] Luebke, D., Erikson, C.: View-Dependent Simplification Of Arbitrary Polygonal Environments. In: Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH 1999, Seiten 199-208, 1997

- [36] Mayer, H.: Scale Space Events for the Generalization of 3D-Building Data, ISPRS, Vol. 33 Band 4, Amsterdam, 2000
- [37] McMaster, R., Shea, K.: Generalization in digital cartography, Association of American Geographers, Washington D.C., 1992
- [38] Meng, L.: Automatic Generalization of Geographic Data, Technical Report, 1997, http://www.vbbviak.sweco.se/Research_net/preport/fm9706.htm, Sweden
- [39] Meng, L.: Heutiger Stand von Theorie und Methodik der Generalisierung. In: Kartographische Bausteine, Band 19, TU Dresden 2001
- [40] Meyer, U.: Generalisierung der Siedlungsdarstellung in digitalen Situationsmodellen, Dissertation, Hannover 1989
- [41] Neudeck, S.: Zur Gestaltung topografischer Karten für die Bildschirm-visua-li-sierung., Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München (2001), Heft 74 (Dissertation).
- [42] Newman, W.M. und Sproull, R.F.: Principles of interactive Computer Graphics, McGraw-Hill, Hamburg, 1981
- [43] Ottmann, T. und Widmayer, P.: Algorithmen und Datenstrukturen, Spektrum Akademischer Verlag, 3.Auflage, 1996
- [44] Rock, I.: Wahrnehmung, Heidelberg 1985
- [45] Rossignac, J., Ericson In: Geometric Modeling in Computer Graphics, Falcidieno, B. and Kunii, T. (eds.), Springer Verlag, 1993
- [46] Samet, H.: The Design and Analysis of Spatial Data Structures, Addison-Wesley, 1994
- [47] Schilcher, M., Guo, Z., Klaus, M., Roschlaub, R.: Aufbau von 3D-Stadtmodellen auf der Basis von 2D-GIS In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformtion (PFG) 3/1999, Seite 157ff
- [48] Schürer, D.: Ableitung von digitalen Landschaftsmodellen mit geringerem Strukturierungsgrad durch Modellgeneralisierung, Doktorarbeit, Universität Bonn, 2002
- [49] Sester, M.: Maßstabsabhängige Darstellungen in digitalen räumlichen Datenbeständen, Habilitationsschrift, Universität Stuttgart 2001

-
- [50] Sester, M.: Generalization based on least squares adjustment, In: IAPRS Vol. 33, Part B4, Amsterdam 2000
- [51] Sester, M.: Application dependent Generalization - The Case of pedestrian navigation, In: IAPRS Vol. 34, Part 4, Ottawa 2002
- [52] Staufenbiel, W.: Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen, Dissertation, Hannover 1973
- [53] Terriblini, Entwicklung von Arbeitsabläufen zur automatischen Erstellung von interaktiven, vektorbasierten topographischen 3D-Karten, Dissertation, ETH Zürich 2001
- [54] Thiemann, F.: Generalization of 3D Building Data, In: IAPRS Vol. 34, Part 4 "Geospatial Theory, Processing and Applications", Ottawa 2002
- [55] Trendelenburg W.: Der Gesichtssinn., 2.Auflage, Berlin 1961
- [56] Wiesel, J.: Digitale Orthophototechnik. In: Bähr, H.-P., Vögtle, T. (Hrsg.): Digitale Bildverarbeitung, 2.Auflage, Karlsruhe 1991
- [57] Worboys, M. F.: GIS - A computing perspektive, London 1995

Abbildungsverzeichnis

2.1	Der Sehwinkel	17
2.2	Konvergenz (links) und Akkomodation	19
2.3	Verdeckung	20
2.4	Relative Größe	20
2.5	Relative Höhe	20
2.6	Atmosphärische Perspektive	21
2.7	Gewohnte Größe	21
2.8	Lineare Perspektive	21
2.9	Texturgradient	22
2.10	Licht und Schatten	22
2.11	Bewegungsparallaxe bei unterschiedlich weit entfernten Objekten	22
2.12	Das stereoskopische Sehen.	24
2.13	Verkleinerung durch die Bildschirmdarstellung	26
3.1	LOD-Verteilung anhand der Betrachtungssituation	34
3.2	Ansicht aus großer Höhe	35
3.3	Ansicht aus mittlerer Höhe	36
3.4	Ansicht aus der menschlichen Umgebungswahrnehmung	36
4.1	Informationsübertragung im Vergleich	45
4.2	Vereinfachung	46

4.3	Zusammenfassung	48
4.4	Auswahl	50
4.5	Backface-Culling	52
4.6	Frustrum-Culling oder Windowing	53
4.7	Rekursive Unterteilung des Darstellungsfensters	54
4.8	Analyse eines Fensters	55
4.9	Zusammenfassung von Punkten	56
5.1	Differentielle Übertragung von LoDs	66
5.2	Einfluss der wechselnden Perspektive	69
5.3	Unterschiedliche Bewertung von Objektteilen gleicher Größe	70
5.4	Unterscheidung von Einbuchtungen	71
5.5	Geometrietypwechsel (volumenhaft nach flächenhaft) am Beispiel einer Mauer	72
5.6	Die Trennung von Objektteilen	73
5.7	Detektion von Eckversprüngen	74
5.8	Strukturierung der Objektteile	76
5.9	Beispiel für die Strukturierung eines Hauses	77
5.10	Hilfsfläche zur Trennung von Dachaufbauten	79
5.11	Vergleich von Kettenhaus- und Reihenhausbebauung	80
5.12	Iterative Zusammenfassung von Objekten	82
5.13	Situation im Grundriss	84
5.14	Ausgangssituation	85
5.15	Erste Zusammenfassung	85
5.16	Strukturierung der Objekte	86
5.17	Zweite Zusammenfassung	86
5.18	Wegfall von Objekten mit Zusammenfassung bei größerer Betrachtungsentfernung	86
5.19	Weitere Zusammenfassung bei gewachsenem Betrachtungs- abstand	87

6.1	Vergleich von natürlicher Verkleinerung und bikubischer Bildreduktion	95
7.1	Beispiel für den Modellbaum eines Stadtgebiets	105
7.2	Beispiel für die Blattanordnung im R-tree	107
7.3	Field-Tree mit zunehmender Verfeinerung im Süd-Osten .	108
7.4	Suche der Startzelle	111
7.5	Untersuchung der nachgeordneten Zellen (<i>Iteration 1</i>) . . .	111
7.6	Untersuchung der nachgeordneten Zellen (<i>Iteration 2</i>) . . .	112
7.7	Datenmodell in UML	115

Tabellenverzeichnis

2.1	Mindestgrößen für größere Betrachtungsabstände	18
2.2	Stereoskopische Abstandsauflösung	25
2.3	Vergrößerungsfaktoren verschiedener Bildschirmgrößen . .	27
2.4	Mindestgrößen von Positionssignaturen nach Neudeck (2001)	28
4.1	Übersicht der Generalisierungsoperationen	58
6.1	Resamplingverfahren nach Wiesel (1991)	91
6.2	Texturgrößen in Abhängigkeit der Entfernung und der Ausdehnung	93