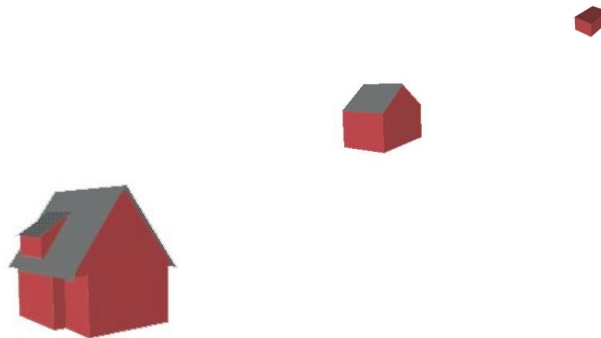


Diplomarbeit

Untersuchung verschiedener Datenmodellierungsmethoden zur semi-automatischen Gebäuderekonstruktion für 3D-Stadtmodelle



Andrea Forberg

August 2000

Hiermit versichere ich, daß ich diese Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe erstellt und keine außer der angegebenen Literatur verwendet habe.

Weetzen, 31. Juli 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gegenstand der Untersuchung	1
1.2	Gliederung dieser Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Grundbegriffe zur Modellbeschreibung	5
2.1.1	Geometrie	5
2.1.2	Topologie	5
2.1.2.1	2D-Topologie	6
2.1.2.2	3D-Topologie	9
2.2	Grundbegriffe zur Informationsgewinnung aus Bildern	10
2.2.1	Objekterkennung	11
2.2.2	Digitale Stereozuordnung	12
2.3	Gebäudemodelle	13
2.3.1	Objektmodelle	13
2.3.2	Repräsentationsformen	14
2.3.2.1	Ecken- oder Punktmodell	14
2.3.2.2	Kanten- oder Drahtgittermodell	15
2.3.2.3	Flächen- oder Randdarstellung (<i>Boundary Representation</i>)	15
2.3.2.4	Volumen- oder Vollkörpermodell (<i>Solid Modeling</i>)	16
2.3.3	Eignung für 3D-Stadtmodelle	17

3	Daten für die Gebäuderekonstruktion	19
3.1	Datenerfassung	19
3.1.1	Luftbilder	19
3.1.2	Texturinformationen	20
3.1.3	Digitale Karten, 2D-GIS	21
3.1.4	Laserscannerdaten	22
3.1.5	Daten aus terrestrischen Messungen	23
3.1.6	Orthophotos	23
3.1.7	Kontext-bezogenes Wissen	25
3.2	Aufbereitung der Daten	28
3.2.1	Geometrische Modellierung	28
3.2.2	Texturierung	29
3.2.3	Visualisierung	31
4	Modellierungsansätze	33
4.1	Topologiegesteuerter Ansatz	33
4.1.1	CyberCity-Modeler	34
4.2	Modellgesteuerter Ansatz	36
4.2.1	2D-Grundriß und DOM aus Laserscannerdaten	38
4.2.2	2D-Grundriß und Stereo-Luftbilder	43
4.2.3	Stereo-Luftbilder	46
4.2.3.1	Gebäuderekonstruktion durch CSG-Modellierung	46
4.2.3.2	Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten	49
4.2.3.3	Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten unter zusätzlicher Verwendung von Schattenkanten	54
4.2.3.4	Gebäuderekonstruktion durch Punktmessung und Orthophotogenerierung	57
5	Geometrische Generalisierung	59

6	Vergleich und Bewertung der Ansätze	65
6.1	Bewertung des topologiegesteuerten CC-Modelers	67
6.2	Bewertung der modellgesteuerten Ansätze	68
6.2.1	Bewertung der Kombination von 2D-Grundriß und Laserscanner-DOM	68
6.2.2	Bewertung der Kombination von 2D-Grundriß und Stereo-Luftbildern	69
6.2.3	Bewertung der auf Stereo-Luftbildern basierenden Ansätze	70
6.2.3.1	Bewertung der Rekonstruktion durch CSG-Modellierung	70
6.2.3.2	Bewertung der Rekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten	71
6.2.3.3	Bewertung der Rekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten unter zusätzlicher Verwendung von Schattenkanten	72
6.2.3.4	Bewertung der Rekonstruktion durch Punktmessung und Orthophotogenerierung	73
6.3	Abschließender Vergleich	74
7	Zusammenfassung	77
	Anhang	79
	Literaturverzeichnis	79
	Abbildungsverzeichnis	85
	Abkürzungsverzeichnis	87

1

Einleitung

1.1 Gegenstand der Untersuchung

Die Aufgabe des Vermessungswesens ist die Erfassung, Auswertung und Darstellung raumbezogener Daten. Früher dienten Karten, kartenverwandte Darstellungen sowie physische Modelle zur Veranschaulichung der Realität. Heute gibt es, dank der fortgeschrittenen Computertechnologie, zusätzliche Methoden die Umwelt zu visualisieren. Neben der computergestützten Kartenherstellung ist auch die digitale, dreidimensionale Modellierung raumbezogener Objekte möglich. Die digitale Darstellung dreidimensionaler Objekte hat gegenüber anderen Visualisierungsmethoden entscheidende Vorteile. Zum einen berücksichtigt sie die dritte Dimension, zum anderen ist sie im Gegensatz zu einem physischen Modell platzsparend, leicht transportabel und ohne großen Aufwand veränderbar. Physische Modelle haben desweiteren den Nachteil, daß ihre Produktion sehr kostspielig ist. Einen guten Überblick über verschiedene Visualisierungsmethoden, insbesondere für Planungsaufgaben, gibt [LANGE 1999].

Einen besonders interessanten Fall der dreidimensionalen computergestützten Darstellung stellt das 3D-Stadtmodell dar. Es wird die Möglichkeit geboten, sich interaktiv durch eine dreidimensionale Szene in Form einer virtuellen Welt (bzw. Stadt) zu bewegen. Der Nutzer kann per Maus oder Cursor-Tasten navigieren und so selbst bestimmen, aus welchem Blickwinkel und von welcher Position aus er das Modell betrachten möchte. Das Visualisierungsprogramm berechnet dann möglichst in Echtzeit (abhängig von der Rechnerleistung) das jeweilige Bild und stellt es auf dem Bildschirm dar. Es handelt sich eigentlich um eine zweidimensionale, perspektivische Betrachtung. Durch die Möglichkeit der Echtzeit-Navigation bzw. der fortlaufenden Neuberechnung der Ansicht werden aber die Informationen über die dritte Dimension schnell und anschaulich vermittelt.

Benötigt werden 3D-Stadtmodelle für die unterschiedlichsten Anwendungen. Mobilfunkanbieter nutzen sie zur Planung ihrer Antennenstandpunkte, Stadtplaner und Architekten können ihre Ideen besser veranschaulichen, Simulationen verschiedenster Arten erfordern dreidimensionale Modelle der Umgebung.

Die dreidimensionale Modellierung ist nicht nur eine Angelegenheit, die für wissenschaftliche Anwendungen von Nutzen ist. Auch im Freizeitbereich oder für kommerzielle Zwecke in Form von Werbung ist eine ansprechende Visualisierung heute nicht mehr wegzudenken. So möchten beispielsweise Hotels ihren Kunden eine virtuelle Besichtigung ihrer Zimmer per Internet anbieten. Auch bei Computerspielen, deren Handlungen bisher in fiktiven Umgebungen stattfanden, zeichnet sich neuerdings ein Trend zu realen Hintergrundszenarios ab.



Abbildung 1.1: Beispiel eines 3D-Stadtmodells

Die verschiedenen Verwendungszwecke der 3D-Stadtmodelle setzen unterschiedliche Anforderungen an die graphischen Details voraus. Für die Planung der Mobilfunkantennenstandpunkte reichen grobe Höhen der Gebäude und eventuell der Dachtyp aus, während Architekten gerade an Details interessiert sind.

In eine Bewertung einzelner Ansätze zur Gebäuderekonstruktion für 3D-Stadtmodelle muß immer auch der Zweck der Visualisierung einbezogen werden.

1.2 Gliederung dieser Arbeit

Die Aufgabe dieser Arbeit besteht darin, im Rahmen einer Literaturrecherche verschiedene Ansätze zur Gebäuderekonstruktion für 3D-Stadtmodelle, vor allem im Bereich der semi-automatischen Verfahren, zu beschreiben, miteinander zu vergleichen und zu bewerten.

In Kapitel 2 werden für das weitere Verständnis benötigte Grundlagen erklärt. Hierzu gehören Grundbegriffe zur Modellbeschreibung und zur Informationsgewinnung aus Bildern sowie die verschiedenen zur Wahl stehenden Gebäudemodelle.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den in den Gebäuderekonstruktionsprozeß eingehenden Daten. Es geht auf die einzelnen Daten im Hinblick auf ihre Verwendung für die Gebäuderekonstruktion ein und gibt einen Überblick über die Datenaufbereitung von der geometrischen Datenmodellierung bis zur Visualisierung.

Kapitel 4 liefert die Beschreibungen der einzelnen Rekonstruktionsansätze. Es wird dabei zwischen topologiegesteuerten und modellgesteuerten Ansätzen unterschieden. Die modellgesteuerten Ansätze werden desweiteren nach den verwendeten Datenquellen unterteilt.

Kapitel 5 beschreibt Möglichkeiten zur Optimierung der Visualisierung durch Abstufung der Detailgrade je nach Entfernung des Objekts vom Betrachtungsstandpunkt (*geometrische Generalisierung*).

In Kapitel 6 erfolgt ein Vergleich und eine Bewertung der in Kapitel 4 vorgestellten Gebäuderekonstruktionsmethoden.

Die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit werden in Kapitel 7 noch einmal zusammengefaßt dargestellt.

2

Grundlagen

2.1 Grundbegriffe zur Modellbeschreibung

In diesem Kapitel werden einige Grundbegriffe erklärt, welche für das Verständnis der in Kapitel 4 folgenden Gebäuderekonstruktionsansätze nötig sind.

Aufgrund der zweckgerichteten Erfassung der Objekte (z. B. durch 2D-Karten oder Stereo-Luftbilder) und der Einschränkungen durch das darstellende Medium (Computer mit Visualisierungssoftware) ist es nicht möglich Objekte in all ihren Einzelheiten zu rekonstruieren. Es entstehen Abweichungen zwischen dem realen Objekt und der Repräsentation des Objekts in Form von Maßstabsunterschieden, Detailreichtum und Materialeigenschaften. Aus diesem Grund ist eine Generalisierung der Objekte durch Modelle nötig. Für die Darstellung der realen Objekte benötigt man Modelle der Wirklichkeit, welche dem Zweck der jeweiligen Repräsentation genügen.

Die Modellbeschreibung künstlicher Objekte (z. B. Gebäude) erfolgt häufig über die Begriffe *Geometrie* und *Topologie*.

2.1.1 Geometrie

Der Begriff Geometrie bezieht sich hier auf Eigenschaften wie Form, Größe, Lage oder Richtung eines Objekts. In Bezug auf Gebäudemodelle sind dies Position, Länge, Breite, Höhe oder Giebelneigung. Diese Größen sind für die einzelnen Gebäude individuell.

2.1.2 Topologie

Die Topologie ist das Gebiet der Mathematik, welches sich mit den Nachbarschaftsbeziehungen in der Raumstruktur beschäftigt. Die metrische Komponente kann dabei

außer Acht gelassen werden. Die Adjazenzverhältnisse¹ zwischen verschiedenen Flächen sind unabhängig von Form oder Größe der Flächen.

Handelt es sich um gleiche Adjazenzverhältnisse, aber unterschiedliche Formen und Flächeninhalte, spricht man auch von isomorphen Graphen.

Im Gegensatz zur Geometrie ist mit Hilfe der Topologie die Beschreibung ganzer Klassen von Gebäudetypen möglich. Beispielsweise kann eine Klasse „Satteldach“ festgelegt werden. Diese Klasse steht für alle Satteldächer, unabhängig von ihren Ausmaßen. Für die Beschreibung eines speziellen Daches muß nur noch die Zuweisung der individuellen geometrischen Parameter (Position, Länge, Breite und Giebelhöhe) erfolgen. Die folgenden Erläuterungen stützen sich auf ([MUHAR 1992], S. 16ff.).

2.1.2.1 2D-Topologie

Im zweidimensionalen Fall wird zwischen drei Grundelementen unterschieden:

- 0-Zellen (punktförmige Objekte)
- 1-Zellen (lineare Objekte)
- 2-Zellen (flächige Objekte)

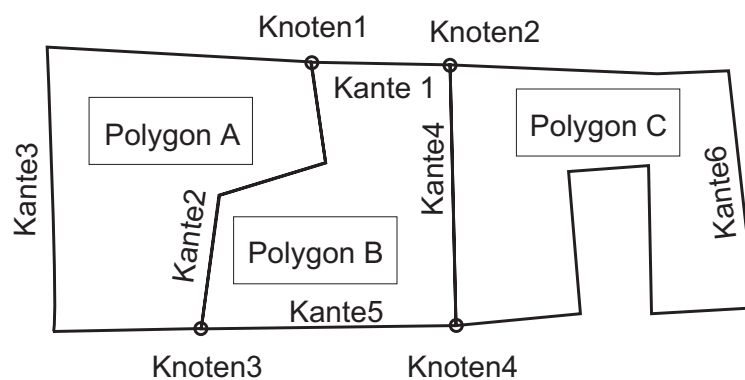
Je nachdem, welche Elemente verwendet werden, herrschen die im Folgenden beschriebenen topologischen Modelle *Punkttopologie*, *Linientopologie* und *Polygontopologie*.

Punkttopologie: Die Punkttopologie stellt die einfachste Variante der topologischen Modelle dar. Es werden die Punktnummern sowie die Koordinaten der einzelnen Punkte gespeichert, ohne daß eine weitere Verknüpfung der Daten notwendig ist.

Linientopologie: Es handelt sich bei der Linientopologie um eine Kanten-Knoten-Struktur. Knoten entstehen immer dort, wo Linienelemente aneinanderstoßen oder am Ende eines Linienzuges, wobei dann von „baumelnden Knoten“ gesprochen wird. Kanten definieren sich durch die Anfangs- und Endknoten sowie durch die Zwischenpunkte eines Linienzuges. Die Knotenpunkte werden getrennt von den Zwischenpunkten gespeichert, da eine Veränderung eines Linienelementes auch Auswirkungen auf die Linienelemente hat, die mit dem veränderten Linienzug gemeinsame Knoten aufweisen. Beim Aufbau der Linientopologie erhält jeder Knoten eine eigene Bezeichnung. Die Speicherung der einzelnen Linienelemente läuft über eine eigene Kennzeichnung, die Bezeichnungen der dazugehörigen Knoten und die Koordinaten der Zwischenpunkte.

¹Adjazenz=Nachbarschaft

Polygontopologie: Bei der Polygontopologie werden die Koordinaten der jeweils begrenzenden Linienelemente erfaßt, wobei Kanten, die zwei Polygone begrenzen, entweder für jedes einzelne Polygon extra oder nur einmal insgesamt gespeichert werden. Das letztere Vorgehen hat den Vorteil, daß eine Veränderung an einer Linie eines Polygons auch eine Veränderung am benachbarten Polygon zur Folge hat. Dadurch werden „Löcher“ zwischen den Polygonen verhindert. Außerdem wird durch die Vermeidung einer doppelten Speicherung gleicher Kanten Speicherplatz gespart. Wie die Abbildung 2.1 verdeutlicht, findet eine Verwendung der Begriffe *Links* und *Rechts* statt, um die Topologie bzw. die Lage der Polygone zu den Linienelementen zu beschreiben. Die Bezeichnungen der Knoten und Kanten müssen dabei keiner Systematik folgen.



Kante	Knoten		Polygon	
	Anfang	Ende	Links	Rechts
1	1	2	Umgeb.	B
2	1	3	B	A
3	1	3	A	Umgeb.
4	2	4	C	B
5	3	4	B	Umgeb.
6	2	4	Umgeb.	C

Abbildung 2.1: Links-Rechts-Orientierung bei der Zuordnung von Polygonen zu Kanten

Topologieaufbau und Attributzuweisung bei Polygonen: Sollen den Polygonen Attribute zugewiesen werden, stehen zwei Vorgehensweisen zur Auswahl. Eine Möglichkeit besteht darin, jedes Polygon extra zu erfassen und mit einem Attribut zu versehen. Bei der zweiten Möglichkeit erfolgt die Datenerfassung nicht durch die Erfassung einzelner Polygone, sondern durch die Erfassung der Linienzüge in beliebiger Reihenfolge und ohne Berücksichtigung der einzelnen Polygonabgrenzungen. In dieses ungeordnete Netz werden zur Attributvergabe Referenzpunkte gesetzt. Anschließend erfolgt der Topologieaufbau. Dieses auch als „Spaghetti and Meatballs“ bezeichnete Vorgehen wird im Vergleich zur Erfassung einzelner Polygone in Abbildung 2.2 veranschaulicht.

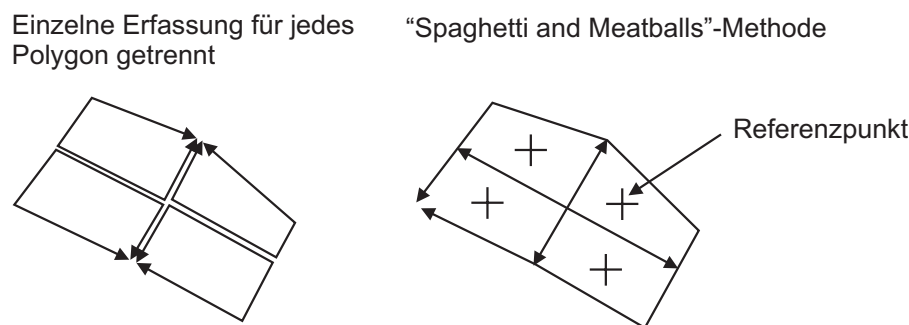


Abbildung 2.2: Topologieaufbau und Attributzuweisung bei Polygonen

Die auf diese Weise gebildeten Polygone können später auf Konsistenz geprüft werden. Hierbei unterscheidet ([MUHAR 1992], S. 56ff.) zwischen

- topologischer Konsistenz
(Sind die Polygone geschlossen? Wo sind „baumelnde Knoten“?)
- geometrischer Konsistenz
(Gibt es Überlappungen? Sind die Ausmaße des Objekts in einem wahrscheinlichen Bereich?)
- thematischer Konsistenz
(Kommt die Hausnummer nur einmal innerhalb einer Straße vor?)

2.1.2.2 3D-Topologie

In der dritten Dimension erhält man zusätzlich zu den geometrischen Elementen *Punkt*, *Linie* und *Fläche* das Element *Körper*. Fünf verschiedene topologische Beziehungen decken nun alle möglichen Nachbarschaftsrelationen ab. Jede dieser Beziehungen schließt eine jeweils andere Beziehung aus. Benötigt werden die topologischen Relationen beispielsweise für die in Abschnitt 4.1 folgende Beschreibung einer topologiegesteuerten Methode zur Gebäuderekonstruktion für 3D-Stadtmodelle.

Zur Veranschaulichung sind die einzelnen Beziehungen in Abbildung 2.3 zusätzlich zur folgenden mathematischen Beschreibung graphisch dargestellt ([GUO 1996]).

- Berührung: $\langle A, \text{berührt}, B \rangle$
 $(A^\circ \cap B^\circ = \emptyset) \wedge (A \cap B \neq \emptyset)$
- Beinhaltung: $\langle A, \text{in}, B \rangle$
 $(A^\circ \cap B^\circ \neq \emptyset) \wedge (A \cap B = A)$
- Durchkreuzung: $\langle A, \text{kreuzt}, B \rangle$
 $\dim(A^\circ \cap B^\circ) < (\max(\dim(A^\circ), \dim(B^\circ))) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B)$
- Überlappung: $\langle A, \text{überlappt}, B \rangle$
 $(\dim(A^\circ \cap B^\circ) = \dim(A^\circ) = \dim(B^\circ)) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B)$
- Trennung: $\langle A, \text{getrennt von}, B \rangle$
 $(A \cap B = \emptyset)$

mit A° das Innere des Objekts A
 B° das Innere des Objekts B
 \dim die höchste in einem Punktsatz enthaltene Dimension
 \emptyset Leere Menge
 \cap Schnittmenge
 \wedge Verknüpfungszeichen „und“

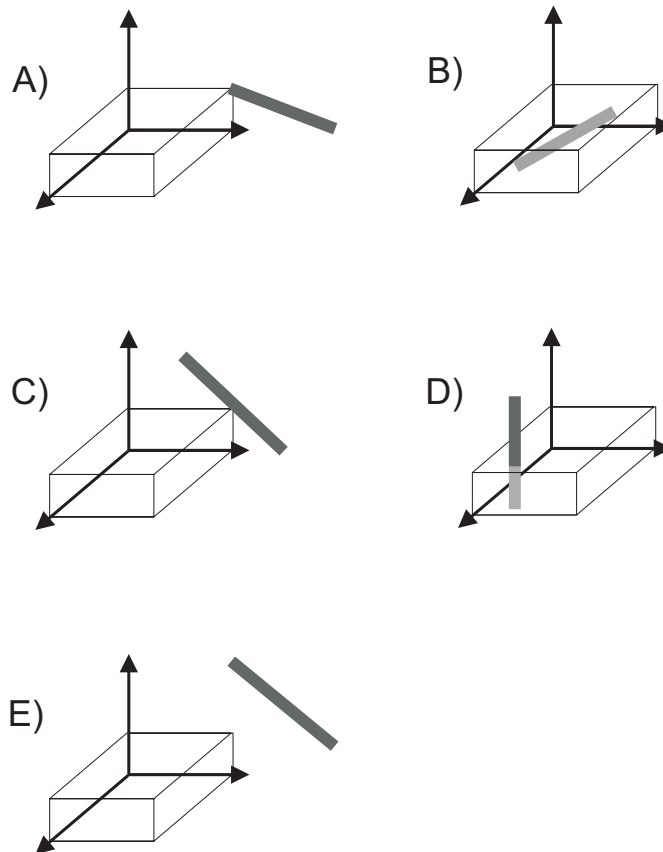


Abbildung 2.3: Topologische Beziehungen:

A) Berührung, B) Beinhaltung, C) Durchkreuzung, D) Überlappung, E) Trennung

2.2 Grundbegriffe zur Informationsgewinnung aus Bildern

Viele Ansätze zur Gebäuderekonstruktion arbeiten mit Stereobildern. Informationen aus Bildern (z. B. 3D-Kanten) werden mit vorgefertigten Gebäudemodellen in Einklang gebracht oder bestimmten Strukturierungsverfahren zugrunde gelegt. Um Modelle oder Strukturierungsverfahren anwenden zu können, müssen die benötigten Informationen aus den Bildern gewonnen werden. Dies geschieht beispielsweise durch eine Merkmalsextraktion und eine automatische Stereozuordnung.

In den nächsten Abschnitten erfolgt eine Erklärung einiger grundlegender Begriffe, die mit der Informationsgewinnung aus Bildern zusammenhängen. Es werden Grundlagen der Objekterkennung mittels Flächen- und Kantenextraktion sowie die automatische Stereozuordnung durch Bildkorrelation (*Image Matching*) erörtert.

2.2.1 Objekterkennung

Für die Gebäuderekonstruktion müssen vorgefertigte Objektmodelle mit den aus den Sensordaten extrahierten Merkmalen in Einklang gebracht werden. Eine Auswahl an Objektmodellen folgt in Abschnitt 2.3.

Die Objekterkennung wird als Zuordnungsproblem definiert, „in dem Korrespondenzen zwischen den extrahierten Bildkomponenten und den Komponenten der Objektbeschreibung durch ein geeignetes Zuordnungsverfahren gesucht werden“ ([HAALA 1996], S. 9). Ein Beispiel der Objekterkennung im zweidimensionalen Fall ist die *Klassifizierung*. Hier wird jedem Helligkeitswert des Bildes eine bestimmte Nutzungsart zugeordnet. Günstiger ist es für viele Anwendungen, die Zuordnung vom Bild zum Modell auf einer höheren Repräsentationsstufe erfolgen zu lassen, so daß Bild und Objektmodell durch geometrische Elemente wie Punkte, Linien und Flächen repräsentiert werden. Diese auch als Primitive bezeichneten Elemente resultieren aus klassischen Segmentierungsverfahren, welche sich in gebietsbasierte und kantenbasierte Verfahren unterteilen lassen.

Als *Segmentierung* wird in der digitalen Bildverarbeitung der Verarbeitungsschritt bezeichnet, welcher zu einer Gruppierung von Bildelementen nach bestimmten Einheitlichkeitsprädikaten führt ([HILDEBRANDT 1996], S. 526).

Gebietsbasierte Segmentierungsverfahren (*Flächenextraktionsverfahren*) fassen Bereiche eines Bildes, dessen benachbarte Pixel ein spezielles Homogenitätskriterium erfüllen, zu Regionen zusammen. Linien werden aus den Grenzen dieser Regionen abgeleitet und Punkte aus den Schnittpunkten der Linien. Der Nachteil dieses Segmentierungsverfahrens liegt in der Instabilität gegenüber Beleuchtungsänderungen. Es kann vorkommen, daß Grenzen auf Grund von Lichtänderungen detektiert werden, obwohl sie keine realen Grenzen im Objektraum (Objektgrenzen, Bruchkanten von Oberflächen) widerspiegeln.

Kantenbasierte Segmentierungsverfahren (*Kantenextraktionsverfahren*) detektieren Pixel, welche an Grauwertkanten liegen. Dies geschieht mit Hilfe von lokalen Operatoren. Konturverfolgungsalgorithmen verknüpfen die Pixel zu zusammenhängenden Linienstücken. Schnittpunkte dieser Linien ergeben Punkte, Flächen entstehen aus geschlossenen Linienzügen. Das Verfahren basiert auf Grauwertsprüngen, welche eher auf die Bruchkanten der Oberflächen schließen lassen als es bei den Flächenextraktionsverfahren der Fall ist. Aber auch hier können Linien detektiert werden, die nicht die realen Objektgrenzen wiedergeben. Einflüsse wie Schatten, Bildrauschen oder besondere Oberflächenstrukturen verfälschen das Ergebnis. Außerdem ergeben die wenigsten so gefundenen Linienzüge geschlossene Polygone. Da gerade diese von besonderem Interesse für die Objekterkennung sind, birgt also auch dieses Verfahren Nachteile.

Alle Segmentierungsalgorithmen haben das Problem, daß Einflüsse wie Rauschen, Schattenwurf, unterschiedliche Beleuchtungen oder Oberflächenstrukturen die Erkennung der wahren Objektgrenzen erschweren. Um die Fehleranfälligkeit dieser Algorithmen zu minimieren, ist es sinnvoll, Wissen über die zu detektierenden Objekte einfließen zu lassen und die extrahierten Einzelmerkmale dementsprechend zu gruppieren. Als mögliche zwischen den Elementen herrschende Beziehungen, die dabei berücksichtigt werden können, kommen *Nachbarschaft*, *Ähnlichkeit*, *Geschlossenheit*, *Kontinuität*, *Symmetrie*, *Parallelität* sowie die *Vertrautheit einer Form* in Frage. Zu letzterer Beziehung zählt auch die Gruppierung der extrahierten Linienstücke in rechteckige Strukturen, da diese gerade für Gebäude ein wesentliches Merkmal darstellen ([HAALA 1996], S. 9-12).

2.2.2 Digitale Stereozuordnung

Für die Ableitung eines digitalen Geländemodells (*DGM*) oder eines digitalen Oberflächenmodells (*DOM*) aus Stereo-Luftbildern muß man eine Stereoauswertung vornehmen. Hierfür werden die Bilder relativ zueinander orientiert (*relative Orientierung*). Dies kann z. B. im Rahmen einer analytischen Auswertung an einem Stereoauswertegerät geschehen.

Eine andere Möglichkeit stellt die Stereozuordnung einzelner Elemente (Punkte, Kanten oder Flächen) auf digitale Art dar. Die Elemente lassen sich durch eine zweidimensionale Merkmalsextraktion gewinnen und durch automatische Bildkorrelation in den 3D-Raum überführen.

Bei der Bildkorrelation werden anhand von Grauwertmustern innerhalb einer Suchmatrix homologe Bildpunkte ermittelt. Homologe Bildpunkte sind jene Abbildungspunkte, die den gleichen Geländepunkt darstellen. Die Suchmatrix, mit welcher der zu einem im ersten Bild passende Abbildungspunkt im zweiten Bild ermittelt wird, kann mit Hilfe der Bildkoordinaten und der Überdeckungsprozentzahl des Bildpaares festgelegt werden.

Die *absolute Orientierung*, also eine Einbettung in ein übergeordnetes Koordinatensystem, ist durch eine geeignete Transformation über Paßpunkte zu erreichen.

2.3 Gebäudemodelle

2.3.1 Objektmodelle

Um ein 3D-Stadtmodell mit automatisierten Schritten zu erstellen, benötigt man ein Objektmodell, welches die Eigenschaften des Objekts beschreibt, und zwar in geometrischer und topologischer Hinsicht. Die Modelle werden hierfür von ([HAALA 1996], S.12ff.) je nach ihrer Spezialisierung in *spezifische Modelle* und *generische Modelle* eingeteilt.

1. Spezifische Modelle:

Spezifische Modelle stellen eine detaillierte und vollständige Beschreibung jedes einzelnen Objekts dar. Ein Quader wird beispielsweise durch seine Länge, Breite und Höhe sowie durch seine Position im Raum beschrieben.

Diese Modellierungsform wird vornehmlich im CAD- oder GIS-Bereich eingesetzt. (Abb. 2.4 A)

2. Generische Modelle:

Diese werden auch „allgemeine Modelle“ genannt. Sie sind frei bezüglich ihrer Geometrie, d.h. Größen wie Länge, Breite oder Höhe sind variabel, nur die Topologie ist vorgeschrieben. Sie liefern keine starre Beschreibung eines einzelnen Objekts, sondern die Beschreibung einer ganzen Klasse oder Gruppe von gleichartigen Objekten. Man unterscheidet zwischen *Parametrischen Modellen* und *Strukturellen Modellen*.

- Parametrische Modelle:

Bei parametrischen Modellen sind Größen wie die Anzahl der Teile oder deren Relationen (z. B. Parallelität der Linien oder Komplanarität der Punkte) fest. Als Beispiel für ein generisches, parametrisches Objektmodell, welches für die Gebäuderekonstruktion häufig eingesetzt wird, sei hier ein allgemeiner Quader genannt, für den noch keine spezifischen Ausmaße und keine Position festgelegt sind (Abb. 2.4 B).

- Strukturelle Modelle:

Auch bei den strukturellen Modellen sind topologische Relationen zwischen den verschiedenen Objektprimitiven vorgegeben. Im Gegensatz zu den Parametrischen Modellen ist aber die Anzahl der Teile frei. So können mit Hilfe eines Modells, welches Rechtwinkligkeit und Parallelität vorgibt, die Zahl der Teile aber offen läßt, verschiedene, auch komplexere Objekte gebildet werden, wie etwa L- oder U-förmige Gebäude (Abb. 2.4 C).

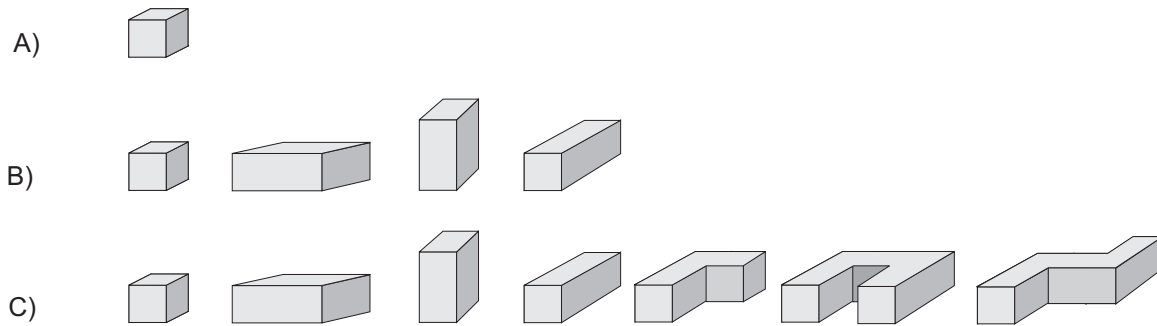


Abbildung 2.4: Möglichkeiten für Objektmodelle:

A) spezifisches Modell: Breite, Höhe und Tiefe des Quaders sind fest

B) generisches, parametrisches Modell: Breite, Höhe und Tiefe sind variabel, Anzahl der Teile ist fest

C) generisches, strukturelles Modell: Breite, Höhe, Tiefe und Anzahl der Teile sind variabel

2.3.2 Repräsentationsformen

Die spätere Repräsentation der Gebäude auf dem Computerbildschirm ist für die Datenmodellierung von großer Bedeutung. Nur wenn bekannt ist, wie die Darstellung aussehen soll und welche Möglichkeiten sie bieten muß, kann man die Erfassung sowie die Modellierung der Daten planen. Je nach Aufgabe der Visualisierung gibt es verschiedene Repräsentationsformen für künstliche Objekte. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf ([MUHAR 1992], S. 90ff. und S. 120ff.) sowie ([HAALA 1996], S. 54ff.).

2.3.2.1 Ecken- oder Punktmodell

Beim Punktmodell werden nur ausgewählte Punkte eines Objekts dargestellt. Entweder hat man eine regelmäßige, durch ein Gitter vorgegebene Punktverteilung, oder es handelt sich um eine unregelmäßige Verteilung, welche aber die Topographie des Objekts widerspiegelt.

Die Darstellung durch Punkte spart einerseits viel Speicherplatz, ist aber hinsichtlich der Auswertbarkeit sehr unbefriedigend. Eine Anwendung dieses Modells stellt die Berechnung eines digitalen Geländemodells dar. Aber auch hier sollen die Punkte für eine spätere Visualisierung mit Hilfe eines Algorithmus verbunden werden.

2.3.2.2 Kanten- oder Drahtgittermodell

Beim Kantenmodell werden die verbindenden Kanten zwischen den gemessenen Eckpunkten dargestellt. Dieses sogenannte Drahtgittermodell wird aufgrund seines geringen Rechenaufwandes gerne für schnelle 3D-Bildschirmdarstellungen z.B. im CAD-Bereich eingesetzt. In Bezug auf die Auswertbarkeit hat dieses Modell den Nachteil, daß keine Information über den Flächeninhalt oder das Volumen vorhanden ist. Es ist keine Schnittbildung oder Sichtbarkeitsanalyse möglich. Für 3D-Stadtmodelle ist dieses Modell also nur bedingt, etwa zur Kontrolle am Bildschirm, geeignet.

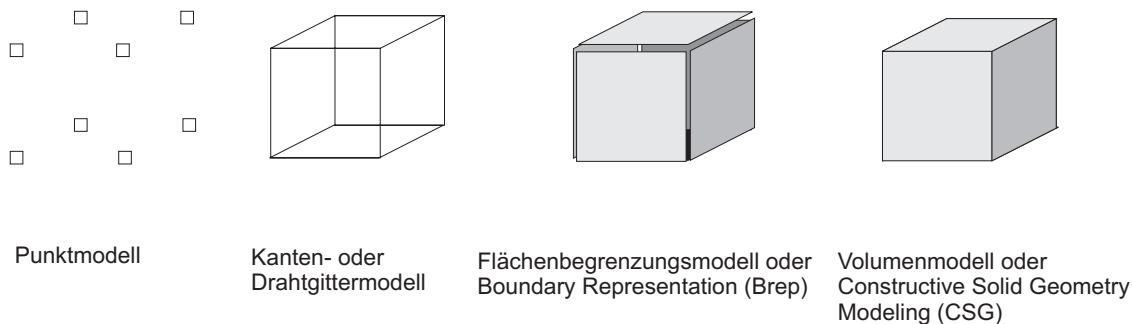


Abbildung 2.5: Repräsentationsformen

2.3.2.3 Flächen- oder Randdarstellung (*Boundary Representation*)

Das als Boundary Representation (*BRep*) bezeichnete Darstellungsmodell definiert räumliche Objekte mit Hilfe der sie umgebenden Begrenzungselemente, d.h. ein Objekt wird aus ebenen, geschlossenen Polygonen zusammengesetzt. Eckpunkte und Linien ergeben sich aus dem Schnitt dieser Begrenzungsflächen.

Es sind metrische Informationen in Form von Punktkoordinaten sowie zusätzlich topologische Informationen in Form von Relationen zwischen den einzelnen Begrenzungselementen vorhanden. Eine Auswertung von Flächeninhalten ist möglich, ebenso eine Sichtbarkeitsberechnung und die daraus folgende Ausblendung nicht sichtbarer Flächen. Dies führt zu einer Darstellung, die der Realität recht gut entspricht. Da das Objekt nur aus den begrenzenden Polygonen besteht, also nur die Hülle des Objekts vorhanden ist, ist eine unmittelbare Berechnung des Volumens oder ein Schnitt durch das Objekt nicht möglich. Hierzu wäre eine Umwandlung in das Volumenmodell mit Hilfe der Normalvektoren, die definieren, in welcher Richtung „Innen“ liegt, nötig. Diese Transformation ist aber nicht eindeutig zu lösen.

Beim Flächenbegrenzungsmodell können die Anzahl der Objektkanten, -ecken und -flächen sowie ihre Relationen (Verknüpfung, Parallelität etc.) definiert werden. Die geometrischen Merkmale von Gebäuden sind oft für jedes einzelne Gebäude unterschiedlich, die topologischen Beziehungen können aber für ganze Gebäudeklassen gelten.

Für die Gebäudemodellierung kommt eine Flächendarstellung in Frage, wenn man zunächst von einer festen Topologie ausgeht und für die geometrischen, also variablen Merkmale Platzhalter zur Verfügung stellt. Die eigentliche Rekonstruktion findet erst nach einer Wertzuweisung zu den variablen Größen statt. Dies entspricht dem generischen Modell.

2.3.2.4 Volumen- oder Vollkörpermodell (*Solid Modeling*)

Beim Volumenmodell werden einfache 3D-Grundkörper wie Quader, Pyramiden, Zylinder, etc. durch Addition, Subtraktion, Vereinigung und/oder Durchschnittsbildung zu komplexeren Objekten zusammengefügt. Es handelt sich somit um ein Modell, bei dem auch gekrümmte Formen (repräsentiert durch Kugeln, Zylinder, Kegel etc.) darstellbar sind.

Alle Eigenschaften des Körpers sind beschreibbar. Es ist eine Aussage über das Volumen sowie ein Schnitt durch das Objekt möglich. Im Gegensatz zur Flächendarstellung ist keine Überprüfung der Topologie nötig, um beispielsweise die Geschlossenheit der Objekte zu garantieren. Wenn den Grundprimitiven vorerst kein Wert zugewiesen wird, erhält man wieder ein generisches Modell, das Constructive Solid Geometry Modell (*CSG-Modell*). Man kann sich dies als eine Art leere Hülle vorstellen, die erst nach Wertzuweisung gefüllt wird.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der parametrisierten Darstellung, auch *Primitive Instancing* genannt. Hierbei ist es möglich, neue Objekttypen durch Erzeugung komplexerer Primitive zu definieren. Dies führt zu einem minimalen Satz von Formparametern für Objekte eines Typs, welche dann als redundanzfrei anzusehen sind. Die topologisch-geometrischen Bedingungen (Rechtwinkligkeit, Parallelität etc.) müssen nicht explizit angegeben werden, sondern ergeben sich implizit aus den gewählten Formparametern. Da die Werte der Formparameter wieder frei sind, ist auch dies ein generisches Modell.

Mit den genannten Datenmodellen sind noch nicht alle Formen der dreidimensionalen Repräsentation ausgeschöpft. Es gibt noch weitere Modelle, z. B. Freiformflächen. Da diese aber sinnvoller für Geländedarstellungen oder andere natürliche Objekterscheinungen anzuwenden sind und für die hier behandelte Problematik der Gebäuderekonstruktion keine Bedeutung haben, wird auf eine Vorstellung dieser Techniken verzichtet.

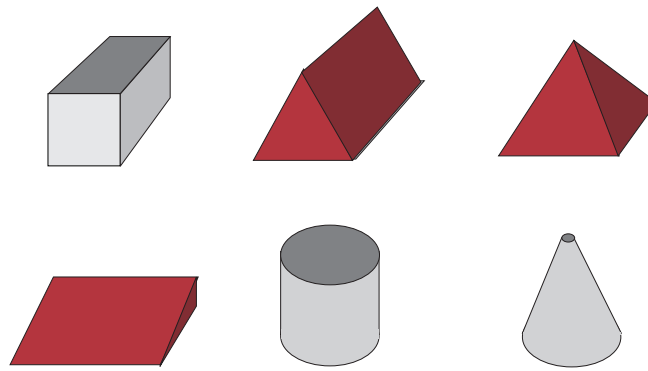


Abbildung 2.6: Auswahl einiger 3D-Primitive

2.3.3 Eignung für 3D-Stadtmodelle

Zur realitätsnahen Darstellung eines 3D-Stadtmodells bieten sich generische Objektmodelle an, da mit der spezifischen Modellierung jedes einzelnen Objekts ein zu großer Aufwand verbunden wäre.

Für die angestrebte, möglichst reale Darstellung der Gebäude ist die Punktdarstellung aus Gründen der Interpretierbarkeit ungeeignet.

Auch die Kantendarstellung ist als Repräsentationsform nur bedingt einsetzbar, da keine Sichtbarkeitsberechnungen ausgeführt werden und keine Texturierung möglich ist. Es entsteht ein unrealistisches, durchsichtiges Szenario. Zu einer schnellen, wenig Rechenleistung in Anspruch nehmenden Bildschirmkontrolle wäre ein Einsatz dieser Repräsentationsform aber denkbar.

Für die Gebäuderekonstruktion kommen nur die rechenintensiveren Repräsentationsformen, d.h. die Flächen- oder die Volumendarstellung in Frage. Das Volumenmodell benötigt weniger Speicherplatz als das Flächenbegrenzungsmodell, da die Beschreibung eines Körpers aus Volumina weniger Daten benötigt als die Beschreibung aus Oberflächen. Andererseits hat man bei komplexeren Objekten im Volumenmodell das Problem, daß durch das immer wieder neue logische Aufbauen der darzustellenden Strukturen eine Verlangsamung der Bildschirmdarstellung erfolgt ([MUHAR 1992], S. 123). Desweiteren ist zu beachten, daß eine Transformation vom Volumenmodell ins Flächenmodell verhältnismäßig einfach ist. Der umgekehrte Prozeß führt aber nicht zu eindeutigen Ergebnissen ([HAALA 1996], S. 55).

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen ist es daher sinnvoll, für die Modellierung der Gebäude ein CSG-Modell zu wählen, welches letztendlich für die Visualisierung in eine BRep-Darstellung umgewandelt wird.

3

Daten für die Gebäuderekonstruktion

3.1 Datenerfassung

Für die Rekonstruktion eines 3D-Stadtmodells gibt es verschiedene Ansätze. Dementsprechend werden auch unterschiedliche Eingangsdaten für die Modellierung benötigt. Meist verwenden die Ansätze mehrere Datenquellen simultan. Übliche Eingangsdaten sind:

- Luftbilder
- Texturinformationen
- Digitale Karten, 2D-GIS
- Laserscannerdaten
- Daten aus terrestrischen Messungen
- Orthophotos
- Kontext-bezogenes Wissen

3.1.1 Luftbilder

Stereo-Luftbilder werden primär genutzt, um dreidimensionale, geometrische Informationen über das zu erfassende Gebiet zu beziehen. Zur Gewinnung dieser Informationen wird eine Stereozuordnung einzelner Elemente (Punkte, Kanten oder Flächen)

zueinander ausgeführt. Diese kann im Rahmen einer analytischen Auswertung an einem Stereoauswertegerät stattfinden oder mit Hilfe einer digitalen Auswertung durch Merkmalsextraktion und automatische Bildkorrelation ausgeführt werden. Als Resultat erhält man ein digitales Geländemodell (*DGM*) der Landschaft und ein digitales Oberflächenmodell (*DOM*) für die Gebäude.

Eine sekundäre Nutzung der Luftbilder liegt in der Verwendung ihrer radiometrischen Information. Eine Fototextur kann die Realitätsnähe auch bei geometrisch stark vereinfachten Objekten erheblich steigern. Aus den Luftbildern können dazu die Dachtexturen abgeleitet werden sowie ein Orthophoto, welches über das Gelände gelegt wird. Die Texturen der Fassaden lassen sich aufgrund der Perspektive der Luftbilder nicht aus diesen entnehmen und müssen in einem zusätzlichen Schritt terrestrisch aufgenommen werden.

Die Bilddaten sind verschiedenen Einflüssen unterworfen, die eine automatische Auswertung erschweren. Es herrschen selten die gleichen Lichtverhältnisse, Schatten entstehen, die Lichtreflexion weicht je nach Oberflächenmaterial ab, das Bild weist einen mangelnden Kontrast auf, oder es ergeben sich Probleme durch Bildrauschen. Desweiteren muß man mit einem Informationsverlust aufgrund von Perspektive und Verdeckungen, z.B. durch Bäume, rechnen.

Zieht man die enorme Informationsfülle der Bilddaten in Betracht, ist es schwierig, Wichtiges von Unwichtigem zu unterscheiden. Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, verschiedene Datenquellen zu nutzen, die sich in ihren Vor- und Nachteilen ergänzen.

3.1.2 Texturinformationen

Für eine wirklichkeitsnahe Darstellung der Objekte ist eine Textur der einzelnen Bestandteile der Gebäude nötig. Als Textur wird im weiteren ein digitales Bild bezeichnet, welches auf eine Oberfläche eines Objekts projiziert wird. Es kann sich hierbei um eine synthetische, also künstliche Textur handeln oder um eine Fototextur. Bei der synthetischen Textur werden Dächern oder Wänden eine bestimmte Farbe oder ein in einer Texturbibliothek bereitgestelltes Muster (*Bumpmapping*, *Textur-Mapping*) zugeordnet. Genauere Beschreibungen zum Textur-Mapping sind bei [POMASKA 1998] zu finden. Legt man Wert auf die tatsächliche Fassade, bzw. möchte man mit der Textur darüber hinwegtäuschen, daß Kleinformen wie Erker, Dachfenster etc. nicht modelliert wurden, kann man auch gescannte, entzerrte und radiometrisch überarbeitete Fotos als Textur verwenden. Aus den Luftbildern gewinnt man dabei hauptsächlich die Dachtexturen. Fotos der Fassaden sind dagegen nur unvollständig vorhanden und durch die Perspektive stark verzerrt. Ist ein vollständig foto-texturiertes 3D-Stadtmodell gefordert, sind

terrestrische Photographien notwendig. Dies bedeutet einen erheblichen Mehraufwand. Die Fotos der Fassaden müssen aufgenommen, gescannt und entzerrt werden. Läßt sich eine Fassade nicht mit einem Foto abdecken, ist eine Mosaikbildung mit einer radiometrischen Anpassung nötig.

Zur Vereinfachung der Fassadenaufnahme schlagen [MARESCH, GRUBER 1997] und [GRUBER ET AL. 1996] ein vehikelbasiertes Multisensorsystem vor. Es handelt sich dabei um CCD-Sensoren, welche in einer Höhe von ca. 4 m oberhalb der Straßenebene parallel zur Fassade mit einer Geschwindigkeit von 3-5 km/h und in einer Entfernung von 8-10 m im rechten Winkel zur Fassade bewegt werden. Es ergeben sich Stereobilder im genäherten Normalfall, aus denen geometrische Informationen sowie die Texturen der Fassaden abgeleitet werden können. Durch die mehrfache Aufnahme gleicher Flächen können die relevanten Objekte von störenden Objekten (parkende Autos, Vegetation etc.) separiert werden. Für Innenhöfe oder Innenraumaufnahmen wird eine rotierende Kamera vorgeschlagen.

3.1.3 Digitale Karten, 2D-GIS

Die in den Luftbildern vorhandenen Informationen zeigen aus den oben genannten Gründen nicht immer alle Details, die von den Modellen benötigt werden. Zusätzliches Wissen wird gebraucht, um im Bild fehlende Informationen zu erhalten. Eine für viele Gebäuderekonstruktionsansätze wichtige, zusätzliche Wissensquelle liegt in der 2D-Grundrißinformation, wie sie digitale Karten oder Geoinformationssysteme (*GIS*) liefern. Dabei wird beispielsweise die digitale Katasterkarte genutzt. [BRENNER, HAA-LA 1999] schlagen wahlweise auch digitalisierte Karten im Maßstab 1:5 000 vor.

Die Gebäudegrundrißdaten werden auf verschiedene Arten verwendet. Zum einen wird die Grundrißinformation als Basis für die dreidimensionale Modellierung genutzt, so daß nur noch Gebäudehöhen und Dachformen ermittelt werden müssen. Zum anderen wird durch die Grundrißinformation der Suchraum für die Merkmalsextraktion bei der automatischen Stereozuordnung eingeschränkt. Hierdurch wird eine größere Zuverlässigkeit und eine Geschwindigkeitssteigerung gewährleistet. Verwendet man sowohl Stereo-Luftbilder als auch 2D-Grundrißdaten ist eine Verifizierung der Ergebnisse durch einen Vergleich beider Quellen miteinander möglich. Ein weiterer Vorteil eines GIS oder einer digitalen Karte liegt in der semantischen Information. Angaben über Nutzung oder Geschoßzahl lassen Hypothesen z.B. über Dachtyp oder Gebäudehöhe zu.

3.1.4 Laserscannerdaten

Eine relativ neue Methode zur flächenhaften Erfassung von Höhendatensätzen ist durch flugzeuggetragene Laserscanner gegeben. Bei diesen wird über die doppelte Laufzeit des Laserimpulses die Entfernung zwischen dem Sensor und dem Gelände direkt bestimmt. Durch die zeilenweise Abtastung der Oberfläche quer zur Flugrichtung wird beispielsweise nach [VON HANSEN, VÖGTLE 1999] mit einem Laserscanner-System der Firma TopoSys¹ eine Streifenbreite von ca. 160 m bis 230 m aufgenommen und eine Punktdichte von ca. 4 bis 5 Meßwerten pro Quadratmeter erreicht. Durch die Unsicherheiten bei der Flugwegbestimmung wird dabei eine Genauigkeit von ± 0.1 m in der Höhe und ± 0.5 m in der Lage erzielt.

Das System kann in zwei verschiedenen Modi operieren. Der eine Modus zeichnet das zuerst zurückkommende Signal auf (*first pulse-Messung*), der andere das zuletzt zurückkommende Signal (*last pulse-Messung*). Wird das zuerst zurückkommende Signal aufgezeichnet, eignet sich dieses besonders zur Erfassung der Oberkante der Vegetation. Der Modus, welcher die zuletzt zurückkommenden Signale aufzeichnet dient der Erfassung der festen Erdoberfläche, da die Vegetation bis zu einem bestimmten Grad durchdrungen wird.

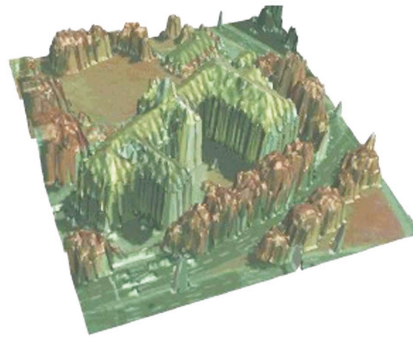


Abbildung 3.1: Digitales Oberflächenmodell aus Laserscannerdaten

Die Vorteile des Laserscannens gegenüber den klassischen photogrammetrischen Methoden liegen für die Herstellung von 3D-Stadtmodellen vornehmlich in der Möglichkeit mit Vegetation und Verdeckungen umzugehen, in der durchweg digitalen Erfassung sowie der vollautomatischen Auswertung.

¹<http://www.toposys.com>

Eine Signalisierung durch Paßpunkte ist nicht notwendig, da die Koordinaten des Sensors durch DGPS (Differential Global Positioning System) und inertielle Systeme hinreichend bekannt sind.

Der Nachteil des Laserscannens für die Gebäuderekonstruktion liegt in der regelmäßigen Gitterweite. Bei der klassischen photogrammetrischen Auswertung durch einen Operateur werden die für die Darstellung wichtigen Punkte wie Bruchkanten etc. berücksichtigt, während es bei einer regelmäßigen Gitterweite vorkommen kann, daß eine wichtige Bruchkante, in diesem Fall z.B. eine Gebäudewand, zwischen zwei Meßwerten liegt. So wird statt einer senkrechten Wand eine Schräge interpoliert. Wählt man eine sehr kleine Gitterweite, um dieses Problem zu minimieren, erhält man zu viele Daten, die für die eigentliche Aufgabe eher unerheblich sind und nur unnötigen Speicherplatz benötigen.

3.1.5 Daten aus terrestrischen Messungen

Neben den Meßmethoden der Photogrammetrie und Fernerkundung können die für die Gebäuderekonstruktion benötigten Koordinaten auch durch eine terrestrische Vermessung mittels Winkel- und Streckenmessung (Tachymetrie) erfaßt werden. Da dies aber sehr aufwendig und dementsprechend kostspielig ist, ist eine terrestrische Messung für großflächige 3D-Stadtmodelle nur zur Paßpunktbestimmung sinnvoll.

3.1.6 Orthophotos

Ein Orthophoto ist das Ergebnis einer differentiellen Entzerrung, bei der die Zentralperspektive des ursprünglichen Luftbildes in eine orthogonale Projektion umgewandelt wurde. Die Herstellung von Orthophotos auf dem analogen, analytischen oder digitalen Weg wird unter anderem bei ([HILDEBRANDT 1996], S. 278ff.) beschrieben.

Ein Orthophoto bietet eine Darstellung, welche folgende, bei [KRAUS, RIES 1999] aufgezählte Vorteile in sich vereint:

- Ein Orthophoto bietet eine vertraute Darstellungsweise der realen Welt und gibt daher eine gute Orientierungshilfe.
- Es besitzt einen hohen dokumentarischen Wert. Der Zeitpunkt der Befliegung ist bekannt.
- Digitale Orthophotos sind verhältnismäßig preiswert in der Herstellung und ermöglichen daher aktuelle Datensätze.

- Mit digitalen Orthophotos lassen sich Widersprüche in heterogenen Datensätzen aufklären und beheben.
- Digitale Orthophotos sind nicht generalisiert und liefern eine hohe Genauigkeit, besonders in großmaßstäbigen Bildern.

Im Bereich der 3D-Modellierung liegt die Hauptverwendung des Orthophotos in der Texturierung des rekonstruierten Modells. Bei kleinmaßstäbigen Modellen wird das Orthophoto über das dreiecksvermaschte Geländemodell bzw. bei besiedelten Gebieten zusätzlich über das Oberflächenmodell gerechnet. Eine Fototextur der Fassaden bedeutet für den visuellen Eindruck kleinmaßstäbiger Modelle keinen Gewinn.

Bei großmaßstäbigen Visualisierungen kann das Orthophoto ebenfalls über das Geländemodell gelegt werden. Außerdem ist eine Ableitung der Dachtexturen möglich. Für die Darstellung der Fassaden liegt im Orthophoto aber keine Information vor. Hierfür werden terrestrische Aufnahmen benötigt oder man begnügt sich mit einer synthetischen Textur.



Abbildung 3.2: kleinmaßstäbige Visualisierung

Eine weitere Verwendung des Orthophotos bei der Gebäuderekonstruktion ist die Bereitstellung der Grundrißinformation, welche man durch Digitalisierung des Dachumrisses ableiten kann, sofern man von der Annahme ausgeht, daß Dach und Grundriß



Abbildung 3.3: großmaßstäbige Visualisierung

korrespondieren. Die so erhaltene Grundrißinformation kann ähnlich wie eine digitalisierte Karte als Grundlage für die geometrische Rekonstruktion genutzt werden. Der Vorteil eines Orthophotos liegt in seiner Aktualität. Da es aus den gleichen Luftbildern abgeleitet werden kann, die auch der Gewinnung der dritten Dimension dienen, werden Probleme, die durch die unterschiedlichen Bezugssysteme zweier Datenquellen auftreten können, vermieden. Ein weiterer Vorteil liegt in der realen Dachform. Im Gegensatz zur Karte ist das Orthophoto nicht generalisiert.

3.1.7 Kontext-bezogenes Wissen

Die aus den Sensordaten ableitbaren Informationen geben oft nicht die idealen Strukturen der Modelle wieder. Durch perspektivische Darstellungen kommt es zu Verdeckungen und die in Abschnitt 3.1.1 genannten Einflüsse auf die Grauwerte erschweren eine automatisierte Interpretation zusätzlich. Um die Zuverlässigkeit der Rekonstruktion zu steigern, bietet es sich an, zusätzliches, kontext-bezogenes Wissen in den Rekonstruktionsprozeß einzubeziehen. Mögliche kontext-basierte Analysen, wie sie bei [STILLA ET AL. 1997] aufgelistet werden, sind:

- Analyse des lokalen Kontextes:
Objekte stehen oft in einer funktionalen Beziehung zu ihrer Umgebung. Das Wissen, daß Gebäude oft in der Nähe von Straßen und Autos meist auf den Straßen zu finden sind, kann für eine Interpretation genutzt werden.

- **Multisensoranalyse:**
Informationen, die in einem Spektralkanal nicht sichtbar sind, können unter Umständen in einem anderen Kanal gut hervortreten. Für eine umfassende Analyse von Bilddaten ist eine Kombination verschiedener Sensordaten von Vorteil.
- **Bildsequenzanalyse:**
Erfolgt die Aufnahme der Bilddaten in einer zeitlich variierenden Sequenz, können sich bewegende Objekte (z. B. Autos) entdeckt und von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.
- **3D-Analyse:**
Das Erscheinungsbild räumlicher Objekte ist abhängig vom Blickwinkel und der Beleuchtung. Um zuverlässige Aussagen zu erhalten, kann mit Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln gearbeitet werden.
- **Kartengestützte Analyse:**
Zweidimensionale Informationen in Form von Karten, Konstruktionszeichnungen oder einem GIS können eine zusätzliche geometrische Beschreibung des Kontextes liefern (siehe Abschnitt 3.1.3).

[ENGLERT 1997] nennt als weitere Eigenschaft der vom Menschen geschaffenen Objekte die in Abbildung 3.4 verdeutlichte

- Symmetrie, unterschieden in
 - Spiegelsymmetrie
 - Rotationssymmetrie
 - Translationssymmetrie
 - Skalierungssymmetrie
 - Farbsymmetrie
 - Kombinationen der einzelnen Symmetrien

Die bei Gebäuden am häufigsten auftretende Symmetrie ist die Spiegelsymmetrie, wobei diese auch in Kombination mit der Farbsymmetrie genutzt werden kann, um Gebäude zu detektieren.

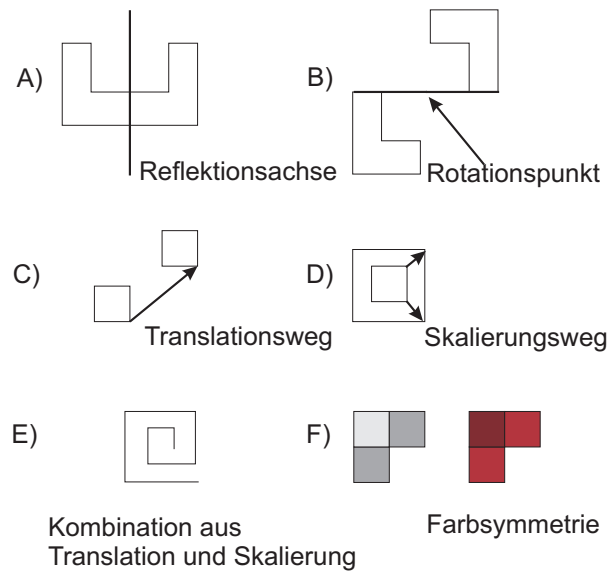


Abbildung 3.4: Symmetrietypen:

A) Spiegelsymmetrie, B) Rotationssymmetrie, C) Translationssymmetrie, D) Skalierungssymmetrie, E) Kombination aus Translation und Skalierung, F) Farbsymmetrie

[BÄHR 1998] führt verschiedene Beispiele zur Umsetzung von Wissensrepräsentation im Rahmen einiger Projekte an der Universität Karlsruhe² an. Er hebt hervor, daß Wissen zum einen auf faktischen Merkmalen basiert und zum anderen auf Regeln, welche zu Schlußfolgerungen führen.

Er unterscheidet zwischen explizitem und implizitem Wissen. Als explizites Wissen bezeichnet er dabei die Wissensrepräsentation durch Objektmodelle, wogegen implizites Wissen durch Kontrollalgorithmen ausgezeichnet wird. Repräsentieren läßt sich Wissen unter anderem in Form von Netzen, wobei unterschiedliche Repräsentationsformen wie z. B. neuronale Netze, semantische Netze oder Produktionsnetze in Frage kommen. Weitere Angaben zur Wissensrepräsentation gibt [DENGEL 1994].

²<http://www-ipf.bau-verm.uni-karlsruhe.de>

3.2 Aufbereitung der Daten

Die Aufbereitung der Daten unterteilt [KLAUS 1997] in drei Bereiche:

- Die geometrische Modellierung der Gebäude
- Die Texturierung der Fassaden und der Dächer
- Die Visualisierung mit freier Wahl des Betrachtungsstandpunkts

3.2.1 Geometrische Modellierung

Die aus den Datenquellen abgeleiteten Informationen führen zu einem geometrischen Modell der Gebäude, welches für die spätere Visualisierung aus Flächen zusammengesetzt sein soll (BRep). Mit Visualisierungswerkzeugen wie AutoCAD oder VRML können diese Flächen mit einer Textur belegt werden. Der Weg, welcher von der Datenerfassung bis zu dem fertigen geometrischen Modell des Gebäudes führt, ist für jeden Rekonstruktionsansatz verschieden. Auf eine Auswahl unterschiedlicher Ansätze wird in den weiteren Kapiteln noch eingegangen. Man kann den Prozeß mit den folgenden, allgemeinen Schritten beschreiben:

1. Datenbeschaffung
2. Aufbereitung der Daten
3. Zur Verfügung stellen von Datenmodellen oder Datenstrukturierungsverfahren
4. Anpassung der Datenmodelle an die erfaßten Daten
5. Verifizierung, evtl. mit Hilfe einer Visualisierung/Editierung

Um eine zum Teil automatische Rekonstruktion zu ermöglichen, ist es nötig, Wissen über die Daten und über die darzustellenden Objekte zu formulieren. Nur durch das Wissen über die Objekte und über die Sensordaten ist eine Unterscheidung zwischen Wichtigem und Unwichtigem möglich, und die aus den Sensordaten extrahierten Informationen können so strukturiert werden, daß eine Anpassung zwischen diesen und den vordefinierten Objektmodellen erfolgen kann. Möglichkeiten für dieses Kontext-Wissen sind in Abschnitt 3.1.7 beschrieben.

3.2.2 Texturierung

Für ein möglichst reales Erscheinungsbild eines Gebäudes wird eine Texturierung der vorher modellierten geometrischen Flächen gewünscht. Im einfachsten Fall kann es sich um eine Flächenfarbe handeln, d. h. Fassaden werden z. B. grau und Dächer rot dargestellt. Wählt man eine synthetische Textur, also eine Textur, die aus einer einfachen Flächenfarbe und/oder einem einfachen Muster besteht, ist es sinnvoll, sich einer Bibliothek zu bedienen, in der übliche, synthetische Texturen (z. B. Ziegelsteinmuster) vorgehalten werden.

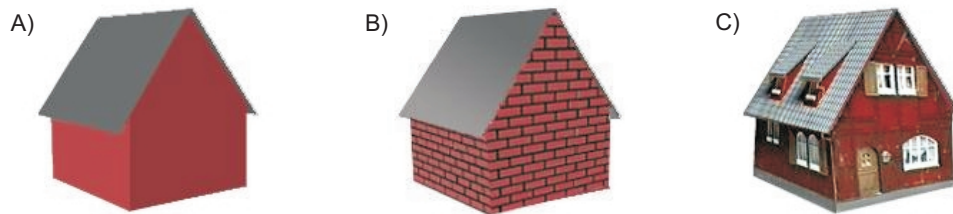


Abbildung 3.5: Texturtypen: A) synthetische Textur, einfache Flächenfarbe, B) synthetische Textur, Bumpmapping, C) Fototextur

Möchte man einen hohen Realitätsgrad erhalten bieten sich Fototexturen an. Für die Fototexturierung gibt es zwei Möglichkeiten, abhängig vom Maßstab der gewünschten Visualisierung. Bei kleinmaßstäbigen Visualisierungen kann man ein Orthophoto über das gesamte dreiecksvermaschte 3D-Stadtmodell rechnen. Für großmaßstäbige Visualisierungen eignet sich ein 3D-Fotomodell. Bei diesem wird jeder Fläche ein Foto zugewiesen. Die Fototexturen der Dachflächen lassen sich aus den Luftbildern ableiten. Die Fassadentexturen müssen in einem zusätzlichen Schritt terrestrisch aufgenommen werden.

Vor Zuweisung der Fotos zu den Flächen des geometrisch modellierten Stadtmodells ist eine Vorbereitung der Fotos in geeigneten Bildverarbeitungsschritten notwendig. Diese Schritte beinhalten das *Scannen*, das *Entzerren*, das *Ausschneiden* und das *Mosaiken* der gewünschten Bildausschnitte sowie radiometrische Korrekturen. Für die Texturierung muß außerdem ein Bezug zwischen dem Bild und der dazugehörenden Fläche des geometrischen Modells hergestellt werden. Dies geschieht über die Ecken der zu texturierenden Flächen.

Scannen: Beim Scannen ist zu bedenken, daß eine Abhängigkeit zwischen der kleinsten Objekteinheit und der Auflösung besteht. Man möchte verhindern, daß die Matrixstruktur des digitalen Bildes bei der Betrachtung von Details erkennbar wird. Andererseits ist eine zu hohe Auflösung mit keinem Qualitätsgewinn verbunden, die so gescannten Bilder nehmen nur unnötigen Speicherplatz in Anspruch. [ROUS 1998] empfiehlt aufgrund empirischer Beobachtungen eine Scan-Auflösung von 1/5 bis 1/10 der Gegenstandsgröße.

Entzerren: Um das gescannte Bild als Textur verwenden zu können, ist das zentralperspektivische Bild in eine orthogonale Abbildung zu überführen. Hierfür bietet sich die projektive Transformation an, welche die Umrechnung der Bildpunkte in eine definierte Ebene ohne Kenntnis der inneren Orientierung ermöglicht. Der Ansatz lautet

$$X_i = \frac{a_1 x_i + a_2 y_i + a_3}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1}$$

$$Y_i = \frac{a_4 x_i + a_5 y_i + a_6}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1}$$

mit X_i, Y_i Koordinaten des orthogonalen Bildes
 x_i, y_i Koordinaten des perspektivischen Bildes
 $a_1 - a_8$ Transformationsparameter, ermittelbar durch Kenntnis von mindestens vier Paßpunkten

Mosaiken und Radiometrisches Anpassen: Oft ist eine Fassade nicht mit einem Bild abzudecken, da das Haus zu hoch oder zu breit ist, oder weil Verdeckungen zusätzliche Aufnahmen erfordern. Liegen mehrere Bilder für eine Fassade vor müssen diese nach der Entzerrung zu einem Mosaik zusammengesetzt werden. Da die Lichtverhältnisse in mehreren Bildern nicht konstant sind, ist hierbei eine Angleichung der Grauwerte und eine Glättung an den Nahtstellen vorzunehmen. Ferner sind Störpixel zu entfernen bzw. nicht gewünschte Objekte wie Bäume, Autos etc. zu retuschieren. Als geeignetes Programm nennt [ROUS 1998] das Bildverarbeitungsprogramm ADOBE PHOTOSHOP³, und [BRENNER 1999] schlägt das Nahbereichs-Photogrammetrie-Paket PHOTOMODELLER 1999⁴ vor.

³<http://www.adobe.com>

⁴<http://www.photomodeler.com>

3.2.3 Visualisierung

Letztendlich soll das geometrisch aufbereitete und mit einer Textur versehene Modell so auf dem Bildschirm visualisiert werden, daß der Nutzer den Betrachtungsstandpunkt frei wählen kann. Diese Aufgabe der perspektivischen Darstellung wird von allgemein üblichen Visualisierungswerkzeugen übernommen. Hier sind z. B. die kommerziellen Softwareprodukte *AutoCAD*⁵ oder *MicroStation*⁶ zu nennen. Eine Darstellung nach ISO-Standard (ISO/IEC 14772) bietet ein VRML-Browser.

VRML-Browser, z. B. der *CosmoPlayer*⁷ von Silicon Graphics, sind als Freeware-Produkte im Internet erhältlich. VRML ist die Abkürzung für „Virtual Reality Modeling Language“⁸. Es bietet die Möglichkeit, innerhalb einer vorher modellierten 3D-Welt frei zu navigieren, also die Perspektive selbst zu wählen und interaktiv zu verändern. Mit Hilfe von VRML lassen sich sowohl aus Flächen bestehende Objekte (BRep, siehe Abschnitt 2.3.2.3) als auch durch 3D-Primitive geschaffene Objekte (CSG, siehe Abschnitt 2.3.2.4) generieren.

Die flächenhaften Objekte lassen sich mit einer zweidimensionalen Bilddatei (Textur) belegen, wobei VRML die Bild-Formate GIF und JPG unterstützt. Weiter sind verschiedene Farb- oder Materialzuweisungen (matt, transparent, glänzend etc.), das Setzen von Lichtquellen verschiedener Arten (Punkt-, Parallel- oder Spotlicht) an verschiedenen Positionen sowie festgelegte Kamerastandpunkte, sogenannte *Viewpoints*, möglich. Entlang vordefinierter Viewpoints lassen sich außerdem interpolierte Animationen erstellen, die ungeübten Nutzern eventuell auftretende Navigationsprobleme ersparen.

Ein großer Vorteil von VRML liegt darin, daß die VRML-Skripte erst zur Laufzeit übersetzt werden. So nehmen die einzelnen Welten nur den Speicherplatz einer Textdatei sowie natürlich die Speicherplätze für die eingebundenen Fotos (Texturen) in Anspruch. Einen guten Überblick zur Skriptsprache VRML bieten [CÖLTEKIN ET AL. 1999] und [ROUS, SCHLÖSSER 1998]. Letztere nennen außerdem verschiedene Autorenwerkzeuge. Dies sind Programme, die das Gestalten einer virtuellen Szene vereinfachen.

⁵<http://www.autodesk.de>

⁶<http://www.bentley.de>

⁷<http://www.cai.com/cosmo/>

⁸<http://www.web3d.org/Specifications/VRML97/>

4

Modellierungsansätze

Möchte man mit Hilfe der im vorherigen Kapitel genannten Daten die Gebäude für ein 3D-Stadtmodell rekonstruieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es kann grob zwischen zwei grundlegenden Vorgehensweisen unterschieden werden:

- Beim *topologiegesteuerten Rekonstruktionsansatz* werden die gemessenen Elemente (z. B. Punktwolken) aufgrund von Attributen und topologischen Beziehungen zu den Zielobjekten strukturiert. Die Strukturierung erfolgt automatisch nach einer manuell ausgeführten analytischen oder digitalen Punktmessung.
- Beim *modellgesteuerten Rekonstruktionsansatz* werden durch automatische Verfahren Elemente wie Kanten oder Flächen aus den Bildern oder vergleichbaren Datenquellen extrahiert und mit der Möglichkeit zu einem manuellen Eingreifen einem oder mehreren in einer Bibliothek vorgegebenen Basis-Modellen zugeordnet.

In diesem Kapitel soll eine allgemeine Beschreibung beider Ansätze sowie Beispiele zu deren Umsetzungen erfolgen.

4.1 Topologiegesteuerter Ansatz

Bei dem hier vorgestellten topologiegesteuerten Ansatz zur Gebäuderekonstruktion für 3D-Stadtmodelle werden Punktwolken, bestehend aus Gebäudeecken, manuell anhand von Stereo-Luftbildern gemessen und mit Attributen versehen. Mit Hilfe von eigens dafür entwickelten Algorithmen werden die attributierten Punkte automatisch erst zu

Kanten, dann zu geschlossenen Polygonen und schließlich zu 3D-Objekten strukturiert, welche aus mehreren Flächen bestehen. Das Ergebnis kann manuell in einem Editor korrigiert werden. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise ist der *CyberCity-Modeler*.

4.1.1 CyberCity-Modeler

Der *CyberCity-Modeler*¹ (CC-Modeler) ist ein von der ETH Zürich entwickeltes System zur Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte für 3D-Stadtmodelle. Das System läuft auf einer Arbeitsstation und ist auf alle polyederförmigen Oberflächen anwendbar. Bei der manuellen Punktmessung mittels digitaler Stereoauswertung werden jedem Punkt verschiedene Attribute zugeordnet. Diese geben neben der Objektidentifikation an, ob es sich im zweidimensionalen Fall um einen Umringspunkt (*Boundary Point* BP) oder einen Innenpunkt (*Interior Point* IP), z. B. einen Punkt auf dem Giebel, handelt. Ein anderes Attribut besagt, ob das Objekt geschlossen ist und aus vielen Flächen besteht, oder ob es durch einen offenen Linienzug (z. B. Straße) repräsentiert wird. Eine eventuelle Fototextur wird ebenfalls als Attribut vergeben.

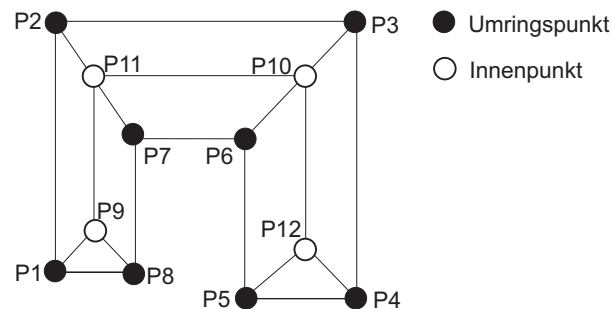


Abbildung 4.1: Umrings- und Innenpunkte

Für die Rekonstruktion gelten diverse Bedingungen. Bei einem 3D-Objekt muß es sich um ein geschlossenes Multiple-Flächen-Objekt handeln. Die einzelnen Flächen dürfen sich nicht schneiden, und alle benachbarten Umringspunkte sind Teil einer Fläche und können so paarweise betrachtet werden. Bei der Messung der Umringspunkte ist eine bestimmte Reihenfolge, mit oder gegen den Uhrzeigersinn, einzuhalten, während die Reihenfolge der Innenpunkte beliebig ist.

Mit dem Wissen über diese Bedingungen können diejenigen Innenpunkte gesucht werden, welche mit den gerade genannten Umringspunktpaaren eine Fläche bilden. Dieser als *Consistent Labeling* bezeichnete Schritt basiert auf Wahrscheinlichkeiten, resultierend aus der räumlichen Distanz zwischen den Umrings- und den Innenpunkten.

¹http://www.geod.ethz.ch/p02/projects/3DGIS/CC-Modeler_intro.html

Sind Dachpartien vorhanden, die nur aus Innenpunkten bestehen, wird eine Sub-Schleife generiert, welche eine neue Fläche definiert. Um solche Sonderfälle zu entdecken, verbindet der CC-Modeler alle Innenpunkte aller Flächen und bildet einen Sub-Graphen. Im nächsten Schritt werden alle Flächen simultan nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen und so an die zugehörigen Punktbeobachtungen angepaßt. Die Beobachtungen werden mit Bedingungsgleichungen verbessert, welche die Rechtwinkligkeitszwänge gerader Linienpaare modellieren.

Zur Visualisierung mit einem gebräuchlichen Visualisierungswerkzeug wie z. B. AutoCAD, MicroStation oder Inventor kann das Modell in einem weiteren Schritt mit einem Algorithmus, ähnlich dem von Delaunay, trianguliert werden. Zur Verbesserung von Fehlern, die durch die automatische Prozedur auftreten können, ist ein Editieren möglich ([GRUEN, WANG 1999]).

An der Universität Bonn² wird an einem vollautomatischen Ansatz zur topologiegesteuerten Gebäuderekonstruktion gearbeitet. Nähere Informationen liefern [HEUEL 2000] und [FISCHER ET AL. 1999].

Strategie

Die Strategie des CyberCity-Modelers läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Manuelle, photogrammetrische Messung der Eckpunkte mit Attributvergabe
- Topologische Strukturierung der Punkte zu Flächen aufgrund von Wahrscheinlichkeiten
- Ausgleichung zur Anpassung der strukturierten Flächen an die gemessene Punktwolke
- Visualisierung und Editierung zur nachträglichen Korrektur von Fehlern

Künstliche, von Menschen geschaffene Objekte weisen häufig Eigenschaften wie Symmetrie, vertikale Wände, konstante Höhen der Dachtraufen oder Standarddachtypen auf. Der topologiegesteuerte Ansatz macht sich diese Vorteile nicht zu eigen. Um das Wissen über die Objekte besser zu nutzen, bietet sich eine modellgesteuerte Herangehensweise an.

²<http://www.ipb.uni-bonn.de>

4.2 Modellgesteuerter Ansatz

Viele Ansätze nutzen in ihrem Rekonstruktionsprozeß eine Bibliothek mit vorgefertigten Basis-Modellen. Bei diesen kann es sich um Basisflächen (Rechtecke, Dreiecke, Parallelogramme etc.) oder um Basiskörper (Quader, Pyramiden etc.) handeln.

[MASON 1996] schlägt eine Gebäuderekonstruktion mit Hilfe von Basisflächen vor, aus denen das Gebäude zusammengesetzt wird. Diese Modellbildung entspricht der BRep-Darstellung und bietet eine besondere Flexibilität. Auch sehr ungewöhnlich geschnittene Objekte können problemlos dargestellt werden. Der Nachteil liegt in einem erhöhten Aufwand. Dem Gebäude muß jede einzelne Fläche zugewiesen werden, obwohl viele Gebäude einer gleichen 3D-Struktur folgen. So sind für ein einfaches Flachdachgebäude vier senkrechte Rechtecke für die Wände und ein horizontales Rechteck für das Dach nötig. Eine Beschreibung durch einen schon dreidimensional vorliegenden Quader spart Arbeit und minimiert den nötigen Speicherplatz, da statt fünf Elementen „Fläche“ nur ein Element „Körper“ zugeordnet werden muß.

Viele Ansätze gehen deshalb von bereits dreidimensional vorliegenden Modellen aus, den sogenannten 3D-Primitiven. Für die Modellierung eines Gebäudes mit Satteldach kann ein Quader und ein keilförmiges Primitiv verwendet werden, oder man nutzt ein bereits bestehendes aus beiden Teilen zusammengesetztes Primitiv (siehe Abschnitt 2.3.2.4, Primitive Instancing).

Zur Gebäuderekonstruktion werden die einzelnen, für das jeweilige Gebäude benötigten Primitive ausgewählt und zu dem vollständigen Gebäude verschnitten (CSG-Modellierung). Im Gegensatz zu dem topologiegesteuerten Ansatz wird bei einer modellgesteuerten Herangehensweise meist nicht manuell gemessen. Man bedient sich statt dessen diverser automatischer Verfahren zur Mustererkennung, Kantenextraktion und Bildkorrelation.

Das Selektieren der passenden Modelle bzw. Primitive erfolgt in einem interaktiven Prozeß oder automatisch mit einer nachträglichen Möglichkeit zur Interaktion, um eventuell falsche Ergebnisse zu korrigieren, die aus dem automatischen Prozeß resultieren.

Bei den benötigten, originären Daten ist man nicht zwangsläufig auf Stereo-Luftbilder beschränkt. Stereo-Luftbilder oder auch ein DOM aus Laserscannerdaten werden oft mit zweidimensionalen Daten in Form eines GIS oder einer digitalen Karte kombiniert. Die zweidimensionalen Daten liefern Informationen über den Grundriß der Gebäude, während dem DOM, sei es nun aus Stereobildern abgeleitet oder durch Laserscanner gewonnen, die dritte Dimension entnommen wird.

Für den Rekonstruktionsprozeß der Gebäude gibt es sehr unterschiedliche Ansätze. Neben der reinen Auswertung von Stereo-Luftbildern gibt es z. B. Verfahren, welche vorerst von einem 2.5D-GIS ausgehen. Das bedeutet, es sind 2D-Grundrißinformationen vorhanden und eine ungefähre Angabe der Gebäudehöhe oder der Geschößzahl sowie Angaben über die Gebäudenutzung. Es wird mit einer Reihe von Hypothesen ein dreidimensionales Modell erstellt. Die Hypothesen können die Annahmen beinhalten, daß bestimmte Gebäudenutzungen auf bestimmte Dachtypen hinweisen (z. B. Garagen besitzen ein Flachdach). Erst die Verifizierung der Hypothesen erfolgt mit Hilfe der Stereobilder.

Arbeitet man mit Stereobildern, findet für gewöhnlich eine Merkmalsextraktion statt, d.h. es werden Elemente wie Punkte, Geraden oder Flächen aus den Bildern extrahiert. Hieraus werden Ecken und Polygone gebildet, die dreidimensional einem bestimmten Repräsentationsmodell zugeordnet werden. Anschließend findet eine Verifizierung der Zuordnung statt, und es wird eventuell eine Fototextur vergeben.

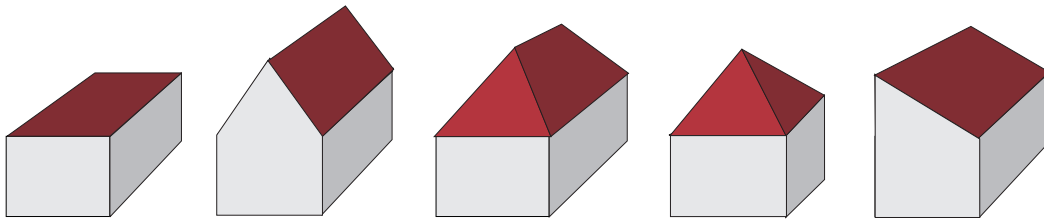


Abbildung 4.2: Eine kleine Auswahl von Basis-Gebäudetypen mit verschiedenen Dachformen: Flachdach, Satteldach, Walmdach, Pavillondach, Pultdach

Allen modellgesteuerten Rekonstruktionsansätzen sind zwei grundlegende Schritte gemein:

1. Die Objektmodellierung
2. Die Anpassung der Objektmodelle an die aus den Sensordaten abgeleiteten Informationen

Unterschiede zwischen den verschiedenen Gebäuderekonstruktionsansätzen betreffen die Wahl der zu extrahierenden Merkmale, den Zeitpunkt der 3D-Zuordnung und der Verifizierung, die Arten der zur Verfügung stehenden Objektmodelle sowie die Frage, welche Strukturen zur Verwaltung der Daten benutzt werden.

Je nachdem, wann ein manuelles Eingreifen notwendig ist, kann man außerdem zwischen zwei verschiedenen Interaktionsmodi unterscheiden:

- **Korrektive Interaktivität:**
Es ist eine vollautomatische Rekonstruktion angestrebt, welche aufwendig in einem interaktiven Prozeß korrigiert werden muß. Diese Methode birgt die Gefahr, eventuelle Fehlzuordnungen zu übersehen.
- **Instruktive Interaktion:**
Der Operateur interagiert frühzeitig, indem er passende Modelle auswählt. Die Gefahr der Fehlzuordnung ist aufgrund der Erfahrungen des Operateurs und seiner Fähigkeit zur visuellen Interpretation gering.

Die Genauigkeit eines rekonstruierten Modells hängt von der geometrischen Genauigkeit der Ausgangsdaten und der Modellvollständigkeit ab, welche sich nach dem Grad der Generalisierung richtet ([MASON 1996]). Im Folgenden wird eine Auswahl üblicher Ansätze zur semi-automatischen Gebäuderekonstruktion mittels Basismodellen vorgestellt. Die Unterteilung der Ansätze erfolgt primär nach den in den Rekonstruktionsprozeß eingehenden Daten. Die Abbildung 4.3 zeigt wesentliche Arbeitsschritte, die für viele der noch folgenden Ansätze nötig sind.

4.2.1 2D-Grundriß und DOM aus Laserscannerdaten

Eine Möglichkeit zur Gebäuderekonstruktion stellt die Kombination eines 2D-Grundrisses aus einem GIS oder aus einer digitalen Karte mit einem DOM, welches aus Stereo-Luftbildern oder aus Laserscannerdaten abgeleitet wird, dar.

Bei dem hier beschriebenen *Stuttgart-Ansatz*³ werden 2D-Grundrißinformationen aus einem GIS sowie die Höhendaten eines Laserscanner-DOM genutzt ([BRENNER 1999], [HAALA ET AL. 1997], [BRENNER, HAALA 1999], [BRENNER, HAALA 2000]).

Es sind alle generellen Polyeder rekonstruierbar. Man geht von der Annahme aus, daß die Koordinaten des Grundrisses korrekt sind, d. h. die Ränder des Daches werden exakt durch ihn definiert. Die Tatsache, daß die Dächer meist etwas überstehen, der Grundriß des Daches demnach größer ist als der Grundriß des aufsteigenden Mauerwerks, wird aus Gründen der Generalisierung vernachlässigt. Diese Feinheiten werden für viele Anwendungen, z. B. Simulationen, auch nicht benötigt. Weiter wird angenommen, daß alle Dachtraufen die gleiche Höhe besitzen und die Dachneigung variabel ist. Die Wände sind als vertikale Flächen definiert, die den Grundriß mit den Dächern verbinden. Weichen die Gebäude von diesen Annahmen ab, erhält man keine korrekten Ergebnisse.

³<http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

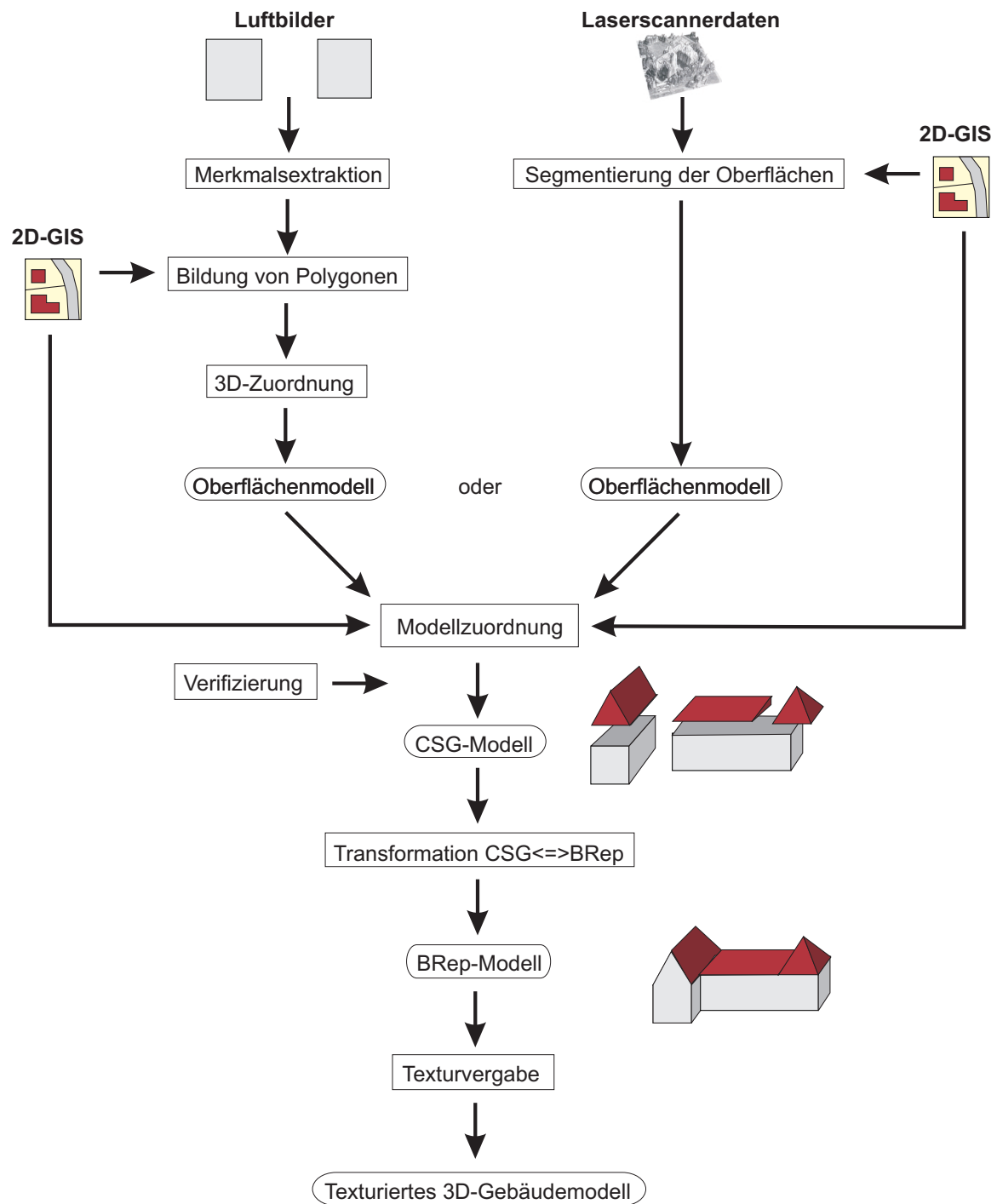


Abbildung 4.3: Allgemeiner Ablauf einer Gebäuderekonstruktion

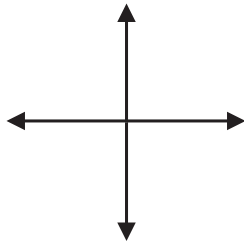
Die grobe Idee des Algorithmus ist die Unterteilung der Gebäude in eine Anzahl von Basisprimitiven. Hierzu stehen vier Primitive, unterschieden durch den Dachtyp, zur Verfügung:

- Flachdach
- Satteldach
- Walmdach
- Pultdach

In einem ersten Schritt erfolgt eine Zerlegung des Grundrisses in Rechtecke, welche die Basis für die Primitive darstellen. Die Parameter der Rechtecke legen die Position, Orientierung und horizontale Ausdehnung der Primitive fest. Unbekannte Parameter sind die Höhe des Kuboids, der Dachtyp sowie die Dachneigung. Diese Parameter werden mit Hilfe einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten aus den Höhendaten des Laserscanner-DOM geschätzt. Der Zweck der Ausgleichung ist es, den Abstand zwischen der DOM-Oberfläche und dem korrespondierenden Gebäudeprimitiv zu minimieren.

Zur Auswahl der passenden Gebäudeprimitive muß das DOM in ebene Flächen segmentiert werden. Diese Segmentierung erfolgt durch eine Neigungsanalyse. Der existierende Grundriß dient dazu, die Ausdehnung des zu untersuchenden Gebietes zu beschränken. Die Neigungsermittlung erfolgt durch eine Berechnung der Oberflächennormalen für jeden DOM-Punkt. Die möglichen Orientierungen der Dachflächen sind durch den Grundriß des Gebäudes definiert (siehe Abbildung 4.4). Mit Hilfe der Neigungen der segmentierten Flächen können schließlich das passende Primitiv sowie die Dachneigung ermittelt werden.

Die vier Hauptachsen



Oberflächennormale

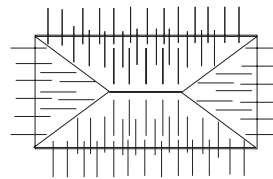


Abbildung 4.4: Oberflächennormale zur Neigungsanalyse in Richtung der Hauptrichtungen, welche durch den Grundriß vorgegeben sind

Wurde ein Primitiv ausgewählt, müssen diejenigen Dachregionen, welche nicht zu dem gewählten Modell passen, von der Ausgleichung ausgeschlossen werden. Es folgt eine lokale Anpassung nach kleinsten Quadraten in der Umgebung eines jeden DOM-Punktes. Alle Punkte, welche eine Oberflächennormale besitzen, die kompatibel zu der untersuchten Grundrißrichtung ist, werden zu einer Region kombiniert. Mit Hilfe der so entstandenen Segmente aus dem DOM und der Rechtecke, welche durch Zerlegung aus dem Grundriß gewonnen wurden, findet eine Schätzung der unbekannt Parameter, also der Höhe des Kuboids, des Dachtyps sowie der Dachneigung, statt.

Simulationen oder Visualisierungen benötigen für gewöhnlich ein BRep-Modell. Deshalb ist nach der Verschmelzung der einzelnen Gebäude-Basis-Primitive eine Transformation vom CSG- ins BRep-Modell nötig.

Die Standardabweichung wird für jedes Gebäude und seine einzelnen Bestandteile berechnet, um einen zuverlässigen Test für die Qualität der Rekonstruktion zu erhalten ([BRENNER, HAALA 1999]). Man erhält den Unterschied zwischen der DOM-Oberfläche und den korrespondierenden Punkten der Dachebenen. Regionen, die nicht kompatibel mit der endgültigen Rekonstruktion sind, geben einen zusätzlichen Aufschluß darüber, ob ein manuelles Eingreifen für die weitere Verfeinerung gefragt ist. Der Prozeß läuft bis zu diesem Zeitpunkt automatisch ab.

Da die nicht kompatiblen Regionen bei der Segmentierung festgelegt wurden, können sie zusammen mit den berechneten Standardabweichungen in einem interaktiven Auswertungsschritt visualisiert werden. Die Editierung findet mit Hilfe eines Werkzeugs mit graphischem Benutzer-Interface (*GUI*, graphical user interface) statt, welches dem Operateur die Möglichkeit bietet, die Grundrißprimitive zu verändern bzw. neue zusätzliche 3D-Gebäudeprimitive zu generieren.

Von der Auswahl der Primitive und der Zuordnung dieser zu den vorhandenen Daten (DOM, Grundriß) bis zur Verifizierung laufen alle Schritte automatisch ab. Erst eine Korrektur der automatisch gewonnenen Ergebnisse erfolgt durch Interaktion. Es handelt sich demnach um eine korrektive Interaktion.

Die eben beschriebene Herangehensweise zur Gebäuderekonstruktion geht von der Annahme aus, daß alle Wände, definiert durch das Grundrißpolygon, zu ebenen Dachflächen mit variabler Neigung führen, und daß der Grundriß in Rechtecke zerlegbar ist. Diese Annahmen sind sehr generell. Es gibt falsche Resultate, wenn die Dachstruktur innerhalb des Grundpolygons nicht den Regeln folgt, welche aus dem Grundpolygon abgeleitet werden können. Dies geschieht beispielsweise, wenn mehr als eine Ebene aus einem einzigen Polygonelement entspringt, oder wenn Teile des Gebäudes, welche in der Dachoberfläche enthalten sind, nicht vom Grundriß repräsentiert werden, z. B. Gauben.

Ein weiteres Problem liegt in der unterschiedlichen Aktualität der Daten durch die Kombination verschiedener Datenquellen. Das 2D-GIS ist eventuell schon veraltet, während das DOM für gewöhnlich aus aktuellen Messungen abgeleitet wird. Außerdem werden aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsmethoden auch unterschiedliche Inhalte geboten. Die GIS-Daten enthalten für gewöhnlich keine Informationen über die Vegetation oder über kleinere Gebäudeteile. Es besteht für detailreiche Modelle der Bedarf, die Objekte zu erfassen, welche nicht im 2D-GIS enthalten sind.

Aufgrund der Dichte des Oberflächenmodells von $1\text{m} \times 1\text{m}$ bei [BRENNER, HAALA 1999], bzw. $0,5\text{m} \times 0,5\text{m}$ bei [HAALA ET AL. 1997] mit einer Lagegenauigkeit beider von $0,3\text{m}$ und einer Höhengenaugigkeit von $0,1\text{m}$ ist eine Darstellung von Objekten, welche kleiner als ein Meter sind, nicht möglich. Eine Verbesserung des Realismus und ein Kompensieren von fehlenden Teilen, welche kleiner als ein Meter sind, ist durch eine Fototextur möglich. Das Drahtgitter des rekonstruierten Gebäudes sowie die Indizes der Flächen werden auf das Luftbild projiziert. Wenn die Blickpunkte während der terrestrischen Bildbeschaffung in eine Karte oder ein Orthophoto übertragen werden, erlaubt dies eine einfache, interaktive Definition der korrespondierenden Flächenindizes auch für jedes terrestrische Bild. Für die Fototexturierung ist eine projektive Entzerrung der Bilder notwendig. Nach Auswahl der korrespondierenden 3D-Gebäudeflächen müssen mindestens vier Verbindungspunkte zwischen dem Flächenpolygon und dem terrestrischen Bild festgelegt werden. Nach dem Textur-Mapping werden für die endgültige Visualisierung das Orthophoto sowie virtuelle Bäume hinzugefügt.

Strategie

Die Strategie zur Gebäuderekonstruktion anhand eines Laserscanner-Oberflächenmodells und eines 2D-Grundrisses läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Zerlegung des Grundrisses in Rechtecke
- Segmentierung der Laserscannerdaten in ebene Flächen durch Neigungsanalyse
- Auswahl eines passenden Primitivs
- Ausgleichung unter Ausschluß nicht kompatibler Dachregionen und Schätzung der unbekanntenen Parameter (Gebäudehöhe, Dachtyp, Dachneigung)
- Transformation vom CSG-Modell ins BRep-Modell
- Verifizierung, Editierung, nachträgliche Verbesserung
- Texturierung

4.2.2 2D-Grundriß und Stereo-Luftbilder

Der bei [HAALA, ANDERS 1996] beschriebene Versuch einer vollautomatischen Gebäuderekonstruktion mit Hilfe eines GIS erfolgt vorerst nur mit den Grundrißinformationen. Es werden aufgrund der Textinformationen eines GIS oder einer digitalen Karte (z. B. die digitale Katasterkarte) sowie aus allgemeinen Überlegungen Hypothesen über Gebäudehöhe, Dachtyp und Dachneigung aufgestellt. Luftbilder werden erst zur Verifizierung eingesetzt.

Der Ansatz beginnt mit einer Generalisierung des Grundrisses, so daß man eine einfache rechtwinklige Darstellung bekommt. Auch hier legt der Grundriß die Position, Orientierung und horizontale Ausdehnung des Gebäudes fest. Die unbekannte Höhe des Kuboids, der Dachtyp sowie die Dachneigung werden diesmal nicht durch eine Neigungsanalyse eines regelmäßigen Oberflächenmodells bestimmt, sondern in Abhängigkeit von der Nutzung mehr oder weniger willkürlich festgelegt. Es kommen nur zwei Dachtypen in Frage:

- Flachdach
- Satteldach

Die Nutzungsart eines Gebäudes wird als semantische Information im GIS vorgehalten. Mit ihrer Hilfe kann man Hypothesen über den Dachtyp aufstellen. Eine Garage oder eine Industriehalle werden als Flachdachgebäude festgelegt, Wohnhäuser erhalten Satteldächer. Die anderen Unbekannten, z. B. die Gebäudehöhe, sind im GIS meist nicht enthalten. Sie werden ebenfalls durch Hypothesen aus der Nutzung abgeleitet. Man geht beispielsweise von drei Meter hohen Garagen aus und legt fest, daß eine Kirche zwölf Meter hoch ist.

Diese Annahmen sind sehr generell und werden der Wirklichkeit meist nicht gerecht. Daher ist eine Verifizierung mit Hilfe von Luftbildern nötig.

Es werden Luftbilder mit einer bekannten äußeren Orientierung benötigt, aus denen ein Kantenextraktionsverfahren die Linienmerkmale extrahiert. Nach der Extraktion der Grauwertkanten im zweidimensionalen Fall müssen diese durch automatische Bildkorrelation in den dreidimensionalen Raum überführt werden. Die so erlangten dreidimensionalen Linienmerkmale müssen den Linien des Objektmodells, welches vorher durch die genannten Hypothesen generiert wurde, zugeordnet werden. Um festzustellen, ob die jeweiligen Linienmerkmale korrespondieren, erfolgt eine Transformation des Objektmodells und der extrahierten Bildprimitive in ein gemeinsames Koordinatensystem.

Alternativ zu Luftbildern mit bekannter äußerer Orientierung kann auch ein DGM die Geländehöhen liefern, die der Rekonstruktionsprozeß zusätzlich zu den 2D-Koordinaten des Grundrisses benötigt. Verwendet man ein genähertes DGM zusammen mit den GIS-Daten dazu, Gebäuderegionen während des Zuordnungsprozesses auszuschließen, werden Probleme vermieden, welche aufgrund von Verdeckungen und Höhendiskontinuitäten während der Anwendung der digitalen Stereozuordnung auftreten können.

Man geht davon aus, daß die Abweichungen zwischen den Linienmerkmalen aus den Bildern und den Linien des Objektmodells nur durch eine Differenz zwischen angenommener und wahrer Dachhöhe verursacht werden. Diese Höhendifferenz ist berechenbar. Es erfolgt eine Ausgleichung des Modells nach kleinsten Quadraten.

Nutzt man für die Zuordnung ein genähertes DGM, reicht theoretisch ein Bild aus. Mit zusätzlicher Verwendung eines zweiten Bildes wird aber die Zuverlässigkeit gesteigert.

Eine ähnliche Herangehensweise benutzen auch [PAŠKO, GRUBER 1996]. Sie extrahieren die Grundrißinformation aus einem GIS und nehmen mit Hilfe von Hypothesen (in diesem Fall der Geschoßzahl) eine vorläufige Höhe an. Für eine genauere Darstellung werden Kanten aus den Luftbildern extrahiert und mit den Grundrißdaten des GIS durch eine stückweise affine Zuordnungsprozedur in einem monokularen Ansatz in Beziehung gesetzt. Schließlich wird das 3D-Dachskelett in einem stereoskopischen Ansatz ermittelt und das gesamte Ergebnis noch einmal überprüft.

Auch hier werden aufgrund der Informationen eines GIS Hypothesen aufgestellt und mit Hilfe von Stereobildern verbessert. Im Gegensatz zu dem obigen Ansatz wird aber keine Hypothese über den Dachtyp aufgestellt, sondern nur über die Gebäudehöhe. Der Dachtyp wird erst durch eine Stereoauswertung der Luftbilder ermittelt.

Der Vorteil dieser Herangehensweisen liegt in der vollautomatischen Rekonstruktion. Die Daten müssen lediglich vorbereitet werden, d. h. die Luftbilder werden gescannt und radiometrisch überarbeitet.

Der Nachteil liegt in der Tatsache, daß die Verfahren in ihrer Modelldetailliertheit stark beschränkt sind. Bei dem von [HAALA, ANDERS 1996] vorgeschlagenen Verfahren sind beispielsweise nur zwei verschiedene Dachtypen möglich.

In einem von [WOLF 1999] vorgestellten Ansatz werden die Gebäudeumringe aus dem GIS zusätzlich mit dem DGM verschnitten, so daß die Gebäude auf dem ebenfalls dreidimensionalen Gelände statt auf einer planen Fläche aufsetzen.

[KRAUS, RIES 1999] kombinieren eine 3D-Gebäudeerfassung „von oben“ mit der „von unten“. Das bedeutet, daß aus den Luftbildern („von oben“) eine Messung der Dächer erfolgt und ausgehend von dem GIS („von unten“) wie oben beschrieben das aufsteigende Mauerwerk sowie eventuelle Hypothesen über den Dachtyp einbezogen werden. So ist es auch möglich, die Unterschiede zwischen Dachtraufen und Gebäudeumriß zu

modellieren. Die Kombination beider Verfahren setzt aber hohe Anforderungen an die Bezugssysteme, d. h. die Grundrißinformation aus dem GIS und die Dachinformation aus den Luftbildern müssen ein gemeinsames Koordinatensystem aufweisen, um eine Verschmelzung beider Informationen zu ermöglichen.

Als Textur wird je nach Visualisierungsmaßstab entweder ein Orthophoto auf das gesamte dreiecksvermaschte Modell projiziert, oder man verwendet ein 3D-Fotomodell. Das Orthophoto kann auch hier über das Geländemodell gelegt werden. Für die einzelnen Flächen des Gebäudemodells sind aber individuelle Fototexturen zu verwenden.

Bei dem von [TÖNJES 1997] präsentierten Ansatz wird das wissensbasierte Szeneninterpretationssystem AIDA⁴ genutzt, welches für die Interpretation von Bildern konzipiert wurde. Das Vorwissen über die zu extrahierenden Objekte und deren Beziehungen zu den Merkmalen im GIS und den Merkmalen in den Luftbildern wird dabei explizit in einem semantischen Netz formuliert. Neben den Luftbildern nutzt AIDA das digitale Landschaftsmodell ATKIS DLM25/1 ([ADV 1989, 1995]), welches sowohl Semantik als auch Geometrie der enthaltenen Objekte liefert.

Der Rekonstruktionsprozeß unterteilt sich auch hier im Wesentlichen in zwei Schritte. Im ersten Schritt wird aus den im GIS enthaltenen Informationen eine vorläufige Szenenbeschreibung abgeleitet, und im zweiten Schritt wird diese Beschreibung anhand der Luftbilder verifiziert. Hierzu erfolgt wieder eine Merkmalsextraktion und eine Gruppierung der Merkmale zu einer symbolischen Beschreibung der beobachteten Szene.

Eine aus einer Stereozuordnung abgeleitete Höhenkarte hilft dabei, die 3D-Geometrie des Objekts durch ein Oberflächenmodell anzunähern. Als Rekonstruktionsergebnis erhält man Modelle der Gebäude, welche durch Polygone für jede Fläche angenähert werden. Das Luftbild wird anschließend auf die Polygonoberflächen projiziert und als Textur gespeichert.

Strategie

- Extraktion des 2D-Grundrisses aus einem GIS oder einer digitalen Karte
- Aufstellen von Hypothesen über Höhe, Dachtyp etc., z. B. anhand der Textinformation des GIS
- Extraktion der 2D-Kanten aus den Luftbildern
- Ermittlung der 3D-Kanten durch Stereozuordnung
- Verifizierung des Ergebnisses durch Vergleich zwischen den 3D-Kanten und dem durch Hypothesen erhaltenen Modell

⁴Automatic Image Data Analyzer, <http://www.tnt.uni-hannover.de/soft/tnt/aida/>

4.2.3 Stereo-Luftbilder

Stützt man sich bei der Gebäuderekonstruktion hauptsächlich auf eine Stereobildauswertung, unterscheidet man zwischen binokularen und multiokularen Ansätzen. Binokulare Ansätze nehmen eine Auswertung eines Stereobildpaares vor, während die multiokularen Ansätze einen Bildverband, also viele sich überlappende Bilder, auswerten. Im folgenden werden verschiedene Ansätze vorgestellt, welche vorwiegend für die Handhabung mehrerer Bilder konzipiert sind. Da es im Bereich der Gebäuderekonstruktion durch Stereobildauswertung sehr unterschiedliche Vorgehensweisen gibt, werden die Ansätze noch folgendermaßen unterteilt:

- Gebäuderekonstruktion durch CSG-Modellierung
- Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten
- Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten unter zusätzlicher Verwendung von Schattenkanten
- Gebäuderekonstruktion durch Punktmessung und Orthophotogenerierung

4.2.3.1 Gebäuderekonstruktion durch CSG-Modellierung

Das an der Universität Bonn⁵ entwickelte „Monokulare Stereo System HASE⁺“ zur Erfassung komplexer 3D-Gebäudebeschreibungen geht von multiplen Ansichten, mindestens aber zwei sich überlappenden Luftbildern aus, deren innere und äußere Orientierung als bekannt angenommen werden. Das System wird als monokular bezeichnet, da für den Operateur keine Stereobetrachtung der Bilder nötig ist. Alle in einem Bild vorgenommenen Aktionen werden automatisch auf die anderen Bilder übertragen.

Das bei [GÜLCH ET AL. 1999],[ENGLERT, GÜLCH 1996] und [GÜLCH 1996] beschriebene System läuft auf UNIX-Arbeitsstationen und bedient sich einer Auswahl an 3D-Primitiven, aus denen komplexere Gebäudebeschreibungen zusammengesetzt werden können (CSG-Modellierung).

Der Prozeß der dreidimensionalen Modellierung spaltet sich in zwei Phasen auf. In einem ersten Schritt, auch als Navigationsphase bezeichnet, zoomt ein Operateur im Bild auf die Region, die für die Erfassung der 3D-Information von Interesse ist, bzw. begrenzt den Bereich auf ein einzelnes, zu rekonstruierendes Gebäude.

⁵<http://ipb.uni-bonn.de/>

In einem zweiten Schritt, der Modellierungsphase, findet eine semi-automatische Form- und Positionsanpassung der 3D-Modelle statt. Hierbei hat der Operator die Aufgabe, ein passendes Primitiv aus einer Bibliothek auszuwählen. Dieses wird als Drahtgittermodell in den in der Navigationsphase ausgewählten Bildabschnitt projiziert. Mit Hilfe der Maus kann der Operator das Drahtgittermodell auf die korrekte Größe des zu modellierenden Gebäudeteils ziehen.

Sind die eben genannten Schritte für alle Primitive eines Gebäudes erfolgt, erhält man als Ergebnis einen attributierten CSG-Baum für die 3D-Gebäudebeschreibung. In diesem ist festgelegt, wie die einzelnen Primitive miteinander verbunden werden. Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen ist, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die CSG-Bäume für ein Gebäude zu konstruieren, je nachdem, welche Primitive der Nutzer auswählt.

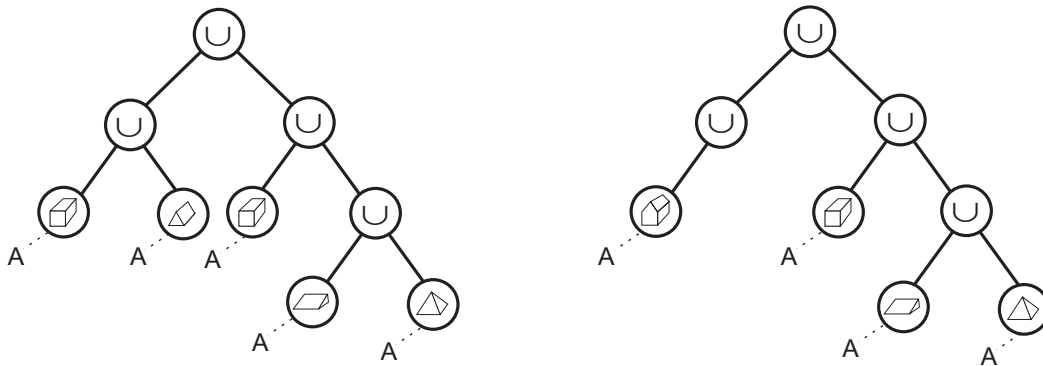


Abbildung 4.5: Zwei unterschiedliche CSG-Bäume für ein Gebäude.

A: den Primitive zugeordnete Attribute

U: Vereinigungsmenge

Während der Anpassung der Primitive an das Bildmaterial stehen dem Operateur verschiedene Werkzeuge zur Verfügung. Die Adaption wird in allen Bildern gleichzeitig überwacht, die Parameter und die 3D-Koordinaten werden online angezeigt, der CSG-Baum kann wiedergegeben und editiert werden, der Systemstatus wird angezeigt, und ein 3D-Rendern der kompletten Gebäudebeschreibung ist möglich.

Desweiteren gibt es die Funktion des „Flaggenmast“-Prinzips (Abb. 4.6). Dieses ist eine Hilfe für die Modellierung solcher Gebäudeteile, die keine Berührung mit dem Boden aufweisen, also komplexe Dachstrukturen, Balkone etc. Um die Positionierung der Primitive in der beabsichtigten Höhe zu ermöglichen, wird jedes Primitiv, außer den bereits kombinierten Primitiven, mit einem Masten versehen. An diesem kann es durch den Operateur auf- und abbewegt werden, um die Höhe einzustellen. Es ist keine weitere Messung homologer Punkte nötig.

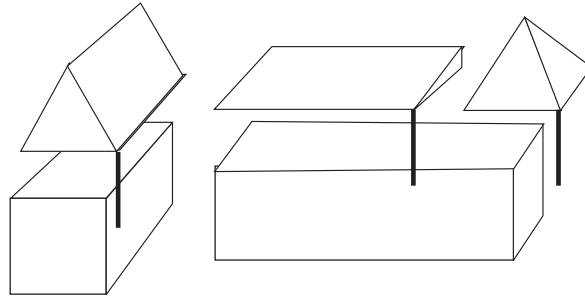


Abbildung 4.6: „Flaggenmast“-Prinzip

Ein weiteres Hilfsmittel bei der Modellierung komplexer Gebäude aus 3D-Primitiven ist das automatische Zuordnen und Verbinden von Gebäudeteilen (Abb. 4.7). Hier werden zwei Flächen verschiedener Primitive „zusammengeklebt“, wenn sie beide innerhalb eines durch den Nutzer festgelegten Radius geraten.

Beide Verfahren, das „Flaggenmast“-Prinzip sowie das automatische Verbinden der einzelnen Primitive, machen eine komfortable Zusammenfügung der 3D-Primitive zu einem kompletten Gebäude möglich.

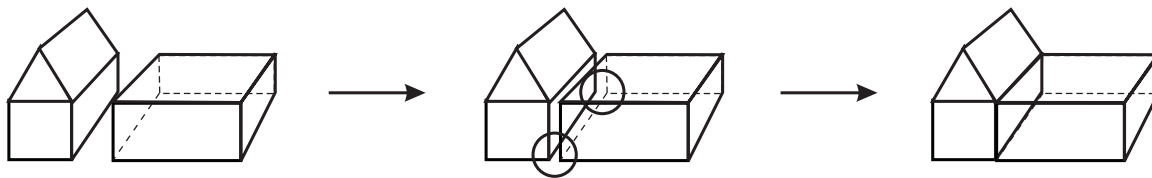


Abbildung 4.7: Automatisches Zuordnen und Verbinden einzelner Gebäudeteile

Der so erhaltene CSG-Baum kann noch erweitert werden. Durch einen Mausklick auf ein spezielles Primitiv innerhalb des CSG-Baumes kann der Gebäudebeschreibung Wissen über zusätzliche Attribute (Gauß-Krüger Koordinaten, Höhe der Dachtraufen etc.) hinzugefügt werden. Für eine weitere Analyse der Daten sowie für die Visualisierung der rekonstruierten Modelle wird eine BRep-Darstellung abgeleitet.

Für ein Testgebiet wurden beispielsweise Luftbilder im Maßstab 1:12 000 mit einer Bodenaufösung von 15 cm gescannt und nach der hier vorgestellten Methode ausgewertet. Die benötigte Zeit pro rekonstruiertem Gebäude belief sich auf ca. 90 s. Diese enthalten sowohl die benötigte Zeit für die Navigationsphase als auch für die Modellierungsphase. Die Genauigkeit betrug ca. 25 cm in der Lage und 35 cm in der Höhe. Dies korrespondiert in etwa mit der Genauigkeit analytischer, photogrammetrischer Methoden.

Ein Vorteil des Systems besteht darin, daß jede gewünschte Detailstufe modellierbar ist. Es ist dem Operateur überlassen, welche Teile eines Gebäudes er rekonstruiert. Desweiteren ist das Verfahren unkompliziert in der Anwendung und demnach auch für ungeübte Anwender schnell lernbar. Es handelt sich um eine schnelle und zuverlässige Methode zur 3D-Objektrekonstruktion, wobei nicht nur Gebäude, sondern auch komplette 3D-Szenen inklusive Straßen oder Vegetation modelliert werden können. Dafür hat man im Gegensatz zu einigen anderen Methoden einen gewissen manuellen Aufwand.

Strategie

- Navigationsphase, d. h. Eingrenzung des Gebietes, in dem sich das zu rekonstruierende Gebäude befindet, durch Zoomen.
- Modellierungsphase, d. h. semi-automatische Auswahl und Anpassung einzelner 3D-Primitive an das Bildmaterial.
- Eventuelles Vergeben zusätzlicher Attribute

4.2.3.2 Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten

Ein anderer Ansatz zur Rekonstruktion der Gebäude, welcher von mehreren Bildern verschiedener Blickwinkel ausgeht, wird bei [STILLA, JURKIEWICZ 1996] und [STILLA ET AL. 1997] beschrieben. Der Vorteil der Verwendung vieler sich überlappender Bilder liegt in der Redundanz der Daten. Liegen Objektpunkte in mehreren Bildern vor, können Störungen (verursacht z. B. durch Bildrauschen) durch Mittelbildung vermindert werden. Manche Objektpunkte sind aufgrund von Verdeckungen oder Belichtungsunterschieden nicht in jedem Bild sichtbar. Dies stellt kein Problem dar, wenn die Objektpunkte wenigstens in zwei Bildern zu erkennen sind. Der Nachteil einer multiokularen Rekonstruktion liegt in dem erhöhten Rechenaufwand.

Der hier vorgestellte Ansatz arbeitet mit einem modellgesteuerten, in einem Produktionsnetz (*Production net*) beschriebenen Konzept. Ein Produktionssystem besteht aus einer Datenbasis, einem Satz von Produktionsregeln und einer Kontrolleinheit. Die Kontrolleinheit wählt die anzuwendenden Produktionsregeln aus, welche das Wissen über die Objektstrukturen beschreiben. Das Produktionsnetz beschreibt hierarchisch z. B. die „Teil_von“-Relationen zwischen Objektkonzepten. Objektkonzepte stehen für bestimmte Objekttypen und bilden einen Rahmen für konkrete Objekte, welche durch

ihre speziellen Parameter beschrieben werden. Das Netz geht von den einfachen Objekten (z. B. Linien) aus und setzt Schritt für Schritt komplexere Objekte (z. B. Rechtecke) durch Anwendung der Produktionen zusammen. Die einzelnen Produktionen (*productions*) definieren, wie ein gegebener Parametersatz in einen Satz komplexer Objekte transformiert wird. Die Objekte werden auf geometrische, topologische und weitere strukturelle Beziehungen untersucht, und es werden neue Objekte aufgrund der untersuchten Relationen gebildet. Abbildung 4.8 zeigt ein Beispiel eines Produktionsnetzes für die Bildanalyse eines parametrischen Modells.

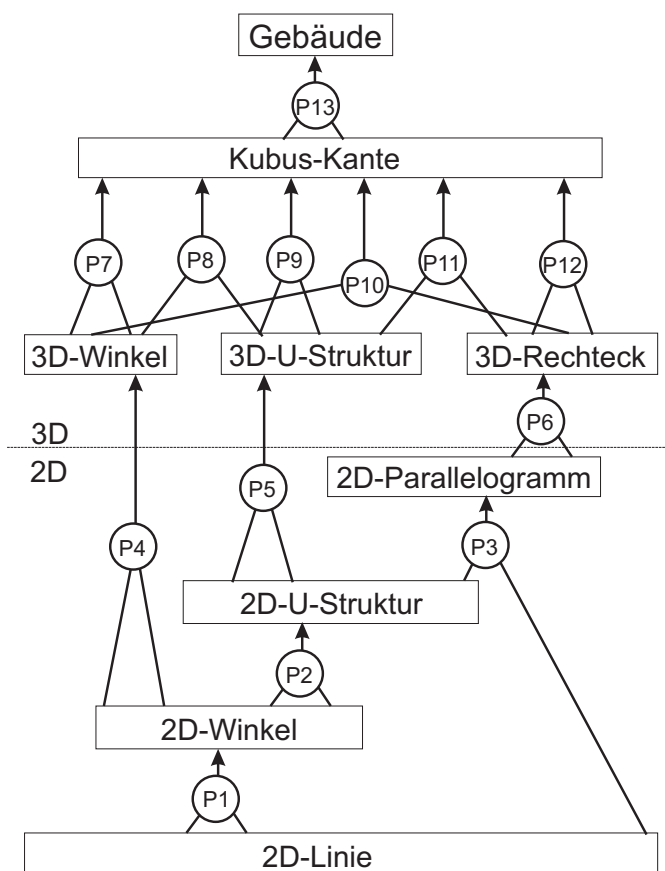


Abbildung 4.8: Produktionsnetz für die Bildanalyse, P: Produktion

Das hier beschriebene Verfahren zur Gebäuderekonstruktion beginnt mit einer Transferrierung des Bildes in eine Sequenz von Binärbildern mit verschiedenen Schwellwerten. Die durch kurze, gerade Linien angenäherten Konturlinien der Segmente werden verlängert und als primitives Objekt „Linie“ abgespeichert. In einem nächsten Schritt erfolgt für jedes Bild unabhängig eine 2D-Analyse. Linienförmige Objekte bilden Ecken, aus diesen werden U-förmige Objekte und schließlich Parallelogramme gebildet.

Nun muß in einer 3D-Analyse durch Stereotriangulation versucht werden, in zwei verschiedenen Bildern Paare von 2D-Objekten zu finden, welche Projektionen der gleichen 3D-Struktur sind. Liegt der Abstand zwischen den zurückverfolgten Strahlen zweier Knoten unter einem vorgegebenen Schwellwert, werden die 2D-Objekte als korrespondierend eingestuft. Der Schwellwert ist nötig, da durch Fehlereinflüsse (z. B. Bildrauschen oder fehlerhafte Kameraparameter) keine exakt übereinstimmenden Koordinaten berechnet werden können. Korrespondieren 2D-Objekte in zwei verschiedenen Bildern, werden 3D-Objekte generiert.

Hat man zwei 3D-Rechtecke, deren Oberflächennormalen einen rechten Winkel einschließen und die so positioniert sind, daß ihre Kanten benachbart sind, wird als Zielobjekt ein Objekt „Kubuskante“ generiert. Für andere Kombinationen wird gleich vorgegangen. Eine Auswahl an möglichen Kombinationen ist in Abbildung 4.9 zu sehen.

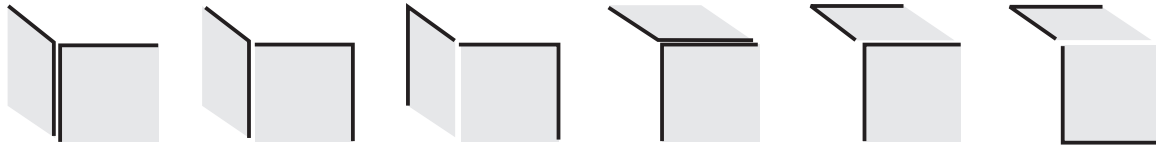


Abbildung 4.9: Kombination von 3D-Winkel-Objekten zu Kubuskanten

Die Positionen der Knoten passen nicht hundertprozentig zusammen. Die Abweichungen werden als Attribut für das Objekt „Kubuskante“ abgespeichert. Setzt man die „Kubuskante“ aus komplexeren Objekten (z. B. 3D-Rechtecken) zusammen, ergibt dies eine bessere Schätzung als bei einfachen Objekten (z. B. 3D-Winkel).

Im 3D-Raum gibt es Orte an denen sich die Objekte „Kubuskante“ häufen. Mit Hilfe der genannten Abweichungen und Schätzungen werden diese Cluster bewertet, und ein Objekt „Gebäude“ wird generiert.

Auch hier werden die aus den Bildern abgeleiteten Informationen daraufhin überprüft, ob sie einem bestimmten Modell angepaßt werden können, hier einem kubusförmigen Gebäudetyp.

Zusätzlich zu der Bildanalyse können auch andere Informationen, wie die in einem GIS oder einer Karte enthaltenen Informationen, z. B. über den Grundriß, zur Unterstützung eingesetzt werden. Um die aus den Bildern gewonnenen Informationen mit den Informationen vergleichen zu können, die sich aus einer Karte ableiten lassen, ist eine hierarchische Beschreibung der Karteninhalte erforderlich. Man nutzt hierfür sowohl parametrische als auch strukturelle Modelle. Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben,

sind bei parametrischen Modellen die topologischen Relationen sowie die Anzahl der Teile fest, und nur die geometrischen Werte sind variabel. Es steht nur eine beschränkte Auswahl an vorgefertigten Modellen zur Auswahl. Strukturelle Modelle sind im Gegensatz dazu frei in der Anzahl der Teile.

Die Aufgabe der Kartenanalyse liegt in der Separierung der einzelnen Gebäudeteile, dem Feststellen von eingeschlossenen Flächen und dem anschließenden Gruppieren der Gebäudeteile. Abbildung 4.10 zeigt einen Teil eines Produktionsnetzes eines strukturellen Modells, in welchem die topologischen Beziehungen Berührung, Nähe und Beinhaltung von Flächen untersucht werden. Es werden die Objekte „Gebäude“ aus den Konturen gebildet, welche nicht innerhalb anderer Konturen liegen und selbst auch keine anderen enthalten. Das strukturelle Modell stellt demnach fest, daß ein geschlossenes Polygon vorliegt, welches weder andere Polygone enthält, noch selbst in einem anderen Polygon enthalten ist.

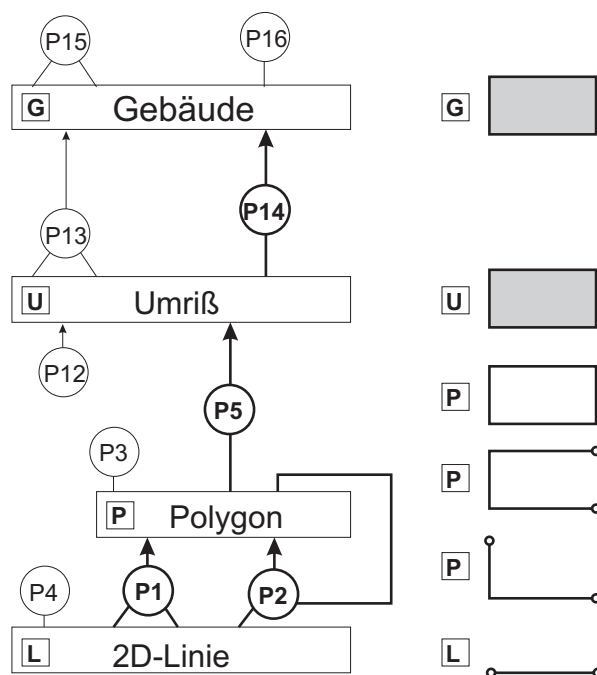


Abbildung 4.10: Produktionsnetz für die Kartenanalyse, strukturelles Modell, P: Produktion

Das parametrische Modell trifft eine Aussage über die Form des Objekts. In dem in Abbildung 4.11 beschriebenen Produktionsnetz einer Kartenanalyse mit parametrischem Modell läßt sich beispielsweise feststellen, ob es sich bei dem Grundriß um ein einfaches, geschlossenes Rechteck oder um ein Rechteck mit einer offenen Ecke handelt.

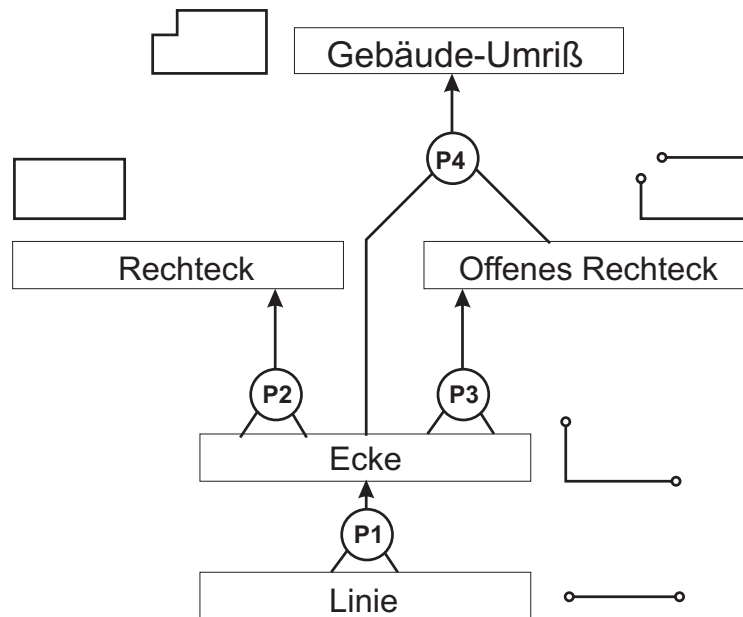


Abbildung 4.11: Produktionsnetz für die Kartenanalyse, parametrisches Modell, P: Produktion

Für eine Verifizierung der Auswertung wird das Ergebnis aus der Bildanalyse mit dem Ergebnis der Kartenanalyse verglichen.

Strategie

- Bildanalyse aus Luftbildern mehrerer Blickwinkel
 - Kantenextraktion
 - Konstruktion einfacher 2D-Strukturen
 - Berechnung der räumlichen Position der einfachen 2D-Strukturen durch Stereozuordnung
 - Konstruktion der 3D-Strukturen
- Kartenanalyse
 - hierarchische Beschreibung des Karteninhalts in einem strukturellen Modell zur Topologie-Prüfung
 - hierarchische Beschreibung des Karteninhalts in einem parametrischen Modell zur Festlegung der Form
- Verifizierung durch einen Vergleich der Ergebnisse aus beiden Analysen

4.2.3.3 Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten unter zusätzlicher Verwendung von Schattenkanten

Der im folgenden vorgestellte Ansatz von [SAHAR, KRUPNIK 1997] nutzt die im Luftbild auftretenden Schatten als Identifikationshilfe für die Gebäudedetektion.

Schatten können dazu beitragen, die im Bild zweidimensional repräsentierten 3D-Objekte von 2D-Objekten zu unterscheiden, da nur die Objekte Schatten werfen, welche aus der Ebene hervortreten. Die Identifikation von Schatten ist außerdem nützlich, um eine Verwechslung zwischen Schatten und Objekt zu vermeiden.

Der erste Schritt des hier beschriebenen Ansatzes beinhaltet das sogenannte *Preprocessing*. Dieses enthält eine als *Image patch extraction* bezeichnete manuelle Auswahl des zu bearbeitenden Ausschnitts, welches nur ein Gebäude enthält. In dem ausgewählten Gebiet werden die dunklen Schattenregionen z. B. durch eine überwachte Klassifikation erkannt. Zusätzlich zu der Extraktion der Schattenkanten erfolgt eine weitere Kantenextraktion für alle sonstigen Linienmerkmale. Die Kanten werden in gerade Linien gruppiert und segmentiert, welche durch ihre Länge, Dicke, Endpunkte und Orientierung charakterisiert werden. In einem zweiten Schritt erfolgt mit Hilfe der vorher extrahierten Linienelemente ein monoskopischer Prozeß, d.h. ein Prozeß, welcher die einzelnen Bilder ohne Stereozuordnung nutzt. Hier werden unwichtige Kanten aufgrund ihrer Länge und Dicke eliminiert. Die topologischen Relationen zwischen den Kantensegmenten (Parallelität, Orthogonalität und Nachbarschaft) werden definiert. Aus benachbarten, orthogonalen Linien werden Ecken gebildet. Diese werden zu sogenannten Ketten (*chains*) gruppiert, bei denen es sich um Paare oder Triplets handeln kann. Paare oder Triplets, die aufgrund ihrer Relationen kein Rechteck miteinander bilden können (siehe Abbildung 4.12), werden von der Auswahl ausgeschlossen.

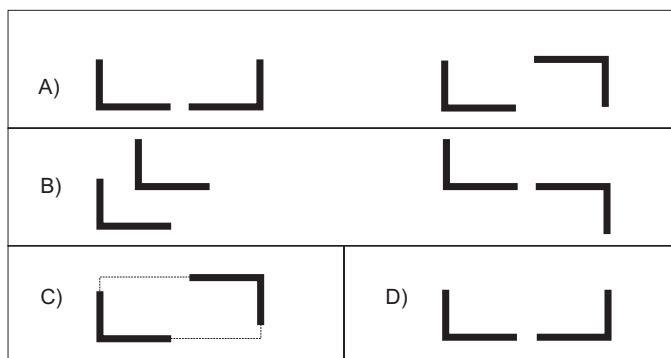


Abbildung 4.12: A) Eine Gruppierung der Ecken zu Ketten ist möglich, B) Die Ecken werden nicht gruppiert, C) Die Verschneidung der Linien zu einem Rechteck ist möglich, D) Die Verschneidung der Linien zu einem Rechteck ist erst im Stereoprozeß möglich

Um die durch Schatten gebildeten Kanten zu eliminieren, werden die beiden Kantenbilder, also das der allgemeinen Kanten und das der Schattenkanten, in einem Zuordnungsprozeß verglichen und idealerweise voneinander abgezogen. Diagonal liegende Ecken, die ein Rechteck bilden können, kann man schon in diesem Schritt verschneiden und die fehlenden Ecken hinzufügen. Alle anderen Ecken-Konstellationen können erst in einem weiteren, stereoskopischen Schritt zu Rechtecken verschmolzen werden.

Im stereoskopischen Prozeß werden die im monoskopischen Prozeß gewonnenen Ketten, welche für jedes Bild verschiedenen sind, näher untersucht. Es wird festgelegt, welche Ecke des linken Bildes mit welcher Ecke des rechten Bildes kompatibel ist. Erkannte Ecken werden je nach ihrer Position in der Kette benannt. Die Ecke mit dem Label „1“ des einen Bildes wird einer Ecke des gleichen Labels aus einem anderen Bild zugeordnet. Anschließend werden die 3D-Koordinaten berechnet. Falls verschiedene Ecken mit dem gleichen Label existieren, werden alle möglichen Kombinationen geprüft. Für gewöhnlich sind die Möglichkeiten in diesem Stadium der Auswertung aber schon sehr beschränkt.

Mit Hilfe der Stereo-Information und diversen geometrischen Zwängen werden die fehlenden Ecken hinzugefügt, welche im monoskopischen Prozeß noch nicht ermittelt werden konnten, da nur benachbarte Ecken eines Rechtecks in den Bildern entdeckt wurden.

Um die richtigen Gebäudekonturen auszuwählen, wird angenommen, daß alle Ecken am Rand eines Daches die gleiche Höhe besitzen. Außerdem werden den Konturen mit Hilfe von bestimmten Kriterien verschiedene Prioritäten zugewiesen. Diese Kriterien richten sich unter anderem nach:

- dem Typ der Ecken
(eine L-Ecke hat eine höhere Priorität als eine T-Ecke)
- dem Abstand der Linienenden der Ecken zueinander
- der Kantenbedeckung zwischen den Ecken
- der Eckenkonfiguration im zweidimensionalen Fall
(ein benachbartes Linienpaar hat eine höhere Priorität als ein Paar an der Diagonalen)
- der Rechtwinkligkeit der 3D-Gebäudeumrisse
- den Höhenunterschieden zwischen den Ecken

In einem letzten Schritt wird eine Ausgleichung vorgenommen, so daß leicht abweichende Ecken auf ein ebenes Rechteck gezwungen werden.

Tests haben ergeben, daß 80% der Ecken nur um höchstens 20 cm von den manuell gemessenen Ecken des gleichen Testgebiets abweichen. 50% weichen sogar nur um 10 cm ab.

Für eine effektivere Rekonstruktion sind verschiedene Erweiterungen geplant. So soll auch eine Rekonstruktion komplexerer Modelle mit diesem Ansatz ermöglicht werden. Um die manuelle Image patch extraction einzusparen, ist eine automatische Detektion der Gebäude angestrebt. Außerdem werden die Ergebnisse bisher nicht wieder zurück in die Bilder projiziert. Zur Genauigkeitssteigerung wäre dies aber wünschenswert.

Strategie

Es handelt sich um eine semi-automatische Gebäuderekonstruktion, die mit Hilfe von Schattenkanten aus Stereobildern die 3D-Gebäudekonturen ermittelt. Bis auf die Image patch extraction läuft der Prozeß automatisch ab. Der Ansatz beschreibt eine Methode zur Gebäuderekonstruktion mit instruktiver Interaktion, deren einzelne Schritte folgendermaßen zusammengefaßt werden können:

- Vorbereitung der Bilder (Preprozessing)
 - Auswahl des Bildausschnitts für das gewünschte Gebäude
 - Schattenkantenextraktion
 - allgemeine Kantenextraktion
 - Vergleich zwischen Schattenkanten und allgemeinen Kanten
- Monoskopischer Prozeß:
 - Gruppierung der Kanten zu Ecken
 - Kettenbildung im zweidimensionalen Fall
- Stereoskopischer Prozeß:
 - Ermittlung der 3D-Umrise durch Stereozuordnung
 - Auswahl der bestpassenden Umrise aufgrund vordefinierter Kriterien
- Ausgleichung, um die 3D-Konturen auf plane Rechtecke einzupassen.

4.2.3.4 Gebäuderekonstruktion durch Punktmessung und Orthophotogenerierung

[GURETZKI, EHRHARDT 1996] von der Firma Phoenix GmbH⁶ verwenden für ihre Gebäuderekonstruktion Bildverbände. Die aus den Bildern abgeleiteten 3D-Stadtmodelle werden vorwiegend für Funkausbreitungsmodelle sowie für Immissionsmessungen eingesetzt. Als Daten gehen in den Rekonstruktionsprozeß nur die Luftbilder ein. Diese liegen einer stereoskopischen Auswertung zugrunde und dienen der Erstellung von digitalen Orthophotos, aus denen die Gebäudepolygone digitalisiert werden. Es handelt sich demnach um eine Mischform aus der in diesem Abschnitt beschriebenen Gebäuderekonstruktion mittels reiner Stereo-Luftbildauswertung und der in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Kombination von Stereo-Luftbildern mit 2D-Grundrißinformationen.

Für die Rekonstruktion werden Farb-Luftbilder im Maßstab 1:12 500 durch Befliegung gewonnen. Mit Hilfe des an der Universität Hannover entwickelten Bündelblockauswertungssystems BLUH erfolgt eine analytische Aerotriangulation zur Orientierung der Stereomodelle des Bildverbandes. Auf dem Gebiet der digitalen Stereo-Photogrammetrie sind Programme zur vollautomatischen Triangulation von Bildverbänden in der Entwicklung. Haben sich diese auch für besiedelte Gebiete als operabel erwiesen, läßt sich die analytische Punktbestimmung durch eine digitale Triangulation ersetzen.

Die Luftbilder werden mit einer Auflösung von 1 000 dpi ($\approx 25\mu\text{m}$) gescannt. Ein Pixel entspricht dann ca. 32 cm am Boden. Um Farborthophotos zu produzieren, wird jedes zweite Bild in drei Kanälen gescannt.

Für das DGM und das DHM wird ein Gitter mit der Gitterweite von einem Meter automatisch generiert. Mit Hilfe der automatischen Bildkorrelation ist dabei eine Berechnung von 200 Punkten pro Sekunde möglich. Das Geländemodell (DGM) wird durch einen speziell dafür entwickelten Prozeß berechnet. Für die Ableitung des Gebäudehöhenmodells wird zu dem ursprünglichen Modell zurückgekehrt.

Durch die regelmäßige Gitterweite werden scharfe Kanten nicht optimal wiedergegeben, sondern interpoliert. Dank der hohen Punktdichte ist die Darstellung des Geländes aber trotzdem recht detailreich. Die Datenspeicherung und -verwaltung der Gittermodelle erfolgt mit dem Programm ERDAS/IMAGINE.

Unter Verwendung einer generalisierten Form des Geländemodells und der von der Firma Autometric entwickelten Software *OrthoMax* wird das Orthophoto mit einer Bodenauflösung von 30-35 cm pro Pixel bei einem Maßstab von 1:25 000 generiert. Bei der Zusammensetzung der einzelnen Orthophotos zu einem Ganzen (Mosaikbildung),

⁶<http://www.phoenix.de>

erfolgt eine radiometrische Anpassung an den Rändern der einzelnen Bilder, um harte Übergänge zu vermeiden. Aus dem so entstandenen Orthophoto werden die 2D-Gebäudeumrisse, unter Nutzung der Software *Arcview* der Firma ESRI, am Bildschirm digitalisiert (*Onscreen-Digitizing*). Während der Digitalisierung findet eine Referenz zu den Daten des DHM statt. Dadurch wird eine Messung im Stereomodell unnötig.

Schließlich erfolgt eine Verschmelzung der Gebäudepolygone mit den zugeordneten Höhen. Dieser Vorgang wird durch Programme des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover (IPI) und der Firma Phoenix GmbH automatisiert. Die Höhendaten werden durch analytische Referenzmessungen verifiziert.

Man erhält eine Genauigkeit der Rekonstruktion von 1,5 m in der Lage und 1 m in der Höhe. Die Vektordaten in Form von geschlossenen, attribuierten Polygonen können unter anderem in den Formaten ARC/INFO exportformat, DXF oder ASCII ausgegeben werden. Die Rasterdateien der Gebäude und das Geländemodell können mit einer Farbtiefe von 16 Bit und einer Gitterweite von wahlweise einem oder fünf Metern in den Formaten IMAGINE, GRID, TIFF, SUN-Raster oder anderen üblichen Formaten ausgegeben werden.

Im Gegensatz zu anderen Vorgehensweisen ist dieser Ansatz mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden (analytische Auswertung, Digitalisierung der Grundrisse).

Strategie

- analytische Aerotriangulation
- digitale Stereozuordnung zur DGM- und DHM-Generierung
- Orthophotogenerierung
- Digitalisierung der Gebäudegrundrisse aus dem Orthophoto
- Kombination der Gebäudegrundrisse mit den Höhendaten des DHM
- Verifizierung der Höhendaten durch analytische Messung

5

Geometrische Generalisierung

Graphische Bilddarstellungen können durch eine große darzustellende Polygonanzahl und durch Verwendung von Fototexturen je nach Rechnerleistung beschränkt sein. Um die Echtzeitbegehung einer virtuellen Szene, z. B. eines 3D-Stadtmodells, auch wirklich in Echtzeit zu ermöglichen, ist eine unterschiedliche Detaildarstellung der abzubildenden Objekte je nach Entfernung vorteilhaft.

Ist ein Gebäude weit vom Betrachter entfernt, so daß kaum noch die genaue Form erkennbar ist, stellen Kleinformen wie Erker nur überflüssige Objektteile dar, die die Geschwindigkeit aber stark belasten. Gleiches gilt für Fototexturen.

Strebt man bei der Generierung von 3D-Stadtmodellen eine Detailabstufung der Gebäude an, stellt sich die Frage, wie diese umzusetzen ist. Es bietet sich an, einen Blick auf übliche Verfahren zu werfen, wie sie z. B. auf dem Gebiet der Computerspiele realisiert werden, denn auch in der Spieltechnologie spielt eine flexible Abstufung in der Darstellung von Details je nach Entfernung eine große Rolle.

Kommerzielle Spiele stellen eine treibende Kraft für die Entwicklung neuer Software dar. Die Herausforderung dabei ist eine wachsende Anzahl an sichtbaren Objekten und gleichzeitig ein immer größer werdender Anspruch an die Realitätsnähe. Für eine flüssige Darstellung einer bewegten Szene sind mindestens 20 Bilder pro Sekunde zu realisieren. Die Geschwindigkeit, mit der ein Bild aufgebaut werden kann ist von der Anzahl der darzustellenden Polygone sowie von der Leistungsfähigkeit des Computers abhängig. Je nach Graphikkarte und Prozessorleistung ist demnach eine unterschiedliche Anzahl an Polygonen möglich.

Eine gängige Lösung, den Detailreichtum mit zunehmender Entfernung vom Betrachtungsstandpunkt zu reduzieren, ist der *Level of Detail (LoD)*. Hier wird nach einer vorgegebenen Entfernung von einem detailreichen Objekt auf eine weniger detaillierte Darstellung umgesprungen. Dieses sprunghafte Wechseln der Darstellung, auch als *Object Popping* bezeichnet, kann den visuellen Eindruck beeinträchtigen.

Die Spieleindustrie beschäftigt sich deshalb, und auch um eine optimale Anpassung eines Spieles an die jeweilige Rechnerleistung zu gewährleisten, mit alternativen Techniken zur Polygonreduzierung. Diese bei [BERTUCH 2000] genannten Verfahren sind zum Teil noch in der Entwicklung. Auf dem Gebiet der 3D-Stadtmodell-Visualisierung wird man sich noch eine Weile mit der LoD-Technik begnügen müssen. Das Hauptproblem bei Computerspielen liegt in der wirklichkeitsnahen Darstellung polygonreicher Spielfiguren. Bei 3D-Stadtmodellen handelt es sich aber um statische Objekte mit einer geringeren zu reduzierenden Polygonanzahl. Die Wirkung des Object Poppings wird daher als nicht ganz so störend empfunden.

Um die LoD-Technik auf die 3D-Stadtmodelle, insbesondere auf die darin befindlichen Gebäude, anzuwenden, ist es sinnvoll, verschiedene Detailstufen festzulegen. [KLAUS 1997] unterscheidet beispielsweise drei Detailgrade für Gebäudemodelle:

- Basismodell:
Beim Basismodell werden die Gebäude durch einfache Quader ohne spezielle Dachform repräsentiert. Es werden demnach alle Gebäude als Flachdachbauten dargestellt.
- Blockmodell:
Den Quadern, welche die Gebäude repräsentieren, werden beim Blockmodell die realen Dachformen hinzugefügt. Die Anzahl der Dachformen, die dabei zur Auswahl stehen, ist für gewöhnlich beschränkt.
- Detailmodell:
Beim Detailmodell erfolgt eine Darstellung der Gebäude mit realer Dachform sowie der wichtigsten Details wie Erker oder Balkone. Die benötigten Details werden entweder geometrisch modelliert und mit einer synthetischen Textur versehen oder durch eine Fototextur wiedergegeben.

Navigiert man in der modellierten Szene nah an ein Gebäude heran, möchte man dieses in der höchsten verfügbaren Detailstufe erkennen. Stehen Fototexturen oder geometrische Feinheiten zur Verfügung, wählt man das Detailmodell.

Entfernt sich das Objekt vom Betrachtungsstandpunkt (siehe Abbildung 5.1), springt die Darstellung auf das Blockmodell um, indem die geometrisch modellierten Kleinformen wegfallen bzw. die Fototextur auf eine weniger auflösende, also weniger Speicher in Anspruch nehmende Textur umspringt.

Schwindet das Objekt schon fast aus dem Blickfeld, ist auch die Dachform nicht mehr von Bedeutung, und eine Fototextur wird überflüssig. Die Darstellung erfolgt in Form des Basismodells, in welchem die Gebäude durch Blöcke mit einer einfachen Flächenfarbe repräsentiert werden. Bei der Flächenfarbe sollte darauf geachtet werden, daß sie in das Stadtbild paßt.

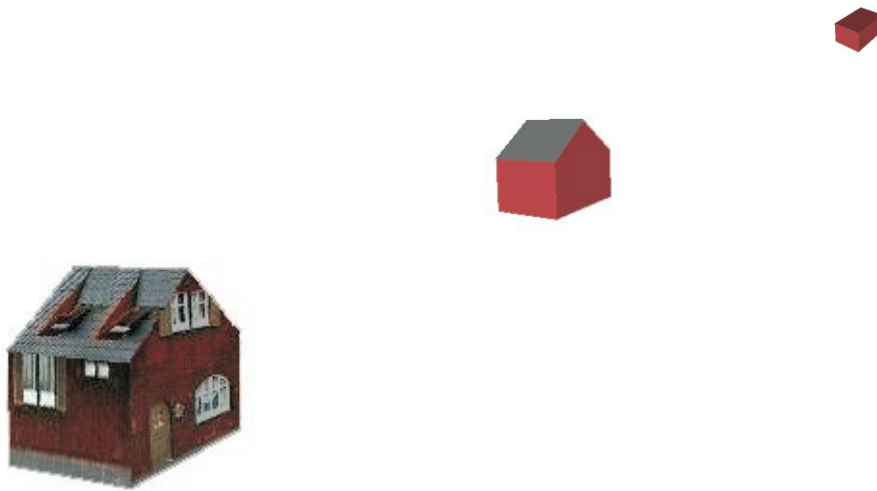


Abbildung 5.1: Unterschiedliche Detailstufen je nach Entfernung mit fototexturiertem Detailmodell (Beispiel mit geometrisch modelliertem Detailmodell siehe Titelbild)

Um die drei verschiedenen Detailstufen zu realisieren, müssen drei verschiedene Modelle vorgehalten werden. Da der manuelle Aufwand dafür möglichst gering gehalten werden soll, ist eine Automatisierung der Generalisierung von einem Modell zu einem weniger detailreichen Modell wünschenswert.

Liegt der Unterschied zwischen den Detailstufen statt in der geometrischen Modellierung in der Textur, bietet es sich an, das als Textur verwendete Bild für die einzelnen Detailstufen in verschiedenen Auflösungen abzuspeichern (sogenannte *Bildpyramide*, siehe Abbildung 5.2). Dadurch entsteht ein sanfter Übergang beim Wechseln der Darstellung. Eine Möglichkeit zur Automatisierung solch einer Texturgeneralisierung liegt in der automatischen Ableitung der weniger auflösenden Fotos aus einem Foto mit hoher Auflösung.



Abbildung 5.2: Beispiel einer Bildpyramide

Die in Kapitel 4 beschriebenen Ansätze liefern häufig keine geometrisch detaillierten Modelle. Eine durch die LoD-Technik abgestufte Darstellung ist daher nur bei wenigen Ansätzen sinnvoll einzusetzen. Ist das Ergebnis der Rekonstruktion nur ein Block- oder Basismodell, ist auf eine nach geometrischen Details abgestufte Darstellung zu verzichten. Lediglich eine Texturgeneralisierung, wie sie oben beschrieben wurde, ist denkbar.

Verschiedene Überlegungen im Rahmen dieser Arbeit haben zu einem weiteren Vorschlag zur Automation geführt, diesmal im Bereich der geometrischen Generalisierung. Die grundlegende Idee dabei ist die Vergabe von Attributen für die einzelnen Primitive. Die Attribute werden bei der Modellierung vergeben und bestimmen, bis zu welchem Detailgrad das jeweilige Primitiv dargestellt wird. Für eine automatische Ableitung der weniger detailreichen Modelle aus dem einmalig erfassten Detailmodell müßte ein entsprechender Algorithmus entwickelt werden.

Von den vorgestellten Methoden zur Gebäuderekonstruktion eignen sich nur zwei Ansätze für eine geometrische Detailabstufung, der in Abschnitt 4.1.1 beschriebene **Cyber-City-Modeler** und das in Abschnitt 4.2.3.1 vorgestellte System **HASE⁺**. Die vorgeschlagene Attributvergabe wäre für beide Systeme unterschiedlich umzusetzen.

Beim **CyberCity-Modeler** werden Punkte gemessen und attributiert. Diese Punkte werden aufgrund ihrer Attribute und topologischen Relationen erst zu Kanten und dann zu Flächen strukturiert, aus denen das Gebäude zusammengesetzt wird.

Die einzige Möglichkeit der Attributvergabe besteht während der Punktmessung. Um verschieden detaillierte Darstellungen der Gebäude zu erhalten, müßte demnach schon jedem einzelnen Punkt ein Attribut zugewiesen werden, das besagt, ob und bis zu welcher Detailstufe er bei einer Generalisierung erhalten bleibt. Der **CyberCity-Modeler** sollte dann in der Lage sein, die unterschiedlich detaillierten Modelle durch eine automatische Strukturierung abzuleiten.

Beim System **HASE⁺** werden 3D-Primitive miteinander verschmolzen. Die Attributvergabe muß also für die schon dreidimensional vorliegenden Objektteile erfolgen. Beim aus der CSG-Modellierung resultierenden CSG-Baum ist die Möglichkeit gegeben, zusätzliche Attribute zu vergeben. Eine Erweiterung dieser Attributliste um weitere, den Detailgrad betreffende Attribute dürfte demnach leicht umzusetzen sein.

Bei beiden Systemen gilt, daß Programme entwickelt werden müssen, welche zum einen die detailarmen Modelle aus den detailreichen ableiten und zum anderen die so gewonnenen Modelle automatisch in eine LoD-Umgebung (z. B. in VRML) einbetten. Hierbei sollte ein Operateur festlegen können, in welcher Entfernung die Repräsentation auf eine weniger detaillierte Darstellung umspringt.

6

Vergleich und Bewertung der Ansätze

Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, die in Kapitel 4 vorgestellten, unterschiedlichen Ansätze zur Gebäuderekonstruktion für die Herstellung von 3D-Stadtmodellen zu bewerten und miteinander zu vergleichen.

Vergleicht man verschiedene Ansätze zur Gebäuderekonstruktion aufgrund einer Literaturrecherche, stößt man auf das Problem, daß keine einheitlichen Regeln für die Beschreibung solcher Ansätze vorhanden sind. Jeder Autor legt bestimmte Schwerpunkte bei seiner Darstellung und geht auf andere Aspekte seiner Rekonstruktionsmethode ein. Die Angaben zur Genauigkeit sind nicht immer auf das gleiche Ergebnis bezogen. Ein Autor gibt die Genauigkeit der individuellen Punktbestimmung an, ein anderer nur die des verwendeten digitalen Geländemodells, ein dritter trifft Aussagen über die Genauigkeit der rekonstruierten Modelle und ein paar verzichten vollkommen auf Angaben zur Genauigkeit.

Während die meisten Autoren mehr oder weniger ausführlich auf die Genauigkeit eingehen, gibt es viele andere interessante Aspekte, z. B. bezüglich benötigtem Zeit-, Kosten- und Personalaufwand, welche nur von wenigen Autoren beschrieben werden.

Wünschenswert wäre eine gewisse Vereinheitlichung bei der Darstellung der Gebäuderekonstruktionsmethoden für 3D-Stadtmodelle. Dann wäre es möglich, die Ansätze umfassend in Beziehung zu setzen. Denkbar wäre z. B. ein Vergleich aufgrund von:

- Grad der geometrischen Generalisierung, Detaillierung
- Grad der Automation, Interaktionsaufwand
- Genauigkeit der Rekonstruktion

- Zuverlässigkeit, Vollständigkeit
- benötigtem Zeit-, Kosten- und Personalaufwand
- benötigter Soft- und Hardware
- Nutzerfreundlichkeit

Da es bisher keine Regeln für die Beschreibung der Gebäuderekonstruktionsansätze gibt, muß sich diese Bewertung auf die wenigen vergleichbaren Elemente beschränken. Sie stützt sich in erster Linie auf die Elemente:

- Grad der geometrischen Generalisierung, Detaillierung
- Grad der Automation, Interaktionsaufwand
- Genauigkeit der Rekonstruktion

Im folgenden werden für die einzelnen in Kapitel 4 beschriebenen Gebäuderekonstruktionsansätze die Vor- und Nachteile zusammengefaßt und bewertet sowie die oben genannten vergleichbaren Elemente der jeweiligen Ansätze hervorgehoben. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen variabler und beschränkter Detaillierung und eine Unterteilung der Automatisierungsgrade in instruktive Interaktion, korrektive Interaktion und vollautomatische Rekonstruktion. Die Genauigkeit wird als „hoch“ bezeichnet, wenn eine Genauigkeit von $\leq 0,5$ m für die Rekonstruktion erreicht wurde. Schlechtere Ergebnisse werden als „niedrig“ eingestuft. Abschließend erfolgt eine allgemeine Bewertung der Ansätze im Hinblick auf die verschiedenen Anwendungen.

6.1 Bewertung des topologiegesteuerten CC-Modelers

Der Vorteil des in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen topologiegesteuerten **CyberCity-Modelers** liegt darin, daß durch die manuelle Punktmessung der Grad der Generalisierung variabel ist. Der CC-Modeler bietet die Möglichkeit auch Kleinformen zu erfassen und ist somit für viele verschiedene Anwendungen geeignet.

Die Genauigkeit der Modellierung wird durch die Genauigkeit der Punktmessung, also in erster Linie durch den Bildmaßstab bestimmt. Für eine Visualisierung der Gebäudemodelle sind verschiedene übliche Ausgabeformate (DXF, VRML u. a.) möglich.

Der Nachteil des CC-Modelers liegt in dem erforderlichen Interaktionsaufwand. Zusätzlich zu einer manuellen Punktmessung ist eine nachträgliche Korrektur des automatischen Prozesses (korrektive Interaktion) nötig. ([GRUEN, WANG 1999]) geben die Fehlerquote ihres automatischen Prozesses mit nur 5 % an. Die Wahrscheinlichkeit, bei einer nachträglichen Korrektur Fehler zu übersehen, ist aber dennoch nicht unerheblich. Die Zuverlässigkeit einer korrektiven Interaktion ist aufgrund der menschlichen Wahrnehmung niedriger als bei einer instruktiven. Ein menschlicher Operateur kann Bilder zuverlässig interpretieren, neigt aber zu Schwächen, wenn es sich um das nachträgliche Entdecken von Fehlern handelt.

Der CC-Modeler folgt einem topologiegesteuerten Ansatz zur semi-automatischen Objektrekonstruktion. Topologiegesteuerte Ansätze machen sich das Wissen über häufig auftretende Eigenschaften künstlicher Objekte wie Symmetrie, vertikale Wände, konstante Höhen der Dachtraufen oder Standarddachtypen nicht zunutze. Im Stereomodell nicht sichtbare Elemente können nicht modelliert werden.

Im Gegensatz dazu besteht in einem modellgesteuerten Ansatz, der mit CSG-Primitiven arbeitet, die Möglichkeit, auch verdeckte Gebäudeteile zu schätzen. Für die Gebäude-rekonstruktion in einem dicht bebauten Gebiet ist daher eine modellgesteuerte Herangehensweise sinnvoller, obwohl der CC-Modeler eine genaue und detaillierte Gebäudebeschreibung liefert.

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: variable Detaillierung
- Grad der Automation: manuelle Punktmessung, korrektive Interaktion
- Genauigkeit der Rekonstruktion: hoch

6.2 Bewertung der modellgesteuerten Ansätze

6.2.1 Bewertung der Kombination von 2D-Grundriß und Laserscanner-DOM

Der in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Ansatz zur Gebäuderekonstruktion kombiniert 2D-Grundrißinformationen mit einem digitalen Oberflächenmodell aus Laserscannermessungen. Der Ansatz zeichnet sich durch eine stark beschränkte Anzahl der möglichen Dachformen aus. Kleinformen wie Erker sind zwar darstellbar, ihre Modellierung erfordert aber einen hohen manuellen Aufwand, da alle Formen, die nicht unmittelbar aus dem Grundriß ableitbar sind, in einem aufwendigen Nachbearbeitungsschritt durch Modifizierung des zugrundeliegenden Grundrisses erfaßt werden müssen.

Es handelt sich demnach ebenfalls um einen Rekonstruktionsansatz mit korrekativer Interaktion, d.h. automatisch erhaltene Modelle müssen manuell korrigiert und erweitert werden.

Aufgrund der Dichte des Laserscanner-Oberflächenmodells können Objekte, welche kleiner als 1 m sind, nicht rekonstruiert werden. Die Genauigkeit ist recht hoch und liegt bei 0,3 m in der Lage und 0,1 m in der Höhe. Die Ausgabe erfolgt in den allgemein üblichen Formaten (DXF, VRML).

Es handelt sich um einen relativ benutzerfreundlichen Ansatz mit hoher Genauigkeit. Der Nachteil dieser Rekonstruktionsmethode liegt aber in einem hohen manuellen Aufwand bei der Modellierung von Kleinformen. Sinnvoll einzusetzen ist der Ansatz daher nur für 3D-Stadtmodelle mit hohem Generalisierungsgrad (Blockmodell).

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: beschränkte Detaillierung
- Grad der Automation: korrektive Interaktion
- Genauigkeit der Rekonstruktion: hoch

6.2.2 Bewertung der Kombination von 2D-Grundriß und Stereo-Luftbildern

Die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Ansätze zur Gebäuderekonstruktion arbeiten mit einem 2D-Grundriß als Basis, einer Reihe von Hypothesen sowie Stereo-Luftbildern zur Verifizierung. Wie die vorher beschriebene Gebäuderekonstruktionsmethode mit 2D-Grundrißinformationen und einem Laserscanner-DOM werden die an dieser Stelle behandelten Ansätze ebenfalls durch eine stark eingeschränkte Auswahl an Dachtypen ausgezeichnet. Um die Bilddaten mit dem 2D-Grundriß zu kombinieren, müssen die Dachoberflächen generalisiert werden.

Dem dadurch stark beschränkten Modell steht eine vollautomatische Rekonstruktion gegenüber, welche zudem eine verhältnismäßig hohe Genauigkeit liefert. ([WOLF 1999]) gibt $\leq 0,5$ m für die totale Höhengenaugkeit seiner Rekonstruktion bei einem Bildmaßstab von 1:13 000 und sogar $\leq 0,3$ m bei einem Bildmaßstab von 1:10 000 an.

Akzeptiert man für einen hohen Grad an Automation (in diesem Fall müssen nur die Bilder vorbereitet werden) eine starke Einschränkung des Detailreichtums, bietet dieser Ansatz eine genaue und preiswerte Gebäuderekonstruktionsmethode für großflächige 3D-Stadtmodelle, da der manuelle Aufwand auf ein Minimum reduziert wird.

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: beschränkte Detaillierung
- Grad der Automation: vollautomatische Rekonstruktion
- Genauigkeit der Rekonstruktion: hoch

6.2.3 Bewertung der auf Stereo-Luftbildern basierenden Ansätze

6.2.3.1 Bewertung der Rekonstruktion durch CSG-Modellierung

Bei dem in Abschnitt 4.2.3.1 vorgestellten „Monokularen Stereo System HASE⁺“ wählt ein Operateur 3D-Primitive aus und paßt diese interaktiv an das Bildmaterial an. Dem manuellen Aufwand, der dadurch entsteht, stehen viele Vorteile gegenüber.

Es ist eine Modellierung aller gewünschten Details möglich. Der Grad der Generalisierung ist je nach den Anforderungen, die der Nutzer stellt, variabel. Trotz hohem manuellen Aufwand handelt es sich um eine sehr schnelle Methode zur Gebäuderekonstruktion, da die nötigen Interaktionen leicht zu handhaben sind. Auch Anwender, die kein photogrammetrisches Vorwissen besitzen, können dieses System bedienen.

([GÜLCH 1996]) gibt eine durchschnittliche Zeit von 90 s pro Gebäude an. Diese werden mit einer Genauigkeit von 0,25 m in der Lage und 0,35 m in der Höhe rekonstruiert. Das entspricht in etwa der Genauigkeit analytischer, photogrammetrischer Methoden. Durch die frühzeitige, instruktive Interaktion erhält man ein sehr zuverlässiges Ergebnis, welches in den üblichen Ausgabeformaten (DXF, VRML) erhältlich ist.

Durch die CSG-Modellierung können auch nicht sichtbare Gebäudeecken geschätzt werden. Ein weiterer Vorteil dieses Systems liegt darin, daß das System nicht nur auf die Rekonstruktion von Gebäuden beschränkt ist. Durch die Kombination verschiedener Primitive können auch andere Objekte, wie Straßen oder Vegetation, modelliert werden. Dieses eine System ist demnach ausreichend, um eine vollständige 3D-Szene zu rekonstruieren.

Zusammenfassend bietet dieser Ansatz eine genaue, zuverlässige und schnelle Methode zur Objektrekonstruktion mit flexiblem Generalisierungsgrad.

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: variable Detaillierung
- Grad der Automation: instruktive Interaktion
- Genauigkeit der Rekonstruktion: hoch

6.2.3.2 Bewertung der Rekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten

Bei dem in Abschnitt 4.2.3.2 vorgestellten Ansatz zur Gebäuderekonstruktion werden aus Stereo-Luftbildern Kanten extrahiert und aufgrund ihrer topologischen und geometrischen Beziehungen automatisch zu 3D-Objekten strukturiert.

Erfüllen die Kanten nicht alle Bedingungen, welche durch ein Objektmodell vorgegeben werden, wird kein Zielobjekt erschaffen. Läßt man für den Rekonstruktionsprozeß einige der zu erfüllenden Bedingungen weg, werden zu viele Objekte generiert.

Die Idealbedingungen, die für den Rekonstruktionsprozeß nötig wären, werden in der Praxis selten durch die Bilder und die aus ihnen extrahierten Kanten erfüllt. Gleiches gilt auch für die in der Realität vorkommenden Gebäudetypen. Die an dieser Stelle angesprochene, vollautomatische Rekonstruktionsmethode kann dementsprechend kein vollständiges 3D-Stadtmodell liefern. Ohne eine Möglichkeit, den Rekonstruktionsprozeß interaktiv zu beeinflussen, sei es durch eine instruktive oder eine korrektive Interaktion, ist die Zuverlässigkeit dieser Rekonstruktionsmethode sehr beschränkt.

Der Detailreichtum ist durch die Anzahl der vorhandenen Gebäudemodelle limitiert. Nur die Gebäude lassen sich rekonstruieren, welche explizit durch ein Modell beschrieben werden. Da es unmöglich ist, die gesamte Vielfalt der existierenden Gebäude mit ihren Details (Erker, Balkone etc.) durch vollständige Modelle zu beschreiben, muß der Detailreichtum bei dieser Methode eingeschränkt bleiben.

([STILLA ET AL. 1997]) geben eine Abweichung von ca. 2 m zwischen einer Rekonstruktion durch Bildanalyse und einer aus einer Kartenanalyse abgeleiteten Rekonstruktion an. Die Genauigkeit dieses Rekonstruktionsansatzes ist also recht niedrig.

Da in Zukunft Fortschritte auf dem Gebiet der vollautomatischen Ableitung von 3D-Stadtmodellen aus Stereo-Luftbildern zu erwarten sind, kann der hier erwähnte Ansatz zumindest in der Theorie weiterverfolgt werden. Um die hier beschriebene vollautomatische Rekonstruktion in der Praxis für 3D-Stadtmodelle mit geringem Detailreichtum einzusetzen, müssen Zuverlässigkeit und Genauigkeit aber noch erheblich gesteigert werden.

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: beschränkte Detaillierung
- Grad der Automation: vollautomatische Rekonstruktion
- Genauigkeit der Rekonstruktion: niedrig

6.2.3.3 Bewertung der Rekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten unter zusätzlicher Verwendung von Schattenkanten

Das in Abschnitt 4.2.3.3 beschriebene Vorgehen zur Gebäuderekonstruktion geht ebenfalls von extrahierten Kanten aus, welche zu 3D-Objekten strukturiert werden. Zusätzlich zu einer allgemeinen Kantenextraktion werden hier noch die durch Schatten hervorgerufenen Kanten ermittelt, als Identifikationshilfe eingesetzt und von dem Satz der allgemeinen Kanten abgezogen. Dieses Vorgehen verhindert Verwechslungen zwischen 2D- und 3D-Objekten im Bild, und die Schattenkanten selbst werden von dem weiteren Rekonstruktionsprozeß ausgeschlossen. Im Idealfall gehen demnach nur die Kanten in den Rekonstruktionsprozeß ein, welche auch Kanten eines Objekts widerspiegeln.

Wie bei der in Abschnitt 4.2.3.2 vorgestellten Rekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten ist auch die hier zu bewertende Methode in ihrem Detailreichtum beschränkt. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit ist dagegen wesentlich höher. Durch die manuelle Auswahl des Bildausschnitts durch einen Operateur und das Einbeziehen der Schatten in den Rekonstruktionsprozeß werden Fehlzuordnungen minimiert. Die Genauigkeit liegt zwischen $\pm 0,1$ m und $\pm 0,3$ m.

Nachteile dieser Methode sind die fehlende Komplexität der Modelle und die Tatsache, daß erkannte Ecken nicht wieder in die Bilder zurückprojiziert werden. Dadurch ist eine Kontrolle der verbleibenden Fehler schwierig.

Für die Darstellung eines 3D-Stadtmodells mit geringem Detailreichtum ist diese Methode günstiger als die Rekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten ohne zusätzlicher Verwendung der Schattenkanten. Sie liefert ein vergleichbares Ergebnis wie die vollautomatische Rekonstruktion durch Kombination von Stereo-Luftbildern mit 2D-Grundrißdaten, wie sie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben wurde. Allerdings erfordert dieser Ansatz noch einen geringen Interaktionsaufwand.

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: beschränkte Detaillierung
- Grad der Automation: instruktive Interaktion
- Genauigkeit der Rekonstruktion: hoch

6.2.3.4 Bewertung der Rekonstruktion durch Punktmessung und Orthophotogenerierung

Der in Abschnitt 4.2.3.4 beschriebene Ansatz zur Gebäuderekonstruktion verbindet eine Stereoauswertung mit 2D-Grundrißdaten, welche aus einem Orthophoto digitalisiert wurden.

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß das Orthophoto aus denselben Bildern abgeleitet wird, die auch der Aerotriangulation sowie der DGM- und DHM-Berechnung zugrunde liegen. Dadurch werden Probleme aufgrund unterschiedlicher Bezugssysteme vermieden. Im Gegensatz zu den Ansätzen, welche ein 2D-GIS oder eine digitale Karte in den Prozeß einbeziehen, sind die Grundrißinformationen bei diesem Ansatz aktuell und vollständig, da im Orthophoto noch keine Generalisierung stattfand.

Der Ansatz wurde für die Mobilfunkplanung konzipiert. Diese Anwendung benötigt keine Details wie Erker. Möchte man aber für eine andere Anwendung ein 3D-Stadtmodell ableiten, welches eben diese Kleinformen darstellt, stößt man an die Grenzen des Verfahrens.

Bei einer Genauigkeit von 1,5 m in der Lage und 1 m in der Höhe gehört das Verfahren zu den ungenauen Rekonstruktionsmethoden. Zudem ist es mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden. Neben einer analytischen Stereoauswertung muß das Orthophoto am Bildschirm digitalisiert werden (Onscreen-Digitizing).

Durch den hohen Interaktionsanteil erhält man ein recht zuverlässiges Rekonstruktionsergebnis, welches aber in seinem Detailreichtum und seiner Genauigkeit stark beschränkt ist. Es handelt sich demnach um ein Gebäuderekonstruktionsverfahren, welches bei hohem Interaktionsaufwand ein nur mäßiges Rekonstruktionsergebnis liefert.

Vergleichbare Elemente:

- Grad der Generalisierung: beschränkte Detaillierung
- Grad der Automation: analytische Auswertung, Digitalisierung
- Genauigkeit der Rekonstruktion: niedrig

6.3 Abschließender Vergleich

Für eine Bewertung verschiedener Rekonstruktionsmethoden ist der Verwendungszweck der Modelle von großer Bedeutung, da je nach Anwendung unterschiedliche Ansprüche an den Detailreichtum der Modelle gestellt werden.

Von den in dieser Arbeit vorgestellten Ansätzen zur Gebäuderekonstruktion bieten nur zwei Verfahren die Möglichkeit einer variablen Detaillierung:

- der in Abschnitt 4.1.1 beschriebene topologiegesteuerte **CyberCity-Modeler** und
- das in Abschnitt 4.2.3.1 vorgestellte modellgesteuerte System **HASE⁺**.

Alle anderen Verfahren sind nur für jene 3D-Stadtmodelle geeignet, welche keine hohen Ansprüche an den Detailgrad stellen, z. B. für Funkausbreitungsmodelle.

Für 3D-Stadtmodelle mit niedrigem Detailgrad bietet beispielsweise der in Abschnitt 4.2.2 genannte, vollautomatische Ansatz mit Hilfe von 2D-Grundrißdaten und Stereo-Luftbildern eine preiswerte Methode zur Gebäuderekonstruktion, da der manuelle Aufwand auf die Vorbereitung des Bildmaterials beschränkt bleibt. Die Zuverlässigkeit der Rekonstruktion ist bisher aber fraglich, da wie für die meisten der in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze gilt, daß die automatischen Prozesse nur in einem verhältnismäßig geringen Umfang getestet wurden. Solange es keine verlässlichen Aussagen über die Zuverlässigkeit der Prozeduren gibt, ist ein gewisser Anteil menschlicher Interaktion einer vollautomatischen Rekonstruktion vorzuziehen. Auch aufgrund der menschlichen Fähigkeit zur visuellen Interpretation kann die Fehleranfälligkeit der Rekonstruktion z. B. durch eine instruktive Interaktion verringert werden. Das in Abschnitt 4.2.3.3 behandelte Verfahren zur Gebäuderekonstruktion, welches auf Kantenextraktion und Schattenidentifikation basiert, liefert ein ähnliches Ergebnis mit etwas höherer Zuverlässigkeit bei geringem manuellen Aufwand.

Die in Abschnitt 4.2.3.2 (Gebäuderekonstruktion durch Strukturierung extrahierter Kanten) und 4.2.3.4 (Gebäuderekonstruktion durch Punktmessung und Orthophotogenerierung) beschriebenen Rekonstruktionsansätze unterscheiden sich stark in ihrem Interaktionsaufwand. Das zuerst genannte Verfahren ist vollautomatisch und wenig zuverlässig, das andere besitzt zwar eine hohe Zuverlässigkeit, ist aber mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden. Für beide Ansätze gilt, daß die Genauigkeit der Rekonstruktion extrem niedrig ist und beide Methoden daher als nicht empfehlenswert einzustufen sind.

Wird eine detaillierte Darstellung der Gebäude gewünscht, stehen wie oben schon erwähnt zwei der in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze zur Wahl. Der topologiegesteuerte **CyberCity-Modeler** hat den Nachteil, daß nur die in den Bildern sichtbaren Elemente strukturiert werden können. Eine Schätzung der fehlenden Elemente (Ecken, Kanten, Flächen) ist im Gegensatz zu einem modellgesteuerten Ansatz, welcher mit 3D-Primitiven arbeitet, nicht möglich.

Die Gebäuderekonstruktion durch CSG-Modellierung, wie sie durch das System **HASE⁺** umgesetzt wird, bietet als einziges der hier repräsentierten modellgesteuerten Verfahren eine flexible Modellierung der Details mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Neben Gebäuden können auch andere Objekte wie Straßen oder Vegetation modelliert werden. Das System benötigt keine lange Einarbeitungszeit, sondern läßt sich auch von einem ungeübten Anwender leicht bedienen. Desweiteren bietet es durch die variable Detailmodellierung eine Möglichkeit, die verschiedenen Modelle zu generieren, die im Rahmen einer LoD-Darstellung benötigt werden (siehe Abschnitt 5, Geometrische Generalisierung).

Aufgrund seiner vielen Vorteile bietet das System **HASE⁺** ein geeignetes Verfahren zur 3D-Stadtmodellgenerierung, welches sowohl detailreiche als auch detailarme Gebäude-repräsentationen zuläßt. Die Vorteile im einzelnen sind:

- die flexible Detailmodellierung je nach Forderungen seitens des Auftraggebers
- die hohe Genauigkeit
- die hohe Zuverlässigkeit
- die Möglichkeit zur Modellierung weiterer Objekte (Straßen, Vegetation etc.)
- die unkomplizierte Handhabung
- die Möglichkeit einer Schätzung nicht sichtbarer Elemente durch die Modellierung mit 3D-Primitiven

7

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit bietet einen Überblick zu unterschiedlichen Gebäuderekonstruktionsansätzen für 3D-Stadtmodelle sowie zu deren Vor- und Nachteilen. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt bei den semi-automatischen Rekonstruktionsverfahren, also solchen Verfahren, welche sowohl automatische Prozesse als auch menschliche Interaktionen einbeziehen.

Im Rahmen einer kurzen Zusammenfassung werden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit noch einmal hervorgehoben:

In Kapitel 2 werden theoretische Grundlagen zur Modellbeschreibung und zur Informationsgewinnung aus Bildern gegeben sowie verschiedene Gebäudemodelle vorgestellt. Für die Gebäuderekonstruktion bietet sich aufgrund der vielfältigen Gebäudeformen ein generisches Objektmodell an.

Mögliche Repräsentationsformen für Gebäude sind durch das BRep- und das CSG-Modell gegeben. Es ist günstig für die Modellierung ein CSG-Modell zu wählen und dieses für eine Visualisierung in ein BRep-Modell zu transformieren.

Kapitel 3 stellt die einzelnen für den Rekonstruktionsprozeß geeigneten Daten vor und beschreibt den allgemeinen Ablauf der Datenaufbereitung. Es werden die drei Schritte geometrische Modellierung, Texturierung und Visualisierung unterschieden.

Auf die geometrische Modellierung geht Kapitel 4 ein. Es liefert einen Überblick zu verschiedenen Gebäuderekonstruktionsverfahren. Bei diesen wird zwischen einer topologiegesteuerten und einer modellgesteuerten Herangehensweise unterschieden. Die modellgesteuerten Verfahren werden desweiteren nach den von ihnen verwendeten Eingangsdaten unterteilt.

Für die Echtzeitbegehung einer virtuellen Szene, z. B. eines 3D-Stadtmodells, ist eine die Details betreffende Abstufung der Darstellung je nach Entfernung des Objekts vom Betrachter von Vorteil (LoD-Darstellung). Auf die dafür benötigte geometrische Generalisierung der Gebäude wird in Kapitel 5 eingegangen. Vorschläge zur Automatisierung der Ableitung eines weniger detaillierten Modells aus einem detailreichen beziehen sich aber sowohl auf die geometrische als auch auf eine die Textur betreffende Generalisierung. Liegt der Unterschied der verschiedenen Darstellungen in den geometrischen Details wird eine Attributierung der einzelnen Primitive vorgeschlagen. Die Attribute bestimmen, bis zu welchem Detaillierungsgrad das jeweilige Primitiv dargestellt werden soll. Ein Algorithmus zur automatischen Ableitung der LoD-Darstellung ist noch zu verwirklichen. Liegt der Unterschied der verschiedenen Darstellungen dagegen in der Textur, bietet sich eine automatische Generierung von Bildpyramiden an.

Eine Gegenüberstellung der in Kapitel 4 vorgestellten Ansätze zur Gebäuderekonstruktion erfolgt in Kapitel 6. Der Vergleich ergibt, daß das an der Universität Bonn entwickelte „Monokulare Stereo System HASE⁺“ am besten für die unterschiedlichen Anforderungen, die an die 3D-Stadtmodelle gestellt werden, geeignet ist. Die Vorteile liegen in der flexiblen Detailmodellierung, der hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie in der schnellen und unkomplizierten Handhabung. Die Möglichkeit auch andere Objekte wie Straßen oder Vegetation zu modellieren steigert die Attraktivität des Systems zusätzlich.

Literaturverzeichnis

- [ADV 1989, 1995] *Gesamtdokumentation des Vorhabens ATKIS, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.* AdV, 1989, 1995
- [BÄHR 1998] Bähr, Hans-Peter: *From Data to Inference: Examples for Knowledge Representation in Image Understanding.* In: ISPRS Commission III Symposium 'Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensoral Pixels', ISPRS, Columbus, Ohio, 1998, pp. 301-306.
- [BERTUCH 2000] Bertuch, Manfred: *3D verfeinert, Neue Darstellungsverfahren in 3D-Spielen.* c't 1/2000, Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, Hannover, 2000, S. 144-146
- [BRENNER 1999] Brenner, Claus: *Interactive modelling tools for 3D building reconstruction.* Photogrammetric Week '99, Eds. Dieter Fritsch, Rudolf Spiller, Wichmann, Heidelberg, 1999, pp. 23-34.
- [BRENNER, HAALA 1999] Brenner, Claus; Haala, Norbert: *Rapid Production of Virtual Reality City Models.* Geo-Information-Systems (GIS), 12, 2/1999, pp. 22-28.
- [BRENNER, HAALA 2000] Brenner, Claus; Haala, Norbert: *Erfassung von 3D Stadtmodellen.* PFG, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart 2/2000, S. 109-117.
- [CÖLTEKIN ET AL. 1999] Cöltekin, Arzu; Heikkinen, Jussi; Rönholm, Petri : *Studying Geometry, Color and Texture in VRML.* The Finnish Society of Surveying Sciences, Surveying Science in Finland November 1999, Meripaino Oy, Vol. 17, No.1-2, Helsinki 1999, pp. 65-90.
- [DENGEL 1994] Dengel, Andreas: *Künstliche Intelligenz-Allgemeine Prinzipien und Modelle* BI-Taschenbuchverlag (Meyers Forum), Mannheim; Leipzig; Wien; Zürich, 1994.

- [ENGLERT 1997] Englert, Roman: *Reducing Complexity of 3D Object Reconstruction due to Symmetry of Model Knowledge*. In: IAPRS Workshop ‚3D Reconstruction and Modeling of Topographic Objects‘, IAPRS, Vol. 32, Part 3-4W2, Stuttgart, 1997, pp.137-144.
- [ENGLERT, GÜLCH 1996] Englert, Roman; Gülch, Eberhardt: *One-Eye Stereo System for the Acquisition of Complex 3D Building Descriptions*. In: OEEPE Workshop ‚3D-City Models‘, Uni Bonn, Oktober 1996.
- [FISCHER ET AL. 1999] Fischer, André; Kolbe, Thomas H.; Lang, Felicitas: *On the Use of Geometric and Semantic Models for Component-Based Building Reconstruction*. Smati ’99 Workshop ‚Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps‘, Eds.W. Förstner, C.-E. Liedke, J. Bückner, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, 1999, pp.101-119.
- [GRUBER ET AL. 1996] Gruber, Michael; Leberl, Franz; Maresch, Markus: *Requirements for Photorealistic 3D Modeling of Urban Areas*. IAPRS, Vol.XXXI, Part B3, Vienna, 1996, pp.261-265.
- [GRUEN, WANG 1999] Gruen, Armin; Wang, Xinhua : *CyberCity Modeler, a tool for interactive 3-D city model generation*. Photogrammetric Week ’99, Eds.Dieter Fritsch, Rudolf Spiller, Wichmann, Heidelberg, 1999, pp.317-327.
- [GÜLCH 1996] Gülch, Eberhardt: *Semiautomatic Building Extraction*. In: OEEPE Workshop ‚3D-City Models‘, Uni Bonn, Oktober 1996.
- [GÜLCH ET AL. 1999] Gülch, Eberhardt; Müller, Haro; Läbe, Thomas: *Integration of Automatic Processes into semi-automatic Building Extraction*. IAPRS, Vol.32, Part 3-2W5, ‚Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery‘, München, September 1999
- [GUO 1996] Guo, Wei: *Three Dimensional Representation of Spatial Object and Topological Relationships*. IAPRS, Vol.XXXI, Part B3, Vienna, 1996, pp.273-278.
- [GURETZKI, EHRHARDT 1996] Guretzki, Markus; Ehrhardt, Hardy: *Urban Building Models for Telecommunication*. In: OEEPE Workshop ‚3D-City Models‘, Uni Bonn, Oktober 1996.
- [HAALA 1996] Haala, Norbert: *Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 460, München, 1996

- [HAALA, ANDERS 1996] Haala, Norbert; Anders, Karl-Heinrich: *Fusion of 2D-GIS and Image Data for 3D Building Reconstruction*. IAPRS, Vol.XXXI, Part B3, Vienna, 1996, pp. 285-290.
- [HAALA ET AL. 1997] Haala, Norbert; Brenner, Claus; Anders, Karl-Heinrich: *Generation of City Models from Digital Surface Models and 2D GIS*. In: IAPRS Workshop '3D Reconstruction and Modeling of Topographic Objects', IAPRS, Vol. 32, Part 3-4W2, Stuttgart, 1997, pp. 68-75.
- [VON HANSEN, VÖGTLE 1999] Hansen, Wolfgang; Vögtle, Thomas: *Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen*. PFG, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart 4/1999, pp. 229-236.
- [HILDEBRANDT 1996] Hildebrandt, Gerd: *Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Wichmann, Heidelberg, 1996.
- [HEUEL 2000] Heuel, Stephan: *Zur automatischen Erfassung von Gebäuden aus Luftbildern*. PFG, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart 3/2000, S. 177-188.
- [KLAUS 1997] Klaus, Michael: *Erstellung von 3D-Stadtmodellen für die virtuelle interaktive Begehung*. Münchener Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, München, 1997.
- [KRAUS, RIES 1999] Kraus, Karl; Ries, Christine: *Erfassung und Visualisierung von 3D-Welten*. Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag, Herausgegeben von Christian Heipke und Helmut Mayer, München, 1999, S. 161-169.
- [LANGE 1999] Lange, Eckart: *Von der analogen zur GIS-gestützten 3D-Visualisierung bei der Planung von Landschaften*. Geo-Information-Systems (GIS), 12, 2/1999, pp. 29-37.
- [MASON 1996] Mason, Scott: *3D Building Reconstruction Using Composites of Surface Primitives: Concept*. IAPRS, Vol.XXXI, Part B3, Vienna, 1996, pp. 517-522.
- [MUHAR 1992] Muhar, Andreas: *EDV-Anwendungen in Landschaftsplanung und Freiraumgestaltung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1992.

- [MARESCH, GRUBER 1997] Maresch, Markus; Gruber, Michael: *Recording and Modeling of Building Facades for Three Dimensional City Models*. In: ISPRS Workshop ‚Theoretical and Practical Aspects of Surface Reconstruction and 3-D Object Extraction‘, ISPRS, Vol. 32, Teil 3-2W3, Haifa, Israel, 1997, pp.100-105.
- [PAŠKO, GRUBER 1996] Paško, Marko; Gruber, Michael: *Fusion of 2D GIS Data and Aerial Images for 3D Building Reconstruction*. IAPRS, Vol.XXXI, Part B3, Vienna, 1996, pp.257-260.
- [POMASKA 1998] Pomaska, Günter: *Photorealistische Visualisierung mittels Textur-Mapping aus photogrammetrischen Aufnahmen*. VDV-Schriftenreihe, Der Vermessungsingenieur in der Praxis, Band 16, Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen, Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden, 1998, S.81-88.
- [ROUS 1998] Rous, Clemens: *Einbindung digital entzerrter Bilder in virtuelle Welten*. VDV-Schriftenreihe, Der Vermessungsingenieur in der Praxis, Band 16, Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen, Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden, 1998, S.54-60.
- [ROUS, SCHLÖSSER 1998] Rous, Clemens; Schlösser, Dirk: *3D-Objektvisualisierung auf Basis des Internet-Standards VRML*. VDV-Schriftenreihe, Der Vermessungsingenieur in der Praxis, Band 16, Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen, Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden, 1998, S.41-53.
- [SAHAR, KRUPNIK 1997] Sahar, Liora; Krupnik, Amnon: *A Semiautomatic Approach for 3-D Reconstruction of Building Outlines*. In: ISPRS Workshop ‚Theoretical and Practical Aspects of Surface Reconstruction and 3-D Object Extraction‘, ISPRS, Vol. 32, Teil 3-2W3, Haifa, Israel, 1997, pp.127-133.
- [STILLA, JURKIEWICZ 1996] Stilla, U.; Jurkiewicz, K.: *Structural 3D-Analysis of Urban Scenes from Aerial Images*. IAPRS, Vol.XXXI, Part B3, Vienna, 1996, pp.832-838.
- [STILLA ET AL. 1997] Stilla, U.; Geibel, R.; Jurkiewicz, K.: *Building Reconstruction using different Views and Context Knowledge*. In: IAPRS Workshop ‚3D Reconstruction and Modeling of Topographic Objects‘, IAPRS, Vol. 32, Part 3-4W2, Stuttgart, 1997, pp.129-136.

-
- [TÖNJES 1997] Tönjes, Ralf: *3D Reconstruction of Objects from Aerial Images using a GIS*. In: ISPRS Workshop ,Theoretical and Practical Aspects of Surface Reconstruction and 3-D Object Extraction', ISPRS, Vol. 32, Teil 3-2W3, Haifa, Israel, 1997, pp. 140-147.
- [WOLF 1999] Wolf, Manfred: *Photogrammetric Data Capture and Calculation for 3D City Models*. Photogrammetric Week '99, Eds. Dieter Fritsch, Rudolf Spiller, Wichmann, Heidelberg, 1999, pp. 305-312.

Internetadressen:

<http://www.adobe.com>

<http://www.autodesk.de>

<http://www.bentley.de>

<http://www.cai.com/cosmo/>

http://www.geod.ethz.ch/p02/projects/3DGIS/CC-Modeler_intro.html

<http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

<http://www.ipb.uni-bonn.de>

<http://www-ipf.bau-verm.uni-karlsruhe.de>

<http://www.phoenics.de>

<http://www.photomodeler.com>

<http://www.tnt.uni-hannover.de/soft/tnt/aida/>

<http://www.toposys.com>

<http://www.web3d.org/Specifications/VRML97/>

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiel eines 3D-Stadtmodells ([GRUEN, WANG 1999])	2
2.1	Links-Rechts-Topologie ([MUHAR 1992], S.18, überarbeitet)	7
2.2	Topologieaufbau und Attributzuweisung bei Polygonen ([MUHAR 1992], S. 20, überarbeitet)	8
2.3	Topologische Beziehungen ([GUO 1996], überarbeitet)	10
2.4	Objektmodelle	14
2.5	Repräsentationsformen	15
2.6	3D-Primitive ([ENGLERT, GÜLCH 1996], überarbeitet)	17
3.1	DOM aus Laserscannerdaten ([BRENNER 1999])	22
3.2	kleinmaßstäbige Visualisierung ([BRENNER 1999])	24
3.3	großmaßstäbige Visualisierung ([BRENNER 1999])	25
3.4	Symmetrietypen ([ENGLERT 1997], überarbeitet)	27
3.5	Texturtypen (enthält Fototexturen aus einem Foto, das im Projektse- minar Photogrammetrie 1997/98 der Universität Hannover entstanden ist.)	29
4.1	Umrings- und Innenpunkte ([GRUEN, WANG 1999], überarbeitet)	34
4.2	Basis-Gebäudetypen	37
4.3	Allgemeiner Ablauf einer Gebäuderekonstruktion (Teile der Darstellung sind an Abbildungen aus [ENGLERT, GÜLCH 1996] angelehnt. Die Ab- bildung enthält ein Laserscanner-Bild, welches [BRENNER 1999] entnom- men wurde)	39
4.4	Neigungsanalyse	40
4.5	CSG-Baum ([ENGLERT, GÜLCH 1996], überarbeitet)	47

4.6	„Flaggenmast“-Prinzip ([ENGLERT, GÜLCH 1996], überarbeitet)	48
4.7	Automatisches Zuordnen der Primitive ([ENGLERT, GÜLCH 1996], überarbeitet)	48
4.8	Produktionsnetz 1 ([STILLA ET AL. 1997], überarbeitet)	50
4.9	Kombination von 3D-Winkeln ([STILLA ET AL. 1997], überarbeitet) . .	51
4.10	Produktionsnetz 2 ([STILLA ET AL. 1997], überarbeitet)	52
4.11	Produktionsnetz 3 ([STILLA ET AL. 1997], überarbeitet)	53
4.12	Kettenbildung (angelehnt an Abbildung aus [SAHAR, KRUPNIK 1997])	54
5.1	Unterschiedliche Detailstufen je nach Entfernung mit fototexturiertem Detailmodell (Bild abgeleitet aus einem Foto, welches aus dem Projektseminar Photogrammetrie 1997/98 der Universität Hannover stammt) .	61
5.2	Beispiel einer Bildpyramide (Bild abgeleitet aus einem Foto, welches aus dem Projektseminar Photogrammetrie 1997/98 der Universität Hannover stammt)	62

Alle Abbildungen, welche keine Quellangaben aufweisen, wurden von mir selbst erstellt.

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AIDA	Automatic Image Data Analyzer, wissensbasiertes Szeneninterpretationssystem
ATKIS	Amtlich-Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BLUH	Programm zur Bündelblockausgleichung der Universität Hannover
BP	Boundary Point, Umringspunkt beim CC-Modeler
BRep	Boundary Representation, Flächenbegrenzungsdarstellung
CAD	Computer Aided Design, rechnergestützter Entwurf
CC-Modeler	CyberCity-Modeler der ETH Zürich
CSG	Constructive Solid Geometrie, Geometrie zur Volumenmodellierung
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
GIS	Geoinformationssystem
GUI	Graphical User Interface, graphisches Benutzer-Interface
HASE ⁺	In Bonn entwickeltes Monokulares Stereo System zur Erfassung komplexer 3D-Gebäudebeschreibungen
IP	Interior Point, Innenpunkt (z.B. Giebelpunkt) beim CC-Modeler
IPI	Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover
ISO	Internationale Organisation für Standardisierung
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission

- VR Virtual Reality, Virtuelle Realität
- VRML Virtual Reality Modeling Language, Sprache zur
Modellierung virtueller Realitäten