

**3D-Stadtmodellierung auf heterogenen
Ausgangsmodellen mittels evolutionärer
Algorithmen**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 11.7.2006

von

Dipl.-Inform. Björn Weitzig

aus Düsseldorf

Referent: Professor Dr.-Ing. Dieter Morgenstern
Institut für Kartographie und Geoinformation, Universität Bonn

Korreferent: Professor Dr. rer. nat. Hans-Peter Helfrich
Mathematisches Seminar der Landwirtschaftlichen Fakultät, Universität Bonn

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 2007

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Erscheinungsjahr: 2007

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein neuartiges Verfahren zur flexiblen und effizienten 3D-Stadtmodellierung im Kontext der Verfügbarmachung von 3D-Stadtmodellen. Ausgangspunkt ist die Heterogenität existierender und zukünftiger Modelle mit dem Ansatz, diese in einem gemeinsamen Datenpool zusammenzuführen, modellübergreifende Beziehungen festzustellen und ein umfassendes Zielmodell automatisch zu erreichen. Die Ausgangsmodelle können verschiedenster Auflösung, Qualität, Vollständigkeit, Herkunft, Formates und auch zueinander widersprüchlich sein.

Die Bildung des Zielmodells stellt sich als komplexes Optimierungsproblem dar, wofür sich die aus der Informatik kommenden Evolutionären Algorithmen (EA) als neuartiges Verfahren bewährt haben. Die EA bilden die Darwinsche Evolutionstheorie auf mathematische Probleme ab, indem Datensätze als Individuen betrachtet werden, die sich vermehren, beeinflussen, ändern und sterben. Ein Bewertungssystem lässt die heterogene Menge von Individuen nach dem Grundsatz „Survival of the fittest“ auf ein Zielmodell zusteuern.

Um die Methodik der EA auf die 3D-Stadtmodellierung zu übertragen, wird ein zugleich den Anforderungen der EA, der Ausgangsmodelle und der 3D-Stadtmodellierung genügendes Datenmodell entworfen. Das EA-Modell wird, ausgehend vom Stand der Forschung, problemspezifisch analysiert, angepasst und erweitert.

Die Ausgangsdaten werden durch Operatoren, die als Implementierungen der EA-Grundrechenarten wirken, zum Ziel geführt.

Es wird ein Pool von Operatoren entworfen, sowohl einzeln als auch im komplexen Zusammenspiel der EA analysiert und anhand praktischer Beispiele anschaulich dargestellt.

Das Verfahren kann auf den Umgang mit sich überlappenden heterogenen Datensätzen verallgemeinert werden.

Abstract

This thesis introduces a new approach for flexible and efficient 3D city modeling. The approach establishes a comprehensive and consistent target model out of a set of existing heterogeneous basic models. To this aim, first a unified data pool is built from the set of basic models. Then the target model is derived automatically from the pool by transforming the basic models and detecting their relations. The basic models may vary widely with respect to resolution, quality, coverage and data format. Moreover, the basic models may even be partially contradictory to one another.

Thus, the derivation of a target model is a complex optimization problem. Evolutionary algorithms (EA), known from the discipline of computer science, are an up-to-date method to resolve these problems. The basic idea of EA is to transfer mechanisms inspired by Darwin's theory of evolution. All data sets are treated as individuals, which may reproduce, mutate, recombine and die. By using an adequate "survival of the fittest" evaluation system the individuals are converging towards a target model.

To apply EA in our context, a data model has to be specified that satisfies the requirements of EA, the basic models and the 3D city modeling. Based on the current state of the art in both EA and 3D city modeling, the EA-model is analyzed, adapted and extended.

The data sets converge towards the target by operators, which realize EA basic calculations.

A set of operators is designed. Their single and combined effects are analyzed in the given context. The results are demonstrated with practical examples.

The approach can be generalized towards overlapping, heterogenous data sets.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig erstellt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Bonn, den 9. Juli 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Anwendungsgebiete	9
1.2	Ziele der Arbeit	11
1.3	Gliederung und Aufbau	12
2	Stadtmodellierung	15
2.1	Vorhandene Verfahren	15
2.1.1	CAD - Modellierwerkzeuge	15
2.1.2	Geländemodellierer	16
2.1.3	Photogrammetrische Verfahren	17
2.1.4	Grundrissbasierte Verfahren	22
2.1.5	3D-Scanner	22
2.1.6	Weitere monolithische Verfahren	24
2.1.7	Verfahren mit Monte-Carlo-Techniken	24
2.1.8	Modulare Verfahren	25
2.1.9	Gesamtbewertung	26
2.2	Einordnung in die 3D-Geovisualisierung	28
2.2.1	Allgemeine Betrachtung der 3D-Geovisualisierung	28
2.2.2	Visualisierungspipeline	29
2.2.3	Schnittstellen	30

3	Datenquellen	35
3.1	Einführung	35
3.2	Vektordaten	36
3.2.1	2D-Vektordaten	36
3.2.2	Digitale Landschaftsmodelle	39
3.2.3	3D-Vektordaten	40
3.3	Rasterdaten	43
3.3.1	Fassadenbilder	43
3.3.2	Luft- und Satellitenbilder und ihre Folgemodelle	45
3.3.3	Laserscannerdaten	47
3.3.4	COP-Bilder	48
3.4	Semantische Daten	48
3.4.1	Attributive Informationen	49
3.4.2	Relationen	49
3.5	Bewertung	49
4	Evolutionäre Algorithmen	51
4.1	Einführung	51
4.2	Datenmodell	54
4.2.1	Einführung	54
4.2.2	Anforderungen an das Datenmodell	55
4.2.3	Entwurf des Datenmodells	55
4.3	Bewertungssystem	63
4.3.1	Allgemeine Gütemaße	64
4.3.2	Modellspezifische Gütemaße	66
4.4	Entwurf des erweiterten EA-Modells	68
4.4.1	Äußerer Ablauf des Verfahrens	68
4.4.2	Ablauf der Berechnung	70

4.4.3	Mutationslevel	71
4.4.4	Populationsgrößenabhängige Elimination	72
4.4.5	Teilbeschreibungen	73
4.4.6	Abschließende Diversität	73
4.4.7	Frühelimination	74
4.4.8	Fehlerkorrektur durch Rekombination	74
4.4.9	Vermeidung doppelter Aufrufe	76
4.5	Spezialisierte Operatoren	76
4.5.1	Initialisierung	77
4.5.2	Rekombination	79
4.5.3	Mutation	88
4.5.4	Neugenerierung	101
4.5.5	Elimination	102
4.5.6	Abbruchkriterien	103
4.5.7	Bewertung	104
4.6	Hypothesen	104
4.6.1	Einführung	105
4.6.2	Allgemeines	105
4.6.3	Hypothesen aufgrund von Fassadenbildern	106
4.6.4	Hypothesen aufgrund von Grundrissen	120
4.6.5	Hypothesen aufgrund von 3D-Modellen	123
4.6.6	Bewertung	125
5	Evaluation	127
5.1	Einführung	127
5.2	Test kombinierter Operatoren	128
5.2.1	Einfache Rekombination	128
5.2.2	Photogrammetrie und Entzerrung anhand eines Balkons	129

5.2.3	Modellierung einer breiten, gewölbten Fassade	130
5.2.4	Digitalisierung eines Grundrisses auf ein Luftbild	130
5.2.5	Rekonstruktion eines Satteldaches ohne Höhenangaben .	131
5.2.6	Rekonstruktion einer breiten Fassade ohne Hilfspunkte .	132
5.3	Gesamttest	133
5.3.1	Shadow-Arkaden	134
5.3.2	Wilhelmstraße	137
5.3.3	Düsseldorf Altstadt	137
5.3.4	Heiligendamm	138
5.4	<i>3dw</i> als Produkt	139
6	Implementation	141
6.1	Einführung	141
6.2	Genutzte Werkzeuge	141
6.3	<i>3dw</i>	142
6.3.1	Benutzeroberfläche	142
6.3.2	Klassenstruktur der Modulsysteme	143
6.3.3	Datenkonsistenz und Laufzeitverhalten	147
6.4	Bewertung	148
7	Fazit	151
A	Grundlagen	155
A.1	Definitionen	155
A.2	Mathematische Grundlagen	156
A.3	Photogrammetrische Verfahren	167
	Abbildungsverzeichnis	169
	Literaturverzeichnis	173
	Index	187

Kapitel 1

Einleitung

Dieses Kapitel stellt Anwendungsgebiete von 3D-Stadtmodellen vor, legt die Ziele dieser Arbeit fest und behandelt ihren weiteren Aufbau.

1.1 Anwendungsgebiete

3D-Stadtmodelle werden in vielen Gebieten und mit steigender Nachfrage eingesetzt. Ihre Nutzung kann in die Gebiete Stadtplanung, Visualisierung, Navigation und physikalische Modelle aufgeteilt werden [Kolbe 1999; Thiemann 2003].

In der *Stadtplanung* werden 3D-Bestandsmodelle um weitere Planungsvorhaben (Architekturentwürfe) ergänzt, um so eine Architektur-Simulation und einen Vergleich des Bestandes mit der Planung im Gesamtkontext erreichen

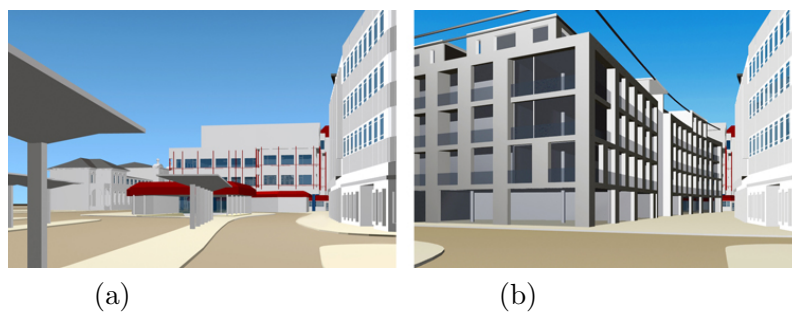


Abbildung 1.1: Planung am Bonner Hauptbahnhof (Sicht vom Busbahnhof): a) aktueller Bestand und b) Planung



Abbildung 1.2: Das von Siemens VDO Automotive entwickelte 3D-Navigationssystem Mobile Navigator

zu können. Diese Modelle unterstützen und beeinflussen die Entscheidungsfindung bei Bauvorhaben. Als aktuelles Beispiel sei die geplante Neubebauung um den Bonner Hauptbahnhof aufgeführt, zu der zahlreiche dreidimensionale Darstellungen veröffentlicht und in die Entscheidungsfindung einbezogen wurden (Abb. 1.1, <http://www.bonn.de/bahnhofsbereich/>).

Die *Visualisierung* wird in der Werbung und zur Tourismusförderung genutzt. In der Werbung werden häufig Bestandsmodelle um weitere Objekte oder Informationen ergänzt, um so die eigenen Geschäftsräume oder Produkte in einem passenden Umfeld wunschgemäß zu präsentieren.

Zur Tourismusförderung stellen immer mehr Städte Bilder und 3D-Stadtmodelle von Sehenswürdigkeiten in das Internet oder drucken Standbilder in Prospekten ab. Virtuelle Stadtrundgänge vermitteln aus der Ferne einen Eindruck der Stadt.

Weitere Visualisierungsanwendungen sind Wirtschaftsförderung und die Vorbereitung von Großveranstaltungen [AG 3D-Stadtmodelle 2004, Kap. 5.2].

Mit den *Navigationssystemen* in Fahrzeugen hat sich die 2D-Computernavigation endgültig durchgesetzt. Erste Projekte, diese Systeme zur verbesserten Orientierung um 3D-Modelle zu ergänzen, existieren bereits [Thiemann 2003, Seite 185]. Siemens will sein 3D-Navigationssystem „Mobile Navigator“ (Abb. 1.2) bis Ende 2007 zur Serienfertigung bringen [Siemens VDO 2005]. Weiterhin werden solche Systeme auf Handhelds übertragen und sind mittlerweile als GPS-gestützter PDA mit Navigationssoftware im Handel erhältlich, wobei auch dort die Ergänzung um 3D-Informationen bei steigender Hardwareleistung ansteht.

Physikalische Modelle sind eine weitere Einsatzmöglichkeit von 3D-Stadtmodellen. Die Ausbreitung und Belastung mit Schall, elektromagnetischen Wellen

und Schadstoffen sowie Wasser und Feuer im Katastrophenfall kann ermittelt werden, wobei das 3D-Stadtmodell sowohl zur Berechnung der Daten als auch zu ihrer Darstellung dient. Die Schweiz hat eine landesweite GIS-basierte Lärmdatenbank ausgeschrieben. Ziel ist laut Strategiepapier des Umweltamtes der „*Aufbau eines strategischen Controlling-Systems, damit der Fortschritt und der zukünftige Handlungsbedarf in der Lärmbekämpfung gemäß neuer Strategie umgesetzt werden kann.*“ [BUWAL 2003, Seite 29].

Da die Ausbreitung von Funkwellen stark durch Gebäude beeinflusst wird, werden Standorte von Mobilfunkmasten durch Simulationen auf Basis von 3D-Stadtmodellen ermittelt [Siebe u. Büning 1997].

Die Nutzung von 3D-Stadtmodellen erfordert deren Erstellung und Fortführung, was mit den vorhandenen Verfahren (Kap. 2.1) in der gewünschten Auflösung von mindestens LoD 3 (Kap. A.1) nur mit erheblichem manuellen Arbeitsaufwand möglich ist. Die vorliegende Arbeit untersucht einen neuartigen Ansatz zur Reduzierung dieses Arbeitsaufwandes.

1.2 Ziele der Arbeit

Primäres Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur flexiblen und effizienten 3D-Stadtmodellierung im Kontext der Verfügbarmachung von 3D-Stadtmodellen. Hierzu wird eine Reihe von sekundären Zielen definiert.

Bei der Stadtmodellierung gilt:

- Durch die hochdetaillierte Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) und zahlreiche Spezialprojekte im Bereich der Geodatenerfassung und -nutzung existiert oft bereits eine umfangreiche heterogene hochaufgelöste raumbezogene Datengrundlage.
- 3D-Stadtmodelle enthalten in ihrer Struktur Regelmäßigkeiten, wie z.B. rechte Winkel oder vertikal stehende Seitenwände.

Unter Berücksichtigung sowohl der vorhandenen Modelle als auch der möglichen Regeln ist eine effiziente 3D-Stadtmodellierung denkbar.

Die Ausgangsmodelle können unter anderem in Form von Grundrissen, Fassadenbildern, 3D-Modellen, Luftbildern und semantischen Daten vorliegen (Kap. 3) und verschiedenster Auflösung, Qualität, Vollständigkeit, Aktualität und Herkunft sein.

Es muss untersucht werden, wie die heterogenen und möglicherweise zueinander widersprüchlichen Ausgangsmodelle in einem gemeinsamen Datenpool

zusammengeführt, dort bearbeitet und modellübergreifende Beziehungen gesetzt werden können. Dazu ist ein geeignetes Datenmodell zu entwickeln.

Die in 3D-Stadtmodellen auftretenden Regelmäßigkeiten können durch Hypothesen abgebildet werden (Kap. 4.6). Durch die Hypothesen und heterogenen Ausgangsmodelle stellt sich die Findung eines umfassenden Zielmodells als komplexes Optimierungsproblem dar. Hierfür haben sich in anderen Disziplinen die Evolutionären Algorithmen (EA) bewährt [Streichert 2001, Kap. 2]. Die EA (Kap. 4.1) orientieren sich an der Darwinschen Evolutionstheorie [Darwin 1859, 1871] und bilden, beginnend mit den Ausgangsmodellen, einen iterativen Rahmen zur Weiterentwicklung über viele Stufen (Generationen) und parallele Wege (Individuen) hin zu einem optimalen Zielmodell. Dabei werden Individuen verschmolzen, modifiziert, neu erzeugt, eliminiert und bewertet, bis ein Abbruchkriterium (Kap. 4.5.6) erfüllt wird.

Es soll daher untersucht werden, ob das Konzept der EA auf ein Verfahren zur Modellierung und Erzeugung von 3D-Stadtmodellen übertragen werden kann. Hierzu muss das Datenmodell den EA, den Ausgangsmodellen und der Stadtmodellierung genügen. Das allgemeine EA-Modell muss problemspezifisch analysiert, angepasst und erweitert werden.

„There is no absolutely best method but only the optimal choice under certain circumstances.“ [Yang u. a. 2004, Kap. 5]

Es wird ein erweiterbares Verfahren angestrebt, in das sowohl bereits bekannte als auch speziell neu entwickelte Methoden flexibel einfließen können. Durch die Nutzung unterschiedlicher Methoden aus den Bereichen der Geometrie, Photogrammetrie, Parameterschätzung und Informatik soll unter dem Dach der EA ein optimales Ergebnis erzielt werden.

Die vorliegenden Verfahren wurden vom Verfasser in das Softwareprodukt *3dw* umgesetzt, welches zur Evaluation diente und bereits erfolgreich als Produkt vertrieben wird (Kap. 5.4).

1.3 Gliederung und Aufbau

Diese Arbeit gliedert sich im wesentlichen in die vier Teile Bestandsaufnahme, Ausgangsdaten, Entwurf des Verfahrens und Evaluation, die in jeweils einem Kapitel beschrieben werden.

Nach der Einleitung werden in der *Bestandsaufnahme* in Kap. 2 zuerst vorhandene Verfahren der Stadtmodellierung untersucht. Die Verfahren sind thematisch geordnet und werden jeweils neutral vorgestellt und dann bezüglich der Problemstellung bewertet. Nach einer Übersicht modularer Verfahren folgt

eine Gesamtbewertung.

Der zweite Teil der Bestandsaufnahme stellt Konventionen und Standards vor und ordnet die Arbeit diesbezüglich ein.

Die *Ausgangsdaten* als Basis des Verfahrens werden in Kap. 3 nach Typ und Art gegliedert erörtert. Dabei werden jeweils nach einer allgemeinen Vorstellung die Besonderheiten untersucht und gezeigt, welche Informationen genutzt werden können.

Der *Entwurf des neuen Verfahrens* in Kap. 4 stellt den Kern der Arbeit dar. Als neuartiger Ansatz zur Lösung des komplexen Optimierungsproblems der 3D-Stadtmodellierung wird die bereits bei anderen Problemen bewährte Methode der Evolutionären Algorithmen (EA) auf die Aufgabenstellung übertragen. Nach einer Einführung in die EA wird gemäß den ermittelten Anforderungen ein geeignetes Datenmodell entwickelt sowie Bewertungskriterien betrachtet. In Kap. 4.4 wird das Modell der EA übertragen und geeignet erweitert. Die hierdurch nötige Spezialisierung der Variationsoperatoren wird anhand zahlreicher nach Typ geordneter Operatoren in Kap. 4.5 und Kap. 4.6 vorgenommen und deren lokale Verwendung gezeigt.

Die *Evaluation* erfolgt bei den jeweiligen Schritten in Kap. 4 und für zusammengesetzte Verfahren und das Gesamtsystem in Kap. 5. Es werden mehrere Testfälle und Beispiele aus der Praxis unterschiedlicher Komplexität vorgestellt und analysiert. Die Praxistauglichkeit des Verfahrens wird durch eine Liste der Anwender abgerundet.

Kap. 6 stellt Details der Implementation vor.

Abschließend werden in Kap. 7 die erreichten Ziele zusammengefasst und bewertet sowie mögliche Erweiterungen diskutiert.

Kapitel 2

Stadtmodellierung

Das folgende Kapitel stellt vorhandene Verfahren der 3D-Stadtmodellierung vor. Im zweiten Teil wird die vorliegende Arbeit in den Kontext der Geovisualisierung eingeordnet und es werden zugehörige Schnittstellen betrachtet. Das zu modellierende Stadtgebiet wird im Folgenden als *Szene* bezeichnet.

2.1 Vorhandene Verfahren

Im Folgenden werden vorhandene Verfahren neutral vorgestellt und dann bezüglich der hier behandelten 3D-Stadtmodellierung bewertet.

Es wird keine allgemein bewertende Aussage über die untersuchten Programme abgegeben, da diese teilweise für andere Aufgabenbereiche und für unterschiedliche Zielgruppen konzipiert und umgesetzt wurden und daher nicht allgemein vergleichbar sind.

2.1.1 CAD - Modellierwerkzeuge

Die ältesten computergestützten Verfahren zur Erzeugung von 3D-Modellen sind Werkzeuge zur Unterstützung manueller Tätigkeiten. Dies drückt sich in der Bezeichnung CAD (Computer Aided Design) aus und umfasst viele Programme, die mit immer umfangreicheren Funktionen die manuelle Dateneingabe erleichtern.

Beschreibung

Zum Entstehungszeitpunkt vieler CAD-Programme lag ihre Hauptanwendung im exakten technischen Zeichnen (Abb. 2.1a), weshalb viele dieser Programme

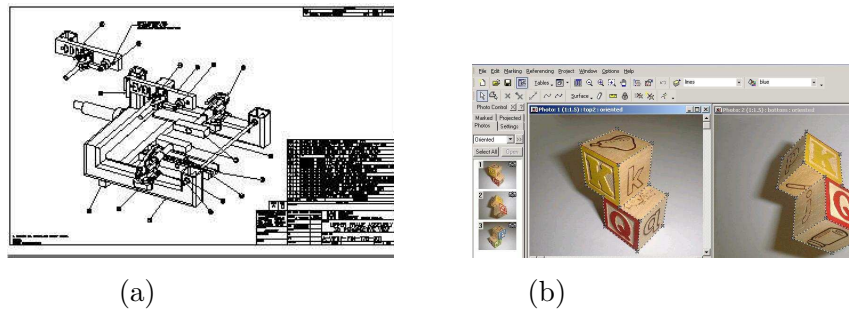


Abbildung 2.1: (a) Eine typische AutoCAD-Zeichnung und (b) ein Photomodeler-Projekt.

darauf spezialisiert sind. Bekannte Beispiele sind AutoCAD [Autodesk 2006] von Autodesk oder FelixCAD [FelixCAT GmbH].

Mit steigender Rechnerleistung hielt die Computergrafik Einzug in Werbespots und Kinofilme. Dazu entstanden Programme, die sich auf die photorealistische Darstellung virtueller Objekte spezialisierten und neben vielen Grundkörpern auch Texturen, Bewegungsmodelle und Beleuchtung berücksichtigen. Bekannte Beispiele sind Maya [Mahintorabi 2005; Silicon Graphics 2005], Blender (<http://www.blender3d.org/>, [Roosendaal u. Selleri 2004]) und 3D-Studio Max [Discreet 2006; Wendt 2001]. Trotz aller umfangreichen Hilfen blieben diese Programme CAD, also computergestützte Handarbeit.

Bewertung

Mit CAD können beliebige Szenen modelliert werden, jedoch ist dies mit umfangreicher Erfassungstätigkeit verbunden. Alle Objekte müssen manuell dreidimensional eingegeben werden, wobei bei existierenden Vorlagen die einzugebenden Daten erst erfasst werden müssen.

Beispielhaft müssen bei der Modellierung eines Kirchturmes erst verschiedene Längen und Winkel vor Ort ermittelt werden, um diese dann korrekt eintragen zu können. Dieser Aufwand ist für die untersuchte Aufgabe nicht vertretbar.

2.1.2 Geländemodellierer

Unter dieser Rubrik lassen sich einige Verfahren und Produkte zusammenfassen, die auf die Erfassung, Auswertung und Darstellung von digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen (DGM, DOM) und Landschaftsdaten spezialisiert

sind.

Es wurden u.a. das auf dem Visualization Data Explorer von IBM beruhende Open Source-Projekt OpenDX [OpenDX] sowie der Geländemodellierer Terragen der Firma Planetside (<http://www.planetside.co.uk/>) untersucht. Geländemodellierer ermöglichen die komfortable Erstellung virtueller Berglandschaften, unterstützen jedoch nicht oder nur minimal die Modellierung von Gebäuden und haben daher für die hier untersuchte Zielsetzung keine Relevanz.

2.1.3 Photogrammetrische Verfahren

Laut [Heipke 2005, Kap.1] ist Photogrammetrie die *„Kunst, Wissenschaft und Technologie zur Gewinnung zuverlässiger Informationen über Objekte der physischen Welt und der Umwelt durch Aufzeichnung, Messung und Interpretation von Bildern und digitalen Darstellungen davon, die durch berührungsfreie Sensorsysteme gewonnen wurden“*.

Die Photogrammetrie wird in die Bereiche Nahbereichsphotogrammetrie und Fernerkundung aufgeteilt. Die Fernerkundung liefert eine für die hier untersuchte Aufgabenstellung zu grobe Auflösung und ist nicht zur Modellierung einzelner Gebäude geeignet. Aufgrund der Vielzahl photogrammetrischer Methoden [Maas 1997] werden im Folgenden nur für die Zielsetzung relevante Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie betrachtet.

Inwieweit photogrammetrische Methoden in das Konzept dieser Arbeit integriert werden können, wird in Kap. 3.3.1.1 untersucht.

2.1.3.1 Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung [Triggs u. a. 2000] erwartet mehrere sich mindestens teilweise überlappende Bilder der zu erstellenden Szene. Es werden Punktkorrespondenzen angegeben und anhand der Bildkoordinaten der korrespondierenden Punkte durch eine Ausgleichsrechnung von Bündelblöcken deren Raumkoordinaten und somit echte 3D-Geometrie berechnet. Das 3D-Modell kann durch mindestens drei vorgegebene Punkte in ein gegebenes Koordinatensystem transformiert oder durch eine Längenangabe richtig skaliert werden. Die nötige Handarbeit besteht einerseits in der Aufnahme oder Beschaffung geeigneter Bilder und andererseits der Digitalisierung der korrespondierenden (auch: *homologen*) Geometrie. Alle Maße werden den Bildern entnommen. Durch die Zuordnung der Bildpunkte zu Raumpunkten können benötigte Texturen automatisch den Bildern entnommen und entzerrt werden.



Abbildung 2.2: Canoma - Geometrieauswahl

2.1.3.1.1 Photomodeler Das Programm Photomodeler von Eos Systems [Eos Systems] ist nach eigenen Angaben Marktführer auf dem Gebiet der Rekonstruktion von 3D-Objekten aus Bilddaten. Es wurden die Versionen 3.0 und 5.0 (Abb. 2.1b) getestet.

Beschreibung Zuerst werden Bilddateien in den üblichen Bitmap-Formaten importiert und kameraspezifische Daten erfasst. Danach kann in den Bildern jeweils 2D-Geometrie (Punkte, Linien, Flächen) digitalisiert werden. Jedes Geometrieobjekt sollte in mehreren Bildern vorkommen und kann in einem weiteren Schritt aufeinander referenziert werden. So aufbereitete Projekte können berechnet, als 3D-Modell betrachtet und als VRML exportiert werden.

Bewertung Photomodeler eignet sich zur Modellierung einzelner Objekte anhand mehrerer Bilder. Es ist jedoch irritierend, dass beim Erstellen eines Projekts die zu erwartende Gesamtgröße der Szene in Metern, der Kamertyp (Digital, Analog, Video, Scanner, ...) und die verwendete Brennweite fest eingegeben werden müssen. Bei der Wahl von „flexible Brennweite“ wird der Nutzer aufgefordert, nur eine Brennweite zu nutzen und diese anzugeben. Weitere Einstellungen folgen.

Neben diesen Einschränkungen fällt auf, dass nur Bitmapbilder als Ausgangsdaten akzeptiert werden. Es können also weder Grundrisse, existierende Modelle noch sonstige Zusatzinformationen und Geometrieattribute verwendet werden.

Photomodeler ist konzeptionell auf die Modellierung einzelner Objekte ausgelegt und beinhaltet keine Konzepte zur Erstellung ganzer 3D-Stadtmodelle.

2.1.3.1.2 Canoma Canoma [MetaCreations 1999] wurde von MetaCreations entwickelt und vertrieben, von Adobe aufgekauft und dann eingestellt. Vollversionen sind nur noch über ebay und die letzte freie Testversion gelegentlich auf Freeware-Seiten zu finden. Weitere Informationen finden sich unter <http://www.canoma.com>.

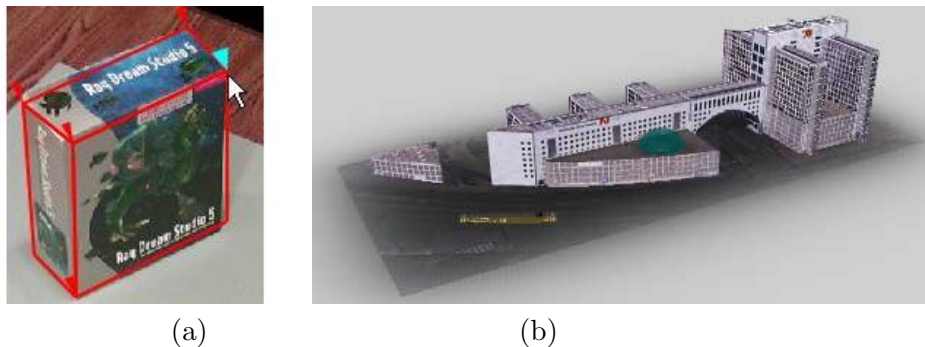


Abbildung 2.3: Canoma - (a) Ein einfaches und (b) ein sehr komplexes Projekt

Beschreibung Canoma baut auf das Setzen dreidimensionaler Primitive wie Quader, Pyramiden oder Prismen (Abb. 2.2) und deren korrektes Einpassen in folgende Bilder auf. Dies ist recht komfortabel in der Eingabe und Canoma erhält hierdurch viele zur 3D-Berechnung hilfreiche Informationen. In Abb. 2.3b finden sich neben Quadern auch ein Torbogenelement und Prismen mit dreieckiger Grundfläche.

Es kann eine Bodenplatte untergelegt, die Szene berechnet, in der 3D-Sicht betrachtet und als VRML exportiert werden. Texturen werden automatisch aus den Bildern entnommen.

Bewertung Es wurde die neueste Testversion [MetaCreations 1999] geprüft. Canoma ist zur schnellen Modellierung einfacher und aus geometrischen Primitiven zusammengesetzten Szenen geeignet und erfreut durch angenehme Handhabung.

Neben dem technischen Hindernis der eingestellten Entwicklung wurde auch hier ein anderes Ziel verfolgt: Anwendungsfeld ist die schnelle Modellierung geometrischer Gebilde anhand von Bildern. Wie bei Photomodeler (Kap. 2.1.3.1.1) existiert keine Möglichkeit zur Einbindung vorhandener 3D-Modelle, Grundrisse, semantischer Informationen, Einpassungsstützpunkte und sonstiger Vorgaben.

2.1.3.1.3 Magan Das Photogrammetrie-Paket Magan der Firma Offset [Offset 2006] nimmt einen ähnlichen Weg wie Canoma. Zahlreiche Basiskörper (Abb. 2.4a) stehen zur Nachmodellierung der Bilddaten zur Verfügung. Diese werden in den Bildern digitalisiert und miteinander in Beziehung gesetzt. Die Geometrie wird anhand eines Baumes strukturiert (Abb. 2.4b links).

Wie an den Basiskörpern ersichtlich, liegt der Schwerpunkt bei technischen



Abbildung 2.4: Magan - Die (a) Basiskörper und (b) Geometriestruktur mit 3D-Ansicht.

Apparaturen, Röhren- und Maschinensystemen. Es ist keine spezielle Unterstützung von Stadtmodellen vorgesehen und die entsprechenden Methoden (siehe vorherige Abschnitte) fehlen daher.

2.1.3.1.4 COP-Bilder In [Appel 2005] wird ein Verfahren zur Integration zweidimensionaler technischer Zeichnungen in Bilder zu je einem „registrierten orthographischen und perspektivischen Bild“ (COP-Bild) entwickelt. Spezielle Orientierungs- und Rekonstruktionsmethoden liefern nach erfolgter Bündelausgleichung das gewünschte 3D-Modell.

Das Verfahren eignet sich zur Erfassung kompakter Industrieanlagen, ist jedoch nicht für 3D-Stadtmodelle ausgelegt.

2.1.3.1.5 Leica Photogrammetry Suite Die Photogrammetry Suite von Leica ist noch in der Entwicklung (Stand 2005), es sind jedoch schon einige Vorabinformationen unter <http://gis.leica-geosystems.com/Products/LPS/> abrufbar. Eine Test- oder Vollversion gab es zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht.

Laut Aussage des Programmherstellers soll Bildverarbeitung, Photogrammetrie und 3D-Ansicht in einem Programm zusammengefasst sein. Trotz zahlreicher Beschreibungen findet sich jedoch kein Hinweis auf eine Importmöglichkeit von Grundrissen, 3D-Modellen, Attributverwaltung oder Ähnlichem.

Darüber hinausgehende Informationen waren nicht erreichbar [Leica-Vertreter u. Weitzig 2004].

2.1.3.2 Stereoskopie

Die Stereoskopie gewinnt 3D-Informationen aus Bilderpaaren anhand leicht versetzter Augenpunkte. Die speziell hierfür entwickelte Stereokamera nimmt

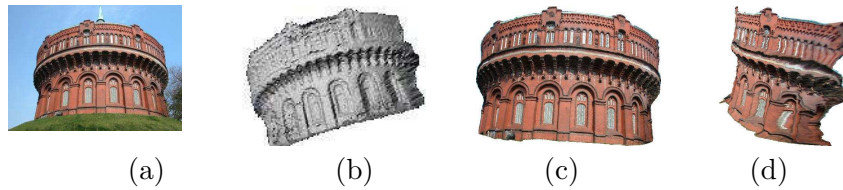


Abbildung 2.5: MIP Uni Kiel - (a) Ein Originalbild, (b) eine Tiefenkarte und die 3D-Ansicht des erzeugten Modells (c) aus Photoperspektive und (d) von der Seite.

beide Halbbilder zeitgleich auf.

2.1.3.2.1 MIP Uni Kiel Das Institut für Informatik und Praktische Mathematik der Universität Kiel hat in seiner Abteilung Multimediale Informationsverarbeitung (MIP = Multimedia Information Processing) ein System zur Rekonstruktion von 3D-Modellen aus Bildern entwickelt [Multimedia Information Processing 2003].

Beschreibung Es werden Bildpaare mit jeweils 5 bis 10 Grad Aufnahmewinkelunterschied epipolar¹ entzerrt. Mit einer Stereokorrespondenzanalyse werden Tiefenkarten der Bilder berechnet (Abb. 2.5b). Abschließend werden die Tiefenkarten in ein 3D-Oberflächengitter umgerechnet und mit einer Bildtextur versehen (Abb. 2.5c,d).

Bewertung Die vorhandenen Beispiele beeindruckten auf den ersten Blick, zeigen jedoch bei näherer Betrachtung zugleich die Grenzen des Verfahrens. Durch die Tiefenkarten und deren Umwandlung in ein Drahtgittermodell entsteht selbst bei den übersichtlich wirkenden Beispielen ein immenses Datenaufkommen. Die nach mehreren Stunden erfolgte Ausgabe zu Abb.2.5a ergibt genau ein Polygon mit 11420 Punkten.

Trotz der übermäßig feinen Auflösung des erzeugten Polygonnetzes ist eine korrekte Darstellung auf das Umfeld der Kameraposition, deren Tiefenkarte verwendet wurde, beschränkt. Bei größeren Winkeländerungen ergeben sich starke Verzerrungen, die beispielhaft in Abb.2.5d zu sehen sind.

Aufgrund des umfangreichen Datenvolumens, der Winkeleinschränkung bei

¹Die *Epipolarometrie* beschreibt die geometrischen Zusammenhänge zwischen dem Augenpunkt der Kamera, Punkten im Raum und ihren Abbildungen auf Bildflächen (Kap. A.2.4, [Luong u. a. 1993, Kap. 2.2], [Luong u. Faugeras 1993]).

Aufnahme und Ergebnis sowie des Nichtvorhandenseins weiterer Strukturen und Methoden zur Erstellung großer und komplexer Szenen eignet sich das Verfahren hauptsächlich zur Erfassung von kleinen Ausschnitten oder Einzelobjekten.

Vorteilhaft ist die unkomplizierte Modellierung stark unebener Oberflächenstrukturen.

2.1.3.3 Bewertung

Besonders bei kompakten Objekten liefern Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie in einigen Fällen sehr gute Ergebnisse. Sie bieten sich jedoch, zusätzlich zu den jeweiligen verfahrenstypischen Nachteilen, wegen der großen Menge benötigter Photos, dem Finden von Punktkorrespondenzen und der Instabilität bei langen Sequenzen [Gonzo u. a. 2004, Kap. 2.3] nicht bei größeren Szenen an.

2.1.4 Grundrissbasierte Verfahren

Aus Grundrissen und Zusatzinformationen werden Klötzchenmodelle erzeugt.

2.1.4.1 ArcView 3D Analyst

Die 3D-Geovisualisierungs-Komponente „ArcView 3D Analyst“ von ESRI ermöglicht ein Aufziehen von Grundrissinformationen auf ein Geländemodell (Abb. 2.6a). Durch Höheninformationen von Objekten kann hieraus schnell ein einfaches Klötzchenmodell erzeugt werden (Abb. 2.6b).

Es liegt demnach ein LoD 1 vor, welcher für die untersuchte Aufgabenstellung zu wenig Details besitzt, jedoch gut als Ausgangsmodell nutzbar ist.

2.1.5 3D-Scanner

Als 3D-Scanner werden technische Systeme bezeichnet, die durch Abtastung mit einem Laserstrahl und Auswertung seiner Laufzeit ihre Umgebung dreidimensional erfassen.

2.1.5.1 Leica HDS

Leica hat auf der Intergeo 2004 das „Leica High-Definition Surveying (HDS)“ als einziges Leica-Verfahren zur 3D-Erfassung genannt und vorgestellt.

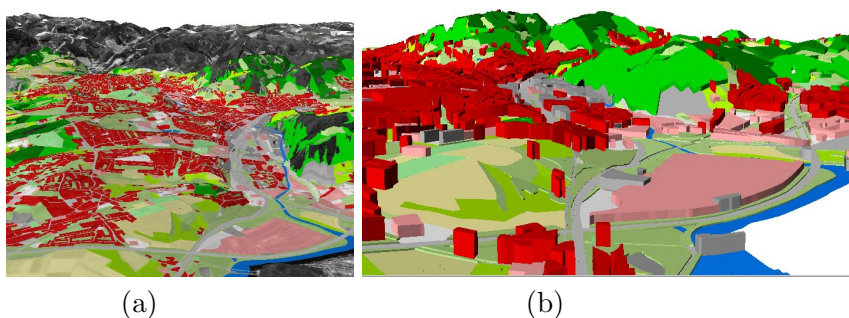


Abbildung 2.6: ArcView 3D Analyst: Grunddaten auf (a) einem Geländemodell und (b) mit Objekthöhe

Beschreibung Beim HDS [Leica Geosystems 2004] wird ein leistungsfähiger 3D-Scanner (z.B. Leica HDS3000, HDS2500 oder HDS4500) über einem Vermessungspunkt aufgestellt und gestartet. Die Umgebung wird in einer gewählten Auflösung mit einem Laserstrahl abgetastet. Durch eine Laufzeitmessung oder das Phasenverfahren (HDS4500) wird die Entfernung des aktuellen Punktes bestimmt. Resultat ist eine Punktwolke, die durch ein vom 3D-Scanner aus aufgenommenes Bild noch texturiert werden kann.

Bewertung Mit Leica HDS lassen sich komplexe 3D-Strukturen schnell und hochauflösend erfassen. Die generierten Punktwolken sind jedoch unhandlich in der Weiterverarbeitung und lassen sich nicht einfach zu texturierten Elementen zusammenfassen. Diese durch spezielle Auswertesoftware unterstützte Modellierung zu sinnvollen Geoobjekten beanspruchte z.B. in [Böhm u. Schuhmacher 2005] 73% des Gesamtarbeitsaufwandes.

Zu ignorierende Hindernisse (Bäume, Autos, ...) verfälschen das Ergebnis und sind nur aufwändig entfernbar. Die texturierte Darstellung ist nur aus größerer Entfernung und bei größerem Blickwinkel zufrieden stellend [Böhm u. Schuhmacher 2005] und es wird mit dem 3D-Scanner teure Spezialhardware benötigt. Das Zusammenführen mehrerer Punktwolken ist durch spezielle Messmarken möglich.

2.1.5.2 Verarbeitung der Punktwolken

[Vosselman u. a. 2004] untersucht verschiedene Verfahren zur Weiterverarbeitung der durch Laserscanning entstandenen Punktwolken. Selbst komplexe Strukturen wie Bäume lassen sich relativ gut rekonstruieren, jedoch hängt

der jeweils optimale Algorithmus von dem untersuchten Problem ab [Vosselman u. a. 2004, Kap. 5.4] und die bei Gebäuden üblichen harten Kanten sind schlecht aus umgebenden Punktwolken approximierbar.

2.1.6 Weitere monolithische Verfahren

Im Folgenden werden einige weitere nicht-modulare Verfahren angeschnitten.

2.1.6.1 IMAGINE Software Suite

ERDAS Software wurde von Leica aufgekauft und wird nun auch von ESRI angeboten.

Die ERDAS IMAGINE Software Suite [ERDAS a] behandelt hauptsächlich die Erstellung von Karten durch Luftbilder und bietet dazu Funktionen zum Bearbeiten, Entzerren und Zusammenfügen der Einzelteile. Methoden zur 3D-Stadtmodellierung sind nicht zu finden.

2.1.6.2 Photogrammetry Product Suite, Stereo Analyst

Die ERDAS Photogrammetry Product Suite [ERDAS b] enthält neben diversen Formatfiltern und Anzeigemodulen hauptsächlich Komponenten zur photogrammetrischen Behandlung von Luft- und Satellitenbildern sowie das auch einzeln von Leica beziehbare Programm Stereo Analyst.

Mit Stereo Analyst können Modelle als Stereobilder angezeigt und mit einer passenden Shutterbrille betrachtet werden, es dient jedoch auch der Datenerfassung. Im Benutzerhandbuch [Curry 2003] taucht, neben diversen hier nicht relevanten Modulen, Photogrammetrie nur in Bezug auf Luftbilder und Geländemodelle auf. Ein Verfahren zur Berechnung von 3D-Stadtmodellen aus Fassadenphotos, die zum Erreichen der gewünschten Auflösung nötig sind, ist nicht vorhanden. Dies wurde in [Leica-Vertreter u. Weitzig 2004] bestätigt.

2.1.7 Verfahren mit Monte-Carlo-Techniken

Monte-Carlo-Algorithmen liefern Näherungslösungen für eine Vielzahl komplexer Probleme. Indem bis zu einer festen Wahrscheinlichkeit eine falsche Lösung akzeptiert wird, können einige Aufgaben sehr effizient und, durch mehrfaches Wiederholen, mit kleiner Fehlerwahrscheinlichkeit gelöst werden.

In [Früh u. Zakhor 2004] wird ein Verfahren beschrieben, bei dem ein horizontaler und ein vertikaler Laserscanner auf einem Fahrzeug montiert sind.

Die Daten werden ununterbrochen während der Fahrt aufgezeichnet. Der vertikale Scanner erfasst die Gebäudefassaden, der horizontale Scanner dient zur Verfolgung der Fahrzeugbewegung. Da der ermittelte Weg durch Ungenauigkeiten nach einiger Zeit abdriftet, wird bei der Nachverarbeitung eine Korrektur gegen ein Luftbild oder digitales Oberflächenmodell durchgeführt. Dazu wird der erfasste Weg mit MCL (Monte Carlo Localization) [Fox u. a. 1999] anhand markanter Kanten im Luftbild (bzw. im Oberflächenmodell) korrigiert. MCL ist ein Spezialfall der wahrscheinlichkeitstheoretischen Markov-Lokalisierung [Burgard u. a. 1998].

Die Bestimmung der genauen Fahrzeugposition zu den vertikalen Scans ergibt eine 3D-Punktwolke, die zu Flächen trianguliert werden kann.

Das Verfahren ermöglicht eine schnelle Erfassung von Gebäudevorderseiten ganzer Stadtteile. Jedoch werden genau die durch den vertikalen Scanner erfassten Objekte modelliert und daher Hindernisse wie Autos oder Bäume halbseitig abgebildet und ihre Schatten als Löcher in der Fassade wahrgenommen [Früh u. Zakhor 2004, S. 22].

Bei der untersuchten Zielsetzung spielt die Nutzung heterogener Ausgangsmodelle in einem gemeinsamen Pool eine wichtige Rolle. Durch das Konzept der Individuen bei den EA, welche sich durch ihre Gene und Fitnessfunktionen auszeichnen (Kap. 4.1), können diese gut abgebildet werden. Weiterhin können verschiedene und voneinander unabhängige Operatoren gut in die EA eingebracht werden (Kap. 4.5).

Die Abbildung heterogener Ausgangsmodelle einerseits und verschiedener Operatoren andererseits unter einem gemeinsamen Dach lässt sich bei den EA besser umsetzen als in anderen wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahren. Weiterhin können bei den EA über viele Schritte und Operatoren hinweg alternative Wege verfolgt werden.

Der allgemeine und flexible Ansatz der EA ermöglicht die Integration zahlreicher weiterer Konzepte, so dass Verfahren wie in [Früh u. Zakhor 2004] als Operatoren aufgenommen werden können.

2.1.8 Modulare Verfahren

Einige aktuelle Entwicklungen haben den Vorteil multipler Ausgangsmodelle erkannt und, meist problembezogen, Kombinationen vorhandener Verfahren entwickelt. In [Tunc u. a. 2004] wird beispielsweise erst ein Gebäude mit Fassadenphotografien in Photomodeller [Eos Systems] erstellt, um dann exportiert, nach ArcView importiert und dort manuell georeferenziert und so auf einen Grundriss eingepasst zu werden.

Die Verbindung von Photogrammetrie mit Laserscanner-Punktwolken wird in

[Forkuo u. King 2004] untersucht. [Mahmoud 2004] passt 3D-Objekte in Orthophotos ein. [Gonzo u. a. 2004] geht weiter und nutzt zur Modellierung historischer Schlösser einen Grundriss, Fernphotogrammetrie (Bilder vom Hubschrauber), Nahbereichsphotogrammetrie und Laserscann-Daten, fügt diese aber nach eigenem Ermessen in einem linearen Ablauf zusammen. Dort wird auf Methoden zum Zusammenfügen von Modellen, die aus verschiedenen Techniken entstanden sind, in [Flack u. a. 2001] verwiesen.

Wie bei vielen weiteren Beispielen finden sich in [Flack u. a. 2001] zwar gute Teilkonzepte, doch das eigentliche Zusammenführen erfolgt auf manueller Basis anhand eines verzweigungsfreien strikten Ablaufs und betrachtet weder mögliche Widersprüche, Bewertungen noch Hypothesen. Bei CyberCity Modeler [CyberCity AG 2002] sind Ablauf und erwartete Eingangsdaten ähnlich starr und spezialisiert und die Kosten von ca. 90 „bis zu 100 € je Gebäude ohne Kosten für die Software und Korrekturen (lt. Herstellerangaben)“ [Koppers 2002, S. 105] recht hoch.

[Yang u. a. 2004] vergleicht 12 verschiedene DTM-Interpolationsmethoden, um im Fazit festzustellen: „*There is no absolutely best method but only the optimal choice under certain circumstances.*“ [Yang u. a. 2004, Kap. 5]. Daher bietet es sich an, viele und durchaus widersprüchliche Methoden unter einem Dach zu verbinden.

2.1.9 Gesamtbewertung

Die unter „Bündelblockausgleichung“ in Kap. 2.1.3.1 betrachteten Systeme kommen der untersuchten Aufgabenstellung am nächsten. Jedoch sind, neben diversen individuellen Einschränkungen, bezüglich der untersuchten Aufgabenstellung nachfolgend beschriebene Probleme erkennbar.

2.1.9.1 Monolithisch oder Modular

Übliche Verfahren bestehen aus einem monolithischen Algorithmus, der die Eingabedaten in einer fest vorgegebenen Form verarbeitet. Daher haben diese Verfahren ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Sogar die in Kap. 2.1.8 vorgestellten „modularen Verfahren“ können wegen ihres festgelegten Ablaufs als monolithisch betrachtet werden.

Um die Vorteile unterschiedlicher Ansätze nutzen zu können, müssen diese modular unter einem Dach zusammengefasst und ihre verschiedenen Ergebnisse sinnvoll weiterverarbeitet und zu einem umfassenden Zielmodell überführt werden. Dies findet sich in keinem der untersuchten Verfahren.

2.1.9.2 Nutzung vorhandener Modelle

Im Kontext der 3D-Stadtmodellierung existiert üblicherweise bereits eine heterogene Datengrundlage über die zu modellierende Szene, deren Nutzung den Arbeitsaufwand verringern und die Ergebnisqualität steigern kann.

Neben der rein technischen Umsetzung verschiedener Importfilter müssen Datenmodell und Berechnungsverfahren auf die Zusammenführung heterogener Ausgangsmodelle ausgelegt sein. Dies ist in keinem der untersuchten Verfahren hinreichend umgesetzt.

2.1.9.3 Typübergreifende Korrespondenzen

Die Zusammenführung von Ausgangsmodellen verschiedenen Typs (z.B. 2D-Grundriss, 3D-Modell, Fassadenphoto) erfordert ein Konzept, um typ- und dimensionsübergreifend Beziehungen setzen und bearbeiten zu können. Hierzu müssen geeignete und ineinander greifende Module geschaffen und das Datenmodell entsprechend entworfen werden. Durch Korrespondenzen werden heterogene Ausgangsmodelle zu einer zusammenhängenden Berechnungsgrundlage verbunden. Diese Methodik findet sich in keinem der untersuchten Verfahren.

2.1.9.4 Semantische Informationen

Die meisten Systeme verwalten keine semantischen Informationen. Einige wenige schleifen diese als Zusatzinformationen mit, nutzen sie jedoch nicht bei der Berechnung der Szene.

Einige Attribute beinhalten jedoch Informationen über zugehörige Geometrie. So können z.B. bei einer als Firstlinie gekennzeichneten Linie oder einer als Grundriss deklarierten Fläche Aussagen über ihre Ausrichtung und relative Anordnung zu anderer Geometrie gemacht werden.

Besonders bei lücken- oder fehlerhaften Ausgangsdaten ist es daher sinnvoll, vorhandene semantische Informationen in die Berechnung und Bewertung des Zielmodells einzubeziehen. Hierzu sei auf die Hypothesen in Kap. 4.6 verwiesen.

2.1.9.5 Bewertungskriterien

Einige Datenquellen sind zuverlässiger und genauer als andere. Selbiges gilt für die modular eingebundenen Berechnungsalgorithmen. Durch die Vergabe und Auswertung von passenden Qualitätskriterien werden solche Kenntnisse genutzt und unterstützen eine Verbesserung des Zielmodells.

Die in Kap. 2.1.8 vorgestellten modularen Verfahren können diese Methodik

nur ansatzweise nutzen, da aufgrund des starren Ablaufs nicht umfangreich auf aus der Bewertung folgende Konsequenzen (z.B. Änderung der Reihenfolge der Module) eingegangen werden kann. Andere Verfahren nutzen diese Methodik nicht, da sie nur eine Datenquelle und einen Algorithmus verwenden.

2.2 Einordnung in die 3D-Geovisualisierung

Bei der Entwicklung neuer Verfahren müssen vorhandene Konzepte, Abläufe, Infrastrukturen und Schnittstellen berücksichtigt werden. Dies ist wichtig für die spätere Verbindung verschiedener Verfahren. Daher wird im Folgenden die vorliegende Arbeit in die 3D-Geovisualisierung eingeordnet.

2.2.1 Allgemeine Betrachtung der 3D-Geovisualisierung

Im Folgenden wird die 3D-Geovisualisierung umrissen und anhand des OGC²-Modells der Visualisierungspipeline ein modularer Gesamtprozess betrachtet.

2.2.1.1 Definition

„[...] ,alle Nachrichten über reale Erscheinungen und über abstrakte Sachverhalte werden für die Möglichkeiten eines optischen Kanals in einer Weise aufbereitet und präsentiert, die man insgesamt als Visualisierung (1.5.2) bezeichnet.“ [Hake u. a. 2002, Kap. 1.2.5]

Die Aufbereitung der Daten wird im folgenden auch als *Modellierung*, die Darstellung als *Rendern* bezeichnet. Im referenzierten Absatz wird Visualisierung in die drei Stufen Modellierung („Formalisierung und Realisierung“), Darstellung und Wahrnehmung und abschließend die individuelle Auswertung anhand eines personenspezifischen Vorstellungsmodells eingeteilt. Durch die Aufbereitung und Darstellung der Daten soll ein Erkenntnisgewinn ermöglicht werden. Als Spezialgebiete der Visualisierung gelten u.a. die Geodaten-Visualisierung, die Kartographie und die Computer-Grafik, welcher als modernes Untergebiet die Virtuelle Realität (VR) zugeordnet ist, die *„eine interaktive Bewegung des Anwenders in virtuellen (scheinbaren) 3D-Räumen (Cyberspace)“* [Streit 2004, Kap. 1] ermöglicht.

²Das Open Geospatial Consortium (OGC) ist eine Organisation mit dem Ziel der Schaffung allgemein gültiger Standards im Bereich der Geodatenverarbeitung [Open Geospatial Consortium].

Es wird generell zwischen den zwei Phasen Modellierung und Rendern unterschieden. Als *Modellierung* gilt die Erfassung, Zusammenstellung und Vorbereitung der darzustellenden Daten, während die endgültige Ausgabe z.B. auf einen Bildschirm, einen Drucker oder als Rasterbild als *Rendern* bezeichnet wird.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Problem der Modellierung bei 3D-Stadtmodellen.

2.2.1.2 Vor- und Nachteile

Durch virtuelle 3D-Stadtmodelle ist ein besseres Verständnis räumlicher Zusammenhänge möglich. Das 3D-Stadtmodell kann aus verschiedenen Perspektiven und Entfernungen betrachtet und durchwandert werden (Virtual Reality) sowie als Grundlage unterschiedlicher Berechnungen und Darstellungen dienen. Die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten wurden in Kap. 1.1 betrachtet. Entscheidender Nachteil ist die meist aufwändige Erfassung, die mit dieser Arbeit durch einen neuartigen Ansatz entlastet werden soll.

2.2.2 Visualisierungspipeline

In [May u. a. 2003], [Schmidt u. a. 2003] und [Kolbe 2004] werden Architekturen für eine im Netzwerk verteilte 3D-Geovisualisierung beschrieben. Auch wenn das in dieser Arbeit betrachtete Verfahren nicht speziell für Netzwerke ausgelegt ist, so gelten doch ähnliche Regeln für die Verzahnung verschiedener Arbeitsschritte und Verfahren. Die Motivation liegt in der Aufteilung des Arbeitsprozesses in einzelne Module mit definierten Schnittstellen, so dass diese örtlich und besonders programmtechnisch getrennt voneinander ablaufen und flexibel miteinander kombiniert werden können.

Das OGC-Modell des Visualisierungsprozesses ist in Abb. 2.7a dargestellt und nutzt nur eine Datenquelle. Da die vorliegende Arbeit mehrere heterogene Ausgangsmodelle zeitgleich verarbeiten soll, erfolgt an dieser Stelle eine entsprechende Erweiterung. Diese Erweiterung wurde bereits in [Kolbe 2004, Kap.2] als Möglichkeit der Komponentenstruktur der Visualisierungspipeline genutzt. Abb. 2.7b stellt das erweiterte Modell dar. Es wurde eine weitere Ebene im Ablauf ergänzt, die die einzelnen Ausgangsmodelle vom Ursprungsformat in die Menge der Ausgangsmodelle als Segmente (Abb. 2.7b, Segments) überführt, dort eine Veredelung ermöglicht und durch EA das Zielmodell (Abb. 2.7b, Features) erreichen lässt.

Ein *Segment* ist ein für die 3D-Stadtmodellierung in dieser Arbeit spezialisiertes Individuum der EA (Kap. 4.1).

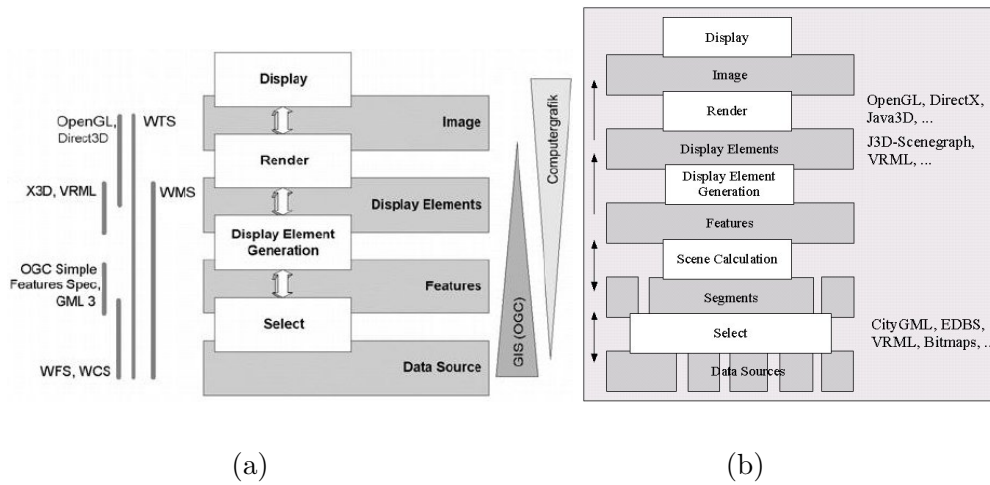


Abbildung 2.7: (a) Das OGC-Modell des Visualisierungsprozesses und (b) die hier erweiterte Variante

Die Ausgangsmodelle als Segmente besitzen noch ihre lokalen Koordinatensysteme und quellspezifischen Inhalte, können aber durch eine erweiterte Struktur miteinander in Beziehung gesetzt werden. Das Zielmodell besitzt dann nur ein einheitliches Koordinatensystem.

Wird die Datenselektion zu Segmenten und deren folgende Zusammenführung durch Veredelung und EA als ein komplexer Auswahlvorgang betrachtet, so entspricht das verwendete Modell dem OGC-Modell.

2.2.3 Schnittstellen

Adapter zur Ein- und Ausgabe von Daten an verschiedenen Stellen der Visualisierungspipeline ermöglichen erst den flexiblen Einsatz von Programmmodulen. Normierte Schnittstellen ermöglichen den Datenaustausch zwischen verschiedenen Anwendungen und sind für eine gebiets- und herstellerunabhängige Datenverarbeitung erforderlich [Kolbe 2004].

Im Folgenden werden 3D-Schnittstellen betrachtet und auf ihre konkrete Nutzbarkeit untersucht.

2.2.3.1 VRML und X3D

Die „Virtual Reality Modeling Language“ (VRML) wurde 1995 von SGI als 3D-Beschreibungssprache für das Internet eingeführt, die zusätzlich zur statischen

Geometrie auch Beleuchtung, Animationen, Verknüpfungen und grafikspezifische Zusatzinformationen, wie z.B. Blickpunkte, enthalten kann.

VRML wurde 1997 als ISO-Standard 14772 festgeschrieben [Web3D Consortium 1997] (VRML97) und weiter über VRML99 zum abwärts kompatiblen und leistungsfähigeren Nachfolger X3D [Web3D Consortium 2004] entwickelt und als ISO-Standard (19775 bis 19777) definiert.

VRML97 hat sich gut verbreitet und als Austauschformat von 3D-Modellen etabliert. Seine Nachfolger konnten sich noch nicht durchsetzen (Stand 2005).

Vorteile Die große Verbreitung und Unterstützung von VRML ist ein entscheidender Vorteil, weshalb es sich als 3D-Austauschformat etabliert hat. Die Normierung als ISO-Standard sichert die plattformübergreifende Kompatibilität. Weiterhin existieren mehrere kostenlose und gut verfügbare Anzeigemodule, u.a. als Browser-Plugin, die ein einfaches Betrachten einer VRML-Datei ohne aufwändige Spezialsoftware ermöglichen.

Nachteile Nachteilig bei der Bearbeitung von GIS-Daten ist, dass VRML rein grafikorientiert ist und keine semantischen Informationen vorsieht (siehe Kap. 2.2.3.3).

2.2.3.2 CityGML

CityGML [Kolbe u. Gröger 2003; Kolbe u. a. 2005] ist eine im Rahmen der SIG3D (Special Interest Group 3D) der GDI-NRW (Geodateninfrastruktur NRW) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn entwickelte Erweiterung des GML3-Schemas (siehe Kap. 3.2) unter Nutzung des Geometriestandards ISO 19107. Es ist speziell zur Abbildung von 3D-Stadtmodellen in mehreren LoDs und mit zusätzlichen semantischen Informationen ausgelegt und daher gut für die untersuchte Aufgabe geeignet.

Nachteilig ist die zum Zeitpunkt der Arbeit geringe Verbreitung und Unterstützung von CityGML.

Abb. 2.8 zeigt ein einfaches CityGML-Modell, von dessen Quelltext ein markanter Ausschnitt dargestellt ist.

2.2.3.3 SG-VRML

SG-VRML (SupportGIS-VRML) ist eine im Rahmen dieser Arbeit in Kooperation mit der Firma CPA Geo-Information entworfene Erweiterung von VRML.

```

<Building gml:id="Geb0815">
  <externalReference>
    <informationSystem>http://www.adv-online.de</informationSystem>
    <externalObject> <!-- Verweis auf ALKIS -->
      <uri>urn:adv:oid:DEHE123400007001</uri>
    </externalObject> </externalReference>
  </function>31001_1000</function>
  <yearOfConstruction>1985</yearOfConstruction>
  <roofType>3100</roofType>
  <lod2SolidProperty> <gml:Solid srsName="urn:adv:crs: ETRS89_3GK2-h">
    <gml:exterior><gml:CompositeSurface> <gml:surfaceMember>
      <TexturedSurface orientation="+> <gml:baseSurface>
        <gml:Polygon> <gml:exterior> <gml:LinearRing>
          <gml:pos srsDimension="3">1.0 1.0 0.0</gml:pos>
          <gml:pos srsDimension="3">3.0 1.0 0.0</gml:pos>
          <gml:pos srsDimension="3">3.0 1.0 1.5</gml:pos>
          <gml:pos srsDimension="3">2.0 1.0 2.5</gml:pos>
          <gml:pos srsDimension="3">1.0 1.0 1.5</gml:pos>
          <gml:pos srsDimension="3">1.0 1.0 0.0</gml:pos>
        </gml:LinearRing> </gml:exterior> </gml:Polygon>

```



Abbildung 2.8: Ein einfaches CityGML-Modell: Links ein markanter Teil des Quelltextes, rechts die 3D-Darstellung

Durch Einflechtung sämtlicher Zusatzinformationen als spezielle Kommentare wird eine vollständige Abwärtskompatibilität zu VRML gewährleistet. Insbesondere werden Flächen als Bodenkachel, Seitenwand oder Dach gekennzeichnet und zu Gebäuden mit zugehörigen semantischen Gebäudeinformationen zusammengefasst. Durch Übergabe der eindeutigen Gebäude-Objektnummer sowie einer eindeutigen Seitenwand-Bezeichnung bleibt die Beziehung zum GIS erhalten. Dies ermöglicht eine Fortführung der 3D-Modelle bei einer Fortführung der Ausgangsdaten.

Nachteilig ist die geringe Verbreitung des Formates sowie seine bezüglich der semantischen Informationen eingeschränkte beziehungsweise stark spezialisierte Struktur.

2.2.3.4 WTS, WFS, W3DS

Der *Web Terrain Service* (WTS) ist eine Spezifikation der OGC zum Client-Server-basierten Geodaten austausch und in der Fassung 0.5 der OpenGIS-Spezifikation in [Lieberman u. Sonnet 2003] definiert. Er dient der Abfrage von dreidimensionalen Geländeausschnitten.

Der *Web Feature Service* (WFS) dient zur Client-Server-basierten Datenabfrage bzw. -bearbeitung.

Der als OGC Discussion Paper [Quadt u. Kolbe 2005] verabschiedete *Web 3D Service* (W3DS) dient dazu, gewünschte 3D-Geodaten von einem geeigneten Client am Web3D-Server abfragen zu können.

2.2.3.5 OpenGL, DirectX, Java3D und JOGL

Der ursprünglich von SGI³ kommende plattformunabhängige Grafikstandard *OpenGL* wird seit 1992 vom OpenGL Architecture Review Board festgelegt, dem einige namhafte Computerfirmen angehören, und ist auf performante 3D-Visualisierung optimiert. Die meisten Grafikkarten unterstützen hardwareseitig einen OpenGL-Basisbefehlssatz, weitere Befehle werden vom Grafikkartentreiber emuliert. Für 3D-Sound sorgt OpenAL.

OpenGL ist im professionellen Bereich führend, wurde jedoch bei 3D-Spielen durch die von Microsoft entwickelte Alternative *DirectX* verdrängt, die neben Grafik noch Sound, spezielle Eingabegeräte (z.B. 3D-Joystick, Lenkrad), Netzwerkverbindungen und Multimedia-Streaming unterstützt. DirectX existiert nur für Windows-Betriebssysteme und die Spielekonsole Xbox.

Java3D [Sowizral u. Nadeau 1999; SUN 2006] ist eine von SUN entwickelte und der OpenSource-Gemeinde fortgeführte objektorientierte API⁴-Erweiterung für JAVA, die je nach Einstellungen und System DirectX, OpenGL oder eine Softwareimplementierung nutzt, um eine leistungsfähige 3D-Visualisierung mit Selektion und 3D-Sound zu ermöglichen.

Java3D existiert für alle gängigen Betriebssysteme und wird in dieser Arbeit wegen der Kombination aus objektorientierter Architektur, guter Performance, ansprechendem Funktionsumfang und funktionierender Plattformunabhängigkeit zur 3D-Darstellung genutzt.

JOGL [Game Technology Group; Petersen u. Russell 2004] wird als OpenSource-Projekt mit aktiver Unterstützung durch SUN und SGI entwickelt. Weil Java3D mit der reinen OpenGL-Performance nicht mithalten konnte und einfache OpenGL-Bindings mit unterschiedlichen Problemen kämpften, setzte sich das nah an OpenGL gehaltene JOGL als neue performante Zukunftsperspektive für 3D unter Java durch. Zu Beginn dieser Arbeit war JOGL jedoch noch nicht weit genug entwickelt, um den benötigten Funktionsumfang für eine erste Realisierung der Arbeiten bieten zu können.

2.2.3.6 Bewertung

Von den betrachteten Schnittstellen und Diensten sind besonders VRML, SG-VRML, X3D und CityGML zum Datenaustausch für die untersuchten Ziele geeignet. Als 3D-Engine wurde Java3D gewählt, wobei sich im Laufe dieser Arbeit JOGL als performante Alternative herausgestellt hat, die jedoch beim objektorientierten Design mit Java3D nicht mithalten kann und soll.

³Silicon Graphics (SGI) ist ein auf leistungsfähige Grafikdarstellungen konzentrierter Computerhersteller

⁴Das *application programming interface* (API) ist die Programmierschnittstelle zwischen verschiedenen Softwarekomponenten.

Kapitel 3

Datenquellen

Dieses Kapitel betrachtet unterschiedliche Typen von Datenmodellen und untersucht ihre Besonderheiten, Vor- und Nachteile im Zusammenhang der 3D-Stadtmodellierung. Dazu werden die Quellen in Vektordaten, Rasterdaten und semantische Daten aufgeteilt. Mischformen sind unter der Rubrik der markantesten Komponente eingeordnet.

3.1 Einführung

Ein wichtiger Vorteil des im Rahmen der Arbeit zu entwickelnden Verfahrens ist die freie Kombinierbarkeit heterogener Algorithmen und Modelle. Ausgangsmodelle können verschiedenen Typs (Vektor-, Raster- oder semantische Daten) und verschiedenster Auflösung, Qualität, Vollständigkeit, Aktualität und Herkunft sein.

„Die Akquisition der Daten beansprucht in der Regel ca. 80% der gesamten Einführungskosten eines GIS!“ [Holweg 2004, S.4]

Die Nutzung vorhandener Daten (*Sekundärdaten*) bedeutet eine erhebliche Arbeitersparnis gegenüber einer Neuerfassung (*Primärdaten*). Aufgrund des unterschiedlichen Beschaffungsaufwandes und der kontextabhängigen Verwertbarkeit und Kombinierbarkeit kann kein Modelltyp als übergreifend optimal betrachtet werden. Daher müssen verschiedene Modelltypen untersucht werden, um sie im weiteren Verlauf entsprechend ihrer Besonderheiten nutzen zu können.



Abbildung 3.1: Ein (a) Baum als typisches Straßenmöbel und (b) ein aus einer EDBS (Kap. 3.2.1.1) gewonnener Grundriss mit Straßen und Häusern

3.2 Vektordaten

Im Folgenden werden Modelle betrachtet, deren geometrische Objekte auf durch Koordinaten definierten Punkten basieren. Statt der allgemeinen XML-Erweiterung Geography Markup Language (GML) [AG 3D-Stadtmodelle 2004, Kap. 6.4.2] werden hier nur ihre geeignetsten Ausprägungen in Form der im ALKIS-Umfeld genutzten NAS (Normbasierte Austauschchnittstelle) und CityGML betrachtet.

3.2.1 2D-Vektordaten

Viele Kommunen besitzen aktuelle und detaillierte zweidimensionale Karten ihrer Städte, oft als ALK, ATKIS oder Stadtgrundkarte. Diese bieten einen guten Rahmen zur Georeferenzierung anderer Datensätze. So können beispielsweise einzeln berechnete Gebäude dort referenziert sowie Ausreißer bei der Erfassung und Berechnung durch Abgleich mit den 2D-Daten erkannt und korrigiert werden.

Vorteilhaft ist die Genauigkeit und Verfügbarkeit dieser Daten. Jedoch zeigen Beispiele aus der Praxis (z.B. Shadow-Arkaden in Düsseldorf, Kap. 5.3.1.2), dass bei sich ändernder Bebauung die Daten manchmal erst mit Verspätung fortgeführt werden.

3.2.1.1 ALK

Die amtlich geführte digitale Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) [Ministerium des Innern des Landes Brandenburg 2004] hat eine hohe geometrische

Genauigkeit und enthält neben der reinen Objektgeometrie auch deren Klassifizierung anhand strukturierter Schlüssel und Zusatzinformationen. So kann eine Fläche beispielsweise als Flurstück mit zugehörigem Flurstückskennzeichen, Wohngebäude oder Straßenfläche identifiziert werden. Die Vermessungsverwaltungen halten diese Daten meist in Form der *EDBS* (einheitliche Datenbank-schnittstelle) vor (Abb. 3.1).

Die ALK eignet sich gut als Ausgangsmodell für das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren.

3.2.1.2 ALKIS

ALK und ALB (Automatisiertes Liegenschaftsbuch) [Gemeinschaft der Anwender des automatisierten Liegenschaftsbuchs 2005] sind über Flurstückskennzeichen und Flurstückskordinaten miteinander verknüpft und werden in das neue Modell ALKIS (Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem) überführt, welches als Schnittstelle zum Daten- und Informationsaustausch die GML-Erweiterung NAS (Normbasierte Austauschschnittstelle) nutzt.

Durch Abbildung wesentlicher Daten der ALK kann auch ALKIS entsprechend gut als Ausgangsmodell für die zu entwickelnden Verfahren genutzt werden.

Weiterhin existieren zahlreiche Attribute, die gut zum Aufbau eines 3D-Stadtmodells verwendet werden können. Die Klasse *AX_Gebaeude* (Abb. 3.2a) beinhaltet beispielsweise u.a. die optionalen Attribute *anzahlDerOberirdischenGeschosse*, *objekthoehe* und *dachform* (Abb. 3.2b). Jedoch bleibt abzuwarten, wie umfangreich diese freiwilligen Attribute im konkreten Einzelfall gesetzt sind.

3.2.1.3 ATKIS

ATKIS (Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem)[AdV-Arbeitsgruppe ATKIS 2005] wurde mit dem Ziel der effizienteren Herstellung topographischer Kartenwerke und der „Bereitstellung eines einheitlichen räumlichen Bezugssystems und aktueller topographischer Objektinformationen“ [Hake u. a. 2002, S. 410] von der AdV¹ entwickelt.

Ausgangspunkt ist das aus dem *Objektartenkatalog (ATKIS-OK)* und *Signaturenkatalog (ATKIS-SK)* entwickelte Datenmodell mit dem *digitalen Landschaftsmodell (DLM)* und *digitalen kartographischen Modellen (DKM)* in Vektor- und Rasterdarstellung. Die *digitalen topographischen Karten (DTK)* sollen nach der AdV automatisiert aus dem DLM abgeleitet werden.

Mittlerweile wurden einige Objektbereiche (z.B. Verkehrsnetz, Gewässernetz,

¹Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)

Attributname	Attributtyp	Dialog	Bearbeiten	Einstellungen	AX_Dachform
position	GeoFace				
gebäudefunktion	AX_Gebäudefunktion				
weitereGebäudefunktion	AX_Weitere_Gebäudefunktion				
name	String				
nutzung	AX_Nutzung_Gebäude				
bauweise	AX_Bauweise_Gebäude				
anzahlDerOberirdischenGeschosse	Long				
anzahlDerUnterrirdischenGeschosse	Long				
hochhaus	Bool				
objekthöhe	Double				
dachform	AX_Dachform				
zustand	AX_Zustand_Gebäude				
geschosfläche	Double				
grundfläche	Double				
umbauterRaum	Double				
baujahr	Long				
lageZurErdoberfläche	AX_LageZurErdoberfläche_Gebäude				
dachart	String				
dachgeschossausbau	AX_Dachgeschossausbau_Gebäude				
gebäudekennzeichen	String				
qualitätsangaben	AX_DOMitDatenerhebung				

ID	enumeration	Beschreibung
716	1000	Flachdach
717	2100	Pultdach
718	2200	Versetztes Pultdach
719	3100	Satteldach
720	3200	Walmdach
721	3300	Krüppelwalmdach
722	3400	Mansardendach
723	3500	Zeltdach
724	3600	Kegeldach
725	3700	Kuppeldach
726	3800	Sheddach
727	3900	Bogendach
728	4000	Turmdach
729	5000	Mischform
730	9999	Sonstiges

(a)

(b)

Abbildung 3.2: (a) Ein Ausschnitt des Schemas von AX_Gebäude und (b) der Enum (Coded List) AX_Dachform, hier aus den NAS-4.0 Schemadateien der AdV generiert

...) flächendeckend erfasst, der „Objektbereich Siedlung ist dagegen noch unvollständig, weil er u.a. keine Gebäudeobjekte enthält“ [Hake u. a. 2002, S. 412]. Nach [Sester u. Brenner 2002] werden bis auf wenige markante Ausnahmen keine einzelnen Gebäude modelliert.

Daher ist ATKIS nur begrenzt für die zu entwickelnden Verfahren der 3D-Stadtmodellierung geeignet.

3.2.1.4 Stadtgrundkarte

Die Stadtgrundkarte ist eine amtliche Stadtkarte im Maßstab 1:1000 [Hake u. a. 2002, S. 443]. Sie ist je nach Funktion unterschiedlich stark gegliedert und hebt oft markante Gebäude besonders hervor. Städtische Merkmale wie Straßennamen, Haltestellen, Parkplätze und Einbahnstraßen sind enthalten und klassifiziert.

Vorteilhaft ist die häufige Aktualisierung und die zahlreichen Zusatzinformationen. Die teilweise Nutzung der Ansichtsdarstellung bei Sehenswürdigkeiten ist jedoch für die automatische Weiterverarbeitung nicht sinnvoll und sollte ausgefiltert werden.

Die Stadtgrundkarte kann gut für die zu entwickelnden Verfahren eingesetzt werden. Eine Auswertung der Klassifizierung sowie der Zusatzinformationen kann durch spezielle Hypothesen zur Verbesserung des Zielmodells beitragen.

3.2.2 Digitale Landschaftsmodelle

Digitale Landschaftsmodelle (DML) bestehen aus dem Digitalen Geländemodell und dem Digitalen Situationsmodell [Hake u. a. 2002, Kap. 1.7.2]. Weiterhin wird das in anderer Literatur genutzte Digitale Oberflächemodell vorgestellt.

3.2.2.1 Digitale Geländemodelle

Das Digitale Geländemodell (DGM) wird auch als DTM (digital terrain model), DHM (Digitales Höhenmodell bzw. digital height model), DEM (digital elevation model) oder Digitales Geländere Reliefmodell bezeichnet [Baltsavias 1998, Definitionen].

Digitale Geländemodelle [Attwenger u. Briese 2004; Prinz 2003] beschreiben eine dreidimensionale Oberflächenform eines Gebietes. Es wird die Grundstruktur ohne Gebäude oder Bewuchs betrachtet (vgl. DOM).

„Als Gelände oder Relief gilt die Grenzfläche zwischen fester Erde (Lithosphäre) und Luft (Atmosphäre) bzw. Wasser (Hydrosphäre)“ [Hake u. a. 2002, Kap. 9.2.3.2]

Eine Matrix von Stützpunkten wird mittels Approximation durch Flächenfunktionen oder Triangulation zu einer dreidimensionalen Oberfläche verarbeitet. Meist werden dreieckige oder rechteckige Maschen zu einem Gitter verbunden (Abb. 3.3).

Die Stützpunkte werden entlang von Höhenlinien aus topographischen Grundkarten digitalisiert, terrestrisch vermessen, durch photogrammetrische Verfahren gewonnen oder per Laserscanning ermittelt. Aus der manuellen Erfassung folgt eine erhöhte Punktdichte entlang der Höhenlinien [Hake u. a. 2002, S. 344-346].

Die besonders vor 1990 genutzte manuelle photogrammetrische Auswertung oder manuelle Messung terrestrischer Stützpunkte zur Erfassung des DGM wurde mittlerweile durch automatisierte photogrammetrische Verfahren und Laserscanning (Kap. 3.3.3) ersetzt.

Eine sinnvolle Kombination unterschiedlicher Ausgangsmodelle ist das Aufziehen eines detaillierten platten Grundrisses und der auf ihm stehenden Objekte auf einen unebenen Untergrund (Hügelstruktur). Geländemodelle können daher der globalen Positionierung von Objekten dienen, sind aber nicht sinnvoll bei der detaillierten Konstruktion einzelner Gebäude nutzbar.

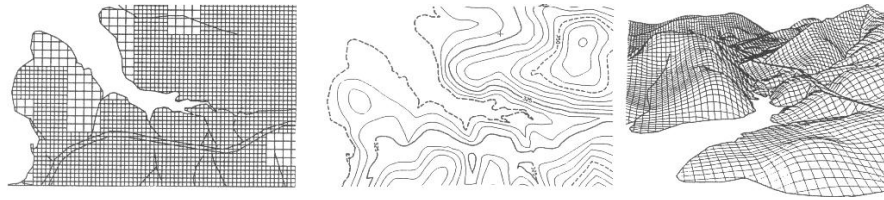


Abbildung 3.3: Messpunktgitter, Höhenlinien der Karte und 3D-Sicht beim DGM.

3.2.2.2 Digitale Situationsmodelle

Das zweidimensionale Digitale Situationsmodell (DSM, Digital situation model) [Hake u. a. 2002, S. 343] beinhaltet die Grundrisse natürlicher und künstlicher Objekte und zugehörige semantische Informationen. Durch das Zusammensetzen von Objekten aus Objektteilen und die Einteilung in Gruppen (Siedlung, Gewässer, ...) entsteht eine Hierarchie.

Die Informationen des DSM können gut im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt werden.

3.2.2.3 Digitale Oberflächemodelle

Das Digitale Oberflächemodell (DOM²) wird auch als DSM³ (digital surface model) bezeichnet.

Im Gegensatz zu der Geländeoberfläche beim DGM wird hier die Höhe der sichtbaren Erdoberfläche mit Gebäudedächern, Baumkronen und Straßenmöbeln modelliert [Baltsavias 1998].

Ein DOM kann daher wie ein DGM verarbeitet werden, besonders bei der Referenzierung von Punkten ist jedoch zu differenzieren, ob es sich beispielsweise um einen Punkt am unteren oder oberen Ende einer Hauswand handelt.

Ein hochauflösendes DOM kann, zusammen mit einem Grundriss, zur Ermittlung von Gebäudehöhen und Dachformen genutzt werden. Je nach Dachform können gegebenenfalls mehrere Höhen dem DOM entnommen werden.

3.2.3 3D-Vektordaten

Zahlreiche Kommunen besitzen bereits 3D-Modelle von Stadtausschnitten, besonders von Sehenswürdigkeiten und anderen herausragenden Gebäuden. Optimalerweise werden diese oft sehr detaillierten Daten in die Modellierung

²zu unterscheiden vom Digitalen Objektmodell [Hake u. a. 2002, S. 34]

³zu unterscheiden vom Digitalen Situationsmodell

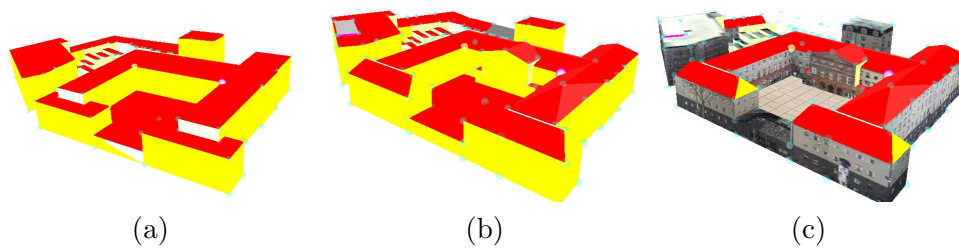


Abbildung 3.4: 3D-Modelle
am Beispiel der Düsseldorfer Altstadt: a) Basismodell, b) erweitertes
Blockmodell und c) Detailmodell

der Szene eingebracht. Genutzte Schnittstellen sind z.B. X3D, VRML (Kap. 2.2.3.1) und CityGML (Kap. 2.2.3.2).

Weiterhin bietet sich die Nutzung von häufig wiederkehrenden Elementen und Klötzchenmodellen an.

Die 3D-Position eines Punktes innerhalb eines 3D-Modells wird auch als *Raumkoordinate* oder *Ortskoordinate* bezeichnet.

3.2.3.1 Basismodelle

Basismodelle (Abb. 3.4a) werden je nach Literatur auch als Klötzchenmodell oder Blockmodell bezeichnet [Klaus 1997; Schilcher u. a. 1999]. Sie entsprechen LoD1 (Kap. A.1) und stellen Gebäude als einfache Klötze ohne Dachform dar. Basismodelle werden häufig anhand von Gebäudegrundrissen und Gebäudehöhen generiert und können normalerweise anhand existierender Daten automatisch oder mit geringem Arbeitsaufwand abgeleitet werden. Fehlende Gebäudehöhen werden anhand von Geschosshöhen geschätzt oder mit Standardwerten belegt.

Basismodelle eignen sich aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit oder leichten Beschaffbarkeit sowie ihrer großflächigen 3D-Struktur sehr gut als Ausgangsmodell für die untersuchte Aufgabenstellung. Der durch sie gegebene grobe Rahmen kann den EA zur Einpassung von detaillierten 3D-Modellen und als Basis zur Erweiterung, Verfeinerung und Veränderung dienen.

Ein Qualitätskriterium ist die je nach Datensatz stark variierende Genauigkeit der Gebäudehöhen.

3.2.3.2 Erweiterte Blockmodelle

Erweiterte Blockmodelle (Abb. 3.4b) werden auch als Blockmodell oder Klötzchenmodell mit Dächern bezeichnet [Klaus 1997; Schilcher u. a. 1999]. Auf die Bezeichnung „Blockmodell“ wird hier wegen der Verwechslungsgefahr mit dem Basismodell verzichtet.

Erweiterte Blockmodelle sind durch Dächer erweiterte Basismodelle, entsprechen LoD2 und können je nach vorhandener Daten auch automatisiert abgeleitet werden. Hierzu werden bereits erfasste und den Gebäuden zugeordnete Standarddachformen, Firstlinien und -höhen oder Luftbilder [Kolbe 1999] genutzt.

Klötzchenmodelle mit Dächern erweitern die Vorteile des Basismodells durch vorgegebene grobe Dachstrukturen, an die sich per EA weitere Details wie Schornsteine, Aufbauten und Überstände anhängen können. Daher sind erweiterte Blockmodelle sehr gut als Ausgangsmodelle für die im Rahmen der Arbeit zu entwickelnden Verfahren geeignet.

3.2.3.3 Detailmodelle

Detailmodelle (Abb. 3.4c) entsprechen LoD3 und sind geometrisch sehr gut ausgeprägt. Häufig existieren sie bereits von prägnanten oder für die Öffentlichkeit und besonders den Tourismus relevanten Gebäuden und Gebäudekomplexen. Diese Modelle kommen üblicherweise nur einmalig in der Szene vor (z.B. Kölner Dom) und können daher mittels homologer eindeutiger Punkte referenziert werden.

Diese Ausgangsmodelle sollten nicht als fertiger Block, sondern als Individuum mit vielen Genen behandelt werden. Somit sind Korrekturen und Ergänzungen im Laufe des Algorithmus an ihnen möglich.

Detailmodelle sind gut für die Aufgabenstellung geeignet und vermeiden doppelte Arbeit.

3.2.3.4 Wiederkehrende Objekte

Zur anschaulichen Darstellung ist es oft unnötig, wiederkehrende Elemente im Stadtbild wie z.B. Bäume, Autos, Litfasssäulen und Telefonzellen (Abb. 3.1a), hier als Straßenmöbel bezeichnet, anhand des konkreten Originals immer wieder neu zu modellieren. Stattdessen werden Platzhalter genutzt, so dass statt z.B. eines konkreten Baumes dort ein Baum oder, etwas spezialisierter, ein Laubbaum steht.

Diese Elemente müssen speziell gekennzeichnet werden, da später mehrere Vorkommen jedes Originalpunktes an unterschiedlichen Raumpositionen auftreten

können. Dieses Problem kann durch eine Struktur mit eindeutigen Referenzpunkten behandelt werden.

3.3 Rasterdaten

Bei Rasterdaten wird ein bestimmtes Gebiet durch eine mehrdimensionale Matrix abgedeckt. Jedes Element der Matrix besitzt dabei genau einen Wert, der bei Bildern z.B. einen Grau- oder Farbwert darstellt.

Die Verwaltung zugehöriger semantischer und topologischer Informationen ist zwar möglich, jedoch im Gegensatz zu Vektordaten nicht praktikabel einsetzbar, da jedes Pixel einzeln referenziert werden müsste. Daher werden Rasterbilder im Folgenden meist mit auf sie referenzierten Vektorinformationen ergänzt. Die 2D-Position eines Punktes innerhalb eines Bildes wird als *Bildkoordinate* bezeichnet.

3.3.1 Fassadenbilder

Fassadenbilder sind in zweierlei Hinsicht nützliche Eingangsdaten. Einerseits können durch geometrische und photogrammetrische Auswertung mittels homologer Punkte 3D-Modelle berechnet werden und so durch ermittelte Balkone, Erker und andere Details zum LoD3 beitragen. Andererseits dienen Bilder als Quelle für Texturen, die bei digitalisierten Flächen sogar automatisch entnommen werden können.

Da keine Kameraparameter erwartet werden sollen, sind auch alte Fotografien und Videosequenzen als Quelle geeignet und ermöglichen sogar die virtuelle Rekonstruktion nicht mehr existierender Gebäude.

Aufgrund des vielseitigen Ansatzes lassen sich keine globalen Aufnahmeregeln festlegen, da die Eigenschaften optimaler Bilder von der konkreten Szene und den dementsprechend anvisierten Operatortypen (z.B. photogrammetrische Verfahren) abhängen.

3.3.1.1 Photogrammetrische Verfahren

Photogrammetrische Verfahren eignen sich zur Erfassung kompakter komplexer geometrischer Objekte und wurden bereits in Kap. 2.1.3 vorgestellt.

Konzeptionell bedingt muss jeder Punkt in mindestens zwei Bildern sichtbar sein, die von unterschiedlichen Positionen aus aufgenommen sind. Ansonsten kann der Punkt beliebig auf der Geraden durch Augen- und Bildpunkt skaliert und ist nicht eindeutig bestimmbar. Alternativ genügt zur Berechnung jedoch



Abbildung 3.5: Bildbeispiele einer Häuserecke

eine begrenzte Menge homologer Punkte, deren Rekonstruktion wiederum die Ermittlung der restlichen Punkte durch andere Verfahren ermöglicht.

Zu jedem Bild sollte mindestens ein Gegenstück mit mindestens n_{op} gemeinsamen Punkten (homologe Punktepaare) existieren. n_{op} ist verfahrensspezifisch und beträgt beispielsweise $n_{op} = 8$ beim Acht-Punkt-Algorithmus. Bei dem häufigen Spezialfall von Hausecken (Abb. 3.5) genügen oft zwei ähnliche Bilder von verschiedenen Aufnahmepositionen. Für photogrammetrische Verfahren werden wegen der unterschiedlichen Aufnahmepositionen oft schräge Aufnahmen benötigt. Dies ist häufig der sinnvollste Weg zur Erfassung komplexer und bisher nicht modellierter Ausschnitte (Türme, Erker, Vorbauten, ...) größerer Szenen.

3.3.1.2 Hypothesen

Hypothesen (Kap. 4.6) ermitteln einfache oder übliche Resultate aus wenigen Ausgangsdaten. Daher ist es teilweise ausreichend, wenn wesentliche Teile der Szene auf je nur einem Bild zu sehen sind.

Zur Referenzierung dieser Einzelbausteine sind leichte Überdeckungen von, je nach Operator, meist mindestens drei homologen und linear unabhängigen Punkten nötig. Die drei Punkte setzen sich dabei aus einem Angelpunkt und zwei Punkten zur Aufspannung der gemeinsamen Bildachsen zusammen.

Die meisten Hypothesen gehen der Einfachheit halber von annähernd frontal aufgenommenen Bildern aus und bilden, da ihnen explizit weniger als die zur eindeutigen Bestimmung notwendigen Informationen genügen, einen effizienten Weg zur Minimierung des Erfassungsaufwandes.

3.3.1.3 Texturen

Texturen können generell allen Bildern entnommen werden. Wenn der Blickwinkel nicht aus anderen Gründen festgelegt ist, z.B. weil ein photogramme-

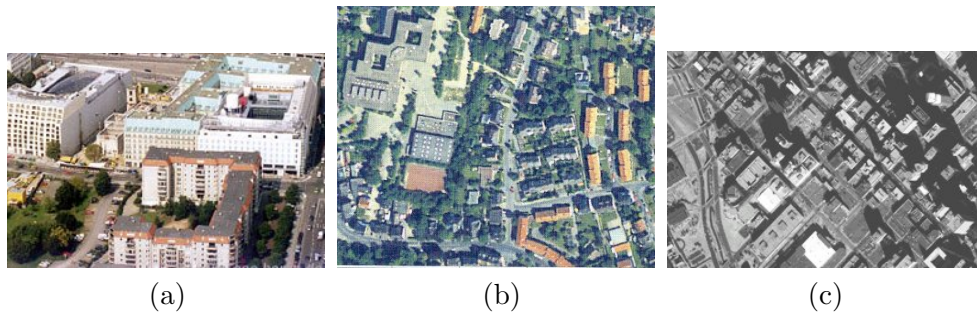


Abbildung 3.6: a) Luftbildschrägaufnahme, b) Orthophoto und c) Satellitenbild

trisches Verfahren angestrebt wird oder ein optisches Hindernis (z.B. Baum) existiert, dann bieten sich frontale Aufnahmen wegen der konstanten Auflösung und Vermeidung von Ungenauigkeiten bei der Entzerrung an. Ist eine Fläche in mehreren Bildern sichtbar, so wird eine automatische (z.B. maximaler Flächeninhalt in Pixel) oder manuelle Auswahl getroffen.

Bei der Erfassung der Bilder ist die Vermeidung optischer Hindernisse sinnvoll, aber nicht immer vollständig möglich. Daher ist in einigen Fällen eine manuelle Nachbearbeitung zur Entfernung der Hindernisse nötig, falls diese nicht als Bestandteil der Textur auf die Fläche projiziert werden sollen.

Texturen steigern die wahrgenommene Qualität und realistische Darstellung von 3D-Modellen erheblich und sind daher ein wichtiges Element der 3D-Stadtmodellierung.

3.3.2 Luft- und Satellitenbilder und ihre Folgemodelle

Luftbilder (Abb. 3.6) sind aus der Luft aufgenommene Bilder der Erdoberfläche. Aufnahmen von Satelliten aus werden abgrenzend als Satellitenbilder bezeichnet.

Durch Weiterverarbeitung und Ergänzung mit Zusatzinformationen entstehen die im Folgenden vorgestellten Modelle, die teils von Firmen, Einrichtungen und Behörden erstellt, verwaltet und aktualisiert werden.

3.3.2.1 Luftbildschrägaufnahmen

Luftbildschrägaufnahmen (Abb. 3.6a) sind perspektivische Aufnahmen aus der Luft und werden für Stadt- und Verkehrswegeplanung, zur Kontrolle und Dokumentation bei großen Bauprojekten und für Werbematerial genutzt.

Bei zufriedenstellender Auflösung sind Luftbildschrägaufnahmen gut zur Gewinnung von Dach- und Seitenwandtexturen geeignet, sie weisen jedoch wegen des schrägen Aufnahmewinkels eine starke Verzerrung auf und sind daher schlecht zur Referenzierung geeignet. Wegen der aus ihren Grundrissen stark herausragenden Gebäude können sie auch nicht sinnvoll als Bodenplatte genutzt werden.

Bei hoher Auflösung können mit photogrammetrischen Verfahren bauliche Details aus mehreren Luftbildschrägaufnahmen gewonnen werden.

3.3.2.2 Senkrechte Luftbilder

Senkrechte Luftbilder, oft auch nur als Luftbilder bezeichnet, sind aus der Luft in Lotrichtung zur Erdoberfläche aufgenommen. Besonders durch heterogene Geländehöhen tritt eine perspektivische Verzerrung auf, deren Korrektur dann je nach Verfahren das entzerrte Luftbild oder das Orthophoto ergibt. Daher gelten für senkrechte Luftbilder in verschlechterter Form deren Eigenschaften.

3.3.2.3 Entzerrte Luftbilder

Entzerrte Luftbilder sind durch einfache geometrische Bildtransformation entzerrte Luftbilder. Die Entzerrung ist bei ebener Erdoberfläche korrekt, wird aber durch heterogene Geländehöhen verfälscht [Hake u. a. 2002, Kap. 3.8.1, Kap. 6.4.1.2].

Bei akzeptabler Verzerrung gelten annähernd die Eigenschaften von Orthophotos.

3.3.2.4 Orthophotos

Digitale Orthophotos (DOP) sind durch eine Orthophotoprojektion entzerrte Senkrechtaufnahmen der Erdoberfläche (Abb. 3.6b). Dabei wird die, besonders durch die photographische Zentralprojektion und verschiedene Geländehöhen verursachte, Verzerrung des Bildes so korrigiert, dass nun Entfernungen zwischen zwei Punkten maßstabgetreu sind [Hake u. a. 2002, Kap. 6.4.1.2].

Eine Bodentextur (Bodenplatte) kann durch einfache Referenzierung entnommen werden. Bei ausreichender Auflösung können vorhandene Dachgeometrien auf das Bild referenziert und automatisch Dachtexturen gewonnen werden. Ähnlich kann mit vorhandenen Grundrissen verfahren werden. Existieren keine Grundrisse, so können diese im Orthophoto digitalisiert werden.

Mittels spezieller Verfahren können Gebäude mitsamt einfacher Dachformen automatisiert extrahiert werden [Kolbe 1999].

Orthophotos sind daher sehr gut für die untersuchte Aufgabenstellung einsetzbar.

3.3.2.5 Bildpläne

Bildpläne „entstehen durch das analoge oder digitale Zusammentragen entzerrter Bilder und das anschließende Abgrenzen der Ergebnisse einer solchen Montage nach einer übersichtlichen Blattschnittsystematik der Bildpläne.“ [Hake u. a. 2002, S. 178].

Daher gelten für die in dieser Arbeit zu entwickelnden Verfahren bzgl. der Bildpläne die Eigenschaften der entzerrten Bilder. Das Zusammentragen der Einzelbilder würde sonst in den Aufgabenbereich der Kombination multipler Ausgangsdaten fallen.

Als Bildpläne existieren u.a. Luftbildpläne, Orthophotopläne und Satellitenbildpläne.

3.3.2.6 Bildkarten

Bildkarten sind um kartographische Gestaltungsmittel (z.B. Signaturen oder Schrift) ergänzte Bildpläne [Hake u. a. 2002, S. 179]. So werden aus entzerrten Luftbildern Luftbildkarten, aus Orthophotos Orthophotokarten und aus entzerrten Satellitenbildern Satellitenbildkarten abgeleitet.

Für die zu entwickelnden Verfahren ergeben sich kaum Unterschiede zwischen Bildkarten und Bildplänen. Die Entscheidung hängt hauptsächlich von den verfügbaren Daten und den gewünschten Texturen ab.

3.3.3 Laserscannerdaten

Beim Laserscanning wird ein Laserstrahl rasterförmig über das zu erfassende Objekt bewegt und die Entfernung der einzelnen Punkte anhand der Laufzeit des Laserstrahls berechnet. Es entsteht eine Punktwolke.

3.3.3.1 Luftgestütztes Laserscanning

Luftgestütztes Laserscanning ist heutzutage ein Standardverfahren zur detaillierten Geländeerfassung und erfolgt von einem Flugzeug, Hubschrauber oder Ballon aus. Die Lagegenauigkeit liegt bei 50 cm, die Höhengenaugigkeit bei 10-20 cm [Sester u. Brenner 2002, Kap. 2.1] [Attwenger u. Briese 2004]. Durch Verwendung der spätesten Signalreflektion kann Oberflächenbewuchs (Bäume,

Sträucher) eliminiert werden und es entsteht ein Geländerastrmodell, welches als Grundlage eines DGM dienen kann. Die früheste Reflektion ergibt entsprechend die Bewuchsoberkante und somit das Rastermodell eines DOM.

Aus diesen Daten können zu einem Gebäudegrundriss die Höhe und ggf. auch die Dachform anhand markanter Punkte ermittelt werden.

Sowohl bei der Geländebetrachtung als auch bei der automatisierten Gebäudehöhen- und Dachformenerkennung sind Laserscannerdaten nützlich.

3.3.3.2 Terrestrisches Laserscanning

Beim 3D-Scanner wird die Umgebung von einem festen Punkt aus erfasst. Dazu wird ein spezielles Gerät z.B. in die Mitte eines Platzes oder mit ausreichendem Abstand vor ein Haus gestellt und bildet eine Punktwolke, die beispielsweise durch eine im Scanner integrierte Kamera mit Farbwerten versehen werden kann.

Terrestrisches Laserscanning ermöglicht die Erfassung komplexer Details, ist aber aufgrund der in Kap. 2.1.5 genannten Nachteile nicht optimal für die großflächige Erfassung eines 3D-Stadtmodells geeignet.

3.3.4 COP-Bilder

COP-Bilder (co-registered orthographic and perspective) [Appel 2005] bestehen je aus einem perspektivischen Bild und einem orthographischen Bild, das in ersteres integriert ist (siehe Kap. 2.1.3.1.4).

Dieser spezialisierte Ansatz ist zwar durchaus leistungsfähig, aber schwierig in andere Systeme zu integrieren. Daher bietet sich auf Anhieb die voneinander unabhängige Nutzung beider Einzelkomponenten sowie das aus ihnen rekonstruierte 3D-Modell zur Weiterverarbeitung an.

3.4 Semantische Daten

Als semantische Daten werden im Weiteren alle nicht geometrischen Daten bezeichnet. Dies sind im Zusammenhang dieser Arbeit einerseits attributive Informationen und andererseits Relationen zwischen zwei Objekten.

Die semantischen Daten der Ausgangsmodelle sollten auch in der Phase ihrer Aufbereitung manuell bearbeitet werden können.

In Kap. 4.2.3.5 werden die konkreten Datentypen behandelt.

3.4.1 Attributive Informationen

ALK, ATKIS und ALKIS gruppieren geometrische Objekte durch strukturierte Objektartenkataloge (hierarchisch oder objektorientiert). Oft existieren weitere Informationen wie beispielsweise der Typ einer Fläche (Dach, Wand, ...), der Objektschlüssel eines Hauses, eine Gebäudehöhe, Geschosszahl oder der Dachtyp.

Mittels geeigneter Schnittstellen können diese Informationen übernommen und, besonders von den Hypothesen, genutzt werden. So lässt sich aus einer Geschosszahl die Gebäudehöhe schätzen, aber vielleicht durch photogrammetrische Verfahren oder geometrische Kantenanalyse von Nachbargebäuden aus genauer bestimmen.

Weiterhin ist eine Einfärbung untexturierter Flächen anhand ihrer Objektart möglich. Einige mögliche Attribute von Gebäuden sind in Abb. 3.2a und links in Abb. 2.8 zu sehen.

Attributive Informationen sind daher sehr gut im Rahmen der zu entwickelnden Verfahren nutzbar, erfordern jedoch auf die konkreten Parameter spezialisierte Operatoren.

3.4.2 Relationen

Relationen zwischen zwei Geoobjekten sind beispielsweise „liegt in einer Ebene mit“, „ist parallel zu“ oder „hat Abstand x zu“. Wenn nicht bereits vorhanden, können sie leicht nachträglich manuell gesetzt werden. Das Erfassen dieser für den menschlichen Betrachter meist offensichtlichen Informationen gestaltet sich in vielen Fällen einfacher als die Digitalisierung der dreidimensionalen Geometrie, die auch aus Relationen durch geeignete Hypothesen abgeleitet werden kann.

Ein weiterer Vorteil sind die durch Relationen entstehenden kausalen Zusammenhänge. Wird beispielsweise eine Seitenwand B einfach nur parallel zu Wand A digitalisiert, so bleibt sie bei einer Änderung von Wand A unberührt. Wird die Ausrichtung von B jedoch durch die Relation „ist parallel zu“ geprägt, so wird sie bei einer Drehung von A auch beeinflusst.

Daher sind Relationen, soweit sie durch geeignete Hypothesen ausgewertet werden können, gut als Eingangsdaten geeignet.

3.5 Bewertung

Viele Datenmodelle sind generell als Ausgangsmodell geeignet. Die beste Verfahrensweise wird im konkreten Fall von den bereits existierenden Daten ab-

hängen, da deren Nutzung eine immense Aufwandsersparnis bedeuten kann. Weiterhin bildet häufig erst die Kombination heterogener Typen, wie z.B. Klötzchenmodelle und Fassadenbilder, die Grundlage für das Zielmodell. Daher wird die Verbindung mehrerer heterogener Datenquellen nicht nur unterstützt, sondern sogar empfohlen. Bei einer reichhaltigen Datengrundlage können sich die EA den besten Weg zum Zielmodell selber suchen.

Bei der Integration mehrerer Ausgangsmodelle ist es wichtig, dass diese nicht wie Fremdojekte in VRML oder diversen GIS als starrer Block eingebunden werden. Stattdessen sollte eine Aufteilung in ihre einzelnen Bestandteile durchgeführt werden, die dann einzeln von den Evolutionären Algorithmen (EA) fortgeführt, optimiert und rekombiniert werden können.

Kapitel 4

Evolutionäre Algorithmen

Das folgende Kapitel beschäftigt sich nach einer allgemeinen Einführung in die Evolutionären Algorithmen mit dem für diese Arbeit benötigten Datenmodell. Nach der Betrachtung eines Bewertungssystems wird die Erweiterung des EA-Modells erst generell untersucht, um dann anhand konkreter Fälle in Form spezialisierter Operatoren umgesetzt zu werden.

4.1 Einführung

Dieser Absatz definiert und erläutert das Konzept evolutionärer Algorithmen (EA) und zeigt deren Vor- und Nachteile auf.

Knappe Geschichte der EA

Charles Darwin (1809–1882) schrieb, beeinflusst durch seine Expedition auf der H.M.S. Beagle (1831–1836), 1859 das für die Evolutionstheorie richtungsweisende Buch „The Origin of Species“ [Darwin 1859]. Seine spätere Veröffentlichung „Descent of Man“ [Darwin 1871] nutzt erstmalig das Wort „Evolution“. Ausgehend von Darwins Evolutionstheorie und der Entwicklung der Genetik [Ringo 2006] wurden von mehreren Forschergruppen, hauptsächlich unabhängig voneinander, u.a.

- 1966 die evolutionäre Programmierung (L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh),
- 1973 die Evolutionsstrategie (I. Rechenberg, H.P. Schwefel) [Rechenberg 1994; Schwefel 1995],

- 1975 die genetischen Algorithmen (Holland) [Nissen 1994, Kap. 3.2.1] und
- 1992 die genetische Programmierung (Koza) [Quasthoff 2002]

entwickelt. Diese Methoden zur Lösung komplexer Such- und Optimierungsprobleme wurden unter dem Sammelbegriff EA zusammengefasst.

Definition und Erläuterung

In [Beyer u. a. 2001] wird ein Evolutionärer Algorithmus definiert als „Sammelbegriff für alle Varianten von (probabilistischen) Optimierungs- und Verbesserungsalgorithmen, die der Darwinschen Evolution nachempfunden sind. Optimalzustände werden durch schrittweise Verbesserung auf Basis des Variations-Selektions-Paradigmas approximiert. Die Variationsoperatoren produzieren dabei genetische Diversität und die Selektion gibt der Evolution die Richtung.“

Das Grundprinzip lässt sich folgendermaßen beschreiben: Ein *Individuum* ist eine spezielle (Teil-)lösung mit den diese beschreibenden Parametern (*Chromosom*), deren Inhalt als *Gene* bezeichnet wird, und ihrer *Fitness*. Eine *Fitnessfunktion* (auch: *Zielfunktion*) bewertet die Nähe eines Individuums an der optimalen Lösung.

Zuerst werden in der *Initialisierung* einmalig Startwerte für den weiteren Ablauf gesetzt. Diese basieren auf den Eingangsdaten und Zufallswerten und bilden die Startpopulation, die gewöhnlich noch weit von dem gewünschten Ergebnis entfernt ist. *Population* ist die Menge aller momentan betrachteten Individuen.

Dann wird die Population weiterentwickelt, indem die *Operatoren* Rekombination, Mutation und Selektion auf die Individuen angewendet werden, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. *Rekombination* bezeichnet hierbei die Schaffung eines neuen Individuums aus den Chromosomen mehrerer Elternindividuen. *Mutation* dagegen beschreibt die Chromosomvariation eines einzigen Individuums. Bei der *Selektion* werden veraltete oder überflüssige Individuen aus der Population entfernt und so u.a. die Geschwindigkeit und Ergebnisfindung verbessert.

Das *Abbruchkriterium* sorgt für die Terminierung der Berechnung und kann sich auf die maximale Rechenzeit, die Anzahl der Iterationen oder eine Konvergenz im Ziel- (Annäherung an das Ergebnis) oder Suchraum (minimale Individuenweiterentwicklung) beziehen. Die Verschiedenheit der Individuen wird auch als *Diversität* bezeichnet.

Bekannte Spezialisierungen

Unter dem Dachbegriff EA haben sich viele Spezialisierungen entwickelt. Bekannt sind die rekombinationsfreie Evolutionäre Programmierung (*EP*), die in eine spezielle Form gepresste Evolutionsstrategie (*ES*), die hauptsächlich zum Prüfen von Computercode und zum automatischen Schaltungsentwurf eingesetzte Genetische Programmierung (*GP*) [Quasthoff 2002], die ohne Rücksicht auf die Logik der Daten rein auf Genen (Bits) arbeitenden Genetischen Algorithmen (*GA*) [Nissen 1994, Kap. 3.2.1] und viele weitere [Beyer u. a. 2001].

Da diese Arbeit viele Konzepte der EA nutzt, ohne sich auf eine vorhandene Spezialisierung zu beschränken, wird das hier entwickelte Verfahren allgemein als evolutionär bezeichnet.

Allgemeine Gründe für den Einsatz von EA

EA bieten sich dann an, wenn normale Algorithmen an der Problemkomplexität scheitern. Da nicht direkt „die“ Lösung gefunden werden kann, werden erst schlechte Ergebnisse erzeugt und diese schrittweise verbessert. Aufgaben, deren Lösung etappenweise angenähert und dabei qualitativ bewertet werden kann, sind hier im Vorteil.

Weiterhin bieten EA den in dieser Arbeit genutzten Vorteil, dass verschiedene Operatoren auf der Population arbeiten können, ohne dass diese sich kennen oder untereinander kommunizieren müssen. Dies ermöglicht eine gute Modularität der Operatoren.

Allgemeine Nachteile von EA

Aus dem Konzept der EA ergeben sich die Nachteile einer schlechten Ergebnisvorhersage, oft eine Unreproduzierbarkeit von Berechnungen und eine schwer abschätzbare Laufzeit. Für das beste ermittelte Ergebnis existiert zwar eine Bewertung, es wird aber nicht unbedingt eine optimale Lösung gefunden. Weiterhin kann bei unzureichender Elimination die Population und somit die Datenmenge und Verarbeitungsdauer immens steigen.

Diese möglichen Probleme müssen bei dem Entwurf einer konkreten Anwendung berücksichtigt und vermieden werden. Im folgenden Entwurf werden dazu verschiedene Mechanismen (z.B. Mutationslevel) eingeführt.

Weiterführende Literatur

Eine ausgiebige Einführung in EA bietet [Nissen 1994], weitere Informationen hierzu finden sich u.a. in [Beyer u. a. 2001; Nissen 1997; Pohlheim 1999;

Quasthoff 2002; Streichert 2001; Weicker 2002].

4.2 Datenmodell

Nach der Betrachtung einfacher und den bei einigen Rekonstruktionssystemen üblichen Modellen werden die hier gestellten Anforderungen an das Datenmodell aufgelistet und eine Lösung entworfen, die unter verschiedenen Gesichtspunkten untersucht wird.

4.2.1 Einführung

Das verwendete Datenmodell stellt einen wichtigen Aspekt des Gesamtkonzepts und der EA dar, da es die Möglichkeiten zur Datenbearbeitung entscheidend prägt. Viele der später vorgestellten Verfahren und Operatoren wären mit anderen Datenmodellen nicht oder nur mit gravierendem Aufwand und Performanceverlusten möglich. Daher werden im Folgenden Standardmodelle für Geodaten angeschnitten, um ausgehend hiervon zu einem eigenen Entwurf zu gelangen.

Modelle mit globalem Koordinatensystem

In gängigen Systemen zur Verwaltung von graphischen Informationen existiert ein globales Koordinatensystem, in das Punkte anhand der genutzten Achsen eingetragen werden. Auf den Punkten aufbauend werden streckenhafte Strukturen wie Linien, Kreise, Kreisbögen und Splines definiert, welche wiederum als Basis für Flächen dienen. In einigen Fällen werden Flächen noch zur Bildung von Körpern genutzt.

Modelle mit multiplen Koordinatensystemem

Schon aufgrund der heterogenen Ausgangsmodelle wird ein mehrere Koordinatensysteme unterstützendes Modell benötigt. Bei photogrammetrischen Rekonstruktionssystemen existieren mehrere Bilder mit graphischen Informationen in jeweils eigenen Koordinatensystemen. Diese werden zu homologen Objekten verknüpft, so dass Punkt A_1 in Bild 1 dem Punkt A_2 in Bild 2 zugeordnet wird. Es findet also eine direkte Verknüpfung homologer Objekte statt.

4.2.2 Anforderungen an das Datenmodell

Zu einer praktischen, sinnvollen und performanten Umsetzung zahlreicher Methoden der EA im Rahmen von 3D-Stadtmodellen sind folgende Kriterien wichtig:

- Es müssen Segmente mit individuellem und voneinander unabhängigem Inhalt in jeweils lokalen Koordinatensystemen verwaltet werden.
- Homologe Punkte sollen frei definierbar sein, und zwar auch zwischen verschiedenen Modelltypen wie 2D-, 3D- und Bildkoordinaten.
- Zu einem Punkt eines Segmentes soll performant ein ggf. vorhandener homologer Punkt eines anderen Segmentes gefunden werden können.
- Jedes Bild besitzt ein eigenes 2D-Koordinatensystem mit dort vorhandenen (=sichtbaren) Punkten.
- Aus Gründen der Praktikabilität sollen aus Punkten zusammengesetzte Strukturen unabhängig von Segmenten, also koordinatensystemfrei sein: Eine Strecke zwischen den jeweils lokalen Punkten A und B ist überall deren direkte Verbindung, ein Dreieck aus A , B und C ist überall ein Dreieck der direkten Verbindungen, wo A , B und C vorhanden sind. Es spielt dabei keine Rolle, ob es sich um Bilder, Grundrisse, 3D-Modelle oder sonstige Strukturen handelt.
- Kameraparameter beziehen sich auf das jeweilige lokale Koordinatensystem.
- Optimalerweise sollen die Strukturen zur Datenhaltung und -bearbeitung denen der Berechnung und somit den Individuen entsprechen. Ein lokales Koordinatensystem wird daher durch ein Segment repräsentiert.
- Zusätzliche Suchstrukturen sollen einen effizienten und flexiblen Datenzugriff ermöglichen.
- Eine logische Korrespondenz zur realen Welt ist schon aus Anschauungsgründen sinnvoll.

4.2.3 Entwurf des Datenmodells

Im Folgenden wird der aus den Anforderungen (Kap. 4.2.2), eigenen Untersuchungen und Versuchen hervorgegangene Entwurf des Datenmodells vorgestellt.

4.2.3.1 Grundlegende Strukturen

Die Anforderungen bringen eine Aufteilung des Datenmodells in globale und lokale Strukturen mit sich, deren Zusammenspiel dargestellt wird. Der Sprachgebrauch orientiert sich hierbei an den Finiten Elementen [Gee 1999; Matheas u. a. 2001; Milbradt u. a. 2004].

4.2.3.1.1 Globale Struktur Es wird eine *globale Struktur* eingeführt, die alle von Koordinaten unabhängigen allgemeinen Daten enthält. Dazu gehören neben allen auf Punkten basierenden Strukturen, wie z.B. Linien oder Flächen, auch koordinatenfreie Repräsentanten der Punkte (*globale Punkte*). So ist dort z.B. für eine Kirchturmspitze der globale Punkt \mathbf{a} definiert und kann diverse globale Parameter und semantische Informationen beinhalten.

Globale Elemente zeichnen sich durch ihre Losgelöstheit von Koordinaten aus, definieren aber durch ihre Verbindung zu zusammengesetzten Geometrien die Topologie der Szene.

4.2.3.1.2 Lokale Strukturen Weiterhin werden mit den Segmenten beliebige *lokale Strukturen* mit jeweils lokalen Koordinatensystemen geschaffen. Zusammengesetzte Strukturen sind, da nur eine individuelle Sicht auf die globale Welt betrachtet wird, nicht lokal definiert. Ein *lokaler Punkt* A_1 wird daher durch seine lokalen Koordinaten und seine Referenz auf genau einen zugehörigen globalen Punkt definiert. Ein anderes Segment kann mit einem unabhängigen Punkt A_2 auf denselben Repräsentanten A zeigen.

Lokale Elemente können daher nur unter Angabe genau eines zugehörigen globalen Elementes angelegt werden. Damit sind zwei lokale Elemente genau dann *homolog* zueinander, wenn sie auf dasselbe globale Element zeigen (z.B. homologe Punkte). Zusammengesetzte Elemente (Strecken, Flächen) sind genau dann homolog, wenn alle Basisobjekte (Punkte) homolog sind. Da Strecken und Flächen global definiert werden, wird es jedoch immer nur eine globale Instanz hiervon geben, die pro Segment durch die jeweiligen lokalen Punkte ausgeprägt wird.

Die genaue Struktur für ein Segment ergibt sich aus dem Typ des Ausgangsmodells (Abb. 4.1).

4.2.3.1.3 Bilder Da jedes Bild ein eigenes Koordinatensystem für dort digitalisierte Punkte besitzt, wird es mitsamt seiner Parameter als Segment betrachtet. Da ein Bild mehrfach unter verschiedenen Gesichtspunkten und mit verschiedenen Koordinatensystemen genutzt werden kann (z.B. als Bodenkachel oder zur Dachtextrurgewinnung), wird auch hier eine Trennung in *loka-*

le Bilder als Spezialfall eines Segmentes und *globale Bilder* vollzogen. Lokale Bilder enthalten Kameraparameter und dort digitalisierte lokale Punkte mit Bewertungen. Globale Bilder speichern beispielsweise die reinen Bildinformationen oder den Pfad zu der Bilddatei.

Da es für Anwender unpraktikabel ist, je Bild ein einzelnes Segment zu gründen, können Segmente Bilderlisten (auch als *Sequenz* bezeichnet) beinhalten, wobei intern jedes Bild als eigenes Segment und damit als Segment im Segment behandelt wird.

4.2.3.1.4 Zusammenspiel der Strukturen Die stark vereinfachte Struktur ist in Abb. 4.1 als Klassendiagramm dargestellt. Dort sind verschiedene Modelltypen wie Grundriss, Bild, 3D-Modell und DGM als Spezialfälle eines Segmentes dargestellt. Diese Menge ist je nach Anforderungen beliebig erweiterbar. Diese Segmentspezialisierungen beinhalten lokale Punkte im für sie passenden Format, die jeweils einem globalen Punkt untergeordnet sind. Die Topologie setzt sich dann aus globalen Objekten zusammen, wobei eine Fläche direkt aus Punkten oder alternativ aus Strecken zusammengesetzt sein kann.

Die Punkte einer *Fläche* sollen immer in einer Ebene liegen. Dies erleichtert viele Berechnungen und ist keine Beschränkung der Allgemeinheit, da bei Bedarf Flächen in mehrere Teile zerschlagen werden können, die spätestens als Dreiecke zwangsläufig jeweils in einer Ebene liegen. Diese Bedingung wird im weiteren Verlauf der Arbeit vorausgesetzt.

4.2.3.2 Arbeitsbereich

Die Wurzel des Datenmodells ist der *Arbeitsbereich*, welcher neben einigen globalen Einstellungen mehrere *Projekte* beinhalten kann.

Jedes Projekt besitzt mindestens eine persistente Liste von Segmenten zur Bearbeitung der Eingangsdaten. Zur besseren Übersichtlichkeit und Strukturierung von Informationen können Segmentlisten neben Segmenten auch wieder Segmentlisten beinhalten und ermöglichen so eine baumartige hierarchische Struktur.

Weiterhin wird für jede gestartete Berechnung eine temporäre Segmentliste zur Haltung aller Individuen der Population genutzt. Die Segmente bilden eine flexible Struktur, die nicht nur während der Erhebung und Bearbeitung der Modelle, sondern auch während der evolutionären Berechnung als Individuum genutzt wird. Daher können gut bewertete Individuen zur Beschleunigung späterer Rechnungen einfach als persistentes Segment übernommen werden. Die zugehörige Struktur ist als vereinfachtes Klassendiagramm in Abb. 4.2 dargestellt.

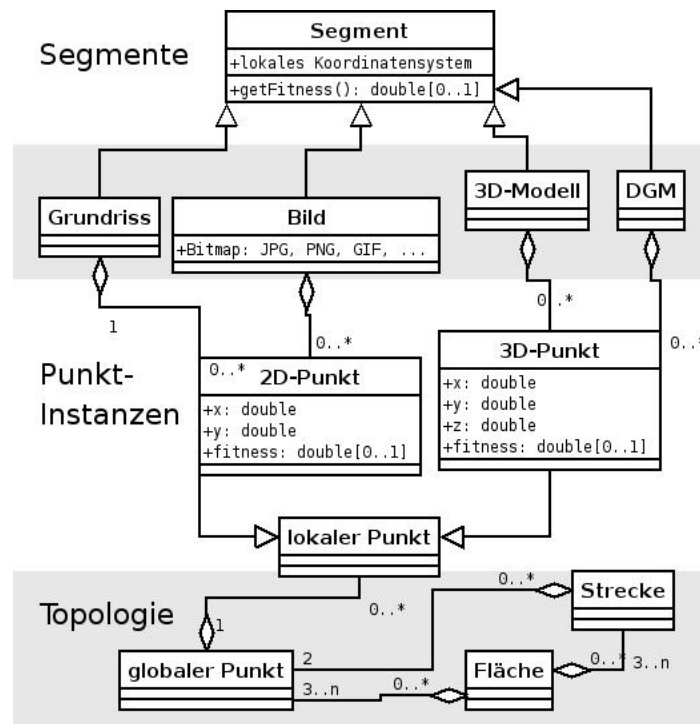


Abbildung 4.1: Vereinfachtes Klassendiagramm der globalen und lokalen Struktur

4.2.3.3 Suchstrukturen

Teil des Datenmodells sind auch Strukturen zur effizienten Durchführung von Suchanfragen. Ausgehend von üblichen Anfragen wird das Datenmodell entsprechend ergänzt.

Die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Suchanfragen beziehen sich auf einen lokalen Punkt und fragen nach der

- Menge (oder nur Anzahl) homologer Punkte, der
- Existenz eines homologen Punktes in einem speziellen Segment oder der
- Instanz des homologen Punktes in einem speziellen Segment.

Da jeder lokale Punkt die direkte Referenz zum globalen Punkt besitzt, wird dort eine Suchstruktur geführt. In der Praxis hat sich aufgrund der Häufigkeit der Anfragen eine HashMap bewährt, die unter Angabe eines Segmentes den passenden lokalen Punkt referenziert, falls dieser existiert.

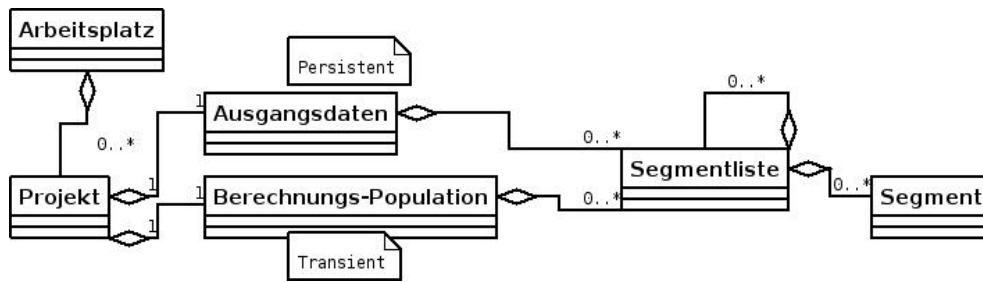


Abbildung 4.2: Vereinfachtes Klassendiagramm mit Segmentlisten

Weiterhin stellt sich oft die Frage nach der Sichtbarkeit von Flächen. Bewährt hat sich die Unterteilung in

1. Fläche F ist nicht im Segment enthalten,
2. Fläche F ist teilweise im Segment enthalten oder
3. Fläche F ist vollständig im Segment enthalten.

Hierzu werden je Fläche zwei Listen geführt, die Referenzen auf alle Segmente verwalten, in denen die Fläche 1) vollständig bzw. 2) teilweise enthalten ist. Entsprechend werden je Segment zwei Listen gehalten. Da auch Bilder als einzelne Segmente verwaltet werden, kann somit auch dort effizient gesucht werden.

Da im Laufe der Berechnung Hierarchien von Segmenten mit tausenden Elementen temporär entstehen können, merkt sich weiterhin jedes Segment über eine HashMap die Menge aller bereits enthaltenen oder per Rekombination aufgenommenen Segmente.

In der praktischen Umsetzung sind in Form von Listen oder HashMaps weitere Suchstrukturen enthalten, die eine freie Bewegung der Operatoren auf den Daten mit guter Performance ermöglichen. Sie sind jedoch mehr Elemente der praktischen Umsetzung als konzeptionelle Strukturen und werden daher hier nicht weiter betrachtet. Konzeptionell ist eine intensive Vernetzung innerhalb des Datenmodells durch effiziente Suchstrukturen vorgesehen (siehe Kap. 6.3.3).

4.2.3.4 Homologe Punkte

Die Verarbeitung der heterogenen Ausgangsmodelle zu einem gemeinsamen Zielmodell benötigt Beziehungen zwischen den Segmenten. Dies kann innerhalb gleichartiger oder zwischen unterschiedlichen Modellen geschehen.



Abbildung 4.3: Hausecke mit digitalisierten homologen Bildpunkten

4.2.3.4.1 Homologe Punkte zwischen Bildern Verfahren der Photogrammetrie beruhen auf der Zuordnung homologer Punkte in Bildern (Abb. 4.3). Die nötigen Referenzen werden hier durch Zuordnung eines globalen Punktes zu mehreren lokalen Punkten erreicht.

Werden beispielsweise Flächen in einem Bild digitalisiert, auf ein anderes Bild übertragen und dort eingepasst, so werden beim ersten Erzeugen der Fläche die zugehörigen globalen Punkte und für die Bildkoordinaten lokale Punkte erzeugt. Das Übertragen auf ein anderes Bild erzeugt dann nur neue lokale Punkte, welche mit den bereits existierenden globalen Punkten referenziert werden, und definiert so homologe Punkte.

4.2.3.4.2 Homologe Punkte zwischen anderen Datenmodellen Wie in Bildern, so sind auch bei 3D-Modellen, Grundrissen und anderen Datenmodellen den lokalen Punkten globale Punkte zugeordnet. Durch Referenzierung mehrerer lokaler Punkte mit dem selben globalen Punkt können somit typübergreifende Relationen abgebildet werden.

4.2.3.4.3 Interpolation bei DGMs In digitalen Geländemodellen können in einer zweidimensionalen Aufsicht weitere Punkte digitalisiert werden, deren dreidimensionale Koordinaten sich durch Interpolation auf der DGM-Oberfläche ergeben. Diese neuen Punkte können zur Referenzierung von Punkten anderer Segmente genutzt werden.

4.2.3.5 Semantische Daten

Semantische Daten ergänzen die reine Geometrie durch Attribute und Relationen mit Zusatzinformationen (Kap. 3.4). An Punkten, Flächen und Segmenten können beliebig viele Attribute beliebigen Typs angehängt sein.

4.2.3.5.1 Funktion semantischer Daten Semantische Daten besitzen verschiedene Aufgaben. Sie dienen als Datenbehälter und ermöglichen das Durchreichen von Informationen vom Datenimport über Berechnungen bis zur Ausgabe. So gehen Zusatzinformationen nicht verloren.

Sie können verwaltet und bearbeitet werden, einerseits ganz allgemein in einer tabellarischen Sicht, andererseits auch durch spezielle Funktionen: Werden Zusatzinformationen, wie z.B. bestimmte Geometrieigenschaften (z.B. Dachfläche, Wandfläche), Relationen (z.B. Linie L_A ist parallel zu Linie L_B , Fläche F_A ist in selber Ebene wie F_B) oder sogar attributive Relationen (z.B. Linie L_A hat Abstand c zu Linie L_B , Fläche F_A steht im Winkel α zu F_B) gesetzt, so werden diese als semantische Daten gespeichert.

Daraus ergibt sich ein weiterer grundlegender Vorteil: Semantische Daten können bei der evolutionären Berechnung genutzt und ausgewertet werden. So können einerseits weitere Annahmen ermittelt und andererseits bestehende Annahmen besser bewertet werden.

4.2.3.5.2 Voraussetzungen zur Berechnungs- und Prüfungsnutzung

Die Nutzung von semantischen Informationen durch die EA erfordert ein spezialisiertes Format, welches in die Importfilter und die Bearbeitung von Segmenten eingearbeitet ist. Andere Informationen dienen der reinen Datenhaltung und werden von den EA ignoriert.

Ist beispielsweise ein Punkt als Teil eines Grundrisses markiert, so können angrenzende und in Bildern sichtbare Flächen als Hauswand und daher eventuell vom Grundriss ausgehend senkrecht nach oben zeigend angenommen werden. Jedoch muss dazu ein spezialisierter Attributtyp *Grundriss* definiert sein.

4.2.3.5.3 Typen semantischer Informationen Allgemeine Typen dienen der reinen Datenverwaltung und des „Durchschleifens“ von Werten, spezialisierte Typen sind zusätzlich noch für die Auswertung durch EA ausgelegt. Alle Klassen semantischer Informationen werden von einem die nötigsten Funktionen festlegenden Interface abgeleitet und sind daher gut erweiterbar.

Allgemeine Typen Es gibt Attribute für Ganzzahlen, Gleitkommazahlen und Texte. Weiterhin wird ein Typ, der nur einen Attributnamen ohne Inhalt

darstellt, definiert. Dies ergibt Sinn mit der Erweiterung, dass jedes Attribut wiederum eine Liste von Attributen beinhalten kann und ermöglicht so komplexe baumartige Strukturen.

Spezialisierte Typen Die spezialisierten Typen werden von Importmodulen oder manuell gesetzt und bei Bedarf von den EA ausgewertet.

Für Segmente werden u.a. die Flags „ist 2D“, „ist Grundriss“ und „ist 3D“ definiert. Flächen können als „Wand“, „Dach“ oder „Boden“ gekennzeichnet sein.

Weiterhin werden die *spezialisierten Relationen* „Fläche F_1 ist parallel zu Fläche F_2 “, „Fläche F_1 ist parallel zu Fläche F_2 mit Abstand d “, „Fläche F_1 liegt in selber Ebene wie Fläche F_2 “ und „Punkt \mathbf{p} hat Abstand d von Fläche F “ festgelegt.

4.2.3.6 Kompatibilität zu Standards

Während in Kapitel 2.2.3 allgemein 3D-Schnittstellen beschrieben wurden, wird nun untersucht, wie sich Daten aus diesen Formaten in das hier entworfene Datenmodell abbilden und wieder ausgeben lassen. Exemplarisch werden die Schnittstellen VRML, SG-VRML und CityGML betrachtet.

4.2.3.6.1 VRML Auch wenn sich in VRML sehr komplexe Strukturen abbilden lassen, so wird es doch von den meisten Anwendungen in einer einfachen Form exportiert. Da fast kein 3D-Modell per Hand als VRML geschrieben wird, wird der Einfachheit halber von diesem vereinfachten Format ausgegangen. Die Abbildung in das entworfene Modell geschieht durch folgende Schritte:

1. Je VRML-Datensatz wird ein Segment Seg_1 angelegt.
2. Die Flächen werden mit globalen Punkten angelegt.
3. Die lokalen 3D-Punkte werden im Segment Seg_1 angelegt.
4. Wenn angegeben, werden Attribute der Flächen wie Farbe oder Transparenz gesetzt.
5. Wenn angegeben, werden Bilder und die aus den Texturkoordinaten $\in [0..1]$ folgenden lokalen Punkte angelegt.

Die Rücktransformation eines Segmentes nach VRML geschieht, indem über alle enthaltenen Flächen gelaufen wird und deren Parameter sowie das Bild mit der besten Sichtbarkeit verwendet werden.

Somit ist eine verlustfreie Transformation in beide Richtungen möglich.

4.2.3.6.2 SG-VRML Da SG-VRML nur eine einfache Erweiterung von VRML ist, gestaltet sich auch die Umwandlung sehr ähnlich. Wesentliche Ergänzung sind als VRML-Kommentare verpackte semantische Informationen. Beispielsweise:

```
#3dw:sb=0010031;class=011-F-Gebäude;oid=ID_21120'0  
#3dw:sr  
#3dw:Face;oid_3dw=10459
```

Die Kürzel `sb` und `sr` stehen für „Start building“ und „Start roof“. Zu der so erfolgten Klassifizierung von Flächen kommen noch attributive Informationen hinzu.

Die Klassifizierung und semantischen Informationen sind im Entwurf des Datenmodells vorgesehen und können daher gut abgebildet werden.

4.2.3.6.3 CityGML CityGML (Kap. 2.2.3.2) definiert zusätzlich zu der in GML-Syntax abgebildeten Geometrie zahlreiche semantische Informationen. Hierbei handelt es sich um Attribute, Relationen und eine mehrstufige Gruppierung von Objekten.

Die Attribute und Relationen lassen sich durch die in Kap. 4.2.3.5 vorgestellten Strukturen abbilden. Besonders die Möglichkeit mehrere Attribute unter ein Attribut zu hängen kommt der baumartigen XML-Struktur von CityGML entgegen.

CityGML kann Objekte in mehreren Ebenen gruppieren. Dies dient der Zusammenfassung von einzelnen Elementen zu Gebäudeteilen (Basis, Dach, Anbau, ...), von Gebäudeteilen zu Gebäuden, zu Häuserblocks, zu Stadtvierteln, zu Stadtteilen, zu einer Stadt und so weiter. Diese Strukturierung lässt sich durch Segmente in Segmenten abbilden, wobei im wesentlichen nur die Blätter des so aufgebauten Baumes mit Daten gefüllt werden. Übergeordnete semantische Informationen wie der Name eines Stadtviertels oder einer Stadt werden bei den entsprechenden inneren Knoten abgelegt.

Weiterhin kann CityGML eine Szene parallel in mehreren LoDs vorhalten. Um dies abzubilden, wird für jeden enthaltenen LoD ein eigenes Segment auf höchster Ebene erzeugt. Diese Segmente können dann bei Bedarf aktiv oder inaktiv geschaltet werden.

4.3 Bewertungssystem

Der folgende Abschnitt untersucht Grundlagen der Bewertung. Die vorgestellten Maße haben einzeln keine Relevanz, sondern werden im weiteren Verlauf

dieser Arbeit, besonders in Kap. 4.5 und Kap. 4.6, verwendet. Es werden erst allgemeine und dann auf das entworfene Datenmodell bezogene Bewertungstypen behandelt.

4.3.1 Allgemeine Gütemaße

Der folgende Abschnitt betrachtet grundlegende Gütemaße einfacher Sachverhalte, auf die später aufgebaut wird.

Bei den Bewertungen wird ein kontinuierlicher Wertebereich $g \in [0, 1]$ mit dem schlechtesten Wert 0 und dem besten Wert 1 angestrebt.

4.3.1.1 LGS-Güte

Da lineare Gleichungssysteme (LGS) oft Teil einer Berechnung und daher mitverantwortlich für deren Güte sind, ist eine einzelne LGS-Bewertung als Komponente sinnvoll. Die folgenden Kategorien beziehen sich jeweils auf ein LGS, welches bereits alle vorhandenen oder relevanten Informationen abbildet und aus dem redundante Informationen entfernt wurden. Ein Gleichungssystem ist

- **unterbestimmt**, wenn es mehr Unbekannte als Gleichungen enthält. Daher kann keine eindeutige Lösung ermittelt werden und es wird mit $g = 0$ abgestraft.
- **regulär**, wenn es gleich viele Unbekannte wie unabhängige Gleichungen enthält. Es gibt genau eine eindeutige und alle Gleichungen exakt erfüllende Lösung, die somit den besten Fall darstellt und daher mit $g = 1$ bewertet wird.
- **überbestimmt**, wenn es weniger Unbekannte als Gleichungen enthält. Überbestimmte LGS sind schwierig zu bewerten: Eine alle Gleichungen exakt erfüllende Lösung ist der beste Fall und erhält $g = 1$, aber es fehlt eine einfache Grenze zur Abstufung gegen 0. Das LGS wird mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst (Kap. A.2.2). Die Abweichung $\epsilon = (\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \dots \ \epsilon_n)^T = \mathbf{x} - \mathbf{b}$ (aus Formel A.16) ermöglicht ein Genauigkeitsmaß ähnlich der Varianz, welches durch Normierung auf eine problemspezifische Größe w und Begrenzung auf den Wertebereich $[0, 1]$ als Güte abgebildet wird:

$$g = \max \left(1, \min \left(0, 1 - \frac{1}{nw} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \right) \right) \quad (4.1)$$

4.3.1.2 2D-Aufspanngüte

Die 2D-Aufspanngüte beschreibt für Punkte und Vektoren, wie gut sie eine Ebene aufspannen.

Berechnung bei zwei Vektoren Zwei Vektoren \mathbf{e} und \mathbf{f} haben genau dann eine hohe 2D-Aufspanngüte, wenn sie linear unabhängig, rechtwinklig zueinander und gleichen Betrages sind.

Nach Kap. A.2.1.2 gibt der Betrag $|\mathbf{g}|$ des Vektorprodukts $\mathbf{g} = \mathbf{e} \times \mathbf{f}$ die Fläche des durch \mathbf{e} und \mathbf{f} aufgespannten Parallelogramms an. Diese ergibt im Optimalfall zweier rechtwinkliger Vektoren gleichen Betrages ein Quadrat mit der Fläche $f = (\max(|\mathbf{e}|, |\mathbf{f}|))^2$. Mit steigender Abweichung vom Optimalfall nähert sich f der Null. Mittels Normierung der Parallelogrammfläche auf den zugehörigen Optimalfall ergibt sich die 2D-Aufspanngüte als:

$$g_{e,f} = \frac{|\mathbf{e} \times \mathbf{f}|}{(\max(|\mathbf{e}|, |\mathbf{f}|))^2} \in [0, 1] \quad (4.2)$$

Alternativ kann das Vergleichsquadrat mit gleicher Gesamtkantenlänge genutzt werden:

$$g'_{e,f} = \frac{|\mathbf{e} \times \mathbf{f}|}{\left(\frac{2 \cdot (|\mathbf{e}| + |\mathbf{f}|)}{4}\right)^2} = \frac{4 \cdot |\mathbf{e} \times \mathbf{f}|}{(|\mathbf{e}| + |\mathbf{f}|)^2} \in [0, 1] \quad (4.3)$$

Berechnung bei Punkten Mangels konstruierbarer Aufspannvektoren ist die Aufspanngüte bei weniger als drei Punkten Null. Existieren mindestens drei Punkte, so werden aus allen 3er-Punktkombinationen jeweils die Vektoren \mathbf{e} und \mathbf{f} gebildet. Die Wahl des Basispunktes wirkt sich dabei nicht aus.

Ob von allen Kombinationen die maximale oder die minimale Aufspanngüte weiterverwendet wird, ergibt sich aus der konkreten Anwendung.

4.3.1.3 3D-Aufspanngüte

Bei vielen Vektorberechnungen wird erwartet, dass drei Aufspannvektoren \mathbf{e} , \mathbf{f} und \mathbf{g} linear unabhängig sind und möglichst gut den Raum aufspannen (*Raum-system*), also die Ausdehnung in alle Richtungen gleich groß und ungleich Null ist (z.B. Einheitsvektoren). Da es auch hier keine harte Grenze zwischen linear abhängig und optimal den Raum aufspannend gibt, ist ein Gütefaktor $\in [0, 1]$ wichtig.

Bewertung anhand des Spatprodukts Das Spatprodukt (Kap. A.2.1.3) gibt das durch die Vektoren aufgespannte Volumen an. Das größte bei fester Gesamtkantenlänge erreichbare Volumen ist ein Würfel, der auch den gesuchten Optimalfall beschreibt. Das kleinste Volumen $v = 0$ ergibt sich entsprechend bei linear abhängigen Vektoren.

Da Zwischenwerte sinnvoll interpoliert werden können, wird die 3D-Aufspanngüte (auch: *Raumsystemgüte*) äquivalent zu der 2D-Aufspanngüte auf das aufgespannte Volumen bezüglich des durch einen Würfel mit Kantenlänge $l = \max(|\mathbf{e}|, |\mathbf{f}|, |\mathbf{g}|)$ aufgespannte Volumen gesetzt:

$$g_{e,f,g} = \frac{|\langle \mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g} \rangle|}{(\max(|\mathbf{e}|, |\mathbf{f}|, |\mathbf{g}|))^3} \in [0, 1] \quad (4.4)$$

Alternativ kann das Volumen auch bezüglich des durch einen Würfel mit gleicher Gesamtkantenlänge erzeugten Volumens betrachtet werden und liegt somit im gewünschten Wertebereich zwischen Null und Eins:

$$g'_{e,f,g} = \frac{|\langle \mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g} \rangle|}{\left(\frac{4 \cdot |\mathbf{e}| + 4 \cdot |\mathbf{f}| + 4 \cdot |\mathbf{g}|}{12}\right)^3} = \frac{27 \cdot |\langle \mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g} \rangle|}{(|\mathbf{e}| + |\mathbf{f}| + |\mathbf{g}|)^3} \in [0, 1] \quad (4.5)$$

3D-Modell-Aufspanngüte Für n 3D-Punkte bilden alle Punkte außer des ersten, jeweils subtrahiert mit genau dem ersten Punkt, insgesamt $n - 1$ Richtungsvektoren. Es werden alle 3er-Mengenmöglichkeiten nach Formel 4.5 untersucht. Da die Rechnung durch die besten Aufspannvektoren geprägt wird, ist das maximale $g_{e,f,g}$ das Ergebnis.

4.3.2 Modellspezifische Gütemaße

Im Folgenden werden Gütemaße betrachtet, die in den modellspezifischen Objekttypen vorkommen. Es werden Punkte, Segmente und Flächen als grundlegende Elemente der Ausgangsmodelle bewertet und die Fitness als Gesamtbewertung eines Individuums während der EA spezifiziert.

4.3.2.1 Punktgüte

Die Güte $g_p \in [0..1]$ eines Punktes \mathbf{p} ist die Basis des Bewertungssystems und bezieht sich jeweils auf einen lokalen Punkt. Globale Punkte besitzen keine Koordinaten und daher auch keine Bewertung.

Wird der Punkt erstmalig gesetzt, so erhält er eine Initialgüte

$$g_p = g_{Modul} \cdot g_{MaxModul}, \quad (4.6)$$

wobei $g_{Modul} \in [0..1]$ die individuelle Bewertung des Moduls und $g_{MaxModul} \in [0..1]$ die feste modulspezifische Höchstbewertung ist.

Beispielsweise kann ein Modul ein Importfilter für CityGML sein, der aus den Informationen der Datei (z.B. Gebäudehöhe oder Etagenanzahl angegeben) die Punkte mit einzelnen g_{Modul} bewertet. Das Importmodul kann durch $g_{MaxModul} = 1$ als sehr genau klassifiziert werden.

4.3.2.2 Segmentgüte

Die Güte g_{Seg} eines Segmentes ergibt sich aus der Durchschnittsgüte aller enthaltenen Punkte

$$g_{Seg} = \frac{\sum g_p}{n_{PtsSeg}}, \quad (4.7)$$

wobei n_{PtsSeg} die Anzahl der im Segment enthaltenen Punkte ist.

4.3.2.3 Fitness

Als Fitness wird bei EA die Bewertung von Individuen bezeichnet, anhand derer sie verglichen werden. Es genügt hier jedoch nicht, einfach die Segmentgüte einzusetzen, da diese zwar die Qualität eines Individuums, nicht jedoch die Menge der lokalen Punkte bezüglich der Menge der globalen Punkte des Projekts beschreibt.

Praktisch betrachtet soll ein Segment mit mittlerer Güte, welches fast das gesamte Zielmodell darstellt, einem winzigen Ausschnitt hoher Güte vorgezogen werden.

$$f_{Seg} = \frac{n_{PtsSeg}}{n_{Pts}} \cdot g_{Seg} = \frac{\sum g_p}{n_{Pts}} \quad (4.8)$$

n_{Pts} ist die Anzahl der globalen Punkte des Projekts und somit die maximale Anzahl lokaler Punkte eines Segmentes.

4.3.2.4 Rekombinationsbewertung

Die Bewertung der Rekombination ist ein wichtiges Kriterium, da hierbei alle beteiligten Individuen gegeneinander abgeglichen werden. Dabei haben bisherige individuelle und möglicherweise ungenaue Bewertungen keinen allzu starken Einfluss. Dies wird in Kap. 4.4.8 und Kap. 4.5.2.6 behandelt.

4.3.2.5 Parallelfächengüte

Als *Parallelfäche* wird eine Fläche F in einem Bild Pic bezeichnet, die parallel zu der Bildebene liegt.

Bei der Bewertung wird spekulativ der häufig zutreffende Fall verallgemeinert, dass die Kanten von Flächen eines Gebäudes horizontal oder vertikal verlaufen. Als Bewertungskriterium $g_{parF} \in [0, 1]$ kann daher die durchschnittliche Abweichung der Steigung der 2D-Kanten der Flächen $(\mathbf{p}_{i-1}, \mathbf{p}_i)$ von der Horizontalen bzw. Vertikalen genutzt werden.

$$g_{parF} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=2}^{n_p} \frac{\min(|p_{i,x} - p_{i-1,x}|, |p_{i,y} - p_{i-1,y}|)}{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i-1}|} \quad (4.9)$$

Hierbei sind die n_p Punkte von F durch $\mathbf{p}_1 \cdots \mathbf{p}_{n_p}$ mit $\mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} p_{i,x} \\ p_{i,y} \end{pmatrix}$ dargestellt. Diese Annahme hat sich in Praxistests als sinnvoll erwiesen. Als Parallelfäche kann F ab einer experimentell ermittelten sinnvollen Wahrscheinlichkeit von $g_{parF} > 0.9$ betrachtet werden.

Stellen die meisten Flächen eines Bildes Parallelfächen dar, so wird es als *Parallelbild* bezeichnet. Ein frontal aufgenommenes Haus ergibt oft ein Parallelbild.

4.4 Entwurf des erweiterten EA-Modells

Um das Konzept der EA auf die Anforderungen der Stadtmodellierung anzupassen, wird es problembezogen erweitert.

Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der Populationsgröße und Laufzeit, da diese über die praktische Anwendbarkeit der Verfahren im Kontext der EA entscheiden.

4.4.1 Äußerer Ablauf des Verfahrens

Der äußere Ablauf des Verfahrens ist in Abb. 4.4 vereinfacht dargestellt. Ausgangspunkt ist eine Menge heterogener Ausgangsmodelle (Schritt 1), die durch geeignete Schnittstellen in Segmente transformiert werden (Ausgangssegmente). Das Segment wird durch modellspezifische Erweiterungen implementiert (Abb. 4.1) und kann so heterogene Ausgangsmodelle in der einheitlichen Hülle von Segmenten ohne Informationsverlust abbilden (Schritt 2).

Zum Erreichen eines umfassenden Zielmodells müssen die Ausgangssegmente miteinander in Beziehung gesetzt werden. Dazu können in einem Vorverarbeitungsschritt die Segmente bearbeitet und insbesondere Relationen zwischen

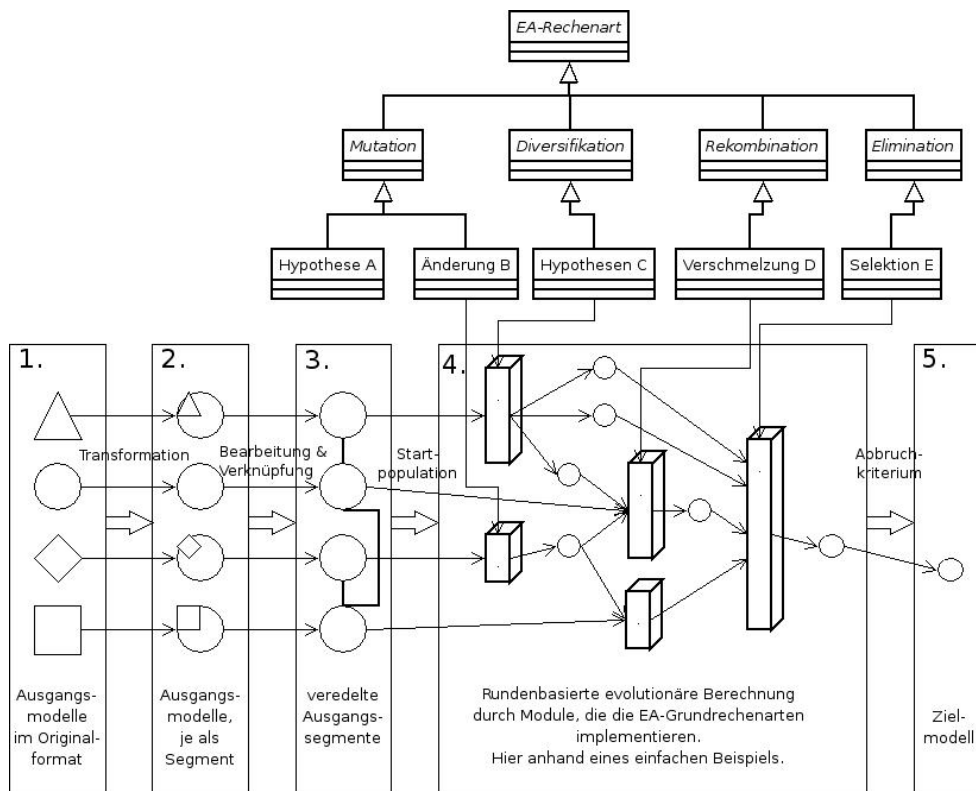


Abbildung 4.4: Äußerer Ablauf des Verfahrens

ihnen gesetzt werden. Bei Bedarf können neue Punkte, Strecken und Flächen digitalisiert und semantische Informationen bearbeitet werden. Es entstehen die veredelten Ausgangssegmente (Schritt 3), die als Startpopulation der EA dienen. Der Datenfluss ist flexibel gehalten und es können jederzeit Segmente neu eingelesen, bearbeitet oder exportiert werden.

Der obere Teil von Abb. 4.4 stellt die Operatoren dar. Hier werden die EA-Standardoperatoren durch spezialisierte Verfahren der Mutation (Kap. 4.5.3), der Diversifikation (Kap. 4.6), der Rekombination (Kap. 4.5.2) und der Elimination (Kap. 4.5.5) ersetzt. Dies bedeutet eine Abkehr von den traditionellen Operatoren der EA, die keine Kenntnis des zu lösenden Problems haben, hin zu problemspezifischen Operatoren. Hierdurch wird die Übertragung der EA auf die Problematik der 3D-Stadtmodellierung erst ermöglicht.

In Schritt 4 arbeiten die spezialisierten Operatoren auf der Startpopulation. Dieser in Abb. 4.4 beispielhaft dargestellte Ablauf wird in Kap. 4.4.2 näher beschrieben.

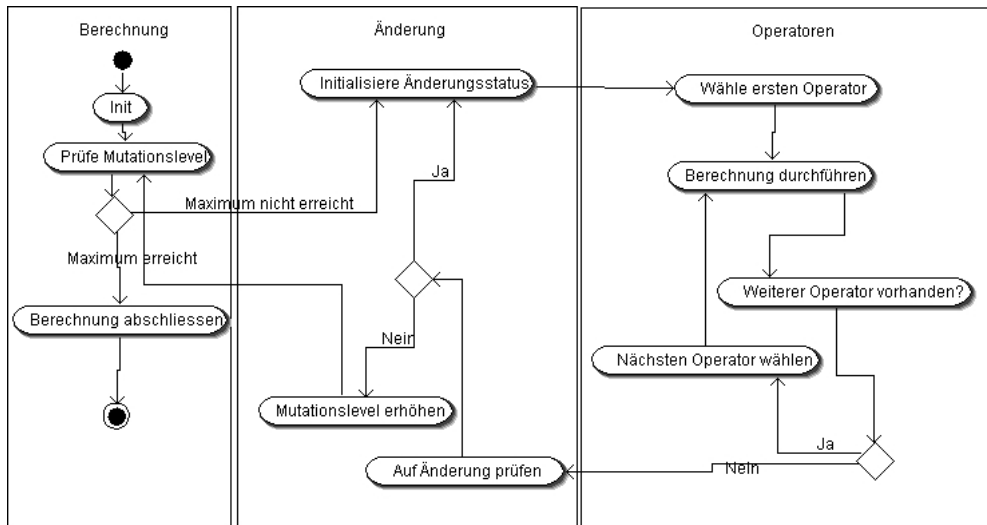


Abbildung 4.5: Grober Ablauf der Berechnung als Aktivitätsdiagramm

Sobald ein Abbruchkriterium (Kap. 4.5.6) erfüllt ist, wird aus der verbliebenen Population das Segment mit der besten Bewertung als Zielmodell gewählt (Schritt 5).

4.4.2 Ablauf der Berechnung

Die Evolution arbeitet in vielen kleinen Schritten, den Generationen. Die aktuell wirkende Population lässt sich einer, ihre Nachfahren der nächsten Generation zuordnen.

Analog hierzu wird auch in der untersuchten Spezialisierung der EA ein rundenbasierter Ansatz verfolgt. Dies folgt aus der mangelnden Parallelität heutiger Computersysteme und ist vorteilhaft für die Systemperformance und die Auswertung der Abbruchkriterien. Dabei wird auf der höchsten Ebene so lange gearbeitet, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

Abbildung 4.5 stellt den äußeren Ablauf der Berechnung dar. Der weitere Vorgang innerhalb des Punktes „Berechnung durchführen“ hängt von den jeweiligen Operatoren ab. Meistens folgt dort noch eine alle Segmente der aktuellen Population durchlaufende Zwischenebene, die zur Vermeidung von Endlosschleifen die eben neu erzeugten Segmente ignoriert und für den nächsten Durchlauf aufspart. Dies entspricht auch dem Konzept der Generationen.

Wurden alle Operatoren auf die aktuelle Population angewandt und ist noch kein Abbruchkriterium erfüllt, so wird bei erfolgter Änderung wieder mit dem ersten Operator begonnen. Wären doppelte Aufrufe möglich (Kap. 4.4.9), so

könnte durch sich gegenseitig aufhebende Operatoren schnell eine Endlosschleife entstehen.

Sobald eine Generation keine Änderungen durchführt, wird der Mutationslevel (Kap. 4.4.3) erhöht und somit weiteren Operatoren der Weg bereitet. Das Erreichen des maximalen Mutationslevels wird, da sich keine Änderung mehr ergeben kann, als Abbruchkriterium behandelt.

Weiterhin können einzelnen Operatoren aus Gründen der Performance lokale Abbruchkriterien zugewiesen werden, welche dann einen Wechsel zum nächsten Operator bewirken.

4.4.3 Mutationslevel

Dieser Absatz stellt den Mutationslevel vom Ansatz über die Analogie zu Entscheidungsfindungsprozessen bis zur praktischen Umsetzung als Erweiterung der EA dar.

Idee

In ersten praktischen Versuchen war die Zahl der Individuen problematisch. Eine zu starke Elimination oder aber zu wenige neu erzeugte Individuen schränkten die Vielfalt so ein, dass kein sinnvolles Zielmodell erreicht werden konnte. Wurde jedoch die Evolution frei laufen gelassen, entstand durch die vielen Möglichkeiten und deren vielseitige baumartige Rekombinationswege eine Populationsexplosion und daraus resultierend eine so schlechte Performance, dass das Zielmodell oft nicht in akzeptabler Rechenzeit erreicht werden konnte.

In Analogie zu zwischenmenschlichen Entscheidungsfindungsprozessen wurde eine Methode entwickelt, sowohl stabile als auch hypothetische Algorithmen ohne überflüssige Einschränkung der Vielfalt sinnvoll zusammen wirken zu lassen.

Analogie zu zwischenmenschlichen Entscheidungsfindungsprozessen

Die hier mit Mutationslevel bezeichnete Vorgehensweise findet sich auch in konstruktiven zwischenmenschlichen Entscheidungsfindungsprozessen wieder. Es kann sich bildlich eine Diskussionsrunde vorgestellt werden. Die verschiedenen Operatoren werden durch die unterschiedlichen Teilnehmer repräsentiert. Zuerst werden die von ihren ausgereiften Konzepten überzeugten Teilnehmer ihre Vorschläge ausbreiten und von diesen ausgehend eine Lösung erörtern. Bleiben danach noch Fragen offen, so werden anschließend weitere Ideen („wäre es nicht auch möglich, dass ...“) angehört und ausgewertet. Ergeben sich in

der späteren Diskussion sinnvollere Werte für bereits getroffene Annahmen, so können die alten Werte jederzeit verworfen werden. Ergänzungen sind auch möglich und werden in das bestehende Konzept integriert. Jede neue Idee wird an dem bereits gefundenen Lösungsansatz gemessen.

Realisierung

In der praktischen Umsetzung wird ein Wert, der so genannte Mutationslevel, von Null ausgehend erhöht. Jedes Verfahren hat einen Schwellenwert, ab dem es erst aufgerufen wird. Der Mutationslevel wird nur dann erhöht, wenn mit den bisher erlaubten Verfahren keine Verbesserung mehr erzielt wird. Steigt er über den höchsten Schwellenwert, so kann die Berechnung abgeschlossen werden (Abb. 4.5).

Durch die langsame Steigerung des Mutationslevels werden zuerst sichere und wahrscheinliche Rechnungen ausgeführt, um sich anschließend mit der stabilen Basis den unsicheren und spekulativeren Annahmen zuzuwenden.

So kommen alle Variationen zum Einsatz, werden aber bei bereits vorhandenen sicheren Alternativen schon durch die Früherkennung oder bei nur teilweiser Überdeckung durch sinnvolle Rekombinationen optimal behandelt.

Der verfahrensspezifische Wert des Mutationslevels klassifiziert somit die Zuverlässigkeit und Stabilität des Moduls und wird einmalig manuell anhand der angenommenen Zuverlässigkeit zugewiesen.

Eine durch schlecht gesetzte Mutationslevel ungünstige Anordnung der Operatoren wird aufgrund des Bewertungssystems und der rundenbasierten Berechnung zwar die Laufzeit durch zusätzliche Individuen beeinträchtigen, sich aber im Endergebnis nicht negativ auswirken. Aufgrund der Gesamtkomplexität terminiert die Berechnung jedoch nur mit solchen Hilfsmitteln in akzeptabler Zeit und macht so den Mutationslevel zu einem wichtigen Werkzeug.

4.4.4 Populationsgrößenabhängige Elimination

Dieses praxisorientierte Vorgehen behandelt die Frage, wie restriktiv die Elimination vorgehen soll. Die zu ausgiebige Löschung vieler Individuen beeinträchtigt zwar durch Ausschaltung wichtiger Evolutionswege die Qualität der Ergebnisse, andererseits führt ein zu sparsames Löschen zu einem, möglicherweise sogar exponentiellen, Populationsanstieg und verhindert dadurch einen Evolutionsfortschritt in akzeptabler Rechenzeit.

Im Gegensatz zu der massiven Parallelität in der Natur müssen wir von einer primär sequentiellen Abarbeitung und daher mindestens proportional zur Populationsgröße auftretenden Verlangsamung ausgehen. Die Rekombination

zweier Individuen verhält sich in der Laufzeit wegen der Anzahl von Möglichkeiten ($n(n - 1)$) sogar quadratisch.

Dieses Trade-Off-Problem wird gelöst, indem parametrisiert an die Populationsgröße gekoppelt wird, wie restriktiv die Elimination vorgehen soll. So werden u.a. Schwellenwerte definiert, bei deren Überschreitung die Kriterien zur Löschung eines Individuums gelockert werden. Wird ein Schwellenwert unterschritten, so kommen erneut die restriktiveren Kriterien zum Einsatz.

Gängige Populationsgrößen werden beispielsweise in [Nissen 1994, S. 24] mit 30 bis 200 Individuen angegeben. Die hier genutzte von der Populationsgröße abhängige Elimination löscht ab 100 Individuen häufiger und ab 1000 sehr oft. So wird eine durchschnittliche Population zwischen 60 und 200 Individuen bei komplexen Daten erreicht.

4.4.5 Teilbeschreibungen

In vielen EA stellt ein Individuum eine Beschreibung aller Unbekannten dar. Dies würde bei der 3D-Stadtmodellierung die Spezifikation der gesamten Szene durch ein Individuum bedeuten.

Der verfolgte Ansatz geht jedoch davon aus, dass Teilmengen ermittelt, verglichen und verschmolzen werden: An einer Stelle ergibt sich eine Hausecke, an einer anderen vielleicht ein Erker oder eine Wand, und mit weiteren Individuen entsteht eine Straße.

Daher beschreiben im vorliegenden Entwurf Individuen beliebige Teilmengen der Szene und erheben nur in seltenen Spezialfällen den Anspruch auf Vollständigkeit. Der Grad der Vollständigkeit geht in die Fitnessfunktion ein.

4.4.6 Abschließende Diversität

Die meisten EA streben als Zielmodell ein optimales Individuum an, das das erwartete Ergebnis möglichst gut approximiert. Wie schon durch die Teilbeschreibungen (Kap. 4.4.5) angedeutet, können hier jedoch mehrere disjunkte und korrekte Lösungen nebeneinander existieren.

Dieser Fall tritt ein, wenn die Szene zwar teilweise rekonstruierbar ist, jedoch keine Möglichkeit zu einer Verbindung der einzelnen Teile gefunden wird. So können beispielsweise zwei Häuser jeweils in sich korrekt erstellt werden. Da jedoch keine Verbindung zwischen ihnen existiert, ergeben sich zwei unabhängige Ergebnissegmente.

Dieses Verhalten ist sinnvoll, gewollt und bietet dem Bearbeiter durch Analyse der Ergebnisse einen schnellen Überblick über die fehlenden Informationen. Als Lösung kann dann beispielsweise manuell ein gemeinsamer Grundriss als Verbindungsgrundlage eingefügt oder homologe Punkte ergänzt werden.

4.4.7 Frühelimination

Die Frühelimination ist eine weitere Taktik zur Optimierung der Performance. Neu erzeugte Individuen werden bei der Aufnahme in die Population direkt auf ihre Tauglichkeit geprüft und gegebenenfalls gar nicht erst aufgenommen. Die Prüfung richtet sich dabei nach den Kriterien der Elimination (Kap. 4.5.5). Diese einfache Früherkennung vermeidet die Generierung weiterer Irrläufer auf Grundlage der nicht aufzunehmenden Individuen, was sonst eine Kettenreaktion nach sich ziehen kann. In der Praxis wird hierdurch ein enormer Geschwindigkeitsvorteil erzielt.

4.4.8 Fehlerkorrektur durch Rekombination

Die entwickelte Erweiterung der EA ermöglicht eine besonders effiziente Auswirkung der Selektion. Die anfänglich nur sehr kleine Teile der Szene beschreibenden Individuen können sich längerfristig aufgrund der größenabhängigen Fitnessfunktion nur durch Rekombination (Kap. 4.5.2) mit anderen Individuen durchsetzen. Dabei bedeutet Rekombination hier nicht nur eine einfache Verbesserung der Fitness, sondern oft einen realen Zuwachs an Informationen durch Vergrößerung des beschriebenen Ausschnitts der Szene. Das Individuum wächst also durch Angliederung bisher unbekannter Informationen.

Wird dieses Vorgehen auf den genutzten 2D- bzw. 3D-Raum übertragen, so ergibt sich ein Zusammenstecken verschiedener Einzelteile anhand gemeinsamer Komponenten zu immer größeren Verbänden, welche dann wieder nur ein Individuum darstellen. Mit der Größe der Ausgangsmodelle wächst meist die Menge überlappender Daten, wodurch anhand eines Genauigkeitsmaßes die Qualität des Zusammenfügens bewertet werden kann und in die Güte des neuen Individuums eingeht.

Es wird nun angenommen, dass durch Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten oder falsch liegende Hypothesen ein oder mehrere Segmente mit ganz oder teilweise fehlerhaftem Inhalt entstanden sind. Da ganz ohne korrekte Daten verständlicherweise kein sinnvolles Ergebnis erwartet werden kann, wird zusätzlich von der Existenz von Segmenten mit korrektem Inhalt für den betroffenen Ausschnitt ausgegangen.

Früher oder später werden die verschiedenen Segmente miteinander rekombiniert. Sind beide Individuen korrekt, so gibt es in der realen Welt korrekte Entsprechungen sowohl für die beiden Ausgangssegmente als auch für das Ergebnissegment der Rekombination. Daher können sie gut zusammengefügt werden und ergeben eine kleine Abweichung.

Ist jedoch mindestens ein beteiligtes Segment fehlerhaft, so wird eine große Abweichung dafür sorgen, dass sich andere Segmente durchsetzen.

Im unwahrscheinlichen Fall, dass sich aus fehlerhaften Segmenten über mehrere Stufen hinweg die gesamte Szene widerspruchsfrei ergibt, so ist dies offensichtlich auch eine korrekte Lösung für die genutzten Eingangsdaten und es müssen weitere Daten zur Abgrenzung ergänzt werden.

In der Praxis sorgt dieser „Puzzletest“ dafür, dass mit der Zeit in die Irre laufende Evolutionslinien durch korrekte Segmente überholt und ersetzt werden.

Bewertung

Existieren bei der Zusammenführung zweier Segmente Seg_1 und Seg_2 (z.B. Kap. 4.5.2.1) mehr als drei homologe Punkte, so können diese widersprüchlich und nicht korrekt aufeinander transformierbar sein. Dies äußert sich durch ein überbestimmtes LGS, welches durch die Methode der kleinsten Quadrate (Kap. A.2.2.2) zu der bestmöglichen Lösung gebracht wird.

Bei der Zuordnung einer Güte muss nicht nur die Summe der Quadrate der Abweichungen, sondern auch die Ausdehnung beider Ausgangssegmente zur Maßstäblichkeit berücksichtigt werden.

Als Bewertungsgrundlage bietet sich der Abstand zwischen den gemeinsamen Punkten \mathbf{d}_i aus Seg_1 und deren zugehörigen und von Seg_2 nach Seg_1 transformierten Partnern \mathbf{d}'_i aus Seg_2 an. Dabei sollen viele leichte Abweichungen weniger Strafe kosten als einzelne kritische Ausreißer. Daher wird die Summe der Quadrate der Abweichungen gebildet, diese durch die Anzahl der Punkte geteilt (Varianz) und auf die größte Punktdistanz normiert:

$$g_{transform} = 1 - \frac{1}{dist_{max}} \cdot \sqrt{\frac{\sum |\mathbf{d}_i - \mathbf{d}'_i|^2}{n_{comm}}} \quad (4.10)$$

In der Formel ist n_{comm} die Anzahl gemeinsamer Punkte und $dist_{max}$ die maximale Distanz $|\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j|$. Spannen die homologen Punkte in Seg_1 kein oder fast kein Raumsystem auf, so können die transformierten Punkte durch die schlecht beschriebene Dimension stark verzerrt werden. Daher wird die Güte von jedem transformierten Punkt noch mit der 3D-Aufspanngüte der gemeinsamen Punkte in Seg_1 multipliziert.

Beispiel

Abb. 4.6 stellt beispielhaft die korrekten Segmente (a) und (b2) sowie das fehlerhafte Segment (b1) dar. Die jeweils vier homologen Punkte sorgen bei der Rekombination für ein überbestimmtes LGS. Wird nun (a) mit (b2) rekombiniert, so können die homologen Punkte gut auf einander transformiert werden und es folgt eine hohe Güte $g_{transform}$. Bei der Rekombination von (a) mit

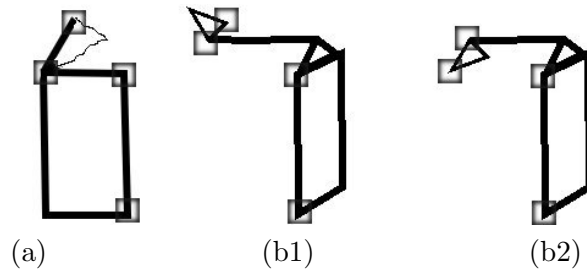


Abbildung 4.6: Fehlerkorrektur durch Rekombination

(b1) folgt wegen der größeren Abweichung der zugehörigen Punkte nach der Transformation ein deutlich kleineres $g_{transform}$. Daher wird sich die Rekombination von (a) mit (b2) durch eine deutlich bessere Bewertung durchsetzen, sogar wenn (b1) eine etwas bessere Ausgangsbewertung als (b2) haben sollte.

4.4.9 Vermeidung doppelter Aufrufe

Eine Herausforderung an EA ist der Umgang mit großen Datenmengen und heterogenen Operatoren. Zur Vermeidung überflüssiger Individuen und der damit verbundenen Laufzeitprobleme ist es vorteilhaft, entgegen dem Vorbild der Natur, keine identischen Experimente mehrfach durchzuführen.

Um einen Aufruf als „identisch“ zu erkennen, müssen das behandelte Individuum, der verwendete Operator und die genutzten Parameter übereinstimmen. Als Parameter ist beispielsweise bei der Rekombination das zweite Individuum oder andere genutzte Daten zu sehen. Aus Gründen der Flexibilität wird die Menge aller Parameter durch einen String beschrieben.

Damit Einträge effizient überprüft, eingetragen und gelöscht werden können, wird die in Abb. 4.7 dargestellte Datenstruktur genutzt. Jedes Individuum speichert pro Operator die bereits getätigten Aufrufe in einer Hash-Struktur, die sich auf den Parameterstring bezieht. Praxistests haben diese Methode als sehr effizient bestätigt.

Hat sich ein Individuum, z.B. durch Mutation, hinreichend geändert, so wird wegen der veränderten Ausgangslage seine Aufrufliste geleert.

4.5 Spezialisierte Operatoren

Das folgende Kapitel behandelt nacheinander die EA-Grundrechenarten Initialisierung, Rekombination, Mutation, Neugenerierung und Elimination. Dabei werden nach knapper Vorstellung des jeweiligen Bereichs problemspezifische

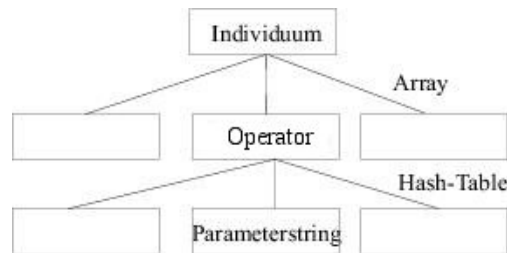


Abbildung 4.7: Datenstruktur zur Vermeidung doppelter Aufrufe

Erweiterungen unter Nutzung des entworfenen Datenmodells (Kap. 4.2) und der Erweiterungen des EA-Modells entwickelt und untersucht. Die Erweiterung der EA-Grundrechenarten ist in Abb. 4.4 dargestellt.

Abschließend werden die weitgehend unverändert von den EA-Standardverfahren übernommenen Abbruchkriterien betrachtet.

Die Spezialisierung der Diversifikation folgt in Kap. 4.6.

4.5.1 Initialisierung

Die Initialisierung wird einmalig zu Beginn der Berechnung ausgeführt. Sie dient der Schaffung einer *Ausgangspopulation* (auch: *Anfangspopulation* [Pohlheim 1999, Kap. 3.6]) für weitere Schritte wie Mutation und Rekombination, die danach iterativ angewendet werden.

„Bei der Initialisierung wird eine Population mit ersten Lösungskandidaten angelegt. Meist werden diese zufällig gewählt, allerdings können auch durch das Optimierungsproblem Startkandidaten vorgegeben werden oder Ergebnisse anderer Optimierungsverfahren genutzt werden.“ [Weicker 2002, S. 44]

Alle Verfahren der Initialisierung erzeugen neue Segmente nur aus den vorgegebenen Ausgangsmustern ohne Berücksichtigung anderer Segmente. Einige Strategien werden nur bei der Initialisierung, andere auch später und mit teilweise veränderten Parametern genutzt.

4.5.1.1 Vorgegebene Szenenausschnitte

Existieren Ausgangsmuster mit bekannten lokalen Koordinaten, so wird aus ihnen durch Übernahme der Originalkoordinaten jeweils ein entsprechendes Segment erstellt. Falls keine Bewertung vorgegeben wurde, bekommen alle Punkte die optimale Güte 1 zugewiesen.

Vorgegebene Szenenausschnitte werden als korrekt betrachtet und hierdurch im weiteren Verlauf in die Berechnungen mit einbezogen. Für fehlerhafte oder

ungenauere Datensätze kann manuell eine andere Güte vorgegeben werden. Weiterhin ist es Aufgabe der Importmodule, mögliche Gütekriterien in den Ausgangsmodellen abzubilden.

4.5.1.2 Photogrammetrische Verfahren zur Initialisierung

Die vorhandenen photogrammetrischen Verfahren können mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen aufgerufen werden. Daher wird bei der Initialisierung nur eine kleine Auswahl berechnet und der Rest den folgenden Schritten überlassen.

Jeder Punkt erhält die bei der photogrammetrischen Berechnung erhaltene Güte, multipliziert mit der 3D-Aufspanngüte des Segmentes. Dies dient der Abwertung von flachen Segmenten, bei denen aufgrund der fehlenden räumlichen Ausdehnung verzerrte und daher für die Weiterverarbeitung ungeeignete Ergebnisse vorkommen können.

Die folgenden Verfahren wurden implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5).

Bilderpaare Die meisten photogrammetrischen Verfahren können bereits mit zwei Bildern und einer verfahrensspezifischen Mindestmenge von homologen Punkten arbeiten. Daher werden alle geeigneten Bilderpaare mit den vorhandenen Verfahren durchlaufen und bewertet. Je nach Art der Ausgangsmodelle werden bereits viele kleine 3D-Ausschnitte rekonstruiert, die sich im Folgenden durch Rekombination zu großen Ausschnitten zusammensetzen können.

Gesamteindruck Zur Schaffung eines die gesamte Szene abdeckenden Segmentes werden alle photogrammetrischen Verfahren, die mit unbekanntem Bildpunkten umgehen können, mit allen Bildern und allen Punkten aufgerufen. Bei komplexen oder umfangreichen Szenen treten sehr schlechte Ergebnisse auf, die durch ihre dementsprechende Güte später ignoriert werden. Sinn dieses Schnellschusses ist das direkte Finden eines vollständigen Segmentes bei kleinen Szenen zur Generierung einer ersten Lösung.

4.5.1.3 Flächen

Nach den Voraussetzungen liegen die Punkte einer Fläche F immer in einer Ebene. Liegt F parallel zu der Bildebene, kann aus den Bildkoordinaten und Null als konstanter dritter Dimension eine 3D-Fläche konstruiert werden. Andernfalls tritt durch die schräge Abbildung der Fläche eine Verzerrung auf.

Dieser spekulative Status wird durch eine Höchstgüte von $g_{max} = 0.5$ und Einbeziehung der Parallellächengüte g_{parF} abgebildet (Kap. 4.3.2.5). Bei als entzerrt markierten Bildern ist $g_{max} = 1$. Die Güte g_{p3d} der Punkte des neuen Segmentes ergibt sich daher aus der zugehörigen Güte g_{p2d} im Bild durch:

$$g_{p3d} = g_{p2d} \cdot g_{max} \cdot g_{parF} \cdot g_{MaxModul} \quad (4.11)$$

Zur Minimierung von Ungenauigkeiten bei der Erfassung wird je Fläche das Bild, dessen Punkte für ein neues Segment verwendet werden, wie folgt gewählt. Ist die Fläche in mindestens einem Bild komplett sichtbar, so wird das Bild verwendet, in dem die Fläche den größten Flächeninhalt hat. Ist die Fläche in keinem Bild ganz sichtbar, so wird das Bild mit den meisten sichtbaren Punkten und, bei mehreren Treffern, davon dasjenige mit dem größten Flächeninhalt des sichtbaren Flächenteils genutzt.

Da zum Einpassen auf andere Segmente mindestens drei gemeinsame Punkte benötigt werden und nur durch mindestens einen weiteren Punkt ein Informationsgewinn stattfinden kann, ist das Erzeugen von Segmenten erst ab mindestens vier Punkten pro Fläche sinnvoll.

Dieses Verfahren wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5). Es ist ein typisches Initialisierungsverfahren, da pro Fläche der Ausgangsmodelle nur ein eindeutiges Segment erzeugt werden kann und danach keine weiteren Ergebnisse folgen.

4.5.2 Rekombination

Nach einer allgemeinen Betrachtung der Rekombination wird ein konkretes Verfahren zur Verbindung von 3D-Segmenten entwickelt, untersucht und verfeinert. Weitere Verfahren, insbesondere zur Verbindung von Bild-Segmenten mit 3D-Segmenten, werden in Kap. 4.6 behandelt.

4.5.2.1 Einführung

Die Rekombination erzeugt aus mehreren vorhandenen Segmenten ein neues: „Durch die Rekombination werden aus zwei oder mehr Elternindividuen die Nachkommen gebildet. Dies geschieht durch Kombination der Variablenwerte der Eltern. In Abhängigkeit der Repräsentation und der zu lösenden Probleme kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz.“ [Pohlheim 1999, S. 34]

Die Ursprungssegmente werden vorerst nicht gelöscht, da weitere Segmente durch andere Kombinationen oder Operatoren aus ihnen folgen können. Ihre Löschung erfolgt separat durch die Elimination (Kap. 4.5.5).

Da Segmente sehr spezielle Individuen sind, wird im Folgenden ein dementsprechend spezialisiertes Verfahren entwickelt.

Jedes Segment stellt ein eigenes Koordinatensystem dar. Ziel der Rekombination ist daher die möglichst verlustfreie Kombination mehrerer Segmente in ein neues durch Übertragung und Verschmelzung der Inhalte. Die Verbindung der Segmente wird durch korrespondierende Punkte definiert.

Ausgehend von einem Basissegment Seg_1 wird ein weiteres Segment Seg_2 nach Seg_1 transformiert. Dabei wird Seg_2 anhand der korrespondierenden Punkte zwischen Seg_1 und Seg_2 durch Rotation, Skalierung und Translation so gewandelt, dass ein möglichst gutes Einpassen erreicht wird.

Mit drei vorgegebenen Punkten existieren genug Informationen zur eindeutigen Einpassung eines 3D-Modells im Raum. Jeder weitere Punkt liefert redundante Informationen und es wird wieder die Methode der kleinsten Quadrate (Kap. A.2.2.2) genutzt. Mit weniger als drei bekannten Punkten ist eine eindeutige Einpassung nicht möglich. Dies ist geometrisch offensichtlich, da jedes räumliche Objekt erst ab mindestens drei Stützpunkten starr im Raum fixiert ist.

4.5.2.2 Grundlegende Methoden

Im folgenden Absatz werden grundlegende Methoden zur Einpassung eines 3D-Modells vorgestellt.

4.5.2.2.1 Vier-Punkte-Verfahren (linear) Dieses recht einfache Verfahren funktioniert für vier oder mehr bekannte homologe Punkte. Die Transformation eines Punktes \mathbf{s} von \mathbf{s}_{alt} zu \mathbf{s}_{neu} lässt sich mit homogenen Koordinaten [Häring u. Massard 2005] durch eine 4×4 Matrix $\dot{\mathbf{A}}$ darstellen als

$$\dot{\mathbf{s}}_{neu} = \dot{\mathbf{A}} \cdot \dot{\mathbf{s}}_{alt}. \quad (4.12)$$

Da es sich bei dieser Transformation um eine Kombination aus Rotation, Skalierung und Translation handelt, werden diese Einzelkomponenten zuerst vorgestellt [Mayer 1997, Kap. 2.2.2], [Microsoft 2000, Kap. '3-D Transformations']:

$$\text{Translation: } \dot{\mathbf{A}}_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ mit der Verschiebung } \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

$$\text{Skalierung: } \dot{\mathbf{A}}_S = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

mit der Skalierung s_x , s_y und s_z auf den entsprechenden Achsen. Die Rotation ergibt sich anhand Tabelle A.2 zu

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{A}}_{R,x} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \dot{\mathbf{A}}_{R,y} &= \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \dot{\mathbf{A}}_{R,z} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

um die jeweiligen Achsen.

Bei der Kombination dieser Verfahren bleibt im Ergebnis die untere Zeile weiterhin $(0 \ 0 \ 0 \ 1)$. Da die Einzelkomponenten nicht ermittelt werden müssen, kann deren Kombination beschrieben werden durch

$$\dot{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

Für alle vorgegebenen homologen Punkte sind sowohl \mathbf{s}_{neu} als auch \mathbf{s}_{alt} bekannt und wir erhalten aus Formel 4.12 ein LGS mit den 12 Unbekannten x_0 bis x_{11} und $3 \cdot s_{vorg}$ Gleichungen, wobei s_{vorg} die Anzahl der vorgegebenen Punkte ist. Dieses LGS wird gelöst (Kap. A.2.2) und anhand der ermittelten Matrix $\dot{\mathbf{A}}$ werden die neuen Positionen \mathbf{s}_{neu} für die restlichen Punkte durch Einsetzen in Formel 4.12 berechnet.

Negative Skalierungen Es sind negative Skalierungen erlaubt, die zusätzlich zu der gewünschten Lösung weitere Ergebnisse ermöglichen könnten. Dieses Umklappen könnte fehlerhafte Resultate hervorbringen. Es tritt jedoch nur auf, wenn die homologen Punkte in einer Ebene liegen.

4.5.2.2.2 Drei-Punkte-Verfahren (nichtlinear) Zur Vermeidung negativer Skalierungsfaktoren im Algorithmus aus Kap. 4.5.2.2.1 und um mit bereits drei Punkten auszukommen, bietet sich ein weiterer Algorithmus an.

Es wird wieder von der in Kap. 4.5.2.2.1 beschriebenen Transformation mit den dort bezeichneten Einzeltransformationen ausgegangen. Die 9 Unbekannten sind die Translationswerte d_x , d_y und d_z , die Skalierungsfaktoren s_x , s_y und s_z und die Rotationsparameter α , β und γ , weshalb auch schon 3 Punkte zur Bestimmung ausreichen.

Die Gesamttransformation $\dot{\mathbf{A}}$ ergibt sich aus

$$\dot{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{A}}_T \dot{\mathbf{A}}_S \dot{\mathbf{A}}_{R,x} \dot{\mathbf{A}}_{R,y} \dot{\mathbf{A}}_{R,z} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ d_x s_x & d_y s_y & d_z s_z & 1 \end{pmatrix} \dot{\mathbf{A}}_{R,x} \dot{\mathbf{A}}_{R,y} \dot{\mathbf{A}}_{R,z}. \quad (4.17)$$

Für alle vorgegebenen homologen Punkte sind sowohl \mathbf{s}_{neu} als auch \mathbf{s}_{alt} bekannt und wir erhalten aus Formel 4.12 ein NLGS mit 9 Unbekannten und $3 \cdot s_{vorg}$ Gleichungen, wobei s_{vorg} die Anzahl der vorgegebenen homologen Punktpaare ist. Dieses NLGS wird gelöst (Kap. A.2.3), aus den Werten wird durch Einsetzen in Formel 4.17 $\dot{\mathbf{A}}$ ermittelt und die neuen Positionen \mathbf{s}_{neu} für die restlichen Punkte durch Einsetzen in Formel 4.12 berechnet.

Test Praxistests lieferten falsche oder sehr ungenaue Werte. Dies liegt an der Komplexität des NLGS, welches durch die vorhandenen Methoden nicht ausreichend gelöst werden konnte. Weiterhin ist die Laufzeit zur Behandlung eines NLGS deutlich höher als die zur Berechnung eines LGS, weshalb das lineare Verfahren vorzuziehen ist.

4.5.2.2.3 Affintransformation Eine weitere Möglichkeit mit verzerrungsfreier Transformation ist die in [Koch 1987] behandelte Affintransformation. Sie wurde jedoch nicht weiter verfolgt, da sich das optimierte Verfahren per LGS (Kap. 4.5.2.6) als völlig ausreichend und sogar Verzerrungsungenauigkeiten minimierend herausgestellt hat.

4.5.2.3 Probleme bei ebener Schnittmenge

Mit der 3D-Einpassung, beispielsweise dem linearen 4-Punkte-Verfahren aus Kap. 4.5.2.2.1, können Segmente mit unterschiedlichen Koordinatensystemen zusammengefügt werden, indem Segment Seg_2 nach Segment Seg_1 transformiert wird.

Bilden die homologen Punkte jedoch kein ausreichendes Raumsystem, so kann bei der Transformation eine Dimension frei skalieren und ein verzerrtes Ergebnis verursachen. Dieser Effekt kann durch negative Skalierung der freien Achse ein



Abbildung 4.8: Zwei Gebäudeteile



Abbildung 4.9: Umklappen bei der Rekombination

Umklappen (oder „auf links drehen“ bzw. invertieren) eines Segmentes bewirken.

Als anschauliches Beispiel sind in Abb. 4.8 zwei Gebäudeteile zu sehen, die nur durch in einer Ebene liegende homologe Punkte verbunden sind. In Abb. 4.9 ist ihre Rekombination zu sehen. Der größere Gebäudeteil ist invertiert, durchdringt daher den kleinen Teil und ragt noch weit zur falschen Seite hinaus. Durch das Umklappen wird auch der Rotationssinn der beteiligten Flächen invertiert, weshalb die vorderen Flächen durchsichtig und stattdessen die Texturen von innen aufgetragen werden. In der Praxis tritt diese Situation erstaunlich oft auf, weil z.B. detaillierte Elemente an vorhandene Flächen (z.B. Wände, Dächer) angebracht werden. Daher wird im Folgenden eine geeignete Lösung erarbeitet.

4.5.2.4 Konstruktion homologer Hilfspunkte

Es soll aus vorhandenen homologen Punkten zweier Segmente, die möglicherweise in einer Ebene liegen, ein weiteres homologes Punktepaar gebildet wer-

den, welches unabhängig zu der ggf. vorhandenen Ebene ist.

Dieses Verfahren bietet sich beispielsweise an, wenn die Rekombination aufgrund in einer Ebene liegender gemeinsamer Punkte versagt oder nicht genügend homologe Punkte bekannt sind.

Voraussetzungen

1. Die Segmente Seg_1 und Seg_2 haben mindestens drei homologe Punkte. Sei $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in Seg_1$ und $\mathbf{a}', \mathbf{b}', \mathbf{c}' \in Seg_2$.
2. Es gibt linear unabhängige $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ als auch $\mathbf{a}', \mathbf{b}', \mathbf{c}'$.

Berechnung Die lineare Unabhängigkeit ist bei rechtwinkligem Abstand zu einem Ebenenpunkt gegeben und folgt aus dem Vektorprodukt, welches noch mit einem passenden Betrag versehen wird.

Wahl eines Tripels Aus der Menge der gemeinsamen Punkte wird aus allen möglichen Tripeln dasjenige $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ gewählt, für deren Aufspannvektoren $\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{a}$, $\mathbf{f} = \mathbf{c} - \mathbf{a}$ das Maximum des Betrages ihres Vektorprodukts gefunden wird. Das Vektorproduktbetragsmaximum liefert die größte aufgespannte Fläche und so einen guten Aufspannwinkel und große Beträge von \mathbf{e} und \mathbf{f} gegen Ungenauigkeit (Kap. A.2.1.2). Bei sinnvollen Ausgangsdaten folgt aus einem guten Tripel $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ auch ein gutes Tripel $(\mathbf{a}', \mathbf{b}', \mathbf{c}')$ in Seg_2 .

Ermittlung der neuen Hilfspunkte

1. Der Vektor $\mathbf{g}_0 = \mathbf{e} \times \mathbf{f}$ ist das Vektorprodukt von \mathbf{e} und \mathbf{f} und steht daher senkrecht auf beiden Vektoren (Kap. A.2.1.2).
2. \mathbf{g} ist das auf die Längensumme von \mathbf{e} und \mathbf{f} normalisierte \mathbf{g}_0 :

$$\mathbf{g} = \frac{|\mathbf{e}| + |\mathbf{f}|}{|\mathbf{g}_0|} \mathbf{g}_0 \quad (4.18)$$

Die Normalisierung auf bekannte Segmentlängen bewirkt einen zum Segment passenden Maßstab in die neue Dimension.

3. Somit bilden $\mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g}$ ein Raumsystem und sind linear unabhängig.
4. Die entsprechenden Vektoren $\mathbf{e}', \mathbf{f}', \mathbf{g}'$ werden äquivalent aus Seg_2 berechnet.



Abbildung 4.10: Das Beispiel aus Abb. 4.9 wird durch Hilfspunkte korrigiert

5. Das neue homologe Punktepaar ist $\mathbf{d} = \mathbf{b} + \mathbf{g}$ und $\mathbf{d}' = \mathbf{b}' + \mathbf{g}'$.

Bei ersten Tests wurde $\mathbf{g} = \mathbf{g}_0$ eingesetzt und es fand keine Normalisierung statt. Der Betrag des Vektorprodukts lässt sich jedoch nicht linear zu den Ursprungsvektoren in andere Koordinatensysteme übertragen und es traten daher starke Verzerrungen in Richtung von \mathbf{g} auf. Dieses Problem wurde durch eine von $|\mathbf{e}|$ und $|\mathbf{f}|$ ausgehende Betragsnormierung anhand Formel 4.18 gelöst.

4.5.2.5 Übertragung einzelner Punkte

Es können auch einzelne Punkte von Seg_1 nach Seg_2 übertragen werden. Es wird zu dem nur in Seg_1 bekannten Punkt \mathbf{d} das homologe Gegenstück \mathbf{d}' in Seg_2 ermittelt:

1. Es werden $\mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{e}', \mathbf{f}', \mathbf{g}'$ nach Kap. 4.5.2.4 berechnet.
2. $\mathbf{h} = \mathbf{d} - \mathbf{b}$ ist der Vektor vom Basispunkt \mathbf{b} aus.
3. Das LGS $i\mathbf{e} + j\mathbf{f} + k\mathbf{g} = \mathbf{h}$ mit den unbekanntem Skalaren i, j, k wird gelöst.
4. Der übertragene Vektor $\mathbf{h}' = i\mathbf{e}' + j\mathbf{f}' + k\mathbf{g}'$ wird berechnet und ergibt den neuen Punkt $\mathbf{d}' = \mathbf{b}' + \mathbf{h}'$.

4.5.2.6 Optimierung

Das Vier-Punkte-Verfahren benötigt mindestens vier gemeinsame Punkte und ist, falls diese eine schlechte 3D-Aufspanngüte aufweisen, anfällig für Verzerrungen. Mit der Konstruktion homologer Hilfspunkte (Kap. 4.5.2.4) lässt sie

sich jedoch verzerrungssicher ausbauen und benötigt nur noch mindestens drei gemeinsame Punkte.

Prinzip Es werden Hilfspunkte ermittelt und dem Segment temporär beigefügt. Die so aufgeblähten Segmente haben nun eine gute 3D-Aufspanngüte der homologen Punkte, werden mit dem 4-Punkte-Verfahren (Kap. 4.5.2.2.1) zusammengefügt und das gewünschte Ergebnis wird durch Löschen der Hilfspunkte extrahiert.

Das Ergebnis wird bei einer höheren Anzahl von Hilfspunkten stabiler, da so einzelne Ausreißer gedämpft und die ergänzten Richtungen besser verteilt werden. In der Praxis wird eine begrenzte Anzahl von Hilfspunkten verwendet. Dadurch wird das Ergebnis stabil, ohne durch eine $O(n^3)$ -Punkteinzunahme¹ die Laufzeit unnötig auszubremesen.

Auswahlkriterien Das neu berechnete Segment entnimmt zwangsläufig die nur in Seg_1 vorhandenen Punkte eben aus Seg_1 und die nur in Seg_2 vorhandenen Punkte aus Seg_2 . Für die gemeinsamen Punkte sind jedoch verschiedene Möglichkeiten denkbar:

1. alle aus Seg_1
2. alle aus Seg_2
3. jeweils aus dem Segment, wo sie die beste Güte haben
4. alle aus dem Segment, wo die gemeinsamen Punkte die beste Durchschnittsgüte haben
5. alle aus dem Segment mit den meisten Punkten

Bei optimal zusammenpassenden Segmenten sind die Möglichkeiten äquivalent. Neben den einfachen Varianten 1 und 2, die quasi willkürlich eine Punktmenge wählen und damit ungünstig liegen können, scheint Variante 3 optimal zu sein. Dies kann jedoch täuschen, da wegen der wechselnden Punktquellen ein verwickeltes Ergebnis möglich ist. Ist z.B. der gemeinsame Teil von Seg_1 nach rechts und Seg_2 nach links verschoben, so ist ein einheitliches Ergebnis zu bevorzugen. Dies berücksichtigt Variante 4. Abschließend sei noch der Fall bedacht, dass an ein sehr großes Segment eine kleine Ecke ergänzt wird. Dann ist eine

¹Da ein Punkte-Tripel als Basis des Hilfspunktepaars gewählt wird, gibt es dafür $n(n-1)(n-2) = n^3 - 3n^2 + 2n$ Möglichkeiten. Zur *O-Notation* sei auf [Gütting 1992, Definition 1.6] verwiesen.

Änderung dieser festen Basis meistens nicht gewollt (Variante 5). Da alle aus Seg_2 nach Seg_1 transformierten Punkte mit einem „Transformationsabschlag“ in der Wertung bestraft werden und im Laufe der Zeit beide Kombinationen, also jeweils Seg_1 oder Seg_2 als feste Basis, berechnet werden, wird hier durch die Menge der bestraften Punkte und deren Eingang in die Segmentfitness Fall 4 und 5 automatisch abgedeckt.

Tests Dank des Transformationsabschlags hat sich in Tests Fall 3 als gut bewährt und es konnten sich bessere Segmente konsequent durchsetzen.

Güte

Besonders hier ist eine sinnvolle Fitnessfunktion wichtig, da fehlerhafte Segmente daran erkannt und aussortiert werden können, dass sie sich nicht richtig einpassen lassen.

Die unverändert übernommenen Punkte aus Seg_1 behalten ihre ursprüngliche Güte, die Güte der transformierten Punkte wird mit der Transformationsgüte $g_{transform}$ multipliziert:

$$g_{s1'} = g_{s1} \cdot g_{transform} \quad (4.19)$$

Die Berechnung von $g_{transform}$ ist in Formel 4.10 in Kap. 4.4.8 beschrieben.

4.5.2.7 Multiple Rekombination

Aufgrund vieler Entwicklungswege zu ähnlichen Zuständen und der freien Kombinierbarkeit der Operatoren kann in der Praxis die Populationsgröße kritisch werden:

1. Die Berechnungsdauer einer Generation hängt stark von der Populationsgröße ab, wobei durch die Rekombination sogar ein quadratischer Zusammenhang entsteht.
2. Eine große Population ergibt viele Kombinationsmöglichkeiten und kann daher schnell weiter wachsen.

Da die Rekombination eine wichtige Ursache des Wachstums ist, wird hier zu einer Lösung angesetzt. Entscheidendes Problem sind die vielen sich sehr ähnlichen Segmente, die sich oft nur in wenigen Punkten oder deren Bewertung unterscheiden. Jedoch würden durch eine zu offensive Elimination viele Informationen verloren gehen. Dies haben u.a. Praxistests mit unnötigen

Verfälschungen gezeigt. Daher werden viele Rekombinationen zu einer einzigen zusammengefasst und damit in einem Schritt ein gutes Segment geschaffen, welches die meisten Irrläufer durch eine bessere Güte bei der Elimination entfernt. Die vielen verschiedenen Wege zum Ergebnis der multiplen Rekombination entfallen genauso wie die aus ihnen resultierenden Rekombinationen.

Prinzip Für alle Segmentpaare Seg_1 und Seg_2 mit mindestens 3 homologen Punkten wird geprüft, ob ihre Rekombination $Seg_{1,2}$ die Frühelimination überleben würde (Kap. 4.4.7). Dabei wird zuerst das kleinere Segment auf das umfangreichere transformiert und erst später die Gegenrichtung probiert. Nach erfolgreicher Rekombination werden alle sonstigen Segmente der Population durchlaufen und, falls sie mindestens 3 homologe Punkte mit $Seg_{1,2}$ besitzen und durch ihre Verschmelzung mit $Seg_{1,2}$ dessen Fitness steigern würden, dort ergänzt. Dabei wird kein neues Zielsegment erzeugt, sondern das vorhandene $Seg_{1,2}$ erweitert.

Tests Das optimierte 4-Punkte-Verfahren mit Hilfspunkten und multipler Rekombination wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5). Bei Praxistests wurden Gesamtberechnungszeiten zwischen 20 Minuten und einer Stunde durch die multiple Rekombination auf unter 3 Minuten reduziert. Die Größe der zu einem Zeitpunkt aktiven Population sank deutlich und die Ergebnisse wurden sogar besser, da auf die offensive Not-Elimination zur zwangsweisen Populationssenkung (Kap. 4.5.5) verzichtet werden konnte. Oft ergaben 2 bis 15 Segmente ein neues Segment.

4.5.3 Mutation

Nach einer kurzen Einführung und der Betrachtung in diesem Kapitel genutzter nichtlinearer Gleichungssysteme werden mehrere spezielle Verfahren der Mutation im Kontext der 3D-Stadtmodellierung betrachtet.

4.5.3.1 Einführung

Die Mutation umfasst Verfahren zur Veränderung eines Segmentes. Gegebenenfalls wird vorher zur Sicherung des alten Zustands eine Kopie des Segmentes erstellt. Zur Übernahme in die Population sollte das neue Segment optimalerweise entweder eine bessere Güte oder mehr Punkte besitzen.

„Durch Mutation erfolgen zufällige Veränderungen der Individuen. Diese Veränderungen (Mutationsschritte) sind meist nur relativ gering und werden mit

einer geringen Wahrscheinlichkeit (Mutationswahrscheinlichkeit bzw. Mutationsrate) auf die Variablen der Individuen angewendet.“ [Pohlheim 1999, S. 46] Im Gegensatz zu manchen Arten der EA, jedoch übereinstimmend mit einigen neueren Erkenntnissen, wird im Folgenden die Mutation als wesentlicher Operator (Exploration, [Nissen 1997]) betrachtet und statt der zufälligen eine gezielte Änderung anhand vieler spezialisierter Operatoren genutzt. Operatoren der Mutation mit höherem Zufallsgehalt folgen in Kap. 4.6.

4.5.3.2 Spezielle nichtlineare Gleichungssysteme

Da einige der in diesem Kapitel vorkommenden nichtlinearen Gleichungssysteme (NLGS) eine hohe Anzahl an lokalen Extrema und teilweise viele Variablen besitzen, haben sich die Standardverfahren zum Lösen von NLGS (Kap. A.2.3) als problematisch herausgestellt. Die folgenden Verfahren wurden in [Weitzig 2001, Kap. A.5] speziell für Rekonstruktionsaufgaben entworfen und hier verfeinert. Sie haben sich bei den in dieser Arbeit auftretenden speziellen Problemen bewährt.

Rundenbasierte Verfeinerung Die Idee entstammt einem ähnlichen Konzept zur Lösung komplexer Formeln mit nur einer Unbekannten und wurde durch Rundenbasiertheit auf den Fall mit mehreren Unbekannten übertragen. Das Verfahren ist besonders für NLGS mit einem grob linear von den Unbekannten abhängigen Genauigkeitsmaß und keinen lokalen Extrema geeignet und zeichnet sich durch eine gute Performance aus. Lokale Optima können jedoch zur Endstation werden, was teilweise durch geeignete oder mehrfache Startkonfigurationen ausgeglichen werden kann. Eine hohe Anzahl Unbekannter stellt kein Problem dar.

Die Iteration beginnt mit einer großen Schrittweite s , die sich z.B. als ein Zehntel der Größe des für die Unbekannten erlaubten Wertebereichs ergibt. Ist kein Wertebereich angegeben, so gelten die Grenzen des genutzten Datentyps als Wertebereich.

Nun wird für alle Unbekannten x_i jeweils die Abweichung ermittelt, falls $x_i := x_i + s$ bzw. $x_i := x_i - s$ gesetzt wird. Ist die neue Abweichung kleiner, so wird das neue x_i übernommen und mit diesem so lange weiter getestet, bis keine kleinere Abweichung mehr erreicht wird.

Hat sich kein x_i verändert, so kann die Lösung durch Reduzierung der Schrittweite $s_{neu} = s_{alt}/4$ näher anvisiert werden, wobei 4 ein in Tests bewährter Richtwert ist.

Wurde jedoch ein x_i geändert, so haben sich hierdurch die Bedingungen der Tests verändert und es wird mit gleicher Schrittweite fortgefahren.

Die Iteration wird durchgeführt bis ein Abbruchkriterium greift oder die Schrittweite einen sehr kleinen Grenzwert unterschreitet und daher ein lokales Extrema gefunden wurde.

Zufallsgesteuerte Annäherung Ausgehend von der Startkonfiguration und der resultierenden Abweichung werden die Unbekannten versuchsweise verschiedenen Veränderungen unterworfen, die bei einem positiven Einfluss auf die Abweichung übernommen werden. Dies wird bis zur Erfüllung eines Abbruchkriteriums durchgeführt.

Mögliche Änderungen der Parameter sind:

1. Die zufällige Neubelegung aller Unbekannten. So können lokale Optima überwunden und an anderer Stelle neu gestartet werden.
2. Die zufällige Neubelegung einer Unbekannten. Auch hierdurch können Hindernisse auf dem Weg zu der gesuchten Lösung überwunden werden.
3. Die Änderung einer Unbekannten um bis zu a) 1, b) 10 oder c) 200 Prozent, um sich dem Ergebnis schrittweise anzunähern.
4. Die Änderung mehrerer Unbekannter um einen prozentualen Wert.

Der Algorithmus ist besonders für stark unstetige NLGS mit lokalen Extrema aber wenigen Unbekannten geeignet. Trotz des auffällig ratenden Ansatzes löst er in der Praxis deutlich mehr der in dieser Arbeit genutzten NLGS wunschgemäß als die anderen untersuchten Verfahren. Dies erklärt sich durch die spezielle Art der genutzten NLGS.

Diese Methode wurde implementiert und erfolgreich getestet. Dank der Leistungsfähigkeit heutiger Computer ist auch die Performance akzeptabel.

Die Laufzeit konnte durch Verschiebung der häufigsten Parameteränderungen von anfänglich Punkt 1 und 2 bei zunehmender Iterationstiefe nach 3 und 4 verbessert werden.

4.5.3.3 Flächenvervollständigung

Besitzt das Segment mindestens drei Punkte einer Fläche F , haben diese eine gute 2D- und eine schlechte 3D-Aufspanngüte und ist mindestens ein Punkt von F nicht im Segment, so können die restlichen Punkte der Fläche anhand des 2D-/3D-Zusammenhangs berechnet werden.

Die schlechte 3D-Aufspanngüte ist ein zusätzliches Instrument zur Kontrolle der Flächen. Nach Definition liegen Flächen in einer Ebene (Kap. 4.2.3.1.4)

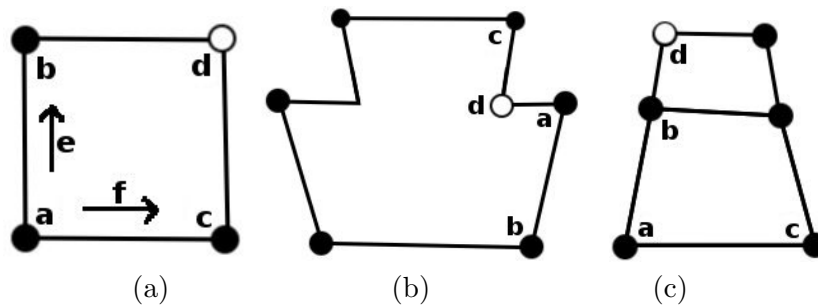


Abbildung 4.11: Skizzen zur Flächenvervollständigung.

und bilden daher gar kein Raumsystem. Durch Einbindung einer potentiell vorhandenen 3D-Aufspanngüte in die Bewertung werden solche Abweichungen passend behandelt.

Zur weiteren Minimierung von Ungenauigkeiten wird das Bild mit dem größten Flächeninhalt $Area_{2d}(F)$ verwendet.

4.5.3.3.1 Berechnung Wie in Kap. 4.5.2.5 werden die bekannten Punkte \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} mit dem Kreuzproduktbetragsmaximum $max(|\mathbf{e} \times \mathbf{f}|)$ der Aufspannvektoren $\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{a}$ und $\mathbf{f} = \mathbf{c} - \mathbf{a}$ wegen ihrer großen Aufspannfläche zur Minimierung von Ungenauigkeiten verwendet (Abb. 4.11a). Die 2D-Bildkoordinaten zu \mathbf{a} , \mathbf{e} und \mathbf{f} seien \mathbf{h}_a , \mathbf{h}_e und \mathbf{h}_f .

Für einen noch unbekanntem Punkt \mathbf{d} mit 2D-Koordinaten \mathbf{h}_d gilt dann

$$\mathbf{h}_a + i\mathbf{h}_e + j\mathbf{h}_f = \mathbf{h}_d. \quad (4.20)$$

Die Lösung dieses quadratischen LGS sind die beiden Skalare i und j . Da die Bildebene bezüglich der Fläche nur eine transformierte Ebene darstellt, kann der neue Punkt durch

$$\mathbf{d} = \mathbf{a} + i\mathbf{e} + j\mathbf{f} \quad (4.21)$$

berechnet werden.

4.5.3.3.2 Verzerrungsminimierung Aufgrund der ortsabhängigen Verzerrungen in unentzerrten Bildern kann der neue Punkt \mathbf{d} je nach genutzter Aufspannvektoren \mathbf{e} und \mathbf{f} variieren und von dem gewünschten Wert unterschiedlich stark abweichen. Beispielsweise würde sich in Abb. 4.11b eine hohe Abweichung ergeben, wenn für \mathbf{a} und \mathbf{b} die gegenüberliegenden Punkte auf der linken Seite genutzt würden. Dieser Effekt ist auch deutlich in Abb. 4.13b sichtbar: Je weiter sich der neue Punkt \mathbf{d} von den dort rechts befindlichen Aufspannvektoren entfernt, desto größer wird die Abweichung.

Dieser Effekt lässt sich durch geschickte Wahl von \mathbf{e} und \mathbf{f} deutlich abschwächen. Die folgenden zusätzlichen Auswahlkriterien werden mittels einer experimentell bestimmten Gewichtung der bisherigen Bewertung durch das Kreuzprodukt beigemischt.

Streckenverlängerung In der Praxis liegt der neue Punkt \mathbf{d} häufig auf der Geraden durch zwei Punkte von F . Dies ist besonders bei der „Verlängerung“ von Flächen der Fall, wie sie z.B. bei der Aufstockung von Wänden auftritt (Abb. 4.11c).

Als optimale Werte sollten diese zwei Punkte der Geraden für \mathbf{a} und \mathbf{b} verwendet werden. Der somit nebensächliche Punkt \mathbf{c} kann weiterhin durch das Kreuzproduktbetragsmaximum bestimmt werden.

In die Bewertung hierfür wird der Abstand des Bildpunktes \mathbf{h}_d zu der Geraden durch \mathbf{h}_a und \mathbf{h}_b genutzt.

Abstandsminimierung Um die Verzerrung gering zu halten, ist es weiterhin vorteilhaft, alle Punkte so zu wählen, dass ihre Bildpunkte dicht beisammen liegen und damit eine einheitliche Verzerrung vorliegt, die sich dann selbst aufhebt. Somit werden z.B. im Fall aus Abb. 4.11b sinnvolle Punkte gewählt.

Dieses Kriterium ist auch für die Wahl von \mathbf{c} bei der „Streckenverlängerung“ (s.o.) sinnvoll.

Existiert ein umgebendes Viereck, so lassen sich bessere Ergebnisse durch die Vorgehensweise in Kap. 4.5.3.5 erzielen.

Bewertung Gilt $i, j \in [0, 1]$, dann wird die Güte g_d des neuen Punktes interpoliert zu

$$g_d = g_a + i(g_b - g_a) + j(g_c - g_a). \quad (4.22)$$

Andernfalls ergibt sich g_d aus der schlechtesten Güte der genutzten Aufspannpunkte. Dieser grobe Richtwert straft außerhalb des gewünschten Bereichs liegende i, j ab.

$$g_d = \min(g_a, g_b, g_c) \quad (4.23)$$

4.5.3.4 Punkte in einer Ebene mit einer Fläche

Manchmal ist für den Bearbeiter offensichtlich, dass ein in einem Bild sichtbarer Punkt \mathbf{s} in der selben Ebene liegt wie eine im Bild eingetragene Fläche F_1 . Dies kann manuell durch eine Relation von F_1 zu \mathbf{s} erfasst werden.

Ist ein Bildpunkt als in einer Ebene zu einer Fläche liegend markiert, so kann dieser aus den gemeinsamen Bilddaten und den Raumdaten der Fläche analog

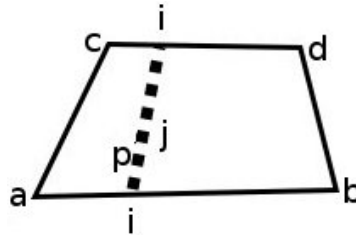


Abbildung 4.12: Skizze zur Interpolation in Vierecken

zu Kap. 4.5.3.3 berechnet werden.

Für den häufig auftretenden Fall einer Fläche F_1 mit genau vier Eckpunkten hat sich die Interpolation in konvexen Vierecken (Kap. 4.5.3.5) bewährt.

4.5.3.5 Interpolation in konvexen Vierecken

Es wird eine konvexe Fläche F_1 mit 4 Eckpunkten vorausgesetzt. Dieser Fall tritt häufig ein.

Als Basis werden alle 4 Ecken \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} und \mathbf{d} genutzt (Abb. 4.12). Eine Position innerhalb der Fläche wird nun durch die zwei Skalare $i, j \in [0, 1]$ angegeben. Dabei gibt i die relative Position zwischen den Geraden durch \mathbf{a} und \mathbf{c} sowie durch \mathbf{b} und \mathbf{d} an. j legt entsprechend die relative Position zwischen den Geraden durch \mathbf{a} und \mathbf{b} sowie durch \mathbf{c} und \mathbf{d} fest (Abb. 4.12).

Die im Folgenden aufgestellten Formeln sind nicht auf den Bereich innerhalb von F_1 beschränkt und es lassen sich so beliebige in der selben Ebene liegende Punkte berechnen, wobei sich dann der Wertebereich von i, j entsprechend vergrößert. Dieses Verfahren wird auch zur Entzerrung von Bildern genutzt, indem Pixel aus dem verzerrten Bild in ein neues Rechteck übertragen werden (Kap. 4.6.3.7).

Da i und j die relative Position beschreiben, können sie zwischen verschiedenen Darstellungen einer Fläche in unterschiedlichen Koordinatensystemen übertragen werden.

Zur sinnvollen Nutzung muss einerseits aus gegebenen i, j eine Position berechnet, aber auch zu einer Position das zugehörige i, j berechnet werden können.

i, j zu Position: Es werden erst die Positionen \mathbf{p}_{ab} und \mathbf{p}_{cd} zwischen den jeweiligen Punkten und prozentual zu i berechnet:

$$\mathbf{p}_{ab} = \mathbf{a} + i(\mathbf{b} - \mathbf{a}), \quad \mathbf{p}_{cd} = \mathbf{c} + i(\mathbf{d} - \mathbf{c}) \quad (4.24)$$

Der gesuchte Punkt \mathbf{p} liegt an Position j zwischen \mathbf{p}_{ab} und \mathbf{p}_{cd} .

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{ab} + j(\mathbf{p}_{cd} - \mathbf{p}_{ab}) \quad (4.25)$$

Diese Rechnung gilt im 2D- und im 3D-Raum.

Position zu i, j : Für die Gegenrichtung wird Formel 4.24 in Formel 4.25 eingesetzt

$$\mathbf{p} = \mathbf{a} + i(\mathbf{b} - \mathbf{a}) + j(\mathbf{c} + i(\mathbf{d} - \mathbf{c}) - (\mathbf{a} + i(\mathbf{b} - \mathbf{a}))), \quad (4.26)$$

umgeformt zu

$$\mathbf{p} - \mathbf{a} = i(\mathbf{b} - \mathbf{a}) + j(\mathbf{c} - \mathbf{a}) + ij(\mathbf{a} - \mathbf{b} - \mathbf{c} + \mathbf{d}) \quad (4.27)$$

und mit dem Verfahren in Kap. A.2.6 (Formel A.29) gelöst. Von den beiden möglichen Ergebnissen wird das richtige an seinem kleineren Betrag $|i| + |j|$ erkannt. In Praxistests fiel das falsche Lösungspaar durch sehr hohe Werte auf, die nie den vorgesehenen Wertebereich für $i, j \in [0, 1]$ erfüllten.

Beispiel Die Dachstruktur in Abb. 4.13 ist in (b) mit der einfachen Punktübertragung (ohne Optimierungen) und in (c) mit der Vierecksentzerrung berechnet. Die Abweichung in (b) entsteht durch die flächendeckende Nutzung der Verzerrung der gewählten Aufspannvektoren, anstatt sie wie in (c) positionsabhängig zu interpolieren. Die in (b) genutzten Punkte zur Berechnung der Aufspannvektoren befinden sich offensichtlich rechts im Bild, da dort die Verzerrung minimal ist und zur linken Seite hin steigt.

Bewertung Die Interpolation in Vierecken sorgt gegenüber der einfachen Punktübertragung durch drei Punkte bzw. zwei Vektoren (Kap. 4.5.3.3) durch eine lineare Anpassung an die Bildverzerrung für deutlich bessere Resultate. Eine spezielle Betrachtung von Parallelvierecken mit Beispielen findet sich in Kap. 4.6.3.7.

4.5.3.6 Bildparameterberechnung

Die Ermittlung von Bildparametern wird im Folgenden nur knapp untersucht, da sich andere Verfahren als leistungsfähiger herausgestellt haben.

4.5.3.6.1 Variante 1 Besitzt das Segment mindestens 5 Punkte in einem Bild i , so können dessen Bildparameter ermittelt werden. Diese Informationen können wiederum Ausgangspunkt für weitere Verfahren sein.

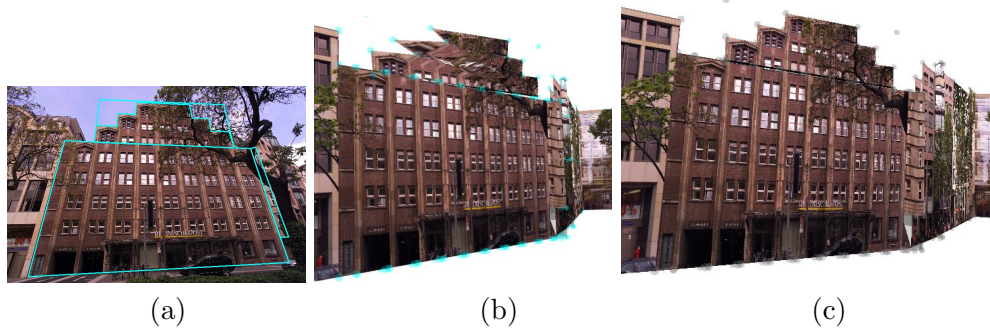


Abbildung 4.13: Vierecksentzerrung: Aus dem (a) Bild wird durch (b) normale Punktübertragung (ohne Optimierungen) bzw. (c) Vierecksentzerrung die Dachform in ein 3D-Segment übertragen

Anzahl genutzte Punkte	2	3	4	5	6
Anzahl Unbekannte	11	12	13	14	15
Anzahl Gleichungen	6	9	12	15	18

Tabelle 4.1: Gleichungen und Unbekannte bei der Bildparameterberechnung, Variante 1

Berechnung In Kapitel A.2.4 wird Formel A.28 hergeleitet zu $\mathbf{p}_i + r'_{i,p} \mathbf{s}_p - r'_{i,p} \mathbf{p}_i - \mathbf{b}_{a,i} - u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} - v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} = 0$. Es werden nur Formeln für bekannte Punkte in Bild i betrachtet, deren Anzahl im Weiteren mit n_i bezeichnet wird. Durch einfaches Umstellen folgt

$$(\mathbf{p}_i - \mathbf{s}_p) r'_{i,p} + \mathbf{b}_{a,i} + u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} + v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} = \mathbf{p}_i. \quad (4.28)$$

Es werden Verfahren zum Lösen von NLGS (Kap. 4.5.3.2) genutzt und \mathbf{p}_i , also nur 3 Skalare, geraten. Damit verbleiben in Formel 4.28 mit $r'_{i,p}$, $\mathbf{b}_{a,i}$, $\mathbf{b}_{b,i}$ und $\mathbf{b}_{c,i}$ noch $n = 9 + n_i$ Unbekannte in $m = 3n_i$ linearen Gleichungen, die sich daher ab 5 Punkten als LGS ermitteln lassen (siehe Tab. 4.1). Die Überbestimmtheit des LGS wird genutzt, um die Summe seiner quadratischen Abweichungen als Genauigkeitsmaß für das NLGS zu verwenden.

Bewertung Bei diesem Ansatz kann die Bildfläche auf einer Geraden durch Augen- und Bildmittelpunkt skalieren, da der Abstand dieser beiden Punkte nicht festgelegt ist. So können Umklapper und gegebenenfalls Ungenauigkeiten aufgrund eines sehr kleinen oder sehr großen Abstandes zwischen \mathbf{p} und \mathbf{b}_m entstehen.

4.5.3.6.2 Variante 2 Besitzt das Segment mindestens vier Punkte in einem Bild i und einen bekannten Augenpunkt \mathbf{p}_i , so können dessen Bildparameter $\mathbf{b}_{a,i}$, $\mathbf{b}_{b,i}$ und $\mathbf{b}_{c,i}$ sowie die Faktoren $r'_{i,p}$ ermittelt werden. Formel A.28 (Kap. A.2.4) wird umgeformt zu

$$\mathbf{s}_p r'_{i,p} - \mathbf{p}_i r'_{i,p} - \mathbf{b}_{a,i} - u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} - v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} = -\mathbf{p}_i \quad (4.29)$$

und stellt bei den bekannten Punkten ein LGS mit den Unbekannten $\mathbf{b}_{a,i}$, $\mathbf{b}_{b,i}$, $\mathbf{b}_{c,i}$ und $r'_{i,p}$ dar. Die gesuchten Werte sind die Lösung des LGS (Kap. A.2.2). Die Ergebnisqualität liegt unter der Augenpunktgüte und berechnet sich, indem diese mit der LGS-Güte (Kap. 4.3.1.1) multipliziert wird. Diese Variante hat kaum Praxisrelevanz, da bei unbekanntem Bildparametern normalerweise auch der Augenpunkt unbekannt ist.

4.5.3.6.3 Variante 3 Es werden wieder nur die Formeln eines Bildes i zu den bekannten Punkten betrachtet. Einfaches Umstellen von Formel 4.29 ergibt

$$r'_{i,p} \mathbf{p}_i + \mathbf{b}_{a,i} + u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} + v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} = \mathbf{p}_i + \mathbf{s}_p r'_{i,p}. \quad (4.30)$$

$$(r'_{i,p} - 1) \mathbf{p}_i + \mathbf{b}_{a,i} + u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} + v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} = \mathbf{s}_p r'_{i,p}. \quad (4.31)$$

Nach Kap. 4.5.3.2 werden $r'_{i,p} \in [0, 1]$ geraten, wobei ein beliebiges (also z.B. erstes) $r'_{i,p}$ auf einen festen Wert (z.B. 0.2) gesetzt wird, damit die ansonsten frei auf der Achse zwischen \mathbf{p} und \mathbf{s} verschiebbare Bildfläche auf einen festen Wert fixiert wird und somit nur eine Lösung möglich ist. Mit den geratenen Werten lässt sich Formel 4.31 als LGS berechnen und die Summe der quadratischen Abweichungen err_{sqr} wird wieder als Genauigkeitsmaß für das NLGS genutzt. Für jeden bekannten Punkt ergeben sich drei Formeln. Als Unbekannte bleiben noch \mathbf{p}_i , $\mathbf{b}_{a,i}$, $\mathbf{b}_{b,i}$ und $\mathbf{b}_{c,i}$ mit jeweils drei Dimensionen. Die $12 - 1 = 11$ Unbekannten stehen in n_i Formeln und lassen sich daher inklusive der für das Genauigkeitsmaß des NLGS benötigten Überbestimmtheit ab vier Punkten mittels LGS ermitteln.

4.5.3.6.4 Erste Analyse Es wurden beispielhaft Bildparameter berechnet und in Abb. 4.14 dargestellt. Zur besseren dreidimensionalen Darstellung wurde zuerst in (a) nur ein Bild mit Parametern sowie ein texturiertes 3D-Modell dargestellt und in (b) dann beide zur Berechnung genutzten Bilder und ein mit verschiedenfarbigen Flächen dargestelltes Modell ausgegeben.

Neben dem wunschgemäßen Ergebnis fällt auf, dass die Bildflächen nicht senkrecht zum Augenpunkt stehen. Hierdurch wird die Szene numerisch am besten

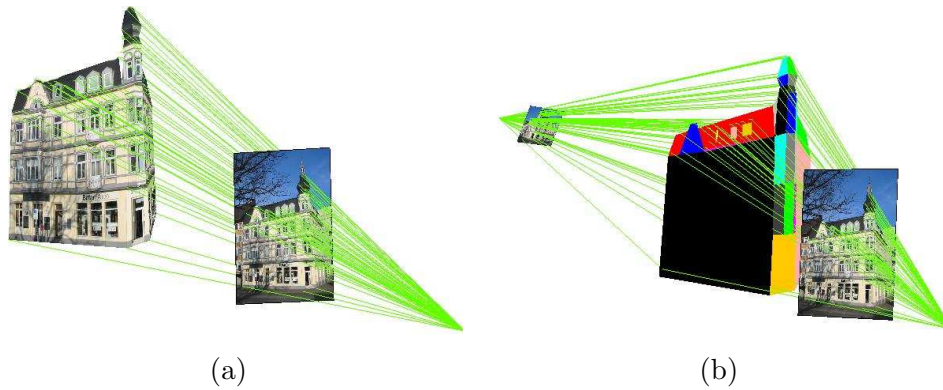


Abbildung 4.14: Bildparameterberechnung: Ergebnis des einfachen Algorithmus

angenähert, da eine unerwünschte Verzerrung durch das genutzte photogrammetrische Verfahren vorliegt. Dies zeigt sich durch Neigung der Bildflächen hin zu der im Bild besser sichtbaren Seite, also hier in Abb. 4.14 nach links zum Haus. Das hintere Bild in Abb. 4.14b wäre bei inverser Wahl des Augenpunktes nach rechts geneigt.

Weiterhin sollte das in Abb. 4.14b im Hintergrund befindliche Bild im Vordergrund sein. Jedoch werden alle Formeln auch durch einen „inversen Augenpunkt“ erfüllt, der die Szene durch ein spiegelverkehrtes Bild von hinten betrachtet.

4.5.3.6.5 Erweiterung Sowohl die Bildverzerrung durch ungenaue Ausgangsdaten als auch der möglicherweise invertierte Augenpunkt sollen korrigiert werden. Hierzu wird das Genauigkeitsmaß des NLGS erweitert.

Auf den Grundlagen in Kap. A.2.1 ist das Spatprodukt der Einheitsvektoren von \mathbf{b}_b , \mathbf{b}_c und dem Vektor vom Augen- zum Bildmittelpunkt entscheidend:

$$s_i = \left\langle \left| \mathbf{b}_{a,i} + \frac{\mathbf{b}_{b,i} + \mathbf{b}_{c,i}}{2} \right|, |\mathbf{b}_{b,i}|, |\mathbf{b}_{c,i}| \right\rangle \quad (4.32)$$

Nach Definition des Spatprodukts gilt somit $s_i \in [-1, 1]$, wobei hier das Vorzeichen angibt, ob es sich um den gewünschten oder den inversen Augenpunkt handelt. Der Betrag stellt den Winkel des Sehstrahles durch den Bildmittelpunkt zur Bildebene dar und nähert sich bei dem gewünschten rechten Winkel der Eins. In den verwendeten Koordinatensystemen ist damit die 1 der Zielwert und das Genauigkeitsmaß des NLGS kann aus der ursprünglichen Summe der Quadrate der Abweichungen err_{sqr} und s_i verschmolzen werden zu

$$err_{total} = err_{sqr} + (1 - s_i)err_{sqr} = (2 - s_i)err_{sqr}. \quad (4.33)$$

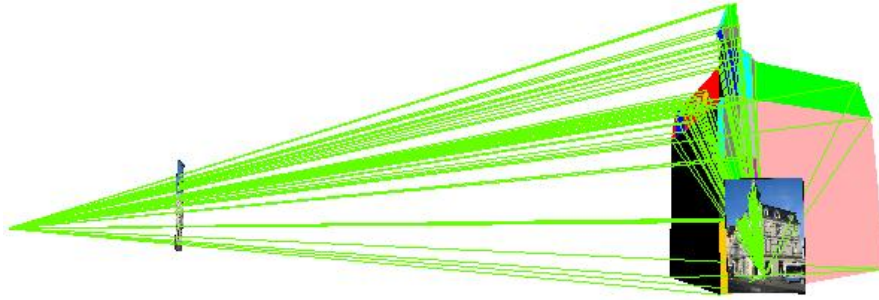


Abbildung 4.15: Bildparameterberechnung: Erweiterter Algorithmus

Da es sich bei err_{total} lediglich um ein zu minimierendes Genauigkeitsmaß für das NLGS handelt, darf err_{total} größer als Eins sein. Die hier genutzte Gewichtung hat sich in Tests bewährt.

4.5.3.6.6 Test Nach Erweiterung des Genauigkeitsmaßes werden beide Bilder besser ausgerichtet und beide Augenpunkte sind korrekt (Abb. 4.15).

4.5.3.6.7 Zusätzliche Erweiterungen Weiterhin kann in die Bewertung mit einfließen, wie senkrecht \mathbf{b}_b zu \mathbf{b}_c ist oder inwieweit das Seitenverhältnis im Bild dem durch \mathbf{b}_b und \mathbf{b}_c entspricht. Da sich andere Operatoren für den EA-Prozess als relevanter herausgestellt haben, wird dies nicht weiter verfolgt.

4.5.3.7 Punktberechnung mittels Bildparameter

Nachdem einige Operatoren zur Berechnung der Bildparameter anhand bekannter Punkte vorgestellt wurden, folgt nun die Gegenrichtung. Hiermit können bisher im Segment unbekannte Punkte ermittelt werden.

Variante 1: Sehstrahlschnitt Ist der Punkt \mathbf{s}_p in mindestens zwei Bildern mit bekannten Parametern sichtbar, so kann er als Schnitt der zugehörigen Sehstrahlen berechnet werden. Dazu wird je Bild der 3D-Bildpunkt $\mathbf{q}_{i,p} = \mathbf{b}_{a,i} + u_{i,p}\mathbf{b}_{b,i} + v_{i,p}\mathbf{b}_{c,i}$ mit dem Augenpunkt \mathbf{p}_i in die Geradengleichung $\mathbf{s}_p = \mathbf{p}_i + (\mathbf{q}_{i,p} - \mathbf{p}_i)r_{i,p}$ mit der Variablen $r_{i,p}$ überführt.

Für einen 3D-Punkt ergeben die Gleichungen der homologen Punkte der n_B Bilder ein LGS mit $3 + n_B$ Unbekannten und $3n_B$ Gleichungen, welches für \mathbf{s}_p den gemittelten Schnittpunkt der Sehstrahlen als optimales Ergebnis liefert.

Es werden also Ausreißer abgeschwächt und die Güte des neuen Punktes kann als Gütemittelwert der beteiligten Ausgangsparameter berechnet werden.

Variante 2: Bekannte $r'_{i,p}$ Erfolgt die Berechnung im Anschluss an z.B. die Bildparameterberechnung aus Kap. 4.5.3.6.3, so sind zusätzlich schon die $r'_{i,p}$ bekannt und durch einfaches Umstellen von Formel 4.31 zu

$$\mathbf{s}_p = \frac{1}{r'_{i,p}} \left((r'_{i,p} - 1) \mathbf{p}_i + \mathbf{b}_{a,i} + u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} + v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} \right) \quad (4.34)$$

genügt ein 2D-Punkt für die direkte Ermittlung des zugehörigen \mathbf{s}_p . Daher reicht bereits ein einziges Bild, wenn dort alle gewünschten Punkte sichtbar sind.

Dieses Verfahren wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5). Bei mehreren vorhandenen Bildern können die Werte für eine Verbesserung der Qualität gemittelt werden.

4.5.3.8 Neuberechnung durch Bildparameter

Sind in einem Segment von genügend Bildern die Parameter bekannt, so können nach Kap. 4.5.3.7 alle Punkte neu berechnet werden. Die bisherigen Punktkoordinaten werden vollständig ignoriert und, wenn bei einigen keine Neuberechnung möglich sein sollte, wieder auf unbekannt gesetzt.

Dieser radikale Neuanfang beruht wegen der Bildparameter zwar doch auf alten Werten, bietet jedoch eine einheitliche Lösung durch ein lineares und optimierendes Verfahren.

4.5.3.9 Flächenebnung

Obwohl sich Flächen laut Definition in einer Ebene befinden, können durch verschiedenste Operatoren gegenteilige Fälle auftreten. Da dies schon nach Definition nicht korrekt ist, kann es sinnvoll sein, die entstandenen Abweichungen zu korrigieren, indem die Fläche durch Verschieben von Punkten in eine Ebene gezwungen wird.

Bei den Abweichungen kann es sich sowohl um Ungenauigkeiten als auch um Ausreißer handeln. Damit beide Fälle berücksichtigt werden, wird folgendermaßen vorgegangen:

- Die Durchschnittsebene aller Punkte, also diejenige mit dem minimalen Gesamtabstand aller Punkte zur Ebene, wird ermittelt.

- Die Ausreißer werden anhand ihres hohen Abstandes zur Durchschnittsebene gefunden oder es werden alle Punkte als Ausreißer außer den drei mit dem kleinsten Abstand betrachtet, da es hier kein Nachteil ist, zu viele Ausreißer zu definieren.
- Die Durchschnittsebene aller restlichen Punkte wird gebildet.
- Alle Ausreißer werden verschoben, indem ihr Lot auf die neue Ebene gefällt und der Fußpunkt gesetzt wird. Dann liegen alle Punkte in der Ebene.

4.5.3.10 Mutation durch photogrammetrische Verfahren

Photogrammetrische Verfahren wurden bisher als monolithische Module betrachtet, die aus homologen Bildpunkten ein 3D-Modell ermitteln. Durch Analyse der jeweiligen Vorgehensweise sind jedoch auch andere Schritte möglich, so dass beispielsweise Bildkoordinaten aus 3D-Punkten berechnet oder Ausreißer in den existierenden Daten gefunden und bestraft oder korrigiert werden können.

Aufgrund der Komplexität dieser Fälle wird nur ein Beispiel angeschnitten: Ausgehend von [Hartley 1997] wurde in [Weitzig 2001, Kap. 5.2.2] der 8-Punkt-Algorithmus verfeinert. Die Berechnung ergibt dort nicht nur ein 3D-Modell, sondern es lassen sich auch die lokalen Punkte in den Bildern ermitteln. Die neu berechneten Bildkoordinaten sind jedoch nicht unbedingt gleich den Ausgangswerten, sondern ergeben sich aus der Gesamtheit der Eingangsdaten. Dies wird in [Weitzig 2001, Kap. 5.2.3] zu einer iterativen Verbesserung des 3D-Modells genutzt, indem bei den Ausgangsdaten unsichere Teile durch die neu ermittelten 2D-Punkte ersetzt werden. Auf gleichem Wege können in einzelnen Bildern auch unbekannte 2D-Punkte ergänzt oder mit bestehenden Daten abgeglichen werden.

4.5.3.11 Flächen in einer Ebene

Liegen mehrere Flächen in einer Ebene und sind insgesamt mindestens drei Punkte berechnet, so können äquivalent zu Kap. 4.5.3.3 alle restlichen Punkte ermittelt werden, indem sie wie eine einzige große Fläche betrachtet werden. Zwei Flächen liegen in einer Ebene, wenn es drei gemeinsame Punkte gibt, die zwei nicht linear abhängige Vektoren aufspannen (siehe Kap. 4.3.1.2). Bei linear abhängigen Vektoren handelt es sich nur um eine gemeinsame Kante (z.B. Hausecke) und die Bildflächen können zueinander verdreht sein. Sonst greifen beide Flächen wie Puzzlestücke ineinander und liegen aufgrund der

gemeinsamen Punkte zwangsläufig in einer Ebene.

Wegen der ähnlichen Situation wird auch die Güte äquivalent zu Kap. 4.5.3.3 berechnet.

4.5.3.12 Flächen in parallelen Ebenen

Anhand ihrer 2D-Punkte können in zueinander parallelen Ebenen liegende Flächen identifiziert werden. Als Voraussetzung sind in den zwei Flächen je drei Punkte notwendig, die Aufspannvektoren bilden. Es ist kein gemeinsamer Punkt notwendig. Weiterhin werden mindestens zwei Bilder benötigt, in denen alle diese Punkte vorkommen.

In dem ersten Bild werden in der ersten Fläche die Aufspannvektoren \mathbf{e} und \mathbf{f} gebildet und für den zweiten bis n -ten Punkt der zweiten Fläche die i, j -Skalarpaare berechnet, um sie per $\mathbf{d} + i\mathbf{e} + j\mathbf{f}$ vom ersten Punkt \mathbf{d} der zweiten Fläche zu erreichen. Dies wird für alle entsprechenden Bilder (≥ 2) durchgeführt und die korrespondierenden i, j verglichen. Dabei gelten i, j als korrespondierend zwischen zwei Bildern, wenn homologe Punkte verwendet werden. Liegen beide Flächen in parallelen Ebenen, so sind die korrespondierenden i, j identisch oder haben eine kleine Abweichung. Oberhalb eines bestimmten Grenzwertes gelten die Flächen als nicht parallel.

Existiert zusätzlich mindestens ein gemeinsamer Punkt der Flächen, so liegen sie in einer Ebene, können wie eine große Fläche betrachtet und nach Kap. 4.5.3.3 berechnet werden. Dies ist bei bekanntem Abstand (z.B. manuell eingegeben oder aus den Ausgangsmodellen interpretiert) durch geeignete Verschiebung auch möglich.

Bewertung Es werden an berechnete Flächen angrenzende Flächen und so z.B. lange geradlinige Häuserfronten erkannt. Leicht gekrümmte Straßenzüge können jedoch fälschlicherweise gerade gebogen werden. Dies muss durch eine starke Bestrafung der Abweichungen korrespondierender i und j entschärft werden.

4.5.4 Neugenerierung

Ergänzend zu den bei der Initialisierung erzeugten Individuen können pro Generation neue Segmente generiert werden. Dies bietet sich lediglich für Verfahren an, die ansonsten bei der Initialisierung zu viele Individuen produzieren würden.

Die Methodik der Neugenerierung wird von vielen EA nicht genutzt und spielt auch hier nur eine untergeordnete Rolle.

4.5.4.1 Neue Segmente durch photogrammetrische Verfahren

Wie bereits in Kap. 4.5.1.2 angedeutet, lassen sich insbesondere photogrammetrische Verfahren mit einer Vielzahl von Startparametern aufrufen, so dass ein Ausführen aller Möglichkeiten die Initialisierung überlasten und eine zu große Ausgangspopulation hervorbringen würde. Die im Laufe der Entwicklung genutzten Aufrufe lassen sich in die zwei Kategorien mit oder ohne vollständige Sichtbarkeit teilen.

Im ersten Fall wird ausgehend von einem zufällig gewählten Startbild eine Menge von Bildern mit einer homologen Punktmenge ermittelt. Es muss nicht jeder Punkt des Startbildes in den anderen Bildern enthalten sein, jedoch wird eine Punktmenge mit einer je nach photogrammetrischem Verfahren typischen Mindestgröße erwartet, die in jedem Bild vorhanden ist.

Im zweiten Fall wird ähnlich verfahren, jedoch muss ein gewisser Teil der gemeinsamen Punktmenge nicht unbedingt in allen Bildern vorhanden sein. Dies ermöglicht neue Punkt- und Bildkombinationen und setzt auf Verfahren, die Verdeckungen erlauben.

4.5.5 Elimination

Können Segmente keinen Beitrag zur weiteren Entwicklung mehr leisten, so sollten sie gelöscht werden. Dies spart Speicher und verbessert die Performance, da auf den überflüssigen Segmenten keine unnötigen Berechnungen mehr ausgeführt werden.

Wie in Kap. 4.4.4 beschrieben, sollte mit steigender Populationsgröße stärker gelöscht werden.

Einige Quellen nutzen die *Selektion* statt der *Elimination*, wobei es sich auch hier um die Auswahl der für die weitere Entwicklung zu nutzenden Individuen handelt und lediglich das Kriterium umgekehrt wird.

„Durch die Selektion werden Individuen entsprechend ihrer Fitness ausgewählt. Diese Individuen dienen als Elter² für die Erzeugung von Nachkommen.“ [Pohlheim 1999, S. 24]

4.5.5.1 Überflüssige Segmente

Existiert zu einem Segment Seg_1 ein anderes Segment Seg_2 , welches mindestens alle in Seg_1 enthaltenen Punkte mit je mindestens derselben Güte enthält, so ist Seg_1 überflüssig und kann gelöscht werden.

²Elter ist die in der Informatik und Genetik gängige Bezeichnung für einen oder mehrere Elternteile.

In der Praxis können unter ungünstigen Bedingungen extrem viele Segmente entstehen, wobei mit den Kombinationen enthaltener Punkte noch die riesige Zahl multipliziert werden muss, die sich durch jeweils etwas bessere Bewertungen bei wenigen Punkten ergibt. Übersteigt also die Segmentzahl eine kritische Grenze, so werden zusätzlich noch alle Segmente Seg_1 gelöscht, zu denen ein Segment Seg_2 existiert, welches mindestens alle Punkte von Seg_1 enthält und eine bessere Segmentgüte besitzt. So gehen keine wesentlichen Segmente verloren und ihre Anzahl bleibt überschaubar.

Da keine neuen oder veränderten Segmente entstehen, benötigt die Elimination keine Güte.

Als kleine praktische Ergänzung wird die Elimination nicht nur einmal pro Generation, sondern zusätzlich noch im direkten Anschluss an Verfahren, die viele neue Individuen hervorbringen, aufgerufen und vermeidet so die direkte Weiterverarbeitung von offensichtlichen Irrläufern.

4.5.5.2 Bewertung

Das vorgestellte einfache Eliminationsverfahren hat sich in Zusammenhang mit anderen in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren zur Begrenzung der Populationsgröße als völlig ausreichend erwiesen, so dass hier keine weiteren Untersuchungen mehr nötig sind. Es wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5).

4.5.6 Abbruchkriterien

Das evolutionäre Optimierungsverfahren kann durch unterschiedliche Kriterien abgebrochen werden. Sobald nach einer Iterationsstufe mindestens ein Kriterium erfüllt ist, wird das Verfahren beendet und das Segment mit der größten Fitness als Ergebnis behandelt.

Die normalen Abbruchkriterien der EA [Pohlheim 1999, Kap. 3.7],[Nissen 1997, S. 40, 162] sind hier ausreichend und es ist keine Erweiterung oder Anpassung notwendig. Es werden die folgenden Kriterien verwendet:

1. Timeout ist der Ablauf einer benutzerdefinierten Zeitspanne zur Vermeidung endloser Berechnungen. Dieses Kriterium birgt die Tücke der Nichtreproduzierbarkeit, da aufgrund unterschiedlicher Hardwarevoraussetzungen und Laufzeiten in ein und derselben Zeitspanne unterschiedlich viele Iterationen durchgeführt werden können.
2. Iterationstiefe bricht das Verfahren nach einer vorgegebenen und als ausreichend erachteten Anzahl von Generationen ab und kann somit reproduzierbare Ergebnisse liefern.

3. Sättigung bezeichnet eine Fitnessapproximation und daher wenig Aussicht auf stärkere Verbesserung. Sie ist erfüllt, wenn sich die beste (oder alternativ durchschnittliche) Fitness nach i Durchläufen um weniger als j Prozent verbessert hat und ist somit auch reproduzierbar. Ein Spezialfall der Sättigung tritt ein, wenn alle beteiligten Operatoren melden, dass sie keine weiteren Ergebnisse mehr produzieren können.
4. Perfekte Fitness ist bei einer Fitness des besten Segmentes von 100 Prozent erreicht. Da kein besseres Ergebnis möglich ist, kann direkt abgebrochen werden. Die Operatoren und ihre Bewertungsfunktionen müssen so eingestellt sein, dass bei 100 Prozent ein optimales Ergebnis erreicht ist.

In der Beispielimplementation wurde zusätzlich noch ein Kriterium implementiert, welches die Dauer eines einzelnen Modulaufrufs beschränkt. Es wurde im Zusammenhang mit NLGS eingebracht, wird aber nur selten benötigt. Dank der zahlreichen Optimierungen konnte im Verlauf der Implementierung auf die Kriterien Timeout und Iterationstiefe verzichtet werden.

4.5.7 Bewertung

Es wurden einige Operatoren aus den Gebieten der Initialisierung, Rekombination, Mutation und Elimination entworfen und untersucht. Wichtiger als die vollständige Korrektheit und genaue Bewertung der Verfahren ist der durch sie entstandene Pool von Operatoren, der auf der aktiven Population anhand des erweiterten EA-Modells arbeiten kann.

Die Rekombination kann falsche Bewertungen korrigieren. Feste Faktoren oder die durch den Mutationslevel geschaffene Reihenfolge sind tolerant und wirken sich stärker auf die Performance als auf das erreichte Zielmodell aus.

Der geschaffene modulare Pool an Operatoren kann beliebig um weitere Verfahren erweitert und so schrittweise verbessert werden.

Die praktische Einsetzbarkeit wird anhand konkreter Fallbeispiele in Kap. 5 untersucht.

4.6 Hypothesen

Im Folgenden werden nach einer Einleitung und Einordnung von Hypothesen ihre Eigenschaften untersucht, um dann mehrere praktische Beispiele zu betrachten.

4.6.1 Einführung

Dieses Kapitel ist bezüglich des evolutionären Optimierungsverfahrens eigentlich unter Kap. 4.5.3 oder Kap. 4.5.2 einzuordnen, da Verfahren zur Erweiterung (Mutation) und Zusammenführung (Rekombination) von Segmenten behandelt werden.

Die Ausgliederung erklärt sich durch den Schwerpunkt auf modellspezifischen Annahmen und Vermutungen. Es werden also reale Fälle nach Regelmäßigkeiten untersucht und versucht, daraus häufig zutreffende Vorschriften abzuleiten. Da deren Korrektheit nicht gesichert ist, muss die zugehörige Bewertung generell schlechter angesiedelt sein als die der allgemeineren Operatoren, die somit im Zweifelsfall immer noch die Oberhand behalten. Daher lassen sich die folgenden Operatoren auch als Spezialisierungen der *Diversifikation* auffassen: Es werden mehrere mögliche Individuen erzeugt, ohne dabei das stabilere Ausgangsindividuum zu verwerfen.

4.6.2 Allgemeines

Im Folgenden werden auf alle Hypothesen zutreffende Eigenschaften betrachtet.

4.6.2.1 Vorteile

Da sich die allgemeinen Operatoren im Zweifelsfall aufgrund ihrer höheren Güte durchsetzen, ist kein nennenswerter Qualitätsverlust beim Ergebnis zu erwarten. Es existieren jedoch Fälle, in denen Hypothesen sinnvoll sind.

Sind für Teile der Szene nicht genügend Ausgangsdaten für eine korrekte Berechnung vorhanden, so kann ein geschätzter Abschnitt oft besser sein als gar keiner. Gegebenenfalls werden sogar mehrere unterschiedliche und sogar widersprüchliche Hypothesen generiert, im weiteren Verlauf der Berechnung geprüft und somit später selektiert. Dies ist gewollt und entspricht den Paradigmen der EA.

Kann ein Segment beispielsweise mit den normalen Operatoren nicht weiter ausgebaut werden und existieren zwei widersprüchliche Hypothesen zu dessen Fortführung, so werden beide angewandt und in verschiedenen Individuen weiterverfolgt. Im Laufe der Entwicklung werden diese Individuen mit anderen Segmenten rekombiniert und eine Rekombinationsgüte ermittelt. Die dem gesuchten Zielmodell besser entsprechende Hypothese wird sich leichter in andere Segmente transformieren lassen, daher bei der Rekombination bessere Bewertungen erhalten und sich somit durchsetzen.

Interessant ist auch der Rückschluss: Verhalten sich Teile der Szene erwartungsgemäß, so werden weniger Eingangsdaten benötigt und die Datenerfassung kann entlastet werden.

4.6.2.2 Festlegungen

Sinnvollerweise liefern Hypothesen auch eine Selbstbewertung. Die Güte soll zwischen $g_{op} \in [0, 0.5]$ liegen.

4.6.2.3 Vorzug selbstsicherer Operatoren

Bei den Hypothesen sind verschiedene Risikoklassen anzutreffen. Einige Operatoren liefern meist zuverlässige, andere wieder eher spekulative Ergebnisse. Damit in der Entwicklung befindliche Individuen nicht unnötig verfälscht werden, jedoch trotzdem die spekulativen Vorschläge genutzt werden, wird eine Reihenfolge etabliert.

Dieses Konzept wird durch den in Kap. 4.4.3 beschriebenen Mutationslevel realisiert.

4.6.3 Hypothesen aufgrund von Fassadenbildern

Im Folgenden werden Hypothesen betrachtet, die auf in Fassadenbildern digitalisierten 2D-Objekten beruhen.

Weitere hier integrierbare Ansätze zur Extraktion von Informationen aus Fassadenbildern finden sich in [Koehl u. Gaiotti 2004].

Zur Kennzeichnung, ob zu einem globalen Punkt \mathbf{p} der zugehörige lokale Punkt \mathbf{p}_{2d} in einem Bild oder der lokale 3D-Punkt \mathbf{p}_{3d} in einem 3D-Segment gemeint ist, wird die Syntax \mathbf{p}_{2d} bzw. \mathbf{p}_{3d} genutzt.

4.6.3.1 Wandgeraden und -ecken

Die folgende Betrachtung gilt für zwei Flächen mit einer gemeinsamen Kante, deren gemeinsame Kante und die direkt daran angrenzenden Kanten in mindestens einem Bild sichtbar sind.

Grenzen zwei Flächen so aneinander, dass sie genau eine gemeinsame und ungefähr vertikale Strecke haben, so handelt es sich oft um einen dieser drei Fälle:

1. Beide Flächen liegen in einer Ebene im Raum und es handelt sich z.B. um die Fortsetzung einer Hauswand.

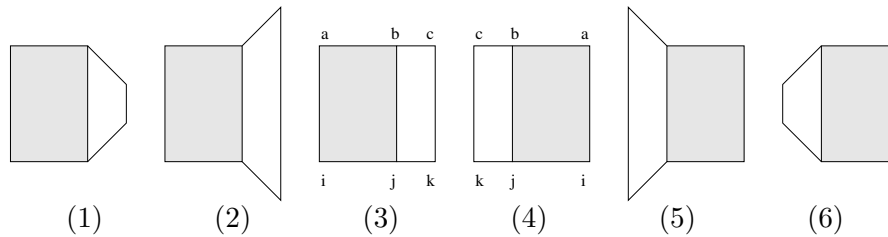


Abbildung 4.16: Typische Sicht auf angrenzende Flächen bei Hausecken bzw. -wänden.

2. Beide Flächen liegen im Raum rechtwinklig zueinander und es handelt sich z.B. um eine Hausecke.
3. Es handelt sich um eine rechtwinklige Hausecke in die andere Richtung.

4.6.3.1.1 Fälle und Wahrscheinlichkeit Ist eine der beiden Flächen bekannt, so soll die andere geschätzt werden. In Abb. 4.16 sind sechs typische Fälle dargestellt, wobei die bekannte Fläche grau gefüllt ist. Diese Fälle sind in der Praxis oft noch perspektivisch verzerrt (Abb. 4.17).

Es wird versucht, anhand der 2D-Lage der Flächen auf die Wahrscheinlichkeit der drei obigen Fälle zu schließen. Da Ausrichtung, Länge und Abstand der einzelnen Linien zueinander von der betrachteten Perspektive abhängen, wird die Richtungsänderung genutzt.

Im Folgenden wird die gerichtete Multilinie von **a** durch **b** bis **c** (Abb. 4.16) als Oberkante und die Multilinie von **i** über **j** nach **k** als Unterkante bezeichnet. Es seien $\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{a}$ und $\mathbf{f} = \mathbf{c} - \mathbf{b}$ die Vektoren der Oberkante und $\hat{\mathbf{e}}, \hat{\mathbf{f}}$ ihre Einheitsvektoren. Selbiges gilt mit $\mathbf{g} = \mathbf{j} - \mathbf{i}$, $\mathbf{h} = \mathbf{k} - \mathbf{j}$ und $\hat{\mathbf{g}}, \hat{\mathbf{h}}$ für die Unterkante. Es werden wieder die drei häufigsten Fälle betrachtet:

Gerade Wand In genau diesem Fall gibt es sowohl bei der Ober- als auch bei der Unterkante keine Richtungsänderung (Abb. 4.16, 3+4 und Abb. 4.17) und es gilt $|\hat{\mathbf{e}}_{2d} - \hat{\mathbf{f}}_{2d}| = 0 = |\hat{\mathbf{g}}_{2d} - \hat{\mathbf{h}}_{2d}|$. Der „Worst Case“ ist erreicht, wenn beide Kanten entgegengesetzt gerichtet sind und $|\hat{\mathbf{e}}_{2d} - \hat{\mathbf{f}}_{2d}| = 2 = |\hat{\mathbf{g}}_{2d} - \hat{\mathbf{h}}_{2d}|$ gilt. Die Güte $g_1 \in [0, 0.5]$ kann daher durch

$$g_1 = 0.5 - \frac{1}{8} \left(\left| \hat{\mathbf{e}}_{2d} - \hat{\mathbf{f}}_{2d} \right| + \left| \hat{\mathbf{g}}_{2d} - \hat{\mathbf{h}}_{2d} \right| \right) \quad (4.35)$$

berechnet werden. Der Faktor 1/8 ergibt sich durch die auf 0.5 normierte Summe beider Worst-Case-Fälle.



Abbildung 4.17: Reale Sicht auf angrenzende Flächen bei Hausecken bzw. -wänden

Ecke auf den Betrachter zu Für Fall 2 und 5 wird angenommen, dass sich die Oberkante ungefähr im rechten Winkel nach oben und die Unterkante rechtwinklig nach unten ändert (Abb. 4.16). Dies ist je nach Perspektive etwas anders, aber erfasst die Tendenz der Kante nach außen und ist daher ein sinnvoller Richtwert.

Durch eine Drehung von $\mathbf{f}_{2d} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_x \\ \mathbf{f}_y \end{pmatrix}$ um 90 Grad nach rechts und $\mathbf{h}_{2d} = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_x \\ \mathbf{h}_y \end{pmatrix}$ um 90 Grad nach links wird dieser Fall auf den obigen Fall der geraden Wand projiziert. Aus den Formeln A.12, A.11 und 4.35 folgt damit für die Güte g_2 :

$$g_2 = 0.5 - \frac{1}{8} \left(\left| \hat{\mathbf{e}}_{2d} - \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{f}_y} \\ -\widehat{\mathbf{f}_x} \end{pmatrix} \right| + \left| \hat{\mathbf{g}}_{2d} - \begin{pmatrix} -\widehat{\mathbf{h}_y} \\ \widehat{\mathbf{h}_x} \end{pmatrix} \right| \right) \quad (4.36)$$

Ecke vom Betrachter weg Für Fall 1 und 6 (Abb. 4.16) folgt äquivalent zu Formel 4.36 unter Optimierung auf eine Rechtskurve der Ober- und eine Linkskurve der Unterkante:

$$g_3 = 0.5 - \frac{1}{8} \left(\left| \hat{\mathbf{e}}_{2d} - \begin{pmatrix} -\widehat{\mathbf{f}_y} \\ \widehat{\mathbf{f}_x} \end{pmatrix} \right| + \left| \hat{\mathbf{g}}_{2d} - \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{h}_y} \\ -\widehat{\mathbf{h}_x} \end{pmatrix} \right| \right) \quad (4.37)$$

4.6.3.1.2 Berechnung Es wird nur die Berechnung der beiden unbekannt und direkt an die gemeinsame Kante grenzenden Punkte betrachtet. Da anschließend mindestens vier Punkte der Fläche berechnet sind, ergibt sich die restliche Fläche durch weitere Verfahren der evolutionären Entwicklung, besonders der Mutation und Rekombination.

Der neu zu berechnende Punkt ergibt sich aus dem angrenzenden Punkt der gemeinsamen Kante (\mathbf{b}_{3d} oder \mathbf{j}_{3d}), einem Richtungseinheitsvektor $\widehat{\mathbf{v}}_{3d}$ und einem Faktor r :

$$\mathbf{c}_{3d} = \mathbf{b}_{3d} + r_0 \cdot \widehat{\mathbf{v}}_{0,3d} \quad , \quad \mathbf{k}_{3d} = \mathbf{j}_{3d} + r_1 \cdot \widehat{\mathbf{v}}_{1,3d} \quad (4.38)$$

Im Fall der geraden Kante gilt $\hat{\mathbf{v}}_{0,3d} = \hat{\mathbf{e}}$ und $\hat{\mathbf{v}}_{1,3d} = \hat{\mathbf{g}}_{3d}$. Andernfalls wird der auf der bekannten Fläche senkrecht stehende Vektor $\mathbf{v}_{3d} = \mathbf{e}_{3d} \times (\mathbf{j}_{3d} - \mathbf{b}_{3d})$ mit je nach Richtung der Ecke passendem Vorzeichen genutzt.

Für den Faktor r lässt sich leider anhand des Bildes kein sicherer Wert ermitteln, jedoch ist eine Schätzung anhand des Verhältnisses der Längen der 2D-Strecken möglich:

$$r_0 = \frac{|\mathbf{f}_{2d}|}{|\mathbf{e}_{2d}|}, \quad r_1 = \frac{|\mathbf{h}_{2d}|}{|\mathbf{g}_{2d}|} \quad (4.39)$$

Dies ist zwar nicht ganz korrekt, ergibt aber als Schätzung besonders bei den zu erwartenden kleinen Distanzen bei Dachvorsprüngen, Hauseingängen und Reklametafeln einen sinnvollen Wert.

4.6.3.2 Rechtwinklige Ecken und gleiche Ebenen bei Parallellflächen

Diese Methode rät ausgehend von Parallellflächen 90-Grad-Ecken und in einer Ebene liegende Flächen. Es werden die Bezeichner und Fälle aus Abb. 4.16 genutzt. Dieses Verfahren wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5).

Algorithmus Es werden in den untersuchten Bildern alle Parallellflächen F_1 betrachtet, die dort mindestens zwei gemeinsame und sichtbare Punkte mit einer weiteren Fläche F_2 besitzen. Weiterhin sollte F_2 noch unbekannte Punkte haben, damit eben diese berechnet werden können. Die beiden genutzten gemeinsamen Punkte \mathbf{b} und \mathbf{j} sollten topologisch nah beisammen sein, es sollten also keine weiteren gemeinsamen Punkte bei Nutzung des kürzesten Weges zwischen ihnen liegen. Es werden in F_2 die an \mathbf{b} und \mathbf{j} angrenzenden und nicht in F_1 liegenden Punkte \mathbf{c} und \mathbf{k} ermittelt. Gelingt dies nicht, wird abgebrochen.

Eine Ebene Ist F_2 auch eine Parallellfläche (z.B. Fall 3 und 4, $g_{parF} > 0.9$), so liegen aufgrund der gemeinsamen Punkte beide Flächen in einer Ebene und es kann ein neues Segment erzeugt werden, welches alle im Bild sichtbaren Punkte von F_1 und F_2 enthält. Die Koordinaten werden, da alle Punkte in einer Ebene liegen, den Bildkoordinaten entnommen und mit Null als dritter Dimension ergänzt.

Es werden alle Punkte von F_1 mit der zugehörigen Parallellflächengüte (Kap. 4.3.2.5) versehen: $g_p = g_{p,old} \cdot g_{parF}$. Dies ist die Basis. Die restlichen Punkte werden als hinzugeschätzt betrachtet und erhalten, da sie aus der Annahme zweier Parallellflächen folgen, das mit einem konstanten Faktor abgeschwächte Produkt beider Wahrscheinlichkeiten: $g_p = g_{p,old} \cdot g_{parF1} \cdot g_{parF2}$

Rechter Winkel Ist F_2 keine Parallellfläche (z.B. Fälle 1, 2, 5 und 6, $g_{parF} < 0.8$), so könnte es sich um eine 90-Grad-Ecke handeln. Hierbei ist zu klären, ob sich die Ecke dem Betrachter nähert (z.B. Fall 2 und 5) oder sich von ihm entfernt (z.B. Fall 1 und 6).

Da F_1 eine Parallellfläche ist, kommen sich die angrenzenden Strukturen bei sich entfernenden Ecken im Bild näher beziehungsweise laufen bei auf den Betrachter zukommenden Ecken im Bild weiter auseinander. Ein erster Ansatz wäre, die Distanzen $|\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{j}_{2d}|$ und $|\mathbf{c}_{2d} - \mathbf{k}_{2d}|$ zu vergleichen. Dies ist jedoch bei komplizierten Flächenverläufen problematisch. Daher wird alternativ der Abstand zu dem Bildmittelpunkt \mathbf{m} verglichen. Sich entfernende und im Bild zusammenstauende Ecken nähern sich, auf den Betrachter zulaufende Ecken entfernen sich von \mathbf{m} . Durch den Vergleich von je zwei Werten ergibt sich ein gutes Kontrollinstrument.

- $|\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}| > |\mathbf{c}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}|$ und $|\mathbf{j}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}| > |\mathbf{k}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}|$: Ecke vom Betrachter fort
- $|\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}| < |\mathbf{c}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}|$ und $|\mathbf{j}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}| < |\mathbf{k}_{2d} - \mathbf{m}_{2d}|$: Ecke zum Betrachter hin

Trifft keiner der beiden Fälle zu, so sind die Annahmen zu vage und es wird keine Hypothese abgegeben.

Das neue Segment erhält die im Bild sichtbaren Punkte von F_1 mit deren Bildkoordinaten und der Parallellflächengüte als Faktor zu der bisherigen Güte zur Abbildung einer möglichen Verzerrung. Da F_2 keine Parallellfläche ist, werden nur die beiden an F_1 angrenzenden Punkte \mathbf{c}_{3d} und \mathbf{k}_{3d} berechnet und ergänzt. Deren x - und y -Koordinaten entsprechen dem zugehörigen \mathbf{b}_{2d} bzw. \mathbf{j}_{2d} des neuen Segmentes und werden für den rechten Winkel mit v als z -Wert versehen.

Das Vorzeichen von v ergibt sich aus der Richtung der Ecke und ist negativ bei einer Ecke zum Betrachter. Der Betrag kann leider nur geschätzt werden und wird, sicherlich etwas zu klein, aus den Bildkoordinaten anhand $|\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}|$ bzw. $|\mathbf{j}_{2d} - \mathbf{k}_{2d}|$ entnommen. Mangels einer Bewertung wird die Güte auf einen operatorenspezifischen festen Wert (z.B. 0.4) gesetzt.

4.6.3.3 Betrachtung der Perspektive

Eine weitere Hypothese setzt den perspektivischen Mittelpunkt eines Parallelbildes auf den Bildmittelpunkt und entscheidet bei festgestellten Ecken deren Richtung. Ausgehend von einer Parallellfläche wird untersucht, ob sich die neue Kante vom „perspektivischen Mittelpunkt“ entfernt oder sich ihm annähert.

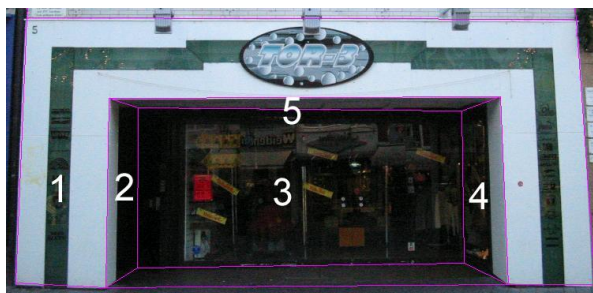


Abbildung 4.18: Beispiel Einbuchtung mit Perspektive

Entfernt sie sich, so kommt sie dem Betrachter entgegen.

In Abb. 4.18 befindet sich der perspektivische Mittelpunkt z.B. zwischen der „3“ und der „5“. Wird ausgehend von Fläche F_1 die angrenzende Fläche F_2 betrachtet und eine Ecke festgestellt (z.B. anhand der unteren Kanten), so nähern sich beide an die gemeinsamen Punkte angrenzenden Kanten von F_2 (oben und unten) dem Mittelpunkt und kennzeichnen dadurch eine Kante vom Betrachter weg. Gleiches gilt für die von F_1 aus untersuchte Fläche 4 oder 5. Wird dagegen von Fläche 3 ausgehend Nummer 2, 4 oder 5 betrachtet, so entfernen sich diese vom Mittelpunkt und zeigen daher eine Ecke zum Betrachter an.

Ausgehend von der häufig auftretenden Betrachterposition konnte die Zuverlässigkeit durch Herabsetzung von m_y auf $1/3$ der Bildhöhe verbessert werden.

4.6.3.4 Rechtwinklige Ecken und gleiche Ebenen von allgemeinen Flächen

Auch dieses Verfahren sucht nach rechtwinkligen Ecken zwischen angrenzenden Flächen oder stellt fest, dass sie in einer Ebene liegen. Es wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5).

4.6.3.4.1 Annahmen Es wird von zwei an einander angrenzenden Flächen F_1 , F_2 und einem Bild Pic ausgegangen:

- Die Basis F_1 ist komplett und das Ziel F_2 noch nicht vollständig im Raum berechnet.
- F_1 ist mindestens teilweise in Pic sichtbar, wobei mindestens zwei angrenzende Punkte sichtbar sein müssen.

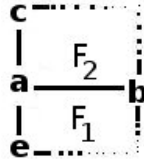


Abbildung 4.19: Flächen und Bezeichner in Kap. 4.6.3.4

- F_2 ist in *Pic* voll sichtbar, aber in keinem anderen Bild. Diese Einschränkung entlastet photogrammetrische und andere sicherere Verfahren: Es wird nur geschätzt, wenn es keinen anderen Weg gibt.
- Die Flächen haben mindestens 2 gemeinsame angrenzende Punkte.

4.6.3.4.2 Algorithmus Seien nach Abb. 4.19 die gemeinsamen Punkte der Flächen \mathbf{a} und \mathbf{b} sowie die an \mathbf{a} angrenzenden und nicht gemeinsamen Punkte \mathbf{c} und, je nach Fall, \mathbf{e} ermittelt, dann können folgende Fälle auftreten:

Fall 1 Hat im Bild $\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{a}_{2d}$ die gleiche Richtung wie $\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}$, dann liegen beide Flächen vermutlich in einer Ebene. Entscheidend ist der Betrag der Differenz der normalisierten Richtungsvektoren:

$$a = \left| \frac{\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{a}_{2d}}{|\mathbf{b}_{2d} - \mathbf{a}_{2d}|} - \frac{\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}}{|\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}|} \right| \quad (4.40)$$

Zeigen beide Vektoren in dieselbe Richtung, folgt $a = 0$. Sind sie entgegengesetzt, folgt $a = 2$. Unterschreitet a einen Grenzwert (hier: 0.1), so ist dieser Fall erfüllt und erhält die Güte $g = 1 - 0.5 \cdot a$.

Fall 2 Ist \mathbf{e}_{2d} sichtbar und hat im Bild $\mathbf{e}_{2d} - \mathbf{a}_{2d}$ die gleiche Richtung wie $\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}$, so liegen die Flächen in einer Ebene (Abb. 4.20a). Analog zu Fall 1 folgt

$$a = \left| \frac{\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{e}_{2d}}{|\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{e}_{2d}|} - \frac{\mathbf{c}_{2d} - \mathbf{a}_{2d}}{|\mathbf{c}_{2d} - \mathbf{a}_{2d}|} \right| \quad (4.41)$$

mit gleichem Grenzwert und Güte.

Fall 3 und 4 Da diese Fälle besonders spekulative, aber dennoch oft hilfreiche Hypothesen sind, besitzen sie einen hohen Mutationslevel (Kap. 4.4.3). Durch sie können Dachsimse, Eingänge, Tafeln und andere rechtwinklige Vorsprünge und Einbuchtungen aus einem einzigen Bild generiert werden. Abb.

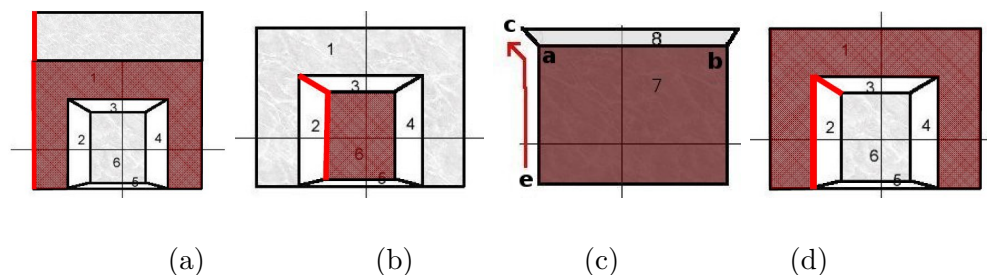


Abbildung 4.20: Beispiele für (a) Fall 2, (b) Fall 3, (c) Fall 3 und (d) Fall 4

4.20 zeigt skizzenhaft einen Dachsims (c) und eine Einbuchtung (d).

Als Voraussetzung muss e_{2d} sichtbar sein und a_{2d} , c_{2d} und e_{2d} müssen sich bezüglich ihrer X-Achse auf derselben Seite vom Bildmittelpunkt m_{2d} befinden.

Es wird untersucht, ob die gerichtete Strecke von e_{2d} über a_{2d} bis c_{2d} nach links oder rechts abbiegt. Ist die Krümmung unwesentlich, so wird keine Hypothese ausgeführt. Wie in Abb. 4.20b zu erkennen ist, hängt die Richtungsänderung von dem Bildsektor der Änderung (bei Punkt a_{2d}) und der genutzten Streckenrichtung ab. Sind c_{2d} und e_{2d} vertauscht, so negiert sich bei gleicher Geometrie die Richtungsänderung.

Es sei *Fall 3* die Ecke zum Betrachter (Abb. 4.20b+c) und *Fall 4* die Ecke in die Ferne (Abb. 4.20d). Es wird die mit einem Pfeil und den passenden Punktbezeichnern in Abb. 4.20c dargestellte Situation betrachtet: Eine Linkskurve verursacht *Fall 3*. Entsprechend würde eine Rechtskurve *Fall 4* ergeben. Würden sich a_{2d} , c_{2d} und e_{2d} jedoch rechts vom Bildmittelpunkt m_{2d} befinden, so müsste das bisherige Ergebnis invertiert werden. Dies lässt sich an der rechten Außenkante nachvollziehen, die wegen der anderen Kurvenrichtung somit auch *Fall 3* ergibt. Nun könnten noch e_{2d} und c_{2d} vertauscht sein. Daher wird untersucht, ob e_{2d} , a_{2d} und c_{2d} in dieser Reihenfolge bezüglich der Y-Achse aufsteigend oder absteigend angeordnet sind. Trifft keiner dieser beiden Möglichkeiten zu, so findet aus Sicherheitsgründen keine Hypothese statt. Je nach genutztem Koordinatensystem muss bei einer dieser Möglichkeiten das Ergebnis wieder invertiert werden.

Alternativ zu dieser auf eine Anordnung der Punkte bezüglich der Y-Achse fixierten Lösung kann eine äquivalente Hypothese hinsichtlich der X-Achse erfolgen.

Aufgrund der zahlreichen Bedingungen und Unwägbarkeiten wird die Güte auf einen niedrigen konstanten Wert gesetzt.

Fall 5 Ist \mathbf{e} im Bild nicht sichtbar und steht $\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{b}_{2d}$ grob rechtwinklig auf $\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}$, so liegen vermutlich beide Flächen in einer Ebene. Aufgrund der perspektivischen Verzerrung wird sich oft kein echter 90-Grad-Winkel finden. Zur Überprüfung dient das Skalarprodukt

$$a_5 = \frac{\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{b}_{2d}}{|\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{b}_{2d}|} \cdot \frac{\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}}{|\mathbf{a}_{2d} - \mathbf{c}_{2d}|} \in [-1, 1] \quad (4.42)$$

welches optimalerweise 0 sein sollte, aber wegen der Verzerrung auf einen großzügigen Wertebereich (hier: $[-0.3, 0.3]$) beschränkt wird. Die Berechnung von \mathbf{c}_{3d} ist nur dann sinnvoll, wenn im 3D-Segment $\mathbf{a}_{3d} - \mathbf{b}_{3d}$ rechtwinklig zu $\mathbf{a}_{3d} - \mathbf{e}_{3d}$ steht. Dies ergibt sich wieder aus dem Skalarprodukt mit einem diesmal engeren Wertebereich (hier: $[-0.2, 0.2]$). Die Güte von \mathbf{c} ergibt sich aus der Nullabweichung von a_5 durch $g = 1 - |a_5|$.

Fall 5 tritt beispielsweise dann ein, wenn der untere Teil einer Wand bereits in 3D ermittelt ist und im Bild ihr oberer Teil zu sehen ist, wobei dort nur die gemeinsame horizontale Kante als Schnittmenge existiert.

4.6.3.4.3 Beispiel Abb. 4.21a zeigt ein Parallelbild mit digitalisierten markanten Flächen. Es werden keine weiteren Daten genutzt oder gesetzt. Die Berechnung ergibt das gewünschte Zielmodell (Abb. 4.21b+c). Ein Blick in die Logdatei des Zielmodells (gekürzter Ausschnitt)

```
CEstimateIn1Pic: Add new P3d, logicCase=2, rating=0.38445
  description: E-A-C on one line, a=179, b=182, e=200
CEstimateIn1Pic: Add new P3d, logicCase=1, rating=0.38422
  description: B-A-C on one line, a=182, b=185, e=179
CEstimateIn1Pic: Add new P3d, logicCase=3, rating=0.18911
  description: come to viewer of polyA, a=213, b=210,e=191,sd=1
CEstimateIn1Pic: Add new P3d, logicCase=3, rating=0.18911
  description: come to viewer of polyA, a=210, b=213,e=194,sd=-1
```

ergibt, dass das vorgestellte Verfahren gegriffen hat und u.a. die Fälle 2, 1 und 3 ermittelt und bewertet wurden. Das Zielmodell wurde insgesamt mit einer Güte von 0.69 bewertet. Da alle Objekte dargestellt sind, entspricht die Güte der Fitness.

4.6.3.5 Vertikale Wände

Ist bereits eine Wandfläche berechnet, so können angrenzende Flächen mit Verfahren aus Kap. 4.6.3.4 oder Kap. 4.6.3.1 ermittelt werden.

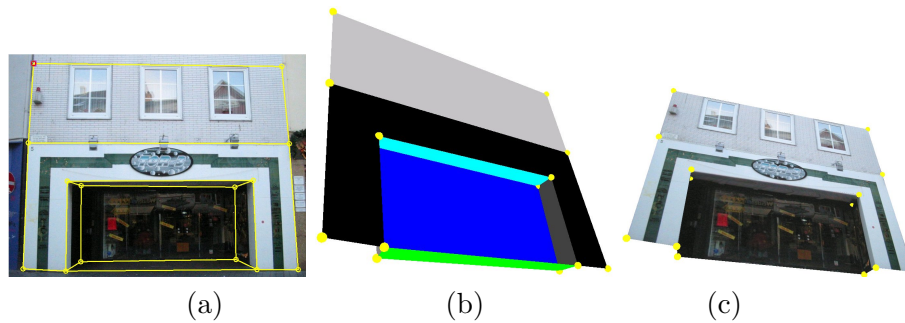


Abbildung 4.21: Rechtwinklige Ecken und gleiche Ebenen von allgemeinen Flächen: Aus lediglich (a) einem Bild werden relative Lage und Abstände geschätzt und als (b) untexturiertes bzw. (c) texturiertes 3D-Modell dargestellt

Das folgende Verfahren behandelt Fälle ohne Ausgangswand und geht von vorhandenen oder bereits gebildeten Grundrissen aus. Daher ist es auch in der Beispielimplementation (Kap. 6.3.2.5) aus Gründen der Performance mit der Grundrissinterpolation (Kap. 4.6.4.1) verflochten. Es werden Punkte in Grundrissen und Bildern wie in Kap. 4.6.4.1 zusammen gebracht und bei Bedarf weitere Grundrisspunkte interpoliert.

Wird nun in einem Bild eine Parallellfläche gefunden, deren untere Punkte auch im aktuellen Grundriss vorhanden sind, so wird eine vertikale Wand angenommen und die oberen Punkte geschätzt. Dazu werden sie anhand ihrer X-Position im Bild entsprechend der dort und im Grundriss sichtbaren Punkte im Grundriss interpoliert. Dies ergibt die X- und Y-Werte der neuen 3D-Punkte. Der Z-Wert ergibt sich aus den Bildkoordinaten, indem im Bild das Lot auf die Grundrissstrecke gefällt und die Länge mit Hilfe einer im Bild und Grundriss bekannten Strecke skaliert wird.

Die Güte der neuen Punkte setzt sich aus der Parallellflächengüte und der Punktgüte der genutzten Ausgangspunkte zusammen.

Ein auf der Grundrissinterpolation aufbauendes Beispiel ist in Abb. 4.28 zu sehen.

4.6.3.6 Enthaltener Punkt

Liegt ein Punkt \mathbf{p} in einem Bild auf einer Strecke oder ihrer Verlängerung, deren Endpunkte bereits in 3D bekannt sind, so kann er interpoliert werden.

Voraussetzung ist, dass \mathbf{p}_{2d} in allen Bildern, wo er und die Strecke sichtbar sind, an annähernd gleicher relativer Position auf der Strecke liegt.

Die Güte setzt sich aus der Güte der Endpunkte nach relativer Position sowie der genauen Lage auf der Strecke und gleicher relativer Position in den Bildern

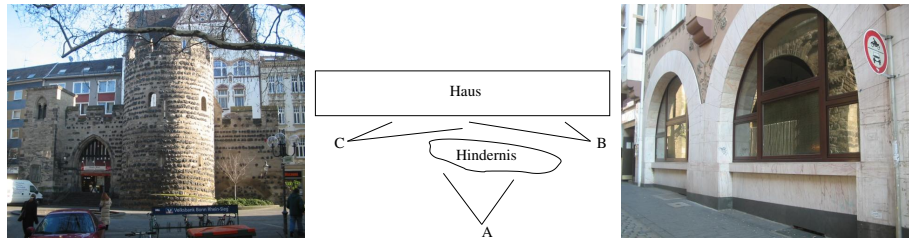


Abbildung 4.22: Schräge Aufnahmen bei einem Hindernis (Sterntor in Bonn)

zusammen.

Übliche Fälle sind aneinander grenzende Wände unterschiedlicher Höhe oder auch Andockkanten von Schildern an Hauswänden.

4.6.3.7 Entzerrung von Parallelogrammen

Ein *Parallelogramm* ist eine Parallelfäche mit vier Punkten und bietet damit einen angenehmen Fall zur Entzerrung. Weiterhin tritt dieser Fall häufig auf und ist in den untersuchten Situationen leicht einzubringen.

Die beiden Hauptanwendungsgebiete dieser erzwungenen Entzerrung sind erstens die Korrektur von Ungenauigkeiten bei der Aufnahme und der Kamera bei Parallelfächen und zweitens die Erzeugung von Parallelfächen aus seitlichen Aufnahmepositionen. Der zweite Fall wird praxisrelevant, wenn z.B. aufgrund örtlicher Einschränkungen keine frontalen Aufnahmen von Häuserfronten möglich sind.

In Abb. 4.22 ist neben der Aufsichtsskizze ein konkretes Beispiel aus der Bonner Innenstadt (Vivatsgasse) zu sehen, wo die zu erfassende Häuserfront (rechts) durch ein altes Tor mit Turm (links) verdeckt wird.

4.6.3.7.1 Voraussetzungen Damit keine photogrammetrisch berechenbaren und andere komplexe Fälle beeinträchtigt werden, sollte die zu entzerrende Fläche in keinem anderen Bild komplett sichtbar sein.

Die Anzahl der Ecken wird auf vier festgelegt, da sonst eine automatische Entzerrung nicht eindeutig identifizierbar und damit nicht praktikabel ist. Möglich ist lediglich ein Workaround für vier echte und beliebig viele „falsche Ecken“, die zwar in der Struktur als Punkte existieren, aber nur Hilfspunkte auf der Strecke zwischen zwei „echten“ Punkten sind. Dieser erweiterte Fall lässt sich auf den 4-Punkte-Fall abbilden.

Weiterhin wird von einer konvexen Form der Fläche und einer Punktverteilung ausgegangen, die eine Zuordnung gemäß Abb. 4.23 gestattet.

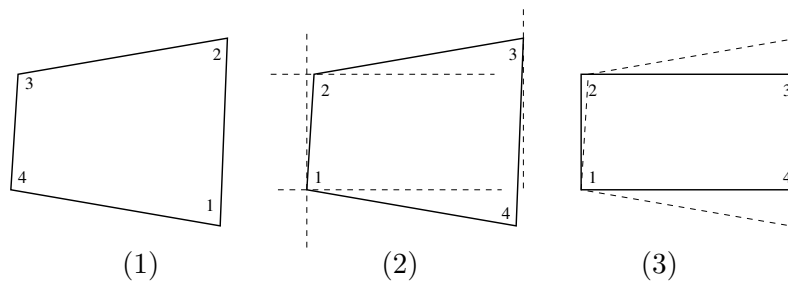


Abbildung 4.23: Vierecksentzerrung

4.6.3.7.2 Berechnung In der den Voraussetzungen entsprechenden Fläche wird durch interne Rotation der Punkte in der Flächendefinition der Punkt links unten im Bild als Startpunkt festgelegt (Abb. 4.23, Schritt 1 nach 2). Dies schafft eine einheitliche Ausgangskonfiguration.

Ist (z.B. durch vorangehende Verfahren) eine Wahrscheinlichkeit zur Entzerrung vorgegeben, so wird diese als Güte verwendet oder nicht entzerrt, falls diese Null beträgt. Andernfalls wird die global vorgegebene konstante Güte g_{Modul} genutzt.

Die Entzerrung geschieht durch Berechnung neuer Eckpunkte und entsprechender Interpolation des Flächeninhaltes.

Neue Eckpunkte Punkt 1 wird übernommen und als X-Wert für Punkt 2 genutzt, dessen Y-Wert auch in Punkt 3 eingeht. Punkt 4 setzt sich aus dem X-Wert von Punkt 3 und dem Y-Wert von Punkt 1 zusammen. Diese Transformation ist in Abb. 4.23 von Schritt 2 nach 3 dargestellt.

Interpolation des Flächeninhaltes Bei der Übertragung von Punkten zwischen dem alten (verzerrten) und dem neuen (entzerrten) Bild werden beide Richtungen genutzt: Zur Generierung der neuen Textur wird für jeden Punkt des neuen Bildes der zugehörige des alten Bildes ermittelt und seine Farbwerte übertragen. Werden weiterhin im Viereck liegende lokale 2D-Punkte übertragen, so wird ihre neue Position anhand der alten Koordinaten ermittelt. Werden nur zwei Vektoren wie bei der Flächenvervollständigung bzw. Punktübertragung genutzt, so kann das Ergebnis durch die auf das ganze Bild übertragene lokale Verzerrung stark verfälscht werden. Abhilfe schafft die Interpolation bei Vierecken aus Kap. 4.5.3.5. Dabei werden Punkte von Pic_1 nach Pic_2 übertragen, indem ihre relative Position i, j in Pic_1 anhand Formel 4.27 ermittelt und in Pic_2 nach Formel 4.25 daraus die neue Position berechnet wird.



Abbildung 4.24: Probleme bei der einfachen Entzerrung

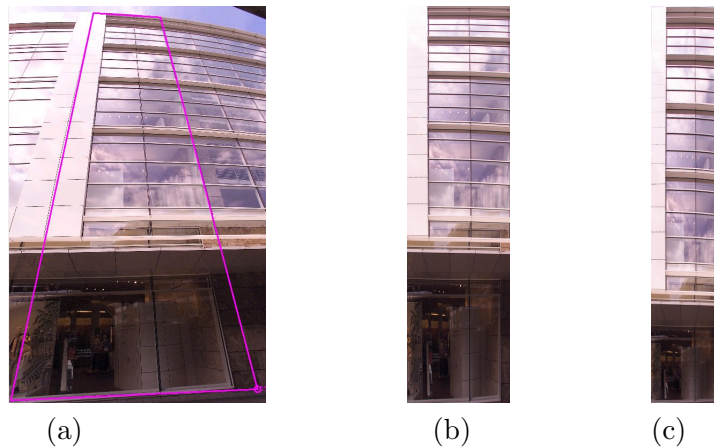


Abbildung 4.25: Eine sehr schräg aufgenommene Fassade (a) im Original, (b) einfach entzerrt und (c) mit Bildinterpolation

In Abb. 4.24 wurden beispielhaft die enthaltenen Strecken mit der Punktübertragung, der Bildinhalt jedoch mit der Interpolation bei Vierecken übertragen. Das beschriebene Verfahren wurde implementiert (Kap. 6.3.2.5) und erfolgreich getestet.

4.6.3.7.3 Probleme Die beiden Achsen (X , Y) werden nicht korrekt zueinander skaliert. Es kann daher eine Stauchung oder Streckung auftreten, die aber durch Einpassungen im weiteren Verlauf der EA korrigiert werden sollte.

4.6.3.7.4 Bildinterpolation bei schräger Aufnahme Bei sehr schräg aufgenommenen Fassaden tritt ein weiteres Problem auf. Trotz ähnlicher Höhe aller Etagen in der Realität werden diese perspektivisch verzerrt und daher mit zunehmendem Abstand immer kleiner. Dies ist beispielhaft in Abb. 4.25 zu sehen. Aufgrund der verzerrten Aufnahme (a) werden die Fensterkacheln bei einfacher Entzerrung, wie sie auch oft manuell mit Bildverarbeitungssoft-

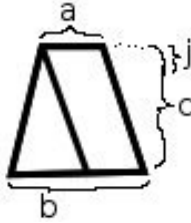


Abbildung 4.26: Das Viereck wird zur Flächenberechnung in ein Parallelogramm und ein Dreieck unterteilt

ware durchgeführt wird, nach oben hin immer kleiner. Das Erdgeschoss ist übermäßig groß dargestellt (b).

Eine deutliche Verbesserung ohne Kenntnis der Kameraparameter lässt sich erreichen, indem die Bildpunkte bei der Entzerrung nicht linear interpoliert, sondern proportional zu der betroffenen Fläche umgerechnet werden. So entsprechen beispielsweise die unteren 3 Prozent (bzgl. der Höhe) des im Originalbild markierten Vierecks der Fläche der oberen 10 Prozent (bzgl. der Höhe). Daher wird das Original im Beispiel von unten nach oben immer langsamer durchlaufen und die Verzerrung minimiert (Abb. 4.25c). Das Viereck aus Abb. 4.25a ist beispielhaft in Abb. 4.26 dargestellt. Durch Unterteilung in ein Parallelogramm und ein Dreieck berechnet sich die Fläche zu $F_{ges} = F_{Dreieck} + F_{Par} = c \cdot (b - a)/2 + a \cdot c$. Es wird vereinfachend angenommen, dass Ober- und Unterkante parallel zueinander sind. Die kürzere Kante wird mit a , die längere mit b bezeichnet. Der umgekehrte Fall ergibt sich analog durch einfache Vertauschung.

Es sei nun ein gewünschter Flächenanteil $i \in [0..1]$ von a Richtung b gegeben. Gesucht ist der zugehörige Streckenanteil $j \in [0..1]$ von c , so dass das Viereck wunschgemäß unterteilt wird. Es gilt damit

$$iF = ajc + jc(b - a)j/2. \quad (4.43)$$

Dies lässt sich zu

$$j^2 + \frac{ac}{c(b - a)/2}j - \frac{i(ac + c(b - a)/2)}{c(b - a)/2} = 0 \quad (4.44)$$

umstellen, zu

$$j^2 + \frac{2a}{(b - a)}j - \frac{i(2a + (b - a))}{(b - a)} = 0 \quad (4.45)$$

vereinfachen und mit der pq-Formel lösen. Durch die Voraussetzung $j \in [0..1]$ bleibt nur eine der beiden Lösungen übrig.

Es fällt auf, dass c vollständig eliminiert werden kann. Dies erklärt sich durch

die Berechnung von Verhältnissen, bei denen der wirkliche Abstand von a und b unerheblich ist.

Sind a und b nicht genau parallel zueinander (z.B. Abb. 4.25), so werden aufgrund des robusten Verfahrens (c gekürzt) und der anteilmäßig kleinen Differenzfläche zum Fall mit parallelen Kanten weiterhin gute Resultate erzielt.

4.6.4 Hypothesen aufgrund von Grundrissen

Im Folgenden werden auf Grundrissmodellen aufbauende Hypothesen vorgestellt.

4.6.4.1 Grundrissinterpolation

Ziel ist es, detaillierte Daten aus Bildern innerhalb weniger detaillierter Grundrisse zu interpolieren. In Abb. 4.27 ist beispielhaft dargestellt, wie sich zwei 3D-Punkte s_1 und s_2 eines groben Grundrisses zu den zahlreichen Punkten in den aufgenommenen Photos verhalten können. Durch Analyse der in den Bildern digitalisierten Flächen können weitere Punkte zwischen s_1 und s_2 geschätzt werden.

4.6.4.1.1 Annahmen und Bedingungen Es gibt einen Grundriss, in dem die Punkte s_1 und s_2 direkt durch eine Kante miteinander verbunden sind. s_1 und s_2 sind jeweils in mindestens einem Bild enthalten. Gesucht wird eine horizontale Verbindung aus 2D-Punkten von s_1 bis s_2 , die bei Bedarf durch mehrere Bilder führen kann.

Weiterhin müssen beim Übergang zwischen Bildern mindestens zwei korrespondierende Punkte beider Bilder existieren, damit die Maßstäbe der Strecken passend umgerechnet werden können. Dies ist nötig, da aufgrund variabler Aufnahmedistanz die Verbindung stückweise in verschiedenen Maßstäben vorliegen kann.

Es wird erwartet, dass die Verbindung jeweils parallel zur Bildfläche verläuft. Unter der Annahme grob ebenerdiger Grundrisse wird der Steigungswinkel des betreffenden Streckenabschnitts zur Bewertung herangezogen.

4.6.4.1.2 Berechnung Für alle Segmente Seg vom Typ Grundriss werden alle dort enthaltenen Punkte \mathbf{a} betrachtet. Weiterhin werden alle \mathbf{a} nutzenden Flächen F betrachtet und dort festgestellt, ob der in F auf \mathbf{a} folgende Punkt \mathbf{b} auch in Seg enthalten ist. Für die so erhaltenen Grundrisstrecken (\mathbf{a}, \mathbf{b}) werden im Folgenden interpolierbare Zwischenpunkte gesucht. Die Gegenrichtung

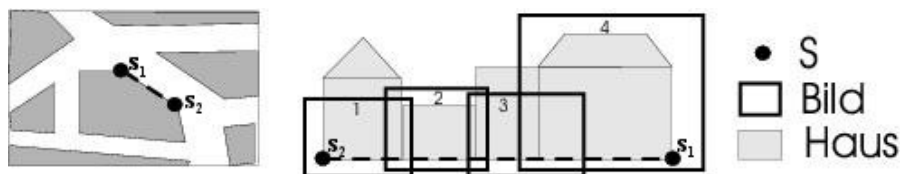


Abbildung 4.27: Ein Grundriss wird durch detailliertere Bilddaten interpoliert

(b, a) ist äquivalent und wird daher nicht betrachtet.

Es wird von **a** ausgegangen und dieser als aktueller Punkt \mathbf{p}_{curr} gesetzt. Die bereits besuchten Punkte werden in einer Liste gespeichert. Um später korrekt über die verschiedenen Bildmaßstäbe interpolieren zu können, wird ein Skalierungsfaktor $scale$ bezüglich des ersten verwendeten Bildes mitgeführt und mit Eins initialisiert. Zu jedem Punkt wird die bereits umgerechnete Strecke zum Folgepunkt vermerkt.

Da sich die gesuchte Kante in den Bildern von **a** aus nach rechts oder links bewegen kann, werden nacheinander beide Fälle untersucht.

START: Es werden alle Bilder pic betrachtet, in denen \mathbf{p}_{curr} sichtbar ist. In den dort sichtbaren und \mathbf{p}_{curr} enthaltenden Flächen F_1 werden bei ausreichender Parallellächengüte g_{parF} (hier: 0.5) die beiden an \mathbf{p}_{curr} angrenzenden Punkte nacheinander als \mathbf{p}_{test} auf ihre Eignung untersucht.

Ist \mathbf{p}_{test} auch im zuletzt untersuchten Bild pic_{old} sichtbar, so wird dieses statt des aktuellen pic genutzt. Somit wird vermieden, dass Ecken fälschlicherweise als geradlinig erachtet werden, weil für jede Einzelstrecke ein Bild existiert, in dem sie horizontal sichtbar ist. Ecken, die in einem Bild vollständig horizontal verlaufen, sollten nicht vorkommen bzw. können zu einer falschen Hypothese führen.

Es werden die 2D-Positionen $\mathbf{p}_{2d,curr}$, $\mathbf{p}_{2d,test}$ zu den Punkten \mathbf{p}_{curr} und \mathbf{p}_{test} im Bild ermittelt und verglichen. Je nach Fall wird nur eine Fortsetzung im Bild nach rechts bzw. links akzeptiert.

Weiterhin wird die Steigung und, falls $pic = pic_{old}$ gilt, die Steigungsänderung untersucht und für eine Güteberechnung g_{curr} genutzt, in der sich die Steigung optimalerweise nicht ändert und horizontal verläuft. Zur Verhinderung von Endlosschleifen darf weiterhin \mathbf{p}_{test} noch nicht im Weg enthalten sein.

Zusätzlich muss, falls $pic \neq pic_{old}$, mindestens ein weiterer gemeinsamer Punkt \mathbf{p}_{check} in beiden Bildern existieren, damit die Skalierung zwischen den Bildern berechnet werden kann.

Von allen \mathbf{p}_{test} wird dasjenige mit der besten g_{curr} ermittelt und an den Weg angehängt. Hat sich das Bild geändert, so wird $scale$ anhand der 2D-Koordinaten



Abbildung 4.28: Grundriss-Beispiel: Aus (a) dem Grundriss und (b) den Fassadenbildern entsteht (c) der interpolierte Grundriss mit Fassade.

aktualisiert:

$$scale_{new} = scale \cdot \frac{|\mathbf{p}_{curr,pic_{old}} - \mathbf{p}_{check,pic_{old}}|}{|\mathbf{p}_{curr,pic} - \mathbf{p}_{check,pic}|} \quad (4.46)$$

Die auf globalen Maßstab skalierte Wegstrecke vom \mathbf{p}_{curr} nach \mathbf{p}_{test} ergibt sich durch $scale_{new} \cdot |\mathbf{p}_{curr,pic} - \mathbf{p}_{test,pic}|$.

\mathbf{p}_{curr} muss nicht in pic_{old} enthalten sein und ist daher als \mathbf{p}_{check} -Ersatz ungeeignet.

Wird kein \mathbf{p}_{test} gefunden, so wird erfolglos abgebrochen. Wird dagegen \mathbf{b} erreicht, so ist eine Verbindung ermittelt. Andernfalls werden die Werte aufgerückt, also \mathbf{p}_{test} nach $\mathbf{p}_{curr,pic}$ nach pic_{old} , ... und bei START weitergesucht. Wurde ein Weg mit einer ausreichenden Durchschnittsgüte gefunden, so werden die Zwischenpunkte anhand \mathbf{a} , \mathbf{b} und der global skalierten Streckenlängen interpoliert und mit der Durchschnittsgüte versehen.

Das beschriebene Verfahren wurde implementiert (Kap. 6.3.2.5) und erfolgreich getestet.

4.6.4.1.3 Beispiel Ein rudimentärer Grundriss wurde in einem Ausschnitt eines Stadtplans digitalisiert (Abb. 4.28a). Es wurden Fassadenbilder aufgenommen und dort einfache Strukturen digitalisiert (Abb. 4.28b).

Bei der Berechnung wird der Grundriss wunschgemäß interpoliert. Abb. 4.28c zeigt die obere rechte Kante des Grundrisses mit den wie in Abb. 4.28a gefärbten lokalen 3D-Punkten. Die interpolierten Punkte sind grau dargestellt und



Abbildung 4.29: Ungenau rekonstruierter Balkon

dienen als Basis für die anhand anderer Verfahren aufgestellten Fassaden. Die richtige Positionierung und Skalierung der Fassaden belegt den ordnungsgemäßen Ablauf.

4.6.5 Hypothesen aufgrund von 3D-Modellen

Der folgende Abschnitt stellt auf 3D-Modellen beruhende Hypothesen vor.

4.6.5.1 Feinkorrektur

In Abb. 4.29 ist ein aus den ersten beiden Bildern photogrammetrisch ungenau rekonstruierter Balkon zu sehen. Das Ergebnis entspricht zwar ungefähr der Erwartung, aber besonders die an die Hauswand grenzende untere Balkonkante verläuft leicht schräg zu der Ebene der Hauswand, anstatt sich in diese einzufügen.

Zur Korrektur können Punkte p , die einen Mindestabstand d zu einer Fläche F unterschreiten, durch ihr Lot auf F eingepasst werden.

Damit Strecken als ganzes eingerechnet werden, auch wenn ein Endpunkt den Mindestabstand knapp über- und einer ihn unterschreitet, wird bei Einpassung eines Endpunktes der Mindestabstand für die topologisch angrenzenden Punkte auf beispielsweise $2d$ erhöht.

Damit nicht fälschlicherweise auf winzige Flächen eingerechnet wird, muss d in gewissen Grenzen (Hauswand, keine Bodenkachel) von der Wurzel des Flächeninhalts abhängen.

Die Ebene durchdringende Strecken sind besondere Kandidaten für knapp um die Ebene schwankende Linien und werden bereits bevorzugt, da sie durch Nutzung beider Seiten den doppelten Gesamtabstand haben dürfen.

Weiterhin wird bei Strecken ihr Winkel zu F berücksichtigt und fast parallele Strecken werden bevorzugt eingerechnet.

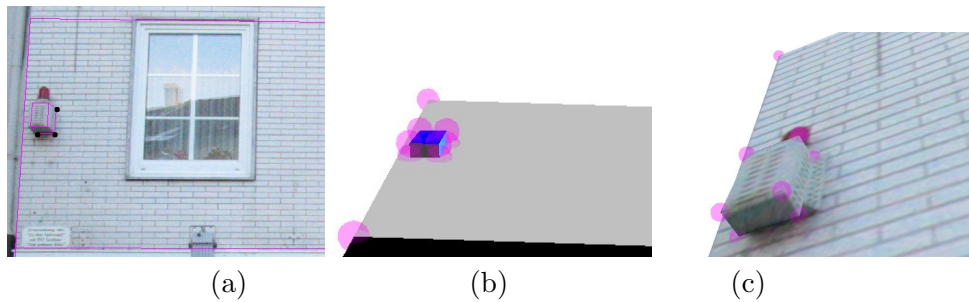


Abbildung 4.30: Punkte in Flächen: Das (a) Ausgangsbild, das (b) Ergebnis und (c) eine Detailsicht

4.6.5.2 Punkte in Flächen

In der Realität kommen häufig Objekte vor, die „auf einer Fläche sitzen“. Die Basisfläche ist oft eine Hauswand, kann aber auch eine Bodenkachel oder ein sonstiges Objekt sein. Exemplarisch wird die an der Wand sitzende Alarmanlage aus Bild 4.30 betrachtet. Eine große Fläche F_1 beschreibt den Abschnitt der Hauswand. Darauf ist die Alarmanlage als Quader skizziert, die zwar durch andere Verfahren in sich korrekt rekonstruiert, aber nicht auf die Wand eingepasst wird. Daher werden die drei im Ausgangsbild schwarz markierten und in der Ebene der Hauswand liegenden Punkte manuell als solche markiert. Dazu wird von F_1 zu den Punkten jeweils eine Relation „parallel zu“ beziehungsweise „Punkt liegt in Fläche“ definiert. Um beide Teile zu kombinieren, genügen drei linear unabhängige Punkte.

Ein zu einer Fläche paralleler Punkt bedeutet hier, dass der Lotfußpunkt auf der Fläche bekannt ist und so, ggf. mit vorgegebenem Abstand, den Punkt beschreibt.

Voraussetzungen und Berechnung Ist eine Fläche sowie ein in gleicher Ebene liegender Punkt in (mindestens) einem Bild sichtbar, so kann dieser nach folgendem Verfahren interpoliert werden:

Es werden alle in dem zu untersuchenden 3D-Segment Seg vollständig enthaltenen Flächen F mit zugeordneten in selber Ebene liegenden oder parallelen Punkten durchlaufen. Dazu werden jeweils die Bilder pic untersucht, welche F komplett beinhalten. Dort werden alle in gleicher Ebene wie F liegende und nicht in F enthaltenen in 3D unbekanntenen Punkte \mathbf{p}_{3d} berechnet, indem \mathbf{p}_{3d} anhand der 2D-Punkte interpoliert wird. Es werden drei Bildpunkte

$\mathbf{p}_{0,2d}$, $\mathbf{p}_{1,2d}$, $\mathbf{p}_{2,2d}$ der Fläche ermittelt, deren Vektordarstellung

$$\begin{aligned}\mathbf{e}_{2d} &= \mathbf{p}_{1,2d} - \mathbf{p}_{0,2d} \\ \mathbf{f}_{2d} &= \mathbf{p}_{2,2d} - \mathbf{p}_{0,2d}\end{aligned}$$

eine hohe 2D-Aufspanngüte ergibt. Damit wird sichergestellt, dass die Punkte nicht linear abhängig von einander sind und so die weitere Rechnung verhindern.

Es werden die Skalare u und v mittels LGS ermittelt, die im Bild durch

$$\mathbf{p}_{2d} = \mathbf{p}_{0,2d} + u\mathbf{e}_{2d} + v\mathbf{f}_{2d}$$

den in der Ebene der Fläche liegenden Punkt \mathbf{p}_{2d} ergeben. Da sich laut Definition auch die 3D-Darstellung in einer Ebene bewegt, kann der 2D-Fall hierauf durch

$$\mathbf{p}_{3d} = \mathbf{p}_{0,3d} + u(\mathbf{p}_{1,3d} - \mathbf{p}_{0,3d}) + v(\mathbf{p}_{2,3d} - \mathbf{p}_{0,3d})$$

übertragen werden.

Die Güte des berechneten Punktes wird entsprechend aus den Güte-Werten der drei verwendeten Punkte gewonnen.

Das Ergebnis ist in Abb. 4.30 (b) und (c) sichtbar. Das beschriebene Verfahren wurde implementiert und erfolgreich getestet (Kap. 6.3.2.5).

Erweiterte Nutzung Zusätzlich zu in Flächen liegenden Punkten werden durch die vorgestellte Methode auch Punkte und Flächen berechnet, die parallel zu einer Basisfläche sind und einen vorgegebenen Abstand haben. Die Relation „Objekt A ist parallel zu B mit Abstand d “ kann auch von anderen Modulen gesetzt werden und bietet so eine besondere Form der Modellierung. Beispielsweise wurde in der praktischen Implementierung ein interaktives Modul zur schnellen Erstellung von Dachstrukturen (Sattel-, Walm- oder Pyramidendach) implementiert, welches Dächer auf vorhandene Klötzchen (Flachdächer) anhand obiger Relation einfügt. Durch diese relative Modellierung hängt das Dach an dem Gebäude und folgt Änderungen des Gebäudes (z.B. Anpassung der Traufhöhe oder Verschiebung). Abb. 4.31 zeigt ein auf diese Weise mit Dächern versehenes Klötzchenmodell.

4.6.6 Bewertung

Es wurden Hypothesen aufgrund von Fassadenbildern, Grundrissen und 3D-Modellen betrachtet und untersucht. Dieser schon recht umfangreiche Pool an Operatoren lässt sich durch weitere Spekulationen sowohl zu diesen als auch zu weiteren Datenquellen erweitern.

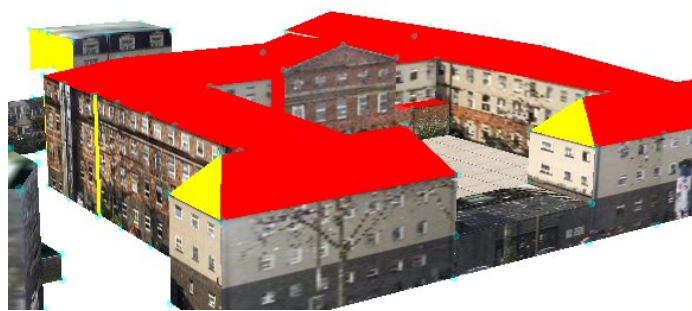


Abbildung 4.31: Dächer auf Flächen

Es wurde gezeigt, dass die vorgestellten Verfahren unter günstigen oder sogar häufigen Bedingungen wünschenswerte Resultate liefern und diese oft sinnvoll bewerten. Jedoch müssen aufgrund der spekulativen Ausgangslage auch zahlreiche Irrläufer erwartet werden. Dies stellt kein Problem dar, sondern ist Teil des EA-Konzepts. Erst durch die Kombination vieler Quellen und Verfahren entfaltet der vorgestellte Ansatz im Laufe der evolutionären Berechnung seine volle Stärke.

Wie die Evaluation in Kap. 5 zeigt, können trotz spärlicher Ausgangsdaten hiermit gute Ergebnisse erzielt werden.

Kapitel 5

Evaluation

In diesem Kapitel wird das vorgestellte Verfahren anhand praktischer Beispiele untersucht. Die einzelnen Operatoren wurden bereits isoliert in ihren jeweiligen Kapiteln betrachtet. Im Folgenden wird erst ihr Zusammenspiel anhand ausgewählter Fälle und dann ein Gesamttest mit umfangreichen Szenen untersucht.

5.1 Einführung

Die folgenden Testfälle entstammen echten praktischen Anwendungen, teils auch durch die in Kap. 5.4 genannten Anwender, und wurden erst nach dem Abschluss der Modellierung analysiert. So wurde sichergestellt, dass kein Testfall auf ein erstrebtes Analyseergebnis hin optimiert wurde.

Um nicht den Rahmen der Arbeit zu sprengen, wird nur eine repräsentative Auswahl von Datensätzen im begrenzten Umfang betrachtet. Die Vielzahl und besonders die Komplexität der Modelle sowie die heterogenen Wege zu dem jeweiligen Zielmodell zeigen die Leistungsfähigkeit des Systems.

Für eine Einschätzung der angegebenen Laufzeiten sei auf die genutzte Hard- und Software in Kap. 6.2 verwiesen.

In einigen Beispielen findet sich der *Stammbaum der Berechnung*. Dies ist eine graphische Darstellung der evolutionären Entwicklung, wobei die Ausgangssegmente in den Blättern und die letzte Generation unter der Wurzel zu finden sind. Um die Anschaulichkeit zu wahren, wird nur ein kleiner Teil der Operatoren im graphischen Stammbaum dargestellt. Besonders die vielen Operatoren der Mutation finden sich in den jeweiligen Knoten als *Mutations-Log*, das eine lineare Auflistung der auf diesem Segment ausgeführten Operatoren darstellt.

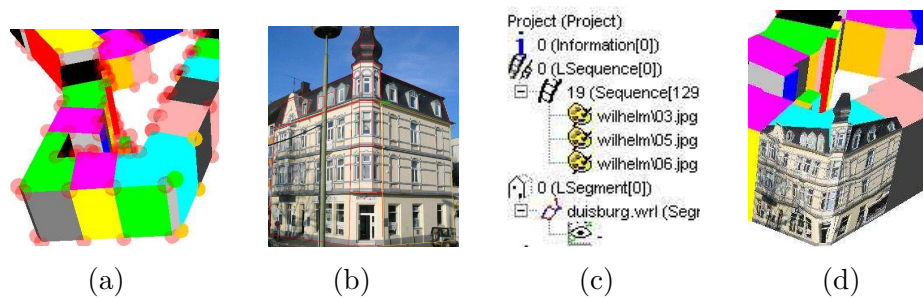


Abbildung 5.1: Zusammenfügen eines importierten VRML-Datensatzes mit Bildern: (a)-(c) die Ausgangsmodelle und (d) das Ergebnis

5.2 Test kombinierter Operatoren

Es werden spezielle Herausforderungen in kleinen Szenen untersucht. Dabei spielen heterogene Datenquellen, Operatoren und Bewertungen bei der EA eine Rolle.

5.2.1 Einfache Rekombination

In Abb. 5.1 ist das Zusammenfügen eines Klötzchenmodells mit Bildern beispielhaft dargestellt. Das als VRML vorliegende Klötzchenmodell (duisburg.vrml, Abb. 5.1a) wird als Segment und die Bilder (Abb. 5.1b) als Segmente einer Segmentliste (hier: Sequenz) in einem Projekt abgelegt (Abb. 5.1c).

Zur Verbindung wurden 4 Punkte der Unterkante sowie die entsprechenden 4 Punkte entlang der Dachrinne aus der Sequenz mit den in Abb. 5.1a unten rechts befindlichen Punkten verknüpft.

Das berechnete Ergebnis ist in Abb. 5.1d dargestellt. Entlang der Turmsäule sind auf Boden- sowie auf Dachrinnenhöhe Verengungen erkennbar: Das Haus wirkt an diesen Stellen wie zusammengezogen. Ursache sind die dort vorhandenen gemeinsamen Punkte der heterogenen Ausgangsdaten, die für eine korrekte Kombination zu eng beisammen liegen. Dies wiederum liegt daran, dass beide Teile dieses Tests in Wirklichkeit nicht zusammen gehören und passen.

Die Bilddaten wurden durch ein photogrammetrisches Verfahren zu einem 3D-Modell gewandelt.



Abbildung 5.2: Photogrammetrie und Entzerrung am Beispiel eines Balkons: (a),(b) Ausgangsdaten und (c),(d) Ergebnis

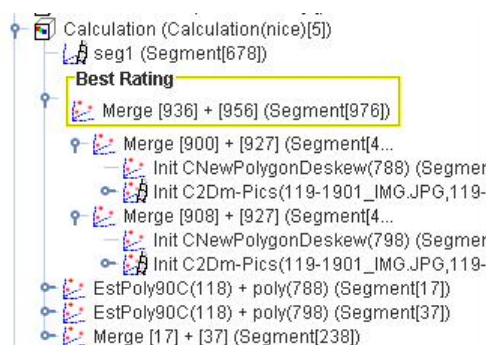


Abbildung 5.3: Der Stammbaum der Berechnung bei der Balkon-Kombination

5.2.2 Photogrammetrie und Entzerrung anhand eines Balkons

Beispielhaft wird eine Hauswand mit einem Balkon erfasst. Die beiden genutzten Aufnahmen mit den eingetragenen Flächen sind in Abb. 5.2 (a) und (b) zu sehen. In (c) und (d) ist eine 3D-Sicht des Resultats von zwei Perspektiven aus dargestellt. Abb. 5.3 zeigt den Stammbaum der Berechnung und damit die letztendlich erfolgreichste Evolutionslinie.

Der dargestellte Fall ist komplexer, als er auf den ersten Blick wirkt: Es gibt 10 Punkte, die in beiden Bildern sichtbar sind. Dies ist das Viereck der Hauswand sowie der Balkon ohne die oberen an die Hauswand angrenzenden Ecken, welche nur jeweils in einem Bild sichtbar sind.

Der mit „Init C2Dm-Pics“ bezeichnete Teil taucht zweifach auf und enthält das photogrammetrisch berechnete Ergebnis der in beiden Bildern vorkommenden Punkte. Hinzu kommen die nach Kap. 4.6.3.7 entzerrten und mit „Init CNewPolygonDeskew“ bezeichneten Vierecke. Hierbei handelt es sich um die beiden seitlichen Balkonflächen, die aufgrund von Verdeckung nur in jeweils einem Bild vollständig sichtbar sind.

Durch Rekombination (merge) der entzerrten Balkonflächen mit jeweils einer photogrammetrischen Lösung wird dort jeweils der fehlende Punkt der entspre-

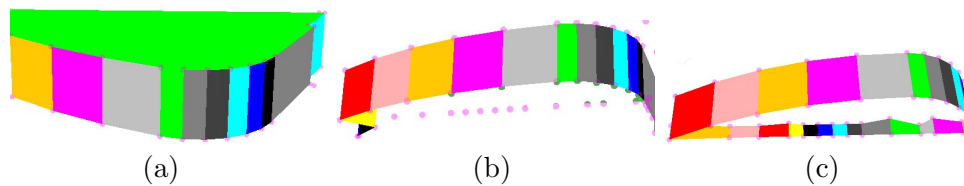


Abbildung 5.4: Rundwand (a) als Klötzchenmodell, (b) mit durch Bilddaten interpoliertem Grundriss und (c) mit Wänden auf dem Grundriss

chenden Seitenfläche ergänzt. Die Zusammenführung dieser beiden Segmente führt zu der gesuchten und vollständigen Lösung.

5.2.3 Modellierung einer breiten, gewölbten Fassade

Im Folgenden wird eine Fassade rekonstruiert, die angenähert im Klötzchenmodell existiert (Abb. 5.4a), jedoch untexturiert ist. Weiterhin liegen Fassadenbilder vor. Jedoch ist es aufgrund fehlender markanter Punkte nicht möglich, zwischen den Bilddaten und dem Klötzchenmodell Korrespondenzen zu finden. Lediglich Start- und Endpunkt der langen Fassade sind erkennbar. In den Fassadenbildern sind Flächen digitalisiert und über die gesamte Länge der Fassade miteinander verbunden. Durch die Grundrissinterpolation (Kap. 4.6.4.1) ergibt sich eine geradlinige Verbindung über die Länge der Fassade (Abb. 5.4b). Auf den neuen Grundrisspunkten werden Wände geschätzt (Abb. 5.4c). Nun kann das Klötzchenmodell auf halbtransparent geschaltet werden und es werden Korrespondenzen zwischen der neuen Grundrisslinie und der Krümmung der Fassade des Klötzchenmodells ermittelt (Abb. 5.5a) und erfasst.

Obwohl das Segment ein Berechnungsergebnis ist, wirkt sich die Erfassung von Korrespondenzen auf alle Segmente und somit auch auf die Ausgangsdaten aus, da es sich hier um Operationen auf globalen Objekten handelt.

Bei erneuter Berechnung werden die restlichen Grundrisspunkte zwischen den neuen Korrespondenzen interpoliert und es entsteht die gewünschte Krümmung mit Texturen aus den Fassadenbildern (Abb. 5.5b).

5.2.4 Digitalisierung eines Grundrisses auf ein Luftbild

Um einen Grundriss aus einem Luftbild zu gewinnen, wird dieses in ein neues Segment importiert und dort der Grundriss auf dem Luftbild manuell digitalisiert. Ein Grundriss-Flag kann den Operatoren anzeigen, dass es sich hier um ein rein zweidimensionales Modell handelt.



Abbildung 5.5: Rundwand (a) mit halbtransparentem Klötzchenmodell, Grundrisswand aus Abb. 5.4c und angedeuteten visuell gefundenen Korrespondenzen sowie (b) mit gesetzten Korrespondenzen

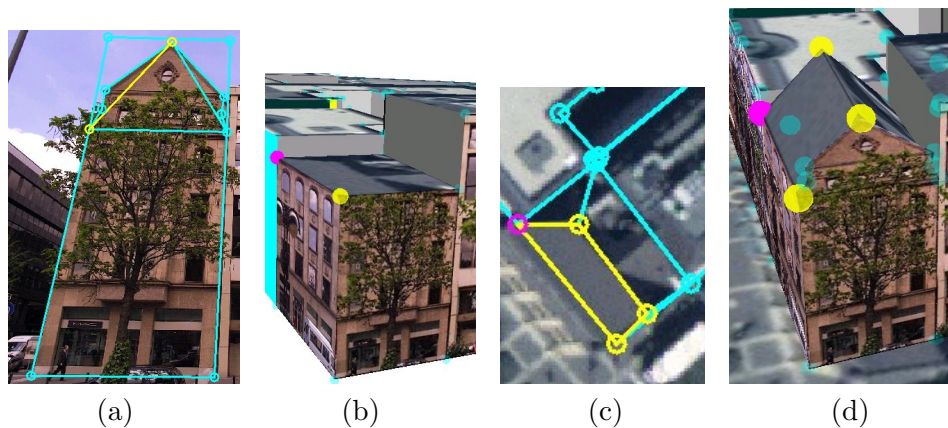


Abbildung 5.6: Rekonstruktion eines Satteldaches ohne Höhenangaben: (a) Ausgangsbild, (b) Ausgangssegment in 3D, (c) Ausgangsluftbild und (d) Ergebnis

Werden mehrere angrenzende Luftbilder kombiniert, so genügt zwischen zwei Bildern eine leichte Überschneidung mit zwei gemeinsamen Punkten zur korrekten Verknüpfung. Der erste Punkt dient als Angelpunkt, der zweite liefert den Maßstab und die Rotation.

Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten aufgrund von Verzerrungen sollten hierzu Orthophotos verwendet werden.

5.2.5 Rekonstruktion eines Satteldaches ohne Höhenangaben

Als Ausgangsdaten wurden eine Fassadenaufnahme, ein Klötzchenmodell ohne Dächer und ein Luftbild verwendet (Abb. 5.6 a-c). In der Fassadenaufnahme wurden markante Flächen digitalisiert und zur Verbesserung der Entzerrung eine Hilfsfläche ergänzt. Die entsprechenden Flächen im Luftbild entstanden durch Einpassung eines existierenden Grundrisses.

Bei der Eingabe dieses Falles wurde vorerst nur die Vervollständigung der Fassade im Zielmodell angestrebt. Erfreulicherweise wurde jedoch nicht nur die

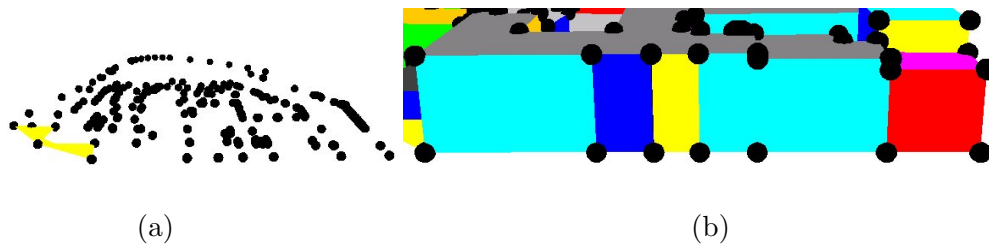


Abbildung 5.7: Ausgangsdaten bei der Rekonstruktion einer breiten Fassade: (a) Grundriss und (b) Basismodell

Fassade vollständig rekonstruiert, sondern zusätzlich noch das gesamte Dach des Gebäudes.

Eine Analyse der evolutionären Entwicklung anhand des Stammbaumes und der Mutations-Log-Meldungen ergab: Durch Hypothesen aufgrund von Fassadenbildern (Kap. 4.6.3) und angenommenen Punkten in einer Ebene mit einer Fläche (Kap. 4.5.3.4) wurde die Fassade erwartungsgemäß aus Abb. 5.6 a+b rekonstruiert.

Sei F_1 die zur Straße zeigende und in Abb. 5.6 markierte Dachfläche sowie F_2 die der Straße abgewandte Dachfläche. Die beiden aus dem Klötzchenmodell stammenden Punkte von F_1 wurden durch die vervollständigte Fassade um den vorderen Firstpunkt ergänzt.

Nun waren sowohl drei 3D-Punkte von F_1 bekannt und F_1 im Luftbild vollständig sichtbar, so dass neben einigen weiteren Modulen auch die Flächenvervollständigung (Kap. 4.5.3.3) ge-griffen hat.

Dieser Effekt ist äquivalent mit F_2 eingetreten und die bessere Variante für den hinteren Firstpunkt hat sich durchgesetzt (Abb. 5.6 d).

5.2.6 Rekonstruktion einer breiten Fassade ohne Hilfspunkte

In der Praxis lassen sich große Fassaden selten auf einem einzelnen Photo abbilden, da sich der Betrachter durch räumliche Beschränkungen (schmale Straßen, Hindernisse) nicht beliebig weit entfernen kann, ohne dass die Fassade durch Hindernisse verdeckt wird.

Im vorliegenden Fall liegt jedoch ein Grundriss mit teilweise sehr langen Strecken vor, die im daraus mit Gebäudehöhen generierten Klötzchenmodell sehr große Fassadenflächen verursachen. Daher kann eine Fläche des Klötzchenmodells nur durch mehrere Fassadenphotografien abgedeckt werden. Abb. 5.7 zeigt den Grundriss und das Klötzchenmodell im Ausgangszustand.

Die evolutionäre Berechnung liefert das in Abb. 5.8c dargestellte Ergebnis. Dort wurden die breiten Ausgangsflächen in die in den Fassadenbildern digita-

lisierten Abschnitte unterteilt.

Eine Analyse des Stammbaumes (Abb. 5.8a) liefert drei besonders relevante Stellen:

Erstens hat die auf unterster Ebene befindliche Kopie des Ausgangsgrundrisses in ihrem Mutations-Log 7 Einträge der Art

Grundriss-Weg gefunden: 625 nach 2882. Länge: 4, Güte: 0.95

Grundriss-Weg gefunden: 15680 nach 15684. Länge: 3, Güte: 0.95

Grundriss-Weg gefunden: 15680 nach 15727. Länge: 3, Güte: 0.95

Grundriss-Weg gefunden: 11701 nach 15082. Länge: 8, Güte: 0.95

Hier wurde der Grundriss anhand Kap. 4.6.4.1 durch die feineren Strukturen der Bilder ergänzt. Das Resultat in Abb. 5.8c hat erwartungsgemäß auf der untersuchten unteren Kante deutlich mehr Punkte als das Ausgangsmodell in Abb. 5.7a.

Zweitens werden durch die Rekombination (Kap. 4.5.2) des erweiterten Grundrisses mit dem Ausgangsklötzchenmodell zu dem in Abb. 5.7a markierten Segment die interpolierten Grundrisspunkte in das 3D-Modell übernommen.

Drittens zeigt das Mutations-Log des markierten Segmentes u.a. die weitere Nutzung dieser neuen Informationen durch die zwei häufig vorkommenden Eintragsarten

Merge: Ergänzung von Segment 'Init CNewPolygon(27319)' (7 Punkte)
anhand 5 gemeinsamer Punkte. Das Ergebnis hat 775 Punkte,
davon 2 neu ermittelt. Güte: 0.6411424974521921

Merge: Ergänzung von Segment 'Init CNewPolygon(17928)' (10 Punkte)
anhand 9 gemeinsamer Punkte. Das Ergebnis hat 773 Punkte,
davon 1 neu ermittelt. Güte: 0.6566788869828456

und

QuadPolygonCorrect: Punkt 11032 ergänzt (Polygon 11026)

QuadPolygonCorrect: Punkt 11061 ergänzt (Polygon 11048).

Ersterer beschreibt die multiple Rekombination (Kap. 4.5.2.7) mit Parallelflächen (Kap. 4.5.1.3), die so fehlende Punkte ergänzen. Im Fall von konvexen Vierecken wird der fehlende 3D-Punkt auch anhand Kap. 4.5.3.5 ermittelt.

5.3 Gesamttest

Die folgenden Fälle entstammen der praktischen Arbeit mit der bereits praxisreifen Umsetzung der entworfenen Verfahren *3dw*. Es werden größere Projekte vorgestellt und die Einsetzbarkeit der Verfahren untersucht.

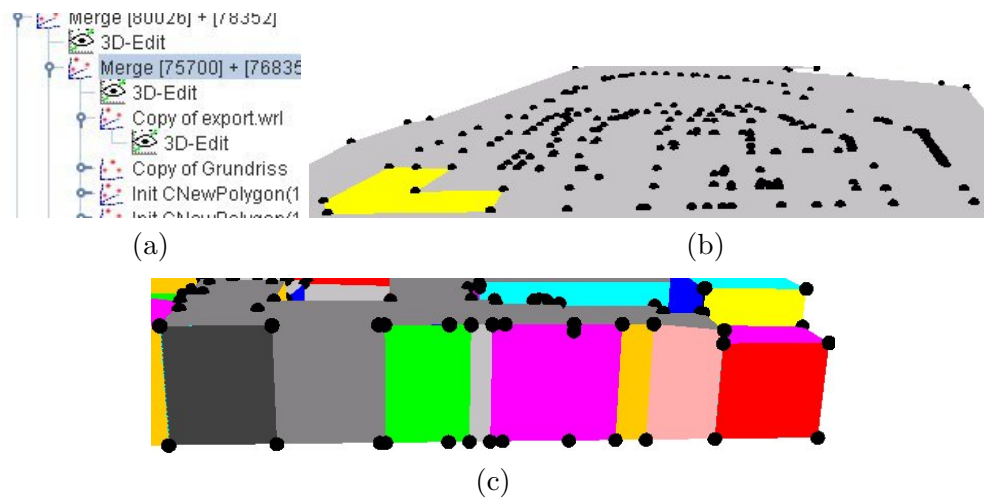


Abbildung 5.8: Ergebnisanalyse bei der Rekonstruktion einer breiten Fassade: (a) Stammbaum, (b) der ergänzte Grundriss und (c) das erweiterte Klötzchenmodell

5.3.1 Schadow-Arkaden

Im Zentrum von Düsseldorf befinden sich die Schadow-Arkaden, deren Häuserblock im Folgenden modelliert wird.

5.3.1.1 Ausgangsmodelle und ihre Erfassung

Ein Orthophoto (Abb.5.9a) sowie ein *ALK-Datensatz* mit Grundrissinformationen waren bereits vorhanden. Diese Datengrundlage existiert in den meisten Städten bereits. Weiterhin waren die Gebäude der ALK mit Geschosszahlen versehen.

Der Häuserblock wurde an einem Vormittag in einem 45-minütigen Rundgang mit einer Digitalkamera mit zusätzlichem Weitwinkelobjektiv durch 85 *Fassadenphotos* erfasst (Abb.5.9c).

Aus der ALK mit Geschosszahlen wurde mit einem GIS [CPA-GeoInformation 2006] vollautomatisch ein Basismodell (Abb.5.9b) abgeleitet. Das Basismodell besitzt keine Texturen, keine Dachformen und auch keine Bodenplatte.

5.3.1.2 Analyse

Neben den teilweise falschen Gebäudehöhen fällt besonders eine noch im vergangenen Jahrhundert abgeschlossene Baumaßnahme auf: Die in Abb. 5.9c

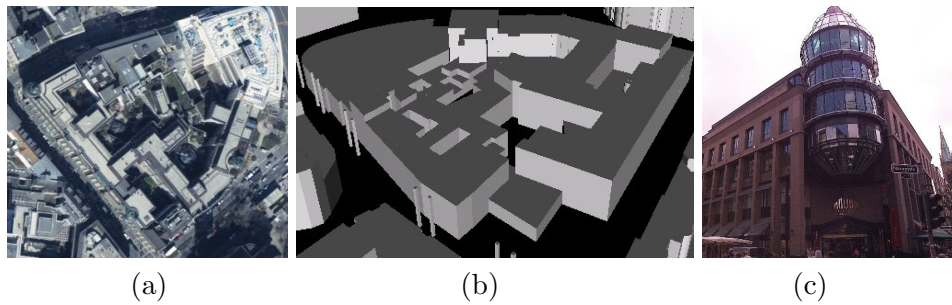


Abbildung 5.9: Ausgangsmodelle der Shadow-Arkaden: (a) Luftbild, (b) Basismodell und (c) eines der 85 Fassadenphotos

sichtbare Häuserecke mit Turm ist in der ALK noch nicht vorhanden und als fast freies Grundstück mit kleinem Pavillion unten in der Mitte in Abb.5.9b zu sehen. Die angrenzenden Gebäude stimmen jedoch und können als Referenzpunkte dienen.

Weiterhin sind oft, beispielsweise rechts in Abb.5.9c, viele Gebäude einer langen Fassade zu einem Gebäudeobjekt zusammengefasst. Daher zieht sich eine Wandfläche über viele Fassadenphotos.

Zusätzlich ist die lange Fassade oben links in Abb.5.9b nach außen gekrümmt und besitzt im Basismodell über längere Strecken keinen markanten Punkt, mit dem die Fassadenphotos referenziert werden könnten. Dieser Fall wurde bereits in Kap. 5.2.3 behandelt.

5.3.1.3 Eingabe und Veredelung der Ausgangsmodelle

Das Anlegen eines *3dw*-Projekts und Einlesen der Ausgangsdaten erfolgte innerhalb weniger Minuten. Der wesentliche Arbeitsaufwand ergab sich erwartungsgemäß durch die Digitalisierung markanter Flächen in den Fassadenphotografien. Hierbei wurden in je einem Bild vollständig sichtbare Flächen des Klötzchenmodells durch Einpassung der Stützpunkte in das Bild übertragen und weiterhin u.a. die in Kap. 5.2 betrachteten Fälle durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Luftbild importiert und der Grundriss hierauf referenziert.

Die gesamte Eingabe und Veredelung wurde an einem Vormittag durchgeführt.

5.3.1.4 Berechnung und Ergebnis

Die Berechnung wurde in ca. 9 Sekunden durchgeführt, wobei der erste Durchlauf zusätzlich noch wenige Minuten für die erstmalige Entzerrung der Bilder

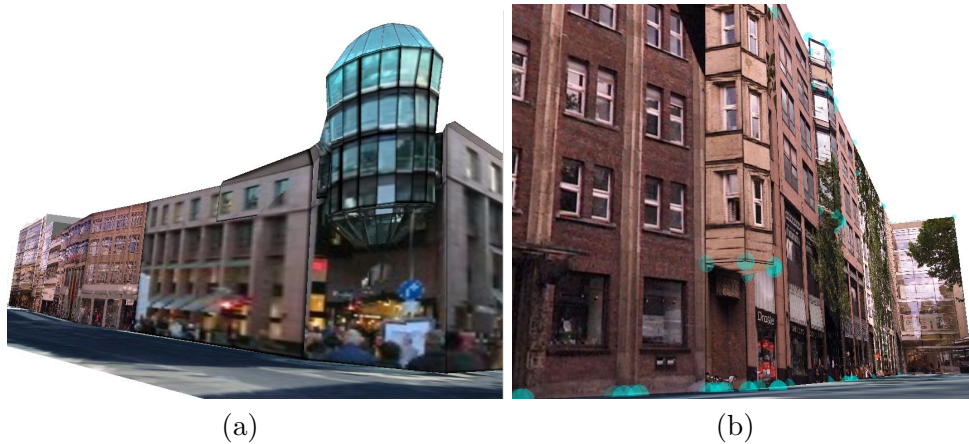


Abbildung 5.10: Zielmodell der Shadow-Arkaden: Detailansichten

benötigte. Dabei entstanden 1046 Individuen in 31 Generationen. Unter den 77 Individuen der letzten Generation befinden sich 75 einzelne Flächen mit einer maximaler Fitness von 0.0036, ein leicht erweiterter Grundriss mit einer Fitness von 0.3131 und das in Abb. 5.10 und Abb. 5.11 dargestellte Zielmodell mit einer Fitness von 0.9202.

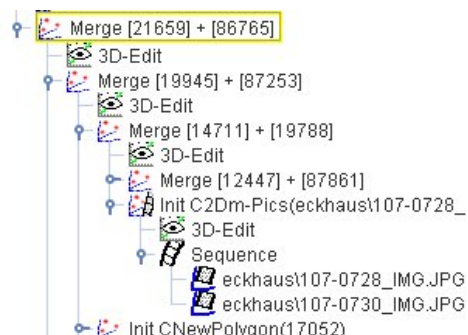
Im Zielmodell ist die inkonsistente Ecke aus Abb. 5.9b korrekt rekonstruiert (Abb. 5.10a), wobei der komplexe Turm in den Ausgangsdaten nur in 2 Bildern vorhanden und primär mit photogrammetrischen Verfahren rekonstruiert und durch andere Module verfeinert wurde. In 5.10b sind zwei weitere Türme sichtbar, die auch nur aus wenigen Bildern und mit u.a. maßgeblicher Beteiligung der Flächenvervollständigung entstanden sind.

Abb. 5.11 zeigt zwei Übersichten des Häuserblocks sowie beispielhaft einen kleinen Ausschnitt des Zielmodell-Stammbaumes, bei dem in der tiefsten dargestellten Ebene die photogrammetrische Rekonstruktion (C2Dm) des Eckhauses (Abb. 5.10a) aus zwei Bildern erfolgt und das Resultat mit weiteren Segmenten rekombiniert wird.

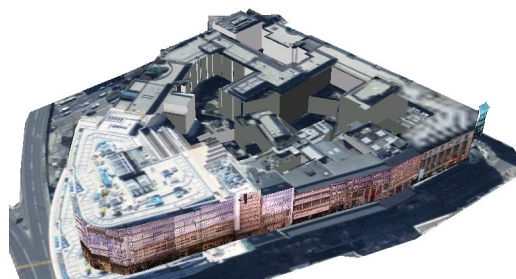
In *3dw* können die Stufen des dargestellten Stammbaumes einzelnen betrachtet und die schrittweise Evolution untersucht werden. So können von der Verbindung des komplexen Eckturmes mit dem Klötzchenmodell alle Verfeinerungen bis zum vollständig texturierten und geometrisch ausgeprägten Ergebnis abschnittsweise untersucht werden.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 5.11: Zielmodell der Shadow-Arkaden: Übersicht

5.3.2 Wilhelmstraße

In die Ausgangsbilder aus Abb. 4.3 (bzw. 5.12a) wurden homologe Punkte und Flächen digitalisiert. Es wurden keine weiteren Eingangsdaten vorgegeben.

Das Zielmodell in Abb. 5.12b ist mangels gegebener 3D-Punkte willkürlich skaliert, aber in sich korrekt rekonstruiert.

Die Analyse des Stammbaumes des Zielmodells (Abb. 5.12c) ist einfach: Von den 3 Ausgangsbildern wurden 2 ausgewählt und aus ihnen das Ergebnis mit einem photogrammetrischen Verfahren rekonstruiert. Die anderen drei Kombinationsmöglichkeiten (Bild 3+5, 5+6, 3+5+6) wurden wegen schlechterer Bewertung eliminiert (Kap. 4.5.5) und werden daher nicht angezeigt.

5.3.3 Düsseldorf Altstadt

Ausgehend von Fassadenbildern und groben Klötzchenmodellen ohne Dächer, Texturen und Details wurde die Düsseldorfer Altstadt modelliert.

Die teilweise durch Farben ersetzten (Dächer) oder geänderten (Innenhof) Tex-



Abbildung 5.12: Eine Hausecke in Siegburg (Wilhelmstr.): (a) Ausgangsbild, (b) Ergebnis und (c) Stammbaum

turen wurden derart vom Auftraggeber gewünscht. Grundrisse wurden aus den Klötzchenmodellen abgeleitet.

Die Ausgangsdaten wurden in mehrere Blöcke unterteilt, welche nach Bedarf in dem einen *3dw*-Projekt aktiv oder inaktiv geschaltet werden konnten. Exemplarisch wird Block 8+9 untersucht.

Abb. 3.4a zeigt das Klötzchenmodell und Abb. 5.13a das Luftbild. Der wesentliche Arbeitsaufwand bestand wie üblich in der Digitalisierung von Punkten und Flächen in den Fassadenbildern.

Zusätzlich zu den im Stammbaum (Abb. 5.13b) sichtbaren Operationen finden sich in den Mutations-Logs der jeweiligen Individuen bis zu 30 Einträge, die fast alle implementierten Module abdecken und von einer komplexen Entstehung zeugen. In 45 Generationen wurden 6361 Individuen erzeugt, von denen am Ende 521 übrig waren. Das Zielmodell in Abb. 5.14b hob sich mit einer Güte von 95,22% deutlich ab (sonst < 85%). Die Berechnung dauerte knapp 3 Minuten.

Abb. 5.14a zeigt ein auch in das Zielmodell eingegangenes Individuum im ersten Teil der Entwicklung und veranschaulicht so, wie über viele Operatoren das Zielmodell schrittweise erreicht wird.

5.3.4 Heiligendamm

In Heiligendamm wurden mehrere Straßenzüge modelliert. Dazu wurden wieder untexturierte Klötzchenmodelle, Grundrisse und Fassadenbilder genutzt.

In 24 Generationen wurden 859 Individuen erzeugt, von denen am Ende noch 24 aktiv waren. Das Zielmodell hob sich mit einer Fitness von 98% klar ab



Abbildung 5.13: Altstadt Düsseldorf: (a) Luftbild und (b) Stammbaum

(sonst < 60%).

Dank der recht detaillierten Ausgangsdaten traten hauptsächlich die Flächenvervollständigung (Kap. 4.5.3.3) sowie die Rekombination auf und die Berechnung wurde in knapp 4 Sekunden abgeschlossen.

Abb. 5.15 zeigt einen Ausschnitt des Zielmodells.

5.4 3dw als Produkt

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren wurden in das Softwareprodukt *3dw* umgesetzt. Das Konzept und die praktische Realisierung haben sich bewährt und wurden in das Vertriebsprogramm der Firma CPA Geo-Information aufgenommen. Aktuell (Juni 2006) beweist das Verfahren in Form von *3dw* bei den folgenden Institutionen seine Praxistauglichkeit:

- Kataster- und Vermessungsamt Landkreis Bad Doberan
- GeoInformation Bremen, Eigenbetrieb des Landes Bremen
- Vermessungs- und Katasteramt Düsseldorf
- Vermessungs- und Katasteramt Dortmund
- Firma CPA Geo-Information, Siegburg
- Katasteramt Kreis Recklinghausen
- Vermessungs- und Katasteramt Münster

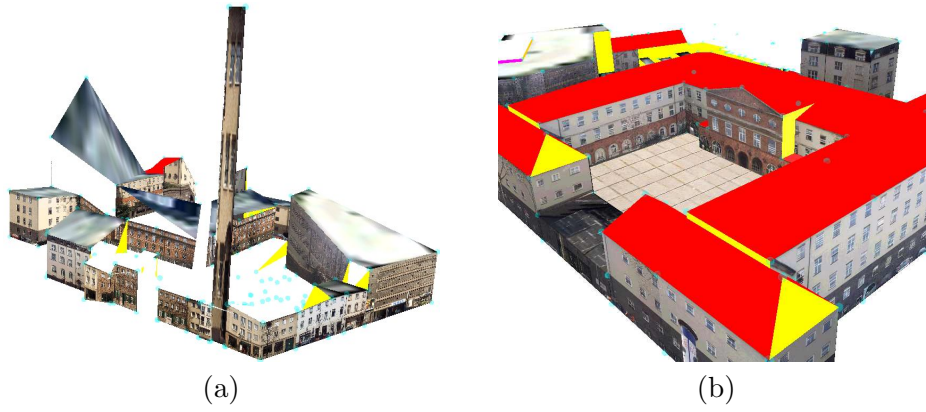


Abbildung 5.14: Altstadt Düsseldorf: (a) Zwischenergebnis und (b) Zielmodell



Abbildung 5.15: Heiligendamm: Ausschnitt des Zielmodells

Kapitel 6

Implementation

Die vorgestellten Verfahren wurden vom Autor in das Computerprogramm *3dw* umgesetzt. Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die praktische Realisierung. Dabei werden die verwendete Hard- und Software sowie Aspekte von *3dw* betrachtet.

6.1 Einführung

Aufgrund der Komplexität des Systems wird hier keine umfassende Beschreibung geliefert, sondern es werden lediglich interessante Teilaspekte angeschnitten. Zur näheren Beschäftigung mit *3dw* sei u.a. auf das zugehörige Benutzerhandbuch verwiesen.

6.2 Genutzte Werkzeuge

Es wird die zur Realisierung verwendete Hard- und Software knapp vorgestellt.

Genutzte Hardware

Das vorgestellte System stellt keine besonderen Anforderungen an die genutzte Hardware.

Zur Entwicklung und Evaluation wurde ein Standard-PC mit 2.0 GHz Taktfrequenz, 1 GB RAM, Intel Pentium 4 und eine NVIDIA GeForce3 Grafikkarte mit 128 MB Speicher sowie für einen zweiten Bildschirm eine SiS 5598/6326 mit 8 MB Speicher genutzt. Die Konfiguration als Dual-Monitor hat sich beim

Setzen von Referenzen sehr bewährt.

Für die Fassadenbilder wurden unterschiedliche Standard-Digitalkameras verwendet (u.a. Canon PowerShot A200), im Fall der Shadow-Arkaden (Kap. 5.3.1) eine hochqualitative Digitalkamera mit Fischauge-Objektiv.

Es hat sich herausgestellt, dass aufgrund der immensen Datenmengen ein ausreichender Arbeitsspeicher (ca. 500MB bis 1 GB) wichtiger ist als ein schneller Prozessor.

Genutzte Software

Als Software zur Entwicklung von *3dw* wurde Java 1.5 von SUN (JDK), Java3D 1.3 [SUN 2006] und die Eclipse-Entwicklungsumgebung der Eclipse Foundation (eclipse.org) verwendet.

Besonderer Wert wurde auf ein modulares und objektorientiertes Design gelegt. Die objektorientierte plattformunabhängige Sprache Java bot sich wegen ihres einheitlichen Aufbaus, einer umfangreichen Klassenbibliothek und Stabilität an. Dieses Konzept konnte durch Java3D um eine objektorientierte Schnittstelle für 3D-Graphik erweitert werden. Die zugrunde liegende Hardwareschnittstelle (OpenGL oder DirectX) wird durch einen Szenengraphen gekapselt, der wie bei einem von der Decke hängenden Mobile sowohl Transformationen als auch Objekte in einer baumartigen Struktur verwaltet. Java3D unterstützt objektorientierte Benutzerinteraktion in der 3D-Sicht.

Zum Entwurf werden die UML-Modellierungswerkzeuge Together von Borland und EclipseUML verwendet.

6.3 *3dw*

Die entwickelten Verfahren wurden vom Verfasser in das Softwareprodukt *3dw* umgesetzt. Aufgrund des Umfangs der Arbeit werden nur wenige Punkte dieser praktischen Umsetzung knapp angesprochen. Für weitere Informationen wird auf die API-Dokumentation von *3dw*, das zugehörige Benutzerhandbuch sowie auf den Verfasser verwiesen. Die Beispiele der Arbeit wurden mit *3dw* erstellt und analysiert.

6.3.1 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche besteht aus einer Baumansicht (links) und einem kontextsensitiven Teil (rechts). Die Baumansicht stellt eine visuelle Sicht der Daten

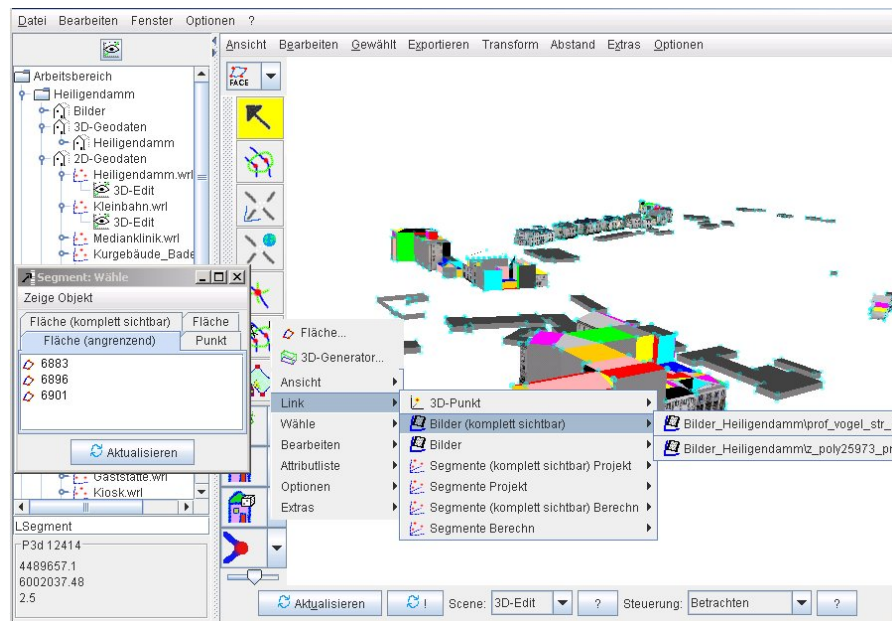


Abbildung 6.1: 3dw-Benutzeroberfläche

dar, wobei auch Einstellungen und spezielle Funktionen als Elemente modelliert sind. Je nach Wahl eines Elementes wird rechts eine kontextsensitive Sicht angezeigt.

Abb. 6.1 zeigt beispielhaft ein 3D-Segment des Projekts Heiligendamm im 3D-Editor. Neben der Visualisierung können die Daten auch bearbeitet werden. Ein Rechtsklick auf eine Fläche erzeugt das dargestellte Kontextmenü, welches eine Navigation durch referenzierte Objekte ermöglicht.

Im konkreten Fall ist die gewählte Fläche in einem Ausgangsbild und in einem von einem Operator generierten Bild vollständig sichtbar. Durch Wahl der jeweiligen Einträge werden neue kontextsensitive Fenster geöffnet und liefern eine Oberfläche zu den zugehörigen Daten. Die Wahl eines Punktes ruft ein ähnliches, auf Punkte zugeschnittenes Kontextmenü hervor.

6.3.2 Klassenstruktur der Modulsysteme

Im Folgenden werden nach einer Einleitung mehrere Modulsysteme von 3dw vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Bewertung.

6.3.2.1 Einleitung

Das Programm wurde mit den UML-Modellierungswerkzeugen Together von Borland und später EclipseUML entworfen und bearbeitet. Beide Werkzeuge beherrschen die bidirektionale Konvertierung zwischen UML-Klassendiagrammen und JAVA-Quelltext. Mit den Werkzeugen und auf Basis eines strukturierten Entwurfs konnte das Programmpaket stark objektorientiert und modular gestaltet werden. Alle Modulsysteme können durch Erfüllung der entsprechenden Interfaces beliebig erweitert werden.

Es existieren Modulsysteme für Importfilter, Exportfilter, Variationsoperatoren und GUI-Elemente für Objekte des Datenmodells.

UML (Unified Modeling Language) ist die gebräuchlichste Sprache zur Modellierung von objektorientierten Softwaresystemen. Sie wurde von der Object Management Group (OMG) entwickelt und von der ISO als Standard zertifiziert [Oestereich 2001]. UML spezifiziert Komponenten und Beziehungen und ermöglicht eine normierte graphische Darstellung komplexer Zusammenhänge. Die Nutzung von UML zur Modellierung des Programms ermöglichte die anschauliche Abbildung der theoretischen Überlegungen in eine objektorientierte Realisierung.

6.3.2.2 Importmodule

Es wurde ein eigenes Package für Importfilter geschaffen (Abb. 6.2). Dort sind alle Module von der abstrakten Klasse *SegImpBase* abgeleitet, die Basisfunktionen zur Verfügung stellt und ein einheitliches Interface definiert.

Jeder Aufruf eines Importmoduls führt entweder zu einer Fehlermeldung oder einem neuen Segment im aktuellen Projekt. Auch das Anlegen eines neuen leeren Segments (*SegImpEmpty*) oder das Kopieren eines vorhandenen Segments (*SegImpPaste*) werden hierüber abgebildet. Wegen ihrer Ähnlichkeit wird VRML und SG-VRML über ein gemeinsames Modul eingelesen. *SegImpFactory* implementiert das Factory-Pattern und sorgt für die flexible Anbindung vorhandener und neuer Importmodule.

Bisher wurden Module für VRML, SG-VRML, CityGML, Bitmap-Bilder, eine leere Vorlage und Copy-Paste aus *3dw* implementiert.

6.3.2.3 Exportmodule

Wie bei den Importmodulen wurde ein eigenes Package geschaffen und alle Exportmodule von der abstrakten Klasse *Export* abgeleitet sowie durch eine Factory-Klasse verwaltet.

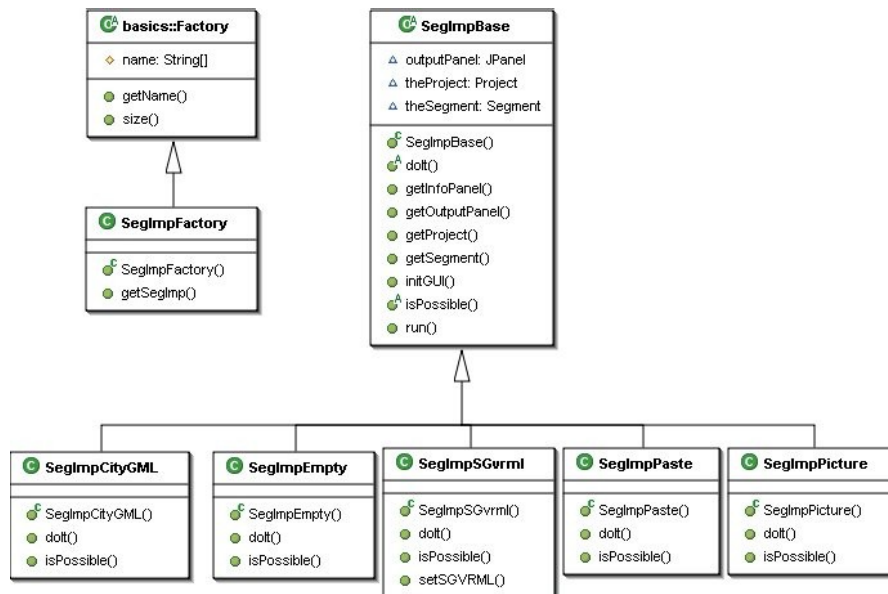


Abbildung 6.2: UML-Klassendiagramm vom Package `importSegment`, automatisch aus den Quellen generiert mit EclipseUML

Unabhängig vom Exportmodul kann über Filter definiert werden, ob das ganze Segment oder nur Teile anhand einer geometrischen oder alphanumerischen Auswahl exportiert werden. Über ein Exportmodul, das das Segment in ein neues Segment exportiert, kann so eine Auswahl getroffen werden. Bisher wurden Exportfilter für CityGML, VRML, SG-VRML, eine Punktdatensatz und ein *3dw*-Segment (Copy-Paste, Auswahl) implementiert.

6.3.2.4 Datenstruktur und GUI-Module

Ein Kernbereich der Datenstruktur von *3dw* ist in Abb. 6.3 dargestellt. Da es sich hier um die Implementierung des entworfenen Datenmodells aus Kap. 4.2 handelt, finden sich zahlreiche Ähnlichkeiten, insbesondere zu Abb. 4.1.

Alle Klassen der Datenstruktur sind von der abstrakten Klasse *StructureObject* abgeleitet, die eine flexible Handhabung unabhängig vom jeweiligen Typ ermöglicht und Basis der objektorientierten Benutzeroberfläche ist.

Daher findet sich im Package *GUI* zu jeder Klasse der Datenstruktur eine äquivalente Komponente zur Anzeige und Bearbeitung.

Wird in der Benutzeroberfläche links ein Element in der dynamischen Baumansicht gewählt (Abb. 6.1), so wird durch die GUI-Factory das zugehörige GUI-Modul erstellt, mit dem Datenobjekt initialisiert und angezeigt. So können

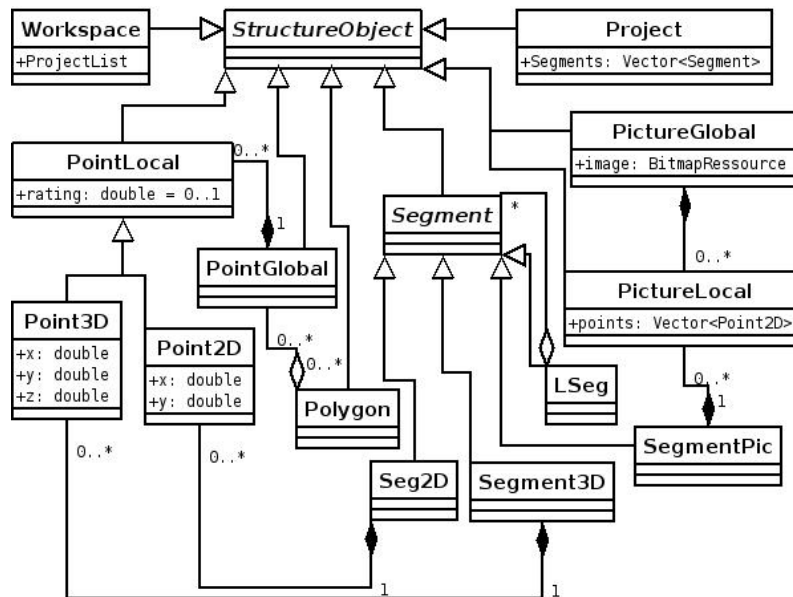


Abbildung 6.3: Kernbereich der Datenstruktur aus dem Package structure

weitere Datentypen mit zugehörigem GUI modular ergänzt werden. Es wurden Editoren für 2D, Bilder mit 2D, 3D und Tabellen mit semantischen Informationen entwickelt und als GUI-Module integriert.

6.3.2.5 Operatoren

Tabelle 6.1 listet anhand der Kapitel dieser Arbeit einige Operatoren und die entsprechenden Module in *3dw* auf. Die Variationsoperatoren können bei Bedarf einzeln aktiviert, deaktiviert und mit individuellen Bewertungsfaktoren g_{max} versehen werden. Die individuellen Bewertungsfaktoren haben sich wegen anderer Effekte (z.B. Kap. 4.4.8) als wenig relevant herausgestellt.

Abb. 6.4 zeigt das automatisch generierte und manuell vereinfachte Klassendiagramm mit dem Operatoren-Interface *CBase*, der Operatoren-Factory *CFactory* und einem zur Berechnung von Bildparametern (Kap. 4.5.3.6.3) genutzten spezialisierten nichtlinearen Gleichungssystem (*CPicParamNLSE*).

Es wurden bereits weitere in dieser Arbeit aus Gründen des Umfangs nicht besprochene Operatoren umgesetzt.

Kapitel	Modul in <i>3dw</i>
4.5.1.1	<i>CalcThread.Init</i>
4.5.1.2	<i>CPhoto</i>
4.5.1.3	<i>CNewPolygon</i>
4.5.2	<i>CMergeSegments</i>
4.5.3.6.3	<i>PictureAbstract.calcPictureParamFromP3d</i>
4.5.3.7	<i>PictureAbstract.setPoint3dFromRi</i>
4.5.5	<i>CEliminate</i>
4.6.3.2	<i>CEstimateInOnePicture.estimateCorners90Par</i>
4.6.3.4	<i>CEstimateInOnePicture.estimateCorners90</i>
4.6.3.5	<i>CGroundPlan.startWallsFromPicInGroundPlanSegment</i>
4.6.3.7	<i>CNewPolygon.doPolyDeskew</i>
4.6.4.1	<i>CGroundPlan</i>
4.6.5.2	<i>CEstimateInOnePicture.estimateSamePlanePoint</i>

Tabelle 6.1: Einige Module der Variationsoperatoren in *3dw*

6.3.2.6 Aktionen

Die vom Anwender ausführbaren Aktionen sind auch objektorientiert aufgebaut und in einem eigenen Package *commands* gesammelt (Abb. 6.5). Durch Implementierung der abstrakten Klasse *Command* wird die jeweilige Aktion und ihre Undo-Funktion realisiert.

Eine Benutzeraktion verursacht die Konstruktion und passende Initialisierung eines zugehörigen *Command*-Objekts, welches dann dem Framework überreicht wird. Das Framework führt das Kommando und nötige Aktualisierungen aus und legt es auf einen Undo-Stack, von dem es bei Bedarf aus abgerufen werden kann. Die kontextsensitiven Informationen für eine Umkehr des Kommandos speichert es selber.

Der *CommandContainer* fasst als besonderes Kommando beliebig viele Kommandos zusammen, ermöglicht so eine Hierarchie und zusammengesetzte Kommandos.

6.3.3 Datenkonsistenz und Laufzeitverhalten

Die Konsistenz der Daten spielte bei der praktischen Umsetzung eine wichtige Rolle bezüglich des Laufzeitverhaltens. Um den EA eine Vielzahl von Individuen und Generationen zu ermöglichen und trotzdem in absehbarer Zeit zu einem Ergebnis zu kommen, mussten die einzelnen Operatoren sehr kurze Laufzeiten haben. Dies wurde durch eine Menge von Hilfsstrukturen in Form von Listen und HashMaps erreicht (Kap. 4.2.3.3), die eine sehr effiziente Umsetzung

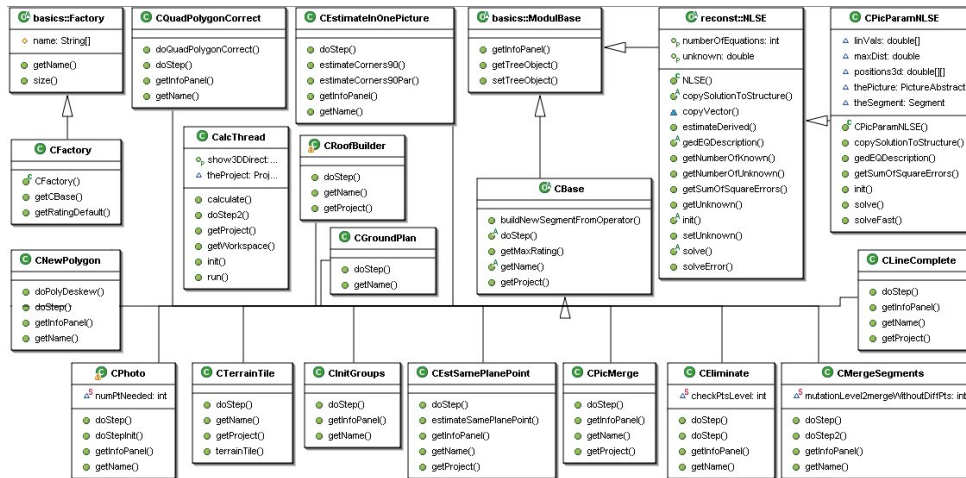


Abbildung 6.4: Package calc mit diversen Operatoren

der Operatoren ermöglichten. Hierdurch konnten aufwändige Suchoperationen durch direkte Verbindungen ersetzt werden.

Die laufende Fortführung und Konsistenzhaltung dieser Hilfsstrukturen während der Berechnung stellte sich zwar als möglich, jedoch bezüglich der Laufzeit kritisch heraus.

Als Lösung wurde die Datenstruktur in den zu großen Teilen in Abb. 6.3 sichtbaren Kernbereich und die Hilfsstrukturen unterteilt. Der Kernbereich wird laufend aktuell und konsistent gehalten und gilt als zuverlässig. Die Hilfsstrukturen jedoch können im Laufe der Zeit veralten und werden durch ein spezielles Kommando auf Basis des Kernbereichs aktualisiert. Die Hilfsstrukturen gelten daher nur als zuverlässig, wenn seit ihrer letzten Aktualisierung keine Änderungen in den relevanten Bereichen durchgeführt wurden. Dieses zweistufige Datenmodell konnte die Laufzeitprobleme lösen.

6.4 Bewertung

Die theoretischen Überlegungen konnten erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden. Ausgehend von UML-Klassendiagrammen wurde ein objektorientiertes und stark modulares Design verfolgt und realisiert. Durch die Nutzung von Standardhardware, frei verfügbaren Entwicklungswerkzeugen (z.B. Java, Eclipse, Java3D, EclipseUML) und offenen Schnittstellen (z.B. OpenGL, CityGML) wurde ein sehr flexibles und gut erweiterbares System geschaffen. Die

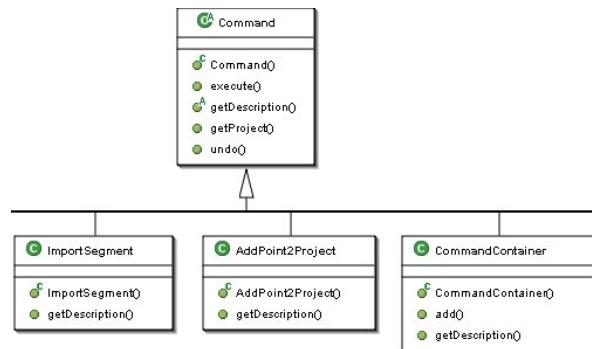


Abbildung 6.5: Package commands, ein kleiner Ausschnitt

entwickelte Software ermöglichte eine umfangreiche Evaluation des gesamten Verfahrens (Kap. 5).

Kapitel 7

Fazit

Die vorliegende Arbeit entwirft ein neuartiges Verfahren zur Generierung von 3D-Stadtmodellen.

Ausgangspunkt ist die Heterogenität existierender und neu zu erfassender Daten. Besonders im Umfeld der 3D-Stadtmodellierung existiert mit Grundrissen, Luftbildern, einfachen Klötzchenmodellen, Fassadenbildern, semantischen Informationen und fertigen 3D-Modellen einzelner Gebäude oft ein Pool bereits vorhandener Datensätze, der für eine effiziente Modellierung genutzt werden sollte. Die Zusammenführung dieser Daten zu einem umfassenden Zielmodell stellt sich als spezielles komplexes Optimierungsproblem dar, auf welches die Methodik der Evolutionären Algorithmen (EA) übertragen, angepasst und erweitert wird.

Die **Abbildung heterogener Modelle in einem Datenpool** hebt dieses Verfahren von gängigen Verfahren zur Erzeugung von 3D-Stadtmodellen ab, die meist auf die jeweilige Methodik abgestimmte spezielle Ausgangsdaten erwarten. Um jedoch die Vielfalt bereits existierender Modelle verschiedenster Auflösung, Qualität, Vollständigkeit, Herkunft und Formate nutzen und miteinander in Beziehung setzen zu können, müssen diese Quellen in einem gemeinsamen Datenpool abgebildet werden. Es müssen effiziente Strukturen zur Verwaltung und Bearbeitung der Modelle und ihrer Beziehungen geschaffen werden.

Hierzu wurde das Segment als spezialisiertes Individuum der EA definiert, welches je Instanz einen Ausgangsdatensatz abbilden kann. Durch die Trennung in lokale Informationen der Segmente und globale Daten des Projekts können über die globalen Bindeglieder Informationen multipler Typen in Beziehung zueinander gesetzt werden. Importmodule dienen als Schnittstellen zu den jeweiligen Datenformaten.

Im Entwurf des Datenmodells (Kap. 4.2), des Verfahrens und bei den Operatoren konnten heterogene Ausgangsmodelle eingebunden werden. Die Menge der unterstützten Formate ist hierbei nicht beschränkt und modular erweiterbar. Durch die von einander unabhängigen Segmente können sogar einander widersprüchliche Ausgangsmodelle aufgenommen und sinnvoll verarbeitet werden. Die Anforderungen an das Datenmodell hinsichtlich gleichzeitiger Einbindung heterogener Ausgangsmodelle, effizienter Zugriffsstrukturen sowie Unterstützung der EA und der 3D-Stadtmodellierung (Kap. 4.2.2) wurden erfüllt. Die Evaluation in Kap. 5 weist die Anwendbarkeit und den Nutzen heterogener Ausgangsmodelle nach, der sich in einem deutlich reduzierten Arbeitsaufwand bei der Erfassung und Bearbeitung der Daten zeigt.

Die **Übertragung und Erweiterung des EA-Konzepts** auf ein Verfahren zur Generierung von 3D-Stadtmodellen (Kap. 4.4) stellt einen neuartigen Ansatz dar und folgt der Einordnung der Problemstellung als komplexes Optimierungsproblem. Hierzu wurden die EA um zusätzliche Mechanismen ergänzt und ein Pool an spezialisierten Operatoren geschaffen. Wichtige Erweiterungen sind u.a. die Fehlerkorrektur durch Rekombination und der Mutationslevel, der analog zu zwischenmenschlichen Entscheidungsfindungsprozessen stabile und sichere Operatoren vorzieht, jedoch auch spekulative Varianten verfolgt.

Wesentlich für die praktische Einsetzbarkeit sind weitere Merkmale zur Verbesserung der Systemperformance, da sonst das angestrebte Zielmodell nur mit erheblichem Speicher- und Zeitbedarf erreicht werden kann. Hierzu wurden verschiedene Erweiterungen wie die Frühelimination, Hilfsstrukturen zur Vermeidung doppelter Operationen und eine populationsgrößenabhängige Elimination entworfen und erfolgreich überprüft. Weiterhin wurden die allgemeinen Variationsoperatoren der EA durch eine Vielzahl spezialisierter Operatoren ersetzt. Erst die Kombination der entworfenen Methoden ermöglicht die praktische Umsetzung. Die vollständige Berechnung auch der großen Szenen aus Kap. 5.3 in wenigen Sekunden auf üblichen Standard-PCs beweist den Erfolg dieser Strategie, ohne die hier mit heutigen Rechnerressourcen keine Lösung in absehbarer Zeit zu erwarten wäre.

Spezialisierte Operatoren dienen der Fortführung der Population im Rahmen des erweiterten EA-Konzepts zu einem umfassenden Zielmodell. Hierbei werden die EA-Variationsoperatoren Rekombination, Mutation, Elimination und Diversifikation jeweils durch eine Menge von spezialisierten Operatoren ersetzt, die als deren Spezialfälle betrachtet werden können.

Während der evolutionären Berechnung werden nun statt der allgemeinen Operatoren ausschließlich ihre bezüglich der Aufgabenstellung spezifischen Spezialisierungen genutzt. Dieser Pool an Operatoren lässt sich durch weitere Module beliebig ergänzen und ermöglicht so eine Steigerung der Leistungsfähigkeit des Systems durch die Integration weiterer Verfahren.

Da Operatoren im Rahmen des Entwurfs und der EA auch schlechte und falsche Ergebnisse liefern dürfen, lassen sich so durch Hypothesen Regelmäßigkeiten in 3D-Stadtmodellen und bei Gebäuden modellieren. So wurden viele Regelmäßigkeiten von 3D-Stadtmodellen in Operatoren abgebildet. Beispielhaft sei die entworfene Grundrissinterpolation aus Kap. 4.6.4.1 genannt, bei der Grundrisse durch eine Kantenanalyse in Fassadenbildern mit zusätzlichen Punkten versehen werden.

Der entworfene Pool an Operatoren (Kap. 4.5, 4.6) deckt bereits viele Fälle der 3D-Stadtmodellierung ab. Dies zeigt sich besonders deutlich an den Anwendern (Kap. 5.4), die ohne Einarbeitung in die implementierten Operatoren aus ihren Ausgangsmodellen wunschgemäße Ergebnisse erhalten haben.

Ein auf speziellen Ausgangsdaten vorteilhaftes Verfahren kann als weiterer Operator integriert werden. Die Ansammlung vieler Operatoren unter dem Dach der erweiterten EA gestattet äußerst flexibel die Vereinigung der Vorteile aller enthaltenen Verfahren.

Die explizite Erlaubnis von Hypothesen ermöglicht bereits bei der Datenerfassung eine Reduzierung des Arbeitsaufwands sowie die Aufnahme von Operatoren, die nur unter gewissen Bedingungen optimale Ergebnisse liefern.

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Operatoren wurde an speziell für sie erstellten Beispielen nachgewiesen. Dass manche Operatoren in anderen Fällen versagen ist Teil des Konzepts und nicht störend, da ihre Ergebnisse im Laufe der Evolution von anderen Operatoren eliminiert oder korrigiert werden.

Zur **Evaluation** wurde das vorgestellte Gesamtkonzept vom Verfasser in das Softwareprodukt *3dw* umgesetzt. Anhand dieses mittlerweile praxisreifen Produkts (Kap. 5.4) wurde in Kap. 5 durch zahlreiche Fallbeispiele sowohl die Anwendbarkeit als auch die erhoffte Arbeitersparnis nachgewiesen.

Die **Performance** konnte durch Maßnahmen im EA-Modell (Kap. 4.4) sowie im Datenmodell in einen sinnvollen Bereich gebracht werden. Sie wurde durch Aufteilung der Datenhaltung in einen laufend konsistenten Kernbereich und bei Bedarf aktualisierte Hilfsstrukturen weiter verbessert.

Auch wenn konzeptionell bedingt keine sichere Aussage über das Laufzeitverhalten gemacht werden kann, so terminieren doch alle bisher bekannten Szenarien und Testfälle auf aktueller Hardware (Kap. 6.2) in wenigen Sekunden bis Minuten.

Als **Ausblick** sei die Vergrößerung des Pools von Operatoren genannt. Hierbei können bisher wenig beachtete Datentypen wie Geländemodelle oder georeferenzierte Bilder weiter untersucht sowie leistungsfähige Speziallösungen (z.B. Dächer aus Luftbildern) als Operatoren eingebracht werden. Bei der Konvertierung von selbständigen Verfahren in neue Operatoren können diese, soweit sinnvoll, um die Möglichkeit multipler Ergebnissegmente erweitert werden, die

dann als gleichberechtigte Individuen in die EA einfließen.

Die vorliegende Arbeit ist zwar auf die 3D-Stadtmodellierung spezialisiert und liefert dort einen wichtigen Beitrag für ein Zusammenwirken heterogener Ausgangsmodelle einerseits und heterogener Verfahren andererseits, lässt sich jedoch durch Anpassung einiger Operatoren auf andere Optimierungsprobleme übertragen, die auf graphischen Daten arbeiten. Daher leistet die Arbeit auch einen wichtigen Beitrag zur Lösung komplexer Probleme der Zusammenführung und Verarbeitung heterogener graphischer Daten im allgemeinen und ist somit über den Bereich der 3D-Stadtmodellierung hinaus relevant. Für den Bereich der Evolutionären Algorithmen schafft die Arbeit durch Einführung bezüglich der Aufgabenstellung spezifischer spezialisierter Operatoren ein neues Bindeglied zwischen traditioneller EA (Operatoren wissen nichts von der Aufgabe) und traditionellen Algorithmen (nur je ein Operator) und trägt hierdurch allgemein zur Lösung von als Optimierungsproblem darstellbaren komplexen Aufgabenstellungen bei.

Ziel der Arbeit war die Schaffung eines neuartigen Verfahrens zur flexiblen und effizienten 3D-Stadtmodellierung.

Durch die Abbildung heterogener Modelle in einem Datenpool, die Übertragung und Erweiterung des EA-Konzepts auf die 3D-Stadtmodellierung und die Schaffung eines Pools von spezialisierten Operatoren wurde ein Gesamtverfahren entwickelt, welches dieses Ziel vollständig erfüllt. Neben der theoretischen Argumentation belegen die untersuchten praktischen Beispiele und der praktische Erfolg des Produkts die Leistungsfähigkeit des entworfenen Systems.

Anhang A

Grundlagen

Dieses Kapitel stellt in der vorliegenden Arbeit genutzte Grundlagen und Verfahren vor. Basis und Möglichkeit zur Vertiefung hierzu sind [Beutelspacher 1998; Dörfler u. Peschek 1988; Merziger u. Wirth 1991; Niemeier 2002]. Es dient der Arbeit auch für Referenzen auf konkrete Formeln.

A.1 Definitionen

Dieser Absatz beschreibt in der Arbeit verwendete Begriffe und Variablen.

LoD

Der „Level of Detail“ (LoD) bezeichnet die Detailliertheit eines Modells. Bei 3D-Stadtmodellen haben sich folgende Stufen zwar noch nicht endgültig durchgesetzt, aber zumindest etabliert und bewährt [Franke 2002; Kolbe u. Gröger 2003; Schilcher u. a. 1999][AG 3D-Stadtmodelle 2004, Kap.11.8]:

LoD1 Klötzchenmodell, z.B. aus hochgezogenem Grundriss

LoD2 Dachformen, farbige Flächen oder grobe Fassadentexturen

LoD3 hochauflösende Phototexturen, hochauflösendes 3D-Modell mit Balkonen, Erkern, Türmchen, ...

LoD4 Etagen und Innenräume

Variablen

Die in der vorliegenden Arbeit genutzten Variablen halten sich zur besseren Übersicht an folgende, auf der gängigen Literatur [Appel 2005; Koch 1987; Merziger u. Wirth 1991; Niemeier 2002] aufbauende, Vereinbarungen:

- Skalare werden immer durch Kleinbuchstaben dargestellt (i, j)
- Vektoren werden immer durch fette Kleinbuchstaben dargestellt (\mathbf{a})
- Punkte werden nicht von dem zugehörigen Vektor unterschieden und daher wie Vektoren dargestellt (\mathbf{p}_1)
- Strecken und Flächen werden durch einfache Großbuchstaben dargestellt (L_1, F_1)
- Matrizen werden immer durch fette Großbuchstaben dargestellt (\mathbf{M})
- Einheitsvektoren werden mit einem Dach gekennzeichnet: $\hat{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|}$
- homogene Vektoren und Matrizen werden mit einem Punkt markiert:
 $\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix}, \dot{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$

In Tabelle A.1 sind oft verwendete Variablen aufgelistet.

A.2 Mathematische Grundlagen

In der Arbeit genutzte mathematische Grundlagen werden zur Übersicht und für Referenzen dargestellt.

A.2.1 Vektorrechnung

Die Vektorrechnung ist in der Literatur (z.B. [Bartsch 1984; Bronstein u. a. 1999; Dörfler u. Peschek 1988]) hinreichend beschrieben und es werden im Folgenden lediglich die verwendeten Basisformeln zusammenfassend dargestellt.

Variable	Beschreibung	Menge
$\mathbf{b}_{a,i}$	Stützpunkt der Bildfläche im Raum	\mathbb{R}^3
$\mathbf{b}_{b,i}$	x-Aufspannvektor der Bildfläche	\mathbb{R}^3
$\mathbf{b}_{c,i}$	y-Aufspannvektor der Bildfläche	\mathbb{R}^3
$\mathbf{b}_{m,i}$	Bildmittelpunkt $\mathbf{b}_{m,i} = \mathbf{b}_{a,i} + \frac{1}{2}(\mathbf{b}_{b,i} + \mathbf{b}_{c,i})$	\mathbb{R}^3
$\mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g}$	Aufspannvektoren, oft zusammen ein Raumsystem	\mathbb{R}^3
g_{op}	Güte eines Operators	$[0, 1]$
$g_{e,f}$	2D-Aufspanngüte, ob \mathbf{e}, \mathbf{f} rechtwinklig, Kap. 4.3.1.2	$[0, 1]$
$g_{e,f,g}$	3D-Aufspanngüte, siehe Kap. 4.3.1.3	$[0, 1]$
i	Index für das verwendete Bild, $[1, m]$	\mathbb{N}_0
i	Index für die verwendete Formel, $[1, m]$	\mathbb{N}_0
j	Index für verschiedene Zwecke	\mathbb{N}_0
m	u.a. Anzahl der Bilder	\mathbb{N}_0
n	u.a. Anzahl der Punkte	\mathbb{N}_0
p	Index für einen Punkt, $p \in [1, n]$	\mathbb{N}_0
\mathbf{p}_i	Augenpunkt in Bild i	\mathbb{R}^3
$\mathbf{q}_{i,p}$	3D-Position des zu \mathbf{s}_p gehörenden 2D-Punktes	\mathbb{R}^3
$r_{i,p}$	$\mathbf{s}_p = \mathbf{p}_i + r_{i,p}(\mathbf{q}_{i,p} - \mathbf{p}_i)$, Formel A.24	\mathbb{R}
$r'_{i,p}$	$\mathbf{q}_{i,p} = \mathbf{p}_i + r'_{i,p}(\mathbf{s}_p - \mathbf{p}_i)$, $r'_{i,p} \in [0, 1]$, F. A.26	$[0, 1]$
\mathbf{s}_p	3D-Punkt im Raum	\mathbb{R}^3

Tabelle A.1: Verwendete Variablen

A.2.1.1 Skalarprodukt

Das Skalarprodukt beschreibt die Verknüpfung zweier gleichdimensionaler Vektoren zu einem Skalar, wird je nach Literaturquelle als

$$s = \langle \mathbf{e}, \mathbf{f} \rangle \quad (\text{A.1})$$

oder als

$$s = \mathbf{e} \cdot \mathbf{f} = \mathbf{e}\mathbf{f} \quad (\text{A.2})$$

geschrieben und berechnet sich aus der Summe der jeweils miteinander multiplizierten Einzelkomponenten der Vektoren oder alternativ aus deren Betrag und Winkel:

$$\mathbf{e} \cdot \mathbf{f} = \sum_{i=1}^n e_i f_i = |\mathbf{e}| |\mathbf{f}| \cos(\alpha) \quad (\text{A.3})$$

Stehen zwei Vektoren \mathbf{u} und \mathbf{v} rechtwinklig zueinander, so werden sie als *orthogonal* bezeichnet und es gilt: $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = 0$.

Weiterhin gilt für den richtungslosen Winkel $\beta \in [0, \pi]$ zwischen den Vektoren \mathbf{u} und \mathbf{v} :

$$\cos(\beta) := \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{u}| |\mathbf{v}|} \quad (\text{A.4})$$

A.2.1.2 Vektorprodukt

Die Multiplikation zweier dreidimensionaler Vektoren \mathbf{e} und \mathbf{f} zu einem neuen 3D-Vektor \mathbf{g} wird Vektorprodukt oder auch *Kreuzprodukt* genannt und als

$$\mathbf{g} = \mathbf{e} \times \mathbf{f} \quad (\text{A.5})$$

geschrieben. Dabei gilt:

1. \mathbf{g} steht senkrecht auf \mathbf{e} und \mathbf{f} .
2. \mathbf{e} , \mathbf{f} und \mathbf{g} bilden ein Rechtssystem.
3. Die Länge von \mathbf{g} entspricht der Fläche des zwischen \mathbf{e} und \mathbf{f} aufgespannten Parallelogramms: $|\mathbf{g}| = |\mathbf{e}| |\mathbf{f}| \sin(\alpha)$.

Das Vektorprodukt berechnet sich durch

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \mathbf{f}_2 - \mathbf{e}_2 \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{e}_2 \mathbf{f}_0 - \mathbf{e}_0 \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{e}_0 \mathbf{f}_1 - \mathbf{e}_1 \mathbf{f}_0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Tabelle A.2: Rotationsmatrizen

A.2.1.3 Spatprodukt

Das Spatprodukt dreier dreidimensionaler Vektoren \mathbf{e} , \mathbf{f} und \mathbf{g} zu einem Skalar beschreibt das durch diese Vektoren aufgespannte vorzeichenbehaftete Volumen i und wird als

$$i = \langle \mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g} \rangle = (\mathbf{e} \times \mathbf{f}) \cdot \mathbf{g} \quad (\text{A.7})$$

geschrieben. Es berechnet sich durch eine Kombination von Skalar- und Vektorprodukt, die in ihrer Reihenfolge zyklisch vertauscht werden können:

$$\langle \mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g} \rangle = \mathbf{e} \cdot (\mathbf{f} \times \mathbf{g}) = \mathbf{f} \cdot (\mathbf{g} \times \mathbf{e}) = \mathbf{g} \cdot (\mathbf{e} \times \mathbf{f}) \quad (\text{A.8})$$

Das Spatprodukt der Einheitsmatrix ist 1 und kann als Volumen eines Würfels mit Kantenlänge 1 betrachtet werden. Das Spatprodukt ist 0, wenn kein Volumen aufgespannt wird und genau dann alle Vektoren in einer Ebene liegen. In Kap. 4.3.1.3 wird eine auf dem Spatprodukt basierende Raumsystemgüte definiert.

A.2.1.4 Rotation

Es wird eine Rotation im dreidimensionalen Raum um eine vorgegebene Achse, dargestellt durch den Vektor \mathbf{a} , und den Winkel α betrachtet [Bartsch 1984]. Da andere Fälle durch einfache Verschiebung leicht übertragen werden können, wird nur eine Drehung um den Ursprung des Koordinatensystems untersucht.

Rotation um die Koordinatensystemachsen Die 3×3 Rotationsmatrizen \mathbf{R} für die Rotation um die Koordinatensystemachsen sind in Tab. A.2 dargestellt.

Ein neuer Punkt \mathbf{p}' ergibt sich mittels Rotation aus dem Ursprungspunkt \mathbf{p} durch

$$\mathbf{p}' = \mathbf{R}\mathbf{p} \quad (\text{A.9})$$

Rotation um eine beliebige Achse Der Punkt \mathbf{p} wird um eine beliebige Achse \mathbf{a} (Vektor vom Ursprung) um α nach \mathbf{p}' gedreht. Die nötige Rotationsmatrix ergibt sich aus der Verknüpfung der drei Einzelmatrizen. Für den normierten Vektor $\hat{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ und die Hilfsvariablen $a = \sin \alpha$, $b = \cos \alpha$ sowie $c = 1 - \cos \alpha$ ergibt sich

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} cx^2 + b & cxy - az & cxz + ay \\ cxy + az & cy^2 + b & cyz - ax \\ cxy - ay & cyz + ax & cz^2 + b \end{pmatrix}. \quad (\text{A.10})$$

A.2.1.5 Rechte Winkel

Die zu einem zweidimensionalen Vektor $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$ rechtwinkligen Vektoren ergeben sich für den nach rechts abgehenden Vektor \mathbf{v} durch

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_y \\ -u_x \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

und den nach links abgehenden Vektor \mathbf{w} durch

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -u_y \\ u_x \end{pmatrix}. \quad (\text{A.12})$$

Da bei der Längenberechnung $l = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ sowohl das Vorzeichen als auch die Reihenfolge der Komponenten unerheblich sind, haben alle Vektoren dieselbe Länge.

Im 3D-Raum wird der auf zwei Vektoren rechtwinklig stehende Vektor durch das Vektorprodukt beschrieben.

A.2.1.6 Lot auf eine Gerade

Im 2D-Raum wird auf die von \mathbf{a} durch \mathbf{b} gehende Gerade das Lot zu \mathbf{c} gefällt (Abb. A.1). Je nach Literatur wird dies auch als *Orthogonalaufnahme* oder *Kleinpunktberechnung* bezeichnet.

y ist die Entfernung von \mathbf{a} zum Lotfußpunkt und $|x|$ die Entfernung von der Geraden zu \mathbf{c} (Lotlänge). Das Vorzeichen von x gibt an, auf welcher Seite des gerichteten Vektors von \mathbf{a} nach \mathbf{b} der Punkt \mathbf{c} liegt.

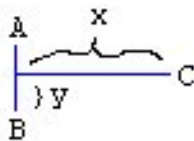


Abbildung A.1: Lot auf eine Gerade

$$\begin{aligned}
 o &= -\frac{\mathbf{b}_x - \mathbf{a}_x}{|\mathbf{a} - \mathbf{b}|} \\
 a &= \frac{\mathbf{b}_y - \mathbf{a}_y}{|\mathbf{a} - \mathbf{b}|} \\
 \mathbf{x}_0 &= -o \cdot \mathbf{a}_y - a \cdot \mathbf{a}_x \\
 \mathbf{y}_0 &= -a \cdot \mathbf{a}_y + o \cdot \mathbf{a}_x \\
 x &= \mathbf{x}_0 + o \cdot \mathbf{c}_y + a \cdot \mathbf{c}_x \\
 y &= \mathbf{y}_0 + a \cdot \mathbf{c}_y - o \cdot \mathbf{c}_x
 \end{aligned}$$

A.2.1.7 Winkel zwischen zwei Vektoren

Gesucht wird der Winkel α gegen den Uhrzeigersinn zwischen zwei Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} . Dabei liefert der *Cosinussatz* [Bartsch 1984] durch

$$\cos(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{\mathbf{a}\mathbf{b}}{|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}|} \Rightarrow \alpha' = \arccos\left(\frac{\mathbf{a}\mathbf{b}}{|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}|}\right) \quad (\text{A.13})$$

zwar den kurzen Winkel α' zwischen den Vektoren, jedoch ist wegen $\cos(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \cos(\mathbf{b}, \mathbf{a})$ der Drehsinn unklar. Dieser wird durch die Lotfunktion aus Kap. A.2.1.6 ermittelt: Es wird für \mathbf{a} der Nullpunkt, für \mathbf{b} der erste Vektor und als \mathbf{c} der zweite Vektor übergeben. Ergibt sich ein positives x , so liegt \mathbf{c} links vom ersten Vektor und α ist daher unter 180, andernfalls über 180 Grad. Somit folgt:

Ist $x \geq 0$, so gilt

$$\alpha = \alpha', \quad (\text{A.14})$$

andernfalls gilt

$$\alpha = 360^\circ - \alpha'. \quad (\text{A.15})$$

A.2.2 Lineare Gleichungssysteme

Dieser Absatz behandelt das Lösen linearer Gleichungssysteme (LGS). Die Einordnung und besonders die Bewertung eines LGS wird in Kap. 4.3.1.1 untersucht. Weitere Informationen zu LGS finden sich in [Werner 1992, Kap. 1].

Es werden wieder LGS betrachtet, die bereits alle vorhandenen oder relevanten Informationen abbilden. Das LGS habe die übliche Form

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (\text{A.16})$$

$$\text{mit } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,n} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix},$$

wobei m die Anzahl der Gleichungen und n die Anzahl der Unbekannten x_1 bis x_n ist. Die Skalare $a_{i,j}$ mit $i \in [1, m]$, $j \in [1, n]$ und b_l mit $l \in [1, m]$ sind gegeben. \mathbf{A} wird als *Koeffizientenmatrix* bezeichnet.

A.2.2.1 Quadratische lineare Gleichungssysteme

Ein LGS der obigen Form mit $m = n$ heißt quadratisch. Sind alle Gleichungen zueinander linear unabhängig ($\det(\mathbf{A}) \neq 0$), so wird es *regulär* genannt und besitzt genau eine Lösung.

In der vorliegenden Arbeit müssen zwar große Koeffizientenmatrizen mit gelegentlichen 0-Elementen erwartet werden, es kann aber nicht von einer dünnbesetzten Koeffizientenmatrix ausgegangen werden.

Vereinfachter Gauß-Jordan-Algorithmus Diese Weiterentwicklung der Gauß-Elimination [Dörfler u. Peschek 1988, Kap. 9.2] ist einfach, numerisch stabil, hat eine gute Laufzeit¹ sowie einen geringen Speicherbedarf² und hat sich bei den betrachteten Fällen als gut geeignet herausgestellt.

Für jedes $i \in [1, n]$ wird folgendes ausgeführt:

- Suche ein $j \in [1, m]$ mit $a_{j,i} \neq 0$.
- Gibt es dieses, so addiere zu jeder Zeile $k \in [1, m]$ mit $k \neq j \wedge a_{k,i} \neq 0$ die durch $-a_{k,i}$ dividierte Zeile j . Kennzeichne Spalte j (also x_j) als eindeutig gelöst.
- Gibt es dieses nicht, so kennzeichne Spalte j als nicht eindeutig lösbar.

¹Der Gauß-Jordan-Algorithmus benötigt n^3 Operatoren. Auch wenn mit der LR-Zerlegung (LU decomposition) bereits $n^3/3$ Operatoren genügen, so ist dieser Laufzeitunterschied im untersuchten Anwendungsfall unerheblich.

²Der Gauß-Jordan-Algorithmus arbeitet „in situ“, also abgesehen von wenigen Hilfsvariablen nur auf den Ausgangsdaten.

Nach Abschluss ist in \mathbf{A} nur noch die Diagonale ungleich Null und es gilt für alle eindeutig lösbaren Variablen: $x_i := b_i/a_{i,i}$.

Zur Erhöhung der numerischen Stabilität wird das Pivotelement³ $a_{j,i} \neq 0$ nicht willkürlich, sondern mit maximalem Betrag gewählt.

A.2.2.2 Überbestimmte lineare Gleichungssysteme

Überbestimmte LGS haben meist keine Lösung, die alle Gleichungen genau erfüllt. Sie entstehen oft, weil zur Minimierung von Messungenauigkeiten redundante ungenaue Daten erfasst beziehungsweise genutzt werden. Die hier optimale Lösung (minimale 2-Norm) liefert die *Methode der kleinsten Quadrate* (auch: *Quadratmittelaufgabe*, Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Sie ist die Belegung mit der kleinsten Summe an Fehlerquadraten:

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^m (a_{i,1}x_1 + \cdots + a_{i,n}x_n - b_i)^2 \quad (\text{A.17})$$

In [Niemeier 2002, Kap. 4.3.2] wird gezeigt, dass die Lösung durch Erweiterung der Formel A.16 mit der transponierten Matrix \mathbf{A}^T folgt [Niemeier 2002, Formel 4.3.20]:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (\text{A.18})$$

Durch $\mathbf{A}' := \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ und $\mathbf{b}' := \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ entsteht aus Formel A.18 das quadratische Gleichungssystem $\mathbf{A}' \mathbf{x} = \mathbf{b}'$, welches nach Kapitel A.2.2.1 gelöst werden kann. Weitere Informationen zum Lösen überbestimmter Gleichungssysteme finden sich u.a. in [Bronstein u. a. 1999, Kapitel 19].

A.2.2.3 Unterbestimmte lineare Gleichungssysteme

Unterbestimmte LGS besitzen keine eindeutige Lösung und werden daher hier nicht als Eingabe akzeptiert. Mit dem in Kapitel A.2.2.1 beschriebenen Gauß-Jordan-Algorithmus können sie teilweise gelöst werden.

A.2.3 Nichtlineare Gleichungssysteme

Im Folgenden werden Methoden zum Lösen nichtlinearer Gleichungssysteme (NLGS) untersucht. Grundlagen hierzu finden sich in [Werner 1992, Kap. 2]. Das NLGS mit m Gleichungen und n Unbekannten habe die Form

$$f(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (\text{A.19})$$

³Pivotelement ist das Element, durch das geteilt wird (frz. pivot = Drehzapfen, Stütze).

beziehungsweise

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i \in [1, 2, \dots, m]. \quad (\text{A.20})$$

Das Lösen von NLGS stellt ein komplexes Problem dar und kann im Gegensatz zum LGS nicht allgemein beantwortet werden. Je nach Aufgabenstellung und Art des NLGS sind unterschiedliche Verfahren besser geeignet.

Die Lösung kann oft nur durch ein *Iterationsverfahren* ermittelt werden, welches sich ausgehend von einer (notfalls konstanten oder willkürlichen) Startkonfiguration durch eine Iterationsfunktion über mehrere Schritte einer Lösung annähert.

„Allein schon an der Vielzahl der bis heute entwickelten Iterationsverfahren erkennt man, dass es hierauf keine eindeutige Antwort gibt.“ [Werner 1992, S. 80]

Als Abbruchbedingungen der Iteration werden ein Zeitlimit, eine maximale Iterationstiefe und das Erreichen einer gewissen Sättigung genutzt (siehe Kap. 4.5.6).

Das *einfache Iterationsverfahren* [Engeln-Müllges u. Uhlig 1996, Kap. 6.1] verläuft sich bei komplexen Fällen schnell in lokalen Maxima. Das *Gauß-Newton-Verfahren* [Straub 1991, Kap. 8.2.1] für überbestimmte NLGS ist für einige Fälle gut geeignet, aber von den Startwerten abhängig. Newton- und Brown-Verfahren [Engeln-Müllges u. Uhlig 1996, Kap. 6.2.1] erwarten quadratische NLGS, die in dieser Arbeit nicht garantiert werden können.

Weitere Informationen finden sich in [Deuffhard 2004] und [Bronstein u. a. 1999, Numerik-Kapitel].

Generell ist beim Lösen nichtlinearer Gleichungssysteme die Frage der ggf. benötigten Startwerte sowie die Schrittweitensteuerung zu beachten.

Die in dieser Arbeit vorkommenden NLGS haben meist eine hohe Anzahl an lokalen Extrema und teils viele Variablen. Daher war das Verhalten der untersuchten Standardverfahren im konkreten Anwendungsfall nicht ausreichend und sie werden hier nicht weiter betrachtet. In Kap. 4.5.3.2 werden daher eigene Methoden vorgestellt.

A.2.4 Geometrie

Es wird die verwendete Sicht der Geometrie mit zugehörigen Bezeichnern beschrieben.

Einfache Sicht

In Abb. A.2b ist \mathbf{s} ein 3D-Punkt, \mathbf{p} ein Augenpunkt, \mathbf{q} der Schnittpunkt des Sehstrahls mit der Bildebene, \mathbf{b}_a der Angelpunkt des Bildes und \mathbf{b}_b und \mathbf{b}_c

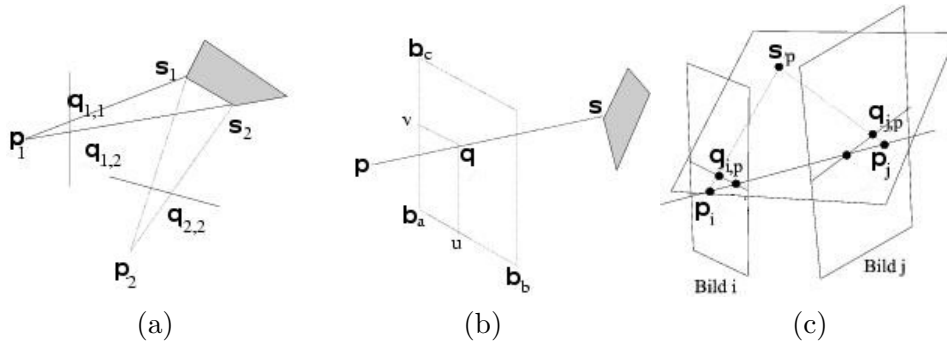


Abbildung A.2: Ansichten der Geometrie.

die Aufspannvektoren des Bildes (relativ zu \mathbf{b}_a). $u, v \in [0, 1]$ sind Skalare und geben die 2D-Position von \mathbf{q} auf dem Bild an. Daher gilt

$$\mathbf{q} = \mathbf{b}_a + u\mathbf{b}_b + v\mathbf{b}_c. \quad (\text{A.21})$$

\mathbf{p} , \mathbf{q} und \mathbf{s} liegen auf einer Geraden und mit einem Faktor r gilt daher

$$\mathbf{p} + r(\mathbf{q} - \mathbf{p}) = \mathbf{s}. \quad (\text{A.22})$$

Sicht mit mehreren Bildern

Abbildung A.2c zeigt beispielhaft eine Sicht mit den zwei Bildern i und j . Weitere Sichten ergeben sich äquivalent und werden auch als *Epipolargeometrie* bezeichnet ([Luong u. a. 1993, Kap. 2.2], [Luong u. Faugeras 1993]).

Aus Formel A.21 und A.22 folgt für Punkt p in Bild i

$$\mathbf{q}_{i,p} = \mathbf{b}_{a,i} + u_{i,p}\mathbf{b}_{b,i} + v_{i,p}\mathbf{b}_{c,i} \quad (\text{A.23})$$

und

$$\mathbf{p}_i + r_{i,p}(\mathbf{q}_{i,p} - \mathbf{p}_i) = \mathbf{s}_p. \quad (\text{A.24})$$

Durch Einsetzen von Formel A.23 in A.24 folgt

$$\mathbf{p}_i + r_{i,p}\mathbf{b}_{a,i} + r_{i,p}u_{i,p}\mathbf{b}_{b,i} + r_{i,p}v_{i,p}\mathbf{b}_{c,i} - r_{i,p}\mathbf{p}_i - \mathbf{s}_p = 0. \quad (\text{A.25})$$

Alternativ kann der Sehstrahl mit einem Faktor r' auch durch

$$\mathbf{p}_i + r'_{i,p}(\mathbf{s}_p - \mathbf{p}_i) = \mathbf{q}_{i,p} \quad (\text{A.26})$$

definiert werden, wobei r' unterschiedlich zu r ist. Unter der Annahme, dass \mathbf{q} zwischen \mathbf{p} und \mathbf{s} liegt, gilt

$$r'_{i,p} \in [0, 1]. \quad (\text{A.27})$$

Durch Einsetzen von Formel A.23 folgt

$$\mathbf{p}_i + r'_{i,p} \mathbf{s}_p - r'_{i,p} \mathbf{p}_i - \mathbf{b}_{a,i} - u_{i,p} \mathbf{b}_{b,i} - v_{i,p} \mathbf{b}_{c,i} = 0. \quad (\text{A.28})$$

A.2.5 Statistik

Die in dieser Arbeit genutzten Grundlagen der Statistik finden sich in der einschlägigen Fachliteratur, z.B. [Bartsch 1984, S. 450ff], [Kreyszig 1991, S. 331ff], [Fisz 1958] und [Bamberg 1993], und werden daher hier nicht wiederholt. Insbesondere wird auf das Buch „Ausgleichsrechnung“ [Niemeier 2002] von Wolfgang Niemeier verwiesen.

A.2.6 Formeln

Es werden in der Arbeit benötigte allgemeine Formeln behandelt.

$$\mathbf{a}x + \mathbf{b}y + \mathbf{c}xy = \mathbf{d}$$

Gesucht ist die Lösung der Formel

$$\mathbf{a}x + \mathbf{b}y + \mathbf{c}xy = \mathbf{d}, \quad (\text{A.29})$$

wobei x, y die gesuchten Skalare und $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}$ jeweils vorgegebene Zweiervektoren sind. Werden die Vektoren ausgeschrieben, so ergibt sich

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} y + \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} xy = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.30})$$

Die erste Zeile wird nach x aufgelöst

$$x = \frac{d_1 - b_1 y}{a_1 + c_1 y} \quad (\text{A.31})$$

und in die zweite Zeile ($a_2 x + b_2 y + c_2 xy = d_2$) eingesetzt. Umgeformt folgt

$$y^2(b_2 c_1 - c_2 b_1) + y(a_1 b_2 - a_2 b_1 + c_2 d_1 - c_1 d_2) + a_2 d_1 - a_1 d_2 = 0 \quad (\text{A.32})$$

und es können mit der pq-Formel [Bartsch 1984] 2 Kandidaten für y ermittelt werden. Das jeweils zugehörige x ergibt sich durch Formel A.31.

Im konkreten Anwendungsfall lässt sich meistens ein Wertepaar durch seinen übermäßigen Betrag bzw. das Verlassen des vorgesehenen Wertebereichs disqualifizieren und es bleibt die gesuchte Lösung übrig.

A.3 Photogrammetrische Verfahren

Als *photogrammetrische Verfahren* werden in der vorliegenden Arbeit in sich geschlossene Module betrachtet, die aus einer Reihe von Bildern mit dort digitalisierten homologen Punkten ein mögliches 3D-Modell rekonstruieren.

Auf eine genauere Betrachtung der einzelnen Verfahren wird absichtlich verzichtet, da dies nicht Thema der Arbeit ist, den Rahmen sprengen würde und aufgrund zahlreicher existierender Arbeiten überflüssig wäre.

Im Rahmen der Arbeit wurde besonders [Hartley 1997] und [Weitzig 2001] genutzt, es sei aber auch u.a. auf [Strum u. Triggs 1996], [Förstner 2001], [Shashua u. Avidan 1996] und [Debevec u. a. 1996] verwiesen.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Planung Bonn Hbf	9
1.2	Siemens Mobile Navigator	10
2.1	AutoCAD, Photomodeler	16
2.2	Canoma, Geometrie	18
2.3	Canoma, Projekte	19
2.4	Magan	20
2.5	MIP Uni Kiel	21
2.6	ArcView 3D Analyst	23
2.7	Visualisierungspipeline	30
2.8	CityGML	32
3.1	Straßenmöbel, Grundriss	36
3.2	ALKIS	38
3.3	Digitales Geländemodell	40
3.4	3D-Modelle	41
3.5	Bildbeispiele	44
3.6	Luftbild	45
4.1	Globale und lokale Struktur	58
4.2	Segmentlisten	59
4.3	Homologe Bildpunkte	60

4.4	Ablauf des Verfahrens	69
4.5	Ablauf der Berechnung	70
4.6	Fehlerkorrektur durch Rekombination	76
4.7	Doppeltenvermeidung	77
4.8	Zwei Gebäudeteile	83
4.9	Umklappen bei der Rekombination	83
4.10	Hilfspunkte	85
4.11	Flächenvervollständigung	91
4.12	Interpolation in Vierecken	93
4.13	Vierecksentzerrung-Beispiel	95
4.14	Bildparameterberechnung	97
4.15	Bildparameterberechnung 2	98
4.16	Hausecken und -wände	107
4.17	Hausecken und -wände, Praxis	108
4.18	Beispiel Einbuchtung	111
4.19	Flächen	112
4.20	Rechtwinklige Ecken, Beispiel 1	113
4.21	Rechtwinklige Ecken, Beispiel 2	115
4.22	Aufnahme mit Hindernis	116
4.23	Entzerrung	117
4.24	Entzerrungsprobleme	118
4.25	Schräg aufgenommene Fassade	118
4.26	Vierecksfläche	119
4.27	Grundrissinterpolation	121
4.28	Grundriss-Beispiel	122
4.29	Balkon	123
4.30	Punkte in Flächen	124
4.31	Dächer auf Flächen	126

5.1	Zusammenfügen	128
5.2	Balkon-Kombination	129
5.3	Balkon: Berechnung	129
5.4	Rundwand	130
5.5	Rundwand, Teil 2	131
5.6	Rekonstruktion eines Satteldaches ohne Höhenangaben	131
5.7	Rekonstruktion einer breiten Fassade: Ausgangsdaten	132
5.8	Rekonstruktion einer breiten Fassade: Ergebnisanalyse	134
5.9	Schadow-Arkaden: Ausgangsmodelle	135
5.10	Schadow-Arkaden: Zielmodell, I	136
5.11	Schadow-Arkaden: Zielmodell, II	137
5.12	Wilhelmstraße	138
5.13	Altstadt Düsseldorf	139
5.14	Altstadt Düsseldorf: Zielmodell	140
5.15	Heiligendamm: Zielmodell	140
6.1	<i>3dw</i> -Benutzeroberfläche	143
6.2	Package importSegment	145
6.3	Datenstruktur	146
6.4	Package calc	148
6.5	Package commands	149
A.1	Lot auf eine Gerade	161
A.2	Ansichten der Geometrie.	165

Literaturverzeichnis

AdV-Arbeitsgruppe ATKIS 2005

ADV-ARBEITSGRUPPE ATKIS: *ATKIS - Objektartenkatalog*.
Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der
Bundesrepublik Deutschland (AdV), 2005

AG 3D-Stadtmodelle 2004

AG 3D-STADTMODELLE: 3D-Stadtmodelle / AG 3D-Stadtmodelle des
AK Kommunales Vermessungs- und Liegenschaftswesens des Städtetages
Nordrhein-Westfalen. 2004. – Forschungsbericht

Appel 2005

APPEL, Mirko: *From Images and Technical Drawings to 3D Models: A
Novel Approach to As-Built Reconstruction*, University of Bonn, Diss.,
2005. – ISBN 3-89821-517-2

Attwenger u. Briese 2004

ATTWENGER, M. ; BRIESE, C.: Vergleich digitaler Geländemodelle aus
Photogrammetrie und Laserscanning / Institut für Photogrammetrie und
Fernerkundung, Technische Universität Wien. 2004. – Forschungsbericht

Autodesk 2006

AUTODESK: *AutoCAD*. Version: 2006. <http://www.autocad.com>. –
Online-Ressource

Baltsavias 1998

BALTSAVIAS, E.: Verfahren und Möglichkeiten der modernen
Photogrammetrie zur DTM Generierung / Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie, ETH Zürich. 1998. – Forschungsbericht. DTM-Tagung

Bamberg 1993

BAMBERG, Günter: *Statistik*. R. Oldenburg Verlag München Wien, 1993.
– ISBN: 3-486-22354-2

Bartsch 1984

BARTSCH: *Mathematische Formeln*. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1984.
– ISBN: 3-8166-9060-2

Beutelspacher 1998

BEUTELSPACHER, Albrecht: *Lineare Algebra*. 3. vieweg, 1998. – ISBN
3-528-26508-6

Beyer u. a. 2001

BEYER, Hans-Georg ; BRUCHERSEIFER, Eva ; JAKOB, Wilfried ;
POHLHEIM, Hartmund ; SENDHOFF, Bernhard ; TO, Thanh B.:
Evolutionäre Algorithmen – Begriffe und Definitionen / Universität
Dortmund. 2001 (CI-101/01). – Interner Bericht des
Sonderforschungsbereichs 531 *Computational Intelligence*. – ISSN
1433-3325

Böhm u. Schuhmacher 2005

BÖHM, Jan ; SCHUHMACHER, Sara: Erste Erfahrungen mit dem
Laserscanner Leica HDS 3000 / Forschungsgruppe „Terrestrial
Positioning Systems and Computer Vision“ am Institut für
Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart. 2005. –
Forschungsbericht

Bibliographisches Institut 2002

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT, Mannheim: *Duden. Das große
Wörterbuch der deutschen Sprache. Studienausgabe*. Bibliographisches
Institut, Mannheim, 2002. – ISBN 3411703601

Bronstein u. a. 1999

BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDJAJEW, Konstantin A. ; MUSIOL, Gerhard:
Taschenbuch der Mathematik. Springer-Verlag, Berlin, 1999

Burgard u. a. 1998

BURGARD, W. ; DERR, A. ; FOX, D. ; CREMERS, A.: Integrating global
position estimation and position tracking for mobile robots: the Dynamic
Markov Localization approach. In: *Proceedings of IEEE/RSJ
International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '98)*.
Victoria, BC, Canada, October 1998, 730–735

BUWAL 2003

BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) der
Schweiz: *Strategie des Amtes 2003*. 2003

CPA-GeoInformation 2006

CPA-GEOINFORMATION: *SupportGIS*. Version: 2006.
<http://www.supportgis.de/>. – Online-Ressource, Abruf: 5.1.2006

Curry 2003

CURRY, Kris: *Using Stereo Analyst for ArcGIS - Geographic Imaging by Leica Geosystems*. Version: 2003. ftp://gis.leica-geosystems.com/software/stereoanalyst/demo/SAforArcGIS_web.pdf. – Online-Ressource, Abruf: 17.3.2006

CyberCity AG 2002

CYBERCITY AG: CyberCity Modeler und TerrainView - Werkzeuge zur Visualisierung von 3D-Stadt- und Werksmodellen / Lehrstuhl für Photogrammetrie ETH Zürich. 2002. – Forschungsbericht

Darwin 1859

DARWIN, Charles: *The Origin of Species*. Oxford University Press, 1859,1998. – ISBN 019283438X

Darwin 1871

DARWIN, Charles: *Descent of Man*. Princeton University Press, 1871,1981. – ISBN 0691023697

Debevec u. a. 1996

DEBEVEC, Paul E. ; J. TAYLOR, Camillo ; MALIK, Jitendra: Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry- and Image-Based Approach / University of California at Berkeley. Computer Science Division, Berkeley CA, Jan 1996. – Forschungsbericht

Deuffhard 2004

DEUFLHARD, Peter: *Newton Methods for Nonlinear Problems*. Springer, 2004. – ISBN 3540210997

Discreet 2006

DISCREET, Autodesk: *3D-Studio Max*. Version: 2006. <http://www.discreet.com/3dsmax/>. – Online-Ressource, Abruf: 17.3.2006

Dörfler u. Peschek 1988

DÖRFLER, Willibald ; PESCHEK, Werner: *Einführung in die Mathematik für Informatiker*. Carl Hanser Verlag, München, 1988. – ISBN 3-446-15112-5

Engeln-Müllges u. Uhlig 1996

ENGELN-MÜLLGES, Gisela ; UHLIG, Frank: *Numerical Algorithms with C*. Springer-Verlag, Berlin, 1996

Eos Systems

EOS SYSTEMS: *Photomodeler 5.0, Windows-Testversion*. <http://www.photomodeler.com>. – Online-Ressource, Abruf: 2005

ERDAS a

ERDAS, Leica Geosystems: *ERDAS IMAGINE Software Suite*.
<http://gis.leica-geosystems.com/>. – Online-Ressource, Abruf: 2003

ERDAS b

ERDAS, Leica Geosystems: *ERDAS Photogrammetry Product Suite*.
<http://www.erdas.com/software/ProductModules.asp?SubGroupID=562&GroupID=1>. – Online-Ressource, Abruf: 2003

FelixCAT GmbH

FELIXCAT GMBH: *FelixCAT*. <http://www.graebert.com/>. –
Online-Ressource, Abruf: 2002

Fisz 1958

FISZ, Marek: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*.
Berlin : VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1958

Flack u. a. 2001

FLACK ; WILLMOTT ; BROWNE: *Scene Assembly for Large Scale Urban Reconstructions*. 2001

Forkuo u. King 2004

FORKUO, Eric K. ; KING, Bruce: Automatic Fusion of Photogrammetric Imagery and Laser Scanner Point Clouds / Department of Land Surveying & Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University. 2004. – Forschungsbericht

Fox u. a. 1999

FOX, Dieter ; BURGARD, Wolfram ; DELLAERT, Frank ; THRUN, Sebastian: Monte Carlo Localization: Efficient position estimation for mobile robots. In: *AAAI/IAAI*, 1999, S. 343–349

Franke 2002

FRANKE, Igmarr: *Methodik zur Erstellung einer Stadtvisualisierung zum Zweck der interaktiven VR-Stadtplanung*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fraunhofer Institut Fabrikbetrieb und -automatisierung, Diplomarbeit, 2002

Früh u. Zakhor 2004

FRÜH, Christian ; ZAKHOR, Avidoh: An automated method for large-scale, ground-based city model acquisition. In: *International Journal of Computer Vision* 60(1) (2004), S. 5–24

Förstner 2001

FÖRSTNER, Wolfgang: *Direct Optimal Estimation of Geometric Entities using Algebraic Projective Geometry*. 2001. – Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. B. Wrobel, Institut für Photogrammetrie, Darmstadt

Game Technology Group

GAME TECHNOLOGY GROUP: *Java OpenGL Binding (JOGL)*.
<https://jogl.dev.java.net/>. – Online-Ressource, Abruf: 5.1.2006

Gee 1999

GEE, Michael: *'Remeshing' für Finite Elemente Berechnungen mit grossen Deformationen*, Institut für Baustatik der Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1999

Gemeinschaft der Anwender des automatisierten Liegenschaftsbuchs 2005

GEMEINSCHAFT DER ANWENDER DES AUTOMATISIERTEN
 LIEGENSCHAFTSBUCHS: *Automatisiertes Liegenschaftsbuch*. Hannover:
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen LGN,
 Abteilung Informationstechnologie, 2005

Gonzo u. a. 2004

GONZO, Lorenzo ; EL-HAKIM, Sabry ; PICARD, Michel ; GIRARDI,
 Stefano ; WHITING, Emily: *Photo-realistic 3-D Reconstruction of Castles
 with Multiple-sources Image-based Techniques / Center for Scientific and
 Technological Research, ITC-irst, Trento, Italy*. 2004. – Forschungsbericht

Gröger u. a. 2005

GRÖGER, Gerhard ; BENNER, Joachim ; DÖRSCHLAG, Dirk ; DREES,
 Rüdiger ; GRUBER, Ulrich ; LEINEMANN, Klaus ; LÖWNER, Marc-Oliver:
Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D. In: *Zeitschrift für
 Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 6 (2005), S. 343–353

Güting 1992

GÜTING, Ralf H.: *Datenstrukturen und Algorithmen*. B. G. Teubner
 Stuttgart, 1992. – ISBN 3-519-02121-8

Hake u. a. 2002

HAKE, Günter ; GRÜNREICH, Dietmar ; MENG, Liqiu: *Kartographie:
 Visualisierung raum-zeitlicher Informationen*. 8., vollst. neu bearb. und
 erw. Aufl. Berlin; New York : de Gruyter, 2002. – ISBN 3-11-016404-3

Hartley 1997

HARTLEY, Ralph I.: *In defence of the eight-point algorithm*. In: *PAMI*
 19 (1997), Jun, Nr. 6, S. 580–593

Heipke 2005

HEIPKE, Christian: *Photogrammetrie und Fernerkundung I - III*. Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, 2005

Holweg 2004

HOLWEG, Daniel: *Graphische Informationssysteme / Fraunhofer - Institut Graphische Datenverarbeitung*. 2004. – Forschungsbericht

Häring u. Massard 2005

HÄRING, Andreas ; MASSARD, Yann: *Transformationen und Homogene Koordinaten*. Technische Universität Kaiserslautern, Proseminar Computergrafik, 2005

Klaus 1997

KLAUS, Dipl.-Ing. M.: Erstellung von 3D-Stadtmodellen für die virtuelle interaktive Begehung. In: *Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme* Lehrstuhl für Bodenordnung und Landentwicklung, Technische Universität München, 1997

Koch 1987

KOCH, Karl-Rudolf: *Parameterschätzung und Hypothesentests*. 2. Institut für Theoretische Geodäsie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn : Dümmler, 1987

Koehl u. Gaiotti 2004

KOEHL, Mathieu ; GAÏOTTI, Vincent: *Geometric and Thematic Enrichment of Frontages in 3D City-Models / INSA de Strasbourg*. 2004. – Forschungsbericht

Kolbe 2004

KOLBE, Thomas H.: *Interoperable 3D-Visualisierung (3D Web Map Server)*. In: *Tagungsband zum Symposium Praktische Kartographie 9* (2004)

Kolbe u. Gröger 2003

KOLBE, Thomas H. ; GRÖGER, Gerhard: *Towards Unified 3D City Models / Institute for Cartography and Geoinformation, University of Bonn*. 2003. – Forschungsbericht

Kolbe u. a. 2005

KOLBE, Thomas H. ; GRÖGER, Gerhard ; PLÜMER, Lutz: *CityGML - Interoperable access to 3D city models*. In: *Proceedings on the Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management*, Springer Verlag, Mar. 2005

Kolbe 1999

KOLBE, Thomas H.: *Identifikation und Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern mittels unscharfer Constraints*, Universität Bonn, Diss., 1999

Koppers 2002

KOPPERS, Lothar: *Generierung von Objekten für 3D-Stadtmodelle*, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Diss., 2002

Kreyszig 1991

KREYSZIG, Dr. rer. nat. E.: *Statistische Methoden und ihre Anwendung*. Göttingen : Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1991

Leica Geosystems 2004

LEICA GEOSYSTEMS: *Leica High-Definition Surveying Systems*, Feb 2004. – Manual

Leica-Vertreter u. Weitzig 2004

LEICA-VERTRETER ; WEITZIG, Björn: *Persönliches Gespräch auf der Intergeo 2004*. Okt. 2004. – Stuttgart

Lieberman u. Sonnet 2003

LIEBERMAN, Joshua ; SONNET, Jerome: *Web Terrain Service / Open GIS Consortium. 2003 (OGC 03-081r2)*. – OpenGIS Implementation Specification

Luong u. a. 1993

LUONG, Quang-Tuan ; DERICHE, Rachid ; FAUGERAS, Olivier D. ; PAPADOPOULOU, T.: *On determining the Fundamental matrix: analysis of different methods and experimental results / INRIA*. INRIA, 1993. – Forschungsbericht

Luong u. Faugeras 1993

LUONG, Quang-Tuan ; FAUGERAS, Olivier D.: *Determining the fundamental matrix with planes: instability and new algorithms*. In: *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1993, S. 489–494

Maas 1997

MAAS, Hans-Gerd: *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Diss., 1997. – ISBN 3-906467-00-7

Mahintorabi 2005

MAHINTORABI, Keywan: *Maya 7 - 3D-Grafik und 3D-Animation*. Mitp-Verlag, 2005. – ISBN 3826616081

Mahmoud 2004

MAHMOUD, Ph.D. Aiman Malla Houech A.: *Geographical Information Systems and Digital Models / Public Authority for Housing Welfare, Department of Planning, Kuwait*. 2004. – Forschungsbericht

Matheas u. a. 2001

MATHEAS, Jan ; SCHLEBUSCH, Rainer ; ZASTRAU, Bernd W.: *Zur Herleitung einer oberflächenorientierten Schalentheorie und deren Umsetzung im Rahmen der Finite-Element-Methode / Lehrstuhl für Mechanik, TU Dresden*. 2001. – Forschungsbericht

May u. a. 2003

MAY, Martin ; SCHMIDT, Benno ; STREIT, Ulrich ; UHLENKÜKEN, Christoph: *Web-Service-basierte 3D-Visualisierung im Umfeld der Raumplanung*. 2003

Mayer 1997

MAYER, Christopher: *Ein kantenbasiertes Stereoverfahren*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1997

Merziger u. Wirth 1991

MERZIGER, Gerhard ; WIRTH, Thomas: *Repetitorium der höheren Mathematik*. Feldmann Verlag, Hannover, 1991. – ISBN 3-923 923-33-3

MetaCreations 1999

METACREATIONS: *Windows-Testversion von Canoma 1.0*. Version: 1999. <http://www.metacreations.com/products/canoma/>. – Online-Ressource, Abruf: 2001

Microsoft 2000

MICROSOFT: *DirectX 8.0 Programmer's Reference*. Version: 2000. <http://www.microsoft.com/directx/>. – Online-Ressource, Abruf: Okt. 2000

Milbradt u. a. 2004

MILBRADT, P. ; DAMRATH, R. ; SCHWÖPPE, A.: *Finite Elemente Approximation auf der Basis beliebiger Zellen / Institut für Bauinformatik, Universität Hannover*. 2004. – Festschrift

Ministerium des Innern des Landes Brandenburg 2004

MINISTERIUM DES INNERN DES LANDES BRANDENBURG: *Richtlinien für die Einrichtung der Automatisierten Liegenschaftskarte in Brandenburg (ALK-Richtlinien)*. Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, 2004

Multimedia Information Processing 2003

MULTIMEDIA INFORMATION PROCESSING: Structure from Motion with Uncalibrated Image Sequences / Christian-Albrechts-University of Kiel. 2003. – Forschungsbericht

Niemeier 2002

NIEMEIER, Wolfgang: *Ausgleichsrechnung: eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens*. New York : de Gruyter, 2002. – ISBN 3-11-01-01408-2

Nissen 1994

NISSEN, Volker: *Evolutionäre Algorithmen: Darstellung, Beispiele, betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten*, Universität Göttingen, Diss., 1994

Nissen 1997

NISSEN, Volker: *Einführung in Evolutionäre Algorithmen. Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Braunschweig; Wiesbaden : Vieweg, 1997. – ISBN 3528054999

Oestereich 2001

OESTEREICH, Bernd: *Objektorientierte Softwareentwicklung - Analyse und Design mit der Unified Modeling Language*. 5. R. Oldenburg Verlag, München/Wien, 2001. – ISBN 3486255738

Offset 2006

OFFSET: *Magan*. Version: 2006. <http://www.offsetservices.co.uk/index.htm?menu.htm&flashhead.htm&magannt.htm>. – Online-Ressource, Abruf: 3.2.2006

Open Geospatial Consortium

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM: *Internetseite der OGC*. www.opengeospatial.org

OpenDX

OPENDX: *OpenDX*. <http://www.opendx.org>. – Online-Ressource, Abruf: 2005

Petersen u. Russell 2004

PETERSEN, Daniel ; RUSSELL, Kenneth: 3D application and game development with OpenGL. In: *JavaOne* Sun Microsystems, Inc., 2004. – Session TS-1361

Pohlheim 1999

POHLHEIM, Hartmut: *Evolutionäre Algorithmen. Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. Springer, Berlin, 1999. – ISBN 3540664130

Prinz 2003

PRINZ, Dr. T.: *Einführung in die digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften*. Universität Münster, 2003. – Skript zur Vorlesung

Quadt u. Kolbe 2005

QUADT, Udo ; KOLBE, Thomas H.: Web 3D Service / Open Geospatial Consortium (OGC). 2005 (OGC 05-019). – OGC Discussion Paper, Draft Implementation Specification

Quasthoff 2002

QUASTHOFF, Dr. U.: *Genetische Programmierung*. Institut für Informatik, Universität Leipzig, 2002

Rechenberg 1994

RECHENBERG, Ingo: *Evolutionstrategie*. Frommann Holzboog, 1994. – ISBN 3772816428

Ringo 2006

RINGO, John: *Genetik kompakt*. 1. München : Elsevier, Spektrum, Akad. Verl., 2006. – ISBN 3-8274-1639-6

Roosendaal u. Selleri 2004

ROSENDAAL, Ton ; SELLERI, Stefano: *The Official Blender 2.3 Guide: Free 3D Creation Suite for Modeling, Animation, and Rendering*. No Starch Press, 2004. – ISBN 1593270410

Schilcher u. a. 1999

SCHILCHER, M. ; GUO, Z. ; KLAUS, M. ; ROSCHLAUB, R.: Aufbau von 3D-Stadtmodellen auf der Basis von 2D-GIS. In: *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG) 3/1999*, 1999, S. 157ff

Schmidt u. a. 2003

SCHMIDT, Benno ; MAY, Martin ; UHLENKÜKEN, Christoph: Dienste-basierte Architekturen für die Web-basierte 3D-Geovisualisierung / Institut für Geoinformatik Universität Münster, con terra GmbH Münster. 2003. – Forschungsbericht

Schwefel 1995

SCHWEFEL, Hans-Paul: *Evolution and Optimum Seeking*. New York : Wiley & Sons, 1995. – ISBN 0471571482

Sester u. Brenner 2002

SESTER, Monika ; BRENNER, Claus: Datenquellen und Methoden für eine automatische Bestimmung von Gebäude- und Siedlungsvolumen / Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover. 2002. – Forschungsbericht

Shashua u. Avidan 1996

SHASHUA, Amnon ; AVIDAN, Shai: The rank 4 constraint in multiple (≥ 3) view geometry. In: *ECCV '96: Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision-Volume II*, Springer-Verlag, 1996. – ISBN 3-540-61123-1, S. 196-206

Siebe u. Büning 1997

SIEBE, Eckhard ; BÜNING, Ulrich: Application of digital photogrammetric products for cellular radio network planning. In: *Proceedings of the Photogrammetric Week '97*, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 1997, S. 159-164

Siemens VDO 2005

SIEMENS VDO: *A New Dimension of Navigation*. Schwalbach/Shanghai, Siemens VDO press-release, Reference Number: SV 200512.001e, Dez 2005

Silicon Graphics 2005

SILICON GRAPHICS, Alias Systems: *Maya*. Version: 2005. <http://www.aliaswavefront.com/>. – Online-Ressource, Abruf: 19.8.2005

Sowizral u. Nadeau 1999

SOWIZRAL, Henry A. ; NADEAU, David R.: *Introduction to Programming with Java 3D*. Sun Microsystems, Inc., University of California at San Diego, 1999

Straub 1991

STRAUB, Bernhard: *Ein Verfahren zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objektmodellen aus digitalen Bilddaten*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1991. – ISBN: 3-7696-9426-0

Streichert 2001

STREICHERT, Felix: *Evolutionäre Algorithmen: Implementation und Anwendungen im Asset-Management-Bereich*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Aug 2001

Streit 2004

STREIT, Prof. Dr. Ulrich: *Einführung in die Visualisierung von Geodaten*. Universität Münster : Institut für Geoinformatik der Universität Münster, Feb 2004

Strum u. Triggs 1996

STRUM, Peter ; TRIGGS, Bill: A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion / INRIA. 1996. – Forschungsbericht

SUN 2006

SUN, J3D-Team: *Java3D (J3D)*. Version: 2006.
<https://java3d.dev.java.net/>. – Online-Ressource, Abruf: 3.2.2006

Thiemann 2003

THIEMANN, Frank: 3D-Gebäude-Generalisierung. In: *Kartographische Schriften* Bd. 7: Visualisierung und Erschliessung von Geodaten, Deutsche Gesellschaft für Kartographie, Feb 2003, S. 185–192

Triggs u. a. 2000

TRIGGS, B. ; MCCLAUCHLAN, P. ; HARTLEY, R. I. ; FITZGIBBON, A. W.: Bundle adjustment: A modern synthesis. In: TRIGGS, Bill (Hrsg.) ; ZISSERMAN, Andrew (Hrsg.) ; SZELISKI, Richard (Hrsg.): *Workshop on Vision Algorithms* Bd. 1883, Springer, 2000, S. 298–372. – ISBN: 3-540-67973-1

Tunc u. a. 2004

TUNC, E. ; KARSLI, F. ; AYHAN, E.: 3D City Reconstructoin by Different Technologies to Manage and Reorganize the Current Situation / KTU, Engineering and Architecture Faculty, Dept. of Geodesy and Photogrammetry, 61080 Trabzon, Turkey. 2004. – Forschungsbericht

Vosselman u. a. 2004

VOSSELMAN, G. ; GORTE, B.G.H. ; SITHOLE, G. ; RABBANI, T.: Recognising structure in laser scanner point clouds. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 46. Freiburg, 2004, S. 33–38

Web3D Consortium 1997

WEB3D CONSORTIUM: *VRML97 Functional specification and VRML97 External Authoring Interface (EAI) International Standard*. ISO/IEC 14772-1 und ISO/IEC 14772-2, 1997

Web3D Consortium 2004

WEB3D CONSORTIUM: *X3D and Related Specifications*. ISO/IEC 19775 bis ISO/IEC 19777, 2004

Weicker 2002

WEICKER, Karsten: *Evolutionäre Algorithmen*. Teubner, 2002. – ISBN 3519003627

Weitzig 2001

WEITZIG, Björn: *Hybriges bildsequenzbasiertes 3D-Modellieren*, Universität Dortmund, Diplomarbeit, Okt 2001

Wendt 2001

WENDT, Volker: *Das Einsteigerseminar. 3ds max 4.x discreet*. verlag moderne industrie Buch AG & Co. KG, 2001. – ISBN 3826671589

Werner 1992

WERNER, Jochen: *Vieweg Studium, Nr.32, Numerische Mathematik*. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1992. – ISBN 3528072326

Yang u. a. 2004

YANG, Chin-Shung ; KAO, Szu-Pyng ; LEE, Fen-Bin ; HUNG, Pen-Shan: *Twelve different Interpolation methods: A case study of Surfer 8.0 / National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. 2004.* – Forschungsbericht

Index

- fSeg*, 67
- gP*, 66
- gMaxModul*, 67
- gModul*, 67
- gSeg*, 67
- gtransform*, 75
- gparF*, 68
- 3dw*, 12, 139, 142
- 2D-Aufspanngüte, 65
- 3D-Aufspanngüte, 65
- 3D-Editor, 143
- 3D-Studio Max, 16

- Abbruchbedingung, 103
- Abbruchkriterium, 52
- AdV, 37
- Affintransformation, 82
- ALB, 37
- ALK, 36
- ALKIS, 37
- Altstadt Düsseldorf, 137
- Anfangspopulation, 77
- API, 33
- Arbeitsbereich, 57
- ArcView 3D Analyst, 22
- ATKIS, 37
- ATKIS-OK, 37
- ATKIS-SK, 37
- Attribute, 61
- Aufspanngüte, 65
- Ausgangspopulation, 77
- AutoCAD, 16

- Bündelblockausgleichung, 17

- Basismodell, 41
- Bildkarte, 47
- Bildkoordinate, 43
- Bildplan, 47
- Blender, 16
- Blockmodell, 41, 42

- CAD, 15
- Canoma, 18
- Chromosom, 52
- CityGML, 31, 36, 63
- COP-Bild, 20
- Cosinussatz, 161
- CyberCity Modeler, 26

- Düsseldorf, 137
- Darwin, 51
- Datenmodell, 54
- DEM, 39
- DGM, 39
- DHM, 39
- Digitales Objektmodell, 40
- DirectX, 33
- Diversifikation, 105
- Diversität, 52
- DKM, 37
- DLM, 37, 39
- DOM, 40
- DOP, 46
- DSM, 40
- DTK, 37
- DTM, 39
- Dual-Monitor, 141

- EA, 12, 51

- Definition, 52
- Eclipse, 142
- EDBS, 37
- Einpassen, 79
- Elimination, 72
- EP, 53
- Epipolargeometrie, 21, 165
- ES, 53
- Evolutionäre Algorithmen, 51

- Fehlerquadrat, 163
- FelixCAD, 16
- Finite Elemente, 56
- Fitness, 52, 67
- Fitnessfunktion, 52
- Flächen, 56, 57
- Flächenvervollständigung, 90
- Frühelimination, 74

- Güte
 - 2D-Aufspanngüte, 65
 - 3D-Aufspanngüte, 65
 - LGS, 64
 - Parallelfäche, 68
 - Punkt, 66
 - Rekombination, 67
 - Segment, 67
- GA, 53
- Gauß-Newton, 164
- GDI-NRW, 31
- Geländemodell, 39
- Gen, 52
- globale Struktur, 56
- globaler Punkt, 56
- globales Bild, 57
- GML, 36
- GP, 53
- Grundrissinterpolation, 120

- Hardware, 141
- Heiligendamm, 138
- High-Definition Surveying, 22
- Homologe Geometrie, 17

- homologe Punkte, 56
- Hypothesen, 44

- IMAGINE Software Suite, 24
- Individuum, 52
- ISO
 - 19775-19777, 31
 - 14772, 31
 - 19107, 31
- Iterationsverfahren, 164

- Java, 142
- Java3D, 33, 142
- Jogl, 33

- kartographisches Modell, 37
- Klötzchenmodell, 41
- Koeffizientenmatrix, 162
- Kreuzprodukt, 158

- Landschaftsmodell, 37
- Leica Photogrammetry Suite, 20
- LGS, 64, 161
 - überbestimmtes, 64, 163
 - quadratisches, 162
 - reguläres, 64, 162
 - unterbestimmtes, 64, 163
- LoD, 155
- lokale Struktur, 56
- lokaler Punkt, 56
- lokales Bild, 57
- Lot auf eine Gerade, 160
- Lotlänge, 160
- Luftbild, 45
- Luftbildkarte, 47
- Luftbildschrägaufnahme, 45

- Magan, 19
- Maya, 16
- MCL, 25
- Methode der kleinsten Quadrate, 163
- MIP Uni Kiel, 21
- Modellierung, 28, 29

- Mutation, 52
Mutations-Log, 127
Mutationslevel, 72
- NAS, 37
Navigationssysteme, 10
Neugenerierung, 101
nichtlineares Gleichungssystem, 89, 163
NLGS, 89, 163
 Gauß-Newton, 164
 Iterationsverfahren, 164
- O-Notation, 86
Oberflächenmodell, 40
Oberkante, 107
Objektartenkatalog, 37
OGC, 28, 32
OMG, 144
OpenDX, 17
OpenGL, 33
Operator, 52
orthogonal, 158
Orthogonalaufnahme, 160
Orthophoto, 46
Orthophotokarte, 47
Ortskoordinate, 41
- Parallelbild, 68
Parallelfäche, 68
Parallelfächengüte, 68
Parallelviereck, 116
Photogrammetrische Verfahren, 17, 167
Photomodeler, 18
physikalische Modelle, 10
Pivotelement, 163
Population, 52
Populationsgröße, 72
Primärdaten, 35
Projekt, 57
Punkt liegt in Fläche, 124
Punktgüte, 66
- Quadratmittelaufgabe, 163
- Raumkoordinate, 41
Raumsystem, 65
Raumsystemgüte, 66
regulär, 162
Rekombination, 52
Rendern, 28, 29
Rotation, 159
- Satellitenbildkarte, 47
Shadow-Arkaden, 134
Segment, 29, 55, 56
Segmentgüte, 67
Sekundärdaten, 35
Selektion, 102
Semantische Daten, 48
Senkrechte Luftbilder, 46
Sequenz, 57
SG-VRML, 31, 63
SGI, 33
SIG3D, 31
Signaturenkatalog, 37
Situationsmodell, 40
Skalarprodukt, 158
Spatprodukt, 159
spezialisierte Operatoren, 76
spezialisierte Relationen, 62
Stadtgrundkarte, 38
Stadtplanung, 9
Stammbaum der Berechnung, 127
Stereoskopie, 20
Streckenverlängerung, 92
Szene, 15
- Terragen, 17
Textur, 44
topographische Karte, 37
- Umklappen, 83
UML, 144
Unterkante, 107

Varianz, 75
Variationsoperator, 52
Vektorprodukt, 158
VR, 28
VRML, 30, 62

W3DS, 32
Web 3D Service, 32
Web Feature Service, 32
Web Terrain Service, 32
Werbung, 10
WFS, 32
Wilhelmstraße, 137
Winkel zwischen zwei Vektoren, 161
WTS, 32

X3D, 31

Zielfunktion, 52

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Kartographie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn sowie während meiner Tätigkeit bei der Firma CPA Geo-Information aus Siegburg.

Für die freundliche und unermüdliche Betreuung und Unterstützung während dieser Zeit danke ich ganz besonders Herrn Professor Dr.-Ing. Dieter Morgestern und Herrn Professor Dr. rer. nat. Hans-Peter Helfrich, meinen Referenten dieser Dissertation.

Mein weiterer Dank richtet sich an Herrn PD Dr.-Ing. Christoph Averdung für seine langjährige Förderung und Unterstützung sowie für die Schaffung eines überaus angenehmen und kreativen Arbeitsumfeldes.

Schließlich danke ich allen Mitarbeitern des Instituts für Kartographie und Geoinformation sowie den Mitarbeitern der Firma CPA Geo-Information, die immer für anregende Diskussionen zur Verfügung standen und damit wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Für konstruktive Verbesserungs- und Korrekturvorschläge danke ich weiterhin Heike Walesch, Daniela Friedl, Michael Pack, Gerrit Rothmaier und Daniela Künster.