

Automatische Gebäuderekonstruktion mittels parametrisierter Komponenten

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

André Fischer

aus

Köln

Hamburg, März 2005

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

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

1. Referent: Dr. habil. rer. nat. Volker Steinhage
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner

Tag der Promotion: 19. April 2004
Veröffentlicht im März 2005

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Dr. habil. Volker Steinhage, dessen Betreuung für mich und das Entstehen dieser Arbeit von unschätzbarem Wert war. In vielen Gesprächen stand er mir mit Rat und konstruktiver Kritik zur Seite. Ebenso möchte ich mich bei Koreferent Prof. Dr. Wolfgang Förstner für die stets inspirierenden Diskussionen bedanken, von denen diese Arbeit sehr profitiert hat.

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Bündelprojekts „Semantische Modellierung“ ist die vorliegende Arbeit aus dem Teilprojekt „Extraktion von Gebäuden aus digitalen Luftbildern“ hervorgegangen. Ich möchte mich bei den Projektleitern Prof. Dr. Wolfgang Förstner, Prof. Dr. Armin B. Cremers, Prof. Dr. Lutz Plümer, Dr. habil. Volker Steinhage sowie meinen Projektkollegen Dr. Felicitas Lang und Dr. Thomas H. Kolbe für viele konstruktive Diskussionen und die stets angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken.

Diese Arbeit entstand an den Instituten für Informatik I und III der Universität Bonn. Deren Leitern Prof. Dr. Böhling und Prof. Dr. Cremers sowie den Mitarbeitern danke ich für die guten Forschungsbedingungen. Des weiteren danke ich für die hilfreichen Diskussionen Andre Braunmandel, Dr. Roman Englert, Stephan Heuel und Volker Roth.

Meinen Eltern Rosie und Peter Fischer, meinem Bruder Tim Fischer, Gisela Schaaf, Claudia Löwen, den Familien Willm und Hensel sowie allen Freunden danke ich für die nicht-wissenschaftliche Unterstützung. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	3D-Gebäudedaten	8
1.2	Automatisierung der Gebäudeextraktion	9
1.3	Ziel der Arbeit	9
1.3.1	Gebäudemodell	9
1.3.2	Hypothesenkonstruktion	11
1.4	Begleitendes Beispiel	11
1.5	Gliederung	12
2	Generische Gebäudemodellierung	15
2.1	Volumenmodellierungen	16
2.1.1	Primitivinstanziierung	16
2.1.2	Oberflächenrepräsentation	17
2.1.3	Konstruktive Festkörpergeometrie	18
2.2	Repräsentierung durch parametrisierte Komponenten	19
2.2.1	Übersicht	20
2.2.2	Primitive	21
2.2.3	Aggregate	22
2.2.4	Volumenmodell durch Oberflächenbeschreibung	23
2.2.5	Implizite Constraints	24
2.3	Fügeflächen	25
2.3.1	Fügeflächentypen	26
2.3.2	Repräsentierung der Fügeflächen	27
2.3.3	Terminale und Konnektoren	28
2.4	Parametrisierung	28
2.4.1	Nichtlineare Parametrisierung	29
2.4.2	Symbolische Repräsentierung von Koordinaten	30
2.4.3	Auswirkungen der symbolischen Repräsentierung	31
2.4.4	Explizite Constraints	31
2.5	Aggregation	32

2.5.1	Spezialisierte CSG-Operation	33
2.5.2	Gebäudehypothesen	34
2.6	Parameterschätzung	34
2.6.1	Eckenbeobachtungen	34
2.6.2	Startwerte	34
2.6.3	Gleichungssystem	36
2.6.4	Unterschiedliche Parametrisierungen	38
2.6.5	Weiche Constraints	39
2.6.6	Methode der kleinsten Quadrate	39
2.6.7	Levenberg-Marquardt-Verfahren	40
2.7	Bewertung	40
2.7.1	Wert der χ^2 -Zielfunktion	41
2.7.2	Goodness of fit	42
2.7.3	Auftretenswahrscheinlichkeiten	42
2.7.4	Anzahl der nicht erklärbaren Eckenbeobachtungen	42
2.8	Zusammenfassung	42
3	Automatische Hypothesenkonstruktion	44
3.1	Eckenbeobachtungen	45
3.2	Operationen	45
3.2.1	Indizierung	46
3.2.2	Unifizierung	48
3.2.3	Aggregation	50
3.2.4	Prädiktion	51
3.3	Unerklärte Beobachtungen	53
3.3.1	Erkennen von unerklärbaren Beobachtungen	53
3.3.2	Geometrische Analyse	54
3.3.3	Beispiel	54
3.4	Generalisierung	54
3.4.1	Entfernung von Kanten	55
3.4.2	Entfernung von Flächen	56
3.5	Hypothesenkonstruktion	58
3.5.1	Genereller Ablauf	58
3.5.2	Direkte Umsetzung	59
3.5.3	A*-Algorithmus	61
3.5.4	Kombinatorisches Verfahren	68
3.6	Hypothesenbewertung mit MDL-Prinzip	74
3.7	Zusammenfassung	75

4	Ansichtenhierarchien	76
4.1	Aspektgraphen und Aspekthierarchien	77
4.1.1	Aspektgraphen	77
4.1.2	Aspekthierarchien	80
4.2	2D-Modellierung durch Ansichtenhierarchien	82
4.2.1	Ansichtenhierarchie	82
4.3	Sampling des Parameterraums	83
4.3.1	Freie Parameter	83
4.3.2	Parameterraum	84
4.3.3	Äquivalenzrelation	84
4.3.4	Schatten	85
4.3.5	Sampling des Parameterraums	86
4.3.6	Sampling mit fester Unterteilung	87
4.3.7	Sampling mit dynamischer Unterteilung	88
4.3.8	Analytische Berechnung der Partition	89
4.4	Rückprojektion der Hypothesen	91
4.4.1	Zerlegung in Regionen	92
4.4.2	Integration von Sensor- und Beleuchtungsmodell	92
4.4.3	Beleuchtungsmodell	92
4.4.4	Relative Flächenhelligkeiten	93
4.4.5	Schattenwurf	93
4.5	Merkmalsrelationen	94
4.6	Zusammenfassung	94
5	Ergebnisse	95
5.1	Evaluierung	96
5.1.1	Quantitative Evaluierung	97
5.2	Direktes Verfahren	98
5.3	Kombinatorisches Verfahren	98
5.4	Vergleich der Ansätze	99
5.4.1	Vergleich der Laufzeiten	99
5.5	Zusammenfassung	100
6	Einordnung der Arbeit	101
6.1	Parametrisierte Prototypen	101
6.2	Prismatische Modelle	101
6.3	Allgemeine Polyeder	102
6.4	Komponenten	102
6.5	Diskussion	103

7 Zusammenfassung und Ausblick	104
7.1 Automatische Gebäuderekonstruktion	104
7.2 3D-Modellierung durch parametrisierte Komponenten	104
7.3 Verifizierung mittels 2D-Ansichtenhierarchien	105
7.4 Ausblick	105
7.4.1 Primitive mit variablem Grundriß	107
7.4.2 Verfeinerung der Hypothesen	107
7.4.3 Kanten- und Flächenbeobachtungen	107
A Grammatik von symbolischen Ausdrücken	109
B Umwandlung von Constraints in Gleichungen	111
C Goodness of fit	112
C.1 Gamma-Verteilung	112
C.2 χ^2 -Verteilung	112
C.3 χ^2 -Schätzung	113
C.4 Goodness Of Fit	113
D Projektion	115
Literatur	117
Glossar	120

Zusammenfassung

In vielen Anwendungen, wie z.B. dem Aufbau von Mobilfunknetzen oder der Städteplanung, werden verstärkt digitale dreidimensionale Gebäudedaten eingesetzt. Die Erstellung solcher Daten ist Thema dieser Arbeit. Der Fokus liegt auf der automatischen Konstruktion von dreidimensionalen Gebäudehypothesen.

Die gesamte Hypothesenkonstruktion erfolgt bei gegebenen 3D-Beobachtungen vollständig im dreidimensionalen Raum. Um die Automatisierung der Hypothesenkonstruktion zu gewährleisten, muß die eingesetzte Modellierung auf der einen Seite flexibel genug sein, um möglichst viele unterschiedliche Gebäudeformen repräsentieren zu können. Auf der anderen Seite muß der Konstruktionsalgorithmus aber auch durch den intensiven Einsatz von Gebäudewissen geleitet werden, so daß nur sinnvolle Gebäudeformen rekonstruiert werden. Diese beiden Anforderungen werden durch die Zusammenführung von zwei bisher voneinander unabhängigen Modellierungen erfüllt. Die Modellierung mittels Komponenten wird in dieser Arbeit um die symbolische und nichtlineare Parametrisierung der verwendeten Komponenten erweitert. Dadurch können sowohl Form und Struktur als auch rein geometrische Eigenschaften flexibel erstellt werden, so daß die gegebenen Beobachtungen optimal erklärt werden.

Auf der 3D-Modellierung aufbauend wird ein Algorithmus entwickelt, der für die gegebenen Beobachtungen selbständig aus einer Datenbank eine Menge von Komponenten aussucht und diese zu einer Gebäudehypothese zusammensetzt, die die Beobachtungen optimal erklärt. Der Algorithmus konnte die für die Hypothesenkonstruktion benötigte Zeit gegenüber dem in früheren Veröffentlichungen beschriebenen Verfahren deutlich senken. Ein symbolischer Kleinste-Quadrate-Schätzer, der auch Constraints auf den Parametern berücksichtigt, bestimmt die Parameterbelegung der Hypothese und bewertet sie. Werden mehrere Hypothesen erstellt, dann werden sie anhand des Prinzips der kleinsten Beschreibungslänge geordnet.

Da die Verifizierung der erstellten Hypothesen anhand zweidimensionaler Bildmerkmale erfolgt, werden die 3D-Hypothesen vor der Verifizierung in eine 2D-Beschreibung transformiert. Als Modellierung kommt mit der Ansichtenhierarchie eine Weiterentwicklung der Aspekthierarchie zum Einsatz. In einer hierarchischen Graphstruktur werden die 3D-Hypothesen mit ihren 2D-Rückprojektionen verknüpft. Die Rückprojektionen werden in Teile zerlegt, die einzeln mit den Bildmerkmalen identifiziert werden. Diese Dekomposition greift den Ansatz der Modellierung mittels Komponenten wieder auf. Es wird so eine robuste Verifizierung ermöglicht, die die Rückprojektion einer Hypothese auch dann in einem Luftbild wiederfinden kann, wenn Teile von ihr verdeckt sind.

Die automatische Hypothesenkonstruktion und die 3D- und 2D-Modellierung wurden implementiert und erfolgreich auf Testdatensätze angewendet. Dadurch wird die Flexibilität der Modellierung und die Automatisierbarkeit der Hypothesenkonstruktion bestätigt.

Kapitel I

Einleitung

Das Ziel dieser Arbeit ist die automatische Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern. Daher sind sowohl die Modellierung von Gebäuden als auch der automatische Rekonstruktionsvorgang die zentralen Themen der folgenden Kapitel. Die Modellierung erfolgt explizit in 2D und in 3D da zwar die zu rekonstruierenden Gebäude dreidimensional, die Luftbilder, die die Ausgangsdaten für die Rekonstruktion liefern, dagegen zweidimensional sind. Die von mir eingesetzte Repräsentierung von Gebäuden verbindet eine komponentenbasierte Modellierung mit der Parametrisierung der Komponenten. Diese flexible und gleichzeitig gebäudespezifische Modellierung ermöglicht die automatische Generierung von Gebäudemodellen, die optimal bezüglich einer noch näher zu beschreibenden Bewertungsfunktion zu den Daten der Luftbilder passt.

1.1 3D-Gebäudedaten

Die vollautomatische Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern wurde erst durch die rasante Entwicklung von immer leistungsfähigeren Computern in greifbare Nähe gerückt. Durch die Verfügbarkeit von schnellen Rechnern mit großen Speichermengen wurde es möglich hinreichend komplexe Modellierungen und darauf arbeitende Algorithmen zu entwickeln und zu realisieren.

Damit ging einher eine fokussierte Aufmerksamkeit auf Geoinformationssysteme und ein steigender Bedarf an digitalen dreidimensionalen Gebäudedaten in vielen Bereichen.

In der Mobilfunkbranche ergeben sich neue Anwendungen. Hier müssen Netzwerke von Sende- und Empfangsantennen so platziert werden, daß keine Funklöcher aber auch keine Überschneidungen von Gebieten gleicher Frequenz auftreten. Durch Einsatz eines immer feiner granulierten Netzes mit mehr, dafür aber schwächeren Sendern, müssen abschirmende Gebäude immer genauer bekannt sein.

Auch in der Städteplanung und -verwaltung finden digitale 3D-Gebäudedaten mittlerweile Anwendung. Architekten visualisieren geplante Gebäude im aktuellen Umfeld. Feuerwehr und Katastrophenschutz können Einsätze effektiver planen, wenn Höhe und Form von Gebäuden bekannt sind. Auswahl und Anfahrtswege von Einsatzwagen können optimiert werden.

Ein drittes Beispiel ist die automatische Erstellung von Landkarten. Hier ist das Ziel, die zeitlichen Abstände zu senken, in denen aktuelle Karten auf den Markt kommen. In Zukunft, wenn Karten nicht mehr nur auf Papier, sondern auch in digitaler Form verfügbar sind, werden auch zusätzliche Informationen wie z.B. dreidimensionale Gebäudeinformationen an Bedeutung gewinnen.

1.2 Automatisierung der Gebäudeextraktion

Gebäudedaten werden zur Zeit hauptsächlich mit photogrammetrischen Techniken aus Luftbildern abgeleitet. Sie bieten gegenüber satellitengestützten Datenquellen eine höhere Auflösung und bieten einen größeren Überblick als Bilder, die vom Boden aus gemacht werden.

Die Erfassung der Daten und Rekonstruktion von dreidimensionalen Gebäudedaten erfolgt zur Zeit manuell oder halbautomatisch. Das ist langsam und personalaufwendig. Eine vollautomatische Erfassung wird den benötigten Material- und Personalaufwand und die damit verbundenen Kosten senken und zu einer schnelleren Bereitstellung der Daten und schließlich zu einem aktuelleren Datenbestand führen.

Im Rahmen des DFG-Bündelprojekts „Semantische Modellierung“, siehe Förstner (1999) für einen Überblick, wurde im Teilprojekt „Extraktion von Gebäuden aus Digitalen Bildern“ ein Konzept zur Modellierung und Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern entwickelt. Von Braun et al. (1995) wurde eine generische Gebäudemodellierung durch ein komponentenbasiertes und hierarchisches Konzept entworfen. In den Folgearbeiten Fischer, Kolbe und Lang (1997), (1998) und (1999) wird die Modellierung konkretisiert und um ein vollautomatisches Rekonstruktionsverfahren erweitert.

Darauf aufbauend stellt diese Arbeit sowohl eine Modellierung von Gebäuden in 3D und 2D als auch ein darauf beruhendes Verfahren vor, das unter Ausnutzung der Modellierung zu gegebenen Beobachtungen vollautomatisch passende Gebäudehypothesen erstellt und geeignete Daten zu deren Verifizierung bereitstellt.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die vollautomatische Konstruktion von 3D-Gebäudemodellen, die die 2D-Abbildungen in Luftbildern optimal nachbilden.

Da 2D- und 3D-Daten bei der Rekonstruktion eingesetzt werden, ist auch sowohl eine 2D- als auch eine 3D-Repräsentierung von Gebäuden nötig. Außerdem muß die eingesetzte Gebäudemodellierung einerseits sehr flexibel sein um mit der Vielzahl von unterschiedlichen Gebäudeformen umgehen zu können. Andererseits darf nicht jede beliebige Form zugelassen werden, da sonst die Modellierung gebäudeunspezifisch würde. Schließlich muß die automatisch ablaufende Gebäuderekonstruktion von der Modellierung soweit unterstützt werden, daß keine Benutzerinteraktion erforderlich ist.

1.3.1 Gebäudemodell

Die von uns verwendete Gebäudemodellierung besteht aus einem 3D-Teil und einem 2D-Teil. Die 3D-Modellierung wird für die Konstruktion von Gebäudehypothesen eingesetzt, die die aus den Luftbildern abgeleiteten Beobachtungen bezüglich des Prinzips der kürzesten Beschreibungslänge optimal erklären. Die Verifikation der Hypothesen anhand von Bildmerkmalen erfolgt mit Hilfe der 2D-Modellierung. Dazu wird nach abgeschlossener Hypothesenkonstruktion deren 3D-Darstellung in eine 2D-Darstellung überführt.

1.3.1.1 3D-Modellierung

Die 3D-Modellierung wird für die Konstruktion von Gebäudehypothesen eingesetzt. Zu einer vorgegebenen Menge von Beobachtungen soll eine Hypothese konstruiert werden, die die Beobachtungen optimal beschreibt.

Komponenten und Aggregation. Gebäudehypothesen werden aus einfacheren Komponenten zusammengesetzt. Verschiedenartige Komponenten können flexibel miteinander verbunden werden. Dieser konstruktive Ansatz ermöglicht die Modellierung vielfältiger Grundriß und Dachformen.

Die Verbindung der Komponenten erfolgt über standardisierte Flächen, die die Funktion von Steckern und Buchsen erfüllen. Dadurch kann die Hypothesenkonstruktion vollautomatisch erfolgen.

Bei den Komponenten handelt es sich schon um relativ komplexe Teile von Gebäuden, die im allgemeinen die Abschlüsse von Gebäudetrakten und die Verbindung von zwei oder mehr unterschiedlich orientierten Trakten repräsentieren. Die Auswahl der zur Verfügung stehenden unterschiedlichen Komponenten erfolgt in Abhängigkeit der jeweiligen Anwendung. Durch Anzahl und Art der Komponenten wird die Vielfältigkeit der Modellierung aber auch die Komplexität der Rekonstruktion gesteuert.

Domänenspezifische Parametrisierung. Die verwendeten Komponenten sind parametrisiert. Neben der Modellierung mittels Komponenten sorgt deren Parametrisierung für weitere Flexibilität durch Variabilität der Geometrie. Die Parametrisierung hat die folgenden wichtigen Eigenschaften:

Domänenspezifische und intuitiv erfaßbare Parameter. Die Parameter sind domänenspezifische und intuitiv erfaßbare Größen, wie z.B. die Breite oder Länge eines Hauses oder dessen Dachneigung. Dadurch wird für den Operateur die Erstellung der Komponenten und die Analyse der rekonstruierten Gebäude vereinfacht.

Nichtlineare Parametrisierung. Die Parametrisierung der Komponenten ist nicht auf lineare Abhängigkeiten von den Parametern eingeschränkt, sondern darf nichtlinear sein. Das erlaubt z.B. den Einsatz von trigonometrischen Funktionen und ermöglicht etwa den Einsatz von Winkeln zur Parametrisierung von Dachneigungen.

Constraints. Constraints auf den Parametern kontrollieren die durch die Parametrisierung erzeugte Flexibilität und lassen nur gebäudetypische Werte der Parameter in einer gültigen Kombination zu. Dadurch können z.B. Gartenhäuschen, die zwar eine gebäudetypische Form, aber eine zu geringe Größe haben, von der Modellierung ausgeschlossen werden.

Symbolische Parametrisierung. Um die automatische Konstruktion der Gebäudehypothesen zu ermöglichen, erfolgt die Parametrisierung der Komponenten symbolisch. Mit den Werkzeugen der Computeralgebra können parametrisierte Ausdrücke nach Bedarf automatisch umgeformt werden. Die so erreichte Trennung der Kodierung der Komponenten vom Konstruktionsalgorithmus trägt zur Modularisierung der Hypothesenrekonstruktion bei: Die Datenbasis der verwendeten Komponenten kann ohne Änderung des Konstruktionsalgorithmus modifiziert werden.

Gebäude können in 3D also sehr flexibel modelliert werden, bezüglich sowohl ihrer topologischen Struktur als auch ihrer Geometrie. Gleichzeitig werden die konstruierbaren Hypothesen auf Gebäude mit sinnvollen Formen und Abmessungen beschränkt. Das schon erwähnte Gartenhäuschen wird aufgrund der zu kleinen Abmessungen zurückgewiesen. Ein typisches Auto kann wegen seiner Form durch keine gebäudetypischen Komponenten repräsentiert werden. Ein großer Lastwagen kann aber durchaus eine Herausforderung für die Rekonstruktion darstellen und etwa als Bungalow mit Flachdach erkannt werden.

1.3.1.2 2D-Modellierung

Die 2D-Modellierung wird zur Verifizierung der konstruierten Gebäudehypothesen eingesetzt. Da die zur Verifizierung verwendeten Bildmerkmale zweidimensional sind, werden die 3D-Hypothesen für die Verifizierung in eine 2D-Modellierung transformiert.

Ansichtenhierarchien. Eine Ansichtenhierarchie repräsentiert in einer hierarchischen Graphstruktur für ein bestimmtes Luftbild alle erstellten Gebäudehypothesen. Die Knoten des Graphen bilden drei Ebenen. Die oberste Ebene wird durch alle generierten 3D-Gebäudehypothesen gebildet. Die mittlere Ebene enthält die 2D-Rückprojektionen in das Luftbild. In der unteren Ebene stehen die Regionen, die durch Zerlegung der Ansichten entstehen. Die Regionen sind mit Relationen derart versehen, so daß sie ein relationales Matching mit den Bildmerkmalen ermöglichen. Die

Repräsentierung einer Ansicht durch ihre Komponenten führt zu einer robusten Erkennung der Ansicht auch bei verrauschten Bildern. Zusätzlich werden in die Ansichtshierarchien radiometrische Eigenschaften und der Schattenwurf der Hypothesen aufgenommen. Diese Informationen werden als zusätzliche Relationen durch das Matching verwendet.

Sampling von freien Parametern. Nach der Hypothesenkonstruktion sind im allgemeinen nicht alle Parameter fest bestimmt. Um die Verifizierung der Hypothesen durch Matching der Rückprojektionen mit den Bildmerkmalen zu ermöglichen, wird der durch die freien Parameter aufgespannte Parameterraum in Regionen mit äquivalenten Ansichten aufgeteilt. Für jede dieser Äquivalenzregionen wird eine Ansicht in die Ansichtshierarchie eingefügt. Die Äquivalenzregionen werden mit einem Samplingansatz ermittelt, der für jede Anzahl von freien Parametern einsetzbar ist.

1.3.2 Hypothesenkonstruktion

Das Ziel dieser Arbeit, die automatische Gebäuderekonstruktion, wird durch die schrittweise Verbindung von Komponenten zu immer komplexer werdenden Gebäudeteilen und schließlich zu Gebäudehypothesen erreicht. Für die Bereitstellung der richtigen Komponenten und deren Verbindung werden die folgenden vier Operationen eingesetzt:

Indizierung. Indizierungsoperationen stellen die Verbindung zwischen Beobachtungen und Gebäudemodell her. Die zu einer Beobachtung passenden Komponenten werden aus einer gegebenen Datenbasis herausgesucht und instantiiert.

Unifizierung. Gleichartige, von unterschiedlichen Beobachtungen instanziierte Komponenten werden miteinander unifiziert, wenn sie den gleichen Raum einnehmen.

Aggregation. Gebäudeteile werden über genormte Verbindungsflächen, die sogenannten *Fügeflächen*, miteinander zu komplexeren Gebäudeteilen und schließlich zu Gebäudehypothesen verbunden.

Prädiktion. Wenn Gebäudeteile wegen fehlender Beobachtungen nicht instantiiert werden können, werden die entstehenden Lücken durch Prädiktion der fehlenden Teile geschlossen.

Durch die symbolische Parametrisierung der Komponenten und deren damit möglichen automatischen Bearbeitung können die Parametrisierungen von Gebäudeteilen, die miteinander unifiziert oder aggregiert werden, auf das von dieser Operation erzeugte Gebäudeteil übertragen werden. Die durch die Indizierung hergestellte Verbindung zu den Beobachtungen erlaubt darüber hinaus die Schätzung der Parameter der neuen Gebäudeteile. Ein Kleinste-Quadrate-Verfahren liefert die Parameterbelegungen, die für eine optimale geometrische Übereinstimmung von Beobachtungen und korrespondierenden Teilen der Modelle sorgen.

Die Aufgabe des von uns eingesetzten Konstruktionsalgorithmus ist die richtige Auswahl und Reihenfolge der zum Einsatz kommenden Operationen. Da die Operationen und die anschließende Parameterschätzung sehr rechenaufwendig sind, hat der Algorithmus die Aufgabe, mit der minimalen Anzahl von Operationen eine Hypothese zu konstruieren, die die gegebenen Beobachtungen optimal erklärt.

1.4 Begleitendes Beispiel

Für die Illustration der Gebäudemodellierung und Hypothesenkonstruktion wird uns ein Beispiel begleiten, das jetzt kurz vorgestellt werden soll. Aus dem internationalen Testdatensatz Avenches-Wohnort (s. Abb. 1.1, links), der vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich für den Workshop *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 1995*, bereitgestellt wurde, wurde das mit H3 bezeichnete Gebäude ausgewählt. Abbildung 1.1 zeigt auf der



Abbildung 1.1: Ausschnitt aus dem Avenches-Datensatz. Das mit H3 bezeichnete Haus wird uns als Beispiel durch diese Arbeit begleiten. Auf der rechten Seite sind vergrößerte Ausschnitte aus vier Luftbildern zu sehen.

rechten Seite die Ausschnitte aus den vier zur Verfügung stehenden Luftbildern, die Haus H3 aus leicht unterschiedlichen Richtungen zeigen.

In Abbildung 1.2 ist die Gebäudehypothese für Haus H3 dargestellt, die mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren rekonstruiert wurde. Die Geschoßhöhe des Hauses konnte nicht aus den Bildern bestimmt werden, wurde aber für die Visualisierung auf einen Defaultwert gesetzt. Die betroffenen Kanten sind gestrichelt dargestellt. Verschieden Details des Hauses, wie etwa die abgeschnittene Ecke, die in den Luftbildern sichtbar sind, finden sich in der Hypothese nicht wieder. Das geht auf die generalisierende Modellierung zurück und wird später noch erläutert.

Anhand der aus den Luftbildern extrahierten Beobachtungen, in diesem Beispiel durch sechs Dreibeine gegeben, zeigt Abbildung 1.3 wie das H3-Haus aus vier parametrisierten Komponenten zusammengesetzt wird. Auf der linken Seite sind die Komponenten abgebildet, bevor sie zum Gebäudemodell zusammengesetzt werden. Der zentrale Konnektor mit T-förmigem Grundriß führt drei Trakte mit zwei unterschiedlichen Firsthöhen zusammen. Die Trakte werden durch zwei Satteldach- und ein Krüppelwalmdach-Endstück abgeschlossen. Die rechte Seite zeigt das fertige Modell zusammen mit den zugeordneten Beobachtungen. Durch eine Kleinste-Quadrate-Schätzung wurde die Belegung der Parameter bestimmt.

1.5 Gliederung

Diese Arbeit besteht im Wesentlichen aus drei Teilen, die in jeweils einem Kapitel beschrieben werden:

Kapitel 2: 3D-Modellierung. Nach dieser Einleitung folgt im ersten Teil eine Beschreibung der 3D-Modellierung. Die Aufgabe der 3D-Modellierung ist die einerseits flexible und andererseits domänenspezifische Modellierung von Gebäuden. Ihre Flexibilität erlaubt die Repräsentierung von vielen unterschiedlichen Gebäudeformen. Gleichzeitig bleiben die durch die Modellierung erfaßten Objekte auf die Domäne der Gebäude beschränkt. Schließlich ermöglicht, unterstützt und leitet sie die automatische Generierung von Gebäudehypothesen .

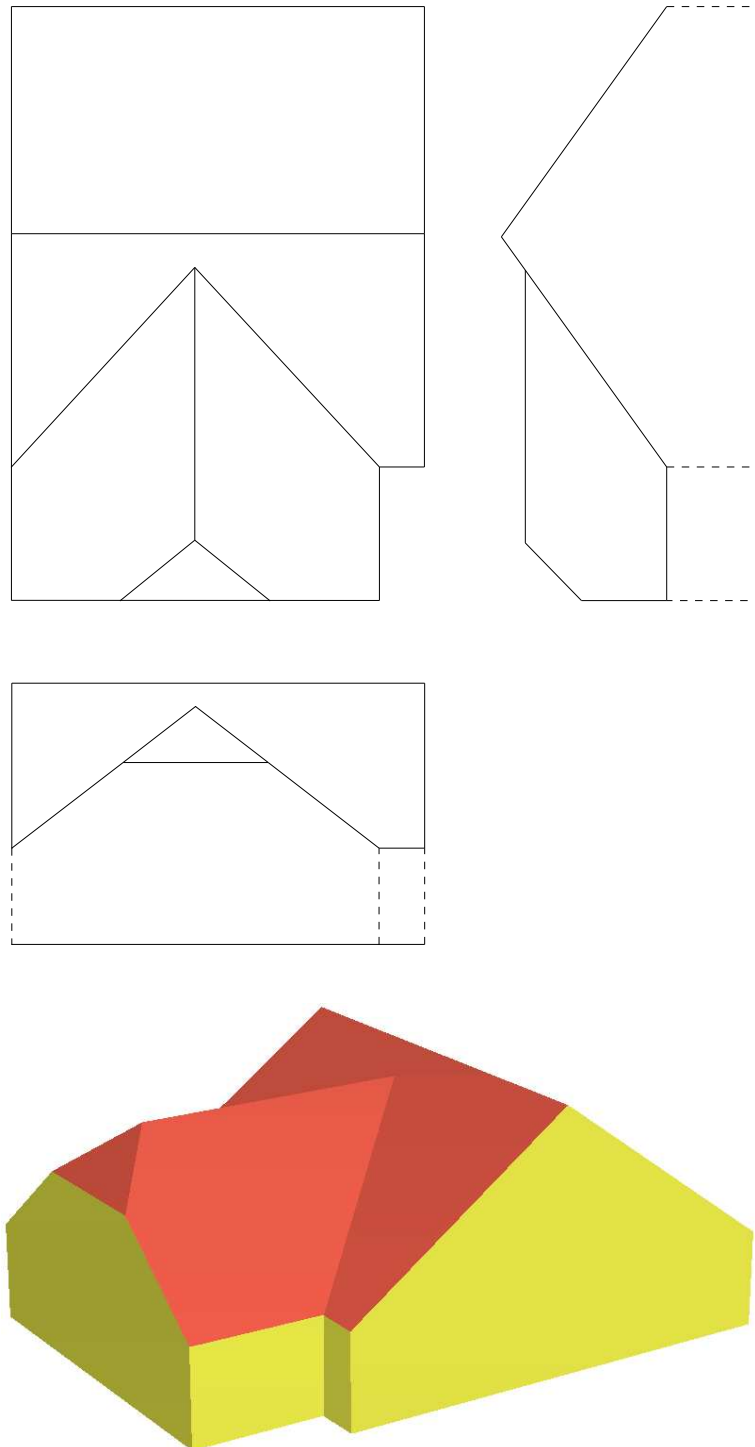


Abbildung 1.2: Aus den vier Luftbildern in Abb. 1.1 wurde diese Gebäudehypothese mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren konstruiert. Da die Geschößhöhe nicht aus den Bildern abgeleitet werden konnte, wurde sie für die Visualisierung auf einen Defaultwert gesetzt. Die entsprechenden Kanten sind gestrichelt dargestellt.

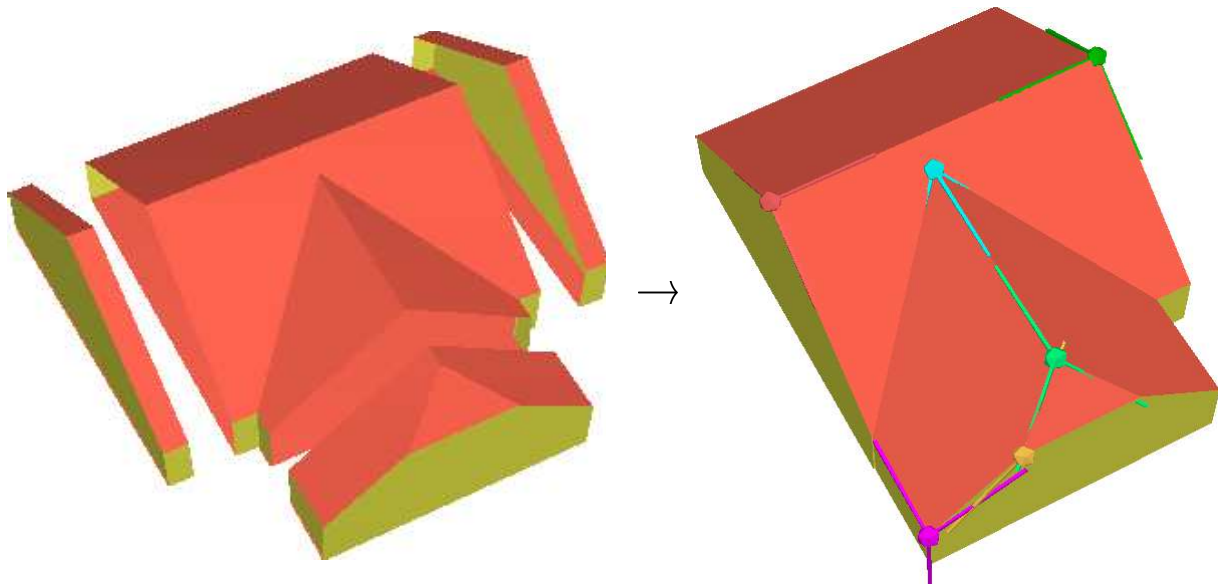


Abbildung 1.3: Links: Das H3-Haus wird mit vier Komponenten modelliert. Der T-Konnektor im Zentrum wird durch zwei Satteldach- und ein Krüppelwalmdach-Endstück abgeschlossen. Rechts: Über die zugeordneten Beobachtungen, die in diesem Beispiel durch sechs Dreibeine gegeben sind, werden über eine Parameterschätzung die Parameter bestimmt, die die Größe der einzelnen Gebäudeteile festlegen.

Kapitel 3: Hypothesenkonstruktion. Die 3D-Modellierung wird im zweiten Teil zur automatischen Konstruktion von Hypothesen von in den Luftbildern sichtbaren Gebäuden eingesetzt. Ausgehend von gegebenen Beobachtungen werden Gebäudehypothesen generiert, die diese Beobachtungen optimal erklären.

Kapitel 4: 2D-Modellierung. Für die Verifizierung der 3D-Hypothesen anhand von 2D-Bildmerkmalen werden die Hypothesen in eine 2D-Darstellung transformiert. Diese im dritten Teil vorgestellte 2D-Modellierung erlaubt die Verifizierung auch bei Verdeckungen in den Luftbildern. Durch Anwendung von sogenannten Ansichtenhierarchien erfolgt eine Erkennung mittels Komponenten (*recognition by components*).

Abschließend folgen in Kapitel 5 eine Besprechung der Ergebnisse der Hypothesenkonstruktion, der Vergleich mit anderen Arbeiten in Kapitel 6 und die Zusammenfassung mit Ausblick in Kapitel 7.

Kapitel 2

Generische Gebäudemodellierung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Modellierung von dreidimensionalen Gebäuden hat zwei wesentliche Eigenschaften. Erstens werden Gebäude aus relativ einfachen aber gleichzeitig domänenspezifischen Komponenten zusammengesetzt. Wie in einem Baukastensystem werden sie über genormte Schnittstellen miteinander verbunden. Dadurch können schon mit einer kleinen Zahl von unterschiedlichen Komponenten komplexe Gebäude modelliert werden.

Zweitens sind die Komponenten mit gebäudespezifischen Parametern versehen. Dies sind intuitiv erfassbare Größen – wie Breite und Höhe eines Gebäudetraktes – oder die Neigung eines Daches. Parametrisierungen werden bei der Verbindung von Komponenten aneinander angepaßt und auf das Resultat übertragen. Neue Parameter können im Verlauf der Hypothesenkonstruktion in das Modell aufgenommen werden.

Die Komponentenmodellierung und die Parametrisierung wirken sich vielfältig auf Modellierung und Konstruktion von Gebäudehypothesen aus. Sie erzeugen eine Generik, die die flexible Repräsentation von Gebäuden erlaubt. Es kann sowohl die Struktur von Grundriß und Dachform als auch die geometrische Ausprägung von Gebäudehypothesen an gegebene Beobachtungen angepaßt werden.

Dieser Generik stehen explizit definierte und domänenspezifische Constraints gegenüber, die dafür sorgen, daß nur Gebäude modelliert werden und keine anderen Objekte, die auf Luftbildern sichtbar sind. Diese Constraints definieren zum einen den Wertebereich der Parameter und sorgen dafür, daß die Parameter bestimmte Werte nicht über- oder unterschreiten. Zum anderen werden Relationen zwischen den Parametern definiert, die zu allen Zeiten eingehalten werden müssen. Gebäudeartige Objekte wie ein Gartenhaus werden als zu klein erkannt und fallen durch das Raster der Modellierung. Objekte wie Autos oder Bäume werden von der Modellierung zurückgewiesen, da ihre Formen nicht zu den gebäudespezifischen Komponenten passen.

Der Preis für die erfolgreiche Zusammenführung der beiden Modellierungsansätze ist die anspruchsvolle Realisierung durch einen implementierbaren Algorithmus zur Konstruktion von Hypothesen zu gegebenen Beobachtungen. Die Parametrisierungen der Komponenten ist nichtlinear und wird symbolisch repräsentiert, um zum einen die Verwendung von intuitiven Parametern zu ermöglichen und bei der Erstellung der Komponenten nicht einzuschränken. Zum anderen kann die Datenbank der Komponenten auch zur Laufzeit um weitere Gebäudeteile erweitert werden. Schließlich kann die Parametrisierung von Komponenten auf die daraus zusammengesetzten Aggregate automatisch übertragen werden.

Die Verbindung der Komponenten wird durch eine spezialisierte CSG-Operation realisiert. Es handelt sich dabei um eine schnittfreie Vereinigung, bei der die Parametrisierungen der Argumente aneinander angepaßt und in das Ergebnis propagiert werden. Diese Eigenschaften machen die automatische Konstruktion von Hypothesen möglich, die eine gegebene Menge von Beobachtungen erklären.

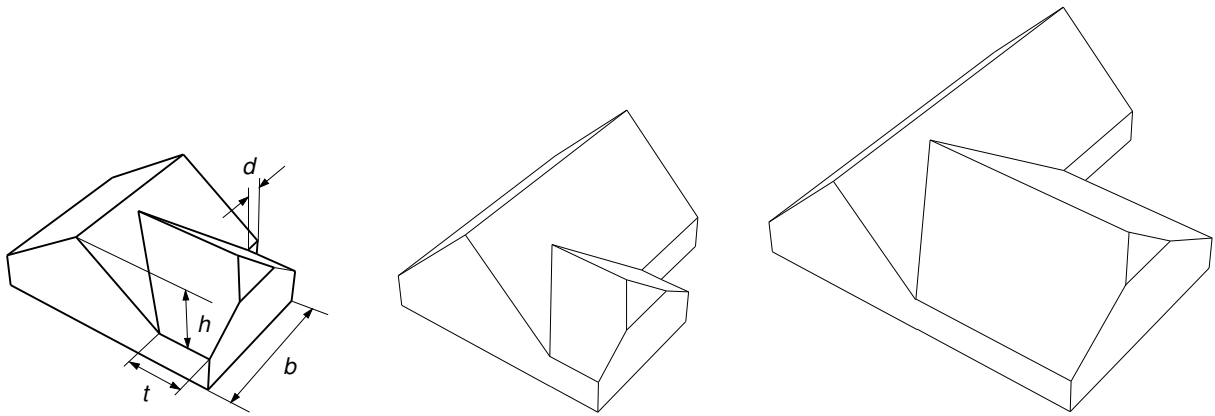


Abbildung 2.1: Drei Instanzen eines Primitivs mit Form des H3-Hauses. Links sind die drei Parameter dargestellt, deren Werte variiert wurden.

Zusammenfassend sind die wichtigsten Eigenschaften der 3D-Modellierung:

- Flexible Modellierung von Topologie **und** Geometrie
- Parametrisierung der Gebäudeteile ist **gebäudespezifisch**, **nichtlinear** und **symbolisch**.
- Aufnahme von neuen Parametern während der Rekonstruktion
- Explizit definierte und domänenspezifische Constraints
- Spezialisierte CSG-Operationen

2.1 Volumenmodellierungen

Für räumliche Objekte und insbesondere Gebäude, gibt es verschiedene Arten der Repräsentierung. Die im Zusammenhang mit dieser Arbeit wichtigsten sind die Primitivinstanziierung, die Oberflächenrepräsentation und die konstruktive Festkörpergeometrie. Eine vollständigere Übersicht findet sich in (Foley, van Dam, Feiner und Hughes 1990).

2.1.1 Primitivinstanziierung

Bei der Primitivinstanziierung sind die repräsentierbaren Objekte Instanzen von einer endlichen Anzahl von vorgegebenen Primitiven. Die Primitive sind parametrisiert. Während der Instanziierung werden die Parameter mit Werten belegt. Die Auswahl eines geeigneten Primitivs führt zu einer begrenzten Formvariabilität. Eine Form, die nicht durch ein Primitiv abgedeckt wird, kann aber auch nicht repräsentiert werden. Die Parametrisierung der Primitive führt zu einer besseren Variabilität der Geometrie. Durch domänenspezifische Constraints werden die Wertemengen der Parameter eingeschränkt. Dadurch wird gewährleistet, daß nur solche Instanzen zugelassen werden, die bezüglich der Domäne der Gebäude sinnvolle Größen haben.

Abbildung 2.1 zeigt drei Instanzierungen eines Primitivs mit der Form des H3-Hauses. Die Parameterwerte auf der linken Seite entsprechen den rekonstruierten Werten. Dieses Beispiel zeigt ein Problem der Primitivinstanziierung. Um in einer realen Anwendung Häuser mit der Komplexität wie dem abgebildeten in ausreichendem Umfang modellieren zu können, sind sehr viele Primitive nötig. Unterschiedliche Grundrisse, Anschlüsse zwischen den einzelnen Teildächern oder etwa Abschlüsse der Dächer (in der Abbildung sind zwei Satteldachenden und ein Krüppelwalmdachende zu sehen) führen zu einer Vielzahl von Primitiven, von denen dann aber vielleicht nur ein kleiner Anteil wirklich gebraucht wird. Informationen, die während der Gebäuderekonstruktion gesammelt werden, können nicht verwendet werden um die Primitive zu verändern.

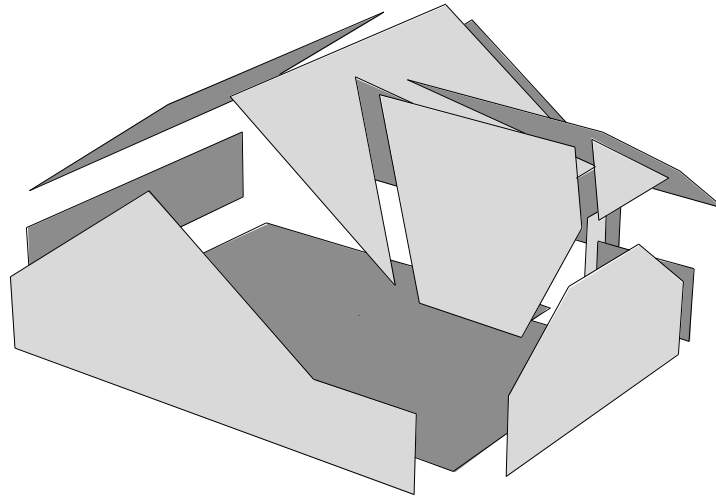


Abbildung 2.2: Oberflächenrepräsentation des H3-Hauses. Außenseiten sind hell, Innenseiten sind dunkel dargestellt.

2.1.2 Oberflächenrepräsentation

Die Oberflächenrepräsentation (engl. *boundary representation*, kurz Brep) eines Objekts besteht in der Beschreibung seiner geschlossenen Oberfläche. Die Oberfläche kann, wie z.B. im Fall der Kugel, durch eine einzelne Funktion beschrieben werden, eine mächtigere Modellierung erreicht man aber durch das Zusammensetzen von unterschiedlichen Teilflächen. Wenn die Teilflächen ausschließlich planar sind, handelt es sich um Polyeder. Allgemeinere Formen sind durch die Verwendung von Freiformflächen möglich. Im Hinblick auf die Gebäudemodellierung beschränken wir uns hier aber auf stückweise planare Oberflächen.

Damit die Oberflächenrepräsentation zu einer Volumenmodellierung wird, muß die Oberfläche geschlossen sein. Das ist dann der Fall, wenn jeder Randpunkt von jeder Teilfläche (im Folgenden kurz Fläche genannt) zu genau zwei Flächen benachbart ist. Da alle Flächen planar sind, folgt damit, daß die Ränder der Flächen aus geraden Kanten bestehen, die an ihren Endpunkten, auch Eckpunkt genannt, miteinander verbunden sind, und daß jede Kante zum Rand von genau zwei Flächen gehört. Das schließt übrigens nicht aus, daß Flächen Löcher haben dürfen. Sie haben dann einen zusätzlichen inneren Rand, der auch zu jeweils zwei Flächen gehört.

Die Forderung nach einer geschlossenen Oberfläche hat zur Folge, daß deren Innen- und Außenseite definiert sind. Außerdem kann für jeden Raumpunkt entschieden werden, ob er im Inneren oder im Äußeren eines Objekts oder auf dessen Oberfläche liegt.

Abbildung 2.2 visualisiert die Oberflächenbeschreibung des H3-Hauses. Je nachdem, ob die Innen- oder die Außenseite einer Fläche zu sehen ist, sind die Flächen hell bzw. dunkel gefärbt. Das Haus besteht aus 12 Flächen, 29 Kanten und 19 Eckpunkten.

Wenn, wie oben gefordert, jede Kante zum Rand von genau zwei Flächen gehört und sich zusätzlich die Oberfläche nicht selbst schneidet oder berührt, dann bildet die gesamte Oberfläche eine 2-Mannigfaltigkeit. Jeder Punkt der Oberfläche, unabhängig davon ob er auf dem Rand oder im Inneren einer Fläche liegt, kann zusammen mit einer ϵ -Umgebung mit einer offenen Kreisscheibe des \mathbb{R}^2 identifiziert werden. Diese Eigenschaft ist unter anderem deswegen wichtig, da so eine Reihenfolge auf den Kanten definiert werden kann, die einen gemeinsamen Eckpunkt haben. Durch die Identifizierung mit einer Kreisscheibe im \mathbb{R}^2 kann jeder Objektkante ein Strahl mit Startpunkt im Zentrum der Kreisscheibe und damit ein Winkel zugeordnet werden. Diese Winkel definieren dann die Reihenfolge.

Im Gegensatz zur beschränkten Variabilität der Primitivinstanziierung ist der Freiheitsgrad der Oberflächenbeschreibung im Kontext der Gebäuderekonstruktion zu hoch. Die wenigen Einschränkungen,

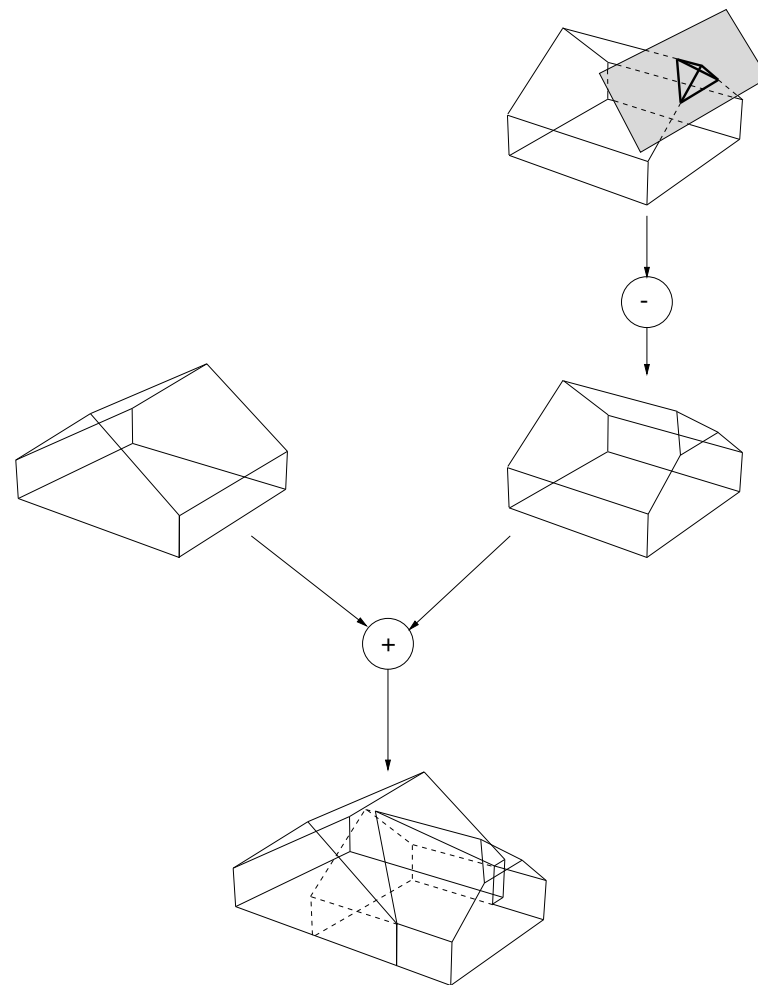


Abbildung 2.3: CSG-Baum zur Konstruktion des H3-Hauses. Zwei Primitive werden miteinander vereinigt. Von einem wird vorher eine Ecke abgeschnitten, um eine Krüppelwalmdachform zu erreichen.

die es gibt, sind nicht domänenspezifisch. Das führt dazu, daß auch Objekte, die deutlich von der künstlich erzeugten Form von Gebäuden abweichen, repräsentiert werden können und nachträglich erkannt und verworfen werden müssen.

2.1.3 Konstruktive Festkörpergeometrie

Wie die Primitivinstanziierung setzt auch die konstruktive Festkörpergeometrie (engl. *constructive solid geometry*, CSG) auf Primitiven auf. Diese können hier jedoch zusätzlich durch geometrische Operationen modifiziert und durch Mengenoperationen miteinander verknüpft werden. Als Mengenoperationen kommen Vereinigung, Durchschnitt und Differenz zum Einsatz.

In Abbildung 2.3 wird das H3-Haus durch zwei CSG-Operationen aus zwei ähnlichen Primitiven erzeugt (geometrische Operationen wie Skalierung, Rotation und Translation werden wegen der besseren Übersichtlichkeit nicht gezeigt). Zuerst wird von einem Primitiv, durch Differenzbildung mit einer Halbebene, eine Ecke abgeschnitten. Anschließend werden die beiden Gebäudeteile miteinander vereinigt.

Ähnlich wie die Oberflächenrepräsentierung ist auch hier der Freiheitsgrad der Modellierung sehr hoch. Durch Einschränkung der verwendeten Primitive auf gebäudespezifische Objekte kann sowohl

Gebäudewissen in die Modellierung einfließen als auch der Freiheitsgrad beschränkt werden. Es bleiben aber die sehr komplexen Mengenoperationen und das Problem, die richtigen Operationen zu finden, um ein gewünschtes Resultat zu erhalten. Zum Beispiel hätte in dem Beispiel in Abbildung 2.3 statt der Differenz auch der Durchschnitt mit der entgegengesetzten Ebene gebildet werden können. Oder die Reihenfolge der Differenz und der Vereinigung könnte, bei gleichem Resultat, vertauscht werden. Darüber hinaus sind in der Gebäuderekonstruktion nur die sichtbaren Gebäudeteile interessant. Die dafür nötige Überführung einer CSG-Repräsentierung in eine Oberflächenrepräsentierung ist aber ein sehr komplexer und aufwendiger Vorgang.

2.2 Repräsentierung durch parametrisierte Komponenten

Jede der drei vorgestellten Modellierungen – Primitivinstanziierung, Oberflächenrepräsentierung und konstruktive Festkörpergeometrie – hat in der Anwendung zur Gebäudemodellierung große Nachteile. Um diese zu vermeiden und die Stärken der jeweiligen Repräsentierung zu vereinigen, wird in dieser Arbeit eine Modellierung eingesetzt, die eine Kombination der drei Ansätze darstellt. Die von der jeweiligen Modellierung übernommenen Eigenschaften sind:

Primitivinstanziierung Die von uns eingesetzten Komponenten sind parametrisiert aber im Gegensatz zu den Primitiven der Primitivinstanziierung handelt es sich dabei nicht um ganze Gebäude sondern um Gebäudeteile.

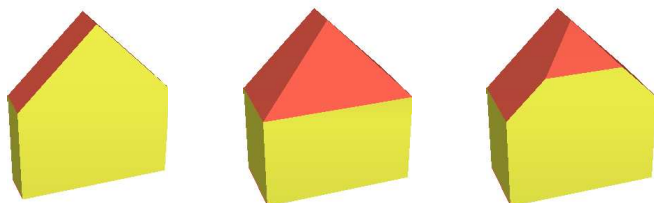
Konstruktive Festkörpergeometrie Die Komponenten werden während der eigentlichen Rekonstruktionsphase mit einer spezialisierten CSG-Operationen zu vollständigen Gebäuden zusammengesetzt. Die spezialisierte Vereinigung fügt jeweils zwei Gebäudeteile schnittfrei zusammen. Die Gebäudeteile besitzen dazu genormte Schnittstellen, die sogenannten *Fügeflächen*, über die sie miteinander verbunden werden. Die Parametrisierung der Gebäudeteile wird beibehalten und während der Vereinigung aneinander angepaßt.

Oberflächenrepräsentierung Die Oberflächenrepräsentierung stellt eine *low-level* Modellierung der Gebäudeteile und der aus ihnen konstruierten Gebäude dar. Erweitert um die Parametrisierung der Eckpunkte ist mit ihr eine einfache und konsistente Modifizierung der modellierten Objekte möglich. Die spezialisierte CSG-Vereinigung ist so definiert, daß die Oberflächen von zwei zu verbindenden Gebäudeteilen zu einer einzigen Oberfläche vereinigt werden können.

Gegenüber den einzelnen Repräsentationsformen hat die von uns verwendete Modellierung die folgenden Vorteile:

- Die Verwendung von Gebäudeteilen und deren Kombination zu Gebäudehypothesen in der Rekonstruktionsphase führt zu einer flexiblen Modellierung der Topologie von Grundriß und Dachform und damit zur Repräsentierung von komplexen Gebäuden. Das ist bei Einsatz von vollständigen Gebäudeformen als Primitive nicht möglich.
- Durch die Parametrisierung kann neben der eigentlichen Form auch die geometrische Ausprägung von Gebäudeteilen oder ganzen Gebäuden an gegebene Beobachtungen angepaßt werden.
- Ein weiterer Vorteil der Parametrisierung ist die Möglichkeit, die Werte der verwendeten gebäudespezifischen Parameter wie Höhe, Breite, Tiefe oder Dachneigung, direkt aus der Repräsentation ablesen zu können.
- Mit der Oberflächenrepräsentierung steht eine Modellierung zur Verfügung,
 - mit der die schnittfreie Vereinigung unkompliziert realisierbar ist,
 - die einfach um die Parametrisierung erweitert werden kann,
 - die einen schnellen Zugriff auf Eckpunkte, Kanten und Flächen erlaubt
 - und in die zusätzliches Gebäudewissen aufgenommen werden kann.

Terminale:



Konnektoren:

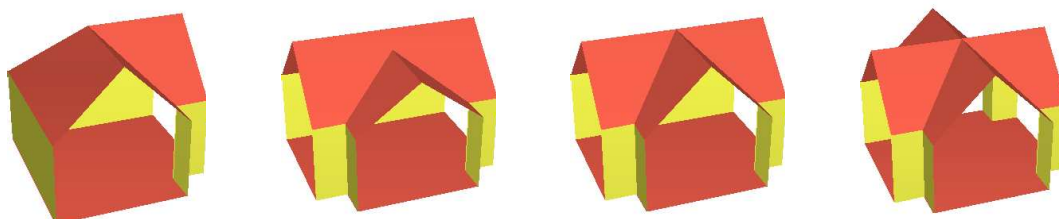


Abbildung 2.4: Terminale repräsentieren unterschiedliche Dachabschlußformen, Konnektoren modellieren unterschiedliche Arten der Verbindung zwischen mehreren Gebäudetrakten. Hier sind Konnektoren für zwei, drei und vier Trakte zu sehen. Die beiden mittleren unterscheiden sich durch die Firsthöhe des nach vorne verlaufenden Nebentraktes. Links ist sie kleiner als die des Haupttraktes, rechts sind die beiden Firsthöhen gleich hoch.

Mit Gebäudemodellierung durch parametrisierte Komponenten können also sowohl Gebäude flexibel in Struktur und Geometrie nachgebildet als auch einfach erzeugt und modifiziert werden. In den folgenden Abschnitten wird sie detailliert beschrieben.

2.2.1 Übersicht

Gebäude werden aus Komponenten zusammengesetzt. Diese Komponenten sind Teile von Gebäuden, die eine semantische Einheit darstellen. Gebäudeteile schließen entweder einen Gebäudetrakt ab oder verbinden zwei oder mehr unterschiedlich orientierte Trakte (der Begriff *Trakt* wird in dieser Arbeit umgangssprachlich für einen Gebäudeteil verwendet, der ein durchgehendes Dach hat und einen rechteckigen Grundriß besitzt) miteinander. Sie werden auch *Terminale* bzw. *Konnektoren* genannt. Terminale und Konnektoren kapseln bestimmte Eigenschaften der Gebäudedächer. Terminale haben die Aufgabe bestimmte Dachabschlußformen zu repräsentieren. Für Satteldächer gibt es zum Beispiel die in Abbildung 2.4 dargestellten Endstücke mit vertikaler Firstfläche, Walmdach- oder Krüppelwalmdachenden. Konnektoren modellieren die verschiedenen Möglichkeiten der Verbindung zwischen mehreren Trakten. Unterschiede entstehen durch die Anzahl der Trakte, aber auch durch Eigenschaften wie z. B. die Firsthöhen der Trakte. Die beiden T-förmigen Konnektoren von je drei Trakten in der Mitte der unteren Reihe unterscheiden sich durch die Höhe des Nebentraktes. Links ist sie kleiner als die Höhe des Haupttraktes, rechts sind die beiden Höhen gleich.

Die Komponenten werden über genormte Interfaces, die sogenannten *Fügeflächen*, miteinander verbunden. Dadurch muß nicht für jede Kombination von zwei Komponenten in einer Liste vermerkt werden, ob und wie diese miteinander verbunden werden können. Es ist nur eine sehr viel kleinere Liste nötig, die bzgl. der Anzahl der Komponenten konstante Länge hat, in der für jede Fügefläche die Menge von Fügeflächen eingetragen wird, mit denen sie verbunden werden kann. Auch der Algorithmus, der die spezialisierte CSG-Vereinigung realisiert, braucht so kein Wissen über alle Komponenten, sondern nur über deren Fügeflächen. Die Menge der Komponenten kann so, auch zur Laufzeit, erweitert werden, ohne irgendeinen Algorithmus verändern zu müssen.

Bei Fügeflächen handelt es sich um Auszeichnungen von vollständigen Flächen, die in der Oberflächenbeschreibung eines Objekts schon vorhandenen sind. Damit die Aggregation von Gebäudeteilen automatisch durchgeführt werden kann, müssen für alle Fügeflächen bestimmte Informationen bekannt sein. Diese werden während der Modellierung der Primitive bereitgestellt und während der Aggregation auf die neuen Gebäudeteile propagiert. Es ist daher nicht möglich Gebäudeteile über beliebige Flächen, die diese Informationen nicht beinhalten, oder sogar nur Teile von solchen Flächen miteinander zu verbinden. Es handelt sich bei der Aggregation also weniger um ein „Verkleben“ als vielmehr um ein „Zusammenstecken“ über vordefinierte Steckverbindungen.

Die einzelnen Komponenten sind mit gebäudetypischen Parametern parametrisiert. Das sind z.B. Breite, Geschoßhöhe oder Dachneigung. Die konkret verwendete Parametrisierung hängt vom jeweiligen Gebäudeteil ab.

Durch die Kombination von unterschiedlichen Komponenten lassen sich Gebäude mit fast beliebiger Erscheinungsform modellieren. Allerdings konzentriert sich die Modellierung auf die Repräsentierung von Gebäuden, die aus bekannten und wiederkehrenden Grundstrukturen zusammengesetzt sind. Je eigentümlicher und individueller die zu modellierenden Gebäude sind, desto größer muß die verwendete Datenbasis von Komponenten sein. Das widerspricht dem Grundgedanken, mit einer kleinen Menge von Komponenten eine große Anzahl von Gebäuden zu modellieren. Darum fokussiert diese Arbeit auf die Modellierung und Rekonstruktion von für eine Gegend typischen und dort häufig vorkommenden Gebäudeformen.

Die vorgestellte 3D-Modellierung hat ihre Wurzeln in den Arbeiten von Förstner (Förstner 1995) und Braun et al. (Braun, Kolbe, Lang, Schickler, Steinhage, Cremers, Förstner und Plümer 1995). Sie greift verschiedene der dort vorgeschlagenen Konzepte – wie z.B. die Modellierung von Komponenten, die Parametrisierung und die Integration von geometrischen Constraints – auf und kombiniert sie zu einer geschlossenen und schon erfolgreich eingesetzten Gebäudemodellierung.

2.2.2 Primitive

Die von uns verwendeten Komponenten, im Folgenden *Gebäudeteilprimitiv* genannt, sind der Ausgangspunkt der Konstruktion von Gebäudehypothesen. Sie bilden die Datenbasis, die speziell für eine Anwendung zusammengestellt werden muß. In deutschen Kleinstädten sind z.B. eher Häuser mit Satteldächern anzutreffen, in nordamerikanischen Vorortsiedlungen Bungalows mit flachen Dächern und im Nordosten der USA sind Mansarddächer wichtig für die Modellierung von landwirtschaftlichen Gebäuden. Je mehr Primitive verwendet werden, desto vielfältiger sind zwar die damit modellierbaren Gebäude, aber desto größer wird auch der Suchraum und desto länger dauert die Rekonstruktion. Außerdem wächst die Anzahl der erzeugten Hypothesen. Für den Umfang der verwendeten Datenbasis muß also ein Kompromiß zwischen Flexibilität der Modellierung einerseits und Aufwand in der Rekonstruktionsphase andererseits gefunden werden.

Definition 1 (Gebäudeteilprimitiv)

Ein *Gebäudeteilprimitiv* ist ein vorgegebenes parametrisiertes Teil von einem Gebäude mit einfacher Struktur, das bestimmte Eigenschaften von Gebäude- und insbesondere Dachformen repräsentiert.

Besonders wichtig an dieser Definition ist die später noch genauer beschriebene Parametrisierung und die eingangs schon erwähnte Repräsentation und Kapselung von typischen Eigenschaften von Gebäude- und insbesondere Dachformen.

Wie schon früher erwähnt, sind die in dieser Arbeit verwendeten Primitive, im Gegensatz zu anderen auf Primitiven basierenden Ansätzen, weder Primitive von ganzen Gebäuden, noch gebäudeunspezifische geometrische Primitive, die durch allgemeine CSG-Operationen miteinander kombiniert werden, noch simple Merkmale wie Kanten oder Flächen. Es sind vielmehr Teile von Gebäuden, die durch eine spezielle schnittfreie CSG-Vereinigung miteinander verbunden werden. Sie entstehen im allgemeinen durch vertikale Schnitte senkrecht zur Längsachse eines Gebäudetraktes. Es handelt sich bei

den verwendeten Gebäudeteilen entweder um Endstücke von Gebäudetrakten oder um Verbindungsstücke, die mehrere Trakte miteinander verbinden. Die Auswahl der in einer speziellen Anwendung Verwendung findenden Gebäudeteilprimitive wird entweder durch einen Operateur vorgenommen oder kann von einem Lernalgorithmus ermittelt werden (siehe die Arbeit von Englert (1999)).

2.2.2.1 Instanziierung

Gebäudeteilprimitive müssen, bevor sie zur Konstruktion von Gebäudehypothesen eingesetzt werden können, instanziiert werden. Dabei werden ihre Parameter mit Werten belegt. Im allgemeinen werden Gebäudeteilprimitive mehrfach instanziiert, jeweils mit unterschiedlichen Parameterbelegungen. Dieser Vorgang wird durch die gegebenen Beobachtungen gesteuert: Die in Abschnitt 2.6.1 näher beschriebenen Beobachtungen – sie bestehen im wesentlichen aus jeweils einem Eckpunkt und mehreren von ihm ausgehenden Kanten – bestimmt sowohl die Auswahl der Gebäudeteilprimitive, die für eine gegebene Beobachtung instanziiert werden, als auch die Belegung der Lage- und Formparameter. Beides wird in Abschnitt 3.2.1 des nächsten Kapitels im Zuge der Operationalisierung der Instanziierung detailliert erklärt. Durch die Instanziierung wird ein erster lokaler Zusammenhang zwischen Beobachtungen und Modell hergestellt, der später durch die Aggregation in einen größeren Kontext gesetzt werden wird.

2.2.2.2 Koordinatensystem

Jedes Gebäudeteilprimitive wird in einem lokalen Koordinatensystem definiert. Zur Gebäuderekonstruktion werden sie instanziiert, in das globale Koordinatensystem übertragen und dort miteinander verbunden. Bei den verwendeten Koordinatensystemen handelt es sich um kartesische *Rechtssysteme* (siehe etwa Aumann und Spitzmüller (1993), Kapitel 1). Die x - und z -Achse liegen in der horizontalen Ebene, die y -Achse zeigt vertikal nach oben. Da es sich um ein Rechtssystem handelt, zeigt die z -Achse, wenn die x -Achse nach rechts verläuft, auf den Betrachter zu.

2.2.3 Aggregate

Darum soll der bisher intuitiv verwendete Begriff Gebäudeteil nun präzisiert und verfeinert werden. Teile von Gebäuden und auch ganze Gebäude werden im Folgenden als Gebäudeaggregate bezeichnet. Der Name spiegelt wider, daß ein Gebäudeaggregat im allgemeinen durch Aggregation von einfacheren Gebäudeaggregaten, z.B. von instanziierten Gebäudeteilprimitive, entstanden ist. Um die Beschreibung zu vereinheitlichen, werden auch instanziierte Gebäudeteilprimitive als Gebäudeaggregate bezeichnet.

Definition 2 (Gebäudeaggregat)

Ein *Gebäudeaggregat* ist entweder die Instanz eines Gebäudeteilprimitive oder eine Aggregation von zwei Gebäudeaggregaten.

Um bei einem Gebäudeaggregat zwischen einem instanziierten Gebäudeteilprimitive und einem echten Aggregat, das aus zwei oder mehr Teilaggregaten besteht, zu unterscheiden, werden zwei weitere Begriffe eingeführt.

Definition 3 (primitives Gebäudeaggregat)

Wenn ein Gebäudeaggregat die Instanz eines Gebäudeteilprimitive ist, wird es auch *primitives Gebäudeaggregat* genannt.

Definition 4 (zusammengesetztes Gebäudeaggregat)

Wenn ein Gebäudeaggregat aus zwei oder mehr instanziierten Gebäudeteilprimitive aggregiert wurde, wird es auch *zusammengesetztes Gebäudeaggregat* genannt.

Die letzten beiden Definition zeigen an, daß es zwei Arten der Entstehung von Gebäudeaggregaten gibt. Durch die Instanziierung von Gebäudeteilprimitiven werden die einfachsten Aggregate erzeugt, die die Ausgangsbasis für anschließende Aggregationen sind, die komplexere Gebäudeaggregate bilden.

2.2.4 Volumenmodell durch Oberflächenbeschreibung

Gebäudeaggregate werden also durch ihre Oberflächen als Volumen repräsentiert (*boundary representation*, B-rep), siehe Kapitel 12.5 in (Foley, van Dam, Feiner und Hughes 1990). Die geschlossene Oberfläche eines Objekts wird dabei wie ein allgemeines Polyeder durch die 3D-Merkmale Punkte, Kanten und Flächen beschrieben.

Punkte haben dreidimensionale und parametrisierte Koordinaten. Ein Beispiel findet sich in Abschnitt 2.4.2. In jedem Eckpunkt laufen mindestens drei Kanten zusammen, da nicht erlaubt ist, daß zwei benachbarte Flächen in der gleichen Ebene liegen.

Kanten besitzen Attribute, die zum einen ihre Orientierung bezüglich jedes der beiden Endpunkte klassifizieren: horizontal, schräg+, schräg-, vertikal+ und vertikal- (ein - steht für eine Orientierung vom Endpunkt nach unten, ein + für eine Orientierung nach oben). Zum anderen haben sie jeweils ein semantisches Attribut, das ihre Funktion innerhalb eines Gebäudes beschreibt:

- Traufe Die Traufkante verläuft horizontal und ist zu einer Wand- und einer Dachfläche benachbart. Typischer Ort der Regenrinnen.
- First Die Firstkante verläuft horizontal auf der höchsten Stelle des Dachs und ist zu zwei Dachflächen benachbart.
- Ortgang Der Ortgang verläuft schräg in der Firstfläche eines Hauses und ist wie die Traufkante zu einer Wand- und einer Dachfläche benachbart.
- Dach Eine Kante die zu zwei Dachflächen benachbart ist, aber keine Firstkante ist.
- Wand Eine Wandkante ist zu zwei Wandkanten benachbart.
- Boden Eine Bodenkante verläuft horizontal und ist zu einer Bodenfläche benachbart

Flächen besitzen Normalen, die nach außen zeigen. Es handelt sich bei ihnen um planare Polygone, die eine beliebige Form haben und insbesondere konkav sein dürfen. Relationen beschreiben Symmetrien und Parallelitäten der die Fläche umrandenden Kanten. Es werden nur solche Relationen berücksichtigt, die invariant bezüglich der Parameterbelegung sind (sofern diese gültig ist). Diese Relationen werden später benötigt, um zufällig auftretende Symmetrien und Parallelitäten in Rückprojektionen zu identifizieren. Flächen haben ein semantisches Attribut, das ihre Funktion angibt:

- Dach Eine Dachfläche hat einen Normalenvektor mit positivem vertikalem Wert. Kanten, die eine Dachfläche umgeben, haben eines der Attribute Traufe, First, Ortgang oder Dach.
- Wand Eine Wandfläche liegt immer in einer vertikalen Ebene, der Normalenvektor liegt also in der horizontalen Ebene. Kanten, die eine Wandfläche umgeben haben eines der Attribute Traufe, Ortgang, Wand oder Boden.
- Boden Eine Bodenfläche liegt immer in einer horizontalen Ebene. Ihr Normalenvektor ist nach unten orientiert. Die sie umgebenden Kanten haben alle das Attribut Boden.

Abbildung 2.5 zeigt ein Beispiel für Kanten- und Flächenattribute am H3-Haus. Flächenattribute sind kursiv eingetragen. Die Kantenorientierungen werden nicht explizit kodiert, sondern bei Bedarf aus den Koordinaten der Endpunkte berechnet. Sie sind daher in der Abbildung nicht angegeben.

Eckpunkte und Kanten eines Gebäudeaggregats bilden Knoten bzw. Kanten eines Graphen. Flächen werden durch minimale Kantenzyklen definiert.

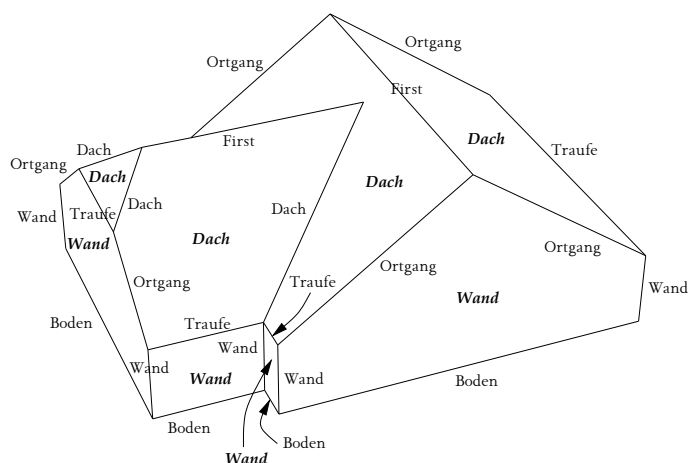


Abbildung 2.5: Kanten- und Flächenattribute eines Gebäudes. Kantenattribute sind normal, Flächenattribute sind kursiv und fett angegeben.

2.2.4.1 Eckenmodell

Die zur Modellierung der Beobachtungen eingesetzten *Ecken* sind Teile eines solchen Graphen. Sie bestehen aus jeweils einem Eckpunkt und den ihm benachbarten Kanten. Da jede Kante von zwei Eckpunkten begrenzt wird, gehört jede Kante zu genau zwei Ecken. Zwischen den Kanten gibt es neben der Nachbarschaftsrelation zum Eckpunkt noch weitere Relationen. So bilden z.B. in der in Abbildung 2.6 hervorgehobenen Ecke die beiden schräg nach unten (*schräg-*) verlaufenden Traufkanten einen rechten Winkel mit der horizontalen (*horizontal*) Firstkante. Außerdem sind die Traufkanten symmetrisch bezüglich der vertikalen Ebene durch den Eckpunkt angeordnet.

Alle Modellecken, die in einem Gebäudeteilprimitiv vorkommen, werden anhand von mehreren Merkmalen klassifiziert:

- Anzahl der Kanten.
- Klassifizierung der Kantenrichtungen.
- Relationen auf den Kanten.

Die Klassifizierung der Ecken richtet sich nach der Beobachtbarkeit der einzelnen Eigenschaften, da die gleichen Eckenklassen auch für die Rekonstruktion von Eckenbeobachtungen aus den Luftbildern verwendet werden. Darum werden die semantischen Attribute nicht verwendet: Ob es sich bei einer Kante um eine Trauf-, First- oder Bodenkante handelt, kann zum Zeitpunkt der Kantenextraktion noch nicht mit ausreichender Sicherheit gesagt werden.

2.2.5 Implizite Constraints

Durch die Verwendung der Oberflächenbeschreibung zur Repräsentierung von Gebäudeaggregaten werden auf den in ihnen enthaltenen Eckpunkten, Kanten und Flächen implizite Constraints definiert. Neben den zwar wichtigen aber trivialen Constraints, daß z.B. jeder Eckpunkt in allen Ebenen, die durch die mit diesem Eckpunkt benachbarten Flächen definiert werden, liegt, gibt es weitere Constraints, die nicht so offensichtlich sind. Hier sei als Beispiel der rechte Winkel zwischen vertikalen Flächen (der y -Wert des Normalenvektors ist unparametrisiert und konstant 0) und horizontalen Flächen (sowohl x - als auch z -Wert des Normalenvektors ist unparametrisiert und konstant 0) genannt.

Jedes Gebäudeaggregat enthält viele implizite Constraints, von denen je nach Anwendung aber nur ein Teil interessant ist. So werden z.B. rechte Winkel zwischen Kanten innerhalb einzelner Flächen

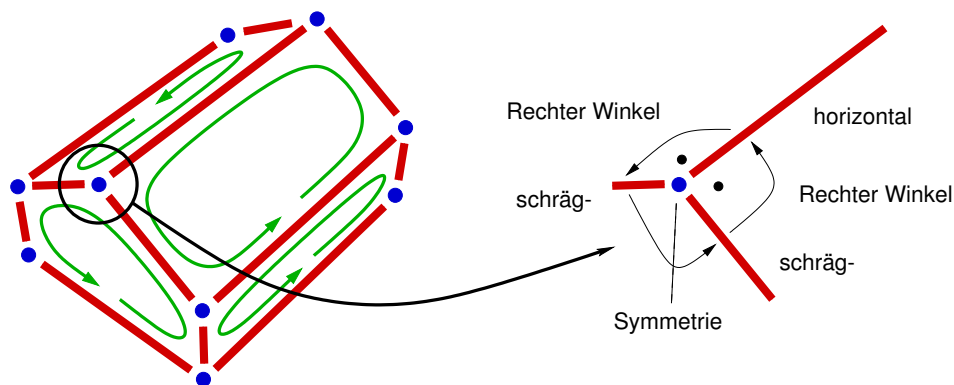


Abbildung 2.6: Links: Die Oberflächen von Gebäuden werden durch Graphen beschrieben. Die parametrisierten Eckpunkte sind die Knoten. Die Kanten des Gebäudes bilden auch die Kanten des Graphen. Flächen werden durch (minimale) Kantenzyklen definiert. Rechts: Einzelne Ecken werden durch einen Eckpunkt und die benachbarten Kanten beschrieben. In diesem Beispiel schließen die beiden schräg nach unten verlaufenden Traufkanten einen rechten Winkel mit der horizontalen Firstkante ein. Die Traufkanten sind symmetrisch orientiert bezüglich der vertikalen Ebene durch den Eckpunkt (hier durch die Schnittkante dieser Ebene mit der Firstfläche).

später genutzt um Relationen auf den 2D-Kanten in Rückprojektionen von den 3D-Repräsentierungen abzuleiten.

2.3 Fügeflächen

Alle Gebäudeteilprimitive und ein Teil der Gebäudeaggregate besitzen ausgezeichnete Flächen, die sogenannten Fügeflächen. Sie sind normierte Schnittstellen, über die die Gebäudeaggregate miteinander zu komplexeren Aggregaten verbunden werden.

Definition 5 (Fügefläche)

Eine ausgezeichnete Fläche eines Gebäudeteilprimitivs oder eines Gebäudeaggregats, die zur Verbindung mit anderen Primitiven und Aggregaten dient, heißt *Fügefläche*. Es handelt sich bei Fügeflächen immer um eine vollständige und schon existierende Fläche der polygonalen Oberflächenbeschreibung.

Fügeflächen sind planare Flächen, die einen Gebäudetrakt abschließen (siehe Abbildung 2.7). Bei der Aggregation von zwei Gebäudeaggregaten werden zwei Fügeflächen miteinander verschmolzen. Nach der Aggregation werden die beiden Fügeflächen, die nun im Inneren des neuen Gebäudetrakts liegen, entfernt. Die Kanten, die in die Fügeflächen hineinlaufen, werden mit einem neuen Parameter versehen, der die Länge des neuen Traktes beschreibt. Eine detaillierte Beschreibung der Aggregation folgt in Abschnitt 3.2.3.

Wie oben erwähnt sind Fügeflächen planare Flächen. Da bei der Aggregation die Längen der Kanten, die in die an der Aggregation beteiligten Fügeflächen hineinlaufen, nicht nur verlängert sondern auch verkürzt werden dürfen, kann es vorkommen, daß in dem neu entstehenden Trakt keine planare Schnittfläche mehr vorkommt, die den Fügeflächen zugeordnet werden kann. Abbildung 2.8 zeigt ein Beispiel in dem ein L-Konnektor und ein Walmdach Terminal aggregiert werden sollen (links). Wenn die Länge des neuen Traktes positiv ist (mitte), dann gibt es einen Bereich, in dem vertikale Ebenen mit dem Trakt geschnitten werden können, so daß die Form der Schnittfläche denen der Fügeflächen entspricht. Im Fall einer negativen Traktlänge (rechts) ist das nicht möglich.

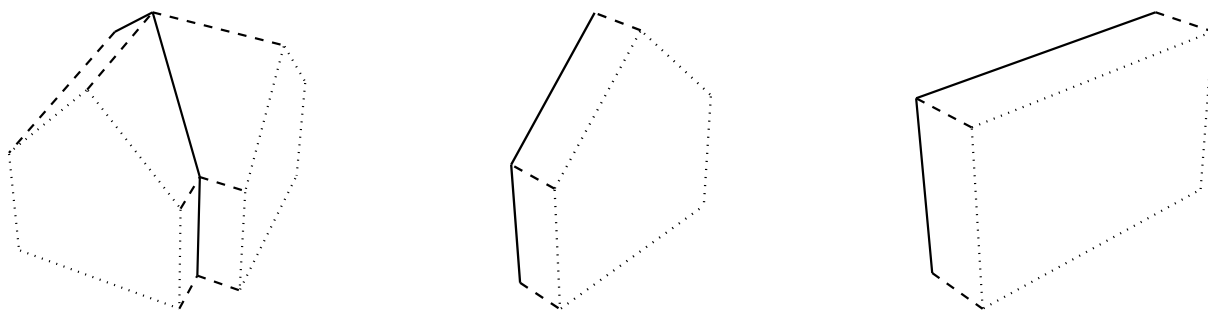


Abbildung 2.7: Fügeflächen sind mit gepunkteten Linien dargestellt. Die Kanten, die in die Fügeflächen hineinlaufen und bei der Aggregation mit entsprechenden Kanten der jeweils anderen Fügefläche verbunden werden, sind gestrichelt gezeichnet. Die Fügefläche des mittleren Gebäudeteilprimitivs ist kompatibel zu den beiden Fügeflächen des linken Primitivs aber nicht zu der Fügefläche des rechten Primitivs.

2.3.1 Fügeflächentypen

Fügeflächen werden nach ihren geometrischen Eigenschaften in Klassen unterteilt. Der *Typ* einer Fügefläche bestimmt, mit welchen anderen Fügeflächen sie verbunden werden kann.

Definition 6 (Fügeflächentyp)

Mit *Fügeflächentyp* wird die geometrische Klassifikation von Fügeflächen bezeichnet. Zwei Fügeflächen mit gleichem Typ sind unabhängig von der konkreten Parametrisierung zueinander äquivalent.

Wenn also ein Gebäudeaggregat A über eine Fügefläche F mit Typ $\phi(F)$ mit einem zweiten Aggregat B verbunden werden kann, dann können auch alle anderen Aggregate A_i mit Fügeflächen F_i von Typ $\phi(F_i) = \phi(F)$ mit B verbunden werden.

Definition 7 (Kompatibilität von Fügeflächentypen)

Zwei Fügeflächentypen werden *kompatibel* genannt, wenn sie miteinander verbunden werden können. Das ist dann der Fall, wenn die Spiegelung an der vertikalen Achse ihre Typen ineinander überführt.

Fügeflächentypen, die bezüglich der vertikalen Achse symmetrisch sind, sind also mit sich selbst kompatibel. Asymmetrische Fügeflächentypen haben als kompatiblen Typ einen gespiegelten Fügeflächentyp.

Durch die Klassifizierung der Fügeflächen in äquivalente und kompatible Typen kann die Hypothesenkonstruktion von den Gebäudeaggregaten entkoppelt werden. Der Konstruktionsalgorithmus benötigt nur das Wissen, welche Fügeflächen miteinander aggregiert werden können und wie die Aggregation ausgeführt werden kann. Die Form der Aggregate spielt dagegen keine Rolle mehr.

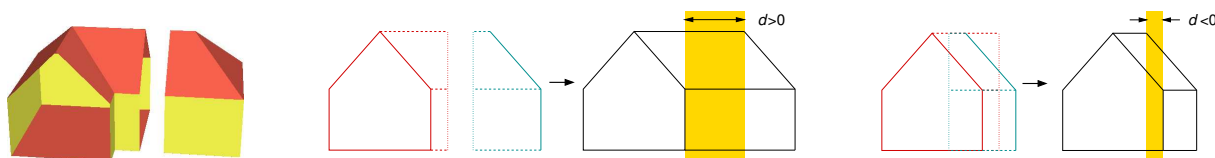


Abbildung 2.8: Ein L-Konnektor und ein Walmdach Terminal sollen miteinander verbunden werden (links). Auf der rechten Seite sind zwei Fälle dargestellt, in denen die Länge des neu entstehenden Traktes einmal positiv (mitte) und einmal negativ (rechts) sind. Bei negativer Traktlänge gibt es keine Möglichkeit eine vertikale Ebene so zu platzieren, daß nur die Wände des Traktes geschnitten werden.

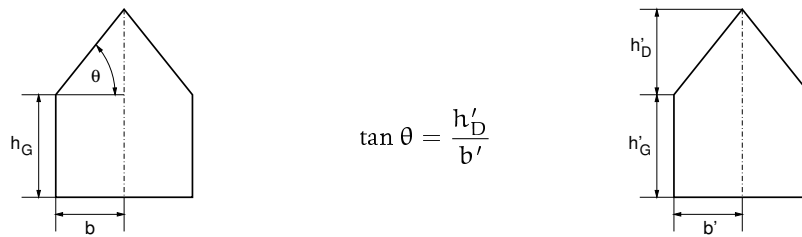


Abbildung 2.9: Die beiden unterschiedlichen Parametrisierungen des gleichen Fügeflächentyps können über die abgebildete Identität ineinander umgerechnet werden.

Diese Abstraktion von den Aggregaten zu ihren Fügeflächen erlaubt die einfache Erweiterung der Menge von Gebäudeteilprimitiven um neue Elemente.

Der Typ einer Fügefläche ist unabhängig von ihrer Parametrisierung. Zwei Fügeflächen, die die Form eines symmetrischen Satteldaches haben, sind kompatibel zueinander, auch wenn bei der einen das Dach durch die Dachhöhe und bei der anderen durch den Neigungswinkel angegeben ist. Das erlaubt dem Operateur, der die Gebäudeteilprimitive erstellt, eine größere Freiheit bei der Wahl einer geeigneten Parametrisierung. Es ist außerdem denkbar, daß der Konstruktionsalgorithmus unter unterschiedlichen Parametrisierungen des gleichen Primitivs die je nach vorliegenden Beobachtungen für die Parameterschätzung günstigste auswählt.

Für jeden Fügeflächentyp gibt es eine Standardparametrisierung, in die die Parametrisierung aller Fügeflächen dieses Typs über spezielle Tabellen übersetzt werden können. Die Parametrisierungen aller Fügeflächen eines Typs müssen zueinander äquivalent aber nicht identisch sein. So kann etwa, wie in Abbildung 2.9 gezeigt, eine symmetrische Satteldach-Fügefläche sowohl durch die Parameter halbe Breite b , Geschoßhöhe h_G und Dachneigung θ als auch durch die halbe Breite b' , Geschoßhöhe h'_G und Dachhöhe h'_D beschrieben werden. Dachneigung und -höhe können über die Identität $\tan \theta = h'_D / b'$ ineinander umgerechnet werden.

2.3.2 Repräsentierung der Fügeflächen

Eine Fügefläche wird gegenüber anderen Flächen durch folgende zusätzliche Informationen beschrieben:

- Ursprung des lokalen Koordinatensystems der Fläche. Der Ursprung dieses Rechtssystems liegt in der Fügefläche, im allgemeinen in der Mitte der Bodenkante. Das Koordinatensystem der Fläche ist so orientiert, daß die x -Achse des Koordinatensystems horizontal und die y -Achse vertikal in der Fläche verlaufen und die z -Achse von der Fläche, bezüglich des gesamten Gebäudeaggregats, nach außen zeigt. Die z -Achse stimmt damit mit dem Normalenvektor der Fügefläche überein.
- Orientierung des lokalen Koordinatensystems der Fügefläche relativ zum lokalen Koordinatensystem des Gebäudeaggregats.
- Eine Tabelle, die diejenigen Parameter des Gebäudeaggregats, die in der Beschreibung der Fügefläche (Eckpunktkoordinaten der Eckpunkte, Ursprung und Orientierung der Fläche) vorkommen, in die Parameter des entsprechenden Fügeflächentyps übersetzt.
- Eine Tabelle für die umgekehrte Übersetzung von den Parametern des Fügeflächentyps, in die in der Beschreibung der Fügeflächen vorkommenden Parameter des Gebäudeaggregats.

Diese Daten werden, wie man in den Algorithmen 2.1 AGGREGATION und 2.2 PARAMETERADAPTION auf den Seiten 35 bzw. 36 sehen wird, zur Aggregation benötigt.

2.3.3 Terminale und Konnektoren

Gebäudeteilprimitive und Gebäudeaggregate werden anhand der Zahl der in ihnen enthaltenen Fügeflächen in zwei Klassen unterteilt. Terminale schließen Trakte an den Enden ab. Eine Gebäudehypothese muß aus mindestens zwei Terminalen bestehen. Konnektoren verbinden zwei oder mehr Trakte miteinander.

Definition 8 (Terminal)

Ein Gebäudeteilprimitiv oder ein primitives Gebäudeaggregat mit genau einer Fügefläche heißt *Terminal*.

Definition 9 (Konnektor)

Ein Gebäudeteilprimitiv oder ein primitives Gebäudeaggregat mit zwei oder mehr Fügeflächen heißt *Konnektor*.

Es wird außerdem zwischen Gebäudeaggregaten mit Fügeflächen, die mit anderen Aggregaten verbunden werden können, und solchen ohne Fügefläche, die das Endprodukt der Hypothesenkonstruktion darstellen, unterschieden.

Definition 10 (offenes Gebäudeaggregat)

Ein Gebäudeaggregat, das mindestens eine Fügefläche besitzt, heißt *offen*.

Definition 11 (geschlossenes Gebäudeaggregat)

Ein Gebäudeaggregat, das keine Fügefläche enthält, heißt *geschlossen*.

Bei der Aggregation fallen die beiden an der Aggregation beteiligten Fügeflächen weg. Daraus folgt, daß die Anzahl der Fügeflächen eines Aggregats nach Aggregation mit einem Terminal sinkt und bei Aggregation mit einem Konnektor unverändert bleibt oder steigt.

2.4 Parametrisierung

Die Parametrisierung der Gebäudeteilprimitive ist neben der Verwendung von Komponenten das zweite wichtige Standbein der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierung. Mit ihr kann, bei fester Struktur, die Geometrie eines Gebäudes an die gegebenen Beobachtungen angepaßt werden. Die Verwendung findenden Parameter lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Die äußeren Lageparameter legen Position und Orientierung fest, die inneren Formparameter beschreiben die Form von Gebäudeteilen und vollständigen Gebäuden.

Das Beispiel in Abbildung 2.10 zeigt die Parameter eines Gebäudes mit einem, bezüglich der durch die Firstkante verlaufenden vertikalen Ebene, symmetrischen Satteldach. Ihr Grundriß wird durch die halbe Breite b und die Tiefe d beschrieben. Die Wandhöhe vom Boden bis zur Traufkante ist mit h_T bezeichnet, die vertikale Dachhöhe von der Trauf- zur Firstkante heißt h_D .

Definition 12 (Formparameter)

Formparameter sind innere Parameter und beschreiben die geometrische Form eines Gebäudeteilprimitivs bezüglich seines lokalen Koordinatensystems.

Formparameter sind gebäudespezifische Parameter, die intuitiv erfaßbar sind, wie zum Beispiel die Breite eines Gebäudetrakts – bzw. bei symmetrischem Querschnitt die halbe Breite – oder Neigung einer Dachfläche. Anzahl und Art der Formparameter richten sich nach den jeweiligen Gebäudeteilen und Gebäuden.

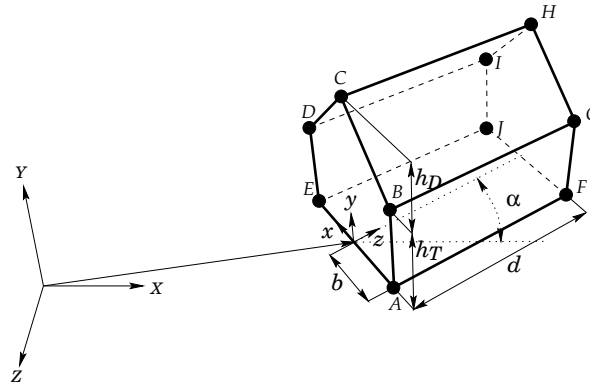


Abbildung 2.10: Form- und Lageparameter eines Gebäudes mit symmetrischem Satteldach. Die Parameter b , d , h_T und h_D bezeichnen die halbe Breite, die Tiefe, die Traufhöhe und die Dachhöhe des Hauses. Die zehn Eckpunkte sind mit A bis J bezeichnet. Die Transformation vom lokalen x, y, z - in das globale X, Y, Z -Koordinatensystem ist anhand des Translationsvektors und des Rotationswinkels α dargestellt.

Definition 13 (Lageparameter)

Die *Lageparameter* sind äußere Parameter und legen die Transformation eines Gebäudeteils aus seinem lokalen in das globale Koordinatensystem fest. Diese Transformation setzt sich aus Rotation um die vertikale Achse und Translation zusammen.

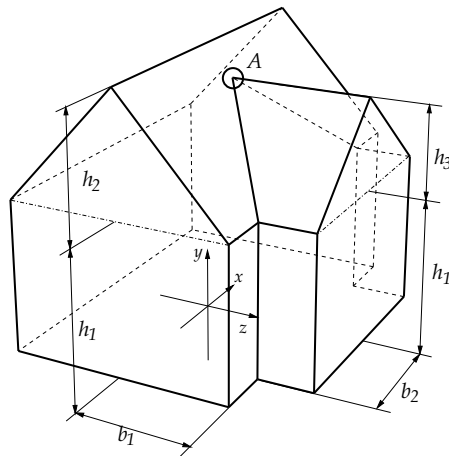
Im Gegensatz zu den inneren Formparametern beschreiben die äußeren Lageparameter nicht das Gebäude selbst, sondern seine Orientierung und Position im globalen Koordinatensystem. Die Orientierung ist ein Winkel, der die Rotation um die vertikale y -Achse des lokalen Koordinatensystems beschreibt. Die Rotationswinkel um die beiden anderen Achsen werden nicht verwendet, da sie bei Gebäuden immer 0 sind. Drei Ortsparameter geben die Position des Ursprungs des lokalen Koordinatensystems im globalen Koordinatensystem an. Insgesamt besitzt jedes Gebäude also genau vier Lageparameter. Translation und Rotation sind auch in Abbildung 2.10 auf Seite 29 dargestellt.

2.4.1 Nichtlineare Parametrisierung

Die Abhängigkeit der Eckpunkt-Koordinaten von den Parametern darf aus den folgenden Gründen ausdrücklich nichtlinear sein:

- Um die Modellierung von Gebäudeprimitiven nicht einzuschränken und um einen einfachen und intuitiven Zugang zu erlauben, müssen die Parametrisierungen der Primitive nichtlinear sein. Nur dann kann man z. B. Winkel für die Dachneigung und begleitende trigonometrische Funktionen verwenden.
- Die Beobachtungen, anhand derer die Parameterschätzung durchgeführt wird, umfassen auch Richtungen von Kanten, nicht aber deren Längen. Daher werden die Längen von beobachteten Kanten und Modellkanten auf eine einheitliche Länge normalisiert. Diese Normalisierung umfaßt eine Division durch die Länge und ist damit nichtlinear.
- Manche Eckpunktkoordinaten hängen nichtlinear von den Parametern ab. Ein Beispiel ist der Punkt A in Abbildung 2.11, der den Durchstoßungspunkt A einer Firstkante in eine Dachfläche bezeichnet. Die z -Koordinate von A hängt nichtlinear von den Parametern h_2 , h_3 und b_1 ab.

Die Nichtlinearität hat insbesondere Auswirkungen auf den Algorithmus zur Parameterschätzung. Wären alle Gleichungen, die für die Schätzung der Parameter aufgestellt werden, linear, könnte ein wesentlich einfacherer und schnellerer Algorithmus zu deren Lösung eingesetzt werden (vergleiche auch Abschnitt 2.6).



$$A = \begin{pmatrix} 0 \\ h_1 + h_3 \\ b_1 - (h_3 * b_1)/h_2 \end{pmatrix}$$

Abbildung 2.11: Der Satteldach-Konnektor mit T-förmigem Grundriß wird durch die Breite der beiden Trakte b_1 und b_2 , die Geschosshöhe h_1 und die beiden Dachhöhen h_2 und h_3 beschrieben. Die z-Koordinate des mit einem Kreis markierten Eckpunkts A hängt nichtlinear von den Parametern ab.

2.4.2 Symbolische Repräsentierung von Koordinaten

Als Konsequenz aus der Parametrisierung der Gebäudeteile ergibt sich zuerst die Notwendigkeit einer geeigneten Repräsentation der Eckpunktkoordinaten. Da ausdrücklich eine nichtlineare Abhängigkeit von den Parametern zugelassen werden soll, können die Koordinaten nicht durch eine Matrix dargestellt werden, die für jeden Ausdruck eine Zeile besitzt, deren Elemente die entsprechenden Faktoren der in den Spalten angeordneten Parameter enthält.

Statt dessen habe ich eine symbolische Repräsentierung der parametrisierten Ausdrücke gewählt. Jede Koordinate wird durch einen algebraischen Ausdruck repräsentiert, dessen Elemente Konstanten, Formparameter und Funktionen sind, die durch Rechenzeichen und Klammern miteinander verbunden werden. Lageparameter sind in den Ausdrücken erlaubt, werden aber bisher nicht verwendet.

Die einfachsten Ausdrücke sind numerische und symbolische Konstanten (0, 1.23, $-4e6$, PI) sowie Parameternamen (b bezeichnet oft die halbe Breite eines Traktes, h1 dessen Höhe vom Boden bis zur Traufkante, h2 die Höhe des Dachs von Trauf- zu Firstkante bzw. alpha die Dachneigung). Diese können mit Rechensymbolen (h_1+h_2 , $b/2$), Klammern ($(h_1+h_2)*b$) und Funktionen ($b*\cos(\alpha)$, $\tan(h_2/b)$) zu komplexeren Ausdrücken kombiniert werden. Die Grammatik, die den Aufbau der Ausdrücke definiert, ist in Anhang A aufgeführt.

Die symbolische Repräsentierung hat weitere Vorteile:

- Ableitungen, die während der Parameterschätzung verwendet werden, lassen sich einfach und exakt berechnen und müssen nicht numerisch ermittelt werden.
- Die Ausdrücke können automatisch manipuliert werden, was während der Parameterpropagierung der in Abschnitt 2.5.1 beschriebenen Aggregationsoperationen benötigt wird.
- Flexible und natürliche Beschreibung der Eckpunktkoordinaten durch direkte Angabe der algebraischen Ausdrücke. Diese vertraute Darstellungsform muß nicht in andere, oft maschinenorientierte Repräsentationen umgeformt werden.

Als Beispiel sind hier die Koordinaten der zehn Eckpunkte des Satteldachhauses aus Abbildung 2.10

auf Seite 29 angegeben:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} -b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & B &= \begin{pmatrix} -b \\ h_T \\ 0 \end{pmatrix} & C &= \begin{pmatrix} 0 \\ h_T + h_D \\ 0 \end{pmatrix} & D &= \begin{pmatrix} b \\ h_T \\ 0 \end{pmatrix} & E &= \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 F &= \begin{pmatrix} -b \\ 0 \\ d \end{pmatrix} & G &= \begin{pmatrix} -b \\ h_T \\ d \end{pmatrix} & H &= \begin{pmatrix} 0 \\ h_T + h_D \\ d \end{pmatrix} & I &= \begin{pmatrix} b \\ h_T \\ d \end{pmatrix} & J &= \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ d \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

2.4.3 Auswirkungen der symbolischen Repräsentierung

Die symbolische Repräsentierung der Eckpunktkoordinaten hat Auswirkungen auf die gesamte Modellierung sowohl in 3D als auch in 2D und auf den Ablauf der Hypothesenkonstruktion und Verifizierung:

Parameterschätzung: Der Algorithmus zur Schätzung der Parameterbelegung muß mit den symbolischen Ausdrücken umgehen können. Wegen der Nichtlinearität der Ausdrücke muß ein iteratives Verfahren gewählt werden. Dabei wird ausgenutzt, daß die von der Parameterschätzung verwendeten Ableitungen der Ausdrücke analytisch berechnet und ausgewertet werden können. Siehe Abschnitt 2.6.

Aggregation: Bei der Aggregation von zwei Gebäudeteilen müssen die Parameter, die in beiden Aggregaten vorkommen aneinander angepaßt werden. Gleichnamige Parameter, die aber unterschiedliche Bedeutungen haben, müssen umbenannt werden. Ein neuer Parameter, der die Länge des neu entstandenen Traktes beschreibt, wird eingeführt. Siehe Abschnitt 3.2.3.

Parametersampling: Um die Verifizierung der konstruierten 3D-Gebäudehypothesen anhand der 2D-Luftbilddaten zu ermöglichen, muß dafür gesorgt werden, daß die freien Parameter der Hypothesen nicht zu topologisch unterschiedlichen Rückprojektionen führen. Dazu wird ein Sampling des durch die verbliebenen unbestimmten Parameter aufgespannten Parameterraums durchgeführt, um eine Liste aller topologisch unterschiedlichen Rückprojektionen zu ermitteln. Siehe Kapitel 4.3.

2.4.4 Explizite Constraints

Es wurde beschrieben, wie die Parametrisierung der Gebäudeteilprimitive zu einer flexiblen Modellierung von Gebäuden führt. Es ist aber gleichzeitig nötig, diese Flexibilität soweit einzuschränken, daß nur sinnvolle und realistische Parameterbelegungen erlaubt sind. Zu kleine und zu große Werte sowie unzulässige Kombinationen von Parameterwerten sollen verhindert werden.

Auf den Formparametern der Gebäudeteilprimitive sind Constraints definiert, die deren gültige Wertebereiche definieren. Diese Constraints sind durch symbolische Gleichungen und Ungleichungen realisiert, in denen beliebige algebraische Ausdrücke in den Formparametern vorkommen dürfen. Constraints auf den Lageparametern sind zwar möglich, werden aber bisher mangels Notwendigkeit nicht eingesetzt.

Im Gegensatz zu den schon erwähnten impliziten Constraints, werden die Constraints auf den Parametern explizit angegeben. Sie können nicht aus der strukturellen oder geometrischen Beschreibung der Gebäudeaggregate abgeleitet werden, sondern repräsentieren Gebäudewissen, das von außen vorgegeben wird.

Constraints werden u.a. in der Parameterschätzung verwendet, um eine gültige und konsistente Parameterbelegung zu erzwingen. Im einfachsten Fall beschreibt ein solcher Constraint die Ober- oder Untergrenze eines Intervalls. Komplexere Constraints setzen mehrere Parameter miteinander in Beziehung.

2.4.4.1 Beispiel

Auf den Parametern des Satteldach-Konnektors in Abbildung 2.11 sind die folgenden Constraints definiert:

- Die Constraints $b_1 >= 1$, $b_2 >= 1$, $b_1 <= 5$ und $b_2 <= 5$ beschränken den gültigen Wertebereich der halben Breiten der beiden symmetrischen Trakte auf Werte zwischen 1 und 5 Metern.
- Durch $h_1 >= 2$, $h_1 <= 10$ und $h_2 <= 10$ werden die Geschoß- und die Dachhöhe auf maximal 10 Meter eingeschränkt.
- Daß die Dachhöhe des Haupttrakts immer höher ist als die des Nebentrakts, wird durch $h_2 > h_3$ gefordert.
- Die Dachneigungen der beiden Trakte werden durch $h_2 > b_1/10$, $h_2 < b_1*10$, $h_3 > b_2/10$ und $h_3 < b_2*10$ auf einen Tangens zwischen 0.1 und 10 beschränkt, also etwa 5° bis 85° Dachneigung.

Die in einer konkreten Anwendung eingesetzten Werte müssen auf die jeweiligen Gegebenheiten abgestimmt werden. So kann man z.B. aus lokalen Verordnungen manche Begrenzung entnehmen.

2.4.4.2 Umwandlung in Gleichungen

Da der in Abschnitt 2.6 beschriebene Algorithmus zur Parameterschätzung nur mit Gleichungen arbeitet, werden die Constraints, die im allgemeinen als Ungleichungen gegeben sind, unter Einführung von jeweils einer Hilfsvariablen in Gleichungen umgewandelt. Eine solche Gleichung hat die Eigenschaft, daß sie genau dann erfüllt ist, wenn der entsprechende Constraint erfüllt ist.

Die Ungleichung $a < b$ wird z.B. in die Gleichung $(a - b) * h^2 + c = 0$ umgewandelt. Dabei ist h die neue Hilfsvariable und c eine frei wählbare positive Konstante. Über die Konstante kann innerhalb eines Gleichungssystems die Gewichtung des Constraints gesteuert werden. Wenn $a < b$ erfüllt ist, wird h mit $h = \sqrt{c/(b-a)}$ vorgelegt, sonst mit $h = c$. Die vollständige Liste mit Transformationsregeln ist in Anhang B aufgeführt.

2.5 Aggregation

Die Aggregation von Gebäudeteilen zu vollständigen Gebäudehypothesen ist die zentrale Operation der Hypothesenkonstruktion. Durch sie kann der in Abschnitt 2.2.2.1 erwähnte lokale Zusammenhang von Beobachtungen und Gebäudemodell, der durch die Instanziierung von Gebäudeteilprimitiven hergestellt wurde, auf den globalen Kontext einer ganzen Gebäudehypothese ausgeweitet werden. Iterativ werden durch Aggregation immer komplexere Gebäudeaggregate erzeugt, denen alle Beobachtungen der in ihnen enthaltenen primitiven Aggregate zugeordnet werden. Dadurch wird eine mit den Beobachtungen konsistente Modellierung erzwungen: Wenn die Bewertung eines neu erzeugten Aggregats anzeigt, daß sich mehrere Beobachtungen widersprechen, dann wird das Aggregat verworfen. Mit jeder erfolgreich durchgeführten Aggregation wird also das Wissen über den globalen Zusammenhang der Beobachtungen vergrößert.

Dieser Abschnitt wird die Aggregation von Gebäudeaggregaten im Detail beschreiben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Aggregation als binäre Operation aufgefaßt, in der zwei Aggregate zu einem neuen und komplexeren Gebäudeaggregat verbunden werden. Die Verallgemeinerung zur Aggregation von drei oder mehr Aggregaten ist trivial.

2.5.1 Spezialisierte CSG-Operation

Die Aggregation von jeweils zwei Gebäudeaggregaten zu einem neuen Aggregat wird durch eine spezialisierte CSG-Operation realisiert. Die Verwendung einer spezialisierten CSG-Operation wird durch die Parametrisierung der Aggregate und die Automatisierung der Gebäuderekonstruktion notwendig. Zum einen könnte eine allgemeine CSG-Vereinigung die Parametrisierungen der zu vereinigenden Aggregate nicht verarbeiten und zusammenführen. Der Umweg über das Einsetzen von verschiedenen Werten in die freien Parameter ist unter anderem deswegen nicht praktikabel, da er eine Vielzahl von Aggregaten mit unterschiedlichen Topologien erzeugen würde. Jede Aggregation würde so die Anzahl von parallel zu verfolgenden Teilhypothesen vervielfachen und so eine Mehrdeutigkeit in die Hypothesenkonstruktion einführen, die nicht mehr beherrschbar wäre. Das würde dem Ziel einer automatischen Gebäuderekonstruktion entgegenlaufen.

Zum anderen würde die Automatisierbarkeit dadurch erschwert, daß über die Teile der zu vereinigenden Gebäudeaggregate, die in der gemeinsamen Schnittmenge liegen, keine Informationen in Form von Beobachtungen vorliegen. Der Konstruktionsalgorithmus müßte außerdem bei jeder Vereinigung dafür sorgen, daß die beiden Aggregate auch zusammenpassen, also z.B. die gleiche Bodenhöhe oder die gleiche Dachneigung haben.

Dem gegenüber hat die von uns verwendete schnittfreie Vereinigung folgende Vorteile:

- Die Vereinigung wird durch Verschmelzung von zwei Fügeflächen durchgeführt. Über die den Fügeflächen zugeordneten Informationen wird zunächst sichergestellt, daß die beiden in Frage stehenden Aggregate überhaupt miteinander vereinigt werden können. Sie definieren außerdem die relative Orientierung zwischen den Aggregaten und sorgen für die korrekte Anpassung der Parametrisierungen aneinander. Da die Vereinigung schnittfrei durchgeführt wird, wird im Folgenden die Aggregation auch als *Verbindung* von Gebäudeaggregaten bezeichnet.
- Die Vereinigung verwendet nur die symbolische Beschreibung der Eckpunktkoordinaten und wird damit unabhängig von der Belegung der Lage- und Formparameter durchgeführt. Die beiden Aggregate werden in einem, noch auszuwählenden, lokalen Koordinatensystem so angeordnet, daß sie einfach miteinander verbunden werden können. Dieses Vorgehen wird durch die Parametrisierung der Gebäudeaggregate möglich und nötig. Die Werte der Parameter des Ergebnisses hängen von den Beobachtungen von beiden der zu verbindenden Aggregate ab und können daher erst *nach* der Aggregation bestimmt werden.
- Die Länge des Trakts, der durch die Vereinigung entsteht, wird mit einem neuen Parameter parametrisiert. Dadurch kann die Traktlänge an die gegebenen Beobachtungen angepaßt werden.
- Nutzung der Fügeflächen als genormte Schnittstellen. Dadurch kann sich der Algorithmus, der zur Konstruktion von Gebäudehypothesen eingesetzt wird, auf die Fügeflächen konzentrieren. Er braucht kein Wissen über die eigentlich zu verbindenden Aggregate, die damit beliebige Formen annehmen dürfen.
- Die Verbindung über Fügeflächen schränkt die relative Lage und Orientierung von zwei Aggregaten auf gebäudetypische Konfigurationen ein. Statt beliebiger Durchdringungen oder Berührungen erfolgt die Verbindung entlang von vordefinierten Trakten, die durch die Fügeflächen abgeschlossen werden.

Die Aggregation von zwei Aggregaten zu einem neuen Aggregat läuft im wesentlichen so ab: Zuerst werden die beiden Aggregate in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert, so daß sie exakt so ausgerichtet sind, daß die Normalenvektoren der zu verbindenden Fügeflächen einen Winkel von 180° einschließen. Anschließend werden die Parametrisierungen der Aggregate modifiziert, so daß die resultierenden Parametrisierungen der beiden Fügeflächen identisch sind. Des weiteren werden gleichnamige Parameter, die nicht in den Fügeflächen vorkommen, umbenannt. Abschließend werden die Oberflächenrepräsentationen der Aggregate vereinigt. Dabei wird ein neuer Längenparameter eingeführt, der die Länge des die Fügeflächen enthaltenden Trakts beschreibt.

Die beiden Algorithmen 2.1 AGGREGATION und 2.2 PARAMETERADAPTION auf den Seiten 35 bzw. 36 beschreiben im Detail die Aggregation von zwei Gebäudeaggregaten zu einem neuen. Die Parametrisierung der Aggregate kann sich an zwei Punkten ändern. Einmal durch eine der Transformationen in Algorithmus 2.1 AGGREGATION und zum anderen durch die Parametersubstitutionen in Algorithmus 2.2 PARAMETERADAPTION. Jedesmal müssen alle betroffenen Daten entsprechend modifiziert werden. Das sind zuerst natürlich die Eckpunkte der Gebäudeaggregate. Es müssen aber auch die Ursprungspunkte und Orientierung der Fügeflächen, deren Übersetzungstabellen und die Constraints der Parameter behandelt werden.

2.5.2 Gebäudehypothesen

Gebäudehypothesen modellieren vollständige Gebäude. Es handelt sich um Gebäudeaggregate mit der Eigenschaft, daß sie keine Fügeflächen mehr enthalten. Sie können also nicht mit weiteren Gebäudeaggregaten verbunden werden. Eine Gebäudehypothese besteht mindestens aus zwei Terminalen.

Definition 14 (Gebäudehypothese)

Ein geschlossenes Gebäudeaggregat heißt *Gebäudehypothese*.

Die Konstruktion einer Gebäudehypothese, die eine gegebene Menge von Eckenbeobachtungen optimal erklärt, ist Aufgabe der im nächsten Kapitel beschriebenen Hypothesenkonstruktion, die einen zweiten zentralen Punkt dieser Arbeit darstellt.

2.6 Parameterschätzung

Um die Belegung der Parameter eines Gebäudeteils oder einer fertigen Gebäudehypothese zu berechnen, die zu einer optimalen Übereinstimmung mit den gegebenen Beobachtungen führt, wird eine Least-Squares Parameterschätzung durchgeführt. Dabei wird ein Gleichungssystem, dessen einzelne Gleichungen die Eckenbeobachtungen mit den Modellecken in Verbindung setzen oder als transformierte Constraints Einschränkungen der Parameter erzwingen, nach den Parametern aufgelöst.

2.6.1 Eckenbeobachtungen

Als Beobachtungen ist eine Menge $C = C_1, \dots, C_N$ von N dreidimensionalen *Ecken* (Englisch *corner* genannt) gegeben. Jede dieser Ecken C_i besteht aus jeweils einem Eckpunkt P_i und n_{K_i} Kanten $K_i = K_{i,1}, \dots, K_{i,n_{K_i}}$. Eckpunkte werden durch ihre Position im Raum und Kanten durch ihre räumliche Orientierung bezüglich des Eckpunkts beschrieben. Alle Eckenbeobachtungen werden durch das in Abschnitt 2.2.4.1 eingeführte Eckenmodell beschrieben. Daher besitzt jede Kante darüber hinaus ein Attribut, das ihre klassifizierte Orientierung beschreibt und eine beliebige Anzahl von Relationen mit anderen Kanten.

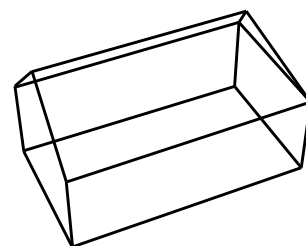
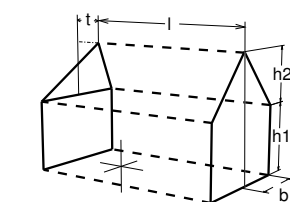
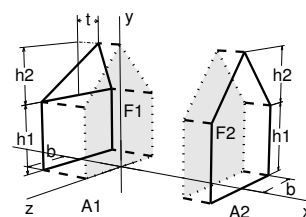
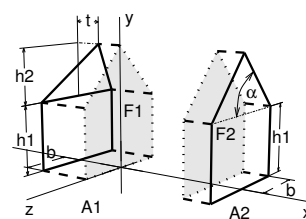
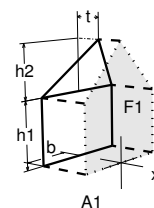
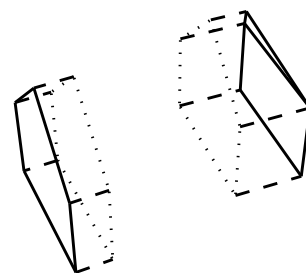
Wir verwenden solche Ecken, weil sie sich robust aus den Luftbildern extrahieren lassen und einen frühen Übergang von 2D zu 3D ermöglichen. Für eine ausführliche Beschreibung der Eckenrekonstruktion aus Luftbildern sei auf die Doktorarbeit von Lang (1999) verwiesen. Die in einem, der Hypothesenkonstruktion vorangehenden, Arbeitsschritt rekonstruierten Ecken, werden in dieser Arbeit als gegeben und damit als Beobachtungen angesehen.

2.6.2 Startwerte

Die Wahl der Startwerte für die Parameter in der Parameterschätzung eines Gebäudeaggregats hängt von den Umständen der Entstehung des Aggregats ab. Daher erfolgt eine genauere Analyse erst im folgenden Kapitel, wenn die einzelnen Operationen, die zur Hypothesenkonstruktion eingesetzt werden, beschrieben sind.

Algorithmus 2.1 AGGREGATION

1. **Auswahl des dominanten Gebäudeaggregats.** Als dominantes Gebäudeaggregat wird dasjenige ausgewählt, dem mehr Beobachtungen zugeordnet sind. Bei Gleichheit wird das mit einer höheren Anzahl von Parametern bevorzugt. Führt auch das zu keiner Entscheidung, wird das zuerst erzeugte gewählt. Das dominante Aggregat wird im folgenden A_1 , das andere A_2 genannt. Die Fügefläche von A_1 wird F_1 , die von A_2 wird F_2 genannt. Die folgende Aggregation wird im lokalen Koordinatensystem des dominanten Aggregats A_1 durchgeführt.
2. **Ausrichtung von A_1 .** Das Gebäudeaggregat A_1 wird so ausgerichtet, daß der Ursprung von F_1 im Ursprung des Koordinatensystems liegt, und die Flächennormale von F_1 mit der positiven x -Achse ausgerichtet ist.
3. **Transformation von A_2 in das lokale Koordinatensystem von A_1 .** Das Aggregat A_2 wird so in das lokale Koordinatensystem von A_1 transformiert, daß der Ursprung von F_2 auf der x -Achse liegt, die Flächennormale von F_2 mit der negativen x -Achse ausgerichtet wird und der Abstand des Ursprungs von F_2 zum Ursprung gleich einem neuen Längenparameter ist, der im folgenden l genannt wird. Der Ursprung von F_2 hat also nach dieser Transformation die Koordinaten $(l, 0, 0)^T$.
4. **Anpassung der Formparameter.** Nach Voraussetzung haben F_1 und F_2 kompatible Typen. Trotzdem können sie unterschiedliche Parametrisierungen haben. Um A_1 und A_2 miteinander verbinden zu können müssen Parameterausdrücke, die gleiche Größen der Gebäudeaggregate beschreiben, durch einheitliche Parameterausdrücke ersetzt werden. Parameter mit gleichem Namen müssen umbenannt werden. Dies leistet Algorithmus 2.2 PARAMETERADAPTION auf Seite 36.
5. **Verbindung der B-reps.** Die eigentliche Verbindung von A_1 und A_2 erfolgt durch die Verbindung ihrer B-reps. Die beiden Fügeflächen werden mit den Punkten und Kanten, die in ihnen liegen, gelöscht. Die verbleibenden Kanten von A_1 , die bisher mit Punkten in F_1 verbunden waren, werden mit den entsprechenden Kanten von A_2 verbunden. Zwei Kanten, von denen jeweils ein in einer Fügefläche liegender Endpunkt gelöscht wurde, werden durch eine neue Kante ersetzt, die die beiden verbleibenden Endpunkte miteinander verbindet.
6. **Rücktransformation in das globale Koordinatensystem.** Die Parameterschätzung, die nach jeder Operation ausgeführt wird, sorgt für die Rücktransformation des neuen Gebäudeaggregats in das globale Koordinatensystem, durch Berechnung der Lageparameter. Die Parameterschätzung bestimmt gleichzeitig die Formparameter. Als Startwerte dienen die Parameterbelegungen von A_1 und A_2 . Bei Konflikten werden die Werte von A_1 bevorzugt. Die Menge der Eckenbeobachtungen des neuen Gebäudeaggregats ist gleich der Vereinigung der Eckenbeobachtungen von A_1 und A_2 .



Algorithmus 2.2 PARAMETERADAPTION

1. **Partitionierung der Parametersätze.** Die Parametersätze von A_1 und A_2 werden in jeweils zwei disjunkte Teilmengen P_i^F und $P_i^{\bar{F}}$ zerlegt. Der Menge P_i^F werden die Parameter von A_i zugeordnet, die in mindestens einem Eckpunkt der Fügefläche F_i vorkommen. Die übrigen Parameter, die nicht von Punkten in F_i referenziert werden, bilden $P_i^{\bar{F}}$. Die Parameter in P_1^F und P_2^F werden verwendet um die beiden Fügeflächen und also die gleiche Flächengeometrien zu beschreiben. $P^{\mathcal{F}}$ bezeichnet den Parametersatz des Fügeflächentyps, zu dem F_1 und F_2 gehören.

$$\begin{aligned} P_1^F &= \{h_1^1, h_2^1, b^1\} \\ P_1^{\bar{F}} &= \{t\} \\ P_2^F &= \{h_1^2, \alpha^2, b^2\} \\ P_2^{\bar{F}} &= \{\} \\ P^{\mathcal{F}} &= \{h_1^{\mathcal{F}}, h_2^{\mathcal{F}}, b^{\mathcal{F}}\} \end{aligned}$$

2. **Übersetzung von Parametern in P_2^F in Ausdrücke über P_1^F .** Um die Parameter aus P_2^F so durch entsprechende Ausdrücke über den Parametern von P_1^F ersetzen zu können, daß die beiden Fügeflächen durch die gleichen Parameter beschrieben werden, verwendet man vorberechnete Übersetzungstabellen. Diese können zwischen der spezifischen Parametrisierung einer Fügefläche und einer generischen Parametrisierung des Fügeflächentyps in beiden Richtungen übersetzen. Im ersten Schritt werden die Parameter in P_2^F in Ausdrücke über $P^{\mathcal{F}}$ übersetzt. In einem zweiten Schritt werden die Parameter in $P^{\mathcal{F}}$ durch Ausdrücke über P_2^F ersetzt. Hintereinander ausgeführt werden damit die Parameter in P_2^F in Ausdrücke über P_1^F übersetzt.

$$\begin{aligned} h_1^2 &\mapsto h_1^{\mathcal{F}} \\ \alpha^2 &\mapsto \arctan(h_2^{\mathcal{F}}/b^{\mathcal{F}}) \\ b^2 &\mapsto b^{\mathcal{F}} \\ h_1^{\mathcal{F}} &\mapsto h_1^1 \\ h_2^{\mathcal{F}} &\mapsto h_2^1 \\ b^{\mathcal{F}} &\mapsto b^1 \end{aligned}$$

3. **Umbenennung der Parameter in $P_2^{\bar{F}}$.** Die Parameter in $P_2^{\bar{F}}$ müssen gegebenenfalls so umbenannt werden, daß es zu keinen Namenskonflikten mit Parametern von A_1 kommt. Namen von Parameter in $P_2^{\bar{F}}$, die auch in P_1^F oder $P_1^{\bar{F}}$ vorkommen, müssen geeignet umbenannt werden.

Keine Umbenennung nötig.

An dieser Stelle läßt sich sagen, daß für primitive Aggregate, die das direkte Ergebnis einer Instanziierung sind, die Startwerte der Formparameter von ihren Defaultwerten abgeleitet werden. Die Startwerte der Lageparameter können direkt aus den zugeordneten Beobachtungen ermittelt werden. Bei zusammengesetzten Aggregaten werden die Startwerte aus den Parameterbelegungen der beteiligten Aggregate berechnet.

2.6.3 Gleichungssystem

Die Schätzung der Parameter erfolgt durch Lösung eines Gleichungssystems, in dem die Zuordnung von Beobachtungen zum Modell durch nicht-lineare Gleichungen ausgedrückt werden. Die Beobachtungen, die in Form von Ecken vorliegen, geben zum einen die Position von Eckpunkten und zum anderen die Orientierung der von diesen Eckpunkten ausgehenden Kanten an. Pro Eckpunkt bzw. Kantenorientierung sind das drei Gleichungen, für jede Raumrichtung eine. Insgesamt erhält man für eine Eckenbeobachtung mit n Kanten also $3 * (1 + n)$ Gleichungen. Von diesen Gleichungen werden allerdings nur jene in das Gleichungssystem übernommen, die mindestens einen Parameter enthalten.

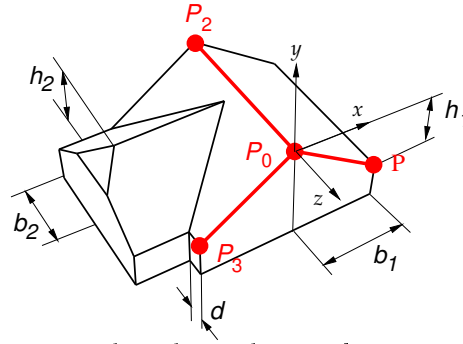


Abbildung 2.12: Die Modellecke mit Eckpunkt P_0 besitzt drei Kanten, die zu den Eckpunkten P_1, P_2 und P_3 verlaufen. Der Ursprung des H3-Hauses liegt in P_0 . Die vier Punkte hängen von fünf Parametern ab: den Dachhöhen von Haupt- und Nebentrakt h_2 und h_3 , den Traktbreiten b_1 und b_2 sowie der zusätzlichen Länge d des Haupttrakts.

2.6.3.1 Beispiel

Anhand der in Abbildung 2.12 markierten Modellecke mit Eckpunkt P_0 und drei Kanten zu den Punkten P_1, P_2 und P_3 soll der Aufbau des Gleichungssystems illustriert werden. Mit Ursprung in P_0 haben die vier Eckpunkte die Koordinaten

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad P_1 = \begin{pmatrix} b_1 \\ -h_1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -d - 2b_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad P_3 = \begin{pmatrix} -b_1 \\ -h_1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Die normierten Richtungsvektoren der drei von P_0 ausgehenden Kanten sind

$$K_1 = \frac{P_1 - P_0}{\|P_1 - P_0\|} = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + h_1^2}} \begin{pmatrix} b_1 \\ -h_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad K_2 = \frac{P_2 - P_0}{\|P_2 - P_0\|} = \frac{1}{\sqrt{d^2 + 4b_2d + b_2^2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -d - 2b_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und}$$

$$K_3 = \frac{P_3 - P_0}{\|P_3 - P_0\|} = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + h_1^2}} \begin{pmatrix} -b_1 \\ -h_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Die Eckenbeobachtungen sind bezüglich des globalen Koordinatensystems gegeben. Darum müssen die Modellkoordinaten vor der Gleichsetzung mit den Beobachtungen vom lokalen in das globale Koordinatensystem transformiert werden. Die Transformationsmatrix

$$M = TR, \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

enthält die Lageparameter α , d_x , d_y und d_z , die die Rotation um die vertikale y -Achse sowie die anschließende Translation definieren. Da die Kantenrichtungen Differenzen von zwei Eckpunktkoordinaten sind, müssen sie nur rotiert werden: Sie sind unter Translation invariant. Für das Beispiel erhält man damit:

$$MP_0 = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad RK_1 = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + h_1^2}} \begin{pmatrix} b_1 \cos \alpha \\ -h_1 \\ b_1 \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$RK_2 = \frac{1}{\sqrt{d^2 + 4b_2d + 4b_2^2}} \begin{pmatrix} (d + 2b_2) \sin \alpha \\ 0 \\ (-d - 2b_2) \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \quad RK_3 = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + h_1^2}} \begin{pmatrix} -b_1 \cos \alpha \\ -h_1 \\ -b_1 \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix}$$

Von den Ausdrücken der 16 Vektorkomponenten enthalten fünf keine Parameter. Das sind die vier w -Komponenten und die y -Komponente von RK_2 , also der horizontal verlaufenden Firstkante zwischen den Punkten P_0 und P_2 . Es bleiben 11 Ausdrücke die in das Gleichungssystem zur Parameterschätzung übernommen werden.

Integration der Constraints Die auf den Parametern definierten Constraints werden auch in das Gleichungssystem aufgenommen. Sie sorgen dafür, daß die Parameter keine ungültigen Werte annehmen. Die Umwandlung der Constraints, die im allgemeinen durch Ungleichungen definiert sind, werden dazu unter Hinzunahme von Hilfsvariablen in Gleichungen umgewandelt. Dieser Vorgang wurde in Abschnitt 2.4.4.2 beschrieben.

Auf den vier Formparametern d , b_1 , b_2 und h_1 , die in den Ausdrücken der Modellecke vorkommen, sind neun Constraints definiert, die mit den Hilfsvariablen H_1, \dots, H_9 in Gleichungen umgewandelt werden:

$$\begin{array}{ll}
 d > 0 & \mapsto d * H_1^2 - c = 0 \\
 b_1 > 1 & \mapsto (b_1 - 1) * H_2^2 - c = 0 \\
 b_1 < 15 & \mapsto (b_1 - 15) * H_3^2 + c = 0 \\
 b_2 > 1 & \mapsto (b_2 - 1) * H_4^2 - c = 0 \\
 b_2 < 15 & \mapsto (b_2 - 15) * H_5^2 + c = 0 \\
 h_1 > h_2 & \mapsto (h_1 - h_2) * H_6^2 - c = 0 \\
 h_1 < 20 & \mapsto (h_1 - 20) * H_7^2 + c = 0 \\
 h_1 > b_1/10 & \mapsto (h_1 - b_1/10) * H_8^2 - c = 0 \\
 h_1 < b_1 * 10 & \mapsto (h_1 - b_1 * 10) * H_9^2 + c = 0
 \end{array}$$

Der Wert von c ist dabei eine positive Konstante, die frei gewählt werden kann. Die Dachhöhe h_1 des Haupttraktes hängt hier von der Dachhöhe h_2 des Nebentraktes ab. Da für letztere aber keine direkten Beobachtungen vorliegen wird dieser Parameter durch seinen aktuellen Wert ersetzt. Die beiden (halben) Traktbreiten müssen im Bereich zwischen 1m und 15m liegen. Die Dachhöhe des Haupttraktes darf nicht mehr als 20m über die des Nebentraktes herausragen. Die Dachneigung des Haupttraktes muß zwischen etwa 5° und 85° (entsprechend einem Tangens von 0.1 bzw. 10) liegen.

Man erhält in diesem Beispiel für eine Eckenbeobachtung also insgesamt $11 + 9 = 20$ Gleichungen, mit denen die Formparameter d , b_1 , b_2 und h_1 sowie die Lageparameter d_x , d_y , d_z und α geschätzt werden.

2.6.4 Unterschiedliche Parametrisierungen

Es hat sich gezeigt, daß die Parameterbelegungen von unterschiedlichen Parametrisierungen derselben Gebäudeaggregate bei gleichen Beobachtungen unterschiedlich gut berechnet werden. Eine typische Stelle, an der sich verschiedene Parametrisierungen anbieten, ist z.B. die Kodierung der Dachneigung. Sie kann einmal durch das Verhältnis zwischen Breite und Dachhöhe angegeben werden, siehe Abbildung 2.13, links. Alternativ kann sie auch direkt durch einen Winkel definiert werden, rechts in der Abbildung.

Welche Parametrisierung günstiger ist, hängt davon ab, welche Beobachtungen vorliegen und welche Parameter dadurch bestimmt werden können. Wenn etwa eine Eckenbeobachtung auf dem Dachfirst existiert, ist die Kodierung durch die Dachneigung günstiger, da sie direkt aus der Beobachtung berechnet werden kann. Die halbe Breite bleibt dabei ein freier Parameter. Bei der Kodierung durch die Dachhöhe dagegen, kann nur das Verhältnis aus Dachhöhe zu halber Breite, nicht aber deren absoluter Wert, bestimmt werden. Gegen die Verwendung der Dachneigung spricht die Verwendung von trigonometrischen Funktionen in den Eckpunktkoordinaten, die zu einer numerischen Verschlechterung des Ausgleichsproblems führen. Wenn etwa eine Trauf- und eine Firstecke gegeben

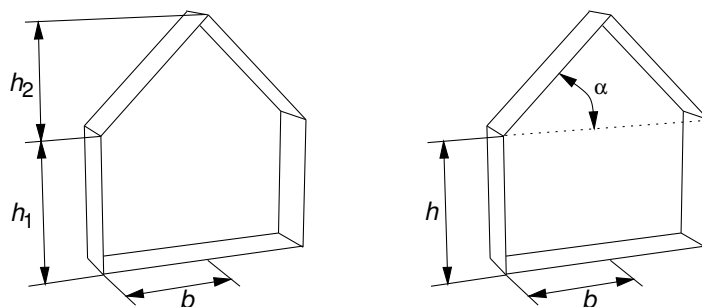


Abbildung 2.13: Zwei unterschiedliche Parametrisierungen des Querschnitts eines Satteldachtrakts. Links ist die Dachneigung über die Dachhöhe und halbe Breite, rechts direkt über den Neigungswinkel definiert.

sind, können halbe Breite und Dachhöhe bestimmt werden. Die Koordinaten der Eckpunkte hängen dann linear von diesen Parametern ab.

Es ist denkbar daß bei der Instanziierung die geeignetste Parametrisierung gewählt oder sogar während der Hypothesenkonstruktion die Parametrisierung an die zugeordneten Beobachtungen angepaßt wird. Doch man muß zwischen der zu erwartenden Verbesserung der Parameterschätzung und dem doch erheblichen Aufwand zur Realisierung der beschriebenen Anpassung der Parametrisierung abwägen. Die erzielten Ergebnisse lassen die zur Zeit verwendete feste Parametrisierung als ausreichend erscheinen.

2.6.5 Weiche Constraints

Wie schon in Abschnitt 2.4.4 erwähnt, sind auf den Parametern explizite Constraints definiert, die dafür sorgen, daß die Parameter nur solche Werte annehmen, die für das jeweilige Modell geometrisch zulässig sind. Diese Constraints fließen als weiche Bedingungen in die Schätzung der Parameter ein. So wie sich die N_B Beobachtungen y_i über die Fehler e_i den Modellausdrücken f_i durch $y_i + e_i = f_i(\mathbf{a})$ zuordnen lassen, so können die N_C Constraints durch $0 + e_j = g_j(\mathbf{a})$ ausgedrückt werden. Durch Umbenennung erhält man daraus ein Gleichungssystem $y_i + e_i = y(x_i; \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M)$, $1 \leq i \leq N$, mit M Parametern $\mathbf{a} = \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M$ und $N = N_B + N_C$ im allgemeinen nichtlinearen Modellausdrücken und Constraints. Die Beobachtungen y_i sind dann die einzelnen Komponenten der Eckpunktkoordinaten und normierten Kantenrichtungen aus den Eckenbeobachtungen bzw. der Wert 0 für die Constraints.

Der Parameter x_i dient dazu, die – formal als einzelne Funktion y definierten – unterschiedlichen Modellausdrücke und Constraints voneinander zu unterscheiden. Die Werte von x_i können beliebig gewählt werden. Anschaulich betrachtet kann mit $x_i := i$ eine Fallunterscheidung äquivalent zu

$$y(x_i; \mathbf{a}) = \begin{cases} f_i(\mathbf{a}) & \text{für } 1 \leq x_i \leq N_B, \\ g_j(\mathbf{a}), j = i - N_B & \text{für } N_B < i \leq N_B + N_C \end{cases}$$

durchgeführt werden.

2.6.6 Methode der kleinsten Quadrate

Die optimale Parameterbelegung dieses Gleichungssystems wird also die Fehler

$$e_i = y(x_i; \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M) - y_i$$

minimieren. Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate definiert die optimale Parameterbelegung \mathbf{a}_{opt} im Sinne eines Maximum-Likelihood-Schätzers als Lösung der Zielfunktion

$$\chi^2(\mathbf{a}_{\text{opt}}) = \min_{\mathbf{a}} \text{ mit}$$

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \chi^2(\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - y(x_i; \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M)}{\sigma_i} \right)^2.$$

Die Standardabweichungen der Beobachtungen sind hier mit σ_i bezeichnet.

2.6.7 Levenberg-Marquardt-Verfahren

Zur praktischen Durchführung der Lösung des Gleichungssystems wird das Levenberg-Marquardt Verfahren eingesetzt. Es löst iterativ die quadratische Approximation

$$\chi^2(\mathbf{a}) \approx \gamma - \mathbf{d} \cdot \mathbf{a} + \frac{1}{2} \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{a}$$

der Zielfunktion und nutzt die symbolische Repräsentation der Gleichungen, um die Richtungsableitungen \mathbf{d} , bis auf numerische Rundungsfehler, exakt berechnen zu können. Siehe Kapitel 15 in (Press, Teukolsky, Vetterling und Flannery 1992) für eine ausführliche Beschreibung.

Die Lösung erfolgt iterativ, obwohl die Ableitungen analytisch berechnet werden, da das zu lösende Gleichungssystem nichtlinear von den Parametern abhängt. In jedem Iterationsschritt wird das Gleichungssystem bezüglich der aktuellen Parameterbelegung linearisiert und eine neue Parameterbelegung berechnet. Führt diese zu einem kleineren Wert der Zielfunktion, wird sie übernommen und sonst verworfen.

Das Levenberg-Marquardt Verfahren verbindet das Gradienten Abstiegsverfahren mit der Newton Iteration. In jedem Schritt wird, abhängig von der bis dahin erreichten Nähe zur optimalen Parameterbelegung, zwischen den beiden Verfahren gewichtet. Eine gute Analyse des Verfahrens findet sich in (Hartley und Zisserman 2000), Anhang 4.

2.7 Bewertung

Die Bewertung von Gebäudeaggregaten hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Eine Aufgabe besteht nach erfolgter Parameterschätzung in der Entscheidung, ob das Aggregat zu den ihm zugeordneten Beobachtungen paßt. Diese Aussage erfolgt unabhängig von den anderen schon erzeugten Gebäudeaggregaten und kann deshalb dazu führen, daß bei fester Beobachtungsmenge kein Aggregat als passend eingestuft wird und nicht statt dessen das am besten (bzw. am wenigsten schlecht) passende.

Die zweite Aufgabe besteht im Vergleich von Gebäudeaggregaten. Der Vergleich beruht auf den Ergebnissen der Parameterschätzung. Wegen deren hohen Kosten, sowohl bezüglich der Laufzeit, als auch bezüglich des erforderlichen Speicherplatzes, soll sie so selten ausgeführt werden wie möglich. Das heißt, das der Weg von den Gebäudeteilprimitiven zur besten Gebäudehypothese möglichst kurz sein soll. Um das zu erreichen wird bei der Hypothesenkonstruktion eine Reihenfolgesteuerung benötigt, die eine optimale Hypothese mit einer minimalen Anzahl von Aggregation konstruieren kann. Diese Reihenfolgesteuerung setzt auf dem Vergleich von Gebäudeteilen auf, so daß die erfolgversprechendsten Gebäudeteile zuerst miteinander verbunden und zu Hypothesen vervollständigt werden.

Die Einzelheiten der Hypothesenkonstruktion und deren Reihenfolgesteuerung werden im nächsten Kapitel näher erläutert, wenn die mit der komponentenbasierten Modellierung zusammenhängenden Begriffe geklärt sind, und mit den Ergebnissen dieses Kapitels zusammengeführt werden können. An dieser Stelle sollen die Bausteine bereit gestellt werden, die dann später zu einer Bewertung kombiniert werden können und den Vergleich von Gebäudeteilen ermöglichen.

Um die beiden Ziele der Bewertung – die Verifizierung und der Vergleich von Gebäudeteilen – zu erreichen, werden unterschiedliche Werte herangezogen. Die beiden wichtigsten beruhen auf dem Ergebnis der Parameterschätzungen. Der Wert der χ^2 -Zielfunktion wird für die eigentliche Bewertung verwendet. Die Entscheidung, ob Beobachtungen durch ein Gebäudeaggregat ausreichend gut erklärt werden, wird durch den *goodness of fit*-Wert getroffen, der die Zuverlässigkeit der Parameterschätzung bewertet. Darüber hinaus werden aber auch die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Anzahl der nicht erklärten Eckenbeobachtungen (dazu mehr in Abschnitt 2.7.4) verwendet.

2.7.1 Wert der χ^2 -Zielfunktion

Der Wert der Zielfunktion

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - y(x_i; \mathbf{a}_{\text{opt}})}{\sigma_i} \right)^2$$

nach abgeschlossener Parameterschätzung gibt an, wie gut die Beobachtungen y_i mit der Modellfunktion $y(x_i; \mathbf{a}_{\text{opt}})$ bei optimaler Parameterbelegung in Übereinstimmung gebracht werden konnten.

Bei perfekter Übereinstimmung würde $\chi^2 = 0$ gelten. Allein die numerische Ungenauigkeit des Parameterschätzers verhindert aber diesen Wert. Allerdings wird ein entsprechend kleiner Wert bei der Parameterschätzung von Gebäudeteilen angenommen, denen eine einzige Eckenbeobachtung zugeordnet ist, vorausgesetzt, daß es sich um ein passendes Gebäudeteil handelt. Der Grund dafür ist, daß die Eckenbeobachtungen mit dem in (Lang 1999) beschriebenen Verfahren mit Hilfe des gleichen Eckenmodells aus den Luftbildern rekonstruiert werden, das auch von der in dieser Arbeit beschriebenen Gebäudemodellierung verwendet wird. Insbesondere wurden die Kantenrichtungen so rekonstruiert, daß sie alle auf den Modellkanten definierten impliziten und expliziten Constraints erfüllen. Ein solcher impliziter Constraint ist z. B. die Forderung, daß in einer auf dem Dachfirst gelegenen Ecke zwei Kanten in einer vertikalen Ebene liegen und die dritte Kante horizontal verläuft.

Daraus folgt, daß bei einer so rekonstruierten Ecke ein Wert der Zielfunktion, der deutlich von 0 abweicht, ein Zeichen dafür ist, daß Modellecke und Eckenbeobachtung nicht zusammen passen und das Modell verworfen werden kann.

Wenn der χ^2 Wert der Parameterschätzung eines zusammengesetzten Gebäudeaggregats sehr klein ist, kann das ein Zeichen für eine falsche statistische Modellierung oder für zu große Standardabweichungen der Beobachtungen sein.

Wenn eine falsche statistische Modellierung des Ausgleichsproblems ausgeschlossen werden kann und die Standardabweichungen korrekt sind, bedeutet ein kleinerer Wert der Zielfunktion eine bessere Übereinstimmung der Beobachtungen mit dem Modell.

Leider können verschieden Gebäudeaggregate über den Wert der Zielfunktion nur bedingt miteinander verglichen werden. Es fehlt die Normierung bezüglich der Anzahl der zugeordneten Beobachtungen und bezüglich der Modellkomplexität. Es ist klar, daß weniger Beobachtungen zu weniger Widersprüchen und damit zu einer besseren Übereinstimmung mit dem Modell führen. Andererseits kann ein komplexeres Modell mit größerer Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Teilen des Gebäudes, denen Beobachtungen zugeordnet sind, diese Beobachtungen besser erklären als ein einfacheres Modell mit strikteren globalen Constraints. Dieses *Overfitting* genannte Phänomen entsteht dadurch, daß natürlich für jede Eckenbeobachtung ein passender Erker zur Gebäudehypothese hinzugefügt werden kann. Man gewinnt dadurch natürlich nichts. Man wünscht sich ganz im Gegenteil ein möglichst einfaches Modell, das die Beobachtungen optimal beschreibt (Ocams Razor).

2.7.2 Goodness of fit

Der *goodness of fit*-Wert bewertet die Zuverlässigkeit des Ergebnisses einer Parameterschätzung. Wenn

$$\begin{aligned} Q &:= Q(\nu/2, \chi^2/2) \\ &= 1 - P(\nu/2, \chi^2/2) \\ &= \frac{\Gamma(\nu/2, \chi^2/2)}{\Gamma(\nu/2)} \\ &= \frac{1}{\Gamma(\nu/2)} \int_{\chi^2/2}^{\infty} e^{-t} t^{\nu/2-1} dt, \end{aligned}$$

über die unvollständigen Gammafunktionen P und Q , mit $\nu = N - M$ der Anzahl der Freiheitsgrade, definiert wird (siehe Anhang C für eine Herleitung), dann verifizieren Werte nahe bei 1 ein Gebäudeaggregat.

Goodness of fit normiert bezüglich der Anzahl der Beobachtungen N . Es können also Hypothesen mit unterschiedlich vielen zugeordneten Eckenbeobachtungen miteinander verglichen werden.

Es ist dabei zu beachten, daß die Anzahl der einer Hypothese zugeordneten Beobachtungsmenge weitgehend proportional zur Modellkomplexität ist. Pro zugeordneter Eckenbeobachtung hat eine Hypothese im allgemeinen ein primitives Gebäudeaggregat. Eine Ausnahme wird im nächsten Kapitel besprochen.

2.7.3 Auftretenswahrscheinlichkeiten

Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Primitiven und einfachen Gebäudeaggregaten kann aus Referenzdaten gelernt werden. Für die Propagierung auf komplexere Aggregate fehlen allerdings Regeln, mit denen die Auftretenswahrscheinlichkeiten bei Aggregationen entsprechend angepaßt werden.

2.7.4 Anzahl der nicht erklärbaren Eckenbeobachtungen

Eine Eckenbeobachtung kann nicht durch das Gebäudeaggregat erklärt werden, wenn sie in dessen Innerem liegt, oder sich in der Nähe der geschlossenen Oberfläche befindet. Jede derart isolierte Beobachtung wird geeignet bestraft.

Auf Grund von freien Parametern ist die geometrische Ausprägung der Oberfläche im allgemeinen nicht exakt bekannt. Also wird auch hier eine Heuristik angewendet, um das Enthaltensein zu prüfen. Im Zweifelsfall wird die Frage nach dem Enthaltensein negativ beantwortet, in der Hoffnung, daß zu einem späteren Zeitpunkt die in Frage stehende Beobachtung entweder dem Aggregat zugeordnet worden ist oder die Parameter soweit bekannt sind, daß die Frage dann eindeutig beantwortet werden kann.

Da die Modellierung zur Zeit nur die Aggregation über vertikale Flächen vorsieht, beschränkt sich die Heuristik auf die Lösung des Problems in der 2D-Grundrißebene. Eine Eckenbeobachtung gilt als im Aggregat enthalten, wenn die x - und z -Koordinate des Eckpunkts im inneren des Grundrisses liegt, der durch die Bodenkanten definiert ist.

2.8 Zusammenfassung

Durch die komponentenbasierte Modellierung wird eine hohe Variabilität der konstruierten Gebäudehypothesen erreicht. Insbesondere der Grundriß kann fast beliebig an die gegebenen Eckenbeobachtungen angepaßt werden. Gleichzeitig bleibt durch die verwendeten Komponenten gewährleistet, daß die konstruierten Hypothesen Gebäude mit plausiblen und realistischen Formen repräsentieren.

Die variable Geometrie, die durch die nichtlineare Parametrisierung der Gebäudeprimitive erreicht wird, erlaubt eine gleichzeitig intuitive und flexible Repräsentierung von Gebäuden. Die verwendeten Constraints sorgen darüber hinaus dafür, daß die repräsentierbaren Strukturen auf sinnvolle und gültige Gebäudeformen beschränkt bleiben.

Mit den Beschreibungen der spezialisierten CSG-Operation der Aggregation und der Parameterschätzung für die symbolisch beschriebenen Parametrisierungen der Gebäudeaggregate wurden die Grundsteine für die Operationalisierung der 3D-Modellierung gelegt. Diese wird im folgenden Kapitel fortgeführt und zur Konstruktion von Gebäudehypothesen ausgebaut.

Kapitel 3

Automatische Hypothesenkonstruktion

In diesem Kapitel wird erklärt, wie die im vorangegangenen Kapitel beschriebene 3D-Modellierung zur automatischen Hypothesenkonstruktion eingesetzt wird. Die ersten Schritte dieser Operationalisierung wurden mit der Aggregation von Gebäudeteilen und der Schätzung der zur symbolischen Parametrisierung der Gebäudeaggregate verwendeten Lage- und Formparameter schon gemacht. Diese beiden Module werden im weiteren in den umfassenden Vorgang der Hypothesenkonstruktion eingebettet.

Die dreidimensionale Modellierung von Gebäuden durch Gebäudeteile hat zur Folge, daß Hypothesen der in den gegebenen Luftbildern sichtbaren Gebäude nicht nur einfach in einer Menge von Gebäudeprimitiven identifiziert werden können. Vielmehr muß eine Hypothese konstruiert und dabei individuell an die Beobachtungen angepaßt werden. Dieser sehr viel anspruchsvollere Vorgang läuft wie folgt ab. Zuerst werden einfache Teilhypothesen erstellt, denen nur einzelne Beobachtungen zugeordnet sind. Diese werden miteinander zu komplexeren Teilhypothesen aggregiert, die einen größeren Teil der Beobachtungen erklären. Dieser iterative Prozeß terminiert mit der Erstellung von geschlossenen Gebäudehypothesen, die alle Beobachtungen umfassen.

Die Hypothesenkonstruktion wird automatisierbar durch ihre Operationalisierung. Vier Arten von Operationen finden Verwendung: Indizierungsoperationen erzeugen die ersten Teilhypothesen. Diese werden miteinander durch Unifizierungs- und Aggregationsoperationen zu komplexeren Teilhypothesen und schließlich zu vollständigen Gebäudehypothesen verbunden. Bei fehlenden Beobachtungen werden Prädiktionsoperationen eingesetzt um Teilhypothesen zu erzeugen, die dafür sorgen, daß schon erstellte aber noch nicht miteinander verbindbare Teilhypothesen zu Gebäudehypothesen aggregiert werden können.

Damit die gesuchten Gebäudehypothesen mit einer möglichst kleinen Anzahl von Operationen erstellt werden können, wird der Konstruktionsvorgang als kombinatorisches Suchproblem interpretiert. Diese sind gut erforscht und es gibt effiziente Lösungsalgorithmen. Das in diesem Kapitel vorgestellte Konstruktionsverfahren basiert auf dem A*-Algorithmus.

Durch die sukzessive Konstruktion von immer komplexeren Gebäudeaggregaten werden gleichzeitig immer mehr Beobachtungen in einen globalen Kontext gesetzt. Dadurch kann getestet werden, ob die einzelnen Beobachtungen ein Modell gleichzeitig unterstützen und somit von diesem erklärt werden, oder ob sie sich so stark widersprechen, daß das Modell verworfen werden muß.

Bevor das eigentliche Konstruktionsverfahren vorgestellt wird, werden zunächst die von ihm verwendeten Bausteine eingeführt. Das sind zum einen die oben erwähnten Operationen, die für den eigentlichen Konstruktionsvorgang eingesetzt werden. Zum anderen sind das aber auch Funktionen, wie die Generalisierung von Hypothesen, bei der Modellmerkmale entfernt werden, die aufgrund zu geringer Größe nicht durch Bildmerkmale verifiziert werden können.

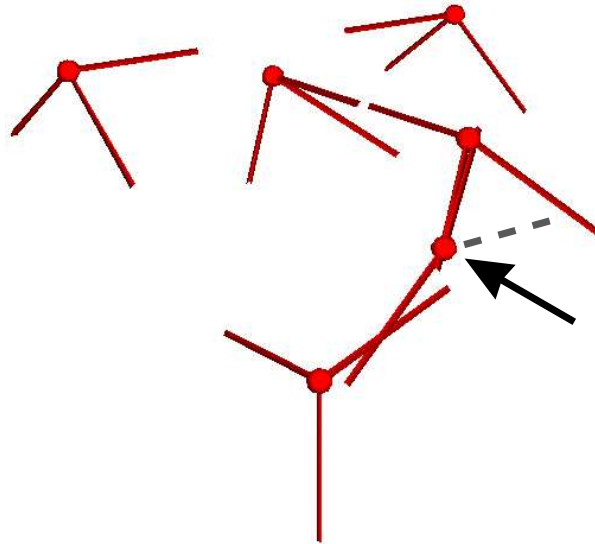


Abbildung 3.1: Eckenbeobachtungen für H3. Fünf der sechs Ecken haben drei Kanten. Von der markierten sechsten Ecke wurde die dritte horizontale Kante nicht gefunden.

3.1 Eckenbeobachtungen

Als Beobachtungen ist eine Menge $C = C_1, \dots, C_N$ von N dreidimensionalen n -Beinen gegeben. Jede dieser *Ecken* genannten Strukturen C_i besteht jeweils aus einem Eckpunkt P_i und n_{K_i} Kanten $K_i = K_{i,1}, \dots, K_{i,n_{K_i}}$. Eckpunkte werden durch ihre Position im Raum und Kanten durch ihre räumliche Orientierung bezüglich des Eckpunkts beschrieben. Jede Kante besitzt darüber hinaus, analog zu den Modellkanten, wie in 2.2.4 beschrieben, ein Attribut, das ihre Orientierung klassifiziert. Abbildung 3.1 zeigt ein Beispiel mit sechs Eckenbeobachtungen. Fünf Ecken sind Dreibeine und wurden entsprechend rekonstruiert. Die markierte sechste Ecke besitzt zwar eigentlich auch drei Kanten, aber die horizontale Kante konnte nicht rekonstruiert werden.

3.2 Operationen

Bei der iterativen Konstruktion der Hypothesen werden vier Arten von Operationen verwendet. Dadurch wird die Formulierung als Suchproblem ermöglicht. Es ist die Aufgabe des Algorithmus, der zur Lösung des Suchproblems eingesetzt wird, eine oder mehrere möglichst kurze Folgen von Operationen zu finden, die Hypothesen erstellen, die die Beobachtungen hinreichend gut erklären.

Jede Operation beschreibt eine Konfiguration, die aus Beobachtungen, Gebäudeaggregaten und einem Operationentyp besteht, die, wenn ausgeführt, ein neues Gebäudeaggregat erzeugt. Dieses wird anhand einer anschließende Parameterschätzung bewertet und entweder verworfen oder in die Menge von Gebäudeaggregaten zur weiteren Konstruktion aufgenommen.

Die vier verwendeten Typen von Operationen, die in den folgenden Abschnitten im Detail beschrieben werden, sind:

Indizierung stellt die initiale Verbindung von Eckenbeobachtungen zu primitiven Gebäudeaggregaten her. Gebäudeteilprimitive werden instanziiert und mit Werten für Form- und Lageparameter versehen.

Unifizierung verschmilzt gleichartige primitive Gebäudeaggregate, die durch multiple Beobachtungen pro Gebäudeteil mehrfach indiziert werden.

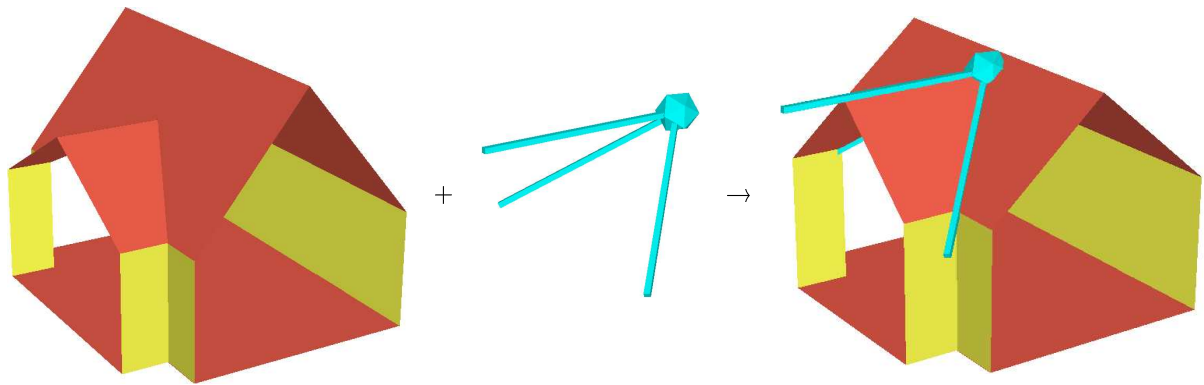


Abbildung 3.2: Durch Zuordnung eines Gebäudeteilprimitivs (links), hier eines symmetrischen Satteldach T-Verbinders zu einer Eckenbeobachtung (mitte) wird ein primitives Gebäudeaggregat instanziiert (rechts). In diesem Beispiel können die beiden Dachneigungen rekonstruiert werden. Für die anderen Parameter werden voreingestellte Werte verwendet.

Aggregation verbindet Gebäudeaggregate zu komplexeren Gebäudeaggregaten und führt die eigentliche Hypothesenkonstruktion durch.

Prädiktion prädiziert primitive Gebäudeaggregate, für die keine Beobachtungen existieren und ohne die keine geschlossene Gebäudehypothese erzeugt werden kann.

3.2.1 Indizierung

Die Indizierung stellt die Verbindung zwischen den Eckenbeobachtungen und dem Gebäudemodell her und ist damit der Einstiegspunkt in die Hypothesenkonstruktion. Die von den Indizierungsoperationen erzeugten Gebäudeaggregate sind instanziierte Gebäudeteilprimitive und haben daher noch eine vergleichsweise geringe Komplexität.

Eine gegebene Eckenbeobachtung wird mit allen Modellecken verglichen. Wenn eine injektive Abbildung von den Kanten der Eckenbeobachtung auf Kanten einer Modellecke definiert werden kann, so daß derart miteinander identifizierte Kanten die gleichen Attribute haben, dann kann eine dieser Abbildung entsprechende Indizierung erzeugt und bei der Hypothesenkonstruktion eingesetzt werden.

Als einziges Attribut, anhand dessen die Kantenbeobachtungen und Modellkanten miteinander verglichen werden, ist die Klassifizierung der Kantenrichtungen relativ zum Eckpunkt. Es werden fünf Klassen unterschieden (siehe auch Abschnitt 2.2.4): horizontal für horizontale Kanten, schräg+ bzw. schräg– für schräg nach oben bzw. schräg nach unten sowie vertikal+ bzw. vertikal– für vertikal nach oben bzw. vertikal nach unten verlaufende Kanten.

Abbildung 3.2 zeigt ein Beispiel. Für eine gegebene Eckenbeobachtung mit drei Kanten, einer horizontalen und zwei schräg nach unten verlaufenden, wird ein symmetrischer Satteldach T-Verbinder instanziiert. Die Kantenrichtungen bestimmen die beiden Dachneigungen. Die anderen Parameter bleiben unbestimmt.

Eckenbeobachtung und Modellecke müssen nicht die gleiche Anzahl von Kanten besitzen. Die Modellecke darf mehr Kanten als die Beobachtung besitzen, da manche Kanten im Bild verdeckt und daher nicht beobachtbar sein können oder weil Kanten obwohl in einzelnen Bildern vorhanden sind, nicht dreidimensional rekonstruiert werden können. Dagegen darf die Beobachtung nicht mehr Kanten als die Modellecke haben, da von einer korrekten Rekonstruktion der Kanten ausgegangen wird. Siehe dazu auch die Doktorarbeit von Lang (1999). Aus diesem Grund wurde oben eine Injektion und keine Bijektion von beobachteten Kanten auf Modellkanten gefordert.

Für jede gefundene gültige Abbildung kann eine Indizierungsoperation erzeugt werden. Zwei Abbildungen sind unterschiedlich wenn

1. die Modellecken, auf die abgebildet wird, zu unterschiedlichen Primitiven gehören,
2. sie innerhalb des gleichen Primitivs auf zwei unterschiedliche Ecken abbilden,
3. sie innerhalb der gleichen Ecke eines Primitivs auf verschiedene Kanten abbilden oder
4. sie innerhalb der gleichen Ecke eines Primitivs auf unterschiedliche Permutationen der gleichen Kantenmenge abbilden.

Die letzten beiden Punkte verdienen eine nähere Betrachtung, da vielleicht nicht auf den ersten Blick klar ist, daß in diesen Situationen überhaupt mehrere unterschiedliche Abbildungen möglich sind.

Zu 3: Da eine Modellecke mehr Kanten haben darf als eine gegebene Eckenbeobachtung, ist es möglich gültige Abbildungen von den Kanten der Modellecke auf unterschiedliche Teilmengen der Kanten der Modellecke zu definieren. Beispiel: Es wurden die horizontale und eine schräge Kante einer Firstecke rekonstruiert. Die Attribute dieser Kanten k_1 und k_2 sind horizontal bzw. schräg—. Eine passende Modellecke ist etwa die Firstecke des Satteldachendstücks, deren Kanten k_a , k_b und k_c die Attribute horizontal, schräg— bzw. schräg— haben. Damit können die beiden unterschiedlichen Abbildungen $\phi(k_1) = k_a$, $\phi(k_2) = k_b$ und $\psi(k_1) = k_a$, $\psi(k_2) = k_c$ definiert werden.

Zu 4: Da die Oberfläche der Gebäudeaggregate 2-Manigfaltigkeiten sind, kann auf den Kanten einer Ecke eine eindeutige Reihenfolge definiert werden. Zwei aufeinanderfolgende Kanten liegen in einer gemeinsamen Fläche. Bei den aus dem Bild rekonstruierten Eckenbeobachtungen ist diese Reihenfolge nicht bekannt, da die Flächen zwischen den Kanten nicht rekonstruiert werden. Es muß also für alle Permutationen der beobachteten Kanten nach einer gültigen Abbildung gesucht werden. Beispiel: Es wurden die horizontale und beide schräge Kante einer Firstecke rekonstruiert. Die Attribute dieser Kanten k_1 , k_2 und k_3 sind horizontal, schräg— bzw. schräg—. Eine passende Modellecke ist, wie im Beispiel des letzten Absatzes, die Firstecke des Satteldachendstücks, deren Kanten k_a , k_b und k_c die Attribute horizontal, schräg— bzw. schräg— haben. Wieder können zwei unterschiedliche Abbildungen definiert werden. Eine ist durch $\phi(k_1) = k_a$, $\phi(k_2) = k_b$ und $\phi(k_3) = k_c$, die andere durch $\psi(k_1) = k_a$, $\psi(k_2) = k_c$ und $\psi(k_3) = k_b$ definiert.

3.2.1.1 Mehrdeutigkeit

Die Indizierung kann also zu Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation einer Eckenbeobachtung führen. Die so in den Rekonstruktionsprozeß eingeführte lokale Unsicherheit wird in Aggregierungsoperationen durch globale Informationen zum Teil wieder aufgelöst.

3.2.1.2 Mehrfachindizierung

Die Indizierung erzeugt im allgemeinen für jede Eckenbeobachtung ein oder mehrere primitive Gebäudeaggregate. Es kann der Fall auftreten, daß zwei oder mehr Eckenbeobachtungen eigentlich zum gleichen Primitiv gehören. Die dann erfolgende Mehrfachindizierung wird durch Unifizierungsoperationen rückgängig gemacht. Dies sieht auf den ersten Blick wie doppelte Arbeit aus. Es sprechen aber zwei Argumente für die gewählte Lösung:

- Sie ist eleganter. Statt einer komplizierten Sonderbehandlung, die globale Informationen über alle rekonstruierten Eckenbeobachtungen benötigt, wird die Zusammenführung der mehrfach indizierten Gebäudeaggregate in einer eigenen Unifizierungsoperation gekapselt und kann vom Konstruktionsalgorithmus gezielt ausgeführt werden.
- Während der Indizierung kann noch gar nicht eindeutig festgestellt werden, ob zwei Beobachtungen zu einem oder zwei primitiven Gebäudeaggregaten gehören. Eine Auflösung während der Indizierung müsste sich für eine der beiden Alternativen entscheiden. Durch die Enbindung

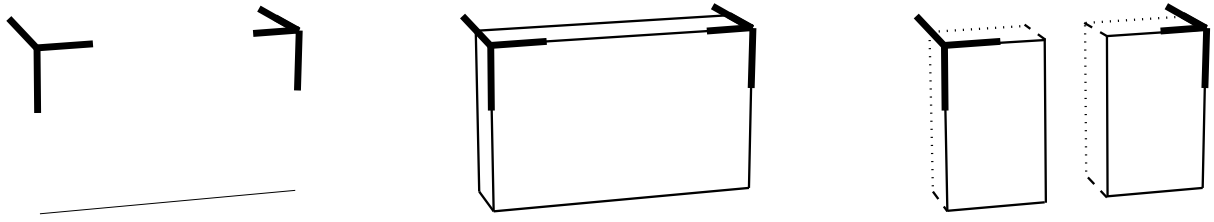


Abbildung 3.3: Gehören die beiden Eckenbeobachtungen (links) zu einem Gebäudeteil (mitte) oder zu zwei (rechts)?

über Unifizierungsoperationen in den Konstruktionsprozeß können dagegen beide Möglichkeiten verfolgt werden. Beispiel: Es wurden zwei Traufecken rekonstruiert, die zu den entsprechenden Modellecken des Satteldachendstücks passen. Bei geeigneter Entfernung voneinander können sie zum gleichen Gebäudeaggregat gehören. Sie können aber auch zu den äußeren Traufecken von zwei nebeneinander stehenden Gebäuden gehören.

3.2.1.3 Startwerte der Parameterschätzung

Für die Startwerte der nachfolgenden Parameterschätzung kann noch nicht auf Ergebnisse der Parameterschätzungen von vorangegangenen Operationen zurückgegriffen werden. Als Startwerte für die Formparameter werden daher typische Werte verwendet die aus früheren Rekonstruktionen stammen können oder bei der Konstruktion der primitiven Gebäudeaggregate vorgegeben wurden. Der Startwert für die Position wird direkt aus der Position des Eckpunkts der Eckenbeobachtung abgeleitet. Die Orientierung wird mittels der Kante der Eckenbeobachtung berechnet, die den kleinsten Winkel zur horizontalen Ebene hat und deren Orientierung damit in einem Luftbild am besten beobachtet werden kann.

Da die Eckenbeobachtungen nach den Modellecken rekonstruiert wurden und es noch keine Widersprüche zwischen den Beobachtungen gibt, werden die Modellecken nach der Parameterschätzung bis auf vernachlässigbare numerische Abweichungen optimal mit den Eckenbeobachtungen übereinstimmen. Die einzige Ausnahme davon sind Eckenbeobachtungen, die nach einem generischen Eckenmodell rekonstruiert wurden, daß zu keiner Modellecke direkt paßt. Daß ist zum Beispiel dann der Fall, wenn einzelne Kanten nicht rekonstruiert werden konnten.

3.2.2 Unifizierung

Wenn zwei oder mehr Eckenbeobachtungen zum gleichen Teil eines Gebäudes gehören, wird während der Indizierung das entsprechende Primitiv trotzdem für jede Ecke instantiiert. Im allgemeinen werden diese primitiven Aggregate auch unterschiedliche Parameterbelegungen haben, da in jedem Fall unterschiedliche Parameter bestimmt werden können und andere durch Default-Werte besetzt werden. Die Aufgabe der Unifizierungsoperation ist es, diese Mehrfachindizierung rückgängig zu machen. Die Ecken sollen nach der Unifizierung dem gleichen primitiven Aggregat zugeordnet sein.

Eine Unifizierungsoperation unifiziert genau zwei primitive Gebäudeaggregate miteinander. Diese müssen Instanzen des gleichen Primitivs sein. Das Ergebnis der Unifizierung ist wieder ein primitives Aggregat und Instanz des gleichen Primitivs wie die beiden Argumente. Dadurch wird es möglich, mehr als zwei primitive Gebäudeaggregate miteinander zu unifizieren, indem die Unifizierung entsprechend mehrfach angewendet wird. Ein Argument von jeder außer der ersten Operation ist dann das Resultat der vorangegangenen Operation.

Alle Unifizierungsoperationen können vor allen Aggregationsoperationen ausgeführt werden, da die Ergebnisse von Aggregationen zusammengesetzte Gebäudeaggregate sind und damit nicht als Argumente von Unifizierungsoperationen dienen können. Andererseits können die Resultate von Unifizierungen Argumente von Aggregationsoperationen sein.

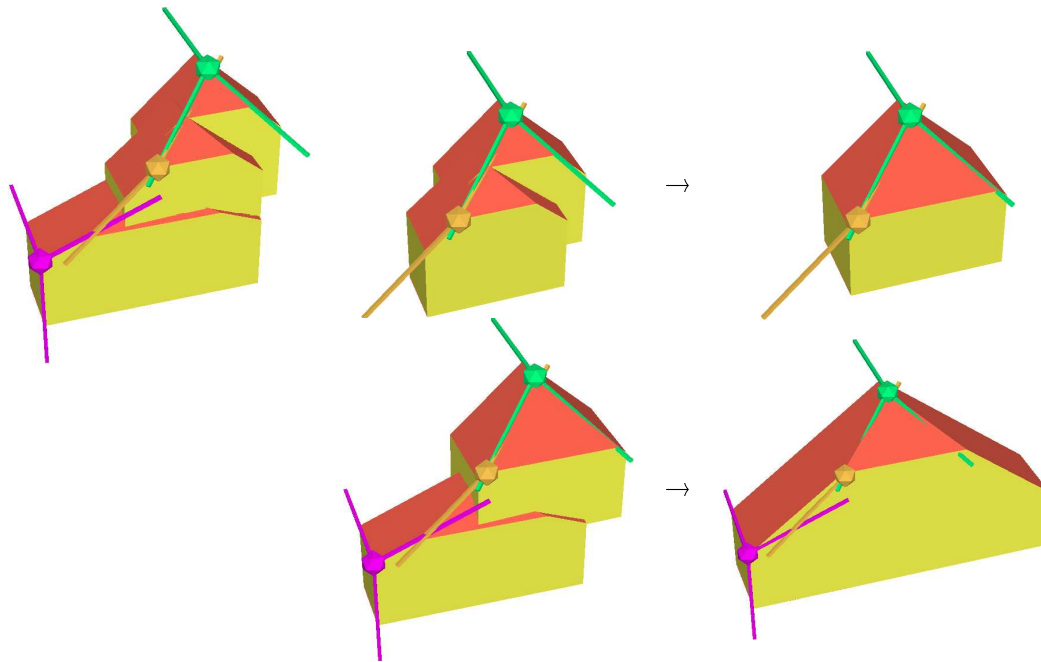


Abbildung 3.4: Die Unifizierung von drei primitiven Gebäudeaggregaten (oben links) erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden zwei der drei Aggregate miteinander unifiziert (oben mitte und rechts). Hier kann man sehen, wie die beiden Dachneigungen und die Höhe der Walmfläche durch die Beobachtungen festgelegt werden. Die Unifizierung mit dem dritten Aggregat erfolgt in einem zweiten Schritt (unten). Durch die dritte Beobachtung kann auch die Breite und die Gesamthöhe des Dachs bestimmt werden.

Im Beispiel in Abbildung 3.4 sollen drei Krüppelwalmdach-Endstücke miteinander unifiziert werden, die durch drei Eckenbeobachtungen indiziert und instantiiert wurden (oben links). Man kann deutlich die unterschiedlichen Dachneigungen, resultierend in unterschiedlichen Breiten, sehen. Die Unifizierung der drei Aggregate erfordert die Anwendung von zwei Unifizierungsoperationen. Die erste (oben mitte und rechts) unifiziert die Aggregate für die mittlere und obere Eckenbeobachtung. Die zweite Operation (unten) unifiziert das Ergebnis der ersten mit dem verbleibenden Aggregat der linken Beobachtung. Hier kann man auch gut den Einfluß der zusätzlichen Beobachtung auf die Parameterbelegung sehen. Das Ergebnis ist etwa doppelt so breit wie die beiden Argumente.

Wie schon am Ende der Beschreibung der Indizierung erwähnt, muß nicht unwiderruflich entschieden werden, ob zwei Eckenbeobachtungen zum gleichen primitiven Gebäudeteil gehören und unifiziert werden sollen. Vielmehr muß nur ein solches Gebäudeaggregat erzeugt und für den weiteren Konstruktionsprozeß zur Verfügung gestellt werden. Es ist damit Aufgabe der Konstruktionssteuerung zu entscheiden, ob das unifizierte Aggregat oder doch die beiden einzelnen Argumente verwendet werden sollen.

Zwei Gebäudeaggregate, die miteinander unifiziert werden sollen, müssen die gleiche Orientierung haben. Der Absolutbetrag der Differenz ihrer Orientierungswinkel darf also einen Schwellwert nicht überschreiten. Dieser Schwellwert ist relativ unkritisch, sofern er nicht zu klein gewählt wird. Ein zu kleiner Wert kann ein richtiges Gebäudeaggregat verhindern. Ein zu großer Wert führt dagegen nur zu einem zusätzlichen Gebäudeaggregat und damit zu einer längeren Laufzeit. In der nachfolgende Parameterschätzung werden Beobachtungen, die sich zu sehr widersprechen, erkannt und das Ergebnis der Operation kann verworfen werden.

Bei der Durchführung der Unifizierung von zwei Gebäudeaggregaten wird eine weitere Instanz des Primitivtyps der beiden Argumente erzeugt. Dieser werden alle Beobachtungen der beiden Argumente zugeordnet.

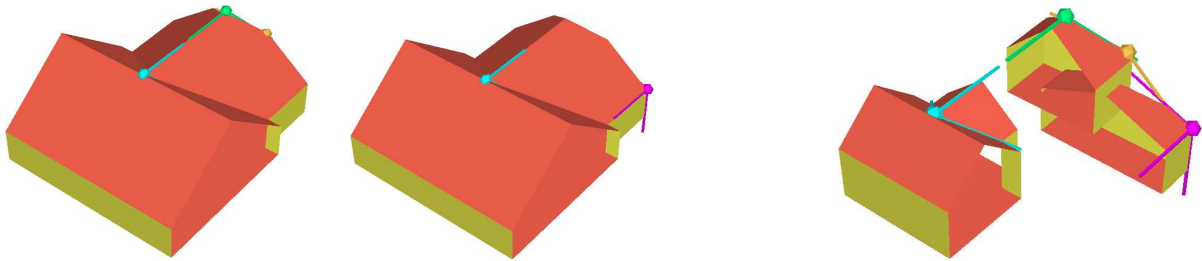


Abbildung 3.5: Die Unifizierung der beiden zusammengesetzten Aggregate auf der linken Seite ist äquivalent zur Unifizierung der beiden Endstücke und anschließender Aggregation mit dem T-Verbinder (rechts).

3.2.2.1 Unifizierung von zusammengesetzten Aggregaten

Es werden nur primitive Aggregate miteinander unifiziert. Zusammengesetzte Aggregate können unifiziert werden, indem zuerst die beteiligten primitiven Aggregate unifiziert und erst danach aggregiert werden. Die Unifizierung muß dabei nur für die Teile ausgeführt werden, für die auch mehrere Beobachtungen vorliegen. Wenn einem beteiligten primitiven Aggregat in beiden zusammengesetzten Aggregaten dieselbe eine Beobachtung zugeordnet ist, muß dieses primitive Aggregat nur mit den Ergebnissen der übrigen Unifizierungen aggregiert werden.

In Abbildung 3.5 ist das an einem Beispiel dargestellt. Die beiden linken zusammengesetzten Aggregate sollen miteinander unifiziert werden. Jedes der beiden Aggregate besteht aus der Verbindung von einem T-Verbinder und einem Krüppelwalm-Endstück. Unterschiedliche Beobachtungen sind nur dem Endstück zugeordnet. Dem T-Verbinder ist in beiden Fällen die gleiche Beobachtung zugeordnet. Also ist die Unifizierung dieser beiden Aggregate gleich der Unifizierung der jeweiligen Endstücke und anschließender Aggregation mit dem T-Verbinder, wie auf der rechten Seite der Abbildung angedeutet.

3.2.2.2 Startwerte der Parameterschätzung

Es sind Belegungen von allen Parametern des resultierenden Gebäudeaggregats in jedem der beiden ursprünglichen Aggregate vorhanden. Wenn zurück verfolgt werden kann, welche Werte direkt von einer Beobachtung abhängen, werden diese verwendet. Ist das nicht oder gleichzeitig bei beiden Aggregaten möglich wird das bevorzugt, daß die meisten zugeordneten Eckenbeobachtungen hat. Bei gleicher Anzahl wird das Aggregat mit der besseren Bewertung seiner Parameterschätzung gewählt.

3.2.3 Aggregation

Die Aggregation ist neben der Indizierung der wichtigste der vier Operationentypen. Sie ist für die Konstruktion von komplexeren Gebäudeaggregaten durch Aggregation aus einfacheren Gebäudeteilen zuständig. Dabei werden zwei Gebäudeaggregate über jeweils eine ihrer Fügeflächen miteinander verbunden. Hier kommt das Baukastensystem der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierung zum tragen. Über zwei zu verbindende Aggregate muß nicht mehr bekannt sein, als daß sie zwei zueinander kompatible Fügeflächen besitzen. Es kann sich bei den Aggregaten um gerade instantiierte Primitive oder um komplexe Aggregate handeln, die ihrerseits in mehreren Schritten konstruiert wurden. Der eigentliche Vorgang der Aggregation wurde schon in Abschnitt 2.5.1 auf Seite 33 im Detail beschrieben.

Die wichtige Aufgabe, die die Aggregation erfüllt, ist die Einbeziehung von globalen Abhängigkeiten der Beobachtungen untereinander. Nach der Indizierung hat im allgemeinen jedes primitive Aggregat eine von den anderen unterschiedliche Parameterbelegung. Auch wenn z. B. die Dachneigung von zwei Aggregaten identisch sein müßte, weil diese zum gleichen Dach gehören, werden die Beobachtungen

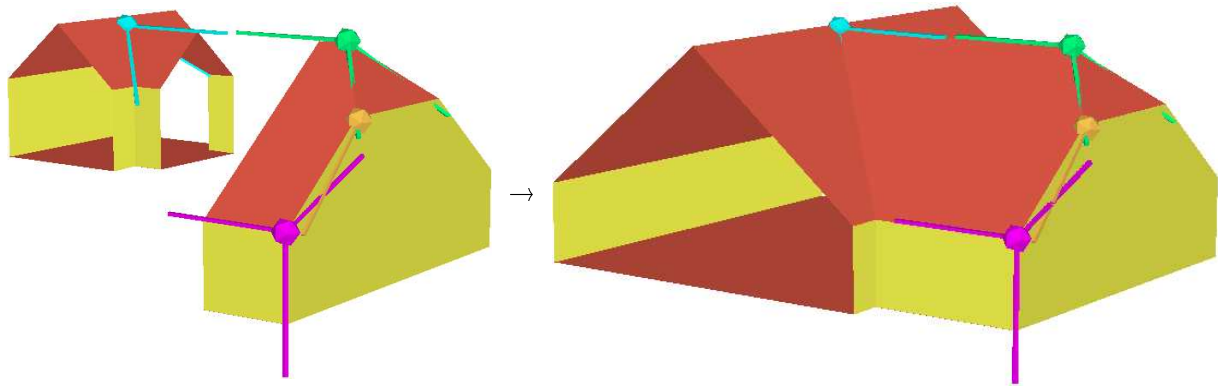


Abbildung 3.6: Jetzt sollen die Ergebnisse der Indizierung aus Abbildung 3.2 und der Unifizierungen aus Abbildung 3.4 miteinander aggregiert werden. Obwohl die Ausdehnungen der zu verbindenden Fügeflächen (links) deutlich voneinander abweichen ist die Aggregation durchführbar, da die Parameterbelegungen nicht beachtet werden, sondern die Aggregation vollständig symbolisch durchgeführt wird. Nach der Aggregation (rechts) werden durch eine erneute Parameterschätzung Parameterbelegungen aneinander angeglichen.

durch die die Aggregate indiziert wurden, durch Bildstörungen zu unterschiedlichen Werten führen, obwohl sie bei gutem Bildmaterial nicht groß sein wird.

Durch die Aggregation werden nun globale Zusammenhänge zwischen vorher isolierten Beobachtungen hergestellt. Einzelne Parameter hängen jetzt von mehreren Beobachtungen ab. Dadurch kommt es aber auch zu Widersprüchen zwischen den einzelnen Beobachtungen, was die Werte von einzelnen Parametern betrifft.

Erst jetzt, wo Beobachtungen einem einzelnen Modell zugeordnet werden, kann entschieden werden, ob die Verbindung von zwei Gebäudeaggregaten überhaupt zulässig war, oder ob die Beobachtungen so unterschiedliche Parameterbelegungen erfordern, daß sie doch nicht z.B. in einer Fläche liegen können.

Die beiden beteiligten Fügeflächen müssen kompatible, also miteinander verbindbare, Typen haben. Außerdem müssen sie zueinander entgegengesetzt orientiert sein, ihre Normalenvektoren also einen Winkel von π zueinander haben. Die Belegungen ihrer Formparameter hingegen unterliegen keinen Bedingungen, denn sie werden während der Aggregation nicht verwendet. Die Aggregation wird vollständig symbolisch durchgeführt. Nach erfolgreich durchgeführter Aggregation wird in einer Parameterschätzung, anhand der vereinigten Beobachtungen der beiden ursprünglichen Aggregate, die Parameterbelegung des neuen Aggregats berechnet. Die deutlich unterschiedlichen Größen der beiden Gebäudeaggregate in Abbildung 3.6 (links) sind also kein Hinderungsgrund für eine Verbindung. Für das Ergebnis (rechts) wird die Parameterbelegung aus allen vier Ecken berechnet.

3.2.3.1 Startwerte der Parameterschätzung

Wie bei der Unifizierung gibt es auch hier Parameterbelegungen der beiden Aggregate die in vorangegangenen Operationen berechnet wurden. Bei Konflikten werden die Werte des dominierenden Aggregats A_1 aus Algorithmus 2.1 AGGREGATION bevorzugt.

3.2.4 Prädiktion

Wenn die Konstruktion einer Gebäudehypothese aufgrund fehlender Eckenbeobachtungen keine weiteren Gebäudeaggregate konstruieren kann und noch keine geschlossene Gebäudehypothese erzeugt wurde, wird versucht die fehlenden Teile zu präzisieren. Dabei werden zwei Fälle unterschieden.

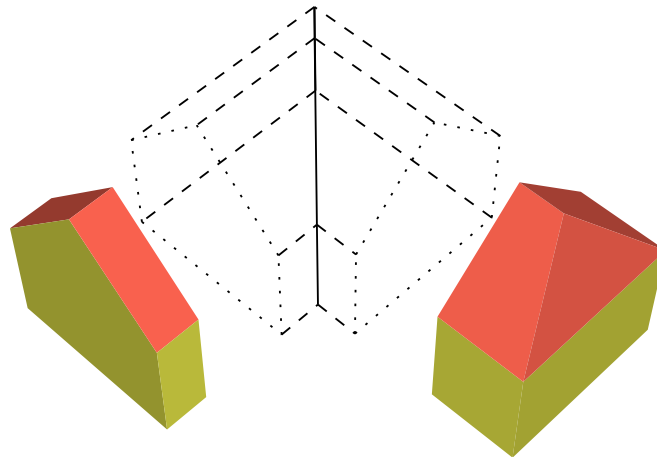


Abbildung 3.7: Die beiden Endstücke können wegen ihrer Orientierung nicht direkt miteinander verbunden werden. Wenn es aufgrund fehlender Beobachtungen kein weiteres Gebäudeaggregat gibt, mit dem sie verbunden werden können, muß eines prädiziert werden. Das ist in diesem Fall ein L-Verbinder. Die Aggregation mit den beiden Endstücken erzeugt eine geschlossene Gebäudehypothese.

Prädiktion eines Verbinders. Wenn für zwei Gebäudeaggregate vermutet wird, daß sie über ein noch nicht vorhandenes primitives Gebäudeaggregat miteinander verbunden werden können, wird versucht dieses Gebäudeaggregat aus dem durch die beiden Aggregate gegebenen Kontext abzuleiten. Dieser Kontext beinhaltet die Typen und Orientierungen der beiden Fügeflächen, die nötig sind um die Aggregate miteinander zu verbinden.

Prädiktion eines Terminals. Eine weitere Situation in der ein Gebäudeaggregat prädiziert werden kann, ist gegeben, wenn ein Gebäudeaggregat nur noch eine Fügefläche hat. In diesem Fall kann das passende Endstück prädiziert werden.

Prädiktionsoperationen führen keine Aggregation aus. Um ein prädiziertes Gebäudeaggregat mit den vorhandenen zu verbinden, müssen die nötigen Aggregationen getrennt ausgeführt werden.

3.2.4.1 Prädiktion eines Verbinders

Zwei gegebene Gebäudeaggregate A_1 und A_2 haben jeweils mindestens eine Fügefläche. Bei mehr als einer Fügefläche muß zuerst entschieden werden, welche verwendet werden soll. Wenn diese Entscheidung nicht getroffen werden kann, werden alle Möglichkeiten einzeln verfolgt.

Für die Prädiktion des zur Verbindung von A_1 und A_2 nötigen Aggregats A_p stehen folgende Informationen zur Verfügung:

Lage der Fügeflächen. Die Lage der Fügeflächen kann zur Ablehnung der Operation führen. Wenn die Fügeflächen bezüglich eines gebäudespezifischen Schwellwertes zu nah beieinander stehen, ist das ein Zeichen dafür, daß sie direkt miteinander verbunden werden müßten. Da das nicht möglich ist (sonst wäre es ja schon geschehen) ist mindestens eines der beiden Aggregate falsch. Wenn dagegen die beiden Fügeflächen zu weit auseinander stehen, muß zuerst diese Lücke kleiner gemacht werden, indem durch andere Prädiktionsoperationen Gebäudeaggregate miteinander verbunden werden können, die sich zwischen A_1 und A_2 befinden. Wenn daß nicht möglich ist, muß der Konstruktionsvorgang aufgrund von fehlenden Informationen abgebrochen werden.

Typen der Fügeflächen. Die Typen der Fügeflächen entscheiden z.B. darüber welche Dachform A_p haben muß. Wenn es kein passendes Gebäudeteilprimitiv gibt, wird die Prädiktionsoperation verworfen.

Orientierung der Fügeflächen. Aus den Orientierungen der beiden Fügeflächen kann deren relative Orientierung berechnet werden. Damit kann z. B. zwischen einem Verbinder mit L-förmigen Grundriß und einem mit geradem Grundriß entschieden werden.

Wenn die Lage der Fügeflächen die Operation nicht verwirft und ein zu den Typen und Orientierungen passendes Gebäudeteilprimitiv existiert, wird es instantiiert und kann in zwei folgenden Aggregationsoperationen mit A_1 und A_2 verbunden werden.

3.2.4.2 Prädiktion eines Terminals

Eine Fügefläche eines Gebäudeaggregats kann mit einem passenden Endstück geschlossen werden. Wenn ein Endstück mit passender Fügefläche existiert, wird es instantiiert und kann in einer folgenden Aggregierungsoperation mit dem bestehenden Aggregat verbunden werden.

3.2.4.3 Startwerte der Parameterschätzung

Es gibt zwar keine Beobachtungen, die dem neuen primitiven Gebäudeaggregat zugeordnet sind, aber es können Informationen von den Aggregaten abgeleitet werden, die zu dieser Prädiktionsoperation geführt haben. Startwerte der Lageparameter können aus dem bzw. den beiden Argumenten abgeleitet werden. Von den Formparametern kann für diejenigen ein Startwert berechnet werden, die in den an der Prädiktion beteiligten Fügeflächen vorkommen. Für die übrigen Formparameter werden die Defaultwerte verwendet.

3.3 Unerklärte Beobachtungen

Das Resultat einer Operation kann Eckenbeobachtungen, zum Beispiel durch Verdeckung, von der weiteren Hypothesenkonstruktion ausschließen. Die konstruierte Hypothese kann sich dann nur auf einen Teil der Beobachtungen stützen und muß entsprechend schlechter bewertet werden. Die ausgeschlossenen Beobachtungen bleiben unerklärt. Für eine optimale Steuerung des Konstruktionsvorgangs ist es daher erforderlich, ausgeschlossene Ecken zu erkennen und in der Bewertung des entsprechenden Aggregats zu bestrafen.

3.3.1 Erkennen von unerklärbaren Beobachtungen

Daß eine Eckenbeobachtung nicht erklärt werden kann, kann an zwei Stellen erkannt werden:

- Bei Operationen, deren Resultat geschlossene Hypothesen sind, sind die ausgeschlossenen Beobachtungen ganz einfach alle nicht erklärten Beobachtungen. Da keine weiteren Gebäudeaggregate mit dem Ergebnis verbunden werden können, können auch keine weiteren Ecken mehr erklärt werden.
- Bei allen anderen Operationen ist das Erkennen der ausgeschlossenen Eckenbeobachtungen aufwendiger. Durch geometrische Überlegungen können solche Ecken erkannt werden, die nach Ausführung der Operation im Inneren des neu erzeugten Aggregats liegen. Da gegenseitige Durchdringungen von Gebäudeaggregaten bei Aggregierungsoperationen nicht erlaubt sind, können diese Eckenbeobachtungen im weiteren Verlauf der Hypothesenkonstruktion nicht mehr mit Modellecken identifiziert und dadurch erklärt werden. Die entsprechenden Bestrafungsterme können dann gleich in die Bewertung eingebaut werden.

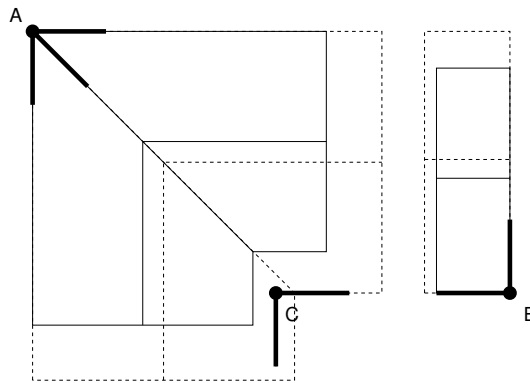


Abbildung 3.8: Ecke A instanziiert einen L-Satteldachverbinder, Ecke B ein Satteldachendstück (beide durchgezogen dargestellt). Wenn die beiden Aggregate miteinander verbunden werden sollen und ihre Parameter aneinander angepaßt werden, ist leicht zu erkennen, daß Ecke C im inneren des neuen Aggregats liegt.

3.3.2 Geometrische Analyse

Wenn eine Eckenbeobachtung im Inneren eines oder nahe bei einem offenen Gebäudeaggregat liegt, aber keiner von dessen Modellecken zugeordnet ist, dann kann sie von keiner Gebäudehypothese erklärt werden, die dieses Aggregat enthält. Um herauszufinden, ob und welche Eckenbeobachtungen von einem bestimmten offenen Aggregat nicht erklärt werden können, erfolgt eine geometrische Analyse. Zur Vereinfachung der Analyse wird sie nicht dreidimensional sondern in der zweidimensionalen Grundrißebene durchgeführt. Mit der aktuellen Parameterbelegung wird untersucht, ob eine oder mehrere Eckenbeobachtungen enthalten sind bzw. in der Nähe liegen indem getestet wird, ob der Grundriß eines der durch die Beobachtung indizierten Gebäudeteile den Grundriß des Aggregats schneidet. Dieser Test muß bei der Unifizierung abgewandelt werden, da sich dort die beteiligten primitiven Gebäudeaggregate durchdringen dürfen.

3.3.3 Beispiel

Abbildung 3.8 zeigt ein Beispiel. Ecken A und B haben zwei primitive Aggregate indiziert. Die gestrichelten Linien geben die Parameterbelegung an, die durch Einbeziehung beider Beobachtungen gleichzeitig entsteht. Ecke C würde im Inneren des neuen Aggregats liegen und nicht von diesem erklärt werden. Daher würde bei der Hypothesenkonstruktion zuerst versucht, ein von C indiziertes primitives Gebäudeaggregat zu finden, das mit dem von Ecke A unifiziert werden könnte bevor es mit dem von B aggregiert würde.

3.4 Generalisierung

Bei der Konstruktion von Gebäudehypothesen kann es vorkommen, daß bestimmte Kanten zu kurz oder Flächen zu klein sind um in den Luftbildern beobachtet werden zu können. Da sie daher auch nicht verifiziert werden können, werden sie, wenn möglich, aus dem Modell entfernt. Diese *Generalisierung* soll die restlichen Kanten und Flächen dabei erhalten und die Geometrie so wenig wie möglich verändern. Die Modelle sollen so einfach wie möglich aber so komplex wie nötig gemacht werden.

Kanten sollen entfernt werden, wenn ihre Länge unter der aktuellen Parameterbelegung so klein ist, daß sie in keinem der Luftbilder beobachtbar ist. Das kann dazu führen, daß Teile von Flächen oder ganze Flächen ebenfalls entfernt werden müssen.

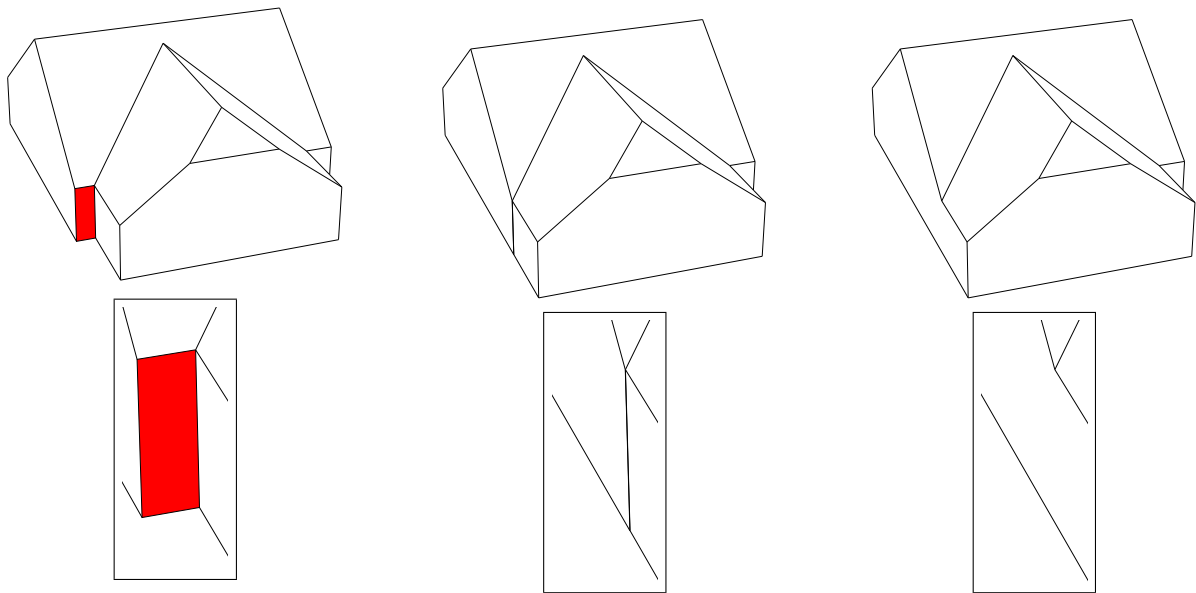


Abbildung 3.9: Die mittlere Abbildung zeigt eine konstruierte Hypothese von Haus H3 mit der originalen Parameterbelegung. Die hier in der Detailansicht darunter zu sehende Fläche ist nur als senkrechter Strich erkennbar. Links ist das Haus mit gleicher Struktur und Parametrisierung aber anderer Parameterbelegung abgebildet um diese Fläche sichtbar zu machen. Dort ist die Fläche rot (grau) hervorgehoben. Rechts ist das Ergebnis der Generalisierung zu sehen: Die Fläche wurde entfernt. Die linke Giebelfläche des Haupttrakts bildet nun mit der linken Seitenfläche des Nebentrakts eine durchgehende Fläche.

Wenn etwa eine horizontale Kante k_0 , die zwei vertikale Kanten k_1 und k_2 miteinander verbindet, entfernt wird, liegen anschließend k_1 und k_2 auf einer Geraden. Wenn sie bezüglich der horizontalen Ebene durch k_0 auf unterschiedlichen Seiten liegen, werden sie zu einer Kante vereinigt. Andernfalls wird das zwischen ihnen aufgespannte Flächenstück entfernt. Siehe dazu auch die Abbildung 3.9.

Die Generalisierung kann also in zwei Phasen aufgeteilt werden:

1. Zuerst werden die nicht beobachtbaren Kanten entfernt.
2. Danach werden die Flächen analysiert und diejenigen (Teil)Flächen entfernt, die einen Flächeninhalt von Null haben.

Nur die erste Phase erfordert den Einsatz eines Schwellwerts, der angibt ab welcher Länge eine Kante als nicht mehr beobachtbar gilt. Die zweite Phase, die natürlich von der ersten abhängt, beruht dagegen auf einer exakten geometrischen Analyse.

3.4.1 Entfernung von Kanten

Wenn die Länge einer Kante unter der aktuellen Parameterbelegung so klein ist, daß die Kante in den Luftbildern nicht beobachtet werden kann, kann sie trotzdem nicht so einfach entfernt werden. Durch das Entfernen einer Kante werden ihre beiden Endpunkte miteinander identifiziert. Um die Konsistenz des parametrisierten Modells zu gewährleisten, muß daher sichergestellt werden, daß die Parametrisierung und die Parameterbelegung so modifiziert wird, daß die beiden Endpunkte die gleiche Parametrisierung erhalten. Um das zu erreichen wird der folgende Algorithmus eingesetzt:

Algorithmus 3.1 ENTFERNE KANTE k

1. Berechne den Differenzvektor D der zu entfernenden Kante k .
2. Erstelle Gleichungssystem, daß D mit dem Nullvektor identifiziert.
3. Führe Parameterschätzung des Gleichungssystems durch. Daran sind nur die Formparameter beteiligt, die in D enthalten sind.
4. Ersetze im gesamten Modell die im letzten Schritt geschätzten Parameter durch die geschätzten Werte.
5. Entferne alle Kanten, die eine Länge haben, die einen Schwellwert unterschreitet und deren beide Endpunkte identische Parametrisierungen haben.

3.4.1.1 Beispiel

Die beiden Bodenpunkte der in Abbildung 3.9 markierten Fläche und ihr Differenzvektor D haben die Koordinaten

$$P_l = \begin{pmatrix} -d'' - b + \frac{bh_3}{h_2} - 2 \\ -h_1 - h_2 + h_3 \\ -d' - d - 2 \end{pmatrix}, \quad P_r = \begin{pmatrix} -b + \frac{bh_3}{h_2} \\ -h_1 - h_2 + h_3 \\ -d' - d - 2 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad D = P_l - P_r = \begin{pmatrix} -d'' - 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Der Parameter d'' ist der Längenparameter, der durch die Verbindungsoperation neu erzeugt wurde, die das linke Satteldachendstück mit dem Rest verbunden hat. Das Gleichungssystem aus Schritt 2 besteht damit im wesentlichen aus $d'' - 2 = 0$ und hat die Lösung $d'' = 2$. Ersetzen des Parameters d'' durch den Wert 2 in P_l und P_r führt zu

$$P_l = \begin{pmatrix} -b + \frac{bh_3}{h_2} \\ -h_1 - h_2 + h_3 \\ -d' - d - 2 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad P_r = \begin{pmatrix} -b + \frac{bh_3}{h_2} \\ -h_1 - h_2 + h_3 \\ -d' - d - 2 \end{pmatrix}.$$

Sie haben jetzt also die gleiche Parametrisierung und die Kante zwischen ihnen kann entfernt werden.

3.4.1.2 Neue Eckengeometrien

Wenn eine Kante entfernt wird, werden ihre beiden Eckpunkte miteinander identifiziert. Deren adjazente Kanten werden auf den verbleibenden Eckpunkt übertragen. Dadurch können Ecken mit Geometrien entstehen, die vorher in keinem Gebäudeteilprimitiv existiert haben. Zum Beispiel führt die Entfernung der oberen horizontalen Kante der in Abbildung 3.9 markierten Fläche zu einer Ecke mit einer horizontalen (horizontal) und zwei schräg nach oben verlaufenden (schräg+) Kanten.

3.4.1.3 Nachträgliche Indizierung

Durch die Generalisierung entstehen im allgemeinen neue Ecken, die in den Gebäudeteilprimitiven nicht existieren. Da die neuen Modellecken unter Umständen bisher nicht erklärten Eckenbeobachtungen zugeordnet werden können, wird eine nachträgliche Indizierung durchgeführt. Wenn entsprechende Abbildungen von Eckenbeobachtungen zu Modellecken hergestellt werden können, werden die Beobachtungen dem Modell zugeordnet.

3.4.2 Entfernung von Flächen

Das Entfernen von Kanten und das Verschmelzen ihrer Endpunkte kann dazu führen, daß Flächen oder Teile von Flächen verschwinden, das heißt einen Flächeninhalt von Null haben. Im Beispiel von

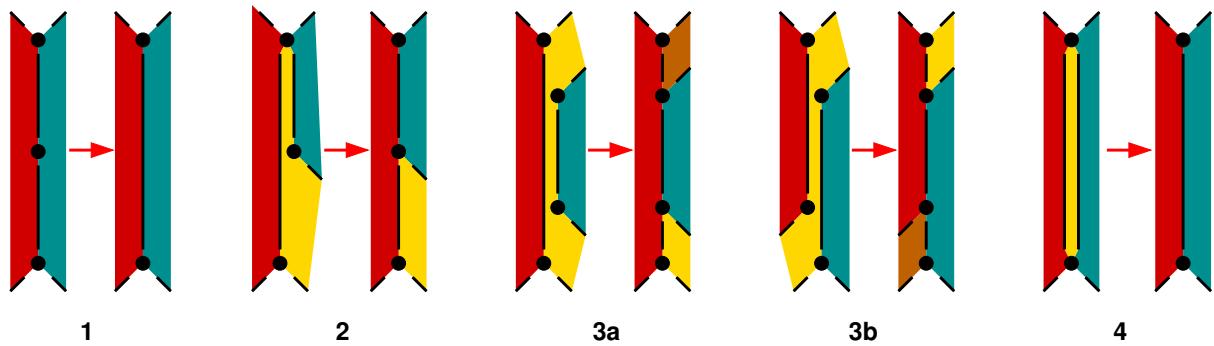


Abbildung 3.10: Durch das Entfernen von Kanten kann es nötig werden, verbliebenen Kanten und Flächen zu löschen oder aufzuteilen.

Abbildung 3.9 betrifft das zwei Flächen. Die markierte Fläche hat nach dem Entfernen der beiden horizontalen Kanten keinen Flächeninhalt mehr. Die Bodenfläche der Hypothese hat vorher einen T-förmigen Grundriß, danach ist er hingegen L-förmig.

Während die Bodenfläche durch das Löschen einer Kante „automatisch“ ihre Form von T- nach L-förmig ändern muß bei der markierten Fläche noch etwas gearbeitet werden. Nach Entfernen der horizontalen Kanten wird sie nur noch von ihren beiden vertikalen Kanten begrenzt und ihr Flächeninhalt ist 0. Um die Hypothese wieder in einen regulären Zustand zu überführen muß diese Fläche und eine der beiden vertikalen Kanten gelöscht werden.

Durch das Entfernen von einer oder mehreren Kanten kann es zu folgenden, noch zu bearbeitenden, Situationen kommen (vergleiche auch Abbildung 3.10):

1. Zwei Kanten, die einen gemeinsamen Endpunkt haben, liegen auf einer Geraden, überschneiden sich aber nicht.
Wenn von dem gemeinsamen Endpunkt keine weiteren Kanten ausgehen, wird er entfernt und die beiden Kanten zu einer durchgehenden Kante vereinigt.
2. Zwei Kanten, die einen gemeinsamen Endpunkt haben, liegen auf einer Geraden und überschneiden sich.
Der Teil der Fläche, der zwischen den beiden kolinearen Flächen liegt, wird gelöscht. Die Kanten werden vereinigt.
3. Zwei Kanten, die keinen gemeinsamen Endpunkt haben liegen auf einer Geraden und überschneiden sich.
 - (a) Eine Kante ist in der anderen ganz enthalten.
 - (b) Beide Kanten überschneiden sich jeweils teilweise.
 Die Fläche zwischen den beiden Kanten wird in zwei Teilflächen aufgespalten. Die beiden Kanten werden vereinigt.
4. Zwei Kanten haben beide Endpunkte gemeinsam.
Die Fläche, die von den beiden Kanten eingeschlossen wird, wird gelöscht. Eine der beiden Kanten wird gelöscht.

Es gibt aber Flächen, die nicht gelöscht werden dürfen, obwohl sie einen so kleinen Flächeninhalt haben, daß sie Bild nicht mehr beobachtbar sind. Das ist zum Beispiel bei der Walmfläche des Walmdachendstücks der Fall. Bei ihr sorgen Constraints dafür, daß die Längen ihrer begrenzenden Kanten immer eine gewisse Mindestlänge haben und daher nicht entfernt werden können. Diese Constraints sorgen für eine Abgrenzung zum Satteldachendstück und stellen sicher, daß die Fläche, die die beiden Primitive voneinander unterscheidet nicht verschwinden kann. Es ist Aufgabe des

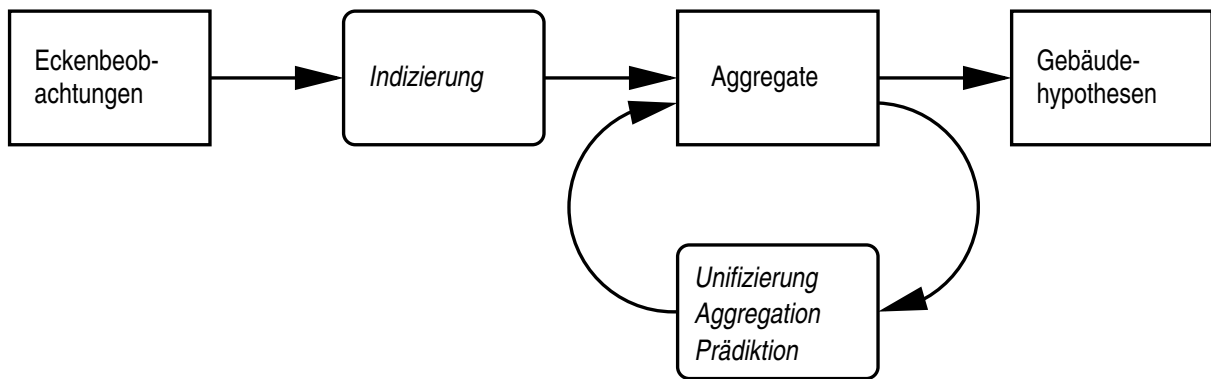


Abbildung 3.11: Durch Indizierung werden die zu den gegebenen Eckenbeobachtungen passenden Gebäudeteilprimitive instanziiert. Die resultierenden primitiven Aggregate werden über Unifizierungs-, Aggregations- und Prädiktionsoperationen zu geschlossenen Gebäudehypothesen zusammengesetzt.

Konstruktionsalgorithmus zu erkennen, daß das Walmdachendstück durch ein Satteldachendstück ersetzt.

3.5 Hypothesenkonstruktion

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Techniken können jetzt zu einem Algorithmus zusammengefügt werden, der modellgetrieben eine oder mehrere Gebäudehypothesen konstruiert, die die gegebenen Eckenbeobachtungen erklären.

Neben dem Hauptziel, nämlich überhaupt eine oder mehrere Hypothesen zu konstruieren, besteht ein weiteres Ziel darin, die zur Konstruktion benötigte Zeit so klein wie möglich zu halten. In einer realen Anwendung sollen nämlich nicht nur einige wenige Gebäude, sondern eine große Menge rekonstruiert werden. Das kann von wenigen Hundert zu vielen Tausenden reichen. Des weiteren ist bei der Rekonstruktion eines einzelnen Gebäudes schon ein kombinatorisches Problem zu lösen. Bei n gegebenen Beobachtungen und k_i instantiierten primitiven Aggregaten für die i -te Beobachtung sind bis zu $\prod_{i=1}^n k_i$ unterschiedliche Kombinationen darauf hin zu testen, ob sie sich die Aggregate zu einer Gebäudehypothese zusammensetzen lassen. Das sind z. B. bei 6 primitiven Aggregaten für jede von 8 Beobachtungen schon $6^8 = 1\,679\,616$ Kombinationen. Schließlich ist zu berücksichtigen, daß insbesondere die symbolisch ausgeführte nichtlineare Parameterschätzung eine zeitaufwendige Operation darstellt.

An der Anzahl der zu rekonstruierenden Gebäude läßt sich erstmal nichts ändern. Bevor wir aber untersuchen, wie die Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen verkleinert werden kann und wann Parameterschätzungen durchgeführt werden müssen bzw. weggelassen werden können, wird zunächst der generelle Ablauf der Rekonstruktion erläutert. Davon ausgehend wird schrittweise der tatsächlich eingesetzte Algorithmus entwickelt.

3.5.1 Genereller Ablauf

Der generelle Ablauf der Hypothesenkonstruktion ist in Abbildung 3.11 illustriert und hat eine im wesentlichen iterative Form. Die Indizierungsoperationen instantiiieren die zu den gegebenen Eckenbeobachtungen passenden Gebäudeteilprimitive. Die dadurch erzeugten primitiven Aggregate stellen die anfängliche Menge von Gebäudeaggregaten zur Verfügung. Mit Argumenten aus dieser Menge, produzieren Unifizierungs- und Aggregationsoperationen immer komplexere zusammengesetzte Aggregate. Offene Gebäudeaggregate werden der Menge hinzugefügt, geschlossene Aggregate stellen die

gesuchten Gebäudehypothesen dar. Der Konstruktionsvorgang wird abgebrochen, wenn keine neuen Aggregate erzeugt werden können.

Wenn auf diese Weise keine geschlossene Hypothese erstellt werden kann, wird eine Prädiktionsoperation ausgeführt. Dabei wird ein primitives Gebäudeaggregat prädiziert, das entweder ein offenes Gebäudeaggregat schließen oder das mit zwei offenen Gebäudeaggregaten aggregiert werden kann. Anschließend wird mit Unifizierungs- und Aggregationsoperationen fortgefahren bis eine hinreichend gute Hypothese erstellt werden konnte oder eine weitere Prädiktionsoperation nötig wird.

Rekonstruierte Gebäudehypothesen werden generalisiert indem Flächen und Kanten, deren Flächeninhalt bzw. Kantenlänge unter einem Schwellwert liegen, aus der Hypothese entfernt werden. Nach der Generalisierung wird eine abschließende Parameterschätzung durchgeführt aus der auch die Bewertungen der Gebäudehypothesen abgeleitet werden. Schließlich werden die Hypothesen, wie in Kapitel 4 beschrieben, durch Erstellung von Ansichtenhierarchien der Verifizierung zugeführt

3.5.2 Direkte Umsetzung

Der oben beschriebene generelle Ablauf wird durch das folgende Verfahren relativ direkt umgesetzt. Die *priority queue* Q enthält die jeweils aktuellen Operationen, die mit einer noch zu beschreibenden Heuristik so sortiert werden, daß die vielversprechendste Operation vor allen aus Q entfernt und ausgeführt wird. Anfangs enthält Q alle Indizierungsoperationen. Nach jeder ausgeführten Operation werden mit dem Ergebnis neue Unifizierungs- und Aggregierungsoperationen gebildet und in Q eingefügt. Solange Q nicht leer ist, wird die jeweils erste Operation von Q aus Q entfernt und ausgeführt. Wenn Q leer ist, aber noch keine geschlossene Gebäudehypothese konstruiert wurde, wird eine Prädiktionsoperation in Q eingefügt und das Verfahren erneut gestartet.

Nach jeder Operation wird eine Parameterschätzung für das neu erzeugte Gebäudeaggregat durchgeführt, deren Ergebnis zum einen dazu verwendet wird, zu entscheiden, ob das Ergebnis in den weiteren Konstruktionsprozeß aufgenommen oder verworfen werden soll. Zum anderen wird das Ergebnis verwendet, um die neuen Operationen zu bewerten und in Q einzusortieren, die mit dem neuen Aggregat als Argument erzeugt werden. Bevor die zur Sortierung eingesetzte Ordnungsrelation beschrieben wird, soll zuerst der Konstruktionsalgorithmus 3.2 ITERATIVE HYPOTHESENKONSTRUKTION die bisherigen Ausführungen präzisieren.

3.5.2.1 Reihenfolgesteuerung

Der zentrale Punkt dieses Verfahrens ist die Ordnungsrelation, mit der die Operationen in Q sortiert werden. Sie steuert direkt die Reihenfolge in der die Operationen ausgeführt werden. Sie ist verantwortlich für die Anzahl der auszuführenden Operationen, die nötig sind um eine hinreichend gute Hypothese zu erstellen.

Da das in Algorithmus 3.2 ITERATIVE HYPOTHESENKONSTRUKTION beschriebene Verfahren eine grundsätzlich exhaustive Natur hat und alle Operationen, die in Q eingefügt werden, irgendwann auch ausgeführt werden, werden alle konstruierbaren Hypothesen auch konstruiert. Da aber insbesondere die Parameterschätzungen, die im Anschluß an jede ausgeführte Operation gemacht werden, sehr zeitaufwendig sind, soll eine die Beobachtungen hinreichend gut beschreibende Hypothese mit einer minimalen Anzahl von Operationen erstellt werden. Wenn diese Hypothese die Beobachtungen gut genug erklärt, kann die Hypothesenkonstruktion abgebrochen und mit der Verifizierung der Hypothese fortgefahren werden.

Die Ordnungsrelation, die das leistet, wird durch eine Heuristik definiert, die die folgenden *Konstruktionsprinzipien* erfüllt:

P1 Indizierungsoperationen sollen vor Unifizierungsoperationen und Aggregierungsoperationen ausgeführt werden, da sie die primitiven Aggregate erzeugen, auf denen die anderen beiden Operationentypen operieren.

Algorithmus 3.2 ITERATIVE HYPOTHESENKONSTRUKTION

1. **Initialisierung.** Die *priority queue* Q , die Menge der Gebäudeaggregate G und die Menge H der Gebäudehypothesen sind anfangs leer.
2. **Indizierung.** Die Indizierungsoperationen, die mit den N gegebenen Eckenbeobachtungen C_1, \dots, C_N und den Gebäudeteilprimitiven möglich sind, werden in Q eingefügt.
3. **Abbruchkriterium.** Wenn Q und H leer sind, muß eine Prädiktionsoperation erstellt und in Q eingefügt werden. Ist das nicht möglich, dann terminiert der Algorithmus. Wenn Q , aber nicht H leer ist, terminiere den Algorithmus.
4. **Operation ausführen.** Sei q die erste Operation in Q . Entferne q aus Q , führe die Operation q aus und führe eine Parameterschätzung für das Ergebnis-Aggregat A durch.
5. **Test von A .** Entscheide anhand des aus der Parameterschätzung abgeleiteten *goodness of fit* Wertes, ob A die ihm zugeordneten Beobachtungen hinreichend gut erklärt oder ob A verworfen werden soll. Wenn A verworfen wird, gehe zurück zu Schritt 3 und führe die nächste Operation aus.
6. **Neue Hypothese.** Wenn A eine geschlossene Hypothese ist, füge A in H ein. Zurück zu Schritt 3.
7. **Neue Operationen.** Erstelle neue Unifizierungs- und Aggregierungsoperationen mit A als einem Argument und dem zweiten Argument aus G . Füge die neuen Operationen in Q ein.
8. **Neues Aggregat.** Füge A in G ein. Gehe zurück zu Schritt 3 und führe die nächste Operation aus.

Der Algorithmus kann an zwei Stellen terminieren. Wenn H leer ist, dann konnte anhand der gegebenen Beobachtungen keine Hypothese erstellt werden. Sonst enthält H alle konstruierbaren Hypothesen.

- P2** Unifizierungsoperationen sollen vor Aggregationsoperationen ausgeführt werden, da einerseits die zusammengesetzten Aggregate, die von den Aggregationsoperationen erzeugt werden, nicht mehr unifiziert werden können und andererseits jede Unifizierungsoperation, die vor einer Aggregation ausgeführt wird, zu einer zusätzlichen erklärten Eckenbeobachtung führt.
- P3** Die Hypothesenkonstruktion soll *depth first* erfolgen, um so schnell wie möglich komplexe Aggregate und geschlossene Hypothesen erzeugen zu können.
- P4** Die Mehrfachkonstruktion des gleichen Teilgebäudes soll verhindert werden. Ein zusammengesetztes Gebäudeaggregat soll mit einem anderen Aggregat direkt verbunden werden, statt die einzelnen Teile einzeln zu aggregieren.

Diese Prinzipien sind in Algorithmus 3.3 ORDNUNGSRELATION umgesetzt, der die Ordnungsrelation auf den Operationen in Q definiert. Die Bewertung der erzeugten Hypothesen wird in Abschnitt 3.6 am Ende dieses Kapitels beschrieben.

3.5.2.2 Diskussion

Das Verfahren wurde in mehreren Veröffentlichungen beschrieben (Fischer, Kolbe und Lang (1997), (1998) und (1999)). Es wurde implementiert und erfolgreich auf Testdatensätze angewendet. Die wichtigsten Eigenschaften des Verfahrens sind folgende:

- Eine direkte Umsetzung des generellen Ablaufs der Konstruktion von Gebäudehypothesen bei Verwendung der in dieser Arbeit eingesetzten vier Arten von Operationen.

Algorithmus 3.3 ORDNUNGSRELATION

Seien im folgenden q_1 und q_2 zwei Operationen, die miteinander verglichen werden sollen.

1. Wenn q_1 und q_2 unterschiedliche Typen haben, wird die Indizierung vor der Unifizierung und diese vor der Aggregierung ausgeführt (P1,P2).
2. Wenn q_1 und q_2 beides Indizierungsoperationen sind, dann gehe wie folgt vor:
 - (a) Wenn die Operationen zu unterschiedlichen Eckenbeobachtungen gehören, wird die Ecke mit bislang weniger instantiierten primitiven Gebäudeaggregaten bevorzugt (P3).
 - (b) Wenn sonst die Operationen zur gleichen Eckenbeobachtung gehören, wird die Operation bevorzugt, von der a priori das bessere Ergebnis erwartet wird. Diese Bewertung wird in Abschnitt 3.5.3 vorgestellt (P3).
3. Wenn q_1 und q_2 beides Unifizierungs- bzw. Aggregierungsoperationen sind, mit den Argumenten $A_{1,a}$ und $A_{1,b}$ von q_1 und $A_{2,a}$ und $A_{2,b}$ von q_2 , werden die folgenden Attribute berücksichtigt:
 - (a) Die Operation q_i mit der größeren Anzahl von $A_{i,a}$ und $A_{i,b}$ zusammen abgedeckten Eckenbeobachtungen wird bevorzugt (P3).
 - (b) Die Operation q_i mit der kleineren Differenz zwischen den von $A_{i,a}$ und $A_{i,b}$ abgedeckten Eckenbeobachtungen wird bevorzugt (P4).
 - (c) Wenn bis hier noch keine Entscheidung getroffen werden konnte, werden die beiden Operationen sortiert bezüglich der Summe der bei den Parameterschätzungen der jeweiligen Argumente minimierten Werten der entsprechenden Zielfunktionen (P3).

- Nach jeder ausgeführten Operation erfolgt eine Parameterschätzung. Deren Ergebnis entscheidet darüber, ob das neu entstandene Gebäudeaggregat weiter an der Hypothesenkonstruktion teilnimmt oder verworfen wird.
- Die Steuerung der Reihenfolge, in der die Operationen ausgeführt werden, werden durch den direkten Vergleich von jeweils zwei Operationen definiert.

Die Vorteile einer direkten Umsetzung des Konstruktionsprinzips und einer einfach definierbaren Ordnungsrelation steht, da es sich um keinen Standardalgorithmus handelt, der hohe Aufwand für eine Analyse des Verfahrens gegenüber, sowohl was Laufzeit und Speicherbedarf als auch die Güte der konstruierten Hypothesen anbetrifft. Der im folgenden Abschnitt beschriebene A^* -Algorithmus ist ein ausführlich untersuchter Algorithmus der KI, für den diese Aussagen direkt aus den Lehrbüchern übernommen werden können.

3.5.3 A^* -Algorithmus

Im letzten Abschnitt wurde die direkte Umsetzung des generellen Ablaufs der Hypothesenkonstruktion beschrieben. Dieses Verfahren hat den Nachteil, daß es bezüglich Laufzeit und Qualität der erzeugten Hypothesen nur schlecht analysierbar ist. Der Einsatz eines bekannten Algorithmus, in den eine die Gebäudeaggregate vergleichende Heuristik als Baustein integriert wird, hat dagegen den großen Vorteil, daß dessen Eigenschaften bekannt sind und so Aussagen z.B. über die Laufzeit übernommen werden können.

Das wird vom A^* -Algorithmus geleistet. Er löst *Suchprobleme* und ist

vollständig, d.h. wenn eine Lösung des Suchproblems existiert, dann findet er sie,

optimal, d.h. bei mehreren Lösungen findet er zuerst die optimale,

optimal effizient unter den anderen Suchproblemen.

Für seinen Einsatz muß die Hypothesenkonstruktion als Suchproblem formuliert werden. Die optimale Lösung ist durch den kürzesten Weg von der Wurzel des entsprechenden *Suchbaums* zu einem Knoten gegeben, der einen Endzustand darstellt. Die Aufgabe des A*-Algorithmus ist das Finden dieses kürzesten Weges in minimaler Zeit. Er wird dabei unterstützt durch eine Heuristik, die festlegt, welche Knoten des Suchbaums zu welchem Zeitpunkt expandiert werden. Je besser die Heuristik ist, desto kleiner ist die Menge der Knoten, die expandiert werden, bevor ein Endzustand gefunden wird. Die Anwendung des A*-Algorithmus auf die Hypothesenkonstruktion wird nun im Detail beschrieben.

3.5.3.1 Suchproblem

Die Konstruktion einer Gebäudehypothese, die die gegebenen Beobachtungen optimal erklärt, wird im Folgenden als Suche nach der dieser optimalen Hypothese aufgefaßt. Die Suche wird durch einen Suchbaum unterstützt, der zu Beginn der Suche nur aus dem Wurzelknoten besteht. Bei jedem Schritt der Suche wird dann ein Knoten expandiert. Die Suche terminiert, wenn ein Knoten gefunden wird, der einen Endzustand, also eine Gebäudehypothese, repräsentiert.

Es läge zunächst nahe, Gebäudeaggregate als Knoten des Suchbaums zu wählen. Das hätte allerdings den Nachteil, daß zur Expandierung eines Knotens alle Operationen ausgeführt werden müssten, die das durch diesen Knoten repräsentierte Gebäudeaggregat als Argument haben. Im optimalen Fall wird aber nur ein Nachfolger des Knotens weiter verfolgt. Die anderen bei der Expandierung erzeugten Knoten werden nicht weiter benötigt.

Es ist daher günstiger als Knoten die Operationen selbst zu verwenden. Die Expandierung eines Knotens besteht in der Ausführung einer Operation und der anschließenden Generierung aller möglichen neuen Operationen, die dann die Nachfolger des Knotens bilden. Für die Expandierung eines Knotens muß nur eine Operation ausgeführt werden. Die Erzeugung einer Operation ist viel billiger als deren Ausführung, da keine Ausgleichsrechnung zur Parameterschätzung durchgeführt werden muß.

Die Indizierung wird vor Beginn der Suche komplett ausgeführt. Die Knoten des Suchbaums sind also die Unifizierungs-, Aggregations- und Prädiktionsoperationen. Endzustände sind Aggregationsoperationen, deren Ergebnis eine geschlossene Gebäudehypothese ist.

3.5.3.2 Heuristik

Der A*-Algorithmus ist eine Best-First-Suche. Die Knoten des Suchraums werden durch eine Funktion

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

für einen Knoten n bewertet. Dabei gibt die streng monotone Funktion $g(n)$ die Kosten des Pfades vom Wurzelknoten zum Knoten n und $h(n)$ die geschätzten Kosten von n zum Zielknoten, dem optimalen Endzustand, an. Für h gilt die Bedingung, daß die wirklichen Kosten h^* nicht überschätzt werden dürfen.

$$h(n) \leq h^*(n)$$

Wenn diese Bedingung erfüllt ist, heißt h *zulässige* Heuristik. Eine triviale Heuristik $h \equiv 0$ ist zwar zulässig, expandiert aber alle Knoten und führt zu einem rein exhaustiven Verfahren.

Die Reihenfolge, in der der Suchbaum expandiert und damit die optimale Gebäudehypothese konstruiert wird, hängt von der Heuristik h ab. Je näher sie an den wirklichen Kosten h^* liegt, desto kürzer ist der Weg zur optimalen Hypothese. Der Definition von h kommt also eine entscheidende Bedeutung bei der Hypothesenkonstruktion zu.

Es müssen also zuerst die Eigenschaften festgelegt werden, bezüglich derer die Optimalität einer Gebäudehypothese definiert wird. Daraus kann dann eine passende Heuristik abgeleitet werden. Fangen wir an mit einem informellen Anforderungskatalog:

Möglichst viele erklärte Beobachtungen. Die konstruierte Hypothese soll, durch Zuordnung der Beobachtungsmerkmale zu entsprechenden Modellmerkmalen, die gegebenen Beobachtungen erklären. Eine Hypothese, die alle Beobachtungen erklärt, soll besser bewertet werden als eine, die nur einen Teil der Beobachtungen erklärt.

Diese Forderung ist für geschlossene Gebäudehypothesen einfach, für offene Gebäudeaggregate dagegen schwer in eine Funktion umsetzbar. Bei einer Gebäudehypothese müssen einfach alle ihr zugeordneten Beobachtungen gezählt werden. Bei einem offenen Gebäudeaggregat ist hingegen noch nicht klar, welche Beobachtungen durch zukünftige Unifizierungs- und Aggregierungsoperationen noch erklärt werden können.

In einem optimistischen Ansatz kann dieses Problem so gelöst werden, daß alle als nicht unerklärbar eingestuften Beobachtungen, für die mindestens ein erklärendes primitives Gebäudeaggregat existiert, als erklärt angesehen werden, indem davon ausgegangen wird, daß zu einem späteren Zeitpunkt eines dieser Aggregate aggregiert wird. Dadurch wird die Zulässigkeit der Heuristik gewahrt, da bei nicht erfüllter Annahme die schließlich erzeugte Hypothese mehr unerklärte Beobachtungen enthält als angenommen. Mehr unerklärte Beobachtungen führen zu einer insgesamt schlechteren Bewertung als die Heuristik vorhergesagt hat. Das erhält die Zulässigkeit der Heuristik.

Möglichst gute Übereinstimmung des Modells mit den Beobachtungen. An den Stellen, an denen Beobachtungen existieren, soll das Modell genauso aussehen wie die Beobachtungen. Das heißt, daß die geometrischen Eigenschaften der Eckpunkte und Kanten der Beobachtungen genau mit denen des Modells übereinstimmen sollen.

Die Übereinstimmung von Modell und Beobachtungen wurde bereits im letzten Kapitel besprochen. Die Bewertung eines Gebäudeaggregats mit Hilfe der Parameterschätzung kann hier übernommen werden.

Möglichst einfaches Modell. Um dem Problem des Overfitting zu begegnen, daß zu einer gegebenen Menge von Beobachtungen immer ein optimal passendes, allerdings beliebig komplexes Modell erzeugt, soll das Modell möglichst einfach sein.

Das bedeutet, daß in Aggregations-, Unifizierungs- und Prädiktionsschritten solche Aggregate bevorzugt werden, die eine minimale Anzahl von Parametern, Eckpunkten oder Kanten besitzen und dabei die ihnen zugeordneten Beobachtungen optimale erklären.

Diese Anforderungen sind nicht gleichzeitig vollständig erfüllbar. Insbesondere die dritte Anforderung steht im Widerspruch zu den ersten beiden. Je mehr Ecken erklärt werden, desto komplexer wird das erklärende Modell und je mehr Details für die einzelnen Beobachtungen in das Modell eingebaut werden, desto geringer ist der globale Widerspruch zwischen den Teilen des Modells die die einzelnen Ecken erklären.

Aus diesen Anforderungen soll eine Bewertungsfunktion f konstruiert werden, die zwischen den Anforderungen abwägt und einen zufriedenstellenden Mittelweg findet. Sie muß in eine Kostenfunktion g und eine Heuristik h aufgeteilt werden, so daß $h \leq h^*$ erfüllt ist.

Um die zweite und dritte Anforderung gegeneinander abzuwägen, bietet sich das MDL-Kriterium an. Allerdings hängen die Aggregate der zu vergleichenden Operationen im allgemeinen nicht von den gleichen Beobachtungen ab. Erst bei der Wahl der besten Hypothese sind die Beobachtungsmengen – also die Menge aller Beobachtungen – gleich. Zur Lösung dieses Problems, werden nicht die in Frage stehenden Aggregate selbst, sondern ein diese Aggregate enthaltendes Modell, bewertet. Dieses Modell soll nun genauer beschrieben werden.

3.5.3.3 Modell

Um eine gegebene Aggregations- oder Unifizierungsoperation zu bewerten, die die Aggregate A_1 und A_2 als Argumente hat, denen die Beobachtungsmengen $B_1 \subseteq B$ und $B_2 \subseteq B$ zugeordnet sind, wird ein Modell $M(A_1, A_2)$ erzeugt, das A_1 und A_2 enthält und das alle gegebenen Beobachtungen in B erklärt. Dieses Modell wird als Vereinigung von A_1 und A_2 und primitiven Aggregaten

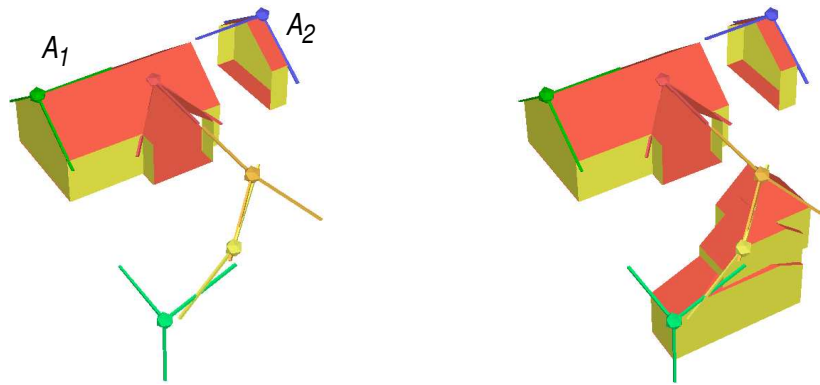


Abbildung 3.12: Die beiden Operations-Argumente A_1 und A_2 auf der linken Seite werden mit den besten primitiven Aggregaten der nicht erklärten Beobachtungen zu dem Modell $M(A_1, A_2)$ rechts vereinigt.

$A(b)$, für alle von A_1 und A_2 nicht erklärten Beobachtungen $B \setminus (B_1 \cup B_2)$, konstruiert. Wenn \mathcal{A} die aktuelle Menge aller Gebäudeaggregate und \mathcal{A}^0 die Menge der durch Indizierung erzeugten primitiven Aggregate bezeichnen ($\mathcal{A}^0 \subseteq \mathcal{A}$), soll gelten:

$$M: \mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \text{Pot}(\mathcal{A}),$$

$$M(A_1, A_2) \mapsto A_1 \cup A_2 \cup \bigcup_{b \in B \setminus (B_1 \cup B_2)} A(b), \quad A(b) \in \mathcal{A}^0$$

Als primitives Aggregat $A(b)$ wird für jede Beobachtung b das für diese Ecke instantiierte Aggregat aus \mathcal{A}^0 gewählt, daß die beste Bewertung hat. Da die $A(b)$ nur zur Abschätzung der in späteren Operationen wirklich verwendeten primitiven Aggregate verwendet werden, müssen sie nicht miteinander oder mit A_1 bzw. A_2 zu verbinden sein.

Wenn die Aggregate A_1 und A_2 durch die in Frage stehende Operation zu einer geschlossenen Hypothese verbunden werden, wird kein weiteres primitives Aggregat in das Modell aufgenommen, auch wenn $B \setminus (B_1 \cup B_2)$ nicht leer ist, also nicht alle Beobachtungen von A_1 und A_2 erklärt werden. Das Modell $M(A_1, A_2)$ besteht also nur aus A_1 und A_2 .

Abbildung 3.12 illustriert die Konstruktion von $M(A_1, A_2)$. Links sind die beiden Argumente A_1 und A_2 einer Aggregationsoperation dargestellt. Die beiden Aggregate erklären drei Ecken. Drei weitere Ecken bleiben unerklärt. Für sie werden, wie auf der rechten Seite dargestellt, jeweils das am besten passende primitive Aggregat gewählt und mit A_1 und A_2 zu dem Modell $M(A_1, A_2)$ vereinigt. In diesem Beispiel werden nur zwei der zusätzlich gewählten drei primitiven Aggregate später Teil der Hypothese sein. Das dritte (in der Abbildung vorne rechts) ist im Gegensatz zu den beiden anderen Krüppelwalmdachenden ein Walmdachende und kann mit ihnen nicht unifiziert werden.

Das Modell $M(A_1, A_2)$ erklärt also alle gegebenen Beobachtungen. Damit können zwei Operationen $\phi(A_1, A_2)$ und $\psi(A_3, A_4)$ von der Bewertungsfunktion f miteinander verglichen werden, indem die Modelle $M(A_1, A_2)$ und $M(A_3, A_4)$ miteinander verglichen werden.

3.5.3.4 Eigenschaften

Die Modelle haben folgende, für die Bewertung in der A^* -Heuristik wichtige, Eigenschaften:

Erklärung aller Beobachtungen. Jede Eckenbeobachtung $b \in B$ wird entweder durch A_1 , A_2 oder durch ein primitives Aggregat $A(b)$ erklärt, bzw. wurde als nicht erklärbar klassifiziert, da durch A_1 oder A_2 verdeckt (siehe dazu Abschnitt 3.3).

Anzahl der Parameter ist monoton fallend. Wenn Aggregat A_1 mit A_2 zu A' aggregiert oder unifiziert wird, dann hat A' höchstens soviele Parameter wie A_1 und A_2 zusammen. Diese Eigenschaft ist auf das Modell $M(A_1, A_2)$ übertragbar: das Modell $M(A_1, A_2)$ hat mehr Parameter als oder gleichviel wie ein Modell $M(A', A_1)$, daß das Ergebnis A' als Argument hat.

Dies ist eine Verletzung der Zulässigkeit der A^* -Heuristik, da die wirklichen Kosten nicht überschätzt werden dürfen, aber ein Modell M mit einem größeren Wert bewertet wird als ein Modell M' , das weniger Parameter hat als M .

Aber obwohl für ein Modell $M(A_1, A_2) = A_1 \cup A_2 \cup \bigcup_{b \in B \setminus (B_1 \cup B_2)} A(b)$ nicht bekannt ist, wie die primitiven Aggregate $A(b)$ mit A_1 und A_2 verbunden werden sollen oder ob vielleicht ganz andere primitive Aggregate an deren Stelle treten, ist über die Fügeflächen aller Aggregate von $M(A_1, A_2)$ bekannt, welche Parameter unifiziert würden und damit im Endergebnis nicht mehr vorhanden wären.

Als Korrektur der Parameteranzahl von $M(A_1, A_2)$ wird damit für jede Fügefläche der beteiligten Aggregate die Hälfte der Anzahl ihrer Parameter abgezogen. Der resultierende Wert ist eine realistische Schätzung der Modellkomplexität. Allerdings kann so immer noch die Zulässigkeit der Heuristik verletzt werden. Wenn nämlich für eine Beobachtung $b \in B \setminus (B_1 \cup B_2)$ statt des angenommenen primitiven Aggregats $A(b)$ ein primitives Aggregat gewählt wird, daß eine Fügefläche mit mehr Parametern als der von $A(b)$ besitzt, werden während der Aggregation auch mehr Parameter entfernt als durch die Korrektur erfaßt werden.

Eine alternative Korrektur, die die Zulässigkeit der Heuristik wahrt, nimmt statt der Fügeflächen, die tatsächlich in den Aggregaten von M vorkommen, immer die Fügefläche mit der größten Zahl von Parametern an, die in einem Gebäudeteil primitiv vorkommt.

Dieser Ansatz ist aber zu pessimistisch und nimmt der Heuristik zu viel von ihrer Ausdruckskraft. Es ist besser die Zulässigkeit zu verletzen und darauf zu vertrauen, daß der A^* -Algorithmus trotzdem die optimale Hypothese findet, als eine (fast) triviale Heuristik zu verwenden, die die Suche kaum noch steuern kann.

Die Qualität der Parameterschätzung nimmt ab. Die geometrische Übereinstimmung des Modells $M(A_1, A_2)$ nimmt mit steigender Anzahl der von dem Resultat der Operation erklärten Beobachtungen ab. Der Erwartungswert der Bewertung der Parameterschätzung ist ungefähr gleich der Anzahl der Beobachtungen: je mehr Beobachtungen, desto eher und stärker widersprechen sich diese. Die primitiven Aggregate $A(b)$, die Teil von $M(A_1, A_2)$ sind, beeinflussen diese Aussage im allgemeinen nicht, da sie optimal zu den Beobachtungen passen (Residuum = 0). Die Zulässigkeit der Heuristik bleibt durch diesen Teil der Bewertung also gewahrt.

Für die Bewertung der Modelle sind noch zwei Punkte zu beachten.

Unerklärbare Beobachtungen. Wenn eine oder mehrere Beobachtungen für ein Gebäudeaggregat A , wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, als nicht erklärbar klassifiziert wurden, müssen sie durch Bestrafungsterme so in die Bewertung eingehen, daß die Aggregate besser bewertet werden, die diese Beobachtungen erklären. Der Bestrafungsterm muß sich an der Bewertung der primitiven Aggregate orientieren: Die Bewertung muß gewährleisten, daß auch das zur Beobachtung am schlechtesten passende primitive Aggregat einer Nichterklärung bevorzugt wird.

Gleichheit direkt nach der Indizierung. Direkt nach der Indizierung gibt es nur primitive Gebäudeaggregate. Im allgemeinen Fall entspricht die für die Indizierung verwendete Eckenbeobachtung, daß sie optimal zur entsprechenden Modellecke paßt. Die geometrische Übereinstimmung wird dann in all diesen Fällen mit dem gleichen Wert bewertet. Für die Erstellung eines Modells für ein gegebenes Aggregat werden die besten primitiven Aggregate verwendet. Die

Modelle, die ihrerseits für diese besten primitiven Aggregate erstellt werden, sind dann alle identisch und werden auch identisch bewertet. Damit trotzdem eine eindeutige Reihenfolge auf den Modellen definiert werden kann, können unter anderem die folgenden Informationen verwendet werden:

Anzahl der Fügeflächen. Beginne den Aufbau der Gebäudehypothesen mit dem primitiven Aggregat mit den meisten Fügeflächen. Dieses stellt den strukturellen Mittelpunkt einer Hypothese dar.

Geometrische Position bzgl. anderer Aggregate. Starte mit dem primitiven Aggregat in der geometrischen Mitte der späteren Hypothese. Diese wird anhand der gegebenen Eckenbeobachtungen bestimmt.

Komplexität der primitiven Aggregate. Fange die Hypothesenkonstruktion mit dem am seltensten indizierten Gebäudeteilprimitiv an.

Die Konstruktion soll in allen Fällen in der Mitte bzw. mit dem am seltensten indizierten Primitiv beginnen, da dadurch Widersprüche mit den anderen Eckenbeobachtungen möglichst früh entdeckt werden können.

3.5.3.5 MDL-Prinzip

Um die Modelle zu bewerten und entsprechend zu ordnen, wird das Prinzip der minimalen Beschreibungslänge (engl. *Minimum Description Length*, kurz MDL) angewandt. Hier wird aus einer Menge von Modellen dasjenige ausgesucht, daß maximale Wahrscheinlichkeit hat, die Beobachtungen zu erklären. Diese Wahrscheinlichkeiten werden über den Begriff der Information mit den Beschreibungslängen in Verbindung gebracht, mit denen die Modelle repräsentiert werden. Die maximale Wahrscheinlichkeit entspricht dabei der minimalen Beschreibungslänge.

Um aus einer Menge von Modellen M_i das herauszufinden, daß die gegebenen Beobachtungen D am besten erklärt wird dasjenige gesucht, daß die Wahrscheinlichkeit $P(M_i|D)$ maximiert. Durch Anwendung des Satzes von Bayes und unter der Annahme, daß die Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen $P(D)$ konstant ist, erhält man

$$\begin{aligned}\hat{M} &= \arg \max_{M_i} P(M_i|D) \\ &= \arg \max_{M_i} \frac{P(D|M_i)P(M_i)}{P(D)} \\ &= \arg \max_{M_i} P(D|M_i)P(M_i).\end{aligned}$$

Durch Einführung des Begriffs der Information $I(X) = -\log X$, die der Beschreibungslänge von X entspricht, wird dies zu

$$\begin{aligned}\hat{M} &= \arg \min_{M_i} I(D|M_i) + I(M_i) \\ &= \arg \min_{M_i} L(M_i).\end{aligned}$$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit $P(M_i)$, kann entweder, wenn vorhanden, hier eingesetzt, oder wenn sie nicht vorliegt, ignoriert werden.

Wenn die Fehler der Beobachtungen in einer Maximum Likelihood Schätzung durch das Modell $E(\mathbf{y}) = f(\theta)$ ausgedrückt werden, die n_B Beobachtungen \mathbf{y} sind eine Funktion der n_P Parameter θ , dann erhält man die Beschreibungslänge (nach Rissanen (1987))

$$L(M_i) = \frac{\Omega}{2 \ln 2} + \frac{1}{2} n_P \log_2 n_B \quad (3.1)$$

mit den Residuen

$$\Omega = (\mathbf{y} - f(\hat{\theta}))^T \Sigma_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} (\mathbf{y} - f(\hat{\theta})),$$

der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\mathbf{y}\mathbf{y}}$ und der $E(\mathbf{y})$ minimierenden Parameterbelegung $\hat{\theta}$.

Die Beschreibungslänge $L(M_1)$ setzt sich, wie in (3.1) zu sehen, als Summe aus zwei Termen zusammen. Der linke Term bewertet, wie gut die Beobachtungen zum Modell passen und entspricht der zweiten Anforderung des Anforderungskatalogs auf Seite 63. Der rechte Term realisiert die dritte, auf Seite 63 formulierte, Anforderung und integriert die Modellkomplexität als Anzahl der freien Parameter und verhindert ein Overfitting des Modells.

3.5.3.6 Bewertungsfunktion

Mit diesem Formalismus läßt sich nun die Bewertungsfunktion des A^* -Algorithmus formulieren. Die Beschreibungslänge $L(M(A_1, A_2))$ in (3.1) des für eine Operation $\phi(A_1, A_2)$ erzeugten Modells $M(A_1, A_2)$ wird als Ergebnis der Funktion f verwendet.

Da die einzelnen Aggregate, aus denen sich $M(A_1, A_2)$ zusammensetzt unabhängig sind, gilt

$$L(M(A_1, A_2)) = L\left(A_1 \cup A_2 \cup \bigcup_{b \in B \setminus B'} A(b)\right) = L(A_1) + L(A_2) + \sum_{b \in B \setminus B'} L(A(b))$$

Damit werden g und h definiert durch

$$g = L(A_1) + L(A_2) \quad \text{und} \quad h = \sum_{b \in B \setminus B'} L(A(b)).$$

Die Kostenfunktion g bezieht sich nur auf die beiden Argumente A_1 und A_2 der Operation $\phi(A_1, A_2)$. Die Heuristik h stützt sich auf die primitiven Aggregate $A(b)$, die die Stellvertreter der primitiven Gebäudeaggregate sind, die später wirklich zum Ergebnis von $\phi(A_1, A_2)$ aggregiert werden.

3.5.3.7 Diskussion

Der A^* -Algorithmus mit auf MDL-Kriterium gestützter Bewertungsfunktion hat unter anderen die folgenden Vorteile:

1. Gut untersuchter Algorithmus mit bekannten Optimalitätsaussagen.
2. Kompromiß zwischen Modellkomplexität und optimaler geometrischer Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtungen.

Diesen stehen zwei wesentliche Nachteile gegenüber:

1. Die Zulässigkeit der vorgestellten Heuristik ist, wegen der fallenden Parameterzahl in den Modellen, nicht gewährleistet.
2. Nach jeder ausgeführten Operation muß eine teure Parameterschätzung durchgeführt werden, um eine Bewertung der neuen Operationen zu ermöglichen, die das Ergebnis als Argument haben.

Während der erste Punkt, ein generelles Problem bei der Definition einer geeigneten Heuristik, eher von theoretischem Interesse und für den praktischen Einsatz nicht entscheidend ist, führt der zweite Punkt auch bei optimaler Steuerung der Suche durch eine optimale Heuristik zu ähnlich hohen Laufzeiten wie die des davor vorgestellten direkten Verfahrens. Für den realen Einsatz eines Verfahrens zur Rekonstruktion von einer großen Menge von Gebäude ist die Laufzeit ein entscheidender Faktor. Aus diesen Gründen wird zur Hypothesenkonstruktion das im folgenden Abschnitt vorgestellte Verfahren praktisch eingesetzt.

3.5.4 Kombinatorisches Verfahren

Angeregt durch die von Steinhage (1999) vorgestellte Rekonstruktionsstrategie von Gebäuden, die sogenannte *Gestaltgrammatiken* (engl. *shape grammars*) einsetzt, basiert das im Folgenden vorgestellte Verfahren auf einer zweidimensionalen Formensprache, die die vier Operationen der Indizierung, Unifizierung, Aggregation und Prädiktion durch Ableitungsregeln einer formalen Grammatik repräsentiert. Im Gegensatz zu den auf linearen Zeichenketten arbeitenden Phrasenstrukturgrammatiken der Chomsky-Hierarchie (s. Hopcroft und Ullman (1990)), operiert die hier eingesetzte Gestaltgrammatik auf zweidimensionalen Formanordnungen, die Abstraktionen von Gebäudeaggregaten sind. Die Verwendung einer Gestaltgrammatik hat in dieser Arbeit einen motivierenden und informellen Charakter. Die Formalisierung und Realisierung der Hypothesenkonstruktion als Suchverfahren hat einen anderen Schwerpunkt.

3.5.4.1 Gestaltgrammatik

Die beiden folgenden Definitionen orientieren sich an der schon erwähnten Arbeit von Steinhage (1999) und definieren eine Gestaltgrammatik und ihre Formensprache.

Definition 15 (Gestaltgrammatik)

Eine G wird durch ein Tupel $G = (N, T, R, I)$ beschrieben. Dabei ist

T eine endliche Menge von terminalen Gestaltelementen,

N eine endliche Menge von nichtterminalen Gestaltelementen, so daß $T \cap N = \emptyset$,

R eine endliche Menge von Ersetzungsregeln $r: u \rightarrow v$, mit *Musterteil* u und *Ersetzungsteil* v , so daß $u \in (T \cup N)^+$ und $v \in (T \cup N)^*$ und

I das initiale Gestaltelement – auch Startelement genannt – mit $I \in (T \cup N)^+$.

Definition 16 (Formensprache einer Gestaltgrammatik)

Sei $G = (N, T, R, I)$ eine Gestaltgrammatik. Jede Form $w \in (T \cup N)^*$, die durch endlich viele Anwendungen der Ersetzungsregeln der Regelmenge R aus dem Startelement I ableitbar ist, wird als Formanordnung bezeichnet. Formanordnungen können also sowohl nichtterminale als auch terminale Gestaltelemente enthalten.

Die *Formensprache* $L(G)$ entspricht der Menge aller Formen, die durch endlich viele Anwendungen der Ersetzungsregeln der Regelmenge R aus dem Startelement I ableitbar sind und ausschließlich aus terminalen Gestaltelementen bestehen:

$$L(G) = \{w \mid w \in T^* \wedge I \xrightarrow{*} w\}.$$

Alle Formen der Formensprache $L(G)$ werden als *Terminalformen* bezeichnet. Terminalformen und Formanordnungen stehen damit in Analogie zu den Worten bzw. Zeichenketten einer Phrasenstrukturgrammatik.

Bezogen auf die Konstruktion von Gebäudehypothesen beschreibt die Form in Abbildung 3.13 ein instanziiertes Gebäudeteilprimitiv dar. Das Quadrat repräsentiert das eigentliche Gebäudeaggregat, die Kreise die in ihm enthaltenen Fügeflächen. Buchstaben definieren die Typen von Aggregat und Fügeflächen. Verbindungslinien zwischen Quadrat und Kreisen geben direkt die Orientierung der Fügeflächen an.

Eine Unifizierungsoperation zwischen zwei primitiven Aggregaten ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Damit die beiden primitiven Aggregate auf der linken Seite miteinander unifiziert werden können, müssen die Typen T_1 und T_2 der Aggregate und die Orientierungen der Fügeflächen identisch sein. Durch Erweiterung der Gestaltgrammatik zur parametrisierten Gestaltgrammatik werden solche Bedingungen als Prädikate den Ableitungsregeln zugeordnet, die nur dann angewendet können, wenn diese Prädikate erfüllt sind.

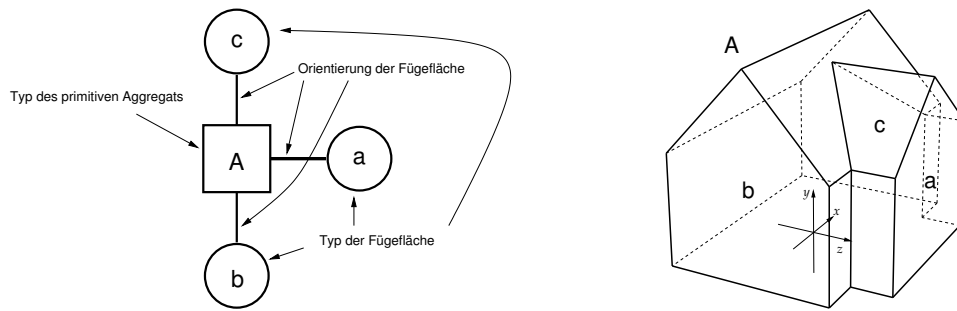


Abbildung 3.13: Die Form auf der linken Seite repräsentiert den T-Konnektor auf der rechten Seite. Das Quadrat repräsentiert das eigentliche Gebäudeaggregat, die Kreise die in ihm enthaltenen Fügeflächen, die in diesem Beispiel alle zur gleichen Klasse gehören. Verbindungslinien zwischen Quadrat und Kreisen geben die Orientierung der Fügeflächen an.

Die Aggregation von zwei Aggregaten ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Die Fügeflächentypen t_1 und t_2 müssen identisch und ihre Fügeflächen entgegengesetzt orientiert sein um aggregiert werden zu können. Da das in diesem Beispiel der Fall ist, kann die Aggregation durchgeführt werden. Die beiden Fügeflächen werden entfernt und die Aggregate mit den Typen A und B durch eine Linie miteinander verbunden.

Durch Anwendung von Aggregationsoperationen werden nach und nach nichtterminale Fügeflächen entfernt. Nur die terminalen primitiven Aggregate bleiben übrig. Wenn so eine Ableitung gefunden wird, die das Startsymbol I auf eine Form w ableitet, die nur noch aus Terminalen besteht, wird durch w eine Gebäudehypothese beschrieben. Durch Ausführung der den einzelnen Ableitungen entsprechenden Operationen wird die Hypothese erzeugt. Die Suche nach solchen Ableitungen durch das sogenannte kombinatorische Verfahren wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Zusammenfassend steht mit der Gestaltgrammatik ein theoretisches Gerüst zu Verfügung, daß sowohl eine anschauliche Beschreibung der Hypothesenkonstruktion als auch eine umfassende theoretische Beschreibung des Konstruktionsvorgangs erlaubt.

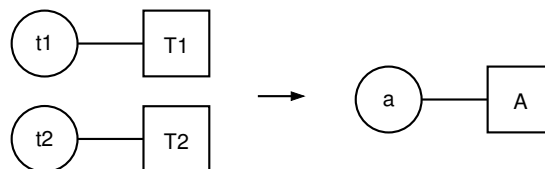


Abbildung 3.14: Unifizierung von zwei primitiven Aggregaten. Die Typen T_1 und T_2 müssen identisch und ihre Fügeflächen gleich orientiert sein um unifiziert werden zu können.

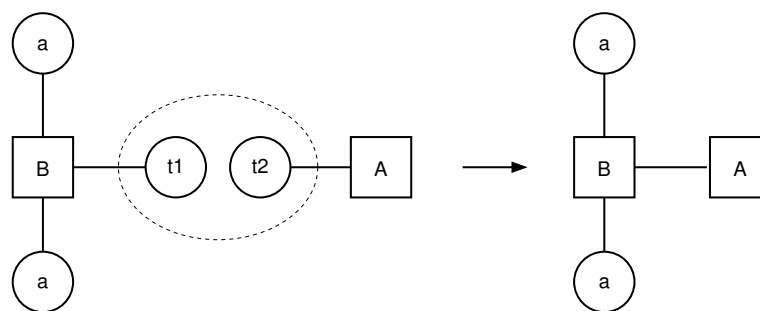


Abbildung 3.15: Aggregation von zwei Gebäudeaggregaten. Die Fügeflächentypen t_1 und t_2 müssen identisch und ihre Fügeflächen entgegengesetzt orientiert sein um aggregiert werden zu können.

3.5.4.2 Übersicht

Das in diesem Abschnitt vorgestellte kombinatorische Verfahren zeichnet sich gegenüber den anderen beiden dadurch aus, daß nicht für alle Zwischenergebnisse sondern nur noch für jede konstruierte Hypothese eine Parameterschätzung durchgeführt wird. Unter anderem durch diese große Zeitersparnis wird es möglich, alle Zuordnungen von indizierten primitiven Aggregaten zu Eckenbeobachtungen zu untersuchen und festzustellen, ob sie sich zu einer geschlossenen Gebäudehypothese zusammenfügen lassen.

Die Zuordnungen werden über die Aufzählung aller Teilmengen der Menge der Aggregations- und Unifizierungsoperationen ermittelt. Diese Aufzählung wiederum kann als Suche in einem Suchbaum aufgefaßt werden. Für jede Operation gibt es eine Ebene im Suchbaum mit zwei Alternativen: Die Operation wird in die Teilmenge bzw. wird nicht in die Teilmenge aufgenommen. Jeder Pfad vom Wurzelknoten zu einem Blatt des Baums bildet ein Element der Potenzmenge der Operationenmenge.

Eine einfache Tiefensuche erzeugt mittels *Backtracking* alle Elemente der Potenzmenge. Gleichzeitig wird versucht, frühzeitig ganze Teilläste des Suchbaums abzuschneiden, wenn festgestellt werden kann, daß keiner der Pfade, die teilweise in einem solchen Ast liegen, zu einer Hypothese führen kann. Diese Beschneidung (engl. *pruning*) des Suchbaums hat in der Anwendung des Verfahrens auf den Avanche-Datensatz zu sehr großen Reduktionen der Anzahl der zu untersuchenden Konfigurationen geführt, so daß die Laufzeit des implementierten Verfahrens im Vergleich zum direkten Verfahren um eine Größenordnung sank. Eine genauere Beschreibung der Beschneidungstechniken folgt in Abschnitt 3.5.4.4, ein detaillierter Vergleich der Laufzeiten im Ergebniskapitel 5.

3.5.4.3 Ablauf

Zunächst wird, wie bisher, die vollständige Indizierung durchgeführt. Anstatt aber eine vollständige Parameterschätzung für jedes instanziierte Gebäudeteilprimitiv durchzuführen, werden nur Orientierung und Position analytisch berechnet. Die Orientierung wird anhand der Kante der Beobachtung berechnet, deren Richtungsvektor einen minimalen vertikalen Wert besitzt und die damit möglichst horizontal verläuft: Richtungsvektoren von horizontale Kanten werden ausschließlich durch die gesuchte Orientierung bezüglich der vertikalen Koordinatenachse definiert. Die Position der instanziierten primitiven Gebäudeaggregate kann einfach aus den Eckenbeobachtungen abgeleitet werden. Da jedem Aggregat genau eine Beobachtung mit jeweils einem Eckpunkt zugeordnet ist, entspricht die Position des entsprechenden Modelleckpunktes exakt der des Eckpunktes der Beobachtung.

Algorithmus 3.4 HYPOTHESENKONSTRUKTION

1. Indizierung. Für jede der N Eckenbeobachtungen wird durch Indizierungsoperationen eine Menge $\mathcal{A}_i = \{A_i^1, \dots, A_i^{n_i}\}$ von primitiven Aggregaten erstellt.
2. Unifizierungs- und Aggregierungsoperationen erstellen. Für jedes Paar $A_i^{k_i}$ und $A_j^{k_j}$, $i \neq j$, wird geprüft, ob sie die Bedingungen erfüllen um unifiziert oder aggregiert zu werden. Wenn der Test positiv ausfällt, wird eine entsprechende Operation erzeugt und der die Menge U der Unifizierungen bzw. V (Verbindung) der Aggregationen hinzugefügt.
3. Aggregierungspläne erstellen. Die Aggregierungsoperationen in $V = \{v_1, \dots, v_{n_v}\}$ werden jetzt zu Aggregierungsplänen zusammengestellt. Das sind Teilmengen von V , die den Plan zur Aggregierung einer geschlossenen Gebäudehypothese beschreiben. Hierzu wird durch rekursive Aufrufe von Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN eine Menge $P \subset V$ und eine Menge $H \in \mathcal{A}_1 \cup \dots \cup \mathcal{A}_N$ erstellt. P beschreibt dann den Plan wie die Hypothese zu erstellen ist und H enthält die einzelnen primitiven Aggregate aus denen die Hypothese bestehen wird. P und H sind anfangs leer. Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN wird mit Argument 0 aufgerufen.

Nach der Indizierung gibt es also für jede der N Eckenbeobachtungen C_i eine Menge $\mathcal{A}_i = \{A_i^1, \dots, A_i^{n_i}\}$ von n_i primitiven Aggregaten. Mit diesen Aggregaten werden jetzt die beiden Mengen U und V von Unifizierungs- und Aggregierungsoperationen (Verbindungsoperationen) erstellt. Eine Operation wird erzeugt, wenn die Orientierungen der Argumente zueinander passen und die Typen der Aggregate (für Unifizierungsoperationen) bzw. die Typen der Fügeflächen (für Aggregierungsoperationen) kompatibel sind. Die Obergrenze für die Anzahl dieser Operationen beträgt $N(N-1)n^2/2$ wobei n die maximale Kardinalität der \mathcal{A}_i ist, also $n = \max_{i=1, \dots, N} n_i$.

Die Konstruktion der gesuchten Gebäudehypothesen aus den primitiven Aggregaten, die von dem Algorithmus 3.4 HYPOTHESENKONSTRUKTION erledigt wird, besteht im wesentlichen aus zwei unabhängigen Schritten. Zuerst wird von Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN eine Menge von primitiven Gebäudeaggregaten ausgewählt und ein Plan erstellt, wie sie miteinander kombiniert werden sollen. Ein solcher Plan besteht aus einer Menge von Aggregierungsoperationen und einer Menge von primitiven Aggregaten, die die Argumente dieser Operationen enthält. Wenn ein Plan gefunden wird, wird er von Algorithmus 3.6 FÜHRE PLAN AUS ausgeführt.

Während der Erstellung von Konstruktionsplänen durch Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN, werden nur Aggregierungsoperationen berücksichtigt. Wenn zwei oder mehr Eckenbeobachtungen eigentlich zum gleichen primitiven Gebäudeaggregat gehören, werden in den entsprechenden Plan Aggregierungsoperationen aufgenommen, die jedes der durch die einzelnen Ecken indizierten Aggregate über die selbe Fügefläche mit einem einzigen anderen Aggregat A_j verbinden. Erst während der Ausführung des Plans durch Algorithmus 3.6 FÜHRE PLAN AUS werden die entsprechenden Unifizierungsoperationen, die in U enthalten sein müssen, ausgeführt. Von den Aggregierungsoperationen bleibt nur eine erhalten. Diese verbindet das Ergebnis der Unifizierung mit A_j .

3.5.4.4 Beschneidung des Suchbaums

Der Algorithmus zur Erstellung eines Planes zählt grundsätzlich alle Teilmengen von V auf, muß also 2^{n_v} Kombinationen von Aggregierungsoperationen testen. Dieses exponentielle Laufzeitverhalten kann aber durch mehrere Faktoren begrenzt werden:

1. Jeder Plan $P \subset V$ muß eine feste Anzahl von Operationen enthalten. Da für jede Eckenbeobachtung genau ein primitives Gebäudeaggregat in H enthalten sein und H einfach zusammenhängend sein muß, muß P genau $N-1$ Operationen enthalten: Außer dem ersten muß jedes primitive Gebäudeaggregat aus H mit einer Aggregierungsoperation mit dem bereits konstruierten Aggregat verbunden werden. Wenn also ein Plan schon $N-1$ Operationen enthält, dürfen keine weiteren Operationen aufgenommen werden. Statt 2^{n_v} müssen nur noch $\binom{n_v}{N-1}$

Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN (i)

Dieser Algorithmus wird mit einem Argument i aufgerufen, das den Index der ersten Aggregierungsoperation in V angibt, ab dem Operationen gesucht werden, um den aktuellen Plan zu vervollständigen.

1. Wenn H für jede der N Eckenbeobachtung genau ein primitives Aggregat enthält, wird geprüft, ob sie durch die Operationen in P zu einer geschlossenen und zusammenhängenden Hypothese aggregiert werden. Ist das der Fall, dann werden mit Algorithmus 3.6 FÜHRE PLAN AUS die Operationen in P ausgeführt und die Hypothese erstellt. Danach wird dieser Algorithmus beendet.
2. Suche in V nach einer Operation v_j , $j \geq i$, mit Argumenten A_k und A_l , die eine der folgenden Bedingungen erfüllen:
 - (a) H enthält noch keine Aggregate für die Ecken k oder l .
 - (b) H enthält A_k aber kein Aggregat für die Ecke l .
 - (c) H enthält A_l aber kein Aggregat für die Ecke k .
 - (d) H enthält sowohl A_k als auch A_l .

In Fall a werden zwei neue Aggregate zu H hinzugefügt, die (noch) keine Verbindung zu einem der schon in H enthaltenen Aggregate haben. Die Fälle b und c erweitern das durch H und P beschriebene zusammengesetzte Aggregat um ein neues primitive Aggregat. Der letzte Fall d stellt die Verbindung zwischen zwei bisher unabhängigen Teilgebäuden dar.

Wenn eine passende Operation gefunden wurde, geht es weiter bei Schritt 3, sonst bei Schritt 7.

3. Wurde eine Operation v_j gefunden, die eine der Bedingungen erfüllt, dann wird v_j zu P und das neue Aggregat bzw. die neuen Aggregate zu H hinzugefügt. Also $P := P \cup v_j$ und
 - (a) $H := H \cup A_k \cup A_l$, bzw.
 - (b) $H := H \cup A_l$, bzw.
 - (c) $H := H \cup A_k$, bzw.
 - (d) H bleibt unverändert.
 4. Die Mengen H und P werden daraufhin überprüft, ob schon jetzt entschieden werden kann, daß mit ihnen keine Hypothese erstellt werden kann. Ist das der Fall wird zu Schritt 7 gesprungen.
 5. Durch Aufruf von Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN mit Argument $j+1$ wird versucht den Plan zu vervollständigen.
 6. Mache die Änderungen an P und H rückgängig, die in diesem und den rekursiven Aufrufen von Algorithmus 3.5 ERSTELLE PLAN gemacht wurden. Setze dann i auf $j+1$ und gehe zurück zu Schritt 2. Damit wird ein Backtracking durchgeführt und nach der gefundenen Operation v_j nach einer weiteren Operation gesucht, die in den Plan aufgenommen werden kann.
 7. Gehe zurück zur aufrufenden Instanz.
-

Algorithmus 3.6 FÜHRE PLAN AUS

Da bisher die Unifizierungsoperationen nicht berücksichtigt wurden, wird im allgemeinen der Fall vorkommen, daß ein primitives Gebäudeaggregat über dieselbe Fügefläche durch mehrere Aggregierungsoperationen mit mehr als einem Aggregat verbunden werden soll. Das ist nur möglich, wenn alle diese Aggregate miteinander unifiziert werden können. Wenn die entsprechenden Unifizierungsoperationen in der Menge U enthalten sind, werden diese zunächst ausgeführt. Anschließend werden die Aggregierungsoperationen in P ausgeführt.

In dem Beispiel auf der rechten Seite bezeichnet $v(A_i, j, A_k, l)$ die Aggregierungsoperation von A_i und A_k über die Fügeflächen j und l . Mit $u(A_i, A_j)$ wird die Unifizierungsoperation für A_i und A_j bezeichnet.

1. Schritte 2, 3 und 4 werden für alle disjunkten Teilmengen von H ausgeführt, auf die die Beschreibung in Schritt 1 zutrifft.

$$\begin{aligned} H &= \{ A_0, A_2, A_4, A_9, A_{13}, A_{15} \} \\ P &= \{ v(A_9, 7, A_{13}, 0), v(A_4, 7, A_{13}, 0), \\ &\quad v(A_2, 1, A_{13}, 3), v(A_0, 1, A_{13}, 5), \\ &\quad v(A_{13}, 0, A_{15}, 7) \} \end{aligned}$$

2. Ausführung der Unifizierungsoperationen. Wenn ein Aggregat $A \in H$ über die gleiche Fügefläche mit zwei oder mehr Aggregaten A_{i_1}, \dots, A_{i_k} , $k \geq 2$, aus H verbunden werden soll, muß U die Unifizierungsoperation für jede Kombination von je zwei dieser Aggregate enthalten. Insgesamt sind das $\binom{k}{2}$ Operationen.

A_9 , A_4 , und A_{15} sollen jeweils mit Fügefläche 7 mit A_{13} über Fügefläche 0 verbunden werden.

Mit $k = 3$ sind die $\binom{3}{2} = 3$ Unifizierungsoperationen $u(A_4, A_9)$, $u(A_9, A_{15})$ und $u(A_4, A_{15})$.

3. Von diesen Operationen werden $k-1$ so ausgewählt und ausgeführt, daß all Aggregate A_{i_1}, \dots, A_{i_k} miteinander unifiziert werden. Die Argumente der ausgewählten Operationen werden nach jeder Ausführung so angepaßt, daß das Ergebnis die entsprechenden Argumente ersetzt.
4. Anpassung der Aggregierungsoperationen an die Unifizierungen. Nachdem die Aggregate A_{i_1}, \dots, A_{i_k} miteinander unifiziert wurden, werden die Aggregierungsoperationen die A_{i_2}, \dots, A_{i_k} als ein Argument besitzen aus P gelöscht. In der in P verbleibenden Aggregierungsoperation, die A_{i_1} als Argument hat, wird A_{i_1} durch das Ergebnis der Unifizierungen ersetzt.

Die Operationen $u(A_4, A_9)$ und $u(A_4, A_{15})$ werden ausgewählt. Die Ausführung von $u(A_4, A_9)$ erzeugt A_{100} und $u(A_4, A_{15})$ wird zu $u(A_{100}, A_{15})$. Deren Ausführung erzeugt A_{101} .

Die Aggregierungsoperationen $v(A_9, 7, A_{13}, 0)$ und $v(A_{13}, 0, A_{15}, 7)$ werden aus P entfernt und $v(A_4, 7, A_{13}, 0)$ wird zu $v(A_{101}, 7, A_{13}, 0)$.

5. Die danach in P verbleibenden Aggregierungsoperationen müssen nun ausgeführt werden um die gesuchte Hypothese zu erhalten.

$$P = \{ v(A_{101}, 7, A_{13}, 0), \\ v(A_2, 1, A_{13}, 3), \\ v(A_0, 1, A_{13}, 5) \}$$

Führe den folgenden Schritt 6 solange aus bis P leer ist.

6. Wähle eine Operation v aus P aus, entferne sie aus P und führe sie aus. In den in P verbleibenden Operationen werden die Argumente, die mit einem Argument von V übereinstimmen mit dem Ergebnis von v ersetzt. Dadurch wird gewährleistet, daß die in H verbleibenden primitiven Gebäudeteile mit der in Konstruktion befindlichen Hypothese aggregiert werden können.

a) Ausführung von $v(A_{101}, 7, A_{13}, 0)$ erzeugt A_{102} . $P = \{v(A_2, 1, A_{102}, 3), v(A_0, 1, A_{102}, 5)\}$.

b) Ausführung von $v(A_2, 1, A_{102}, 3)$ erzeugt A_{103} . $P = \{v(A_0, 1, A_{103}, 5)\}$.

c) Ausführung von $v(A_0, 1, A_{103}, 5)$ erzeugt die gesuchte Hypothese A_{104} .

Kombinationen getestet werden. Im Falle des H3-Hauses mit $n_V = 27$ und $N = 6$ führt das zu einer Verringerung von $2^{n_V} = 134\,217\,728$ auf $\binom{27}{5} = 71\,042$ Kombinationen.

2. Da in einen Plan für jede Beobachtung genau ein primitives Aggregat aufgenommen wird, stehen nicht alle n_V Operationen unabhängig zur Verfügung. Sei zu einem bestimmten Zeitpunkt E die Teilmenge der Eckenbeobachtungen ist, für die schon ein durch sie indiziertes primitives Aggregat Teil des Plans ist. Dann dürfen keine weiteren Operationen in den Plan aufgenommen werden, die ein Aggregat als Argument besitzen, daß auch durch eine Ecke in E indiziert wurde. Ist etwa eine Aggregierungsoperation $v(A_i^{k_i}, A_j^{k_j})$ schon im Plan vorhanden, können keine Operationen mit Argumenten $A_i^{l_i}$ mit $l_i \neq k_i$ bzw. $A_j^{l_j}$ mit $l_j \neq k_j$ vorkommen.
3. Für Teilpläne, also Teilmengen von V mit weniger als $N - 1$ Elementen, werden Tests auf Konsistenz durchgeführt. Ein Beispiel dafür ist der Test darauf, ob diejenigen Aggregate in H , die mit einem weiteren Aggregat über dessen gleiche Fügefläche verbunden werden sollen, miteinander unifiziert werden können. Wenn das nicht der Fall ist, dann können alle Pläne, die den aktuellen Teilplan P enthalten, verworfen werden.

Die erwähnten Ausschlußkriterien konnten im Fall des H3-Hauses die Anzahl der betrachteten (Teil-)Pläne von $2^{n_V} = 134\,217\,728$ auf 876 senken. Wenn Kriterium 3 nicht angewendet wird, müssen auch nur 4612 Kombinationen getestet werden.

3.5.4.5 Diskussion

Das kombinatorische Verfahren ist deutlich schneller als die anderen beiden Verfahren (genauere Angaben folgen in Kapitel 5) und konstruiert dabei gleich gute Hypothesen. Da durch die Nichtausführung der Parameterschätzung weniger Informationen zur Verfügung stehen, ist das Verfahren natürlich uninformativer. Die Tiefensuche ist möglich, da Aufbau und Analyse der Pfade sehr viel weniger komplex sind als beim A*-Algorithmus. Außerdem wird durch die geschickte Beschneidung des Suchbaums die Tiefensuche eingeschränkt und geleitet. Für die praktische Umsetzung des kombinatorischen Verfahrens in ein lauffähiges Programm ist der einfache Algorithmus von großem Vorteil.

Eine Gegenüberstellung der drei vorgestellten Verfahren ergibt folgende Vor- und Nachteile:

	Vorteile	Nachteile
Iteratives Verfahren	Geradlinige Umsetzung des grundlegenden Konstruktionsprinzips. Verwendet alle zur Verfügung stehenden Informationen.	Langsames Verfahren aufgrund der in jedem Schritt ausgeführten Operation und Parameterschätzung.
A*-Algorithmus	Elegantes, gut untersuchtes Verfahren mit garantierten Optimalitätseigenschaften. Verwendet alle zur Verfügung stehenden Informationen.	Eine zulässige Heuristik ist schwer zu finden. Parameterschätzung nach jeder ausgeführten Operation.
Kombinatorisches Verfahren	Schnelles Verfahren. Einfach zu implementieren, dadurch robust.	Verwendet weniger Informationen und damit weniger Gebäudewissen als die anderen beiden Ansätze.

3.6 Hypothesenbewertung mit MDL-Prinzip

Die erstellten geschlossenen Gebäudehypothesen werden nach dem in Abschnitt 3.5.3.5 vorgestellten MDL-Prinzip bewertet und entsprechend sortiert. Wenn mehrere Hypothesen erstellt wurden, kann

so diejenige mit der besten Bewertung zuerst verifiziert werden: Jeder Hypothese H_i wird ihre Beschreibungslänge (vgl. auch Gl. (3.1))

$$L(H_i) = \frac{\Omega}{2 \ln 2} + \frac{1}{2} n_P \log_2 n_B \quad (3.2)$$

zugeordnet.

3.7 Zusammenfassung

Es wurde ein kombinatorisches Verfahren zur automatischen Konstruktion von Gebäudehypothesen für gegebene Beobachtungen vorgestellt, das die Hypothesenkonstruktion als Suchproblem formuliert und durch eine modifizierte Tiefensuche löst. Das Verfahren wurde mit zwei anderen verglichen und hat diesen gegenüber den Vorteil einen sehr einfachen Algorithmus zu haben, der schnell und robust implementiert werden konnte.

Darüber hinaus wurden alle von der Hypothesenkonstruktion eingesetzten Operationen und Teilalgorithmen sowie die Bewertung von Aggregaten und Hypothesen beschrieben. Hier wurde der große Einfluß der eingesetzten 3D-Modellierung sichtbar, die die Automatisierbarkeit der Hypothesenkonstruktion ermöglicht und leitet.

Das nächste Kapitel wird beschreiben, wie die generierten Hypothesen für die Verifizierung vorbereitet werden. Da die Verifizierung anhand der Bildmerkmale zweidimensional erfolgt, werden die Hypothesen in eine 2D-Repräsentierung transformiert. Dabei wird das Prinzip des Erkennens mittels Komponenten wieder aufgegriffen.

Kapitel 4

Ansichtenhierarchien

Für das Ziel der vollautomatischen Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern wurden bisher die 3D-Modellierung von Gebäuden und deren Anwendung bei der Konstruktion von Gebäudehypothesen vorgestellt. Das Thema dieses Kapitels sind die für die Verifizierung der Hypothesen eingesetzte 2D-Modellierung von Gebäuden und die Erstellung von Datenstrukturen, die bei der Verifikation eingesetzt werden.

Die automatisch generierten 3D-Gebäudehypothesen werden anhand aus den Luftbildern extrahierten 2D-Bildmerkmalen verifiziert. Die Bildmerkmale werden mit dem von Förstner (1994) bzw. von Braun (1994) beschriebenen Verfahren aus den Luftbildern extrahiert. Die Hypothesen werden anhand der gegebenen Kameraparameter in die Luftbilder zurückprojiziert und in Regionen zerlegt. Da nicht ganze Ansichten sondern nur einzelne Regionen in den Luftbildern gefunden werden müssen, wird eine robuste Verifizierung realisiert, die eine Hypothese auch dann findet, wenn sie teilweise verdeckt ist oder aus anderen Gründen nicht alle Merkmale extrahiert werden konnten. Durch Relationen, die innerhalb der Regionen und zwischen mehreren Regionen definiert sind, und aus den 3D-Hypothesen extrahiert werden, reicht die Identifikation einer Teilmenge der Regionen einer Ansicht zur Verifikation der gesamten Ansicht und damit zur entsprechenden Hypothese.

Im Gegensatz zur objektzentrierten 3D-Modellierung, in der die Gebäude in ihrer dreidimensionalen Ausprägung repräsentiert werden, ist die hier verwendete 2D-Modellierung betrachterzentriert: Gebäude werden durch ihre zweidimensionalen Ansichten modelliert, also so wie die Kamera und damit der Betrachter sie sieht. Die Modellmerkmale in den Ansichten können dann direkt mit den extrahierten Bildmerkmalen verglichen werden.

Die zweidimensionale Gebäudemodellierung wird durch eine hierarchische Graphstruktur realisiert, die auf Aspektgraphen und -hierarchien aufbaut. Auf drei Ebenen sind als Knoten eines Graphs die dreidimensionalen Gebäudehypothesen, die durch Rückprojektion entstandenen und mit Schattenwurf und Beleuchtungsinformationen versehenen Ansichten sowie die in diesen Ansichten enthaltenen Regionen angeordnet.

Der direkte Vergleich von Modell- und Bildmerkmalen wird erst durch eine geeignete Sensormodellierung ermöglicht. Die Sensoren – in dieser Arbeit ausschließlich Kameras, die im sichtbaren Wellenlängenbereich arbeiten – werden durch äußere und innere Parameter beschrieben, die als bekannt vorausgesetzt werden. Durch diese Parameter werden Position und Ausrichtung sowie die Brennweite der Kameras festgelegt.

Darüber hinaus werden radiometrische Informationen in das Modell integriert, die Aufschluß über zu erwartende relative Helligkeiten von einzelnen Flächen geben. Über den simulierten Schattenwurf, können zum einen primär vertikal wirkende Parameter wie z. B. die Geschoßhöhe durch die Analyse der Luftbilder bestimmt werden. Zum anderen werden die Schattenkanten so explizit modelliert und aktiv zur Verifikation aktiv genutzt, während sie in anderen Ansätzen sonst oft einen störenden Charakter haben.

Im allgemeinen können während der Hypothesenkonstruktion nicht alle Formparameter bestimmt

werden. Damit nicht auch das Matching von Modell- und Bildmerkmalen parametrisiert realisiert werden muß, wird ein Sampling der freien Parameter durchgeführt. Der n -dimensionale Raum, der durch die n freien Parameter aufgespannt wird, wird so in Teilmengen zerlegt, daß alle Ansichten aus einer Teilmenge topologisch zueinander äquivalent sind, und die Teilmengen also Äquivalenzklassen bilden.

4.1 Aspektgraphen und Aspekthierarchien

Zur Einführung von Begriffen und Konzepten wird zunächst kurz die Entwicklung der Ansichtenhierarchien aus Aspektgraphen und Aspekthierarchien dargestellt.

4.1.1 Aspektgraphen

Der von Koenderink und van Doorn (1979) eingeführte Aspektgraph ist eine zweidimensionale betrachterzentrierte Modellierung eines 3D-Objekts. Das heißt, daß ein Objekt nicht direkt über dessen Eigenschaften, wie z. B. Geometrie oder Material, repräsentiert wird, sondern daß das Modell auf der Wahrnehmung eines Betrachters beruht. Das heißt, daß zur Repräsentierung eine Menge von zweidimensionalen Ansichten verwendet wird. Ansichten werden durch die sichtbaren Kanten des Objekts gebildet. Andere Eigenschaften, wie Farbe und Material, werden nicht berücksichtigt.

Die sichtbaren Teile der projizierten Kanten eines Objekts werden in einer Ansicht durch Kanten eines Graphen repräsentiert. Die Knoten des Graphen entsprechen entweder sichtbaren Objekteckpunkten oder Schnittpunkten von projizierten Objektkanten. Zwei Ansichten können sich durch Anzahl von Knoten und Kanten des Graphen, oder in der Struktur, in der die Knoten durch Kanten verbunden sind, unterscheiden. Über die Graphstruktur wird damit eine Äquivalenzrelation auf den Ansichten definiert. Die in dieser Arbeit verwendete Äquivalenzrelation wird in Definition 4.3.3 formalisiert. Die Struktur von zueinander äquivalenten Ansichten wird *Aspekt* genannt. Andere Arbeiten verwenden auch die Begriffe *characteristic-view* (Wang und Freeman 1990), *genral view* (Bowyer und Dyer 1990) oder *general view* (Faugeras, Mundy, Ahuja, Dyer, Pentland, Jain und Ikeuchi 1992).

Um für die Repräsentierung eines Objekts auf der einen Seite möglichst wenige, auf der anderen Seite aber möglichst charakteristische Ansichten zu verwenden, wird von äquivalenten Ansichten nur jeweils eine ausgewählt. Dazu wird der gegebene Sichtraum – die Menge aller Punkte, die der Betrachter einnehmen kann – in Regionen äquivalenter Ansichten aufgeteilt. Die Ansichten einer solchen Region bilden also eine Äquivalenzklasse und haben eine invariante Struktur. Aus jeder Äquivalenzklasse wird jeweils ein Repräsentant als charakteristische Ansicht selektiert. Dafür wird die Ansicht ausgewählt, deren kürzeste Kante die maximale Länge hat. Das soll gewährleisten, daß auch kleine Details eines Aspekts gut durch den Repräsentanten wiedergegeben werden.

Die Repräsentanten der Äquivalenzklassen bilden die Knoten des sogenannten *Aspektgraphen*. Knoten von Repräsentanten aus benachbarten Äquivalenzklassen werden durch Kanten miteinander verbunden. Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite zeigt oben die Zerlegung des Sichtraums in Form einer Kugel, die die Menge aller Punkt mit konstantem Abstand zum Mittelpunkt des H3-Hauses darstellt, in Regionen äquivalenter Ansichten. Darunter ist ein Ausschnitt aus dem entsprechenden Aspektgraphen abgebildet.

Die Änderungen in der Graphstruktur von Ansichten, die auftreten, wenn sich der Betrachter aus einer Äquivalenzklasse des Sichtraums in eine benachbarte bewegt, werden *visuelle Ereignisse* genannt. Ein visuelles Ereignis kann bei einem solchen Übergang einzeln oder in Kombination mit anderen visuellen Ereignissen auftreten. In meiner Diplomarbeit (Fischer 1996) habe ich gezeigt, daß sie in vier Klassen unterteilt werden können:

Kante-Punkt-Ereignis. Ein Objekteckpunkt wird durch eine Objektkante verdeckt.

Punkt-Kante-Ereignis. Eine Objektkante wird teilweise von einem Objekteckpunkt verdeckt.

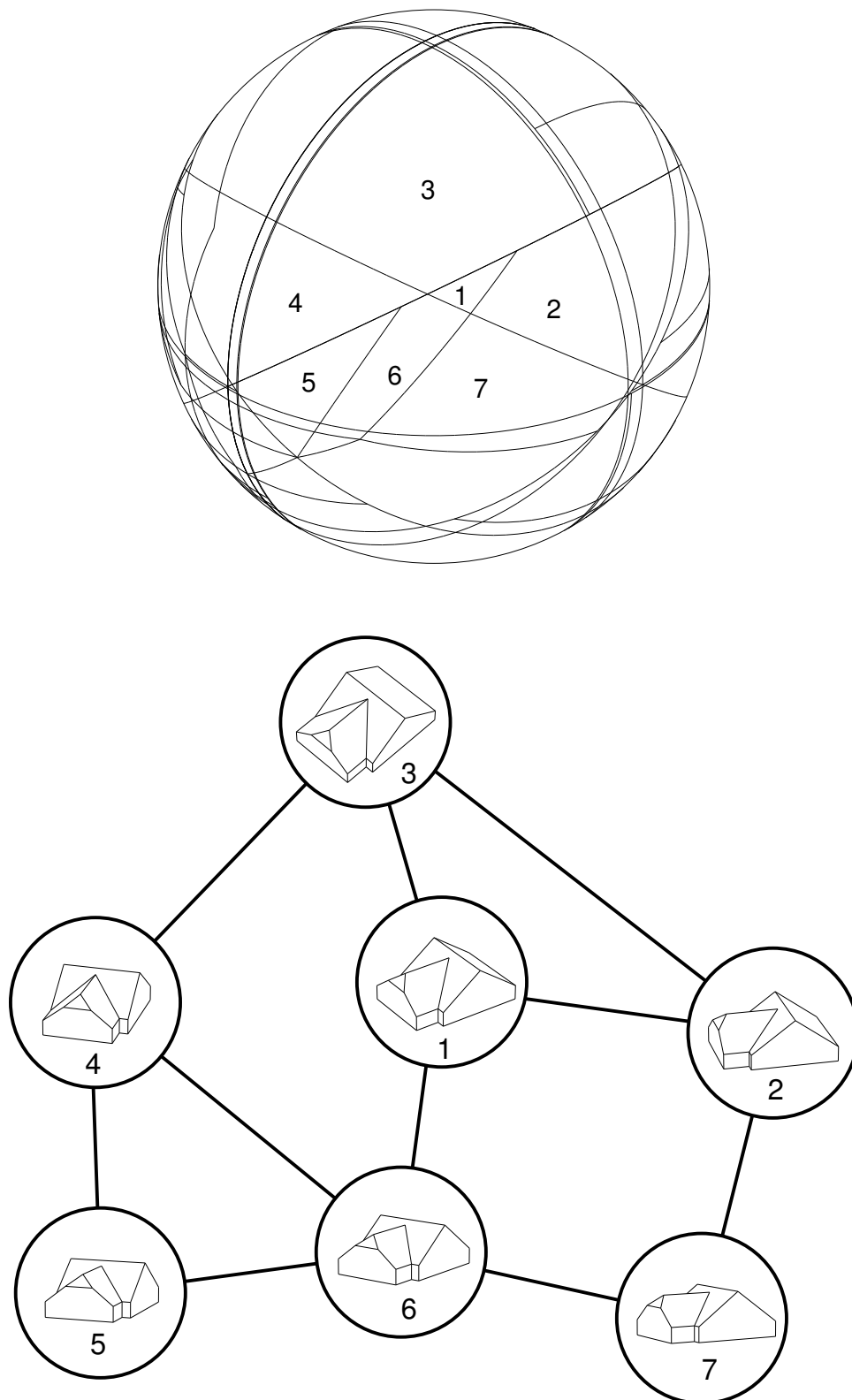


Abbildung 4.1: Zerlegung einer Sichtraumkugel mit konstantem Abstand zum Mittelpunkt des H3-Hauses in Regionen äquivalenter Ansichten. Darunter ein Ausschnitt aus dem entsprechenden Aspektgraphen: Von den 310 Aspekten sind hier sieben dargestellt.

Kante-Kante-Ereignis. Eine Objektkante wird von einer anderen, koplanaren Objektkante ganz oder teilweise verdeckt.

Kante-Kante-Kante-Ereignis. Der Schnittpunkt von zwei projizierten Objektkanten wird durch eine dritte Objektkante verdeckt.

4.1.1.1 Sichtraum

Der Sichtraum ist eine Teilmenge des \mathbb{R}^3 und enthält alle Standorte, die ein Betrachter einnehmen darf. Seine Form hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Eine große Klasse sind Sphären, die um den Mittelpunkt des Objekts zentriert sind. Der Radius einer Sphäre definiert, im Falle der perspektivischen Projektion, die Brennweite des verwendeten Kameramodells. Bei Parallelprojektion legt jeder Punkt der Sphäre die Abbildungsrichtung fest. Die Kamera wird immer so ausgerechnet, daß das Zentrum der Sphäre und damit der Mittelpunkt des Objekts auf die Bildmitte abgebildet wird. Sphären sind zweidimensionale Sichträume.

Einen zweiten wichtigen Sichtraum bildet der \mathbb{R}^3 ohne die konvexe Hülle des Objekts. In diesem dreidimensionalen Sichtraum kann der Betrachter seine Position und damit die verwendete Projektion nahezu beliebig wählen.

4.1.1.2 Anwendung

Das Hauptanwendungsgebiet von Aspektgraphen ist die Objekterkennung. Der große Vorteil liegt in der starken Korrespondenz von Modellmerkmalen zu den durch Methoden der Bildverarbeitung extrahierten Bildmerkmalen. Man benötigt zudem in der Erkennungsphase keine Kenntnisse mehr über die dreidimensionale Struktur der zu erkennenden Objekte. Aspektgraphen dienen in erster Linie zur Objektidentifizierung, können aber auch für eine grobe Bestimmung der Orientierung verwendet werden: Wenn das Objekt mit einem bestimmten Aspekt erkannt wurde, kann durch die entsprechende Äquivalenzklasse des Sichtraums die relative Orientierung von Kamera zu Objekt eingeschränkt werden.

Es gibt aber auch Kritik an Aspektgraphen. Von Faugeras, Mundy, Ahuja, Dyer, Pentland, Jain und Ikeuchi (1992) werden unter anderem folgende Punkte angesprochen:

- I: Skalenproblem. Die Art der Änderung in der Objektansicht bei Übergang von einer Äquivalenzklasse in eine benachbarte ist analytisch berechenbar. Es ist aber viel schwieriger, die Größe der dabei betreffenden Objektelemente vernünftig abzuschätzen. Eine Aussage darüber, ob ein visuelles Ereignis wichtig ist oder vernachlässigt werden kann, ist daher nur schwer möglich.
- II: Es ist fraglich, ob die topologischen Relationen zwischen den projizierten Objekteckpunkten und -kanten, die durch die Graphstrukturen der Ansichten kodiert werden, für die Objekterkennung ausreichen. Wenn Bildmerkmale nicht vollständig extrahiert werden können, kann der entsprechende Aspekt nicht eindeutig bestimmt werden.
- III: Die Erstellung eines Aspektgraphen ist in Abhängigkeit von der Objektkomplexität eine sehr komplexe Berechnung.
- IV: Aspektgraphen können sehr groß werden. Die Identifizierung des richtigen Aspekts kann dadurch ein schwieriges Matchingproblem werden.

Diese Kritikpunkte werden in Abschnitt 4.1.2 noch einmal aufgegriffen. Dort werden die sogenannten Aspekthierarchien eingeführt, die gegenüber Aspektgraphen gerade in Bezug auf die tatsächliche Anwendung mehrere Vorteile besitzen.

4.1.1.3 Erstellung von Aspektgraphen

Aspektgraphen können durch zwei sehr unterschiedliche Ansätze erstellt werden. Für das analytische Verfahren werden aus der Analyse der visuellen Ereignisse Algorithmen abgeleitet, die die Grenzlinien bzw. -flächen direkt berechnen, die die Äquivalenzklassen voneinander trennen. Dagegen wählt der Samplingansatz Punkte aus dem Sichtraum aus und berechnet für diese Ansichten des Objekts. Durch Vergleich der Ansichten werden die ausgewählten Punkte den entsprechenden Äquivalenzklassen zugeordnet. Die analytische Berechnung liefert zwar die präziseren Ergebnisse, der Samplingansatz hat aber in der praktischen Anwendung folgende Vorteile:

- Für die analytische Berechnung muß für jede Definition der Äquivalenzrelation auf den Ansichten ein spezieller Algorithmus entwickelt werden. Für den Samplingansatz genügt es, für einen beliebigen Punkt des Sichtraums die entsprechende Ansicht berechnen zu können.
- Der Samplingansatz liefert eine Generalisierung des eigentlichen Aspektgraphen. Äquivalenzklassen mit kleiner Fläche bzw. mit kleinem Volumen, werden nur mit entsprechend kleiner Wahrscheinlichkeit „getroffen“ und in den Aspektgraphen aufgenommen. Auf den ersten Blick mag diese unvollständige Konstruktion als Nachteil angesehen werden. Wenn aber der eigentliche Aspektgraph viele Knoten enthält, deren Ansichten sich nur durch kleine Details unterscheiden, die im Bild nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit gefunden werden können, ist dieser Generalisierungseffekt sehr vorteilhaft.

So besteht z.B. die Sichtraumpartition für die Gebäudehypothese von Haus H3 schon 310 Regionen (s. Abb. 4.1). Manche benachbarten Aspekte lassen sich aber mit dem bloßen Auge nicht mehr voneinander unterscheiden.

- Das Sampling des Sichtraums läßt sich relativ einfach auf das in Kapitel 4.3 beschriebene Sampling des Raums der freien Parameter übertragen. Statt aus einer dreidimensionalen werden die Samplingpunkte jetzt aus einer n-dimensionalen Menge gewählt. Alles andere bleibt gleich. Die analytische Berechnung kann nicht übertragen und nur mit großem Aufwand (siehe Abschnitt 4.3.8) neu entworfen werden.
- Der Vorgang des Samplings des Sichtraums kann jederzeit beendet werden. Man kann so die Anzahl der ausgeführten Schritte, also die Anzahl der aus dem Sichtraum ausgewählten Punkte und die für sie berechneten Ansichten, an die zur Verfügung stehenden Ressourcen anpassen. Das Sampling kann z.B. abgebrochen werden, wenn eine bestimmte Anzahl von Äquivalenzklassen gefunden wurde, eine gewisse Zeit verstrichen ist oder der bereit stehende Speicherplatz belegt ist.

Ein ausführliche Beschreibung der analytischen Berechnung der Sichtraumpartition findet sich z.B. in (Fischer und Steinhage 1997) und (Fischer 1996).

4.1.2 Aspekthierarchien

Einer der Kritikpunkte an Aspektgraphen ist, daß im allgemeinen nicht alle Kanten eines Objekts aus einem Bild extrahiert werden können und sich dadurch die Suche nach dem passenden Aspekt in einem Aspektgraphen schwierig gestaltet bzw. unmöglich gemacht wird. Nach der Idee der Erkennung über Komponenten (engl. *Recognition-by-Components*) von Biederman (1987), reicht es dagegen, einen Teil der Komponenten zu identifizieren, die das Objekt erzeugen. Über Domänenwissen kann von den erkannten Komponenten und deren Relationen untereinander auf das Objekt geschlossen werden.

Die von Dickinson, Pentland und Rosenfeld (1992a) und (1992b) eingeführten *Aspekthierarchien* verbinden die beiden Konzepte der Aspektgraphen und der Erkennung über Komponenten miteinander. Eine Aspekthierarchie modelliert ein oder mehrere 3D-Objekte durch einen vierstufigen hierarchischen Graph. Auf der obersten Ebene sind die dreidimensionalen Objekte plaziert. Die zweite Ebene enthält die Aspekte dieser Objekte für Sichtraumspähren mit einheitlichem Durchmesser. Diese Aspekte werden in Regionen zerlegt, welche die Knoten auf der dritten Ebene bilden. Auf der untersten Ebene

liegen Kantengruppen aus jeweils einer Region. Jede Kantengruppe stellt eine Relation zwischen den Kanten der Region dar. Das sind z. B. Parallelität, ein gemeinsamer Endpunkt oder eine Symmetrie in der Region.

Das Enthaltensein einer Kantengruppe in einer Region, einer Region in einem Aspekt oder die Zugehörigkeit von einem Aspekt zu einem Objekt wird durch eine Kante zwischen den entsprechenden Knoten in der Aspekthierarchie ausgedrückt. Jeder Kante ist die Wahrscheinlichkeit des Enthaltenseins bzw. der Zugehörigkeit zugeordnet. Bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten wird eine Gleichverteilung der Objekte angenommen.

4.1.2.1 Anwendung

Mit Aspekthierarchien können Objekte auch mit unvollständig extrahierten Linienbildern identifiziert werden: wenn z. B. nicht alle Regionen eines Aspekts vollständig sichtbar sind, kann der Aspekt anhand der sichtbaren Regionen und den Zuordnungswahrscheinlichkeiten dieser Regionen zum Aspekt rekonstruiert werden. Die Objektidentifizierung ist damit sehr viel robuster als es nur durch den Einsatz von Aspektgraphen möglich wäre.

In der Erkennungsphase wird die Zuordnung der Objektprimitive zu der Bildvorlage auf der unteren Ebene der Aspekthierarchie gestartet. Zuordnungen von Kantengruppen zu Kanten der Bildvorlage werden dann in die höheren Ebenen propagiert. Mehrdeutigkeiten und widersprüchliche Zuordnungen werden über die Wahrscheinlichkeiten und durch das nach oben zunehmende Domänenwissen aufgelöst.

4.1.2.2 Diskussion

Der Vergleich von Aspekthierarchien und Aspektgraphen führt zu der folgenden Relativierung der in Abschnitt 4.1.1.2 aufgeführten Kritikpunkte:

- I: Wenn zur Generierung der Aspekte, die auf der zweiten Stufe der Hierarchie eingetragen werden, das Samplingverfahren eingesetzt wird, kommt das Skalenproblem nicht im vollen Umfang zum Tragen. Durch das Sampling wird eine Generalisierung der Partition des Sichtraums in Äquivalenzklassen vorgenommen in der Art, daß ein Modellmerkmal mit umso größerer Wahrscheinlichkeit zur Unterscheidung benachbarter Äquivalenzklassen beiträgt, je größer der Bereich des Sichtraums ist, von dem aus es beobachtet werden kann. Dadurch wird zwar nicht die Größe der Merkmale, relativ oder absolut, gemessen, aber es wird die Relevanz der Merkmale in Beziehung auf die Erstellung von Aspekthierarchien bestimmt.
- II: Aspekte müssen nicht vollständig in den Bildern gefunden werden. Wenn eine hinreichende Anzahl von Teilregionen der Aspekte identifiziert wird, gilt der Aspekt als erkannt.
- III: Auch bei diesem Punkt ist das Samplingverfahren zur Generierung der Aspekte für die Relativierung der Kritik verantwortlich. Das Sampling des Sichtraums kann beendet werden, wenn eine vorgegebene Resource, wie z. B. die Anzahl der für die Repräsentierung eines Objekts eingesetzten Aspekte, aufgebraucht ist. Das löst das eigentliche Problem zwar nicht, trägt aber entscheidend zur praktischen Durchführbarkeit der Erstellung von Aspekthierarchien bei.
- IV: Das Problem, das durch die große Anzahl der Aspekte entsteht, wird durch die Verwendung der hierarchischen Struktur, die verwendeten Zuordnungswahrscheinlichkeiten zwischen Objekten, Aspekten, Regionen und Kanten und den Ansatz der Erkennung über Komponenten relativiert. Die Objektidentifizierung beginnt bei der Identifizierung von Kantengruppen und sucht sich dann den Weg, gesteuert über die Zuordnungswahrscheinlichkeiten durch die Hierarchie nach oben zu den Objekten.

Die Verwendung des Samplingansatzes zur Berechnung der Aspekte und der Erkennung von Objekten über ihre Komponenten führt also im Gegensatz zu den reinen Aspektgraphen zu einem robusteren und in Bezug auf den praktischen Einsatz günstigeren Verbrauch von Ressourcen, wie z. B. Rechenzeit und benötigten Speicher.

4.2 2D-Modellierung durch Ansichtenhierarchien

Bei Ansichtenhierarchien handelt es sich um Aspekthierarchien, die für die Anwendung der Verifizierung von Gebäudehypothesen in mehreren Punkten modifiziert wurden:

- Auf der obersten Ebene stehen statt Objektprimitiven die Gebäudehypothesen.
- Der Sichtraum wird auf einen einzelnen Punkt reduziert, der durch die bekannten inneren und äußeren Parameter der Luftbildkamera definiert ist. Diese einzelne Ansicht ist der Grund dafür, daß nicht von Aspekthierarchien sondern von Ansichtenhierarchien die Rede ist.
- Statt dessen besitzen hier im allgemeinen die Gebäudehypothesen freie Parameter, die zu unterschiedliche Aspekten führen und durch das Sampling des durch sie aufgespannten Parameterraums ermittelt werden.
- Die Aspekte sind um Informationen zu Schattenwurf und Radiometrie erweitert.
- Statt der beiden untersten Ebenen, die die Regionen sowie einzelne Modellmerkmale enthalten, gibt es nur noch eine einzige, auf der gleichberechtigt sowohl Regionen als auch Projektionen von Modellecken stehen, die mit Relationen auf den beteiligten Features versehen sind.

Ansichtenhierarchien sind eine betrachterzentrierte zweidimensionale Repräsentierung der dreidimensionalen Gebäudehypothesen. Die in Kapitel 2 eingeführte Modellierung durch Komponenten wird also auch durch die 2D-Modellierung durch Ansichtenhierarchien aufgegriffen. Die Komponenten sind hier an die zur Verifizierung verwendeten Daten angepaßt. Statt Gebäudeteilen werden Regionen von Aspekten und die ins Bild zurückprojizierten Modellecken verwendet. Gebäudeteile werden hier nicht verwendet, da zum einen einzelne Gebäudeteile im Bild nicht voneinander abgegrenzt werden können: Die Kanten die zu den Fügeflächen der primitiven Gebäudeaggregate gehören sind ja nach der Aggregation nicht mehr Teil des resultierenden Aggregats. Zum anderen besitzen die aus den Luftbildern extrahierten Merkmale noch keine gebäudespezifischen Informationen, die mit denen der Gebäudeteile verglichen werden könnten.

Der größte Unterschied zwischen Aspekthierarchien und Ansichtenhierarchien besteht im verwendeten Sichtraum. Da für jedes Luftbild die inneren und äußeren Kameraparameter als gegeben angenommen werden, beschränkt sich der Sichtraum auf jeweils einen einzelnen Punkt. Die Partitionierung des Sichtraums in Äquivalenzklassen entfällt also. Diesem Umstand verdanken die Ansichtenhierarchien ihren Namen: Für ein gegebenes Objekt gibt es nur eine einzige Ansicht pro Luftbild.

Die nach der Hypothesenkonstruktion im allgemeinen noch vorhandenen freien Parameter führen jedoch zu einer anderen Art von Freiheitsgrad. Unterschiedliche Belegungen der freien Parameter können zu unterschiedlichen Strukturen der die Ansichten repräsentierenden Graphen führen. Mit einem Samplingansatz wird der durch die freien Parameter aufgespannte Parameterraum in Äquivalenzklassen unterteilt, für die die entsprechenden Aspekte in die Ansichtenhierarchie eingefügt werden.

4.2.1 Ansichtenhierarchie

Eine Ansichtenhierarchie ist ein für ein bestimmtes Luftbild erzeugter Graph, der ein oder mehrere Gebäudehypothesen repräsentiert, und dessen Knoten in drei Ebenen angeordnet sind. Die Ebenen sind wie folgt aufgeteilt:

Ebene 1: Alle Gebäudehypothesen, die für die gegebenen Beobachtungen konstruiert wurden, befinden sich auf dieser Ebene. Im Gegensatz zur Aspekthierarchie sind hier komplexe, insbesondere konkave, Objekte erlaubt, die auch freie Parameter enthalten dürfen.

Ebene 2: Für die Hypothesen auf Ebene 1 werden bei festen Kameraparametern durch Rückprojektion in das Luftbild die Ansichten erzeugt, die die Knoten der zweite Ebene bilden. Ein Sampling des durch die freien Parameter aufgespannten Parameterraums legt die dafür verwendeten Parameterbelegungen fest. Durch die Integration von Sensor- und Beleuchtungsmodell wird anhand des bekannten Aufnahmezeitpunktes der Luftbilder der Schattenwurf der Gebäude rekonstruiert und in die Ansichten eingefügt. Es ist möglich, daß sich zwei Ansichten nur durch ihren Schatten unterscheiden. Außerdem werden die erwarteten relativen Helligkeiten der Gebäudeflächen berechnet.

Ebene 3: Regionen und Ecken der Ansichten zusammen mit Relationen, die auf den Eckpunkten und Kanten von Regionen und Ecken definiert sind, bilden die untere Ebene. Die Relationen werden während der Verifikation der Hypothesen zur Steuerung eines relationalen Matchingverfahrens verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der Relationen und des Matchings findet sich in der Doktorarbeit von Kolbe (1999).

4.3 Sampling des Parameterraums

Obwohl der Sichtraum für Ansichtenhierarchien auf einen einzelnen Punkt beschränkt werden kann, kann eine Gebäudehypothese dennoch mehrere Ansichten haben. Das ist der Einfluß der Parametrisierung auf die 2D-Modellierung. Wenn während der Konstruktion einer Hypothese nicht alle Parameter mit festen Werten belegt werden konnten, was mit größerer Wahrscheinlichkeit auf Parameter mit vertikaler Auswirkung wie z. B. Geschoßhöhen zutrifft, können unterschiedliche Werte der Parameter zu Ansichten mit unterschiedlichen Graphstrukturen führen. Damit das Matchingverfahren, das die Rückprojektionen der Gebäudehypothesen in den Bildmerkmalen sucht, nicht auch parametrisiert arbeiten muß, wird der durch die freien Parameter aufgespannte Parameterraum in Regionen äquivalenter Ansichten aufgeteilt, ganz analog zur Partitionierung des Sichtraums bei der Erstellung von Aspektgraphen. Aus jeder Region wird ein Vertreter ausgewählt über die die Hypothese verifiziert werden kann.

4.3.1 Freie Parameter

Die Ausgleichsrechnung, die für eine fertig konstruierte Gebäudehypothese und alle ihr zugeordneten Beobachtungen gemacht wird, kann Belegungen nur für diejenigen Parameter bestimmen, für die Beobachtungen vorliegen. Wenn bestimmte Beobachtungen fehlen, können die entsprechenden Parameter nicht bestimmt werden und bleiben *frei*.

Zum Beispiel kann es, aufgrund der bei Luftbildaufnahmen fast senkrecht verlaufenden Blickrichtung und der daraus folgenden optischen Verkürzung von senkrechten Kanten und Verdeckungen von horizontalen Bodenkanten, vorkommen, daß keine Beobachtungen von Kanten oder Ecken auf Bodenhöhe gemacht werden können. In diesem Fall kann dann auch die Geschoßhöhe nicht bestimmt werden und der entsprechende Parameter bleibt frei.

Die Verifizierung einer Gebäudehypothese erfolgt anhand ihrer Rückprojektionen in die Luftbilder. Diese Rückprojektionen sind aber nicht mehr symbolisch kodiert. Alle Parameter werden vor der Projektion durch ihre Werte substituiert. Auch für die freien Parameter müssen Werte gefunden werden. Aus diesem Grund werden durch ein Sampling des durch die freien Parameter gebildeten Parameterraums alle unterschiedlichen Aspekte (d. h. topologisch unterschiedliche Ansichten, siehe Abschnitt 4.3.4.1) ermittelt.

In Abbildung 4.3.1 ist die Gebäudehypothese für das H3-Haus mit vier unterschiedlichen Parameterbelegungen abgebildet. Für die beiden Parameter Geschoßhöhe und Länge des rechten Quertraktes wurden jeweils zwei Werte eingesetzt. Für die Geschoßhöhe sind das der berechnete – bzw., da der Parameter aufgrund fehlender Beobachtungen auf Bodenhöhe frei ist, der Defaultwert – Wert von 3,0 m (obere Reihe) und ein Wert von 6,0 m (untere Reihe). Für die Traktlänge wurden der rekonstruierte Wert 0,42 m (linke Spalte) und der Wert 3,0 m (rechte Spalte) gewählt.

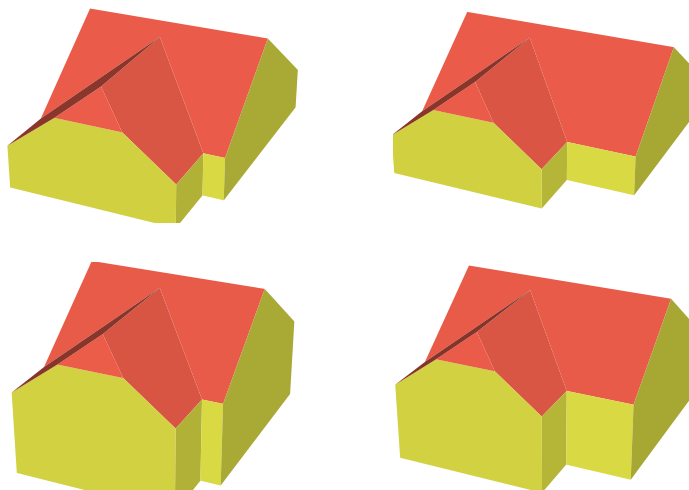


Abbildung 4.2: Die Gebäudehypothese des H3-Hauses mit unterschiedlicher Geschoßhöhe und Länge des rechten Quertraktes. Für beide Parameter wurden jeweils zwei Werte gewählt.

4.3.2 Parameterraum

Der Parameterraum der anhand der Aspekte der Gebäudehypothese in Äquivalenzklassen unterteilt werden soll, ist, bei n freien Form- und Lageparametern p_1, \dots, p_n , eine Teilmenge des \mathbb{R}^n . Wenn es keine freien Parameter mehr gibt ($n = 0$) ist kein Sampling notwendig und es kann sofort die Ansichtenhierarchie erstellt werden. Es kann also $n > 0$ vorausgesetzt werden. Für jeden freien Parameter p_i gibt es ein Intervall $[p_{i,\min}, p_{i,\max}]$, das den gültigen Wertebereich des Parameters angibt. Damit hat der Parameterraum P die Form

$$P = [p_{1,\min}, p_{1,\max}] \times \dots \times [p_{n,\min}, p_{n,\max}]. \quad (4.1)$$

Jeder Punkt im Parameterraum P stellt eine Parameterbelegung dar. Die Parameterbelegung $P_0 \in P$ ordnet jedem Parameter p_i den Wert $\pi_i(P_0)$ zu. Dabei ist die Projektion π durch $\pi_i((p_1, \dots, p_n)) = p_i$ definiert.

Nicht jeder Punkt $p \in P$ stellt eine gültige Parameterbelegung dar. Er muß zusätzlich die für die Hypothese definierten Constraints erfüllen. Der gültige Parameterraum $P^* \subseteq P$ ist also eine Teilmenge des Parameterraums.

4.3.3 Äquivalenzrelation

Die Äquivalenzrelation definiert über die Struktur von Ansichten bei festen Parameterbelegungen die Äquivalenz von Punkten des Parameterraums. Eine Ansicht der Gebäudehypothese wird bei einer gegebenen Parameterbelegung und den gegebenen Kameraparametern durch einen Graph $G = (V, E)$ beschrieben. Die Knotenmenge V enthält sowohl Projektionen von Eckpunkten der Hypothese als auch Schnittpunkte von Projektionen von Hypothesenkanten. Die Kantenmenge $E \subseteq V \times V$ enthält die Verbindungen zwischen den Knoten, die Teilen von projizierten Hypothesenkanten entsprechen. Jeder Knoten aus V und jede Kante aus E wird mit einer Markierung M versehen, die eine eindeutige Zuordnung zu den erzeugenden Bestandteilen der Hypothese ermöglichen (Es wird vorausgesetzt, daß Eckpunkte und Kanten der Hypothese eindeutige Markierungen besitzen):

1. Jeder Kante $e \in E$ ordnet $M(e)$ die Markierung der entsprechenden Hypothesenkante zu. Da einer Kante der Hypothese mehrere Kanten des Graphen entsprechen können, ist diese Markierung alleine noch nicht eindeutig.

2. Jedem Knoten $v \in V$ ordnet $M(v)$ wie folgt eine eindeutige Markierung zu:

- (a) Wenn v die Projektion eines Eckpunkts der Hypothese ist, dann wird v dessen Markierung zugeordnet.
- (b) Wenn v der Schnittpunkt von m Projektionen von Kanten der Hypothese ist, wird ihm als Markierung das m -Tupel der nach Abstand zum Projektionszentrum sortierten Kantenmarkierungen zugeordnet.

Die Äquivalenzrelation, die den gültigen Parameterraum P^* in Äquivalenzklassen unterteilt, wird wie folgt definiert:

Definition 17 (Äquivalenzrelation)

Seien $P_A \in P^*$ und $P_B \in P^*$ zwei Punkte aus dem gültigen Parameterraum und $G_A = (V_A, E_A)$ und $G_B = (V_B, E_B)$ die ihnen entsprechenden Ansichten. Die beiden Punkte heißen Äquivalent, $P_A \sim P_B$, genau dann, wenn es einen Isomorphismus $\phi : V_A \rightarrow V_B$ gibt, der die folgenden Bedingungen erfüllt:

1. Miteinander identifizierte Knoten haben die gleiche Markierung:

$$\forall v \in V_A : M(v) = M(\phi(v)).$$

2. Die Identifizierung der Knoten impliziert eine Identifizierung der Kanten:

$$e_A = (v_k, v_l) \in E_A \Leftrightarrow e_B = (\phi(v_k), \phi(v_l)) \in E_B \\ \wedge M(e_A) = M(e_B)$$

Satz: Die so definierte Relation ist eine Äquivalenzrelation, da Reflexivität, Symmetrie und Transitivität erfüllt sind.

Beweis: Beweis: Seien G , G' und G'' drei wie oben definierte Graphen. Dann gilt

Reflexivität ($G \sim G$) Wähle für ϕ die Identität.

Symmetrie ($G \sim G' \Rightarrow G' \sim G$) Da ϕ ein Isomorphismus ist, existiert dessen inverser Isomorphismus $\psi = \phi^{-1}$, der das Gewünschte leistet.

Transitivität ($G \sim G' \wedge G' \sim G'' \Rightarrow G \sim G''$) Wenn ϕ_1 der Isomorphismus der ersten und ϕ_2 der Isomorphismus der zweiten Äquivalenz ist, dann ist auch $\phi = \phi_2 \circ \phi_1$ ein Isomorphismus. Dieses ϕ leistet die Identifizierung von G und G'' . \square

4.3.4 Schatten

Zusätzlich zu den Kanten und Eckpunkten, die durch Projektion aus den entsprechenden Features der 3D-Gebäudehypothese hervorgegangen sind, werden auch die Kanten in die Ansicht aufgenommen, die den Schatten des Gebäudes begrenzen. Nähere Information zur Erzeugung der Schattenflächen folgen in Abschnitt 4.4.2. An dieser Stelle wird nur die Integration der Schattenkanten in die Gebäudeansicht behandelt.

Seien die Schattenflächen S in der Form von n Polygonen S_1 bis S_n mit Eckpunkten $S_i = (P_{i,1}, \dots, P_{i,n_i})$ gegeben und jeder Eckpunkt und jede Kante besitze eine eindeutige Markierung. Die Schattenflächen werden in die Ansicht integriert, indem zuerst über eine boolesche Differenzbildung die Regionen R der Ansicht, die die sichtbaren Flächen der Gebäudehypothese repräsentieren, von den Schattenflächen abgezogen werden. Anschließend wird die boolesche Vereinigung der verbleibenden Teile der Schattenflächen mit den Regionen der Ansicht gebildet. Für die resultierende Ansicht A_S gilt also

$$A_S = R \cap (S/R).$$

Schatten

Rückprojektion

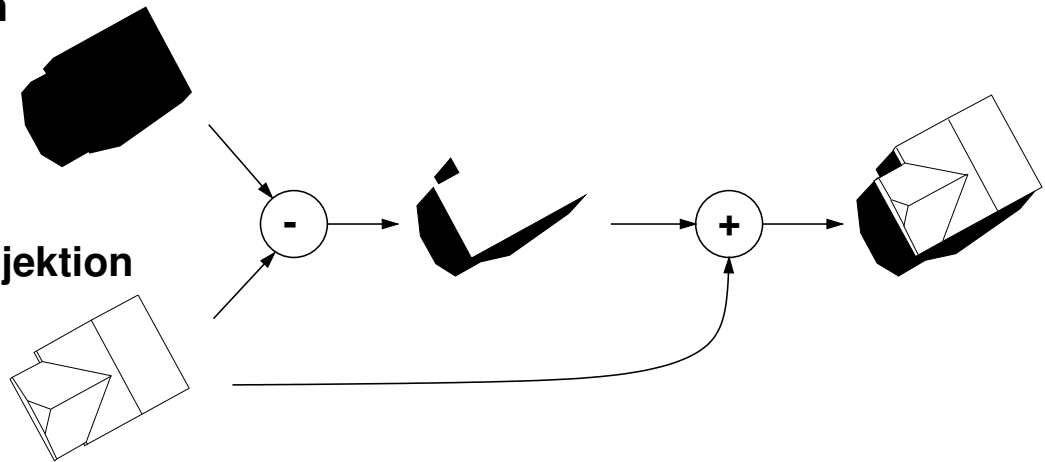


Abbildung 4.3: Eine Ansicht wird durch zwei boolesche Operationen mit ihrem Schatten vereinigt. Zuerst wird von der Schattenfläche der Umriß der Ansicht abgezogen. Das Ergebnis wird anschließend mit der Ansicht vereinigt.

Die Bedingung, daß Eckpunkte und Kanten der Schattenflächen eindeutige Markierungen haben erlaubt die direkte Übertragung der oben definierten Äquivalenzrelation auf die Ansicht mit Schattenflächen. Ein Graph $G = (V, E)$ der eine Ansicht beschreibt, wird durch Hinzufügen der Schattenflächen in einen Graph $G' = (V', E')$ überführt, auf dem die gleiche Äquivalenzrelation definiert ist wie auf dem ursprünglichen Graph.

Durch das Hinzufügen von Schattenkanten zu der Ansicht wird es im allgemeinen zum Aufspalten von Kanten der Ansicht kommen, auf denen Eckpunkte von S/R liegen. Wenn aber ein Schatten-Eckpunkt mit einem Eckpunkt der Ansicht identisch ist, wird die Markierung dieses Punktes beibehalten. Es gilt daher im allgemeinen

$$V \subset V', E \not\subset E'.$$

4.3.4.1 Aspekte

Mit *Aspekt* wird die invariante Struktur aller Ansichten innerhalb einer Äquivalenzklasse bezeichnet. Innerhalb einer Äquivalenzklasse ist der Aspekt der Gebäudehypothese also stabil. Beim Übergang zu einer benachbarten Äquivalenzklasse ändert sich der Aspekt, es kommt zu einem sogenannten *visuellen Ereignis* (siehe dazu auch Fischer (1996)).

4.3.5 Sampling des Parameterraums

Um den Parameterraum in Äquivalenzklassen aufzuteilen, wird in dieser Arbeit der Samplingansatz eingesetzt. Anhand von Stichproben wird die Äquivalenzklasse von kleinen Teilbereichen bestimmt. Benachbarte Bereiche mit äquivalenten Ansichten werden in einem *region growing* Prozeß zusammengelegt. Aus jeder Äquivalenzklasse wird anschließend, nach bestimmten Kriterien, ein Repräsentant ausgewählt, dessen Ansicht in die Ansichtenhierarchie eingefügt wird und dann für die Verifizierung der Gebäudeansicht bereitsteht.

Der Repräsentant einer Äquivalenzklasse wird unter den Samplingpunkten ausgewählt, die zu dieser Klasse gehören. Es wird der Punkt gewählt, in dessen Ansicht die Länge der kürzesten Kante unter allen Punkten der Äquivalenzklasse maximal ist. Neben dem Vorteil der besseren Visualisierung des Repräsentanten wird so das Matching der Ansicht mit den aus den Luftbildern extrahierten Bildfeatures während der Verifizierung unterstützt.

Bei der Auswahl der Samplingpunkte gibt es mehrere mögliche Strategien. Im folgenden Abschnitt wird zunächst das einfachste Verfahren beschrieben, bei dem die Wertebereiche der freien Parameter gleichmäßig in Teilintervalle aufgeteilt werden. Der darauf folgende Abschnitt stellt das tatsächlich eingesetzte Verfahren der dynamischen Unterteilung vor.

4.3.5.1 Generalisierung durch Sampling

Die Anwendung des Samplingansatzes zur Berechnung der Partition des Parameterraums führt zu einer Generalisierung. Kleine Äquivalenzklassen und Details in den Grenzverläufen zwischen benachbarten Äquivalenzklassen, deren Ausmaße unterhalb der (doppelten) Abtastauflösung liegen, werden im allgemeinen nicht erkannt und folglich nicht in die Partition aufgenommen.

Dieser Effekt ist durchaus erwünscht. Denn ein Bildfeature, daß nur mit einer Parameterbelegung aus einem kleinen Bereich des Parameterraums sichtbar ist, läßt sich auch im Luftbild nur mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit beobachten und verifizieren. Außerdem wird durch die Generalisierung die Anzahl der mit dem Luftbild zu vergleichenden Ansichten begrenzt. Da schließlich die Verifizierung robust genug gegen das Fehlen einzelner Kanten oder Eckpunkte ist, reichen die gefundenen Aspekte völlig aus.

4.3.6 Sampling mit fester Unterteilung

Einen Ausgangspunkt der Verfahren zur Wahl von Samplingpunkten stellt das Verfahren mit fester Unterteilung der Wertebereiche dar. Dabei wird der Wertebereich $[p_{i,\min}, p_{i,\max}]$ des i -ten freien Parameters p_i in m_i Teilintervalle

$$\left[p_{i,\min} + \frac{j(p_{i,\max} - p_{i,\min})}{m_i}, p_{i,\min} + \frac{(j+1)(p_{i,\max} - p_{i,\min})}{m_i} \right], \quad 0 \leq j < m_i,$$

zerlegt. Der ganze Parameterraum wird also in $N = \prod_1^n m_i$ n -dimensionale Teilintervalle zerlegt. Als Samplingpunkte werden die Mittelpunkte der Intervalle gewählt.

Die Anzahlen der Unterteilungen m_i der einzelnen Wertebereiche bestimmen die Genauigkeit der resultierenden Partition des Parameterraums. Zur Bestimmung der m_i gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Wenn eine Auflösung r der einzelnen Wertebereiche vorgegeben ist, gilt

$$m_i = \left\lceil \frac{p_{i,\max} - p_{i,\min}}{r} \right\rceil. \quad (4.2)$$

Es wird aufgerundet, damit mindestens die geforderte Auflösung erreicht wird. Zwei benachbarte Samplingpunkte Q_1 und Q_2 haben also einen Abstand entlang der Koordinatenachsen von höchstens r : $\|Q_1 - Q_2\|_\infty \leq r$.

2. Bei vorgegebener Anzahl N von Samplingpunkten, etwa bei Beschränkung der zur Verfügung stehenden Rechenzeit, wird als Auflösung das Verhältnis des Volumens des Parameterraums zu N verwendet

$$r = \prod_1^n (p_{i,\max} - p_{i,\min}) / N,$$

$$m_i = \left\lceil \frac{p_{i,\max} - p_{i,\min}}{r} \right\rceil.$$

Hier wird abgerundet, damit die vorgegebene Anzahl nicht überschritten wird: $\prod_1^n m_i \leq N$.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist, daß innerhalb von Äquivalenzregionen, wo keine Unterschiede zwischen den Ansichten auftreten, das Sampling mit gleicher Auflösung durchgeführt wird, wie bei den Grenzen zwischen Äquivalenzregionen mit unterschiedlichen Ansichten.

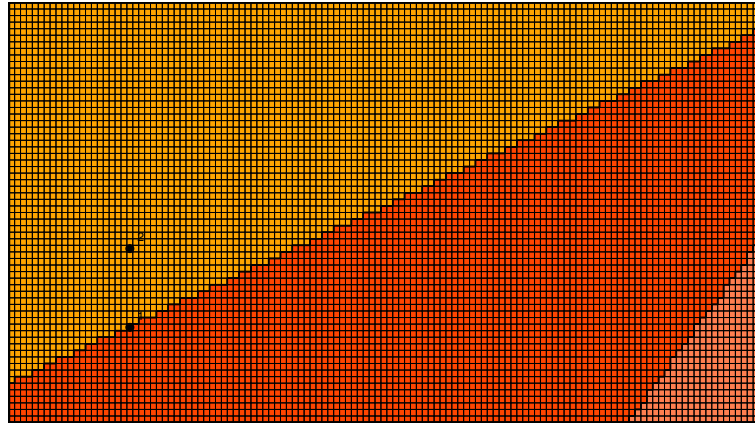


Abbildung 4.4: Sampling der freien Parameter h_1 und d''' von Haus H3 mit fester Unterteilung der Wertebereiche.

Am Beispiel des H3-Hauses wurde die Partition des Parameterraums für die freien Parameter h_1 und d''' berechnet. Parameter h_1 ist frei, da keine Beobachtungen auf Bodenhöhe gegeben sind. Parameter d''' wurde zur besseren Illustration als zweiter freier Parameter gewählt, obwohl die Beobachtungen seinen Wert festlegen. Als Wertebereiche wurden für h_1 das Intervall $[1, 10]$ und für d''' $[0, 5]$ gewählt. Die geforderte Auflösung ist 0.1. Das führte zu Unterteilungstiefen von 7 für h_1 und 6 für d''' . Damit wurden Auflösungen von 0.0703124 und 0.078125 erreicht, die die geforderte Auflösung deutlich unterschreiten. Insgesamt wurden $2^{(7+6)} = 8192$ Ansichten erzeugt, die zu drei Äquivalenzklassen gehören. In Abbildung 4.4 ist die erzeugte Partition dargestellt.

4.3.7 Sampling mit dynamischer Unterteilung

Das Ziel bei der dynamischen Unterteilung des Parameterraums ist es, dort wo es Unterschiede in den Ansichten gibt, also bei Grenzen zwischen Äquivalenzklassen, mit höherer Auflösung zu Sampeln als innerhalb von Äquivalenzklassen, wo die Ansichten die gleiche Struktur aufweisen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird zuerst ein Sampling mit fester Unterteilung, wie oben beschrieben, aber mit niedriger Auflösung durchgeführt. Anhand der so gewonnenen groben Partition des Parameterraums, kann nun dort, wo Grenzen zwischen benachbarten Äquivalenzklassen vermutet werden, mit höherer Auflösung gesampelt werden.

Zur praktischen Durchführung wird der Parameterraum durch einen Binärbaum modelliert, dessen Ebenen abwechselnd die einzelnen freien Parameter repräsentieren. Auf jeder Ebene findet die Unterteilung einzelner Intervalle eines Parameters in jeweils zwei Teilintervalle statt. Um etwa einen Parameter mit einer Auflösung von r abzutasten, muß der Wertebereich des Parameters auf

$$k_i = \left\lceil \log_2 \frac{p_{i,\max} - p_{i,\min}}{r} \right\rceil$$

Ebenen unterteilt werden. Ein kleines Beispiel ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Für die anfängliche feste Unterteilung mit Auflösung r wird der Binärbaum also bis zur entsprechenden Tiefe $\sum_1^n k_i$ vollständig expandiert. Da die Wertebereiche der einzelnen Parameter im allgemeinen nicht gleich groß sind, sind auch die entsprechenden Unterteilungstiefen nicht gleich groß. Folglich wechseln sich nicht alle Parameter in aufeinanderfolgenden Ebenen des Baums gleichmäßig ab. Parameter mit kleineren Wertebereichen sind entsprechend auf den unteren Ebenen nicht mehr zu finden. Solche Parameter werden bei der folgenden dynamischen Unterteilung aber weiter berücksichtigt.

Die folgende dynamische Unterteilung wird realisiert, indem ein Blatt noch dann expandiert wird, wenn es und sein Bruderknoten unterschiedliche Ansichten besitzen. Die Expandierung wird bis

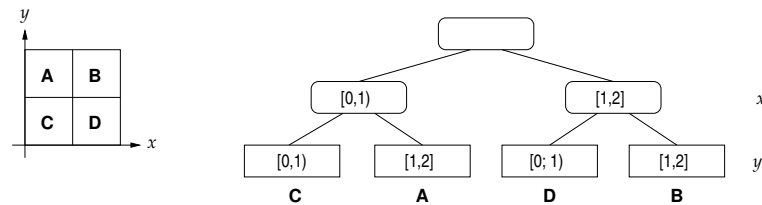


Abbildung 4.5: Sampling Baum für zwei Parameter mit zwei Unterteilungsebenen. Links ist ein zweidimensionales Intervall mit vier Teilintervallen dargestellt. Die vier Blätter des Baums sind mit den Buchstaben der entsprechend Teilintervalle markiert.

zu einer festgelegten maximalen Auflösung fortgesetzt. Wenn ein Blatt auf der Ebene k das den Parameter p_i repräsentiert, unterteilt werden soll, wird das entsprechende Teilintervall von Parameter p_j aufgeteilt, mit $j = i + 1 \pmod n$.

In Abbildung 4.6 ist ein Binärbaum für das Sampling der freien Parameter h_1 und d''' für eine anfänglich feste (oben) und eine anschließende dynamische Unterteilung (unten) zu sehen. Abbildung 4.7 zeigt die drei zu den ausgezeichneten Punkten gehörenden Ansichten.

4.3.8 Analytische Berechnung der Partition

Die Grenzflächen zwischen benachbarten Äquivalenzklassen lassen sich grundsätzlich auch analytisch berechnen, indem für die einzelnen Kombinationen von Eckpunkten und Kanten der Gebäudehypothese Gleichungssysteme aufgestellt werden, die die zu erfüllenden Bedingungen kodieren, die für ein visuelles Ereignis erfüllt sein müssen.

Gegen die praktische Durchführung dieses Verfahrens sprechen mehrere Gründe:

1. Die zu lösenden, nicht linearen, Gleichungssysteme sind im allgemeinen nicht mehr algebraisch lösbar.
2. Wie oben schon erwähnt, ist die exakte Berechnung der Partition des Parameterraums nicht nötig um die Hypothese zu verifizieren und unter Umständen nicht einmal erwünscht.
3. Das Verfahren zur analytischen Berechnung wäre sehr komplex und aufwendig und würde damit den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Der Rest dieses Abschnitts gibt einen Überblick über die zu lösenden Probleme gibt der folgende Abschnitt.

4.3.8.1 Visuelle Ereignisse

Es treten genau die vier von Fischer (1996) beschriebenen visuellen Ereignisse auf. Es handelt sich in allen vier Fällen um Schnittpunkte von mit der symbolischen Projektion Π (siehe Anhang D) projizierten Eckpunkten und Kanten der Gebäudehypothese.

Punkt-Kante-, Kante-Punkt-Ereignis Ein Eckpunkt wird auf eine Kante projiziert und liegt entweder vor oder hinter ihr. Für ein gegebenes Paar von Eckpunkt P und Kante $K = \overline{Q_1 Q_2}$ muß die Gleichung

$$\Pi(P) = s\Pi(Q_1) + (1 - s)\Pi(Q_2), \quad 0 \leq s \leq 1,$$

nach den freien Parametern aufgelöst werden.

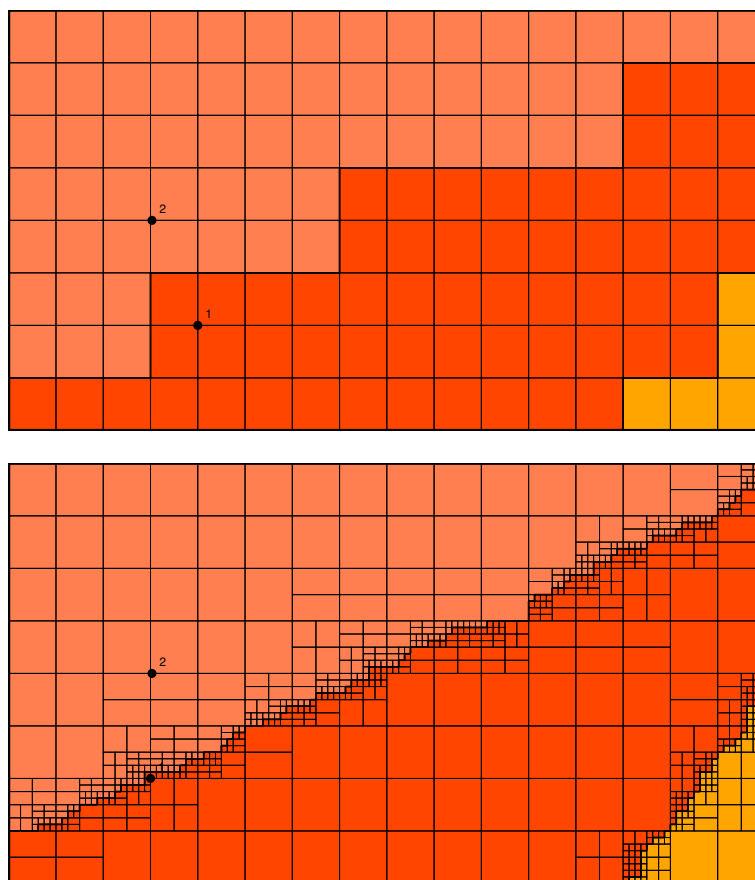


Abbildung 4.6: Sampling der freien Parameter h_1 und d''' von Haus H3 mit dynamischer Unterteilung der Wertebereiche.

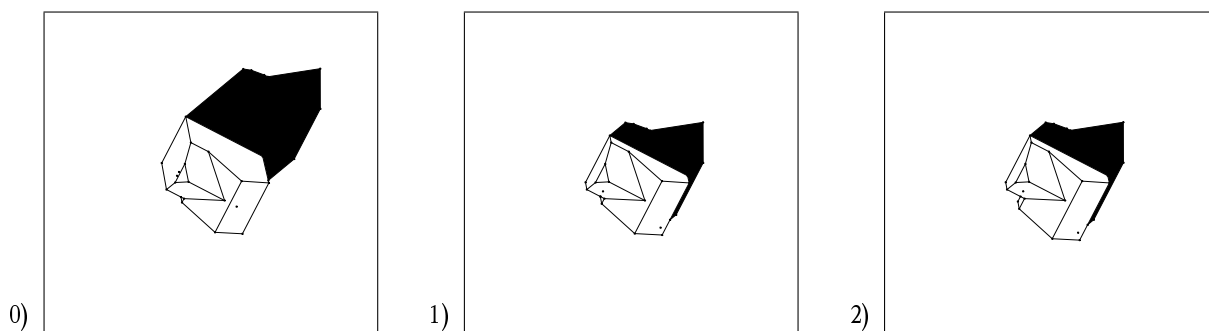


Abbildung 4.7: Die drei Ansichten der Repräsentanten der Äquivalenzklassen der in Abbildung 4.6 dargestellten Partition.

Kante-Kante-Ereignis Zwei Kanten werden aufeinander projiziert. Für ein Kantenpaar $K_1 = \overline{P_1P_2}$ und $K_2 = \overline{Q_1Q_2}$ muß gelten

$$\begin{aligned}\Pi(P_1) &= s_1\Pi(Q_1) + (1-s_1)\Pi(Q_2), \\ \Pi(P_2) &= s_2\Pi(Q_1) + (1-s_2)\Pi(Q_2), \\ (s_1 \geq 0 \vee s_2 \geq 0) \wedge (s_1 \leq 1 \vee s_2 \leq 1).\end{aligned}$$

Kante-Kante-Kante-Ereignis Die Projektionen von drei Kanten haben einen gemeinsamen Schnittpunkt. Für ein Kantentripel $K_1 = \overline{P_1P_2}$, $K_2 = \overline{Q_1Q_2}$ und $K_3 = \overline{R_1R_2}$ muß gelten

$$s\Pi(P_1) + (1-s)\Pi(P_2) = t\Pi(Q_1) + (1-t)\Pi(Q_2) = u\Pi(R_1) + (1-u)\Pi(R_2), \quad 0 \leq s, t, u \leq 1$$

Um die Grenzflächen analytisch berechnen zu können, müssen also diese Gleichungssysteme in Abhängigkeit der freien Parameter gelöst werden. Die so erhaltenden Lösungen, die Hyperflächen im Parameterraum beschreiben, müssen in eine Form umgewandelt werden, die das gegenseitige Verschneiden und den Aufbau eines die Partition beschreibenden (Hyper)Graphen erlaubt.

4.3.8.2 Aufbau der Partition

Die Hyperflächen werden miteinander verschnitten und zu einem Graph zusammengefügt. Für jede Kante des Graphen muß entschieden werden ob der entsprechende Teil der Hyperfläche von Flächen der Hypothese verdeckt wird. In diesem Fall wird die Kante aus dem Graph entfernt.

Schon das Verschneiden der zweidimensionalen Flächen, die die Äquivalenzklassen des dreidimensionalen Sichttraums begrenzen, sind im allgemeinen nicht mehr algebraisch berechenbar. Im Fall der hier auftretenden Hyperflächen ist das natürlich auch nicht möglich.

Aus dem resultierenden Graph müssen schließlich geschlossene Zellen gebildet werden, die die Äquivalenzrelationen beschreiben. Aus jeder Zelle wird ein Repräsentant gewählt.

4.4 Rückprojektion der Hypothesen

Da die inneren und äußeren Kameraparameter bekannt sind, können die Gebäudehypothesen in die Bildebene der Luftbilder projiziert werden. Das ermöglicht einen direkten Vergleich mit den aus den Luftbildern extrahierten Bildmerkmalen, sofern diese nur von festen Parametern abhängen. Wenn ein Bildmerkmal dagegen von einem freien Parameter abhängt, ist je nach Art des Parameters immerhin noch die Orientierung zuverlässig.

Wenn der freie Parameter die Orientierung des 3D-Modellmerkmals nicht beeinflusst, wird die Orientierung des rückprojizierten 2D-Merkmals durch die Projektion nur unwesentlich beeinflusst. Bei einer typischen Entfernung von 750 m des Objekts zum Projektionszentrum und einer Brennweite von 0.23 m sind die Verzerrungseffekte bei Verschiebungen um wenige Meter vernachlässigbar.

Die Abweichung in der Orientierung einer Modellkante im Bild durch Translation im Weltkoordinatensystem hängt vom Fluchtpunkt der Geradenfamilie ab. Um den Fluchtpunkt einer Gerade $g(t) = Q + tD$ mit Ortsvektor Q und Richtungsvektor D zu berechnen, muß der Bildpunkt der Grenzwerte $\lim_{t \rightarrow \infty} g(t)$ bzw. $\lim_{t \rightarrow -\infty} g(t)$ bestimmt werden. Mit der in Anhang D beschriebenen Projektion P gilt für den gesuchten Bildpunkt $(u, v)^T$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{w' + tw''} \begin{pmatrix} x' + tx'' \\ y' + ty'' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ w' \end{pmatrix} = P \cdot Q, \quad \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \\ w'' \end{pmatrix} = D \cdot Q. \quad (4.3)$$

Für die gesuchten Grenzwerte gilt damit

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{x' + tx''}{w' + tw''} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{x'}{w' + tw''} + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{tx''}{w' + tw''} \\ &= \frac{x''}{w''}, \quad \text{für } w'' \neq 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y' + ty''}{w' + tw''} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y'}{w' + tw''} + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{ty''}{w' + tw''} \\ &= \frac{y''}{w''}, \quad \text{für } w'' \neq 0.\end{aligned}$$

Wie zu erwarten war, ist die Position des Fluchtpunktes allein vom Richtungsvektor abhängig. Wenn w'' verschwindet existiert der Fluchtpunkt nicht. Wenn man sich die Projektionsmatrix näher ansieht, erkennt man, daß w'' genau dann verschwindet, wenn der Richtungsvektor rechtwinklig zur Blickrichtung und damit parallel zur Bildebene verläuft.

Der maximale Winkel zwischen den Projektionen einer Kantenschar ist gleich dem Maximum des Winkels zwischen zwei Kanten aus dieser Schar. Dieser Winkel läßt sich berechnen, in dem von jeder Kante ein Punkt ausgewählt wird. Der gesuchte Winkel ist identisch mit dem der Geraden durch die projizierten Punkte und den Fluchtpunkt. Wenn also der Fluchtpunkt im sichtbaren Teil der Bildebene liegt, kann der maximale Winkel also beliebig groß werden. Bei einer Kantenschar, die parallel zur Bildebene liegt ist der maximale Winkel dagegen gleich Null. Die Orientierung von horizontalen Kanten ist deswegen auch bei unsicherer Position stabil. Die Orientierung von vertikalen Kanten dagegen nicht.

Wenn dagegen der freie Parameter, wie z. B. bei der Dachneigung, auch die Orientierung des 3D-Merkmals verändert, wird natürlich auch die Orientierung des 2D-Merkmals verändert. Trotz des Parametersamplings kann ein solches Merkmal nicht zur Verifizierung der Hypothese herangezogen werden.

4.4.1 Zerlegung in Regionen

Ansichten werden in Regionen zerlegt, um eine robuste Verifizierung zu ermöglichen. Durch Verdeckungen von Gebäuden z. B. durch Bäume und unvollständige Merkmalsextraktion ist im allgemeinen das Matching der gesamten Ansicht mit Bildmerkmalen nicht möglich. Um trotzdem eine Verifizierung zu ermöglichen, werden Teile der Ansicht im Bild gesucht. Wenn ausreichend viele Teile gefunden werden, reicht das zur Verifizierung der Hypothese.

Die verwendeten Teile sind Regionen. Sie sind ausreichend klein um im Bild vollständig sichtbar zu sein, enthalten andererseits aber genug Informationen um relativ zuverlässig mit den entsprechenden Bildmerkmalen identifiziert zu werden.

4.4.2 Integration von Sensor- und Beleuchtungsmodell

Die Integration von Sensor- und Beleuchtungsmodell erlaubt die Berechnung von Schattenwurf und relativen Helligkeitswerten der Gebäudeflächen. Der Schattenwurf kann bei geeigneter Umgebung eines Gebäudes zur Verifizierung einer Gebäudehypothese und sogar zur Schätzung eventuell freier Höhenparameter genutzt werden. Auch die relativen Helligkeitswerte, die von dem Winkel zwischen Gebäudefläche und Sonneneinstrahlung und radiometrische Eigenschaften der Flächen abhängen, können die Verifizierung unterstützen.

4.4.3 Beleuchtungsmodell

Das eingesetzte Beleuchtungsmodell modelliert die Sonneneinstrahlung als parallele Strahlung, deren Richtung durch Schwerpunkt der Sonne zum Aufnahmezeitpunkt und Schwerpunkt der Gebäudehy-

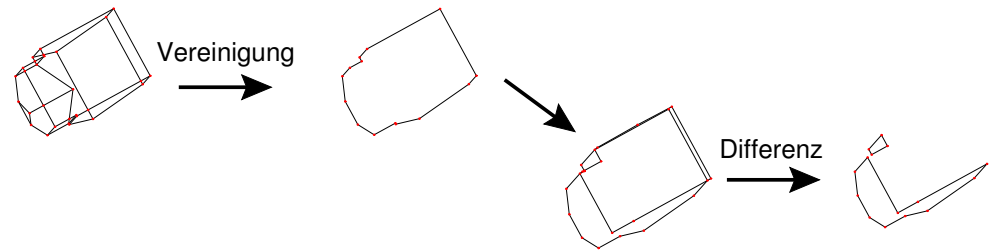
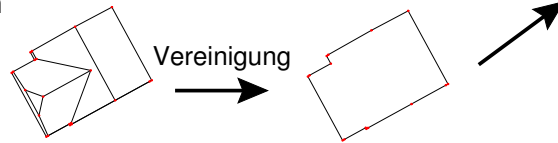
Schatten**Rückprojektion**

Abbildung 4.8: Die Schattenregionen entstehen durch boolsche Differenzbildung von Rückprojektion und Schattenwurf.

pothese approximiert wird. Der Sonnenstand wird mit Hilfe astronomischer Algorithmen aus Zeit, Datum und Ort der Aufnahme eines Luftbildes berechnet. Da nur relative Helligkeiten berechnet werden, spielt die angenommene Helligkeit der Strahlung keine Rolle.

4.4.4 Relative Flächenhelligkeiten

Da die radiometrischen Eigenschaften der einzelnen Flächen unbekannt sind, werden nur relative Helligkeitswerte von Flächen mit gleicher Markierung verwendet. Das hat die Erwartung als Hintergrund, daß zwei Dachflächen oder zwei Wandflächen die gleichen radiometrischen Eigenschaften haben, ein Flächenpaar bestehend aus einer Wand und einer Dachfläche aber nicht.

Die Helligkeit einer Fläche wird als negativer Cosinus zwischen Flächennormale und Richtung der Sonnenstrahlung berechnet. Sind beide Richtungen kollinear wird der maximale Wert angenommen. Der minimale Werte wird bei Rechtwinkligkeit der beiden Richtungen angenommen. Negative Werte werden auf Null gesetzt.

4.4.5 Schattenwurf

Die Prädiktion des Schattenwurfes durch Projektion einer Gebäudehypothese auf dessen Bodenebene erlaubt die Modellierung von Kanten, die aufgrund des starken Kontrasts gut extrahierbar sind. Sie liegen zudem oft parallel zu den Bildmerkmalen der Gebäude und können darum leicht mit diesen verwechselt werden. Die explizite Modellierung ist darum ein geeigneter Weg, um gleich mehreren Problemen gleichzeitig zu begegnen:

- Erhöhung der Aussagekraft des Modells durch Hinzunahme zusätzlicher Informationen.
- Vermeidung von falschen Zuordnungen durch explizite Modellierung von sonst störenden Schattenkanten.
- Durch Projektion von normalerweise primär vertikalen Größen, wie der Geschoßhöhe, in die horizontale Bodenebene, steigt die Wahrscheinlichkeit, diese Größen aus dem Bild rekonstruieren zu können.

Der Schatten wird durch Parallelprojektion der Gebäudekanten entlang der Sonnenstrahlung auf die Bodenebene der Gebäudehypothese berechnet. Die so erhaltenen Schattenregionen werden durch bool'sche Vereinigungsoperationen zu einer Schattenfläche vereinigt. Von dieser wird der sichtbare Teil bestimmt, in dem die Vereinigung der projizierten sichtbaren Gebäudeflächen wieder abgezogen wird. Das Ergebnis kann leer sein oder aus mehreren nicht zusammenhängenden Teilen bestehen. Abbildung 4.8 illustriert diesen Vorgang.

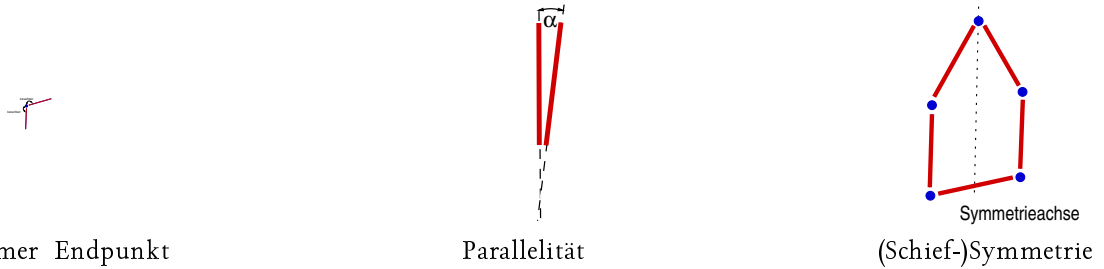


Abbildung 4.9: Drei Relationen werden zur Verifikation von Hypothesen verwendet: Gemeinsamer Endpunkt, Parallelität und Symmetrie

4.5 Merkmalsrelationen

Da die Verifikation mit einem relationalen Matchingverfahren erfolgt, werden aus den vorhandenen 3D- und 2D-Informationen geeignete Relationen abgeleitet. Die Verwendung von 3D-Informationen ist hilfreich um in einer Ansicht zufällig auftretende Relationen auszuschließen, die nicht für alle Ansichten einer Äquivalenzklasse gelten. Die Relationen sind (vergleiche Abbildung 4.9):

Gemeinsamer Endpunkt. Zwei Kanten sind mit einem gemeinsamen Endpunkt benachbart. Diese Relation wird nicht nur für Projektionen von Eckpunkten der Hypothese sondern auch für Schnittpunkte von Kantenprojektionen erzeugt, da nach der Definition der Äquivalenzrelation die Schnittpunkte in einer Äquivalenzklasse stabil sind. Erst bei Übergang in eine benachbarte Äquivalenzklasse können Schnittpunkte wegfallen oder neue hinzukommen.

Parallelität. Zwei Kantenprojektionen sind parallel zueinander, bzw. der von ihnen eingeschlossene Winkel α ist kleiner als ein Schwellwert. Diese Relation wird nur erzeugt, wenn die entsprechenden 3D-Kanten zueinander exakt parallel sind, also die gleichen Kantenrichtungsvektoren haben.

Symmetrie. Eine Region besitzt eine Spiegelschief-Symmetrie. Die entsprechende 3D-Modellfläche muß eine exakte Spiegelsymmetrie besitzen. Die Distanz, um die die einander zugeordneten Eckpunkt-Projektionen von ihrem Spiegelbild abweichen, wird durch einen Schwellwert festgelegt.

4.6 Zusammenfassung

Die Verifikation der Hypothesen erfolgt durch ihre Rückprojektion in die Luftbilder und Matching mit den Bildmerkmalen. Die dabei angewendete hierarchische 2D-Modellierung wurde in diesem Kapitel beschrieben.

Die für die bekannten Kameraparameter und Aufnahmezeitpunkte und -orte erstellten Rückprojektionen werden in die einzelnen Regionen – die sichtbaren Teile der projizierten Flächen – zerlegt. Diese Regionen und die auf ihnen definierten Relationen werden dann für die eigentliche Verifizierung verwendet. Damit kann eine Hypothese auch dann verifiziert werden, wenn nicht alle Regionen einer Rückprojektion im Bild gefunden werden.

Für eine weitere Unterstützung der Verifikation werden die Rückprojektion mit Schatten und radiometrischen Informationen versehen. Dadurch stören Schattenflächen den Verifikationsprozeß nicht sondern helfen ganz im Gegenteil bei seiner Durchführung.

Kapitel 5

Ergebnisse

Die Analyse der Verfahren zur Hypothesenrekonstruktion findet anhand des internationalen Testdatensatzes Avenches-Wohnort¹ statt, der vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich für den Workshop *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 1995*, bereitgestellt wurde.

Der Maßstab der verwendeten Luftbilder beträgt 1 : 5000 mit einer Pixelgröße von 30µm. Zwölf Gebäude sind auf allen vier Luftbildern vollständig sichtbar. Von diesen wurde das in Abbildung 5.2 mit H12 bezeichnete Haus von der Rekonstruktion ausgeschlossen, da es sich noch im Bau befand. Wegen der zu geringen Auflösung konnten keine Ecken auf Bodenhöhe rekonstruiert werden. Daher war es auch nicht möglich, während der Konstruktion der Gebäudehypothesen die Geschosshöhen zu bestimmen. Dieser Parameter blieb bei jeder Hypothese frei. Ihre Werte konnten jedoch nach dem Matching der Modelldaten mit den Bildmerkmalen in der abschließenden Parameterschätzung bestimmt werden.

Zur Hypothesenkonstruktion wurden fünf Gebäudeteilprimitive ausgewählt. Die vier Terminale und ein Konnektor sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Das Mansarddach-Terminal wurde zu Kontrollzwecken aufgenommen und kommt in keinem der Gebäude vor. Der Konnektor wird nur zur Konstruktion des schon bekannten Gebäudes H3 benötigt.

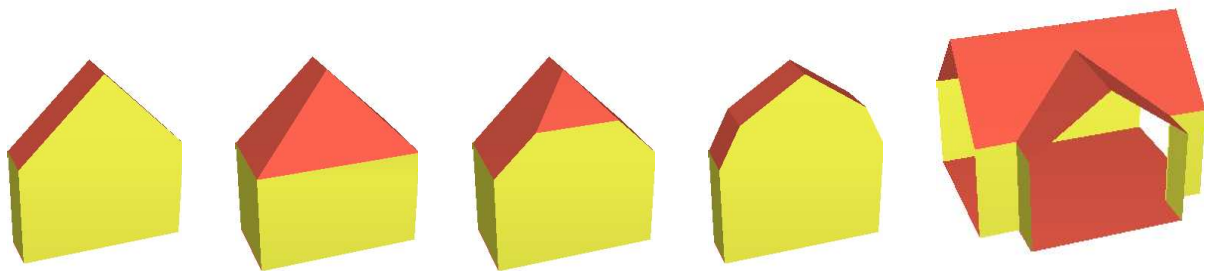


Abbildung 5.1: Vier Terminale und ein Konnektor wurden als Datenbasis für die Anwendung der beiden implementierten Verfahren auf die Testdaten ausgewählt.

Sowohl das direkte Verfahren (siehe Abschnitt 3.5.2) als auch das kombinatorische Verfahren (siehe Abschnitt 3.5.4) wurde implementiert und erfolgreich auf Testdatensätze angewendet. Beide Verfahren wurden als Module realisiert, die auf einer gemeinsamen Bibliothek aufsetzen. Dieses Framework wurde in C++ implementiert. Für die Grafikausgabe zu Demonstrations- und Testzwecken, wurde unter anderem OpenGL verwendet. Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit der Scriptsprache Tcl/Tk erstellt.

¹unter <http://vis-www.cs.umass.edu/vislib/Aerial/AsconaWorkshop1995/files.html> im Internet zu finden.

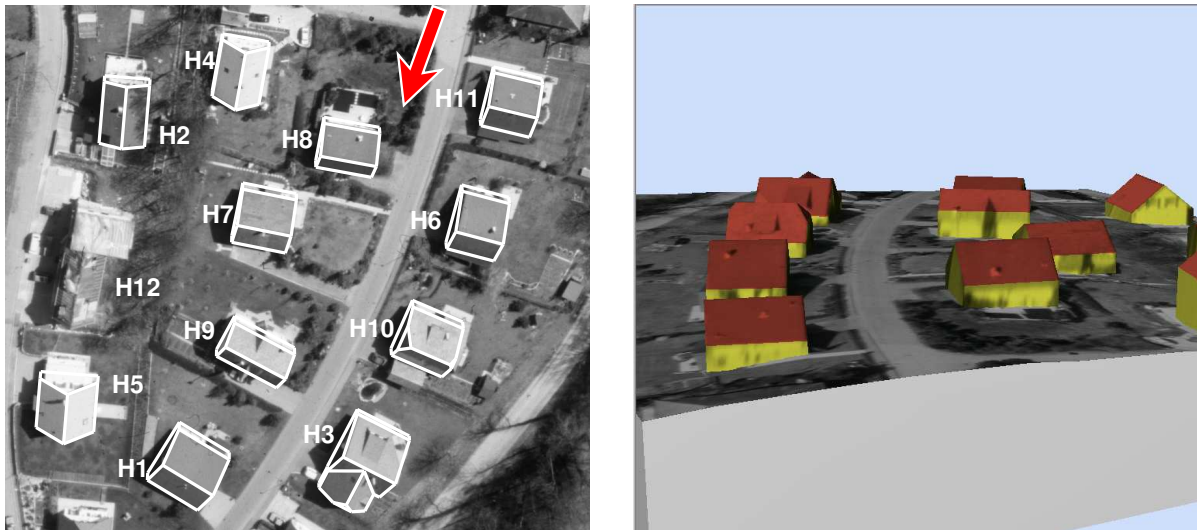


Abbildung 5.2: Zwei Visualisierungen der Gebäuderekonstruktion für den Avenches Datensatz. Links die Rückprojektion in eines der vier Luftbilder. Elf der in allen vier Luftbildern sichtbaren zwölf Gebäude konnten rekonstruiert werden. Das mit H12 bezeichnete Gebäude wurde nicht rekonstruiert, da es sich noch im Bau befand. Rechts eine dreidimensionale Darstellung der selben Daten. Die ungefähre Blickrichtung ist im linken Bild durch einen Pfeil verdeutlicht.

5.1 Evaluierung

Beide Verfahren haben die gleichen Hypothesen erzeugt. Da für die Parameterschätzung jeweils die gleichen Algorithmen verwendet wurden, waren sowohl Struktur als auch Geometrie der Hypothesen identisch. Abbildung 5.2 zeigt auf der linken Seite die Rückprojektion der jeweils am besten bewerteten Hypothesen in eines der Luftbilder. Mit einem Pfeil ist die Blickrichtung markiert, für die auf der rechten Seite die 3D-Ansicht erstellt wurde. Als Textur kam das gleiche Luftbild zum Einsatz.

Für alle elf Gebäude konnten automatisch Gebäudehypothesen konstruiert werden, die die gegebenen Beobachtungen zufriedenstellend erklärten. Wie man in Tabelle 5.1 sieht, standen für die Hypothe-

Gebäude	Eckenrekonstruktion			Hypothesenkonstruktion				Verifikation	
	GE	N	N/GE	GPE	P	H	FPK	FP	
H1	6	3	0.5	2/3/2	0	2	1	0	
H2	6	1	0.1667	2	2	2	1	0	
H3	12	6	0.5	2/2/4/3/3/3	0	1	1	0	
H4	6	3	0.5	3/2/2	0	2	1	0	
H5	6	3	0.5	2/3/3	0	3	1	0	
H6	6	2	0.334	2/3	0	3	1	0	
H7	6	1	0.334	2	2	2	1	0	
H8	6	3	0.5	2/2/3	0	2	1	0	
H9	6	4	0.667	3/2/3/3	0	2	1	0	
H10	10	5	0.5	3/3/4/3/3	0	2	1	0	
H11	6	2	0.334	2/2	0	2	1	0	

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung verschiedener Werte der drei Rekonstruktionsphasen. Die Abkürzungen stehen für folgende Anzahlen. GE: Ecken des Gebäudemodells; N: Rekonstruierte Ecken; GPE: Gebäudeteilprimitive, die durch jede Ecke indiziert wurden; H: Hypothesen; P: Prädiktionen; FPK: Freie Parameter nach der Hypothesenkonstruktion; FP: Freie Parameter nach der letzten Parameterschätzung.

Gebäude	Orientierung	Höhe	Normale
H1	1.30843	0.318871	0.300483
H2	3.1085	0.031218	0.0297943
H3	2.3586	0.301952	0.211582
H4	0.576028	0.246608	0.193619
H5	0.443198	0.114804	0.101024
H6	2.2155	0.128517	0.164965
H7	4.38503	0.166739	0.14172
H8	2.76167	0.116212	0.0864463
H9	1.37802	0.155173	0.11474
H10	2.36671	0.104296	0.0990861
H11	1.62349	0.173987	0.155672
Mittelwert	2.047312	0.168943	0.145376

Tabelle 5.2: Vergleich der Referenzdaten mit den rekonstruierten Dachflächen. Spalte *Orientierung* gibt den mittleren Winkel zwischen den Normalenvektoren an, die Spalten *Höhe* und *Normale* geben die mittleren Entfernungen der Flächenschwerpunkte entlang der vertikalen Achse bzw. der Normalen der Flächen der Referenzdaten an.

senkonstruktion nur in einem Fall mehr als die Hälfte der Gebäudeecken als Beobachtungen zur Verfügung. Trotzdem konnte in jedem Fall mindestens eine Hypothese erstellt werden. Nur bei den Gebäuden H2 und H7 war aufgrund nur einer gegebenen Beobachtung die Ausführung von jeweils zwei Prädiktionen nötig: In beiden Fällen wurde für jedes der beiden durch die einzelne Beobachtung indizierten Gebäudeteilprimitive, ein passendes Gebäudeteilprimitive instanziiert. Da für keines der Gebäude eine Ecke auf Bodenhöhe rekonstruiert werden konnte, blieb in jedem Fall der Parameter der Geschosshöhe unbestimmt. Durch das Matching der Rückprojektionen mit den Bildmerkmalen während der Verifikation konnte dieser Parameter aber in allen Fällen bestimmt werden.

5.1.1 Quantitative Evaluierung

Für den Avenches-Datensatz wurden die Dachflächen der elf Gebäude auch manuell mit Hilfe eines analytischen Plotters vermessen. Die geschätzte Genauigkeit der Punktmessungen beträgt ± 10 cm. Tabelle 5.2 zeigt die Differenzen zwischen diesen Referenzdaten und den automatisch rekonstruierten Dachflächen. Von den Referenzdaten wurden nur die Dachflächen berücksichtigt, die einer rekonstruierten Dachfläche zugeordnet werden konnten. Die Spalte *Orientierung* gibt den mittleren Winkel zwischen den Normalenvektoren an, die Spalten *Höhe* und *Normale* geben die mittleren Entfernungen der Flächenschwerpunkte entlang der vertikalen Achse bzw. der Normalen der Flächen der Referenzdaten an. Die Abweichung der Orientierung, gemittelt über alle elf Häuser, beträgt 2° . Die gemittelten Entfernungen zwischen den Flächenschwerpunkten liegen mit 17 cm bzw. 15 cm noch in der Größenordnung der Ungenauigkeiten der Referenzpunkte. Die Unterschiede sind in erster Linie das Ergebnis der von den Referenzdaten abweichenden Begrenzungen der rekonstruierten Dachflächen.

Tabelle 5.3 vergleicht die Anzahl und den Flächeninhalt der rekonstruierten (Rek.) Dachflächen mit denen der Referenzdaten (Ref.). In der letzten Zeile sind die Werte jeder Spalte aufsummiert. Abweichungen in der Flächenanzahl treten nur auf bei Gebäuden mit Dachaufbauten, wie Erkern und Dachgauben oder unregelmäßig geformten Dachflächen, z. B. durch Vorsprünge oder, wie im Fall von Haus H3, abgeschnittenen Ecken. Diese bewirkt auch, daß zwar nur fünf von neun Dachflächen rekonstruiert wurden (eine Dachgaube wurde nicht erkannt), aber die Fläche des rekonstruierten Daches mit 290.767 qm trotzdem größer ist als die der Referenzdaten mit 281.56 qm. Obwohl aus den genannten Gründen nur etwa 70 Prozent der Dachflächen rekonstruiert wurden, liegt das Verhältnis für die die Summe deren Flächeninhalte bei 96 Prozent.

Gebäude	Flächenanzahl		Flächeninhalt in qm	
	Rek.	Ref.	Rek.	Ref.
H1	2	2	198.180	201.09
H2	2	2	143.547	145.90
H3	5	9	290.767	281.56
H4	2	2	165.866	176.55
H5	2	2	178.734	179.01
H6	2	2	177.125	178.00
H7	2	2	169.422	169.38
H8	2	2	163.247	166.00
H9	2	6	151.070	165.71
H10	4	5	187.235	211.00
H11	2	3	142.590	183.84
Insgesamt	27	39	1967.780	2058.04

Tabelle 5.3: Vergleich von Anzahl und Flächeninhalten der rekonstruierten (Rek.) Dachflächen mit denen der Referenzdaten (Ref.).

5.2 Direktes Verfahren

Die Anwendung des direkten Verfahrens auf den Testdatensatz hat, wie Tabelle 5.4 zeigt, bei allen elf Gebäuden zu Hypothesen geführt, die anschließend verifiziert werden konnten:

Bei den Häusern H2 und H7 wurden aufgrund von jeweils einer fehlenden Beobachtung Prädiktionsoperationen durchgeführt. Das ist auch der Grund, warum für die Konstruktion der optimalen Hypothese statt einer einzelnen Verbindungsoperation zwei Operationen in Spalte O aufgeführt sind: Zuerst mußte das fehlende Satteldach-Terminal prädiert werden.

In sieben der elf Fälle konnte die optimale Hypothese mit der minimalen Anzahl von Operationen rekonstruiert werden. Bei N gegebenen Beobachtungen waren $N - 1$ Operationen nötig. Für die Häuser H2 und H7 wurde, wie oben schon gesagt, eine zusätzliche Prädiktionsoperation ausgeführt. Bei den Häusern H6 und H9 wurden nur $N - 2$ Operationen benötigt, da jeweils eine Beobachtung nicht durch die Hypothese erklärt werden konnte. Im Fall von Haus H6 konnte für eine Beobachtung mit den Kantenattributen horizontal, schräg- und schräg- kein Gebäudeteilprimitiv instanziiert werden, da die beiden schrägen Kanten eine zu geringe Neigung hatten, die nicht von den Constraints eines Primitivs erfüllt werden konnte. Bei Haus H9 schließlich konnten die von der unerklärt bleibenden Eckenbeobachtung indizierten primitiven Aggregate vom Algorithmus nicht in die Hypothese integriert werden.

5.3 Kombinatorisches Verfahren

Tabelle 5.5 beschreibt die Anwendung des kombinatorischen Verfahrens auf den Avenches-Datensatz. Die mit einem * gekennzeichneten Einträge in Spalte GPE stammen aus Prädiktionsoperationen, die aufgrund fehlender Beobachtungen für die Gebäude H2 und H7 ausgeführt wurden. Dort ist jeweils nur eine Eckenbeobachtung gegeben.

Da das kombinatorische Verfahren, wie das direkte Verfahren auch, eine vollständige Suche realisiert, sind die generierten Hypothesen identisch mit denen des direkten Verfahrens. Von den teilweise sehr großen Zahlen in Spalte 2^{n_v} bleiben durch die Suchbaumbeschneidung nur noch wenige zu testende Kombinationen in Spalte ANZ123 übrig. Das führt zu den in Abschnitt 5.4.1 angegebenen Laufzeiten. Durch den einfachen Algorithmus konnte das Verfahren in kurzer Zeit implementiert werden.

Für jedes der beiden Häuser H2 und H7 wurden zwei Prädiktionsoperationen durchgeführt, mit deren Ergebnissen jeweils eine Aggregationsoperation erstellt wurde ($n_v = 2$). Die für Häuser H6 und H9 generierten Hypothesen erklären jeweils eine Eckenbeobachtung nicht. Wie beim direkten

Gebäude	N	GPE	GP	O	P	H
H1	3	2/3/2	7	2	0	2
H2	1	2	2	2	2	2
H3	6	2/2/4/3/3/3	17	5	0	1
H4	3	3/2/2	7	2	0	2
H5	3	2/3/3	8	2	0	3
H6	3	2/0/3	5	1	0	3
H7	1	2	2	2	2	2
H8	3	2/2/3	7	2	0	2
H9	4	3/2/3/3	11	2	0	2
H10	5	3/3/4/3/3	16	4	0	2
H11	2	2/2	4	1	0	2

Tabelle 5.4: Das direkte Verfahren konnte für jedes der elf Gebäude korrekte Hypthesen erstellen. Hier bezeichnet N die Anzahl der rekonstruierten Eckenbeobachtungen, GPE die Anzahl der von jeder Ecke indizierten Gebäudeteilprimitive, GP die Anzahl der indizierten Gebäudeteilprimitive insgesamt. Die optimale Hypothese konnte in O Operationen, davon P Prädiktionen, nach abgeschlossener Indizierung erstellt werden. Insgesamt wurden H Hypothesen erstellt.

Verfahren auch, konnte für eine Beobachtung bei Haus H6 kein Gebäudeteilprimitiv instanziiert werden. Die nicht erklärte Beobachtung von Haus H9 konnte mit keinem von ihr indizierten primitiven Aggregate in die Hypothesen integriert werden.

5.4 Vergleich der Ansätze

Das kombinatorische Verfahren hat sich als robuster und zuverlässiger als das direkte herausgestellt. Das liegt zum einen daran, daß die einzelnen Operationen, die während der Hypothesenkonstruktion ausgeführt werden, sehr viel weniger komplex und damit fehleranfällig sind als die des direkten Verfahrens. Des weiteren ist der zu implementierende Algorithmus sehr viel einfacher realisierbar. Schließlich kommt hier ein ganz praktischer Grund zum Tragen. Bei drastisch kürzeren Laufzeiten können mehr Tests des implementierten Verfahrens durchgeführt werden. Fehler lassen sich schneller finden und einfacher beheben.

Das kombinatorische Verfahren berechnet und verwendet weniger Informationen als das direkte. Es werden z.B. keine Parameterschätzungen für Teilgebäude durchgeführt. Daher können neue Gebäudeaggregate, die nicht zu den Beobachtungen passen, nicht von der weiteren Konstruktion ausgeschlossen werden. Insgesamt werden aufgrund der geringeren Anzahl von verwendeten Informationen mehr Kombinationen durchprobiert als bei dem direkten Verfahren. Diese Mehrarbeit wird aber durch zwei Faktoren mehr als ausgeglichen. Zum einen entsteht eine große Zeitersparnis durch den Wegfall der Parameterschätzungen für die Zwischenergebnisse. Zum anderen sind die jetzt öfter auszuführenden Tests sehr viel einfacher zu berechnen, so daß in der gleichen Zeit viel mehr Hypothesen und Teilhypothesen getestet werden können.

5.4.1 Vergleich der Laufzeiten

Als Hinweis auf die Verbesserung der Laufzeit mögen die folgenden Daten dienen, auch wenn es sich bei den beiden miteinander verglichenen Implementierungen nicht um primär laufzeitoptimierte Programme handelt. Als Datensatz dient einmal mehr das H3-Haus. Beide Implementierungen verwenden den gleichen Programmkernel, so daß gleiche Aufgaben von den selben Methoden erledigt werden. Die Implementierung des direkten Verfahrens benötigt für die Ausführung aller Operationen für die Rekonstruktion von Haus H3 im Mittel 83.41 Sekunden (drei Läufe ergaben Zeiten von 83.44 s, 83.32 s und 83.46 s). Das kombinatorische Verfahren wurde in der Implementierung in

Gebäude	N	GPE	GP	n_V	2^{n_V}	ANZ12	ANZ123	N'	H
H1	3	2/3/2	7	5	32	11	11	3	2
H2	1	2/2*	4	2	4	2	2	1	2
H3	6	2/2/4/3/3/3	17	27	134 217 728	4612	876	6	1
H4	3	3/2/2	7	5	32	11	11	3	2
H5	3	2/3/3	8	8	256	19	19	3	3
H6	3	2/0/3	5	3	8	3	3	2	3
H7	1	2/2*	4	2	4	2	2	1	2
H8	3	2/2/3	7	5	64	11	11	3	2
H9	4	3/2/3/3	11	16	65536	155	149	3	2
H10	5	3/3/4/3/3	16	25	33 554 432	445	239	5	2
H11	2	2/2	4	2	4	2	2	2	2

Tabelle 5.5: Evaluation des kombinatorischen Verfahrens. Hier ist N die Anzahl der Eckenbeobachtungen, GPE die Anzahl der von jeder Ecke indizierten Gebäudeteilprimitive, GP die Anzahl der indizierten Gebäudeteilprimitive insgesamt. Die Anzahl der Aggregationsoperationen n_V führt zur maximalen Anzahl von zu untersuchenden Teilmengen 2^{n_V} . Durch Anwendung der ersten beiden Techniken zur Suchbaumbeschneidung ergibt sich ANZ12, die Anwendung auch der dritten Technik führt zu ANZ123. Mit H wird schließlich die Anzahl der konstruierten Hypothesen bezeichnet.

die eigentliche Rekonstruktion und die anschließende Parameterschätzung in zwei unabhängige Programme aufgespalten. Die Rekonstruktion dauerte im Mittel 1.75 Sekunden (1.72 s, 1.71 s und 1.81 s), die Parameterschätzung dauerte im Mittel 3.81 Sekunden (3.83 s, 3.80 s und 3.79 s), zusammen also etwa 5.56 Sekunden. Auch wenn die Zahlen nicht direkt miteinander vergleichbar sind, so ist doch die Beschleunigung um eine Größenordnung ein deutliches Zeichen für die Überlegenheit des kombinatorischen Verfahrens.

5.5 Zusammenfassung

Die Implementierung von zwei unterschiedlichen Verfahren zur Hypothesenkonstruktion hat gezeigt, daß der in Kapitel 3 vorgestellte Ansatz automatisch Hypothesen von Gebäuden für eine gegebene Menge von Eckenbeobachtungen erstellen kann. Für den Avenches-Datensatz konnten alle elf in den vier Luftbildern sichtbaren Gebäude ohne Eingreifen eines Operateurs rekonstruiert werden. Die in der Hypothesenkonstruktion frei gebliebenen Parameter der Geschoßhöhen konnten alle während der Verifizierung der Hypothesen ermittelt werden.

Durch die flexible Modellierung waren die rekonstruierten Gebäude weder auf bestimmte Grundrisse noch auf feste Dachformen festgelegt. Sowohl Struktur als auch Geometrie wurden während der Konstruktionsphase individuell an die gegebenen Beobachtungen angepaßt. Gleichzeitig haben die impliziten und expliziten Constraints dafür gesorgt, daß ein *Overfitting* vermieden wurde und nur sinnvolle Gebäudeformen konstruiert wurden.

Die Laufzeit des in mehreren Arbeiten vorgestellten und bewährten direkten Verfahrens zu Hypothesenkonstruktion konnte mit dem kombinatorischen Verfahren um etwa den Faktor 10 beschleunigt werden. Außerdem wurde die Implementierung deutlich einfacher und zuverlässiger.

Kapitel 6

Einordnung der Arbeit

Fast alle Verfahren zur automatischen und halbautomatischen Gebäuderekonstruktion verwenden auf Polyedern basierende Modellierungen. Polyeder haben in diesem Zusammenhang zwei wesentliche Charakteristika. Sie werden durch ebene Flächen begrenzt und durch die Graphstruktur ihrer Kanten eindeutig beschrieben.

Die Verwendung von ebenen Flächen dient zum einen der Vereinfachung der Objektbeschreibung. Sie hat aber auch die Eigenschaft Gebäude als künstliche Objekte von natürlichen, wie z.B. Bäumen, abzugrenzen. Die Eigenschaft von Polyedern durch ihre Kanten beschrieben zu werden – Zusatzinformationen über die Graphstruktur machen diese Beschreibung eindeutig – wird für eine weitere Vereinfachung der Gebäuderekonstruktion ausgenutzt. So verwendet der Großteil der in der Literatur beschriebenen Verfahren primär Kanteninformationen zur Erkennung und Rekonstruktion von Gebäuden.

Innerhalb der polygonalen Gebäudemodellierung gibt es im wesentlichen vier verschiedene Spezialisierungen, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

6.1 Parametrisierte Prototypen

Gebäudemodellierungen mit parametrisierten Prototypen verwenden Datenbasen mit verschiedenen Gebäudeprototypen. Diese haben eine feste Struktur mit gebäudespezifischen Parametern.

Parametrisierte Prototypen werden von Haala und Hahn (1995) (Universität Stuttgart), Kim und Muller (1995) oder Shufelt (1996) beschrieben.

Jaynes, Hanson und Riseman (1997) beschreiben einen modifizierten Ansatz. Hier werden nicht vollständige Gebäude sondern nur deren Dachformen durch Prototypen modelliert. Die Grundflächen der Gebäude, dürfen beliebige rechteckige Formen annehmen.

6.2 Prismatische Modelle

Prismatische Gebäudemodelle werden durch ihren Grundriß und ihre Höhe festgelegt. Das Dach wird als Flachdach mit der gleichen Form wie der Grundriß modelliert, die Wandflächen sind vertikal. Diese Gebäudemodellierung wird gerade in frühen Arbeiten verwendet. Prismatische Modelle lassen sich weiter nach Art der für den Grundriß zulässigen Polygone charakterisieren.

Jamet, Dissard und Airault (1995) (Institut Géographique National) beschränken sich auf rechteckige Grundrisse. Gebäude werden also durch Quader modelliert.

Die Verwendung von rechtwinkligen Grundflächen wird von Huertas und Nevatia (1988), Mohan und Nevatia (1988) und Lin, Huertas und Nevatia (1995) (alle University of Southern California) beschrieben. Damit können z. B. L, T, H und E-förmige Grundrisse realisiert werden. Rechtwinklige Grundflächen gehen im allgemeinen aus der Vereinigung rechteckiger Grundflächen von Teilgebäuden hervor.

Rechteckige Grundflächen werden auch von Collins, Hanson, Riseman und Schultz (1995) (University of Massachusetts), Fua und Hanson (1987) und (1991) (SRI International) und McKeown (1990) (Carnegie Mellon University) verwendet.

Prismatische Modelle mit allgemeinen Polyedern als Grundfläche werden von Lang, Löcherbach und Schickler (1995) und Weidner und Förstner (1995) als Teil einer Hybridmodellierung zugelassen. Für einfache Gebäude werden parametrisierte Prototypen eingesetzt. Komplexere Gebäude werden durch prismatische Modelle repräsentiert, die beliebigen Polygone als Grundfläche haben dürfen. Insbesondere sind Löcher zur Modellierung von z. B. Innenhöfen erlaubt.

6.3 Allgemeine Polyeder

Verfahren, die allgemeine Polyeder zur Modellierung von Gebäuden einsetzen, beschränken sich im allgemeinen auf die Rekonstruktion von Dachflächen. Die fehlenden Wandflächen werden anschließend ohne direkte Beobachtungen ergänzt.

Roux und McKeown (1994) beschreiben einen Ansatz, der einen Übergang von prismatischen Modellen zu allgemeinen Polyedern darstellt. Grundrisse bleiben auf rechtwinklige Formen beschränkt. Neben Flachdächern werden jetzt aber auch Satteldächer erkannt.

Ein Ansatz in dem beliebige Dachformen anhand der begrenzenden Kanten erkannt werden, wird von Faugeras, Laveau, Robert, Csurka und Zeller (1995) (INRIA), Bignone, Henricsson, Fua und Stricker (1996) (ETH Zürich) und Henricsson und Baltsavias (1997) (ETH Zürich) beschrieben. Die Höhe der Wandflächen wird anhand von DTM (Digital Terrain Model) Daten ermittelt.

Baltsavias, Mason und Stallmann (1995) (ETH Zürich) verwenden einen hybriden Ansatz. Für einfache Gebäude werden parametrisierte Prototypen zur Modellierung verwendet. Komplexere Gebäudeformen werden durch ein allgemeines Polyeder modelliert.

Im Gegensatz zu den kantenbasierten Verfahren verwenden Haala und Brenner (1997) (Universität Stuttgart) DSM (Digital Surface Model) Daten um Flächen zu extrahieren. Kanten werden aus den Schnittgeraden der Flächen abgeleitet. Zusätzlich werden Pläne, die die Bodenflächen der Gebäude enthalten, verwendet um die Wände zu rekonstruieren.

Moons, Frère, Vandekerckhove und van Gool (1998) verwenden zunächst einen ähnlichen Ansatz wie Bignone, Henricsson, Fua und Stricker (1996) zur Rekonstruktion der Dachflächen. In einem anschließenden Schritt wird das aus den Dachflächen erzeugte Gebäudemodell in die Luftbilder zurückprojiziert. Die Eckpunkte werden in einer Parameterschätzung nun an die Bilder angepasst, so daß eine optimale Übereinstimmung mit den Bilddaten entsteht.

6.4 Komponenten

Braun et al. (1995) (Universität Bonn) beschreiben die Verwendung von parametrisierten Volumenprimitiven, die durch CSG-Operationen miteinander kombiniert werden können. Dieser Entwurf wurde später in die in dieser Arbeit beschriebene Modellierung abgewandelt.

Haala, Brenner und Anders (1998) (Universität Stuttgart) verwendet eine CSG-Modellierung mit wenigen einfachen parametrisierten Primitiven. Diese werden zu Gebäuden mit rechtwinkligem Grundriß vereinigt.

6.5 Diskussion

Bei allen hier aufgeführten Arbeiten hat die Modellierung von Gebäuden ein Problem: Sie ist entweder zu speziell oder zu allgemein. Die Verwendung von prismatischen oder allgemeinen Polyedern kann zwar eine Vielzahl von Gebäuden modellieren, in der zweiten Form auch mit nahezu beliebigen Dachformen, aber es können eben auch andere Objekte repräsentiert werden. Diese beiden Gebäudemodellierungen machen keinen Unterschied zwischen Gebäuden, Hundehütten oder LKWs. Außerdem werden auch Details wie z.B. Schornsteine oder (Satelliten-)Antennen automatisch rekonstruiert, auch wenn diese nicht interessieren oder die Rekonstruktion des eigentlichen Gebäudes behindern, wenn sie aufgrund ihrer geringen Größe nur unvollständig erkannt werden.

Jedes Element des rekonstruierten Daches muß eine entsprechende Beobachtung haben. Prädiktionen von unbeobachteten Modellmerkmalen sind nur in einem äußerst beschränkten Umfang möglich. Dadurch wird die Rekonstruktion eines teilweise verdeckten Gebäudes bzw. die Rekonstruktion aus schlechtem Bildmaterial, das nur die Extraktion eines Teiles der Bildmerkmale erlaubt, erschwert bzw. unmöglich gemacht.

Im Gegensatz dazu ist die Modellierung mit einer begrenzten Anzahl von vollständigen und parametrisierten Gebäudeprimitiven zu speziell. Es können eben nur Gebäude erkannt werden, die einem der Primitive entsprechen. Eine Abweichung in Grundriß oder Dachform führt dazu, daß ein Gebäude nicht erkannt wird.

Hybridmodellierungen verwenden zwei getrennte Teilmodellierungen. Eine echte Integration findet nicht statt.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Gebäudemodellierung ist eben das: Eine Modellierung von Gebäuden. Sie enthält genug Gebäudewissen um Objekte wie Gartenhäuser (zu klein), LKWs (zu schmal) oder Bäume (falsche Form) auszuschließen. Auf der einen Seite ist sie durch die Konstruktion von Gebäudehypothesen aus einzelnen Gebäudeteilen flexibel genug um fast beliebige Grundrisse und Dachformen darzustellen. Auf der anderen Seite können durch die Parametrisierung und den darauf definierten Constraints Objekte ausgeschlossen werden, die keine Gebäude sind.

In den prismatischen und allgemeinen Polyedermodellierungen findet sich Semantik in Form von Gebäudewissen nur durch Verwendung von Polyedern und Beschränkung auf rechte Winkel und vertikale Wände. In der hier vorgestellten Modellierung ist dagegen semantisches Gebäudewissen in vielfältiger Form enthalten. Während der Hypothesenkonstruktion etwa sorgt die Interpretation der in den Fügeflächen endenden Kanten (z.B. in Trauf- oder Firstkanten) dafür, daß nur gleichartige Kanten miteinander verbunden werden können und nach der Verbindung keine Wandfläche zu einer Dachfläche wird. Darüber hinaus erlauben die semantischen Informationen der verwendeten Gebäudekomponenten eine Interpretation der rekonstruierten Gebäude. So können einfache Grundrisse klassifiziert (etwa in I-, L- oder T-förmig), Dachformen benannt (z.B. Sattel- oder Mansarddach) oder Fassaden erkannt werden (z.B. Walmdachabschluß). Durch die Einteilung der Gebäudeteilprimitive in Terminale und Konnektoren können die Trakte, aus denen ein Gebäude besteht, identifiziert und gezählt werden. Schließlich können aus den implizit und explizit kodierten 3D-Relationen entsprechende 2D-Relationen abgeleitet werden, die verwendet werden, um das Matching mit 2D-Merkmalen zu unterstützen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Der Titel der Arbeit nennt das Hauptziel und die Methode um es zu erreichen: „Automatische Gebäuderekonstruktion mittels parametrisierter Komponenten“. Daß das Ziel erreicht und dazu die Modellierung durch parametrisierte Komponenten eingesetzt wurde, ist in den Kapiteln zur automatischen Hypothesenkonstruktion sowie zur 3D- und 2D-Modellierung gezeigt worden.

7.1 Automatische Gebäuderekonstruktion

Um Gebäude automatisch aus Luftbildern zu rekonstruieren wurden in Kapitel 3 drei Verfahren zur Hypothesenkonstruktion vorgestellt. Das direkte Verfahren vervollständigt iterativ primitive Gebäudeaggregate zu komplexen Gebäudehypothesen. Der A*-Algorithmus wird zur Lösung eines entsprechend formulierten Suchproblems eingesetzt. Das kombinatorische Verfahren schließlich realisiert eine Gestaltgrammatik und sucht nach einer geeigneten Ableitung, indem es alle Kombinationen von indizierten primitiven Gebäudeaggregaten aufzählt und testet, welche Kombinationen sich zu Gebäudehypothesen zusammensetzen lassen.

Von den drei Verfahren wurden das direkte und das kombinatorische implementiert und erfolgreich auf den Avenches-Datensatz angewendet. Dadurch wurde bestätigt, daß die vorgestellten Ansätze in der Lage sind automatisch, ohne Benutzerinteraktion, für einen gegebenen Satz von dreidimensionalen Eckenbeobachtungen, Gebäudehypothesen zu erstellen, die diese Beobachtungen optimal erklären. Es hat sich gezeigt, daß das Verfahren unter mehreren für einen Datensatz erzeugten Hypothesen, diejenige am besten bewertet, die auch ein Operateur auswählen würde.

Das kombinatorische Verfahren konnte gegenüber dem in früheren Veröffentlichungen beschriebenen direkten Verfahren, die Laufzeit um etwa den Faktor 10 senken. Gleichzeitig hat sich das Verfahren als einfacher zu implementieren und als robuster in der Ausführung erwiesen.

7.2 3D-Modellierung durch parametrisierte Komponenten

Um die Hypothesenkonstruktion zu automatisieren, wurde in Kapitel 2 eine speziell auf dieses Ziel abgestimmte Modellierung vorgestellt. Durch die Verwendung von parametrisierten Komponenten wird auf der einen Seite eine hohe Flexibilität gewährleistet. Die Konstruktionsverfahren können so Hypothesen erstellen, die die gegebenen Beobachtungen optimal erklären. Dabei kann sowohl die Struktur als auch die Geometrie fast beliebig angepaßt werden. Durch das in der Modellierung enthaltene Gebäudewissen, werden die Algorithmen dabei geleitet.

Auf der anderen Seite wird die Flexibilität aber nicht beliebig weit getrieben. Durch explizite Constraints, die auf den Parametern definiert sind, wird die Geometrie auf gebäudetypische Werte beschränkt. Die Fügeflächen der Komponenten und die spezialisierte CSG-Operation zu deren Verbin-

dition kontrollieren die Flexibilität der Struktur. Auch sie wird so auf Formen beschränkt die typisch für Gebäude sind.

Durch den Einsatz von Komponenten und durch deren Parametrisierung wird es an einigen Stellen nötig, Standardalgorithmen zu erweitern oder durch neue zu ersetzen. Da die Parametrisierung symbolisch ist und nichtlinear sein darf, wurde es nötig, die Ausgleichsrechnung zur Parameterschätzung auch symbolisch zu realisieren. Die zur Aggregation eingesetzte spezialisierte CSG-Operation hat nur noch wenig mit der CSG-Vereinigung gemein. Die Verbindung von zwei Gebäudeaggregaten wird automatisch und mit der symbolischen Parametrisierung durchgeführt. Sie erzeugt aus den gegebenen Aggregaten die Oberflächenbeschreibung eines neuen Aggregats. Die Parametrisierung der Argumente wird dabei aneinander angepaßt und um einen neuen Parameter erweitert.

Für die Bewertung der konstruierten Hypothesen werden, je nach Verwendung, verschiedene statistische Verfahren eingesetzt. Für die allgemeine Bewertung eines beliebigen Aggregats oder einer Hypothese wird das Ergebnis einer zuvor durchgeführten Kleinste-Quadrate-Schätzung verwendet. Über deren *Goodness-Of-Fit*-Wert wird entschieden, ob das Aggregat oder die Hypothese überhaupt ein sinnvolles Ergebnis der entsprechenden Operation darstellt. Mit dem MDL-Kriterium werden Hypothesen miteinander verglichen und nach der Qualität, mit der sie die Beobachtungen erklären, sortiert und der Verifizierung zugeführt.

7.3 Verifizierung mittels 2D-Ansichtenhierarchien

Die Verifizierung der Hypothesen wird durch die in Kapitel 4 vorgestellte 2D-Modellierung der Ansichtenhierarchien ermöglicht und gesteuert. Im Gegensatz zu der objektzentrierten 3D-Modellierung ist die 2D-Modellierung betrachterzentriert.

Die 2D-Modellierung greift die Modellierung mittels Komponenten der 3D-Modellierung wieder auf. In einer hierarchischen Struktur werden die Rückprojektionen der Hypothesen in die Luftbilder in Regionen, die den sichtbaren Teilen der 3D-Flächen entsprechen, zerlegt. Hypothesen sind mit Rückprojektionen und diese mit den Regionen durch Kanten verbunden, die die Wahrscheinlichkeiten der gegenseitigen Zugehörigkeit enthalten. Relationen, die auf den Regionen definiert sind, ermöglichen die Identifizierung von einzelnen Regionen im Luftbild. Hypothesen können so auch dann verifiziert werden, wenn nur ein Teil ihrer Regionen mit den Bildmerkmalen identifiziert werden konnte. Die Integration von radiometrischen Informationen und Schattenwurf, beides speziell für den bekannten Aufnahmezeitpunkt und -ort berechnet, unterstützen die Verifizierung weiter.

Freie Parameter, die während der Hypothesenkonstruktion nicht bestimmt werden konnten, müssen für die Verifizierung mit Werten belegt werden. Dazu wird der durch die freien Parameter aufgespannte Parameterraum, der eine beliebige Dimensionalität annehmen kann, mit einem Samplingansatz in Regionen mit äquivalenten Rückprojektionen unterteilt. Aus jeder dieser Äquivalenzregionen wird ein Vertreter ausgewählt. Für dessen Werte der freien Parameter wird eine Ansicht der jeweiligen Hypothese erzeugt und in die Ansichtenhierarchie eingefügt.

Die in der 3D-Modellierung eingeführten Konzepte der Modellierung mittels Komponenten und die Parametrisierung der Komponenten findet sich, in angepaßter Form, also auch in der 2D-Modellierung wieder.

7.4 Ausblick

Diese Arbeit hat eine 3D- und eine 2D-Modellierung vorgestellt, die erfolgreich zur automatischen Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern eingesetzt wurden. An dieser Stelle möchte ich drei Vorschläge machen, wie diese fortgeführt und erweitert werden können.

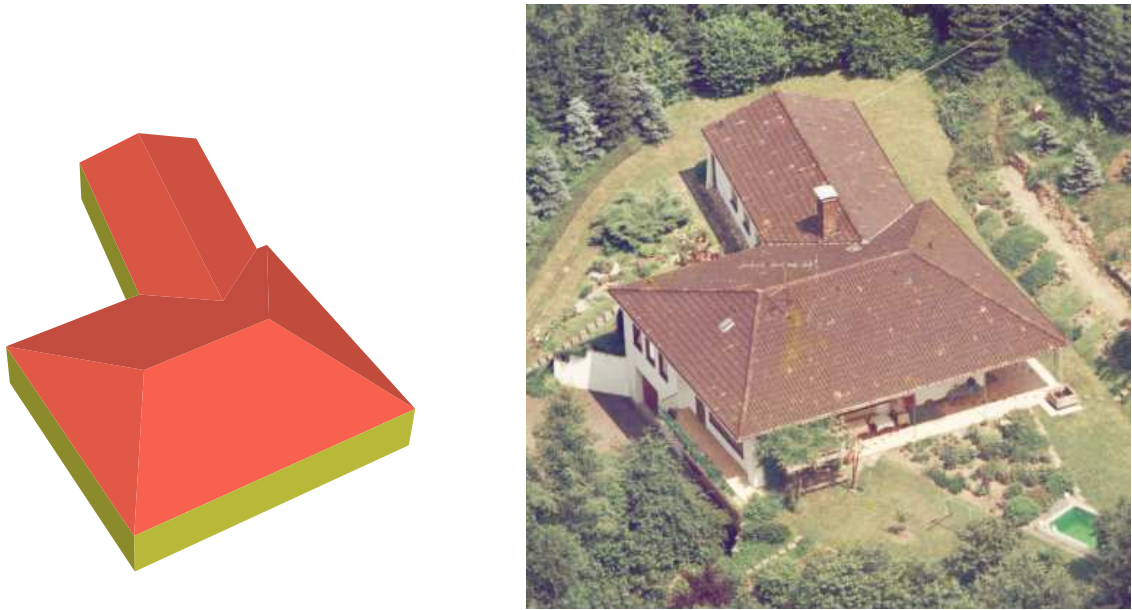


Abbildung 7.1: Modell und Luftbildaufnahme von Haus ND4. Der nach hinten verlaufende Trakt bildet einen Winkel von 80° mit dem Haupthaus.

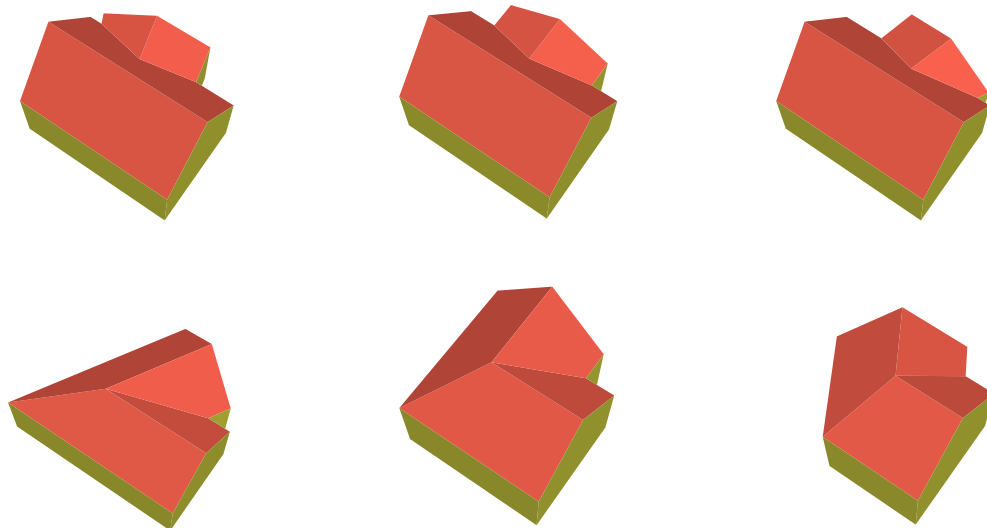


Abbildung 7.2: Zwei Gebäudeteilprimitive mit parametrisiertem Winkel im Grundriß. Oben ist ein T-Konnektor mit den Winkeln -15° , 0° und $+15^\circ$ dargestellt. Darunter ein L-Konnektor mit den Winkeln -30° , 0° und $+30^\circ$.

7.4.1 Primitive mit variablem Grundriß

Bisher sind die Winkel zwischen Kanten bzw. Flächen in den Grundrissen der einzelnen Gebäudeteilprimitive fest und betragen $+90^\circ$ oder -90° . Es gibt allerdings Häuser in denen davon abweichende Winkel auftreten. Zum Beispiel weicht der hintere Trakt des in Abbildung 7.1 dargestellten Hauses ND4 (benannt nach der Adresse) vom rechten Winkel um 10° ab. Es ist zwar möglich, statt einzelner Konnektoren, ganze Familien von Konnektoren in die Datenbasis der Gebäudeteilprimitive aufzunehmen, die jeweils einen ganzen Bereich unterschiedlicher Winkel abdecken. Das widerspricht aber der Forderung nach einer möglichst kleinen Datenbasis und würde auch zu einer stark erhöhten Laufzeit der Hypothesenkonstruktion führen.

Ein besserer Weg ist dagegen die Aufnahme solcher Winkel direkt in die Parametrisierung der Gebäudeteilprimitive. Abbildung 7.2 zeigt dies für zwei Konnektoren. In der oberen Reihe ist ein Konnektor mit T-förmigem Grundriß (in der mittleren Ausgangsform) mit den Winkeln -15° , 0° und $+15^\circ$ dargestellt. Darunter ist ein Konnektor mit L-förmigem Grundriß mit den Winkeln -30° , 0° und $+30^\circ$ zu sehen. Der T-förmige Konnektor wurde verwendet um (manuell) das Haus ND4 zu rekonstruieren (linke Seite in Abb. 7.1).

Für die Integration in die Hypothesenkonstruktion muß nur der Algorithmus des kombinatorischen Verfahrens angepaßt werden. Die Operationen zur Indizierung, Unifizierung, Aggregation und Prädiktion können unmodifiziert übernommen werden (die Aggregation wurde schon praktisch verwendet um das Modell von Haus ND4 zu erstellen). Auch der Algorithmus des direkten Verfahrens bedarf keiner großen Änderungen. Allein das kombinatorische Verfahren muß adaptiert werden. Da keine Parameterschätzungen für Zwischenergebnisse durchgeführt werden, ist die Orientierung eines mit einem Winkel parametrisierten Traktes gegenüber dem lokalen Koordinatensystem eines gegebenen Aggregats unbekannt. Damit hat der Algorithmus auch keine Kenntnis über die Orientierung der in dem Trakt enthaltenen Fügeflächen und kann das Aggregat über diese folglich auch nicht korrekt aggregieren.

7.4.2 Verfeinerung der Hypothesen

Die Komponentenmodellierung und die Parametrisierung der Komponenten erlaubt eine hohe Flexibilität bei der Modellierung der grundsätzlichen Form von Gebäuden. Für die Repräsentierung von zusätzlichen Details wie Schornsteinen, Dachgauben oder Unregelmäßigkeiten in der Dachform ist eine Nachbearbeitung der erstellten Hypothesen nötig.

So ist es denkbar, durch weitere, über die Aggregation hinausgehende CSG-Operationen, Details zu den Hypothesen hinzuzufügen oder zu entfernen. Abbildung 7.3 zeigt, wie durch Bildung des CSG-Durchschnitts mit einer Halbebene die Ecke des Modells von Haus H3 entfernt werden kann, die nicht im Gebäude enthalten ist.

Für den Einsatz der CSG-Operationen ist das Problem zu lösen, das durch die Parametrisierung der Hypothesen entsteht. Hier muß untersucht werden, ob es reicht, wenn die CSG-Operationen nach dem Sampling des Parameterraums der freien Parameter ausgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt, könnten alle Parameter durch feste Werte substituiert werden.

7.4.3 Kanten- und Flächenbeobachtungen

Als letzter Punkt sei die Frage nach der Integration der Beobachtungen von Kanten und Flächen, anstatt nur von Ecken, erwähnt.

Aus Kantenbeobachtungen und den Randpolygonen von Flächenbeobachtungen könnten Informationen über die Verbindungstopologie zwischen den Modellecken abgeleitet werden. Außerdem könnten damit Details der Dachumrandungen rekonstruiert werden.

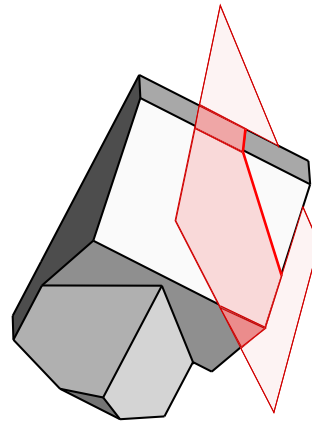


Abbildung 7.3: Um die Ecke zu entfernen, die zwar im Modell, nicht aber im Luftbild enthalten ist, kann eine CSG-Operation zum Einsatz kommen, die den Durchschnitt (bzw. Differenz) mit einem Halbraum bildet.

Flächenbeobachtungen könnten direkte Werte für deren Normalenvektoren liefern. Wenn so die Dachneigung bekannt wäre, könnten daraus fehlende Kanten zwischen benachbarten Dachflächen als Schnittkanten der entsprechenden Ebenen berechnet werden.

Anhang A

Grammatik von symbolischen Ausdrücken

Ausdrücke (expression) und Relationen (relation) werden durch folgende Grammatik definiert:

```
expression
:   sum
  |   '(' expression ')'
  |   function_name '(' expression ')'
;

relation
:   expression relation_operator expression
;

function_name
:   'arctan'
  |   'cos'
  |   'cot'
  |   'sin'
  |   'sqrt'
  |   'tan'
;

sum
:   product ( ( '+' | '-' ) product )*
;

product
:   power ( ( '*' | '/' ) power )*
;

power
:   negation '^' power
  |   negation
;

negation
:   '-' atom
  |   atom
;

atom
```

```
: numerical_constant
| symbolic_constant
| parameter_name
;

symbolic_constant
: 'PI'
| 'E'
;

relation_operator
: '<='
| '<'
| '>='
| '>'
| '!='
| '='
;
```

Dabei ist `numerical_constant` ein `integer-literal` oder `float-literal` aus der C++ Sprachspezifikation und `parameter_name` ein `identifizier` C++ Sprachspezifikation (siehe Stroustrup (1997), Anhang A).

Anhang B

Umwandlung von Constraints in Gleichungen

Constraints sind meist durch Ungleichungen definiert. Damit sie dennoch in das Gleichungssystem einer Parameterschätzung aufgenommen werden können, müssen sie in Gleichungen umgewandelt werden. Das wird erreicht, indem eine Ungleichung bei Einführung einer zusätzlichen Hilfsvariable in eine Gleichung umgewandelt wird, die genau mit den Parameterbelegungen lösbar ist unter denen die Ungleichung gilt.

Auch Constraints, die durch Gleichungen dargestellt werden, werden umgewandelt. Die Gleichungen, die in das Gleichungssystem der Parameterschätzung aufgenommen werden, haben auf der rechten Seite einen konstanten Wert der entsprechende Beobachtung. Eine Gleichung, die einen Constraint darstellt, hat auf der rechten Seite im allgemeinen aber auch einen parametrisierten Ausdruck und muß daher umgewandelt werden.

Abhängig vom Relationsoperator eines Constraints wird eine der folgenden Regeln zur Transformation angewendet:

$$\begin{aligned} a \leq b &\mapsto a - b + h^2 = 0, & h = \sqrt{b - a} &\quad \vee \quad h = 1 \\ a < b &\mapsto (a - b) * h^2 + c = 0, & h = \sqrt{c / (b - a)} &\quad \vee \quad h = c \\ a \geq b &\mapsto a - b - h^2 = 0, & h = \sqrt{a - b} &\quad \vee \quad h = 1 \\ a > b &\mapsto (a - b) * h^2 - c = 0, & h = \sqrt{c / (a - b)} &\quad \vee \quad h = -c \\ a \neq b &\mapsto (a - b) * h - c = 0, & h = c / (a - b) &\quad \vee \quad h = c \\ a = b &\mapsto a - b = 0, \end{aligned}$$

wobei h die neu einzuführende Hilfsvariable und c eine frei wählbare positive Konstante bezeichnet. Im rechten Teil der Tabelle stehen die Werte, mit denen die Hilfsvariablen initialisiert werden falls die Ungleichung mit der aktuellen Parameterbelegung erfüllt sind, bzw. nicht erfüllt sind.

Anhang C

Goodness of fit

C.1 Gamma-Verteilung

Die Dichtefunktion der Gammaverteilung lautet

$$f(x|\alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} & \text{für } x \geq 0, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

und ihre Verteilungsfunktion ist die unvollständige Gammafunktion

$$\gamma(x|\alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} dt,$$

wobei die Gammafunktion $\Gamma(x): (0, \infty) \rightarrow [0, \infty]$ definiert ist durch

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \quad \text{für } x > 0$$

mit der Vereinbarung, daß

$$\gamma(x, a) = \int_0^a t^{x-1} e^{-t} dt \quad \text{und} \quad \Gamma(x, a) = \int_a^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \quad \text{für } x > 0.$$

Durch die Eigenschaft

$$\Gamma(x) = (x-1) \cdot \Gamma(x-1)$$

ist sie damit die Verallgemeinerung der Fakultätsfunktion

$$\Gamma(n) = (n-1)!$$

für ganzzahlige Werte n . An der Stelle $x = 1/2$ nimmt die Gammafunktion z. B. den Wert $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$ an.

C.2 χ^2 -Verteilung

Wenn X eine Zufallsvariable mit Standard-Normalverteilung $N(0, 1)$ ist, dann ist die Dichtefunktion von X^2 gegeben durch

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} x^{-\frac{1}{2}} e^{-x/2} & \text{für } x > 0, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sie ist damit ein Spezialfall der Dichtefunktion der Gammaverteilung mit den Parametern $\alpha = \frac{1}{2}$ und $\beta = 2$.

Wenn n Zufallsvariable X_1, \dots, X_n statistisch unabhängig sind und alle X_i gammaverteilt ist mit den Parametern α_i und β , dann ist die Zufallsvariable $X_1 + \dots + X_n$ gammaverteilt mit den Parametern $\alpha_1 + \dots + \alpha_n$ und β .

Eine Zufallsvariable heißt χ_n^2 -verteilt mit n Freiheitsgraden, wenn sie Gamma-verteilt ist mit den Parametern $\alpha = n/2$ und $\beta = 2$.

Wenn also die Zufallsvariablen X_1, \dots, X_n unabhängig und $N(0,1)$ -normalverteilt sind, dann sind X_1^2, \dots, X_n^2 unabhängig und Gamma-verteilt mit $\alpha = \frac{1}{2}$ und $\beta = 2$ und $X_1^2 + \dots + X_n^2$ ist Gamma-verteilt mit $\alpha = \frac{n}{2}$ und $\beta = 2$ und also χ^2 -verteilt mit n Freiheitsgraden. Die Dichtefunktion der χ_n^2 -Verteilung hat damit die Form

$$f(x|n) = \frac{1}{2^{n/2}\Gamma(n/2)} x^{n/2-1} e^{-x/2} \quad \text{für } x > 0.$$

Die χ^2 -Verteilung hat einen Erwartungswert von n und eine Standardabweichung von $\sqrt{2n}$. Sie wird asymptotisch für große n normalverteilt.

C.3 χ^2 -Schätzung

Wenn die Standardabweichung σ_i für jede von N Beobachtungen bekannt ist, kann die Maximum-Likelihood-Schätzung der M Parameter a_1, \dots, a_M durch Minimierung von

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - y(x_i; a_1, \dots, a_M)}{\sigma_i} \right)^2$$

berechnet werden. Es ist also χ^2 eine Summe von N Quadraten von normalverteilten Größen, normiert auf Einheitsvarianz. Wenn die Parameter durch Minimierung von χ^2 festgelegt sind, sind die Terme der Summe nicht mehr alle statistisch unabhängig. Bei linearer Abhängigkeit der Modelle von den Parametern kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung von χ^2 bei ihrem Minimum trotzdem analytisch abgeleitet werden und ist die χ^2 -Verteilung mit $N - M$ Freiheitsgraden. Es wird oft angenommen, daß die χ^2 -Verteilung gilt, auch wenn die Modelle nicht strikt linear in den Parametern sind.

C.4 Goodness Of Fit

$P(\chi^2|v)$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein beobachteter chi-Quadrat Wert kleiner als ein gegebenes χ^2 ist. Das Komplement $Q(\chi^2|v)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß ein beobachteter Wert per Zufall größer als ein gegebenes χ^2 wird, obwohl es sich um das richtige Modell handelt.

Diese beiden Wahrscheinlichkeiten lassen sich durch die unvollständige Gamma-Funktion ausdrücken:

$$P(a, x) \equiv \frac{\gamma(a, x)}{\Gamma(a)} \equiv \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt \quad \text{für } a > 0 \quad \text{und}$$

$$Q(a, x) \equiv 1 - P(a, x) \equiv \frac{\Gamma(a, x)}{\Gamma(a)} \equiv \frac{1}{\Gamma(a)} \int_x^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \quad \text{für } a > 0.$$

Es gilt also $P(a, x) = F(x|a, 1)$ und

$$P(\chi^2|v) = P\left(\frac{\nu}{2}, \frac{\chi^2}{2}\right) \quad \text{und}$$

$$Q(\chi^2|v) = Q\left(\frac{\nu}{2}, \frac{\chi^2}{2}\right),$$

mit $\nu = N - M$ der Anzahl der Freiheitsgrade.

Literatur: Pestman (1998), Press, Teukolsky, Vetterling und Flannery (1992) und Viertl (1990).

Anhang D

Projektion

Der folgende kurze Überblick über die in dieser Arbeit verwendete perspektivische Projektion orientiert sich an Foley, van Dam, Feiner und Hughes (1990), Abschnitt 6.5.2. Der Projektionsvorgang wurde vereinfacht, indem nur die Schritte angegeben werden, die für die folgenden Betrachtungen wichtig sind.

1. Translation des Bildmittelpunktes (*view refrence point*, VRP) in den Ursprung mit

$$T_{\text{-VRP}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{\text{VRP}} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{\text{VRP}} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{\text{VRP}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

2. Wechsel des Koordinatensystems vom Weltkoordinatensystem in das Kamerakoordinatensystem mit

$$R_{\text{WK}} = \begin{pmatrix} x_{\text{XK}} & y_{\text{XK}} & z_{\text{XK}} & 0 \\ x_{\text{YK}} & y_{\text{YK}} & z_{\text{YK}} & 0 \\ x_{\text{ZK}} & y_{\text{ZK}} & z_{\text{ZK}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

mit den Koordinatenachsen des Kamerakoordinatensystems XK, YK und ZK kodiert im Weltkoordinatensystem. Dabei wird die Orientierung so gewählt, daß XK horizontal liegt und ZK entlang der Bildnormalen (*view plane normal*, VPN) ausgerichtet wird. Die Bildnormale wird als negative Blickrichtung gewählt.

3. Translation des Projektionszentrums (*center of projection*, COP) in den Ursprung. Das Projektionszentrum ist gegeben durch den im Kamerakoordinatensystem relativ zum Bildmittelpunkt definierten Referenzpunkt der Projektion (*projection reference point*, PRP) der die Form $(0, 0, d)^T$ hat, wobei d die Brennweite ist. Die entsprechende Matrix ist

$$T_{\text{-PRP}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{\text{PRP}} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{\text{PRP}} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{\text{PRP}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

4. Projektion durch die Matrix

$$M_{\text{per}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Insgesamt ergibt sich also folgende Transformation:

$$\begin{aligned}
 P &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{XK} & y_{XK} & z_{XK} & 0 \\ x_{YK} & y_{YK} & z_{YK} & 0 \\ x_{ZK} & y_{ZK} & z_{ZK} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{VRP} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{VRP} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{VRP} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} x_{XK} & y_{XK} & z_{XK} & -x_{VRP}x_{XK} - y_{VRP}y_{XK} - z_{VRP}z_{XK} \\ x_{YK} & y_{YK} & z_{YK} & -x_{VRP}x_{YK} - y_{VRP}y_{YK} - z_{VRP}z_{YK} \\ x_{ZK} & y_{ZK} & z_{ZK} & -x_{VRP}x_{ZK} - y_{VRP}y_{ZK} - z_{VRP}z_{ZK} - d \\ -x_{ZK} & -y_{ZK} & -z_{ZK} & +x_{VRP}x_{ZK} + y_{VRP}y_{ZK} + z_{VRP}z_{ZK} + d \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Ein Punkt $(x, y, z, 1)^T$ der mit P auf $(x', y', z', w)^T$ abgebildet wird, wird durch die Division und Selektion der x - und y -Koordinaten in Bildkoordinaten $(u, v)^T$ überführt:

$$\begin{aligned}
 \Pi: \mathbb{R}^3 &\rightarrow \mathbb{R}^2, \quad \Pi(x, y, z) \mapsto (u, v) \\
 \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} &= \frac{1}{w} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ w \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Literatur

- AUMANN, GÜNTER UND KLAUS SPITZMÜLLER (1993). *Computerorientierte Geometrie*. Nummer 89 in Reihe Informatik. BI-Wissenschaftsverlag.
- BALTSAVIAS, EMMANUEL, SCOTT MASON UND DIRK STALLMANN (1995). *Use of DTMs/DSMs and Orthoimages to Support Building Extraction*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 199–210.
- BIEDERMAN, IRVING (1987). *Recognition-by-Components: A Theory of Human Image Understanding*. *Psychological Review* 94(2), 115–147.
- BIGNONE, FRANK, OLOF HENRICSSON, PASCAL FUA UND MARKUS STRICKER (1996). *Automatic Extraction of Generic House Roofs from High Resolution Aerial Imagery*. In B. Buxton und R. Cipolla (Herausgeber): *Computer Vision-ECCV '96*, Band 1064 der Reihe LNCS, Seiten 85–96.
- BOWYER, KEVIN W. UND CHARLES R. DYER (1990). *Aspect Graphs: An Introduction and Survey of Recent Results*. *International Journal of Imaging Systems and Technology* 2, 315–328.
- BRAUN, C. (1994). *Interpretation von Einzelbildern zur Gebäudeerfassung*. Doktorarbeit, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn.
- BRAUN, C., T. H. KOLBE, F. LANG, W. SCHICKLER, V. STEINHAGE, A. B. CREMERS, W. FÖRSTNER UND L. PLÜMER (1995). *Models for Photogrammetric Building Reconstruction*. *Computers and Graphics* 19(1), 109–118.
- COLLINS, ROBERT T., ALLEN R. HANSON, EDWARD M. RISEMAN UND HOWARD SCHULTZ (1995). *Automatic Extraction of Buildings and Terrain from Aerial Images*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 169–178.
- DICKINSON, SVEN J., ALEX P. PENTLAND UND AZRIEL ROSENFELD (1992a, Februar). *3-D Shape Recovery Using Distributed Aspect Matching*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14(2), 174–198.
- DICKINSON, SVEN J., ALEX P. PENTLAND UND AZRIEL ROSENFELD (1992b, März). *From Volumes to Views: An Approach to 3-D Object Recognition*. *CVGIP: Image Understanding* 55(2), 130–154.
- ENGLERT, ROMAN (1999). *Acquisition of Complex Model Knowledge by Domain Theory-Controlled Generalization*. *Computing* 62, 369–385.
- FAUGERAS, OLIVIER, STÉPHANE LAVEAU, LUC ROBERT, GABRIELLA CSURKA UND CYRIL ZELLER (1995). *3-D Reconstruction of Urban Scenes from Sequences of Images*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 145–168.
- FAUGERAS, OLIVER, JOE MUNDY, NARENDRA AHUJA, CHARLES DYER, ALEX PENTLAND, RAMESH JAIN UND KATSUSHI IKEUCHI (1992, März). *Why Aspect Graphs Are Not (Yet) Practical for Computer Vision*. *CVGIP: Image Understanding* 55(2), 212–218.
- FISCHER, ANDRÉ (1996). *Zur analytischen Herleitung von Aspektgraphen*. Diplomarbeit. Institut für Informatik I, Universität Bonn.
- FISCHER, ANDRÉ, THOMAS H. KOLBE UND FELICITAS LANG (1997). *Reasoning for Building Reconstruction Using a Generic Hierarchical Model*. In W. Förstner und L. Plümer (Herausgeber): *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Seiten 159–180. Birkhäuser Verlag, Basel.
- FISCHER, ANDRÉ, THOMAS H. KOLBE UND FELICITAS LANG (1999). *On the Use of Geometric and Semantic Models for Component-Based Building Reconstruction*. In W. Förstner, C.-E. Liedtke und J. Bückner (Herausgeber): *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Seiten 101–119.

- FISCHER, ANDRÉ, THOMAS H. KOLBE, FELICITAS LANG, ARMIN B. CREMERS, WOLFGANG FÖRSTNER, LUTZ PLÜMER UND VOLKER STEINHAGE (1998, November). *Extracting Buildings from Aerial Images Using Hierarchical Aggregation in 2D and 3D*. CVIU 72(2), 185–203.
- FISCHER, ANDRÉ UND VOLKER STEINHAGE (1997). *On the Computation of Visual Events in Aspect Graph Generation*. In *Mustererkennung 1997, 19. DAGM-Symposium, Braunschweig*.
- FOLEY, JAMES D., ANDRIES VAN DAM, STEVEN K. FEINER UND JOHN F. HUGHES (1990). *Computer graphics: principles and practice*, 2. Auflage. Addison-Wesley.
- FÖRSTNER, WOLFGANG (1994). *A Framework for Low Level Feature Extraction*. In J.-O. Eklundh (Herausgeber): *Computer Vision, ECCV '94, Vol. II*, Nummer 801 in Lecture Notes in Computer Science, Seiten 383–394. Springer-Verlag.
- FÖRSTNER, WOLFGANG (1995). *Mid-Level Vision Process for Automatic Building Extraction*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 179–188.
- FÖRSTNER, WOLFGANG (1999). *Semantic Modeling and Extraction of Spatial Objects from Images and Maps*. In W. Förstner, C.-E. Liedtke und J. Bückner (Herausgeber): *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Seiten 3–8.
- FUA, PASCAL UND ANDREW J. HANSON (1987). *Using Generic Geometric Models for Intelligent Shape Extraction*. In *Proceedings AAAI-87 Sixth National Conference on Artificial Intelligence*, Seiten 706–711. AAAI Press.
- FUA, PASCAL UND ANDREW J. HANSON (1991). *An Optimization Framework for Feature Extraction*. *Machine Vision and Applications* 4, 59–87.
- Grün, Armin, Emmanuel P. Baltsavias und Olof Henricsson (Herausgeber) (1997). *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*. Birkhäuser.
- Grün, Armin, Olaf Kübler und Peggy Agouris (Herausgeber) (1995). *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*. Birkhäuser.
- HAALA, NORBERT UND CLAUS BRENNER (1997). *Interpretation of Urban Surface Models using 2D Building Information*. Siehe Grün et al. (1997), Seiten 213–222.
- HAALA, NORBERT, CLAUS BRENNER UND KARL-HEINRICH ANDERS (1998). *3D Urban GIS From Laser Altimeter and 2D Map Data*. In T. Schenk und A. Habib (Herausgeber): *ISPRS, Commission III Symposium on Object Recognition and Scene Classification from Multispektral and Multisensor Pixels*, Columbus, Ohio, Seiten 339–346.
- HAALA, NORBERT UND MICHAEL HAHN (1995). *Data Fusion for the Detection and Reconstruction of Buildings*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 211–220.
- HARTLEY, RICHARD UND ANDREW ZISSERMAN (2000). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- HENRICSSON, OLOF UND EMMANUEL BALTSAVIAS (1997). *3-D Building Reconstruction with ARUBA: A Qualitative and Quantitative Evaluation*. Siehe Grün et al. (1997), Seiten 65–75.
- HOPCROFT, JOHN E. UND JEFFREY D. ULLMAN (1990). *Einführung in die Automatentheorie, Formale Sprachen und Komplexitätstheorie*, 2. Auflage. Addison-Wesley.
- HUERTAS, ANDRES UND RAMAKANT NEVATIA (1988). *Detecting Buildings in Aerial Images*. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 41, 131–152.
- JAMET, OLIVIER, OLIVIER DISSARD UND SYLVAIN AIRAULT (1995). *Building Extraction from Stereo Pairs of Aerial Images: Accuracy and Productivity Constraint of a Topographic Production Line*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 231–240.
- JAYNES, CHRISTOPHER, ALLEN HANSON UND EDWARD RISEMAN (1997). *Building Reconstruction from Optical and Range Images*. Siehe Grün et al. (1997).
- KIM, TAEJUNG UND JAN-PETER MULLER (1995). *Building Extraction and Verification from Spaceborne and Aerial Imagery using Image Understanding Fusion Techniques*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 221–230.
- KOENDERINK, J. J. UND A. J. VAN DOORN (1979). *The Internal Representation of Solid Shape with Respect to Vision*. *Biological Cybernetics* 32, 211–216.

- KOLBE, THOMAS H. (1999). *Identifikation und Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern mittels unscharfer Constraints*. Doktorarbeit, Universität Bonn.
- LANG, FELICITAS (1999). *Geometrische und semantische Rekonstruktion von Gebäuden durch Ableitung von 3D-Gebäudeecken*. Doktorarbeit, Universität Bonn.
- LANG, FELICITAS, THOMAS LÖCHERBACH UND WOLFGANG SCHICKLER (1995, June). *A One-Eye Stereo System for Semi-Automatic 3D-Building Extraction*. *Geomatics Info Magazine* 9(6).
- LIN, CHUNGAN, ANDRES HUERTAS UND RAMAKANT NEVATIA (1995). *Detection of Buildings from Monocular Images*. Siehe Grün et al. (1995), Seiten 125–134.
- McKEOWN, DAVID M. (1990). *Toward Automatic Cartographic Feature Extraction*. In L. F. Pau (Herausgeber): *Mapping and Spatial Modeling for Navigation*, Band F 65 der Reihe *NATO ASI*, Seiten 149–180. Springer-Verlag.
- MOHAN, RAKESH UND RAMAKANT NEVATIA (1988). *Perceptual Grouping for the Detection and Description of Structures in Aerial Images*. In *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, Seiten 512–526.
- MOONS, THEO, DAVID FRÈRE, JAN VANDEKERCKHOVE UND LUC VAN GOOL (1998). *Automatic Modelling and 3D Reconstruction of Urban House Roofs from High Resolution Aerial Imagery*. In *Proc. ECCV*, Seiten 410–425.
- PESTMAN, WIEBE R. (1998). *Mathematical Statistics*. De Gruyter, Berlin.
- PRESS, WILLIAM H., SAUL A. TEUKOLSKY, WILLIAM T. VETTERLING UND BRIAN P. FLANNERY (1992). *Numerical Recipes in C*, 2. Auflage. Cambridge University Press.
- RISSANEN, J. (1987). *Minimum-Description-Length Principle*. *Encyclopedia of Statistical Sciences* 5, 523–527.
- ROUX, MICHEL UND DAVID M. McKEOWN (1994). *Feature Matching for Building Extraction from Multiple Views*. In *Proceedings Computer Vision and Pattern Recognition*, Seiten 46–53.
- SHUFELT, JEFFEREY. A. (1996). *Exploiting Photogrammetric Methods for Building Extraction in Aerial Images*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 31, 74–79.
- STEINHAGE, VOLKER (1999). *Zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern*. Doktorarbeit, Institut für Informatik III, Universität Bonn.
- STROUSTRUP, BJARNE (1997). *The C++ Programming Language*, 3. Auflage. Addison-Wesley.
- VIERTL, REINHARD (1990). *Einführung in die Stochastik*. Springer.
- WANG, RUYE UND HERBERT FREEMAN (1990). *The Use of Characteristic-View Classes for 3D Object Recognition*. In H. Freeman (Herausgeber): *Machine Vision for Three-Dimensional Scenes*, Seiten 109–161. Academic Press, Boston.
- WEIDNER, UWE UND WOLFGANG FÖRSTNER (1995). *Towards Automatic Building Extraction from High Resolution Digital Elevation Models*. *ISPRS Journal* 50(4), 38–49.

Glossar

Aggregation (3.2, S. 45) Operation, die zwei Gebäudeaggregate a_1 und a_2 über kompatible Fügeflächen miteinander verbindet (aggregiert). Das resultierende Gebäudeaggregat enthält alle Eckenbeobachtungen von a_1 und a_2 .

Aspektgraphen (4.1.1, S. 77) Ein Aspektgraph ist eine betrachterzentrierte Modellierung eines Gebäudeaggregats.

Eckenbeobachtung Rekonstruierte Gebäudeecke. Sie wird durch einen Eckpunkt und mehrere, von diesem Eckpunkt ausgehende, Kanten beschrieben.

Fügefläche Fläche eines offenen Gebäudeaggregats, die eine Aggregation mit einem anderen Gebäudeaggregat erlaubt, das eine kompatible Fügefläche hat (Definition 2.3 auf Seite 25).

Gebäudeaggregat Entweder ein instanziiertes Gebäudeprimitiv oder ein Aggregat aus zwei oder mehr Gebäudeprimitiven. Kann geschlossen oder offen sein (Definition 2.2.3 auf Seite 22).

offenes~ Gebäudeaggregat, das mindestens eine Fügefläche hat.

geschlossenes~ Gebäudeaggregat, das keine Fügefläche hat. Synonym Gebäudehypothese.

primitives~ Instanz eines Gebäudeprimitiv (Definition 2.2.3 auf Seite 22).

zusammengesetztes~ Ein Gebäudeaggregat, daß durch Aggregation von zwei oder mehr Gebäudeprimitiven entstanden ist. (Definition 2.2.3 auf Seite 22).

Gebäudehypothese Ein geschlossenes Gebäudeaggregat. Um geschlossen zu sein muß sie mindestens aus zwei Gebäudeteilen bestehen (Definition 2.5.2 auf Seite 34).

Gebäudeprimitiv Atomarer Bestandteil der Gebäudemodellierung. Wird durch Instanziierung zum Gebäudeaggregat(-teil) (Definition 2.2.2 auf Seite 21).

Gebäudeteil Ein im allgemeinen offenes Gebäudeaggregat.

Indizierung (3.2, S. 45) Operation die für eine gegebene Eckenbeobachtung ein Gebäudeprimitiv instanziiert und dessen Form- und Lageparameter so setzt, daß das resultierende Gebäudeaggregat optimal zur Eckenbeobachtung paßt.

Prädiktion (3.2, S. 45) Operation, die ein primitives Gebäudeaggregat prädiziert, das die Aggregation von zwei existierenden Gebäudeaggregaten erlaubt, die nicht anderweitig miteinander verbunden werden können.

Unifizierung (3.2, S. 45) Operation, die zwei Gebäudeaggregate a_1 und a_2 , die Instanzierungen des gleichen Gebäudeprimitivs sind, zu einem einzelnen Gebäudeaggregat verschmilzt. Dieses enthält alle Eckenbeobachtungen von a_1 und a_2 .