



FORSCHUNGSINSTITUT FÜR
INFORMATIONSVERRARBEITUNG
UND MUSTERERKENNUNG

und

INSTITUT FÜR
PHOTOGRAMMETRIE UND FERNERKUNDUNG
UNIVERSITÄT KARLSRUHE



**Analyse von Luft- und Satellitenbildern
zur automatischen Ermittlung der Bodenversiegelung
städtischer Siedlungsbereiche (III)**

U. Stilla, R. Geibel (FIM)
F. Quint, M. Sties (IPF)

Technischer Anhang zum
Abschlußbericht

DFG-Vorhaben : Ka 414/9 und Ba 686/7
Berichtszeitraum : 01.01.95 - 31.03.98

Ettlingen - 1998

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Inhaltsverzeichnis | i |
| Verzeichnis der Abbildungen | iv |
| Projekt-Zusammenfassung | vii |
| Kurzfassung dieses Abschlußberichts | ix |
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Objektmodelle zur Bildanalyse | 5 |
| 2.1 Konzeptionelle Ebene | 5 |
| 2.1.1 Modellkomponenten | 6 |
| 2.1.2 Strukturen und Hierarchien | 6 |
| 2.1.3 Grad der Spezialisierung | 7 |
| 2.2 Repräsentationsebene | 8 |
| 2.2.1 Repräsentation durch Produktionsregeln und Produktionsetz | 10 |
| 2.2.2 Repräsentation durch ein semantisches Netz | 14 |
| 2.2.3 Diskussion zur Modellrepräsentation | 16 |
| 2.3 Implementierungsebene | 18 |
| 2.3.1 Implementierung des Produktionsnetzes | 18 |
| 2.3.2 Implementierung des semantischen Netzes | 20 |
| 3. Analyse von Gebäuden und Straßen | 22 |
| 3.1 Bildanalyse | 22 |
| 3.1.1 Binokulare Stereorekonstruktion | 23 |
| 3.1.2 Multiokulare Stereorekonstruktion | 30 |
| 3.1.3 Einbeziehung von Umgebungsstrukturen | 33 |
| 3.1.4 Komplexe Gebäudestrukturen in monokularen Senkrechtsansichten | 37 |
| 3.1.5 Komplexe Gebäudestrukturen in monokularen Schrägsichten | 41 |
| 3.2 Kartenanalyse | 44 |
| 3.2.1 Generisches Gebäudemodell | 44 |
| 3.2.2 Parametrisches Gebäudemodell | 47 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.3 | Verifikation | 50 |
| 3.3.1 | Vergleich zwischen Objektmerkmalen | 50 |
| 3.3.2 | Vergleich zwischen symbolischen Formbeschreibungen | 50 |
| 3.3.3 | Generalisierung symbolischer Formbeschreibungen | 52 |
| 3.4 | Verfahrensprüfung | 55 |
| 3.4.1 | Verfahrensprüfung mit Bilddaten synthetischer Objekte | 55 |
| 3.4.2 | Verfahrensprüfung mit Bilddaten von Modellobjekten | 57 |
| 3.4.3 | Verfahrensprüfung mit Bilddaten realer Objekte | 58 |
| 4. | Analyse flächenhaft ausgedehnter Objekte | 61 |
| 4.1 | Objektmodelle | 61 |
| 4.1.1 | Szenenmodell | 62 |
| 4.1.2 | Bildbereichsmodell und Kartenbereichsmodell | 62 |
| 4.1.3 | Spezifisches Modell | 63 |
| 4.2 | Prozeßmodell | 63 |
| 4.2.1 | Die Strategie zur Luftbildauswertung | 63 |
| 4.2.2 | Das Verfahren zur Wissensnutzung | 70 |
| 4.3 | Bewertungen | 80 |
| 4.3.1 | Vertrauensmaße vs. Wahrscheinlichkeiten | 80 |
| 4.3.2 | Bayessche Theorie und Dempster–Shafer–Theorie | 82 |
| 4.3.3 | Fortpflanzung von Vertrauensmaßen | 87 |
| 4.3.4 | Bewertung der Instanzen | 92 |
| 4.3.5 | Bewertung der Analysezustände | 99 |
| 4.4 | Ergebnisse | 101 |
| 4.4.1 | Erweiterung der Objektbeschreibung | 101 |
| 4.4.2 | Erkennung neuer Objekte | 105 |
| 5. | Fusion der Analyseergebnisse | 111 |
| 6. | Zuordnung der Bodenversiegelung | 112 |
| 6.1 | Zuordnung auf Basis der Objekterkennung | 112 |
| 6.2 | Zuordnung mit anderen Verfahren | 114 |
| 6.3 | Schlußfolgerung | 117 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 7. Ausblick | 118 |
| Literaturverzeichnis | 121 |

Verzeichnis der Abbildungen

| | | |
|------|---|----|
| 1-1 | Multispektralanalyse | 2 |
| 1-2 | Ablauf der kartengestützten Bildanalyse | 4 |
| 2-1 | Graphische Darstellung von Wissen | 11 |
| 2-2 | Graphische Repräsentation verschiedener Arten von Produktionen | 12 |
| 2-3 | Tabelle der Produktionen und Produktionsnetz | 13 |
| 2-4 | Beispiel für ein semantisches Netz | 14 |
| 2-5 | Produktion zur Winkelbildung | 18 |
| 3-1 | Stereoskopische Aufnahme eines Gebäudes | 24 |
| 3-2 | Spezifische Modelle (parametrische und formfeste Modelle) | 24 |
| 3-3 | Produktionsnetz DACH und Ableitungsgraph einer Instanz | 25 |
| 3-4 | Stereorekonstruktion von Punkten | 26 |
| 3-5 | Verarbeitungsschritte zur Linienextraktion (Dachanalyse) | 27 |
| 3-6 | Zwischenergebnisse und Teil des Ableitungsgraphen (Dachanalyse) | 29 |
| 3-7 | Kantendetektion in verschiedenen Ansichten | 30 |
| 3-8 | Verschiedene Ansichten eines Hochhauses | 30 |
| 3-9 | Produktionsnetz zum Konzept BUILDING | 31 |
| 3-10 | Siedlungsstruktur im Luftbild | 33 |
| 3-11 | Produktionsnetz HOUSE_ROW | 34 |
| 3-12 | Stereorekonstruktion von Linien | 35 |
| 3-13 | Beispiel für die Analyse mit dem Produktionsnetz HOUSE_ROW | 36 |
| 3-14 | Verschiedene Luftbilder | 37 |
| 3-15 | Produktionsnetze B_UCO_Cav, B_UCO_Vex, B_RECT und B_UAA | 38 |
| 3-16 | Zwischenergebnisse der Analyse (Vertikale Ansicht) | 40 |
| 3-17 | Luftbild (Schrägsichten) | 41 |
| 3-18 | Horizontale rechte Winkel in Schrägsicht | 42 |
| 3-19 | Zwischenergebnisse (Schrägsicht) | 43 |
| 3-20 | Produktionsnetz Complex_Building | 45 |
| 3-21 | Kartenanalyse Complex_Building | 46 |
| 3-22 | Ergebnis der Kartenanalyse | 47 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3-23 | Generische Konturanalyse | 48 |
| 3-24 | Kartenanalyse mit parametrischem Modell | 48 |
| 3-25 | Topographische Karten in unterschiedlichen Maßstäben | 51 |
| 3-26 | Vergleich auf symbolischer Ebene | 51 |
| 3-27 | Vereinfachung von rechtwinkligen Strukturen | 53 |
| 3-28 | Generalisierung der Karte in verschiedenen Skalendimensionen | 53 |
| 3-29 | Generalisierung eines Objektes der Karte | 54 |
| 3-30 | Test bed für das Produktionsnetz DACH | 55 |
| 3-31 | Automatisch generierte Szene mit Objekten HAUS | 56 |
| 3-32 | Aufnahme von Modellobjekten | 57 |
| 3-33 | Modellszene der Stadt Karlsruhe | 58 |
| 3-34 | Testdatensatz FLAT | 59 |
| 3-35 | 3D-Visualisierung der rekonstruierten Gebäude | 59 |
| 4-1 | Modellhierarchie zur Luftbildauswertung | 62 |
| 4-2 | Ablauf der Luftbildauswertung | 64 |
| 4-3 | Bestimmung des Partner-Konzeptes der Instanz <code>m_parkPlace</code> | 65 |
| 4-4 | Algorithmus zur Erstellung des spezifischen Modells | 66 |
| 4-5 | Ausschnitt aus dem automatisch erstellten spezifischen Modell | 68 |
| 4-6 | Luftbild und spezifisches Modell eines Polygons | 71 |
| 4-7 | Typischer Ablauf des Analyseprozesses (Teil 1) | 73 |
| 4-8 | Typischer Ablauf des Analyseprozesses (Teil 2) | 74 |
| 4-9 | Analysezustände | 76 |
| 4-10 | Bewertungsfunktionen für den A^* -Algorithmus | 79 |
| 4-11 | Parameter zur Beschreibung einer Strecke und Lage-Nachbarschafts- funktionen | 94 |
| 4-12 | Modelltreue-Funktion und Verlängerung von Kantensegmenten | 96 |
| 4-13 | Beispiel zur Bewertung von Kantensegmenten | 98 |
| 4-14 | Ergebnis der Bildauswertung | 103 |
| 4-15 | Luftbild und Karteninformation | 106 |
| 4-16 | Ergebnis der Bildauswertung (mit Erkennung neuer Objekte) | 107 |
| 5-1 | Fusion der Analyseergebnisse | 111 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 6-1 | Bestimmung der Bodenversiegelung mittels struktureller Bildauswertung . | 113 |
| 6-2 | Bestimmung der Bodenversiegelung mittels Klassifikation der Rückstreuungseigenschaften von Regionen | 115 |
| 6-3 | Bestimmung der Bodenversiegelung mittels Klassifikation der Rückstreuungseigenschaften von Bildpunkten | 116 |
| 7-1 | Generierung eines Stadtmodells | 119 |
| 7-2 | Erweiterung der Gebäudebeschreibungen | 120 |

Projekt-Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes war es, neue Verfahren zur automatischen modellgestützten Auswertung von Luftbildern zu entwickeln. Für eine Bildstrukturerkennung wird neben der Verwendung von zwei- und dreidimensionalen Objektmodellen zusätzlich Kontextinformation verarbeitet, die aus kartographischen Darstellungen stammt.

Als Anwendungsgebiet wurde die Bestimmung der Bodenversiegelung in städtischen Gebieten gewählt. Bisherige Ansätze zur Bestimmung der Versiegelung aus Luftbildern versuchen, z.B. anhand der sogenannten Vegetationsindices, Aussagen über die Bedeckung der Erdoberfläche mit Vegetation zu machen und daraus auf die Versiegelung zu schließen. Dabei wird dem einzelnen Bildpunkt jedoch keine semantische Bedeutung zugewiesen. Im Gegensatz dazu erfolgt bei dem hier vorgestellten Ansatz die Auswertung der Bilder auf symbolischer Ebene und damit die Versiegelungsaussage auf Objektebene.

Die von den Projektpartnern FIM und IPF vorgeschlagene Vorgehensweise zur kartengestützten Bildanalyse ist zweistufig. Zunächst erfolgt eine Verifikation der aus der Karte bekannten Objekte im Luftbild. In der nachfolgenden Stufe wird eine Klassifikation der nicht bearbeiteten Objekte des Luftbildes vorgenommen.

Als Eingangsdaten dienen großmaßstäbige Farbluftbilder (Pixelgröße ca. 30 cm x 30 cm) und die Deutsche Grundkarte im Maßstab 1:5000. Vor der modellbasierten Analyse werden die ikonischen Bilddaten durch konturorientierte und flächenorientierte Segmentationsverfahren in eine symbolische Form überführt. Die digitale Karte liegt in symbolischer Form vor und wird von beiden Projektpartnern zur Wissensnutzung analysiert und entsprechend aufbereitet.

Die zu analysierenden Objekte werden durch Modelle beschrieben, die festlegen, wie komplexere Teile des Objektes aus einfacheren Teilen zusammengesetzt werden. Während der Analyse findet ein Konstruktionsprozeß statt, der als Suche verstanden wird. Die zu analysierenden Objektklassen wurden zwischen FIM und IPF so aufgeteilt, daß vom FIM vorwiegend Straßen und Gebäude und vom IPF vorwiegend flächenhaft ausgedehnte Objekte wie Parkplätze, Hofflächen usw. analysiert wurden.

Die Modelle für die Analyse von Straßen und Gebäuden werden am FIM durch Produktionsnetze dargestellt. Die strukturelle Analyse erfolgt in der Systemumgebung BPI (Blackboard-based Production System for Image Understanding). Zwischenergebnisse des Suchprozesses werden als Objekte gespeichert.

Die Modelle für die Analyse von flächenhaft ausgedehnten Objekte werden am IPF durch semantische Netze dargestellt. Die strukturelle Analyse erfolgt in der Systemumgebung MOSES (Map Oriented SEmantic Image UnderStanding). Zwischenergebnisse des Suchprozesses werden als Zustände gespeichert.

Die Ergebnisse der von beiden Partnern durchgeführten Analysen sind Graphen, die die analysierte zwei- oder dreidimensional beschriebene Szene darstellen. Zur gegenseitigen Ergänzung können diese Beschreibungsgraphen ausgetauscht und in die Datenbasis des jeweils anderen Projektpartners eingetragen werden. Den durch die Analysen erfaßten Objekten werden nun entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu Objektklassen Versiegelungsgrade zugewiesen.

Für Teile der Szene konnte die Versiegelung zuverlässig bestimmt werden. Für die Teile der Szene, in denen die Objekterkennung versagte, wurde als Ersatz ein Verfahren mit Klassifikation der Regionen verwendet.

Als Ergebnis des Forschungsprojektes kann man festhalten, daß neue Methoden zur modellbasierten strukturellen Bildauswertung entwickelt und erprobt wurden. Die Erkennung von 2D- und 3D-Objekten in großmaßstäbigen Farbluftbildern konnte wesentlich erweitert und verbessert werden. Ein operationell einsetzbares Verfahren ist damit noch nicht verfügbar.

Kurzfassung dieses Abschlußberichts

Der Abschlußbericht beschreibt die Ergebnisse der dritten Projektphase. Es wird Bezug genommen auf die Zwischenberichte [103,108]. Die Schwerpunkte dieses Berichtes liegen einerseits auf der Modellierung von Objekten in Luftbild und Karte und andererseits auf der Nutzung des Kartenwissens in der Bildanalyse.

Die Modellierung wird auf drei unterschiedlichen Abstraktionsebenen betrachtet. Im Rahmen der konzeptionellen Ebene gehen wir auf Eigenschaften und Abgrenzungen der Modelle ein. Auf der Repräsentationsebene wird die Wissensrepräsentation durch Produktionsnetze (FIM) und semantische Netze (IPF) vorgestellt. Auf der Implementierungsebene betrachten wir die Umsetzung der beiden Repräsentationen für eine maschinelle Bildauswertung.

Zur Analyse von Straßen und Gebäuden werden am FIM Produktionsnetze in der Systemumgebung BPI eingesetzt. An einem Beispiel der binokularen Stereorekonstruktion aus Luftbildern werden die Umsetzung eines Gebäudemodells in ein Produktionsnetz, sowie die Zwischenergebnisse auf den einzelnen Stufen der Vorverarbeitung und symbolischen Analyse dargestellt. Erweiterungen der Modellierung werden im Zusammenhang mit der multiokularen Stereorekonstruktion wie auch unter Einbeziehung von Umgebungsstrukturen diskutiert und gezeigt.

Für die Kartenanalyse wird ein zweistufiger Ansatz vorgestellt. Zunächst werden mit einem Produktionsnetz eines generischen Modells die Topologie der Kartenobjekte untersucht und eine hierarchische Objektbeschreibung erstellt. Im Anschluß werden Produktionsnetze parametrischer Modelle verwendet, um geometrische Formbeschreibungen zu gewinnen. Zur Überprüfung der implementierten Produktionsnetze und Bewertung der Verfahren werden drei Testphasen eingeführt.

Die Analyse flächenhaft ausgedehnter Objekte erfolgt am IPF mit dem System MOSES in mehreren Schritten. Zunächst wird mit dem generischen Modell im Kartenbereich eine kartenbezogene Szenenbeschreibung erstellt. Daraus wird dann mit dem generischen Modell im Bildbereich ein spezifisches Modell gewonnen. Mit Verwendung dieses Modells werden Kantensegmente und Regionen im Luftbild berechnet. In der eigentlichen Auswertungsphase erfolgen dann die Verifikation, Erweiterung der Objektbeschreibung und Erkennung neuer Objekte.

Die Analyse wird mittels eines anwendungsunabhängigen Kontrollalgorithmus, der die Analyse auf eine Suche abbildet, durchgeführt. Zur Steuerung der Suche wird der ϵ -A*-Algorithmus verwendet. In Erweiterung zur Dempster-Shafer-Theorie wird zur Berechnung der Bewertungen der Analysezustände ein neues Verfahren zur Fortpflanzung von Vertrauensmaßen in hierarchischer Umgebung vorgeschlagen. Die Ergebnisse der Verifikation bzw. Klassifikation werden an der Objektklasse *Parkplatz* im Zusammenhang mit der Detektion von Fahrzeuggruppen exemplarisch dargestellt und diskutiert.

An einem Beispiel wird gezeigt, wie die Fusion der Analyseergebnisse beider Projektpartner zu einer verbesserten Szenenbeschreibung führt. Für einen Szenenausschnitt werden Ergebnisse einer Zuordnung der Bodenversiegelung unter Verwendung der strukturellen Bildauswertung dargestellt. Die Ergebnisse der Zuordnungen mit Verfahren ohne strukturelle Bildauswertung werden gegenübergestellt und diskutiert.

Im Ausblick wird auf die Gewinnung von dreidimensionalen Szenenbeschreibungen (Gebäude) aus Laserscanndaten eingegangen und erste Ergebnisse einer Analyse der Höhendaten aus dem betrachteten Testgebiet dargestellt.

1. Einleitung

Luft- und Satellitenbilder spielen in den Geo- und Umweltwissenschaften eine immer größere Rolle. Ihre Analyse zur Erkundung und Überwachung der Umwelt erschließt sich immer neue Anwendungsgebiete und gewinnt zunehmend an Bedeutung. Mit steigender Zuverlässigkeit ihrer Aussagen und kostengünstigen Lösungen durch zunehmende Automatisierung ergänzt und ersetzt sie in steigendem Maße andere, erdgebundene Techniken. Daher möchte man die Analyse z.B. bei der Ermittlung der Zunahme der Bodenversiegelung oder bei der Fortführung von Karten städtischer Siedlungsbereiche weiter automatisieren und so die Notwendigkeit menschlicher Betrachtung großer Mengen von Bildmaterial reduzieren. In diesem Zusammenhang sind in der internationalen Forschungsgemeinschaft die Anstrengungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse und zur weiteren Automatisierung der Verfahren zu sehen.

Einen Schub erhält die Automatisierung durch die Tatsache, daß eine wachsende Menge geographischer Daten zur Verfügung steht. Zur Zeit werden von den Landesvermessungsämtern topographische Karten in digitale Form umgesetzt. Dies trifft nicht nur für die Bundesrepublik Deutschland zu [33] sondern auch für viele andere Staaten.

Das gemeinsame Forschungsprojekt von FIM und IPF verfolgte das Ziel, mit speziellen Ansätzen zur Analyse von Luftbildern deren Auswertung zu automatisieren. Unterstützt wird die zwei- und dreidimensionale Analyse durch die Verwendung von Kontextwissen, wie es z.B. Karten enthalten. Dieses dient dazu, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen und auch die Verfahren zu beschleunigen.

Die Bestimmung der Bodenversiegelung in städtischen Gebieten ist als Anwendungsthema sowohl für Umweltforscher als auch für Städteplaner von großem Interesse. Bisherige Ansätze zur Bestimmung der Versiegelung aus Luftbildern versuchen, anhand der sogenannten *Vegetationsindices* Aussagen über die Bedeckung der Erdoberfläche mit Vegetation zu machen und daraus auf die Versiegelung zu schließen (siehe z.B. [2]). Der Vegetationsindex ist ein aus den Rückstreueigenschaften der Erdoberfläche in verschiedenen Frequenzbereichen abgeleitetes Maß für die Bedeckung eines Bildpunktes mit Vegetation. Dabei wird dem einzelnen Bildpunkt jedoch keine semantische Bedeutung zugewiesen. Durch die kumulative Messung ergibt sich eine große Abhängigkeit der Meßergebnisse von der Auflösung der Bilddaten.

Ein Beispiel für das Ergebnis einer klassischen Multispektralklassifizierung eines Farbluftbildes ist in Abb. 1-1 gezeigt. Der wesentliche Nachteil auch dieser Vorgehensweise besteht darin, daß jedem einzelnen Bildpunkt eine semantische Bedeutung zugewiesen wird, ohne die Nachbarschaft zu beachten.

Im Gegensatz dazu erfolgt bei dem hier vorgestellten Ansatz die Auswertung der Bilder auf symbolischer, also auf Objektebene: es wird nicht versucht, den einzelnen Bildpunkten eine Klasse zuzuweisen, sondern die gesamte Szene zu beschreiben durch Angabe der in der Szene sichtbaren Objekte, ihrer meßbaren Eigenschaften und der Beziehungen zwischen diesen Objekten. Im ersten Zwischenbericht zum laufenden Vorhaben wurde in Kapitel 2 die Versiegelung unter mehreren Aspekten untersucht. Es wurde gezeigt, daß die Bestimmung der Versiegelung über die Zuordnung von festen Versie-

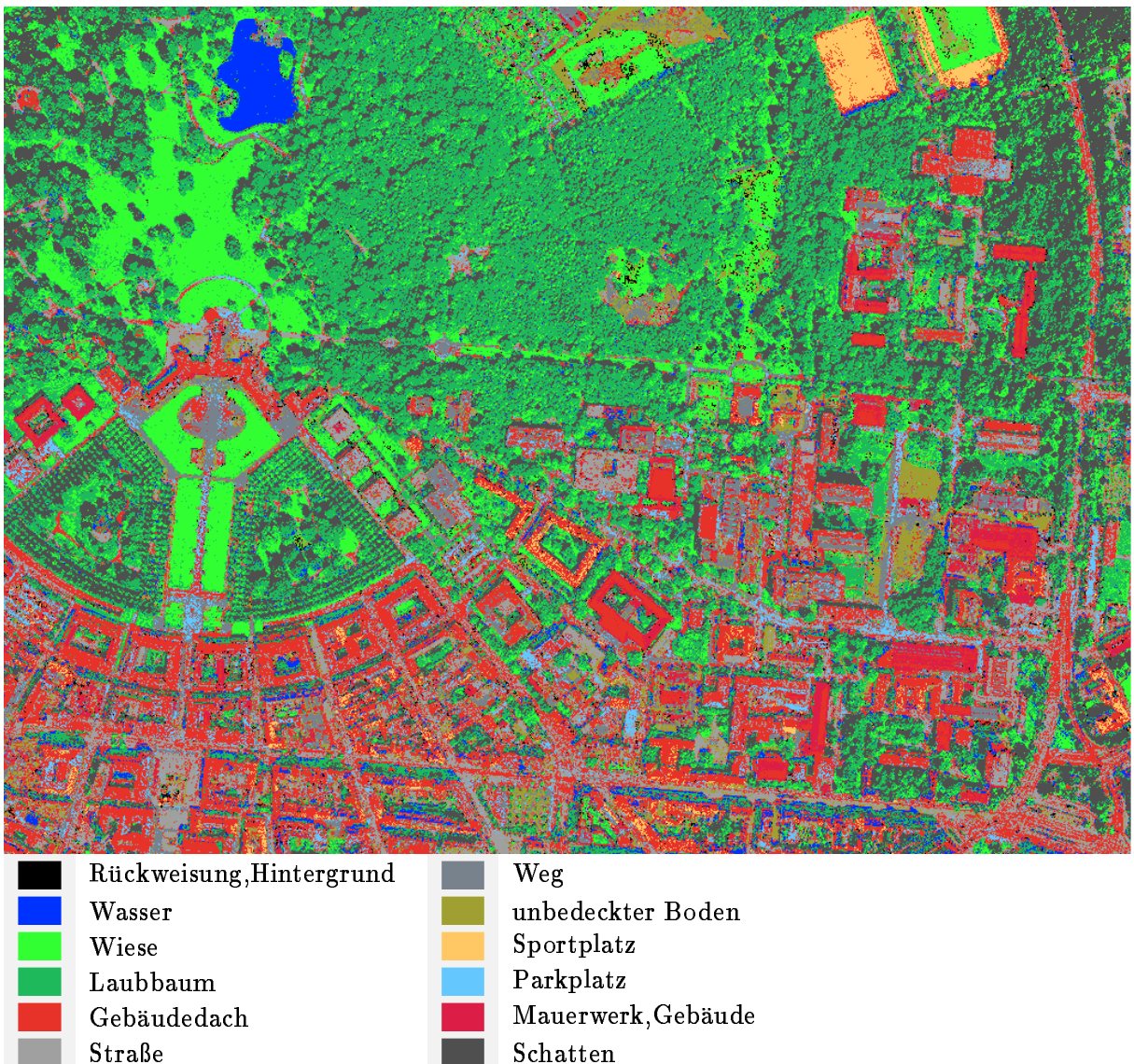


Abb. 1-1: Multispektralanalyse

gelungsgraden zu einzelnen Objekten zweckmäßig ist. Damit kann bei Kenntnis der in der Szene enthaltenen Objekte und ihrer geometrischen Eigenschaften eine Aussage zur Versiegelung eines städtischen Gebietes getroffen werden. Diese Strategie wird auch weiterhin verfolgt.

Zur Durchführung der Objekterkennung müssen neben den “klassischen” Bildverarbeitungsschritten auf ikonischer Ebene und der Gewinnung von Merkmalen auch Schritte zur Auswertung der Merkmale und Ableitung von Schlußfolgerungen vorgenommen werden. Gleichzeitig ist zur Nutzung der zusätzlich zu den Bilddaten verfügbaren Informationen ein Repräsentationsformalismus für dieses Wissen und ein Verfahren zur Einbindung dieses Wissens in die Bildauswertung erforderlich.

Im Kapitel 2 werden Abstraktionsebenen der Modellierung unterschieden. Auf der konzeptionellen Ebene werden Eigenschaften von Modellen beschrieben, verschiedene Kom-

ponenten der Modelle aufgeführt und eine Einteilung der Modelle nach dem Grad der Spezialisierung vorgenommen. Auf der Repräsentationsebene stellen wir zwei Netzstrukturen dar, die Produktionsnetze und die semantischen Netze, mit denen wir das Wissen zur Auswertung von Luftbildern erfassen. Auf der Implementierungsebene zeigen wir, wie dieses Wissen umgesetzt wird, um eine Analyse auszuführen.

Zwischen FIM und IPF wurde eine Arbeitsteilung derart vorgenommen, daß vom FIM vorwiegend Straßen und Gebäude und vom IPF vorwiegend flächenhaft ausgedehnte Objekte wie Parkplätze, Hofflächen usw. analysiert wurden. Dabei wurde den bisherigen Erfahrungen der Projektpartner in der Bearbeitung von Objektklassen Rechnung getragen. Die von den Projektpartnern verifizierten Objekte werden ausgetauscht und können in die Datenbank des jeweils anderen Projektpartners eingebaut werden.

Kapitel 3 behandelt die strukturelle Analyse von Gebäuden und Straßen mithilfe von **Produktionsnetzen**. Implementiert werden Produktionsnetze am FIM in der Systemumgebung BPI mit einer eigens für die Bildverarbeitung entwickelten mengenorientierten Sprache. Die strukturelle Analyse erfolgt schrittweise, wobei Ergebnisse von zunehmendem Abstraktionsgrad entstehen. Die Strukturen eines Bildes, einer Karte oder einer 3D-Szene werden analysiert, indem komplexe Strukturen aus weniger komplexen Strukturen zusammengesetzt werden. Kann man bei der Verifikationsaufgabe für die Bildanalyse auf den Ergebnissen der Kartenanalyse aufbauen ([108] Kap. 3.3), so werden bei der Klassifikationsaufgabe Abweichungen von den idealen Modellen durch größere Toleranzen bei den Parametern ausgeglichen. Für Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Verfahren konnte eine eigene Testumgebung aufgebaut werden (Kap. 3.4).

Kapitel 4 behandelt die Analyse flächenhaft ausgedehnter Objekte. Dazu werden am IPF **semantische Netze** auf der Grundlage des Systems ERNEST [75] benutzt. Darin erfolgen Instanzierung und Bewertung in einem gemischten modell- und datengesteuerten Verfahren. Durch die Einbringung des Kartenwissens in das semantische Netz kann bei der Bildanalyse der Suchraum sehr stark eingeschränkt und damit der Aufwand beträchtlich reduziert werden. Aus einem semantischen Netz, das allgemeines Wissen über die Objekte einer Szene enthält, wird durch Analyse der Karte automatisch ein neues semantisches Netz zur Bildanalyse der aktuellen Szene gewonnen (Kap. 4.1 und Kap. 4.2). Entsprechend dem Arbeitsprogramm des IPF für die Phase III des Vorhabens wurden für die Klassifikation die Konzepte erweitert, so daß auch in der Karte nicht enthaltene Objekte instanziiert werden können (Kap. 4.4.1). Durch die Definition neuer Konzepte für "Meta"-Klassen können Strukturrelationen bei ihrer Instanzierung überprüft werden (Kap. 4.1.1 und Kap. 4.1.2).

Die Ergebnisse der von beiden Partnern in Kapitel 3 und 4 durchgeführten Analysen (Verifikation plus anschließende Klassifikation) sind Graphen, die die analysierte zwei- oder dreidimensionale Szene beschreiben. In Kapitel 5 werden diese in einer gemeinsamen Datenbasis vereinigt.

Danach werden den durch die Analyse erfaßten Objekten in Kapitel 6 entsprechend ihrer Bedeutung Versiegelungsgrade zugewiesen.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der kartengestützten Bildanalyse ist schematisch in

Abb. 1-2 dargestellt. Eine Szene der Realität wurde durch Aufnahme einer Karte und

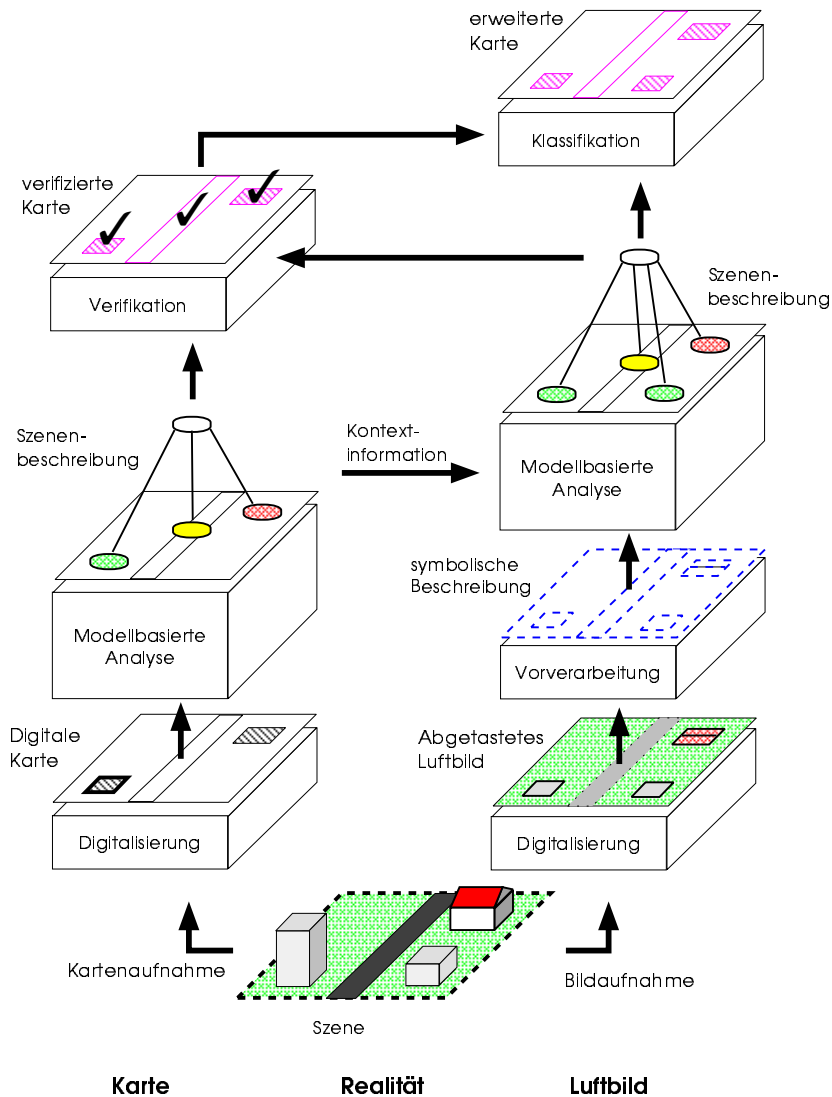


Abb. 1-2: Ablauf der kartengestützten Bildanalyse

eines Luftbildes erfaßt. Durch Digitalisierung werden diese Aufnahmen in eine rechnerverwendbare Form umgesetzt und als digitale Karte und abgetastetes Luftbild bereitgestellt. Aus der digitalen Karte wird durch eine modellbasierte Analyse (Kartenanalyse) eine Szenenbeschreibung erstellt. Das abgetastete Luftbild wird in einer Vorverarbeitungsstufe in eine symbolische Form überführt. Aus der symbolischen Beschreibung wird in einer modellbasierten Analyse (Bildanalyse) eine Szenenbeschreibung erstellt. Für diese Analyse wird die Szenenbeschreibung der Karte genutzt. Danach werden in der Verifikation Objekte der Szenenbeschreibungen von Karte und Luftbild verglichen. In einer anschließenden Klassifikation wird diese Szenenbeschreibung erweitert und eine neue, aktualisierte Karte erstellt.

2. Objektmodelle zur Bildanalyse

Die Bezeichnung *Modell* kann in unterschiedlichen Arbeitsbereichen ebenso unterschiedliche Bedeutungen besitzen. So hat ein Mathematiker sicherlich von einem Modell eine andere Vorstellung als ein Fahrzeugkonstrukteur. Wieder eine andere Vorstellung von einem Modell hat ein Modephotograph. Während im ersten Fall von einem abstrakten Konstrukt ausgegangen wird, kann ein Modell aber auch als Sache oder Person verstanden werden. Auch im Bereich der Mustererkennung und Bildanalyse wird die Bezeichnung *Modell* mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet [51,99].

Daher wird zunächst die Bezeichnung *Modell* näher erläutert. Die hier betrachteten Modelle beziehen sich auf die zu erkennenden Objekte (*Objektmodelle*) im Gegensatz zu Modellen, die den Aufbau und Ablauf eines Erkennungssystems beschreiben (*Systemmodelle*, *Prozeßmodelle*). Im folgenden werden Objektmodelle vereinfacht als Modelle bezeichnet.

Bei der Modellierung unterscheiden wir verschiedene Abstraktionsebenen:

- In der **Konzeptebene** findet die Begriffsprägung und Umschreibung statt.
- In der **Repräsentationsebene** wird das Modell in einer bestimmten Sprache dargestellt.
- In der **Implementierungsebene** wird das Modell in einer Form gespeichert, die eine maschinelle Bildauswertung zuläßt.

2.1 Konzeptionelle Ebene

Mit einem Modell werden bestimmte Aspekte der Realität im Hinblick auf eine Bildanalyse beschrieben. Bei der Auswahl zu beschreibender Eigenschaften wird man solche Eigenschaften berücksichtigen, die auch aus den erwarteten Bildern ableitbar sind. Beispielsweise wird für eine Luftbildanalyse ein Haus durch den Grundriß oder die Form des Daches beschrieben, nicht jedoch durch die Aufteilung der Räume im Innern des Hauses. Ein Modell ist damit nur im Hinblick auf den Zweck, zu dem es erstellt wurde, sinnvoll einsetzbar (vgl. auch [91]).

Ein Modell zur Bildauswertung enthält solche Eigenschaften der Objekte, die für ihre Erkennung geeignet sind (Figur/Hintergrund-Trennung), und solche, die die Unterscheidung eines Objektes von anderen Objekten ermöglichen (Klassifikation). Eine erschöpfende Erfassung dieser Eigenschaften eines Objektes ist jedoch wegen den sich daraus sowohl während der Modellerstellung als auch während der Modellnutzung ergebenden Komplexitätsproblemen nicht möglich. Mit der Modellerstellung ist also immer eine *Generalisierung* verbunden:

Ein Modell soll die als richtig angesehenen Eigenschaften des Vorbilds ausdrücken, die unwichtigen oder nebensächlichen außer Acht lassen, um durch

Vereinfachungen zu einem übersehbaren oder mathematisch berechenbaren oder zu experimentellen Untersuchungen geeigneten Modell zu kommen [12].

Die Unterscheidung zwischen „wichtigen“ und „unwichtigen“ Eigenschaften des Vorbilds ist dabei jedoch stark von der Aufgabenstellung abhängig. Ein Modell enthält also Wissen über die zu beschreibenden Objekte. Wir unterscheiden zwischen explizitem und implizitem Wissen

- Von *explizitem* Wissen sprechen wir, wenn das Wissen in Form einer Beschreibung vorliegt. Zum Beispiel: „Ein *PKW* hat vier Räder, einen Motorraum, eine Personenkabine und einen Gepäckraum“. Es werden also Eigenschaften und Beziehungen zur Charakterisierung des Objektes ausgedrückt.
- Von *implizitem* Wissen sprechen wir, wenn das Wissen nur indirekt, etwa durch Beispiele dargestellt wird. Zum Beispiel kann der Begriff *PKW* durch Nennung gängiger Typbezeichnungen angegeben werden.

Bei der Modellierung wird Wissen explizit beschrieben.

2.1.1 Modellkomponenten

Nach der Art des modellierten Wissens lassen sich verschiedene Komponenten eines Modells unterscheiden:

- Die *topologische* Komponente beschreibt z.B. Verbindungen und Nachbarschaften von Objekten oder Objektmerkmale, wie "Anzahl der Löcher".
- Die geometrische Komponente eines Modells beschreibt z.B. Form-, Größen- und Lageeigenschaften der Objekte.
- Die *physikalische* Komponente beschreibt z.B. Oberflächeneigenschaften (Reflexionsfunktionen) oder thermische Eigenschaften der Objekte.
- Die *semantische* Komponente gibt für das Modell und die Teile jeweils einen Bezeichner (Namen) an, die in einer Sprache eine *vereinbarte* Bedeutung haben.

Überwiegt eine Komponente in einem Modell, so wird häufig das Modell danach benannt. Ein geometrisches Modell ist demnach ein Modell, in dem vorwiegend oder ausschließlich geometrische Eigenschaften eines Objektes erfaßt werden. Wir verstehen unter *geometrischem Modell* den geometrischen Anteil eines Modells. Daher ist unter *semantischem Modell* in diesem Bericht auch nur die semantische Komponente eines Modells zu verstehen und nicht das gesamte Modell (im Gegensatz zu z.B. [19]).

2.1.2 Strukturen und Hierarchien

Bei einer *attributiven* Beschreibung wird ein Objekt nur anhand gewisser globaler Eigenschaften spezifiziert, ohne daß eine interne Struktur angegeben wird. Eine attribu-

tive Beschreibung eines Gebäudes könnte z.B. in Form einer Auflistung von Attributen wie Höhe, Grundfläche, umbautes Volumen usw. erfolgen.

Im Gegensatz dazu bezeichnen wir ein Modell als ein *strukturelles Modell*, wenn es den Aufbau eines Objektes aus seinen Teilen beschreibt. Zum Beispiel könnte die strukturelle Beschreibung eines Gebäudes in Form von Wänden, Decken, Dachteilen usw. mit den Beziehungen zwischen diesen Teilen erfolgen.

Modelle, die eine hierarchische Gliederung des Wissens enthalten, werden auch als hierarchische Modelle bezeichnet. Das Wissen kann z.B. in einer Bestandteilhierarchie oder Spezialisierungshierarchie gegliedert sein.

- In einer *Bestandteilhierarchie* wird das Wissen nach dem Detaillierungsgrad in Stufen gegliedert. Eine Verkettung zwischen den Stufen kann z.B. durch die Aussage "besteht aus" oder "ist Bestandteil von" erfolgen: "Eine Siedlung *besteht aus* Gebäuden und Straßen. Ein Gebäude *besteht aus* Wänden und einem Dach. Eine Wand *besteht aus* Mauerwerk, Türen und Fenstern." oder "Ein Gebäude *ist Bestandteil von* einer Siedlung. Eine Straße *ist Bestandteil von* ..." usw.
- In einer *Spezialisierungshierarchie* wird das Wissen in begrifflichen Abstraktionsstufen geordnet. Eine Verkettung zwischen den Abstraktionsstufen kann z.B. durch die Aussage "ist eine Art von" erfolgen: "Ein Einfamilienhaus *ist eine Art von* Wohnhaus. Ein Wohnhaus *ist eine Art von* Gebäude. Ein Gebäude *ist eine Art von* Bauwerk."

2.1.3 Grad der Spezialisierung

Im Hinblick auf die Erkennungsaufgabe (Verifikation, Detektion, Klassifikation) und unterschiedliche Freiheitsgrade der geometrisch-topologischen Komponenten eines Modells wurde folgende Einteilung vorgenommen [110] :

- **Spezifische Modelle** beschreiben Objekte mit einer festen topologischen Struktur. Sie beschreiben individuelle Objekte oder kleinere Objektklassen. Diese Modelle werden weiterhin in Hinblick auf ihre geometrischen Einschränkungen unterschieden.
 - **Feste Modelle** bilden ideale geometrische Repräsentationen physikalischer Objekte. Sie sind fest in der Position und Orientierung im Referenzraum. Typische Beispiele bilden Karten.
 - **Formfeste Modelle** haben einen festen Satz von geometrischen Relationen - ihre globale Position und Orientierung ist jedoch variabel. Einige Beispiele sind in Abb. 3-2b dargestellt.
 - **Parametrische Modelle** erlauben mehr Transformationen als *formfeste Modelle*, wobei die strukturelle Komplexität jedoch fest bleibt. Die geometrische Variation des Modells wird durch einen Satz von Parametern bestimmt. Mit der Angabe von Parameterintervallen kann eine Klasse von formfesten Modellen beschrieben werden. Ein Beispiel ist in Abb. 3-2b dargestellt.

- **Generische Modelle** sind wesentlich allgemeiner und beschreiben Objekte ohne eine feste topologische Struktur. Sie beschreiben Klassen von Objekten. Objekte, die durch generische Modelle beschrieben werden, können eine unterschiedliche Anzahl von Teilen besitzen. Als Beispiel sind Modelle für ein Straßennetz oder eine Siedlung zu nennen.

Beispielsweise könnte sich die verbale Beschreibung eines Gebäudes durch ein spezifisches Modell und ein generisches Modell wie folgt unterscheiden:

Spezifisches Modell - "Eine Fabrikhalle ist ein Gebäude, das die Form eines rechteckigen Prismas besitzt, eine Grundfläche zwischen 100 m² und 10000 m² und eine Höhe zwischen 3 m und 10 m hat und in grauer Farbe erscheint."

Generisches Modell - "Ein Gebäude ist ein vom Menschen erbautes Objekt, das durch Wände und ein Dach begrenzt ist." Es bleibt zu bemerken, daß die Begriffe *spezifisches Modell* und *generisches Modell* bei manchen Autoren auch anders eingeteilt und abgegrenzt werden.

2.2 Repräsentationsebene

Unter *Modellrepräsentation* (oder kurz: Repräsentation) verstehen wir die Darstellung des Modells in einer Sprache mit eindeutiger Syntax und Semantik. Diese Sprache kann eine natürliche oder formale Sprache sein oder eine Sprache mit graphischen Elementen.

Die Syntax bestimmt den zur Verfügung stehenden Symbolvorrat und die Regeln, nach denen diese Symbole verknüpft werden können. Die Semantik legt die Bedeutung der Symbole fest. Die Semantik der Repräsentationssprache ist nicht zu verwechseln mit der semantischen Komponente eines Modells. Einer Modellrepräsentation wird zweckmäßigerweise auch eine Pragmatik zugeordnet. Die Pragmatik enthält Methoden, die den Zugriff auf das repräsentierte Modell und seine Nutzung gewährleisten.

Explizite und implizite Modellrepräsentation. Betrachtet man die Beziehungen zwischen einer Modellrepräsentation und der zugeordneten Pragmatik, so kann man zwischen *explizit* und *implizit* repräsentierten Modellen unterscheiden.

- Bei einer expliziten Modellrepräsentation gibt es eine klare Trennung zwischen dem Modell und den Verfahren zur Nutzung des Modellwissens. Systeme, die eine explizite Modellrepräsentation verwenden, werden auch wissensbasierte Systeme genannt. Sie sind in der Regel sehr flexibel, da Änderungen des Modells vergleichsweise einfach durchgeführt werden können und nicht notwendigerweise auch Änderungen in den Verfahren zur Wissensnutzung erfordern. Die explizite Modellrepräsentation begünstigt die Verständlichkeit der Modelle und erleichtert die Überprüfung auf Vollständigkeit und Korrektheit der Modelle.
- Bei der impliziten Modellrepräsentation ist das Wissen über die Objekte (Modell) mit dem Wissen über den Analyseablauf (Prozeßmodell) vermischt. Da sich in solchen Fällen zum Beispiel eine Objekteigenschaft erst aus dem Zusammenwirken verschiedener Parameter und Kontrollstrukturen eines Programms ergeben kann,

ist ein Verständnis des Modells oftmals erst nach einer genauen Studie der Verfahren zur Wissensnutzung möglich.

Zur Lösung komplexer Aufgaben ist eine explizite Wissensrepräsentation von Vorteil. Sie ermöglicht die Flexibilität bei der Änderung und Erweiterung der Modelle, verbessert die Verständlichkeit und erleichtert die Überprüfbarkeit der Modelle.

Deklarative und prozedurale Formulierung. Modelle können deklarativ oder prozedural formuliert werden.

- Eine *deklarative Formulierung* ist gekennzeichnet durch eine Aufzählung von Fakten. Auf der Implementierungsebene wird deklaratives Wissen gewöhnlich in Form von komplexen Datenstrukturen realisiert.
- Eine *prozedurale Formulierung* des Wissens enthält Handlungsanweisungen. Eine mögliche prozedurale Darstellung ist die Darstellung mit Hilfe von Regeln. Regeln enthalten einen Bedingungsteil und einen Aktionsteil. Zur Überprüfung der Bedingung und zur Ausführung der Aktion werden Prozeduren ausgeführt.

Bildauswertesysteme besitzen häufig sowohl deklarative als auch prozedurale Repräsentationsanteile. Zur expliziten Repräsentation von Modellen können unterschiedliche Formalismen wie z.B. Formale Grammatiken, Graphen, Frames, Produktionssysteme, semantische Netze verwendet werden. Einen Überblick über die verschiedenen Formalismen findet man z.B. in [10] oder [14].

Zur Repräsentation werden vom FIM Produktionsregeln bzw. Produktionsnetze und vom IPF semantische Netze verwendet. Im Folgenden werden diese beiden Modellrepräsentationen vorgestellt.

2.2.1 Repräsentation durch Produktionsregeln und Produktionsetz

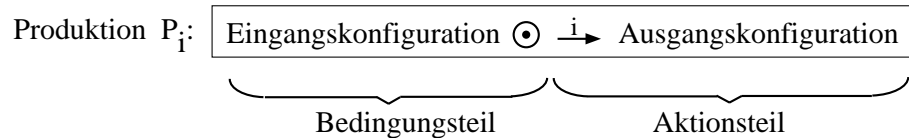
Das Objektmodell wird in Modell-Primitive zerlegt. Verschiedene Teilmengen der Modell-Primitive werden zu Modellteilen gruppiert. Teile der gleichen Struktur werden zu einem Objektkonzept zusammengefaßt. Die topologischen oder geometrischen Relationen zwischen Objektkonzepten werden durch Produktionen beschrieben.

Produktion

Allgemein ist eine Produktion oder Produktionsregel eine Anweisung der Form:

WENN *Bedingung* erfüllt, DANN führe *Aktion* aus.

Bei unserem Ansatz wird im Bedingungsteil eine Eingangs-Konfiguration geprüft. Eine Konfiguration ist eine Menge von Objekten, die durch ein Tupel repräsentiert wird. Eine Konfiguration heißt *kompatibel*, falls eine gewisse Relation \odot zwischen den Objekten erfüllt ist. In diesem Fall ist der Bedingungsteil wahr und eine objektspezifische Generierungsfunktion \xrightarrow{i} wird ausgeführt. Die Funktion erzeugt dann eine neue Ausgangskonfiguration.



Im allgemeinen enthalten Produktionen auf beiden Seiten Tupel beliebiger Länge. Wir betrachten jedoch nur solche Produktionen, die in der Ausgangskonfiguration ein einzelnes Objekt enthalten.

Der Aufbau von komplexeren Strukturen aus weniger komplexen Strukturen mittels Produktionen kann durch ein Ersetzungssystem beschrieben werden. In Anlehnung an formale Sprachen [95] wird das Ersetzungssystem durch eine Grammatik G bestimmt. Eine formale Grammatik ist definiert durch ein Viertupel

$$G = (S, V_n, V_t, P),$$

wobei S eine Menge von Startsymbolen (Zielobjekte), V_n eine Menge von nichtterminalen Symbolen (Teilobjekte), V_t eine Menge von terminalen Symbolen (Primitivobjekte) und P eine Menge von Ersetzungsregeln (Produktionen) darstellt. Die Objekte besitzen Attribute und repräsentieren bestimmte Strukturen. Die Produktionen bestimmen, ob und wie eine gegebene Menge von Objekten in eine Menge komplexerer Objekte überführt wird.

In Analogie zu den Zeichenkettengrammatiken kann der Prozeß der Bildanalyse als Bearbeitung des Bildinhaltes durch einen Parser aufgefaßt werden. Anstatt nun die Konkatination zu untersuchen, wie dies bei Parsern für Zeichenkettengrammatiken der Fall ist, werden bei der Bildanalyse die topologischen oder geometrischen Relationen von Objekten (Prädikate) im Bedingungsteil einer Produktion untersucht. Daher schreiben

wir eine Produktion P_i in folgender Form an [104]:

$$P_i : X \wedge Y \odot \xrightarrow{i} Z$$

Das heißt, WENN ein Objekt vom Typ X und ein Objekt vom Typ Y das Prädikat \odot erfüllen, dann wird eine objektspezifische Generierungsfunktion \xrightarrow{i} ausgeführt, die ein Objekt vom Typ Z produziert. Das Objekt vom Typ Z (oder kurz: Objekt Z) "ersetzt" sozusagen die Eingangskonfiguration der Objekte X und Y. Ausgehend von den Primitivobjekten, kann ein Zielobjekt durch wiederholte Anwendung von Produktionen schrittweise durch Aufbau von Teilobjekten zusammengesetzt werden.

Graphische Darstellung

Graphstrukturen werden häufig benutzt um das in Computerprogrammen implementierte Wissen darzustellen.

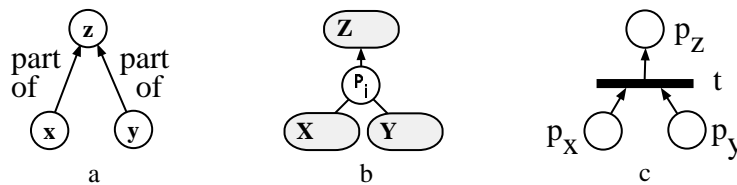


Abb. 2-1: Graphische Darstellung von Wissen.

a) Semantisches Netz, b) Produktionsnetz, c) Petri-Netz

Semantische Netze. *Semantische Netze* sind hilfreich bei der Darstellung deklarativen Wissens [18]. Allgemein besteht ein semantisches Netz aus Knoten und Kanten. Bei der Beschreibung eines Modell-Schemas werden Konzepte durch Knoten dargestellt und Relationen zwischen Konzepten durch Kanten (z.B. *Teil_von* oder *ist_ein*). Ein Beispiel für eine einfache Semantik ist Abb. 2-1a dargestellt. Auf die Wissensrepräsentation durch semantische Netze wird in Abschnitt 2.2.2 noch näher eingegangen.

Petri-Netze. Eine andere Form der Wissensrepräsentation bilden z.B. Petri-Netze [92]. Ein Petri-Netz ist ein bipartiter gerichteter Graph, der als Knoten *Stellen* (*places*) und *Übergänge* (*transitions*) besitzt. Stellen werden durch Kreise dargestellt und Übergänge durch Rechtecke oder Balken (Abb. 2-1c). Ein Pfeil von einer *Stelle* zu einem *Übergang* bedeutet, daß die *Stelle* zum Eingang des *Übergangs* gehört. Analog bedeutet ein Pfeil von einem *Übergang* zu einer *Stelle*, daß die *Stelle* zum Ausgang des *Übergangs* gehört.

Das dynamische Verhalten eines Petri-Netzes wird durch Markierungen ausgedrückt, die jeder *Stelle* eine Anzahl von *Token* zuweisen. Die Anzahl und Verteilung der *Token* bestimmen die Aktionsmöglichkeiten eines Petri-Netzes.

Produktionsnetze. Ähnlich wie bei Petri-Netzen benutzen wir für *Produktions-Netze* zwei disjunkte Mengen von Knoten: Konzepte und Produktionen. Konzepte werden

durch Ovale dargestellt und Produktionen durch Kreise (Abb. 2-1b). Kanten bestehen nur zwischen Knoten aus verschiedenen Mengen. Ein Pfeil von einer Produktion zu einem Konzept steht für die Generierungsfunktion und zeigt auf die Ausgangskonfiguration. Ist ein Konzept an der Eingabe-Konfiguration einer Produktion beteiligt, so wird dies durch eine Kante oder einen Pfeil von dem Konzept zur Produktion dargestellt.

Oft ist die zugrundeliegende Bedeutung einer solchen Kante ähnlich der einer *Teil-von*-Relation in einem semantischen Netz. Andere Mechanismen eines semantischen Netzes wie z.B. Spezialisierung-Generalisierung sind in unseren Produktionsnetzen nicht implementiert.

Die Art der Darstellung kann eingeordnet werden zwischen den eher deklarativ orientierten semantischen Netzen und den Petri-Netzen mit ihrem prozeduralen Charakter. Ähnlich wie in den Semantischen Netzen finden sich in den Produktionsnetzen wegen den "Ersetzungen" die Teil-von Relationen wieder. Produktionsnetze geben auch Auskunft, in welchen Prozessmodulen (Produktionen) welche Relationen geprüft werden. Ebenso erhält man eine Vorstellung vom Informationsfluß innerhalb des Systems, den gegenseitigen Abhängigkeiten und Unabhängigkeiten zwischen Produktionen und Konzepten.

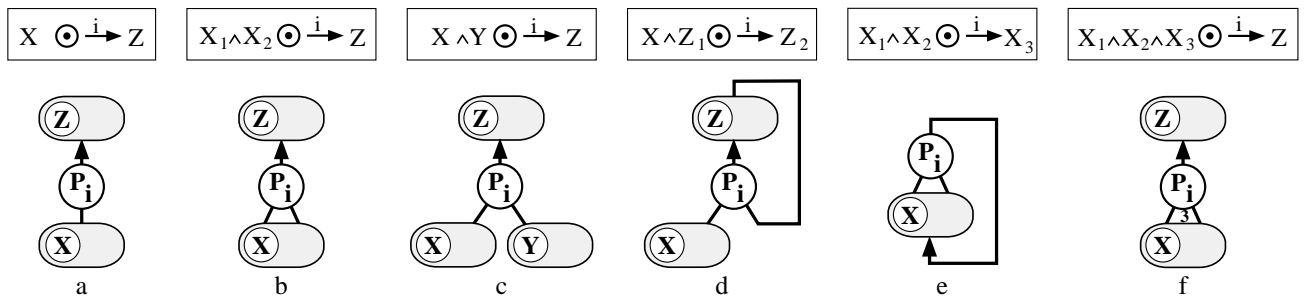


Abb. 2-2: Verschiedene Arten von Produktionen mit graphischer Repräsentation

Verschiedene Arten von Produktionen sind in Abb. 2-2 zusammen mit einer graphischen Repräsentation dargestellt. Sie unterscheiden sich in den Typen der Objekte (Konzepte) der Ein- und Ausgangskonfigurationen und in der Anzahl der Objekte in der Eingangs-Konfiguration. Die Eingangs-Konfiguration in Abb. 2a enthält ein Objekt, die in Abb. 2-2b-e enthält je zwei und die in Abb. 2-2f enthält mehr als zwei Objekte (z.B. 3). Die Produktionstypen unterscheiden sich wie folgt:

- a) Die Produktion transformiert nur eine Instanz eines Objektes X in eine Instanz eines Objektes Z, falls die gegebene Bedingung erfüllt ist.
- b) Diese Produktion enthält ein symmetrisches Paar in der Eingangs-Konfiguration.
- c) Die Produktion enthält ein asymmetrisches Paar in der Eingangs-Konfiguration.
- d) Die rekursive Produktion enthält in der Eingangs-Konfiguration ein Objekt von gleichem Typ wie in der Ausgangskonfiguration.

- e) Die rekursive Produktion enthält in der Ein- und Ausgangs-Konfiguration den gleichen Objekt-Typ.
- f) Die Produktion enthält in der Eingangs-Konfiguration $n_x > 2$ Objekte. Solche Produktionen kann man mit zusätzlichen Objekten in eine Menge von Produktionen (a-e) überführen.

Produktionsnetz

Beispielsweise sei ein einfaches Ersetzungssystem durch die Grammatik

$$G_{Bsp} = (\{E\}, \{C, D, E\}, \{A, B\}, \{P_1, P_2, P_3\}),$$

bestimmt. Danach werden ausgehend von den Primitivobjekten $\{A, B\}$ mit den in Abb. 2-3a spezifizierten Produktionen $\{P_1, P_2, P_3\}$, die Teilobjekte $\{C, D, E\}$ zusammengesetzt, wobei die Objekte E die Zielobjekte bilden.

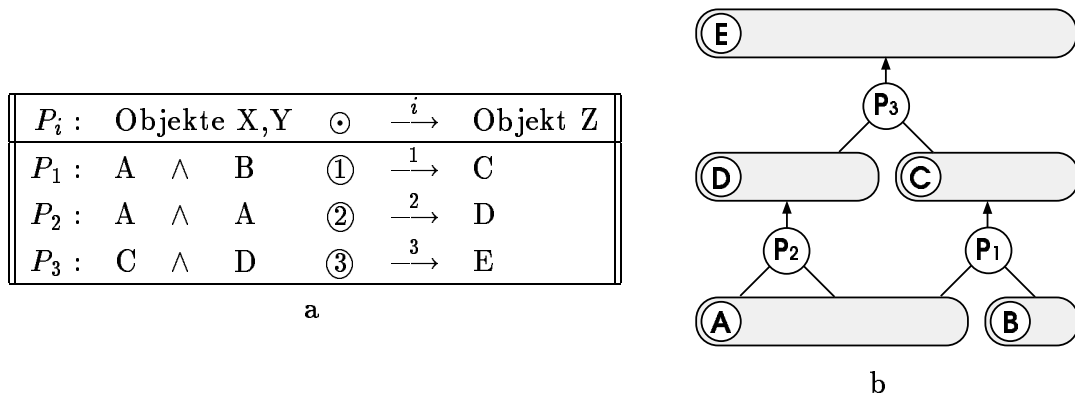


Abb. 2-3: Produktionen. a) Tabelle der Produktionen, b) Produktionsnetz

Das *prinzipielle* Zusammenwirken der Produktionen und die stufenweise Überführung der Objekte in Objekte einer höheren Abstraktionsstufe läßt sich graphisch durch ein Produktionsnetz verdeutlichen. Das in Abb. 2-3b dargestellte Produktionsnetz gibt ebenso wie die Tabelle (Abb. 2-3a) den Zusammenhang zwischen den in Grammatik G_{Bsp} angegebenen Objekttypen (Objekt Konzepten) und den Produktionen wieder.

Die zum Aufbau der *konkreten* Objekte (Instanzen) durchgeführten Zusammensetzungen werden durch Verzeigerungen festgehalten und können durch einen Ableitungsgraphen dargestellt werden (siehe z.B. Abb. 3-3).

Produktionen bestimmen, wie eine Menge von Objekten in eine Menge komplexerer Objekte überführt wird (Abb. 2-3a). Die hierarchische Organisation von Objekt Konzepten und Produktionen kann durch ein Produktionsnetz dargestellt werden. Jedes Objekt Konzept kommt dabei nur einmal vor. Abb. 2-3b zeigt dies an einem Beispiel.

2.2.2 Repräsentation durch ein semantisches Netz

Ein *semantisches Netz* [73] ist eine Wissensrepräsentation, bei der die Beschreibung der Objekte und der Beziehungen zwischen den Objekten im Vordergrund steht. Dafür werden im wesentlichen zwei Arten von Symbolen verwendet: Knoten und Kanten. Die Knoten werden zur Repräsentation beliebiger Objekte, Ereignisse oder Sachverhalte verwendet, während die die Knoten verbindenden Kanten die Beziehungen zwischen den entsprechenden Objekten, Ereignissen oder Sachverhalten darstellen.

Durch die Repräsentation des Diskursbereichs mit Hilfe von Knoten und Kanten kann ein semantisches Netz in Form eines Graphen dargestellt werden. Dennoch unterscheiden sich semantische Netze von allgemeinen Graphen und Relationalstrukturen [73]. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist, daß für semantische Netze eine Syntax *und* eine Semantik definiert ist. Die Syntax bestimmt, welche Symbole zur Repräsentation des Wissens zur Verfügung stehen und wie diese aufgebaut sind. Die Semantik liefert eine Interpretation für diese Symbole. Wieder sei hier darauf hingewiesen, daß diese Semantik sich nicht auf die semantische Komponente eines Modells bezieht, sondern auf die Festlegung, welche Bedeutung die Symbole haben [121,11]. Um es mit dem Titel der zitierten Werke auszudrücken: Was ist in einer Kante und was ist in einem Knoten?

Anhand des Beispiels aus Abb. 2-4 werden die für ein semantisches Netz typischen Symbole zur Wissensrepräsentation erläutert. Für eine eingehende Beschreibung von semantischen Netzen wird auf die Literatur verwiesen (z.B. [18,94,101]).

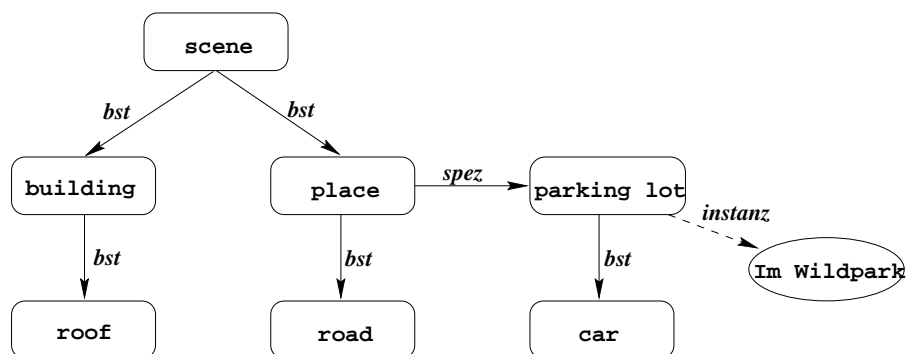


Abb. 2-4: Beispiel für ein semantisches Netz

Knoten

Ein *Konzept* in einem semantischen Netz ist eine abstrakte Darstellung für Klassen von Objekten, Sachverhalten oder Ereignissen. Ein Konzept hat einen Namen, eine Extension und eine Intension. Die Extension ist die Menge aller Objekte¹, die von dem Kon-

¹Zur Vereinfachung sprechen wir im weiteren nur noch von Objekten, meinen aber damit Objekte, Ereignisse, Sachverhalte usw.

zept repräsentiert werden. Die Intension ist die Menge aller Merkmale und Beziehungen, die ein Objekt aufweisen muß, um von diesem Konzept repräsentiert zu werden. In Abb. 2-4 sind die mit Rechtecken dargestellten Knoten Beispiele für Konzepte. Das Konzept **scene** repräsentiert z.B. eine Anordnung von Objekten aus der realen Welt, und das Konzept **parking lot** repräsentiert Parkplätze.

Eine andere Art von Knoten sind die *Instanzen*. Instanzen repräsentieren eine Ausprägung eines Konzeptes, also ein Individuum aus der Menge der von dem Konzept repräsentierten Objekte. Auch Instanzen haben einen Namen, eine Extension und eine Intension. Die Extension besteht allerdings nur aus genau einem Objekt, nämlich dem repräsentierten Objekt. Die Intension umfaßt dessen Merkmale und Beziehungen. Der Parkplatz Im Wildpark ist z.B. ein eindeutig festgelegter Parkplatz und damit eine Instanz für das Konzept **parking lot**. Diese Instanz ist in Abb. 2-4 als Ellipse dargestellt.

Kanten

Eine Kante in einem semantischen Netz repräsentiert eine binäre Relation zwischen den Objekten, die durch die mit der Kante verbundenen Konzepte oder Instanzen dargestellt sind. Zwischen Objekten lassen sich sehr viele und sehr unterschiedliche Relationen definieren. Es hat sich jedoch gezeigt, daß gewisse Relationen immer wieder zur Modellrepräsentation verwendet werden. Deshalb werden für diese Relationen („Standardrelationen“) in semantischen Netzen spezielle Arten von Kanten bereitgestellt. Wir stellen diese Relationen und die entsprechenden Kanten wegen ihrer Bedeutung sowohl für die Modellrepräsentation als auch für die Nutzung des Modells im folgenden vor. Selbstverständlich ist es in semantischen Netzen möglich, nicht nur die hier vorgestellten, sondern auch beliebige andere Relationen zu repräsentieren.

Die Standardrelationen sind *strikte Ordnungsrelationen* [93] und werden deshalb durch gerichtete Kanten dargestellt. Aus Effizienzgründen sind in der Regel jedoch auch die entsprechenden inversen Relationen explizit im semantischen Netz repräsentiert.

Zwischen einer Klasse von Objekten und einem Individuum dieser Klasse besteht die *Instanz-Relation*. Die Instanz-Relation wird in einem semantischen Netz durch die *Instanzkante* dargestellt. Sie zeigt von dem Konzept, das diese Klasse repräsentiert, zu der Instanz für das Individuum. Umgekehrt zeigt von der Instanz zum Konzept die *Instanz-von-Kante*. In semantischen Netzen kann auf eine Instanz nur *eine* Instanzkante zeigen. Umgekehrt kann ein Konzept jedoch mehrere Instanzen (und damit Instanzkanten) haben. Die Instanzkante ist in Abb. 2-4 als unterbrochene und mit *instanz* markierte Linie dargestellt.

Die *Spezialisierung-Relation* besteht zwischen einem allgemeineren und einem spezielleren Objekt. Die inverse Relation heißt *Generalisierung-Relation*. Da ein Parkplatz eine spezielle Art von Platz ist, weist in dem Beispielnetz aus Abb. 2-4 eine Spezialisierungskante (mit *spez* markiert) von dem Konzept **place** zu dem Konzept **parking lot**. Die Spezialisierung-Relation führt auf der Menge der Konzepte die Spezialisierungshierarchie ein. In Abb. 2-4 entfaltet sich diese Hierarchie entlang der Horizontalen. Spe-

ziellere Konzepte sind weiter rechts dargestellt, allgemeinere weiter links. Entlang der Spezialisierungskanten findet eine Vererbung der Eigenschaften des allgemeineren Konzeptes zu den spezielleren Konzepten statt. Deshalb brauchen gemeinsame Eigenschaften von Objekten nur einmal angegeben zu werden.

In der *Bestandteil-Relation* steht ein Objekt mit seinen Teilen. Die Umkehrung davon ist die *Bestandteil-von-Relation*. In Abb. 2-4 ist z.B. die Tatsache, daß ein Platz Bestandteil (eines Ausschnittes) der realen Welt ist, dadurch ausgedrückt, daß das Konzept `place` mit dem Konzept `scene` über eine Bestandteilkante (mit *bst* markiert) verbunden ist. Bestandteil des Konzeptes `parking lot` ist das Konzept `car`, aber auch das Konzept `road`, da die Bestandteilkante von `place` nach `road` über die Spezialisierungskante von `place` nach `parking lot` vererbt wird.

Die Bestandteil-Relation induziert ebenfalls eine Hierarchie auf den Konzepten eines semantischen Netzes. In Abb. 2-4 ist diese Hierarchie in vertikaler Richtung dargestellt. Durch die Angabe seiner Bestandteile wird die *Struktur* des modellierten Objektes beschrieben.

Knoteneinträge

Die mit einem Knoten in einem semantischen Netz repräsentierten Objekte können durch verschiedene Einträge in den Knoten detaillierter beschrieben werden. Eine Art von Einträgen sind *Attribute*. Mit Hilfe der Attribute werden numerische Eigenschaften (hier im Gegensatz zu strukturellen Eigenschaften) der dargestellten Objekte repräsentiert. Die Breite eines Weges kann z.B. durch ein Attribut `width` zu dem Konzept `road` beschrieben werden, oder die Farbe des Autos durch ein Attribut `colour` zu dem Konzept `car`.

Attribute besitzen mehrere Unterkomponenten, in denen z.B. der Name des Attributs, der Werttyp und der Wert selbst gespeichert werden. In der Regel ist bei Konzepten die Unterkomponente „Wert“ des Attributs noch leer. Bei Instanzen hingegen sind die Eigenschaften des Individuums bekannt und die Wert-Unterkomponente ist mit entsprechenden Werten gefüllt.

In einem Attribut kann auch ein Verweis auf eine *Attributberechnungsfunktion* enthalten sein. Diese Prozedur wird in der Phase der Wissensnutzung verwendet, um den Wert des Attributs zu bestimmen. Durch die Zuordnung von Prozeduren zu den Knoten wird die deklarative Wissensrepräsentation in semantischen Netzen durch eine prozedurale Komponente ergänzt.

2.2.3 Diskussion zur Modellrepräsentation

Zur Repräsentation von Modellen werden sowohl in Produktionsnetzen wie auch semantischen Netzen Konzepte verwendet. Semantische Netze können neben den Konzepten noch Instanzen beinhalten (siehe Abb. 2-4), die jedoch nicht Teil des Modells sind. Läßt man in Abb. 2-4 die in der Ellipse dargestellte Instanz und die dazugehörige Instanzkante außer acht, so erkennt man das Modell einer Szene.

Selbst ohne spezielle Kenntnisse zur Wissensrepräsentation in Produktionsnetzen und semantischen Netzen wird ein Betrachter erklären können, was mit der graphischen Repräsentation gemeint ist. Beispielweise zeigt Abb. 2-4 eine Szene, in der sich ein Parkplatz und ein Gebäude befinden. Das Gebäude hat als Bestandteil ein Dach, und der Parkplatz hat als Bestandteile einen Weg und ein Auto. Die Details des Modells (z.B. die Attribute der Konzepte) sind in Abb. 2-4 nicht enthalten, doch scheinen sie für eine erste Wahrnehmung des Modells durch den Menschen auch nicht benötigt zu werden. Die deklarative *Präsentation* des Modells macht es dem Menschen leichter, komplexe Modelle zu verstehen.

Dennoch ist eine deklarative Modellrepräsentation, ebenso wie eine prozedurale Modellrepräsentation, jeweils in Reinkultur, für die Bildauswertung ungeeignet. Assoziationen der Art, daß z.B. in semantischen Netzen eine rein deklarative Modellrepräsentation und z.B. in Produktionssystemen eine rein prozedurale Modellrepräsentation realisiert ist, sind falsch. Man kann bei semantischen Netzen von einer überwiegend deklarativen Modellrepräsentation und bei Produktionssystemen von einer überwiegend prozeduralen Modellrepräsentation sprechen. Dabei bezieht sich das *überwiegend* nicht auf die „Menge“ des Modells, die deklarativ oder prozedural repräsentiert ist, sondern auf das, was bei einer Vorstellung (Präsentation) des Modells in den Vordergrund tritt. Dies sind bei einem semantischen Netz die Konzepte und die Relationen (also deklarative Komponenten), bei einem Produktionssystem die Regeln (also prozedurale Komponenten). Man darf jedoch nicht vergessen, daß in einem semantischen Netz auch Prozeduren zur Berechnung der Attribute von Konzepten angegeben werden müssen oder daß in einem Produktionssystem die in den Produktionen vorkommenden Objekte als Konzepte deklariert werden müssen.

Wir haben die Repräsentation der Modelle in Produktionsnetzen und semantischen Netzen vorgestellt, ohne dabei ein Verfahren zur Wissensnutzung vorstellen zu müssen. Dies zeigt, daß es eine Trennung zwischen der Wissensrepräsentation und der Wissensnutzung gibt. Die Repräsentation von Modellen in Produktionsnetzen und semantischen Netzen fördert die Erstellung struktureller Modelle. Strukturbildend ist in beiden Repräsentationen die Bestandteil-Relation.

2.3 Implementierungsebene

Im vorhergehenden Kapitel 2.2 wurden zwei Formen zur Repräsentation eines Modells vorgestellt, die losgelöst von der Art der Implementierung und der Vorgehensweise zur Wissensnutzung betrachtet wurden. In diesem Kapitel wird für die beiden Repräsentationen jeweils eine Umsetzung zur maschinellen Bildauswertung beschrieben.

2.3.1 Implementierung des Produktionsnetzes

Produktionsnetze, wie in Kap. 2.2.1 vorgestellt, werden in dem sogenannten BPI-System implementiert. BPI steht als Abkürzung für **B**lackboard-based **P**roduktion System for **I**mage Understanding. Auf die Blackboard-Architektur und den Datenfluß im BPI-System wurde bereits im letzten Zwischenbericht [108] eingegangen (siehe auch [106] [107]).

Aufgrund des Produktionsnetzes wird ein Modul generiert, das festhält, welche Hypothesen einer Instanz zugeordnet werden. Diese Zuordnungs-Vorschrift erhält man, indem man für jedes Ausgangskonzept einer Produktion eine *Teilvon*-Hypothese aufstellt, die den Eingangskonzepten zugeordnet werden kann. Die Überprüfung der Hypothese erfolgt in einem für eine Produktion spezifischen Prozeßmodul. Die zu überprüfenden Prädikate stehen im Bedingungsteil der Produktion. Falls diese erfüllt sind, so wird der zugehörige Aktionsteil ausgeführt. Die Attribute der Instanz in der Ausgangskonfiguration wird aus den Attributen der Instanzen der Eingangskonfiguration berechnet.

$$\begin{aligned}
 R_A &= \{(x, y); (x_t - \Delta x \leq x \leq x_t + \Delta x) \wedge (y_t - \Delta y \leq y \leq y_t + \Delta y)\} \\
 R_\varphi &= \{\varphi; \varphi_t + 90^\circ - \Delta\varphi \leq \varphi \leq \varphi_t + 90^\circ + \Delta\varphi \text{ mod } 180^\circ\} \\
 S &= \{o; \text{type}(o) = \text{LINE}\} \cap \{o; e(o) \in R_A\} \cap \{o; \varphi(o) \in R_\varphi\}
 \end{aligned}$$

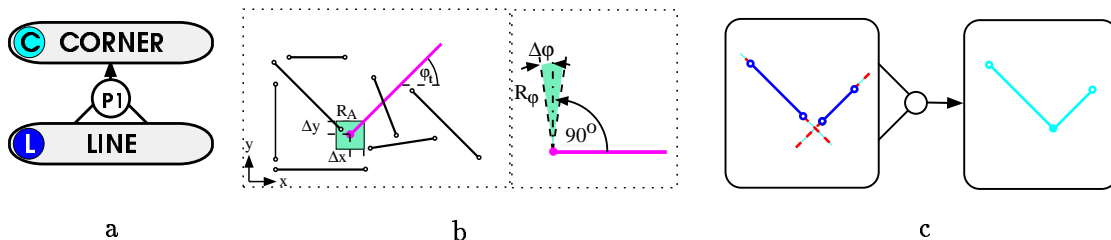


Abb. 2-5: Produktion zur Winkelbildung. a) Produktion, b) Suchbereiche, c) Beispiel-Instanzen

Die Relation über einer Menge von Objekten wird so umformuliert (invertiert), daß ausgehend von einem triggernden Objekt passende Objekt-Partner gesucht werden. D.h., für eine zu überprüfende Relation zwischen Instanz-Paaren werden jeweils ausgehend von einer Instanz die Attribute für die andere Instanz so spezifiziert, daß zunächst

lediglich geprüft wird, ob mindestens eine Instanz mit den spezifizierten Attributwerten existiert. Dazu werden Suchbereiche im Attributraum aufgespannt.

Nehmen wir an, daß aus einer Menge von Instanzen Linie (LINE) eine Menge von Instanzen rechter Winkel (CORNER) extrahiert werden soll.



Ein Instanzen-Paar LINE soll dann durch eine Instanz CORNER ersetzt werden, wenn (a) die Endpunkte benachbart sind und (b) die beiden Linien einen rechten Winkel einschließen. Dazu wird jeder Instanz LINE die Hypothese *part_of-CORNER* zugeordnet. Zur Überprüfung der Hypothese wird um den Endpunkt $e_t = (x_t, y_t)$ des triggernden Objektes eine Suchfläche R_A konstruiert und bezüglich der Orientierung ein Such-Intervall R_φ gebildet. Die Suchfläche R_A gibt die tolerierten Abweichungen der Nachbarschaft an und kann durch einen Kreis oder einfach durch ein Quadrat begrenzt werden. Ebenso gibt $\Delta\varphi$ die tolerierte Abweichung von der Rechtwinkligkeit an. Es wird nun geprüft, ob kompatible Partner existieren, d.h. Instanzen LINE, deren Attribute beide Bedingungen erfüllen ($S \neq \emptyset$). Die Umsetzung der Mengen-Schreibweise in Abb. 2-5 in Programm-Code wird durch die eigens dafür entwickelte Mengen-orientierte Programmiersprache BPI unterstützt. Wird im Suchbereich S eine Instanz LINE gefunden, so wird eine objektspezifische Generierungsfunktion für eine neue Instanz CORNER aufgerufen. Diese berechnet aus den Attributwerten der beiden Instanzen LINE den Scheitelpunkt, der sich aus dem Schnittpunkt der beiden Linien oder deren Verlängerungen ergibt. Als weitere Attribute werden außerdem die Orientierung des Winkels und die Längen der Schenkel bestimmt. Mit diesen Attributwerten wird eine neue Instanz CORNER erzeugt.

2.3.2 Implementierung des semantischen Netzes

Semantische Netze gibt es in vielen syntaktischen Variationen. Eine besondere Art von semantischen Netzen, die den speziellen Anforderungen der Mustererkennung Rechnung tragen, kann mit dem Programmsystem ERNEST erstellt werden. Eine detaillierte Beschreibung von ERNEST findet man z.B. in [48,75,94]. In den folgenden Abschnitten wollen wir auf die für die Wissensrepräsentation vorgenommenen Erweiterungen des Systems gegenüber allgemeinen semantischen Netzen eingehen.

Knoten

Zu den Knotenarten *Konzept* und *Instanz* wird in ERNEST die Knotenart *modifiziertes Konzept* hinzugefügt. Ein modifiziertes Konzept wird während der Wissensnutzung als ein Zwischenergebnis bei der Bildung von Instanzen erstellt. Es widerspiegelt das für ein Konzept aus dem Kontext der aktuellen Analysesituation zusätzlich gewonnene Wissen. Ein typischer Unterschied zwischen einem modifizierten Konzept und dem Konzept, aus dem das modifizierte Konzept entstanden ist, besteht darin, daß ein Teil der Attribute bereits berechnet werden konnte oder daß Beschränkungen für den Wertebereich der Attribute angegeben werden können.

Kanten

Ähnlich den Bestandteilkanten werden *Konkretisierungskanten* als zusätzlicher Kanten-typ eingeführt. Konkretisierungskanten verbinden Konzepte auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen. Dadurch werden die Konzepte gruppiert, wobei die Konzepte innerhalb einer Gruppe als „ähnlich konkret“ oder „ähnlich abstrakt“ anzusehen sind. Ein Konzept *road* kann z.B. als der Konkretisierungsebene „Objekte in Siedlungen“ zugehörig betrachtet werden. Eine Konkretisierung dieses Konzeptes in der Konkretisierungsebene „Geometrie“ wäre dann z.B. das Konzept *parallel lines*. Die niedrigste Konkretisierungsebene umfaßt die Konzepte im Signalbereich, während die höchste Konkretisierungsebene in der Regel das Analyseziel enthält. Dazwischen können sich weitere Konkretisierungsebenen befinden.

Bestandteilkanten kann die Eigenschaft der *Kontextabhängigkeit* zugewiesen werden. Wird eine Bestandteilkante als kontextabhängig markiert, so bedeutet dies, daß ein Teil eines Objektes nur im Kontext des gesamten Objektes erkannt werden kann. So ist z.B. die Erkennung eines freien Platzes als Innenhof nur im Kontext des ihn umgebenden Gebäudes möglich.

Weiterhin können Bestandteil- oder Konkretisierungskanten als *notwendig*, *optional* oder *inhärent* gekennzeichnet werden. Notwendige Bestandteile oder Konkretisierungen eines Konzeptes müssen vorhanden sein, um das Konzept vollständig (im Sinne der Aufgabenstellung) zu beschreiben. Eine Instanz für ein Konzept kann nur dann existieren, wenn auch Instanzen für alle notwendigen Bestandteile und Konkretisierungen

dieses Konzeptes existieren. Weil z.B. in Luftbildern hauptsächlich die Dächer von Gebäuden sichtbar sind, würde in einem Modell für die Luftbildauswertung die Bestandteilkante von dem Konzept **building** zu dem Konzept **roof** (Abb. 2-4) als notwendig markiert werden.

Optionale Bestandteile oder Konkretisierungen können zu einer erweiterten Beschreibung beitragen oder zusätzliche Hinweise z.B. für die Existenz einer Instanz des Konzeptes in den Sensordaten liefern. Ihr Vorhandensein ist jedoch nicht zwingend erforderlich. In Abb. 2-4 kann zum Beispiel die Bestandteilkante zwischen **parking lot** und **car** als optional markiert sein, da sich nicht immer Autos auf einem Parkplatz befinden müssen.

Inhärent sind jene Teile, die nicht beobachtbar sind, aber als vorhanden vorausgesetzt werden. In einem Modell für die Luftbildauswertung kann z.B. die Bestandteilkante von einem Konzept **car** zu einem Konzept **engine** als inhärent gekennzeichnet sein.

Knoteneinträge

Für Attribute der Konzepte, modifizierten Konzepte und Instanzen können *Beschränkungen* angegeben werden. Damit kann sowohl a-priori Wissen als auch während der Analyse erworbenes Wissen über den Wertebereich der Attribute dargestellt werden. Die Beschränkungen, die sich aus der aktuellen Analysesituation ergeben, können mit Hilfe der *inversen Attributberechnungsfunktionen* erfaßt und in die entsprechenden Unterkomponenten der Attribute eingetragen werden.

Für modifizierte Konzepte und Instanzen kann angegeben werden, wie gut sie den Modellen entsprechen. Das wird über die *Bewertungen* vorgenommen, die während der Analyse mit Hilfe der bei den Konzepten angegebenen *Bewertungsfunktionen* bestimmt werden. Die Bewertungen haben eine entscheidende Bedeutung bei der Steuerung der Analyse.

Um es dem Anwender zu ermöglichen, anwendungsspezifische Beziehungen zwischen Objekten zu modellieren, können in ERNEST *Strukturrelationen* als Einträge in den Knoten angegeben werden. Damit können zwar nicht Beziehungen zwischen beliebigen Konzepten eines Netzes angegeben werden, aber es können allgemeine Relationen zwischen den Bestandteilen oder Konkretisierungen eines Konzeptes modelliert werden. Die Strukturrelation wird mit Hilfe einer Funktion implementiert, die bewertet, wie gut die erzeugten modifizierten Konzepte oder Instanzen diese Relation erfüllen.

3. Analyse von Gebäuden und Straßen

Zur Analyse von Gebäuden und Straßen wurde am FIM das System BPI (Blackboard-based Production System for Image Understanding) eingesetzt. Die Modelle zur Analyse von Straßen in Luftbildern und Karten sowie das Analysesystem wurden bereits im Zwischenbericht II [108] beschrieben. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in diesem Berichtszeitraum auf der Modellierung von Gebäuden.

Wie in Kap. 1.2 in [108] gezeigt, stellen Karte und Luftbild unterschiedliche Abbildungen (Beschreibungen) der Szene dar. Um den unterschiedlichen Randbedingungen Rechnung zu tragen, werden auch unterschiedliche Modelle zur Analyse der Karte und des Luftbildes verwendet. Da die Bildanalyse losgelöst von der Kartenanalyse ausgeführt werden kann, wird auch die Modellierung voneinander getrennt dargestellt. Zunächst werden die Modelle für die Bildanalyse und im Anschluß die Modelle zur Kartenanalyse beschrieben. Die graphische Darstellung der Modelle erfolgt in Form von Produktionsnetzen.

3.1 Bildanalyse

Im vorhergehenden Berichtszeitraum wurde dargestellt, wie die Bildanalyse durch Karteninformation unterstützt wird. Als Beispiel wurden Straßen und Straßennetze modelliert. In frühen DFG-Arbeiten [103] wurden zur Bildanalyse bereits suburbane Siedlungsstrukturen modelliert, die aus einem Netz von Straßen mit Gebäudegruppen bestehen. Für die Gebäude wurde jedoch lediglich ein 2D-Ansatz verwendet.

Im folgenden Kapitel werden zur Bildanalyse 3D-Modelle verwendet. Dabei wird zunächst an einem einzelnen Gebäude die Analyse auf Basis einer binokularen Stereorekonstruktion beschrieben (Kap. 3.1.1). Als Erweiterung zu diesem Ansatz wird danach die Rekonstruktion durch eine multiokulare Stereorekonstruktion (Kap. 3.1.2) und die Erfassung von Umgebungsstrukturen (Kap. 3.1.3) dargestellt.

Eine Unterscheidung der Ansätze zur 3D-Rekonstruktion von Gebäuden läßt sich nach unterschiedlichen Kriterien vornehmen [35]. Wir wollen an dieser Stelle nach der Anzahl der verwendeten Bilder in monokulare, binokulare und multiokulare Rekonstruktionen unterscheiden.

Monokulare Rekonstruktion. Mit bestimmten Modellvorstellungen können Höheninformationen aus einem einzelnen Bild gewonnen werden. McGlone & Shufelt [60] bestimmen über Fluchtpunkte horizontale und vertikale Linien. Aus den vertikalen Linien werden die Wandhöhen der Gebäude geschätzt. Vertikale und horizontale Attributierungen werden zur Beschränkung der möglichen Gebäudehypothesen benutzt und vertikale Linien an Eckpunkten extrahiert, um die Strukturhöhe zu schätzen. Lin et al. [53] werten auch den Schatten von Gebäuden zur Bestimmung der Höhe aus.

Binokulare Rekonstruktion. Mit zwei verschiedenen Ansichten einer Szene und bekannten Aufnahme-Parametern kann man die Position eines Objekt-Punktes in der 3D-

Szene aus zwei korrespondierenden Bildpunkten mithilfe der Stereo-Triangulation berechnen. Viele Autoren verwenden einfache 2D-Strukturen, wie Kanten oder Ecken um durch einen Match die 3D-Position zu bestimmen (z.B. [31]). Andere Autoren verwenden komplexere 2D-Strukturen, um Objektteile zu matchen (z.B. [109], [116]).

Multiokulare Rekonstruktion. Werden Luftbilder mit hoher Längs- und Querüberdeckung aufgenommen, so stehen für einen Szenenbereich mehrere Aufnahmen zur Verfügung. Henricsson [35] verwendet zur Rekonstruktion vier Bilder. Von einem der Bilder (Ausgangsbild) werden 2D-Konturen extrahiert und in den anderen drei Bildern gematcht.

Auch Wiman & Axelsson [119] verwenden für die Rekonstruktion von Häusern mehrere Bilder. Von (allen) Bildern werden die Linienelemente in die Szene projiziert und zwei Hauptrichtungen gesucht. Aus Linien, die zu den Hauptrichtungen beitragen, werden (in der Szene) 3D-Linien gebildet und geclustert. Aus diesen geclusterten Linien werden Rechteckflächen im Raum konstruiert.

Manche Autoren gehen in ihren Arbeiten von der Annahme aus, daß vor der Rekonstruktion durch eine Detektion die ungefähre Lage von Gebäuden ermittelt wird und entsprechende Bildbereiche mit jeweils einem Haus ausgeschnitten werden (z.B. [31], [35], [119]). Die Detektion wird aufgrund zusätzlicher Informationsquellen ausgeführt, z.B. aus einem digitalen Höhenmodell (DSM) oder durch interaktive Auswahl eines Benutzers. Im Gegensatz zu diesen Ansätzen setzen wir für die Rekonstruktion generell nicht voraus, daß die Gebäudeposition bereits bekannt ist.

3.1.1 Binokulare Stereorekonstruktion

An einem einfachen Beispiel wird im folgenden Abschnitt die Lösung einer Bildanalyseaufgabe auf den Stufen der Modellierung, Wissensrepräsentation (Produktionsnetz), Vorverarbeitung, und symbolischen Analyse dargestellt.

Objektmodell DACH

In senkrecht aufgenommenen Luftbildern sind Gebäude hauptsächlich durch ihre Dächer zu erkennen (Abb. 3-1). Für eine automatische Erkennung wird daher häufig das Dach modelliert [27,28]. Für das folgende Beispiel wird von einzeln stehenden Häusern mit einfachen Giebeldächern ausgegangen. Die Abmessungen der Gebäude wie auch die Neigung der Dächer seien unbekannt.

Wegen der Variationsmöglichkeiten wird ein Haus durch ein *parametrisches* Modell beschrieben, das vier Parameter (l, w, h, γ) besitzt (Abb. 3-2a). Durch Bestimmung von konkreten Werten des Parametersatzes kann ein *formfestes* Modell (siehe Abschnitt 2.1.3) festgelegt werden. Gibt man Intervalle für die Parameter an, so wird eine ganze Klasse von *formfesten Modellen* definiert.

Abb. 3-2b zeigt Repräsentanten der Klasse S_{DACH} , die ausgehend von einem formfesten Modell mit *mittlerem* Parametersatz (Abb. 3-2a mitte) durch Variation nur eines

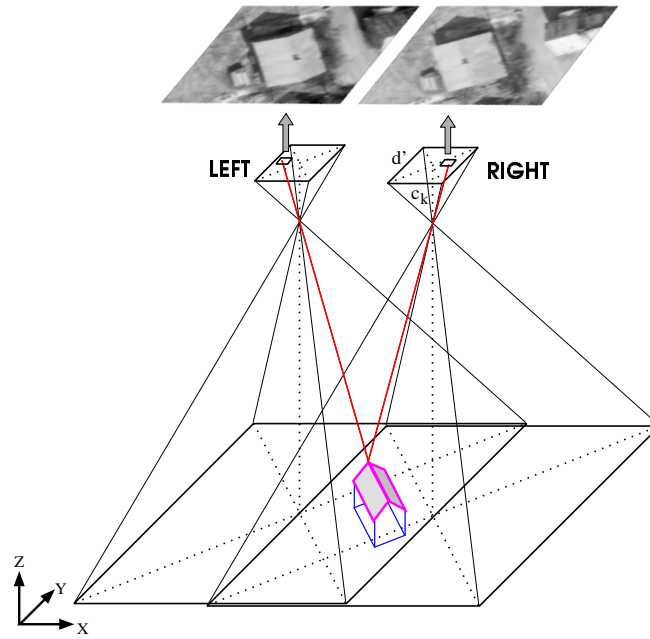


Abb. 3-1: Stereoskopische Aufnahme eines Gebäudes

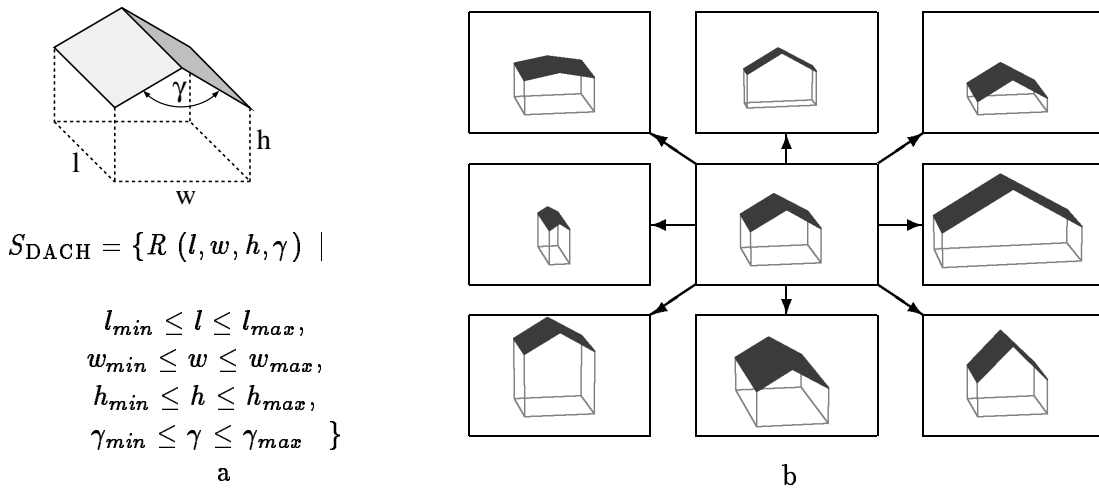


Abb. 3-2: Beispiele für spezifische Modelle. a) Parametrisches Modell DACH, b) Formfeste Modelle DACH variierend in Länge, Breite, Höhe und Dachwinkel.

Parameters, wie z.B. der Länge (vertikale Achse), der Breite (horizontale Achse), der Höhe (l.u. und r.o.) oder der Dachneigung (l.o. und r.u.) entstehen. Alle Gebäude, deren Parameterkombinationen zwischen den gezeigten Extremwerten liegen, sollen durch die Bildanalyse erkannt werden.

Produktionsnetz DACH

Ein Produktionsnetz für das vorgestellte parametrische Objektmodell DACH ist in Abb. 3-3a dargestellt. Es wird angenommen, daß die Teile des Daches als Rechtecke in der Szene und als Parallelogramme im Bild erscheinen. Ein Objekt PARALLELOGRAMM wird zerlegt in die 2D-Objekte U_STRUKTUR, WINKEL und LINIE. Beginnend mit den Primitivobjekten werden aus Paaren der Objekte LINIE Objekte WINKEL konstruiert (P_1). Wenn zwei Objekte WINKEL die Struktur eines offenen Parallelogramms formen, werden sie zu einem Objekt U_STRUKTUR zusammengefügt (P_2). Ein Objekt PARALLELOGRAMM kann zusammengesetzt werden, wenn Objekte U_STRUKTUR und LINIE kompatibel sind (P_3).

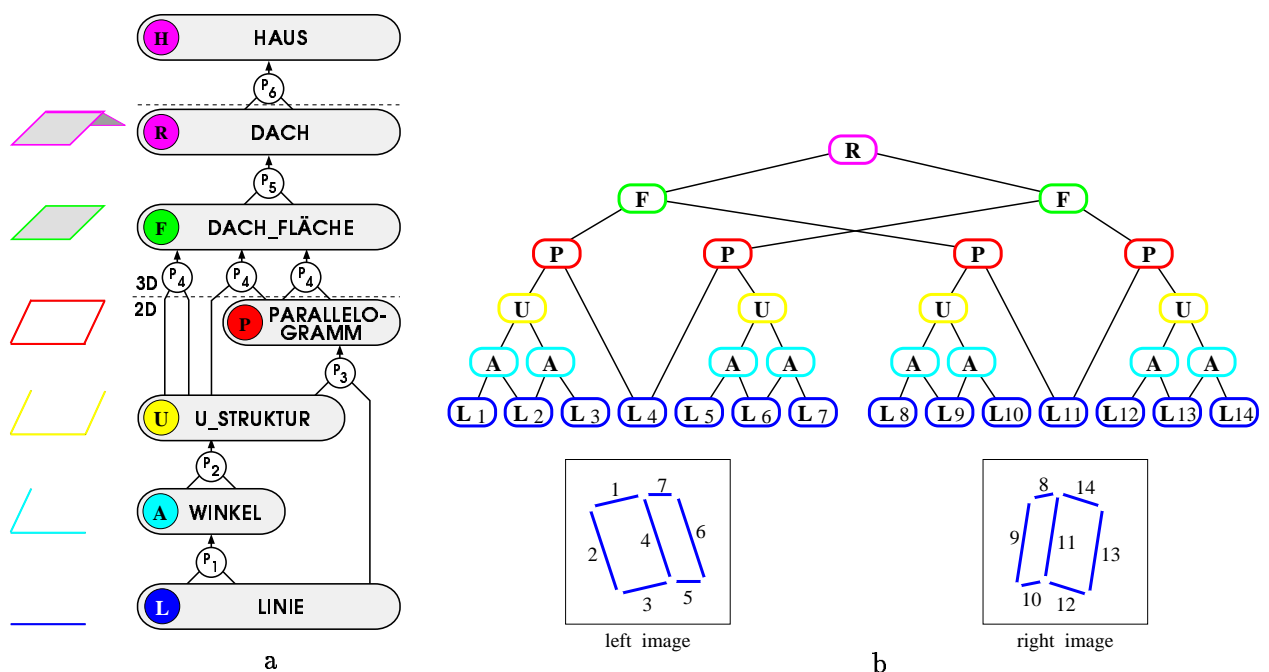


Abb. 3-3: a) Produktionsnetz DACH, b) Ableitungsgraph der Instanz DACH (R)

In der 3D-Analyse versucht man in unterschiedlichen Bildern Paare von 2D-Objekten (U_STRUKTUR oder PARALLELOGRAMM) zu finden, die die Projektion derselben Oberfläche darstellen.

Durch Berücksichtigung der Epipolargeometrie können zu einem Punkt im Bild entsprechende Kandidaten für einen korrespondierenden Punkt im anderen Bild ausgewählt werden. Aus solchen Paaren von Bildpunkten werden unter Kenntnis der Kameraparameter durch Stereo-Triangulation die 3D-Koordinaten des entsprechenden Szenenpunktes berechnet (*Punkt-Stereo*). Da sich dabei die zu den Bild-Objekten berechneten Kamera-Strahlen i.a. nicht exakt schneiden, kann man die Größe des Abstands dieser beiden Geraden zur Berechnung eines Güte-Maßes für die Zuverlässigkeit des berechneten 3D-Punktes benutzen. Analog können aus den vier Eckpunkten zweier korrespondierender Parallelogramme für das zugehörige Rechteck in der Szene die Positionen der Eckpunkte rekonstruiert werden (siehe [108]).

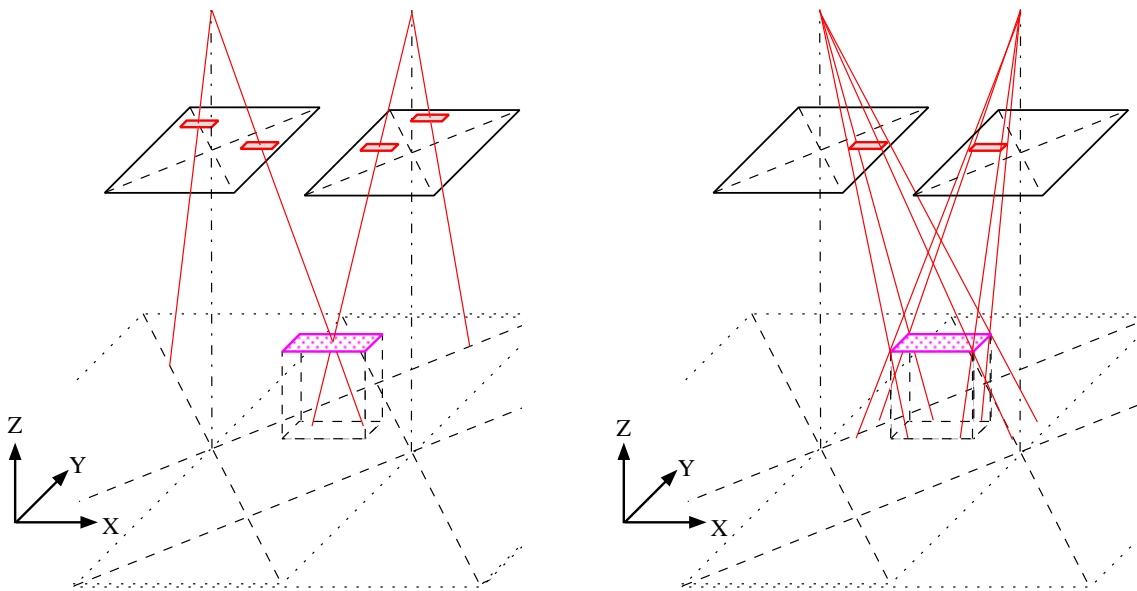


Abb. 3-4: Stereorekonstruktion von Punkten

Korrespondieren 2D-Objekte von verschiedenen Bildern, so wird daraus das 3D-Objekt DACH_HÄLFTE generiert (P_4). Sind Objekte DACH_HÄLFTE so orientiert, daß ihre Oberflächennormalen einen Winkel γ einschließen, der in einem bestimmten Winkelintervall $[\gamma_{min}, \gamma_{max}]$ liegt und sind die Eckpunkte benachbart, so wird das Objekt DACH generiert (P_5). Nach der 3D-Analyse werden Cluster der Objekte DACH untersucht. Das beste Objekt jedes Clusters wird ausgewählt und als Objekt HAUS gespeichert (P_6).

Eine mögliche Konstruktion für den Aufbau einer Instanz DACH aus 14 Instanzen LINIE ist in Abb. 3-3b durch den Ableitungsgraphen dargestellt. Ordnet man den Kanten die Bedeutung *Bestandteil* oder *Teil-von* zu, entspricht die Beschreibung einem semantischen Netz. Abb. 3-3b zeigt, daß aus $\{L_1, L_2\}$ und $\{L_2, L_3\}$ jeweils eine Instanz A zusammengesetzt wird. Diese beiden Instanzen ergeben wiederum eine Instanz U. Nach dem Produktionsnetz kann eine Instanz U aber auch genauso aus den Instanzen $\{L_1, L_4, L_3\}$ aufgebaut werden. Ein Produktionsnetz läßt somit verschiedenen Ableitungsgraphen zu und umfaßt damit verschiedene semantische Beschreibungen (semantische Netze). Um gegenüber Störungen tolerant zu sein, lassen sich die Objekte DACHFLÄCHE bei fehlenden Objekten LINIE auch direkt aus den Objekten U_STRUKTUR konstruieren (Abb. 3-3a, P_4). Auch dadurch können aus einem Produktionsnetz verschiedenartige Ableitungsgraphen entstehen.

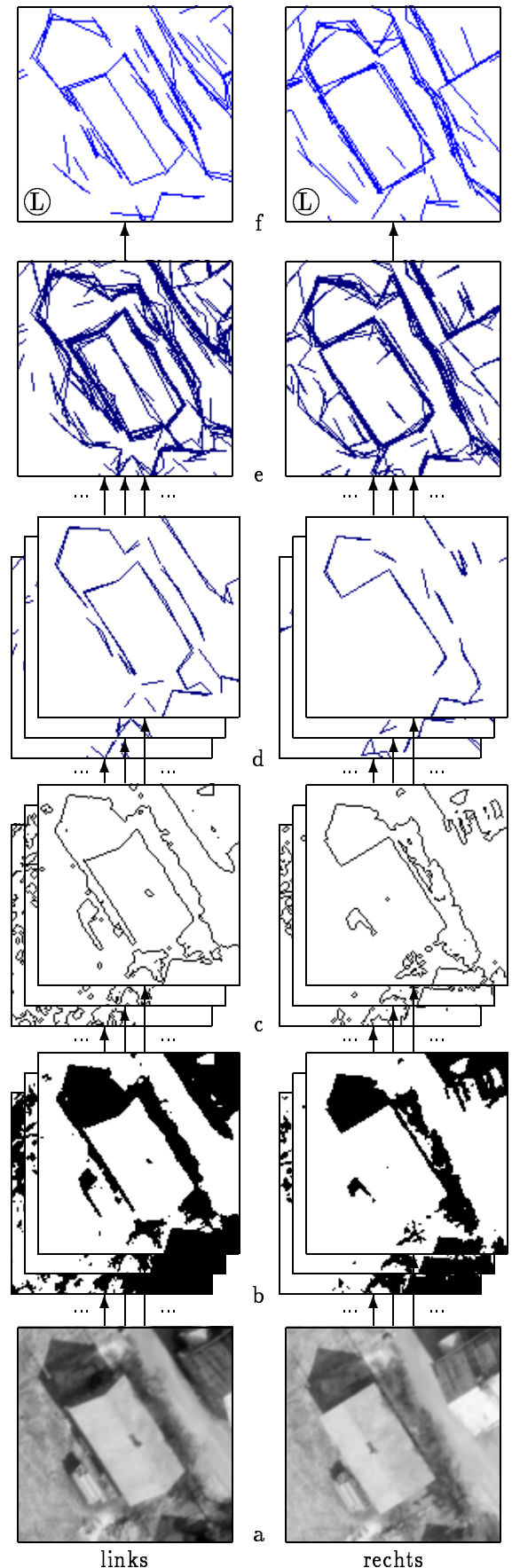
Vorverarbeitung

In der Vorverarbeitungsstufe wird aus den abgetasteten Luftbildern eine erste symbolische Beschreibung erzeugt. Prinzipiell stehen dazu eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Zur Beschreibung von *man-made*-Strukturen verwenden wir hier ein Mehrschwellen-Verfahren [108], das kurze Geradenstücke liefert. Abb. 3-5 zeigt für zwei Bildausschnitte die stufenweise Verarbeitung.

Zunächst wird das Grauwertbild durch n_t Schwellwerte in eine Sequenz von Binärbildern überführt (Mehrschwellen-Segmentierung, Abb. 3-5b). Typischerweise wird $8 \leq n_t \leq 24$ gewählt. In jedem Binärbild der Sequenz werden dann die Konturlinien detektiert (Konturdetektion, Abb. 3-5c). Ein dynamischer Split-Algorithmus [108] approximiert die Konturlinien durch kurze Geradenstücke (Konturapproximation, Abb. 3-5d). Ohne Berücksichtigung der topologischen Relationen werden die Geradenstücke aller Bilder einer Sequenz als Menge zusammengefaßt (Liniensammlung, Abb. 3-5e). Ein Gruppierungsprozeß faßt schließlich kurze kollineare Geradenstücke zu längeren Geradenstücken zusammen (Linienverlängerung, Abb. 3-5f). Diese Objekte LINIE (L) bilden die Primitivobjekte der nachfolgenden symbolischen Analyse (siehe Abb. 3-6).

Symbolische Analyse

Um den Erkennungsprozeß für ein einzelnes Gebäude darzustellen, sind in Abb. 3-6a für einen Szenenausschnitt alle Objekte, die bei der Analyse generiert wurden, zusammengestellt.



links rechts
Abb. 3-5: Vorverarbeitung (Dachanalyse)

Beginnend mit den Objekten LINIE (L) kann im linken und im rechten *Kanal* die schrittweise Zusammensetzung kompatibler Objektkombinationen bis zum Objekt DACH verfolgt werden. Durch Anwendung der Produktionen werden auf jeder Stufe zusätzliche geometrische Beschränkungen berücksichtigt. Die Verkettung (Reihenschaltung) von Produktionen in einem Produktionsnetz führt zu einer logischen UND-Verknüpfung von Beschränkungen. Verfolgt man in Abb. 3-6a die Teilbilder von (L) nach (P), so erkennt man, daß parallelogrammförmige Bildstrukturen aus den Primitivobjekten LINIE *herausgefiltert* werden.

Die in Abb. 3-6a (R) dargestellten Strukturen erfüllen die geometrischen Relationen der angegebenen Produktionen innerhalb der Toleranzgrenzen, die durch Parameter bestimmt werden. Die dargestellten Objekte DACH häufen sich in einem kleinen Bereich der Szene und bilden einen deutlichen Hinweis für ein Haus. Das Objekt DACH mit der besten Bewertung steht repräsentativ für das Hausdach in der Szene.

Das beste Objekt DACH zeigt Abb. 3-6b (oben). Die Vorgängerobjekte, die am Aufbau des Zielobjekts beteiligt sind, erhält man aus dem Ableitungsgraphen. Ein Ausschnitt dieses Ableitungsgraphen ist in Abb. 3-6 aufgezeichnet.

Die zum besten Objekt DACH gehörenden Teile DACH_FLÄCHE sind in 3D-Darstellung zu sehen. Die zu den 3D-Objekten DACH_FLÄCHE gehörenden 2D-Objekte (je ein Objekt PARALLELOGRAMM und ein Objekt U_STRUKTUR) sind in den Bildern darunter zu erkennen. Im rechten Luftbild konnte die First-Linie des Daches nicht detektiert werden, so daß die Objekte U_STRUKTUR nicht zu den Objekten PARALLELOGRAMM vervollständigt wurden. In der Abbildung kann der Ableitungsgraph der linken Dachfläche in dem linken Bild weiterverfolgt werden.

Die Vorgänger des Objektes PARALLELOGRAMM sind die Objekte LINIE und U_STRUKTUR. Das Objekt U_STRUKTUR kann über die Objekte WINKEL bis hinab zu den Primitivobjekten LINIE zurückverfolgt werden.

Zur Stereo-Rekonstruktion sind nach dem Produktionsnetz von Abb. 3-3 mindestens U-Strukturen aufzubauen. Liegen Bilder mit schwachem Kontrast vor, so können wegen fehlender Primitivobjekte an den Kanten nicht bei allen Gebäuden diese U-Strukturen gefunden werden. Eine Möglichkeit, die Toleranz gegen Störungen zu erhöhen liegt darin, auch weniger komplexe 2D-Strukturen zur 3D-Rekonstruktion heranzuziehen. Mit der Absenkung der Anforderung an die Komplexität eines 2D-Objektes ist jedoch auch eine höhere Falschalarmrate zu erwarten. Eine Möglichkeit, die Falschalarmrate zu senken, ergibt sich durch die Berücksichtigung komplexerer Strukturen, die sich aus dem Kontext der Umgebung ergeben.

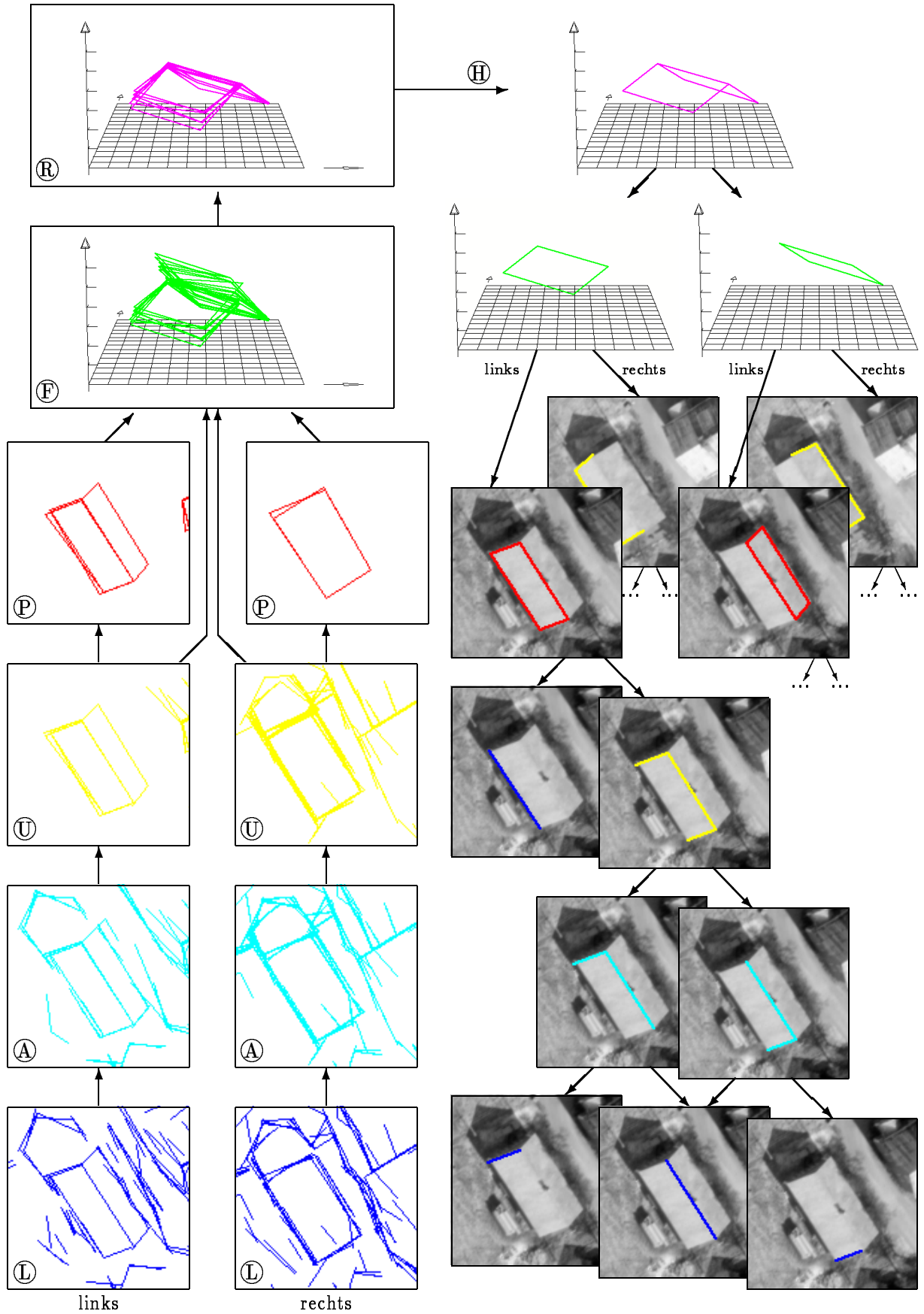


Abb. 3-6: Dachanalyse. a) Zwischenergebnisse, b) Teil des Ableitungsgraphen [109]

3.1.2 Multiokulare Stereorekonstruktion

Mit der Verwendung mehrerer unterschiedlicher Abbildungen der gleichen Szene lassen sich sowohl nicht-redundante wie auch redundante Bildinhalte auswerten.

Nichtredundanter Bildinhalt. In Bildern können je nach Blickwinkel Objekte durch andere verdeckt werden. Auch in Luftbildern treten bei Senkrecht-Aufnahmen Verdeckungen von kleinen Gebäuden durch höhere Gebäude auf. Das Problem der Verdeckung in Luftbildaufnahmen kann reduziert werden, wenn mehrere Aufnahmen berücksichtigt werden.

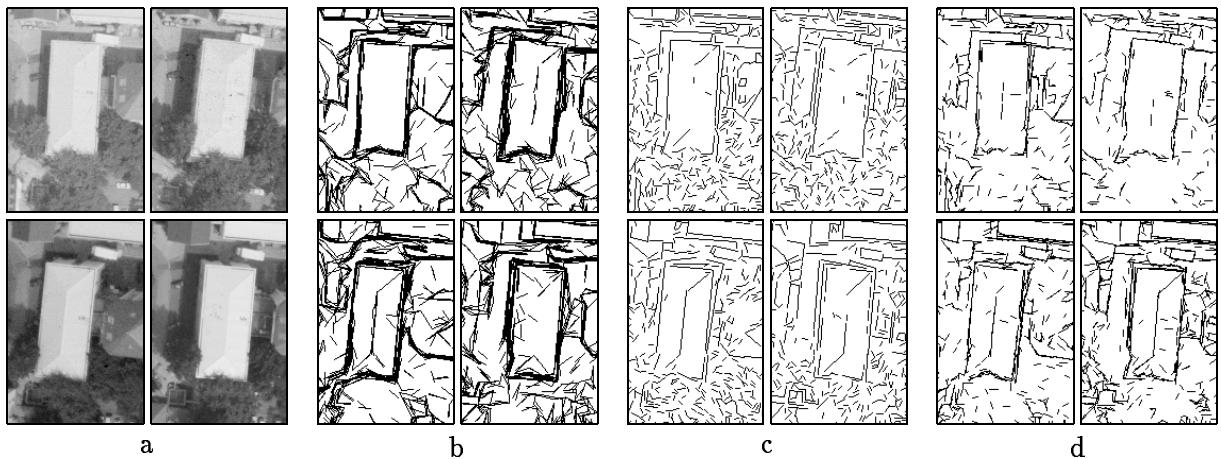


Abb. 3-7: Kantendetektion. a) vier Ansichten eines Walmdachs; b),c),d) verschiedene Kantenoperatoren angewendet auf a) [112]

Weiterhin kann sich durch unterschiedliche Betrachtungswinkel der Helligkeitsunterschied zwischen verschiedenen orientierten Flächen ändern. So können Dachkanten wie der First (ridge) bei bestimmten Betrachtungswinkeln aufgrund des geringen Kontrasts unentdeckt bleiben (siehe Abb. 3-7 obere Bilder). Auch dieses Problem kann durch Mehrfachbilder mit verschiedenen Blickwinkeln reduziert werden, wenn eine Kante wenig-



Abb. 3-8: a) Verschiedene Ansichten eines Hochhauses und b) detektierte Kanten [112]

stens in zwei Bildern auftritt.

Redundanter Bildinhalt. Durch Bildrauschen und Ungenauigkeiten bei der Verarbeitung sowie ungenaue Kameraparameter entstehen bei der Rekonstruktion Abweichungen zu den richtigen Szenenkoordinaten. Erscheint ein Punkt eines Objektes in mehreren Bildern, so können durch Zuordnung und Überlagerung (z.B. Mittelung) Störungen reduziert und die Genauigkeit verbessert werden.

Für einen kleinen Szenenbereich unseres Testgebietes liegt eine Vierfach-Überlappung durch Luftbilder vor. Abb.3-8 zeigt einen Ausschnitt, in dem ein Hochhaus abgebildet ist, das aus vier Richtungen zu sehen ist.

Zur Erkennung und 3D-Rekonstruktion des Gebäudes wird ein einfaches Modell in Form eines Quaders verwendet (siehe [108]).

Das verwendete Produktionsnetz zur Analyse des Szenenbereiches ist in Abb. 3-9 dargestellt. Die Vorverarbeitung und die 2D-Analyse wird unabhängig voneinander in jedem Bild ausgeführt. Wie in [108] werden dabei ausgehend von den Objekten LINE die Objekte ANGLE, U_STRUCTURE und PARALLELOGRAM aufgebaut. Im Gegensatz zu diesen Arbeiten werden jedoch die Objekte U_STRUCTURE aus zwei Objekten ANGLE aufgebaut. Weiterhin werden aus den Objekten ANGLE, U_STRUCTURE und PARALLELOGRAM wie im Produktionsnetz in Abb. 3-11 3D-Strukturen abgeleitet. In Erweiterung zu dem Produktionsnetz in [108] S. 54 werden auch Winkel (ANGLE) zur direkten Ableitung von 3D-Strukturen berücksichtigt. Durch die Produktionen P4, P5 und P6 werden aus korrespondierenden Instanzen des gleichen Konzeptes entsprechende 3D-Strukturen zu diesem Konzept generiert.

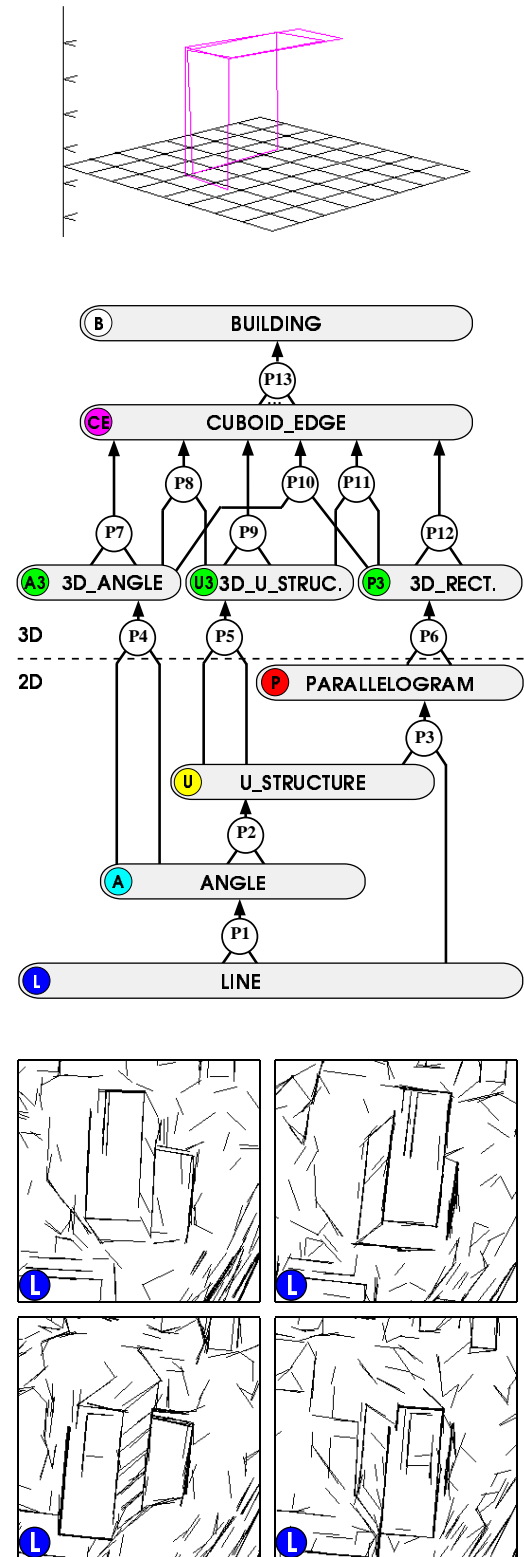


Abb. 3-9: Produktionsnetz zum Konzept BUILDING (parametrisches Modell)

Wenn n Bilder statt nur zwei Bilder verwendet werden, können im allgemeinen $n \cdot (n - 1)/2$ Paare korrespondieren. Für ein Objekt, das in vier Bildern sichtbar ist, erhält man so sechs Berechnungen für die Position im Raum. Wenn zwei Objekte 3D_RECTANGLE so orientiert sind, daß ihre Oberflächennormalen einen rechten Winkel einschließen, und sie räumlich so liegen, daß ihre Eckpunkte benachbart sind, dann wird ein Zielobjekt Quaderkante (CUBOID_EDGE) erzeugt (P_{12}). Statt zwei Objekte 3D_RECTANGLE zu kombinieren, kann auch ein Objekt 3D_RECTANGLE mit einem Objekt 3D_U_STRUCTURE (P_{11}) oder mit einem Objekt 3D_ANGLE (P_{10}) kombiniert werden.

Weitere Kombinationen sind zwei Objekte 3D_U_STRUCTURE (P_9), ein Objekt 3D_U_STRUCTURE mit einem Objekt 3D_ANGLE (P_8) oder zwei Objekte 3D_ANGLE (P_7). Beim Zusammenfügen von je zwei Objekten 3D_ANGLE, 3D_U_STRUCTURE oder 3D_RECTANGLE zu einem Objekt CUBOID_EDGE stimmen die Positionen der Endpunkte der Linien, an denen zusammengefügt wird, i.a. nicht ganz genau überein. Diese Abweichung vom perfekten Zusammenpassen nennen wir *Kompositionsfehler*. Er wird als eines der Attribute des erzeugten Objekts CUBOID_EDGE abgespeichert.

Die komplexeren Objekte (3D_RECTANGLE) erhalten eine bessere Grundbewertung als einfachere (3D_ANGLE), da bei ihnen die Wahrscheinlichkeit größer ist, daß die Lage ihrer Eckpunkte sicher ist.

Im 3D-Raum gibt es an bestimmten Stellen Häufungen von Objekten CUBOID_EDGE. In Produktion P_{13} werden die Cluster anhand der Attribute Kompositionsfehler und Bewertung untersucht und ein repräsentatives Objekt BUILDING ermittelt. Abb. 3-9 (oben) zeigt das Endergebnis der Bildanalyse .

3.1.3 Einbeziehung von Umgebungsstrukturen

Schaut man sich die in Abb. 3-10 gezeigte Szene an, so erkennt man Gebäudegruppen, die neben einer Straße liegen. Bei der Erkennung einzelner Gebäude durch einen menschlichen Beobachter spielen möglicherweise auch die Umgebungsstrukturen im größeren Zusammenhang eine Rolle. Beispiele für solche Zusammenhänge sind die Relationen



Abb. 3-10: Siedlungsstruktur im Luftbild

Kollinearität, Parallelität und Periodizität. Auch die Ähnlichkeit von Objekten beeinflusst eine Gruppierung. In Abb. 3-10 sind Häuser von (a) ähnlicher Größe mit (b) gleicher Orientierung, (c) ungefähr gleichem Abstand (d) angeordnet in Reihen (e) parallel zu einer Straße zu sehen.

Diese Zusammenhänge sollen durch ein Produktionsnetz erfaßt werden. Da sich topologische und geometrische Beschränkungen der Szene häufig durch Angabe räumlicher Relationen einfacher formulieren lassen als in den Abbildungen selbst, verwenden wir auch hier 3D-Modelle. Ein Produktionsnetz zur Auswertung eines Bildpaares der Szene zeigt Abb. 3-11. Die gegenseitige Verstärkung der Aussagen zwischen Hausanordnung und straßenähnlichem Streifen ist durch die Produktionen P19 implementiert. Die Gruppierung von Häusern erfolgt mit den Produktionen P18 und P20, das Clustern von Dachhinweisen für Haushypothesen mit der Produktion P17 und die Konstruktion von Dächern aus Paaren von Objekten `3D_RECTANGLE`, `3D_U_Structure` und `3D_ANGLE` mit P11-P16.

Viele Objekte können von der weiteren 3D-Analyse aufgrund der 3D-Beschränkungen ausgeschlossen werden. Weiteres Wissen über die Szene kann schon in der Ebene der 2D-Analyse ausgewertet werden.

Manche künstliche Objekte wie z.B. Straßen zeigen lange gerade Konturen. Diese Eigenschaft ist invariant unter einer perspektivischen Projektion. Da lange Konturen oft teilweise verdeckt sind, enthält Produktion P5 nicht nur eine Verlängerung, sondern sie ist so konzipiert, daß auch das Ausmaß der zu überbrückenden Unterbrechung berücksichtigt werden kann. Produktion P1 toleriert viel größere Unterbrechungen als P5.

Die Produktionen P2-P4 verwenden die Nachbarschaft im Bildraum. Sie können häufig versagen, da Nachbarschaft unter einer perspektivischen Projektion nicht invariant ist. Dagegen erweist sich Produktion P6 als recht stabil, obwohl sie Parallelität auswertet, die ebenfalls nicht invariant ist.

Dies rührt von der speziellen Perspektive von Luftbildaufnahmen und ist auf vom Boden aufgenommene oder gekippte Ansichten nicht übertragbar. Die Produktionen P7 bis P10 invertieren die Projektion von der Szene in das Bild. Die Produktionen P7 bis P9 konstruieren Szenenstrahlen von Bildpunkten und schneiden sie.

Geraden-Stereo. Im Gegensatz zu der in P7-P9 durchgeführten Rekonstruktion von 3D-Punkten (*Punkt-Stereo*) wird in Produktion P10 eine Gerade rekonstruiert (*Geraden-Stereo*).

Die Lage der Endpunkte von 2D-Linien und 2D-Winkeln in Bildern kann aus verschiedenen Gründen sehr unsicher sein (Verdeckungen, Unterbrechungen der Sichtbarkeit, geringer Kontrast, falsche Verlängerung über einen Endpunkt hinaus).

Die meisten dieser Faktoren, die die Lage der Endpunkte einer Linie in einem Bild stören können, wirken sich nicht auf die Orientierung der Linien aus, so daß das Attribut "Orientierung" im allgemeinen zuverlässiger ist als die Koordinaten der Endpunkte.

Beim Verfahren "Geraden-Stereo" versucht man, aus der Lage und Orientierung je einer Linie in zwei verschiedenen Ansichten auf die zugehörige Linie in der 3D-Szene zu schließen. Dazu bildet man zu einer Strecke g_1 im Bild B_1 (Abb. 3-12) die Menge der möglichen Urbilder in der Szene. Diese bilden in der Szene eine Fläche E_1 , die den Kamerastandort P_1 für die Aufnahme B_1 enthält. Ebenso bildet die Menge der möglichen Urbilder zu einer Strecke g_2 im Bild B_2 mit Kamerastandort P_2 eine Fläche E_2 . Als Schnitt dieser beiden Flächen E_1 und E_2 erhalten wir eine Gerade g^* im Raum. Falls die beiden Strecken g_1 und g_2 Abbild der gleichen Strecke g der "photographierten", in den Bildern erfassten Szene sind, so gilt:

$$g^* = g.$$

Aus der Lage der Endpunkte der Strecken in den Bildern können wir nun die Lage der

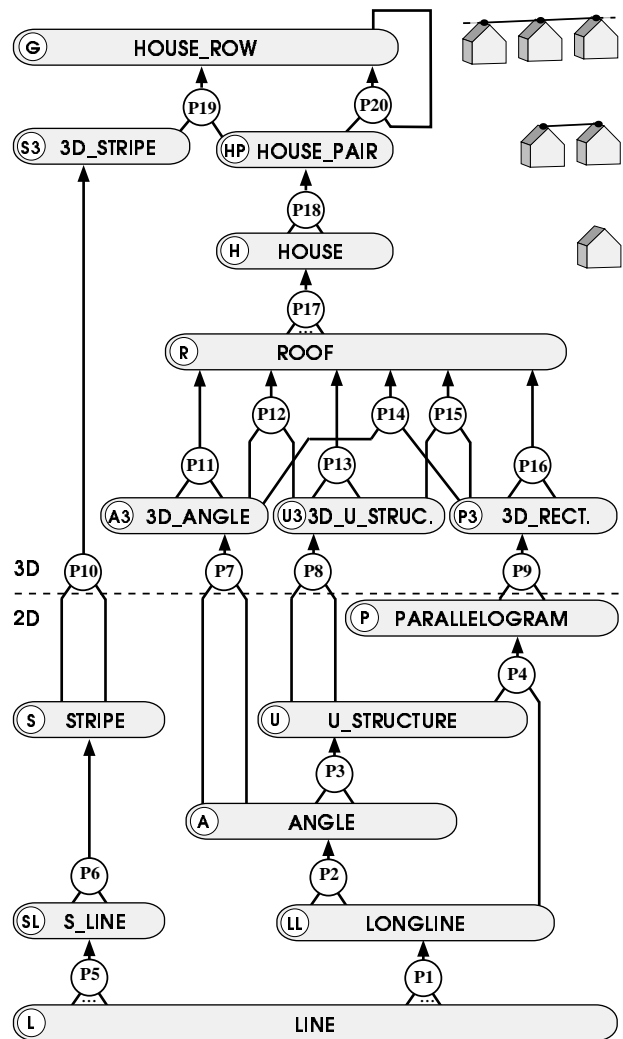


Abb. 3-11: Produktionsnetz HOUSE_ROW

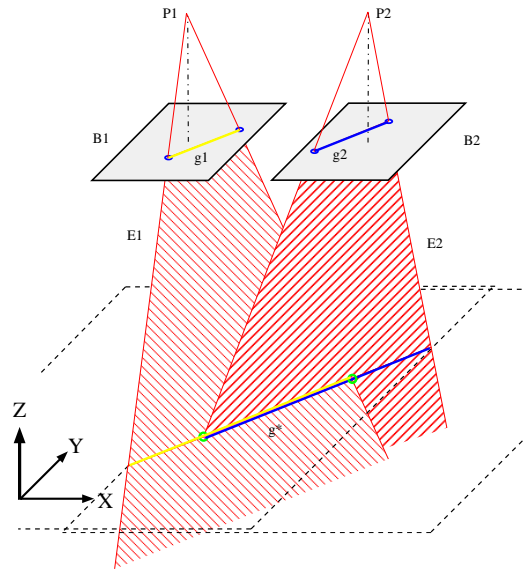


Abb. 3-12: Stereorekonstruktion von Linien

zugehörigen Punkte in der Szene berechnen. Aus den je zwei Endpunkten der beiden 2D-Linien erhalten wir im allgemeinen vier Punkte in der Szene. Wenn wir die zu den Endpunkten einer 2D-Linie konstruierten 3D-Punkte miteinander verbinden, erhalten wir wieder zwei Strecken in der Szene. Die beiden so konstruierten Strecken können verschieden zueinander liegen: eine Strecke kann ganz auf der anderen liegen (Teilmenge), die beiden können einen Überlappungsbereich haben (nicht leere Schnittmenge (siehe Abb. 3-12)), oder es kann sein, daß sie sich nicht überlappen (leere Schnittmenge).

Eine Möglichkeit, aus diesen ein plausibles Ergebnis zu konstruieren, besteht darin, die Vereinigung der beiden Strecken (evtl. ergänzt um einen zwischen beiden liegenden nicht überdeckten Bereich) zu bilden (optimistische Strategie). Dabei können durch parallele Strukturen in der Szene sehr lange 3D-Linien entstehen, zu denen es keine Entsprechung in der Szene gibt. Wir bilden daher als Ergebnis die Schnittmenge der von beiden 2D-Linien überdeckten 3D-Strecke (pessimistische/vorsichtige Strategie).

Beim Geraden-Stereo ergibt der Schnitt der beiden Flächen fast immer eine Strecke in der 3D-Szene. Man hat also anders als beim Punkt-Stereo kein "natürliches" Gütemaß. Stattdessen kann man sich bei der Analyse von Luftbildern aber auf die Konstruktion von räumlich horizontalen und vertikalen Linien beschränken.

Abbildung 3-13d zeigt die besten Objekte vom Typ HOUSE_ROW und 3D_STRIPE, die aus den beiden Luftbildern resultieren. Abb. 3-13b und 3-13c zeigen einige Zwischenergebnisse.

Das hier behandelte Produktionsnetz (Abb. 3-11) wurde gegenüber dem in Abb. 3-3 dargestellten Produktionsnetz um den Kontext Straßen und Hausgruppierung erweitert. Dies erlaubt eine größere Toleranz beim Akzeptieren von Hausdächern. Durch die Absenkung der Schwelle für die Akzeptanz von Hausdächern entsteht eine höhere Falschalarmrate. Diese Falschalarme können wieder reduziert werden, indem die Objekte im Kontext (Einbettung in komplexere Strukturen) betrachtet werden.

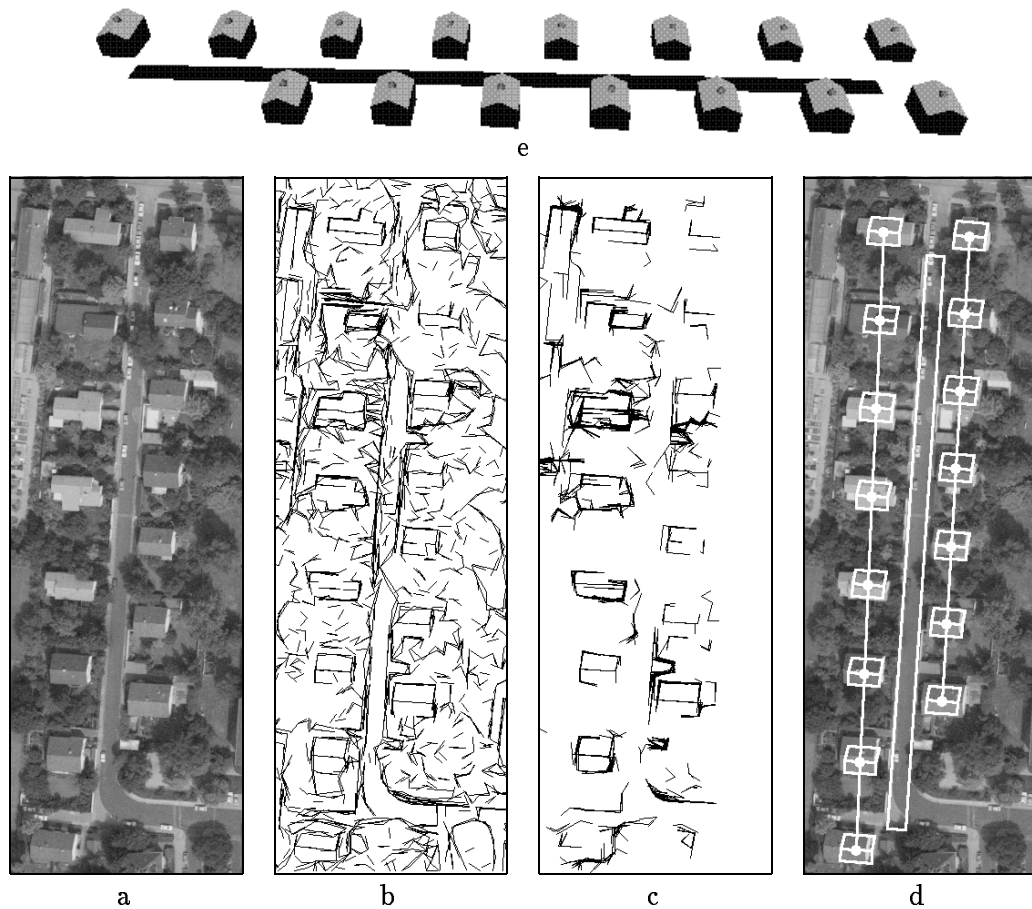


Abb. 3-13: Beispiel für die Analyse mit dem Produktionsnetz HOUSE_ROW a) Ausschnitt aus einem Luftbild, b) Objekte LINE, c) Objekte 3D_ANGLE, d) beste Objekte HOUSE_ROW und 3D_STRIPE projiziert auf a), e) 3D-Visualisierung der besten Objekte HOUSE_ROW

Oftmals können solche Strukturen jedoch nicht genutzt werden zur Erkennung, wie dies bei einzeln stehenden Häusern der Fall ist. Eine andere Möglichkeit, diese Störempfindlichkeit herabzusenken, besteht darin, mehrere Ansichten zu verwenden.

3.1.4 Komplexe Gebäudestrukturen in monokularen Senkrechtansichten

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie komplexe Gebäudestrukturen durch ein Produktionsnetz modelliert werden können. Der Einfachheit halber verwenden wir einen 2D-Ansatz und beschränken uns auf rechtwinklige Gebäudestrukturen [114]. Zueinander zeigende rechte Winkel und dazwischenliegende geraden Kanten geben einen starken Hinweis auf Gebäude. Parametrische Modelle, die solche Strukturen beschreiben, scheinen allgemein genug zu sein um einen großen Teil von Gebäuden zu erfassen.

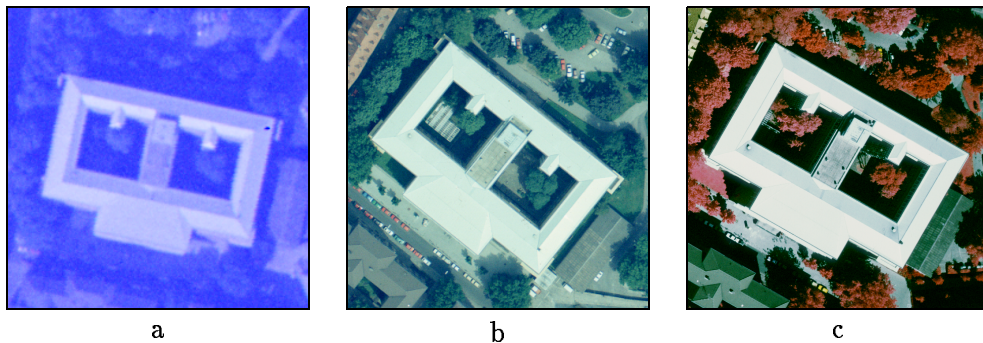


Abb. 3-14: Verschiedene Luftbilder. Originalmaßstab a) 1:40000, b) 1:6300, c) 1:4000 (CIR)

Zwei rechtwinklige Gebäudestrukturen mit acht Ecken können mit dem in Abb. 3-15a gezeigten Produktionsnetz beschrieben und analysiert werden. Die Grundstrukturen werden als B_UCO_VEX und B_UCO_CAV bezeichnet.

Beginnend mit den Objekten CORNER können zwei unterschiedliche Objekttypen durch P1 und P2 erzeugt werden: CORNER_U and CORNER_Z. Objekte CORNER_U resultieren aus einer Eingangskonfiguration von zwei Objekten CORNER, die zueinander zeigen und den gleichen Orientierungssinn besitzen (++) . Die Differenz der Orientierung beträgt 90° .

Objekte CORNER_Z werden aus zwei Objekten CORNER konstruiert, die zueinander zeigen und einen entgegengesetzten Orientierungssinn besitzen (+-) . Die Differenz der Orientierung beträgt 180° . Von beiden Objekttypen werden Hypothesen für Kanten von Gebäuden abgeleitet.

Können diese Hypothesen durch Objekte LINE, die zwischen den Ecken der Objekte CORNER liegen, bestätigt werden, so entstehen daraus mit den Produktionen P3 oder P4 die Objekte EDGE_U oder EDGE_Z. Objekte EDGE_U und EDGE_Z, die einen gemeinsamen Endpunkt haben, können in drei Weisen (+++,+--,+++) kombiniert werden.

Zwei Objekte EDGE_U bilden ein Objekt ANGLE_C (P5), zwei Objekte EDGE_Z bilden ein Objekt ANGLE_O (P7) und die Kombination der Objekte EDGE_U und EDGE_Z bildet ein Objekt ANGLE_S (P6).

Die Objekte ANGLE_C oder ANGLE_S können weiterhin mit den EDGE_U oder EDGE_Z kombiniert werden, um U-Strukturen zu konstruieren, deren Enden zueinander zei-

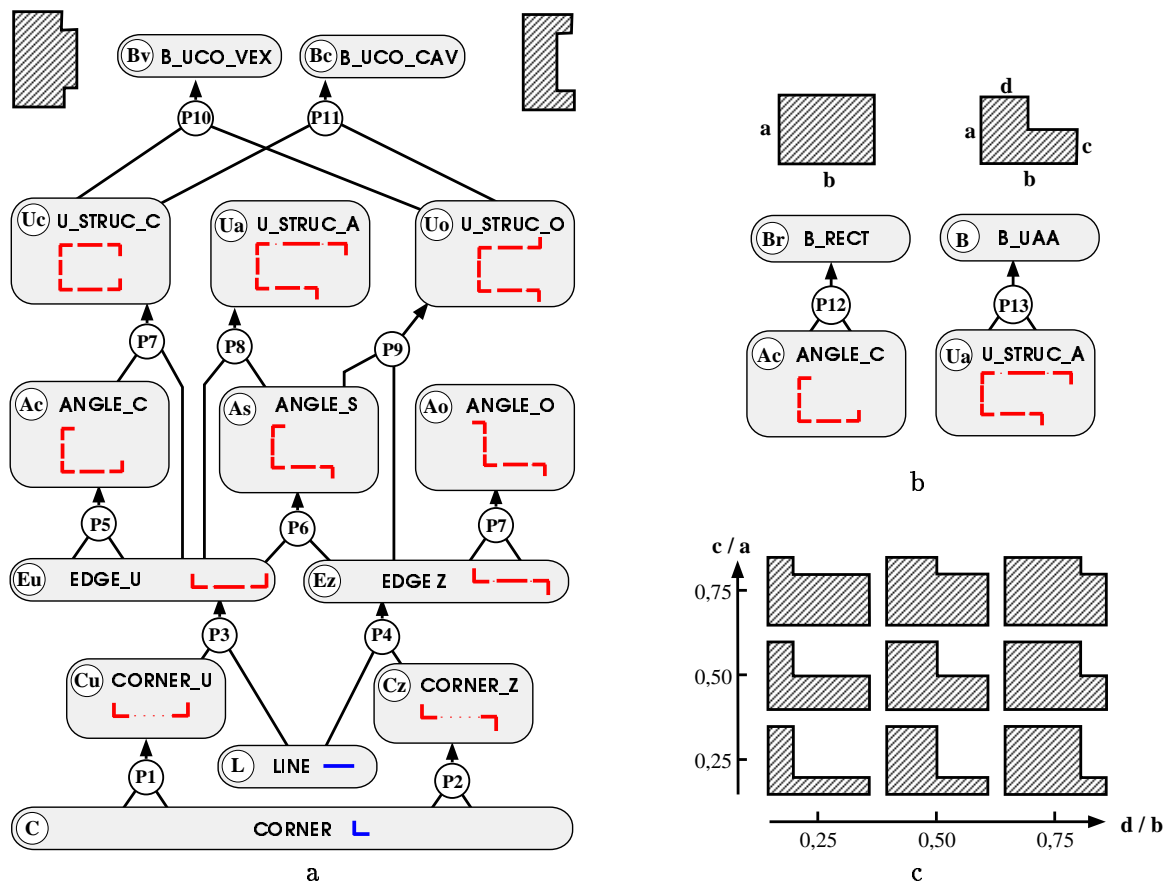


Abb. 3-15: Produktionsnetze a) B_UCO_Cav und B_UCO_Vex (Parametrische Modelle), b) B_RECT und B_UAA; c) Parametervariationen zu b)

gen (U_STRUC_C)(closing; ++++), in die gleiche Richtung zeigen (U_STRUC_A)(angled; +++-), oder in unterschiedliche Richtungen zeigen (U_STRUC_O)(opening; +---).

Weiterhin kombinieren wir die Objekte U_STRUC_C und U_STRUC_O in zwei verschiedenen Weisen (P10, P11) um die Kontur zu schließen. Wird die Fläche eines Objektes U_STRUC_C durch ein Objekt U_STRUC_O vergrößert, entsteht ein Objekt B_UCO_VEX. Wird die Fläche eines Objektes U_STRUC_C durch ein Objekt U_STRUC_O verkleinert, entsteht ein Objekt B_UCO_CAV.

Weitere Strukturen, beispielsweise mit vier und sechs Ecken (Abb. 3-15b), können aus den Grundformen der U-Strukturen, Winkel und Kanten zusammengesetzt werden. Als Beispiel für die Variabilität von Gebäuden, die durch ein einfaches parametrisches Modell erfaßt werden können, ist das Konzept B_UAA dargestellt. Gezeigt sind Realisationen des Konzepts durch Variation der Parameterverhältnisse c/a und d/b auf die Werte 0.25, 0.50 und 0.75. Diese Parameter-Verhältnisse liefern auch Information über das Aussehen der Form. Wenn beide Verhältnisse groß sind ($c/a > 0.5$; $d/b > 0.5$), sieht das Objekt wie ein Rechteck mit einem fehlenden Flächenteil aus. Wenn ein Verhältnis klein ist und das andere groß (z.B. $c/a > 0.5$; $d/b < 0.5$), dann sieht das Objekt wie ein Rechteck mit einem zusätzlichen Flächenteil aus. Sind beide Verhältnisse klein ($c/a < 0.5$; $d/b < 0.5$), dann besitzt das Objekt eine L-Form.

Das Ergebnis einer Analyse von Abb. 3-14b mit dem Produktionsnetz von Abb. 3-15a ist mit den Zwischenergebnissen auf den verschiedenen Objektebenen in Abb. 3-16 dargestellt.

Beginnend mit den Primitivobjekten CORNER (Abb. 3-16C) und LINE (Abb. 3-16L) wird durch Kombination von rechtwinkligen Teilobjekten versucht Grundformen zu konstruieren. Die Abbildungen 3-16Cu 3-16Cz zeigen die aus der Menge Corner abgeleiteten Objekte CORNER_U und CORNER_Z, die Hypothesen für die Objekte EDGE_U und EDGE_Z liefern. Mit den Objekten LINE wird die Anzahl der tatsächlich generierten Objekte EDGE_U und EDGE_Z stark gesenkt. Weitere Reduktionen erfolgen durch die Anwendung der Produktionen P5-P7 (siehe Abb. 3-16Ac,As) und der Produktionen P7-P9 (siehe Abb. 3-16Uc,Uo). Auf der Ebene der Zielobjekte bleiben nur die Gebäudekonturen übrig (Abb. 3-16Bv, Bc). Das Gebäude kann durch die Außenkontur B_UCO_VEX und die beiden Innenkonturen B_UCO_CAV beschrieben werden.

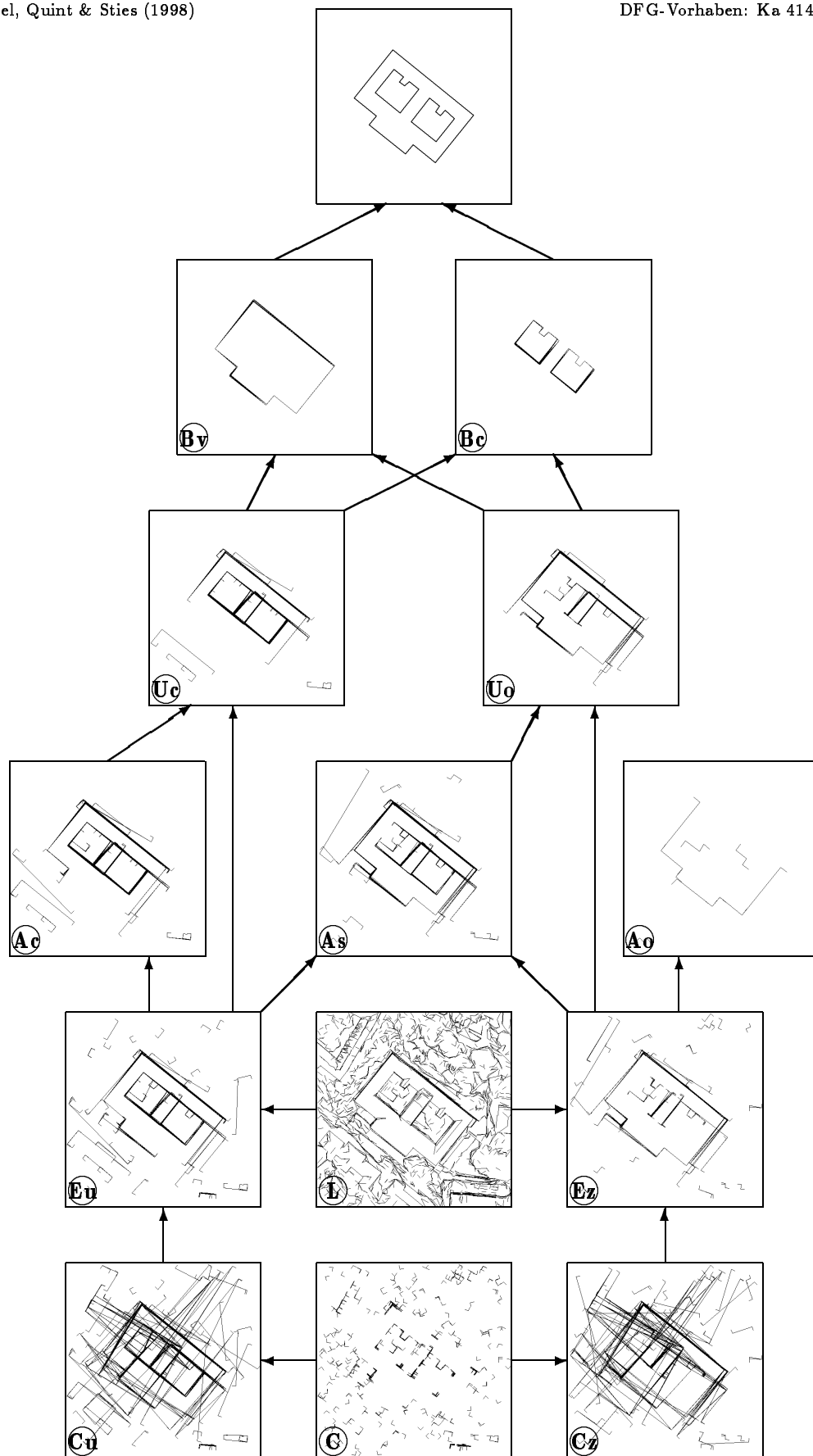


Abb. 3-16: Zwischenergebnisse der Analyse von Abb. 3-14b (Vertikale Ansicht)

3.1.5 Komplexe Gebäudestrukturen in monokularen Schrägsichten

Während für senkrechte Ansichten horizontale rechtwinklige Gebäudekonturen direkt in den detektierten Konturlinien gesucht werden können, ist für Schrägsichten, wie in Abb. 3-17 abgebildet, der Effekt der perspektivischen Veränderung der Winkel zu berücksichtigen (Abb. 3-18a).

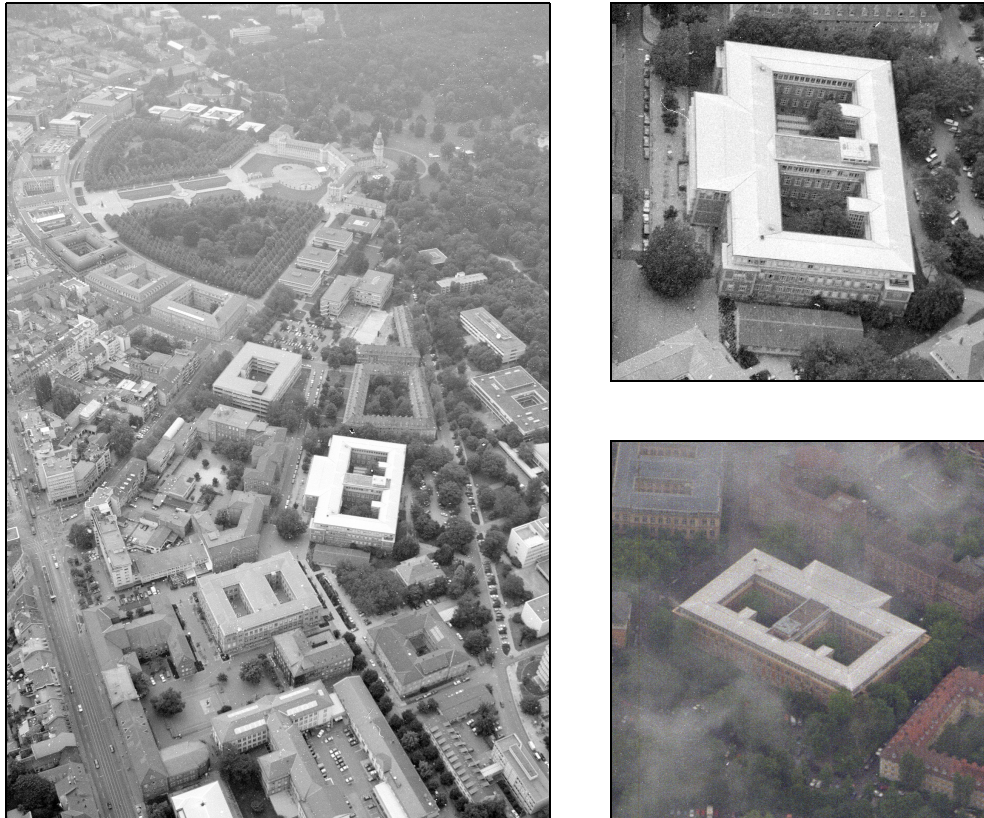


Abb. 3-17: Luftbild, Schrägsichten zu Abb. 3-14

Unter Kenntnis des Horizontes, des Bildhauptpunktes und der Kamerakonstanten können für horizontale rechte Winkel unter Annahme vereinfachter Bedingungen folgende Zusammenhänge berechnet werden (Abb. 3-18b).

Der Horizont, der nicht im Bild sichtbar sein muß, sei durch die Gerade $ax + by = c$ gegeben. Die Gleichung kann aus dem Roll- und Elevationswinkel bestimmt werden. Das Lot des Hauptpunktes M auf den Horizont bestimmt sich durch den Schnitt der Gerade $bx - ay = bM_x - aM_y$ mit dem Horizont. S ist der Fluchtpunkt der Projektion der Kamerablickrichtung auf die horizontale Ebene im Raum.

Liegt eine im Bild gegebene Linie l in der Szene horizontal, so schneidet sie den Horizont im Fluchtpunkt F . Dieser Schnittpunkt ist allen Geraden gemeinsam, die in der Szene parallel zu dieser Linie verlaufen. Der Abstand \overline{FS} ist ein Maß für den Winkel

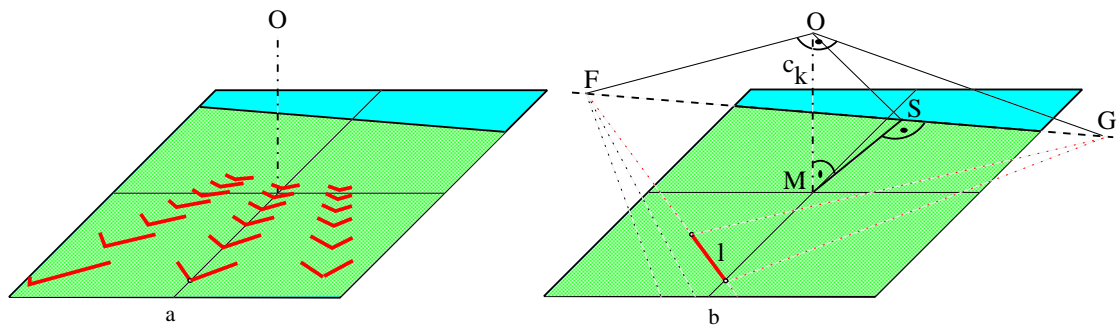


Abb. 3-18: a) Horizontale rechte Winkel in Schrägsicht, b) Konstruktion der Fluchtpunkte

zwischen der Orientierung von l und der Projektion \overline{MS} von der Kameraachse auf die horizontale Ebene.

Zur Erzeugung der Primitivobjekte CORNER werden horizontale Objektkonturen gesucht, die in der Szene einen rechten Winkel einschließen.

Horizontale Linien in der Szene, die senkrecht zur Linie l liegen, laufen zum Fluchtpunkt G auf dem Horizont im Bild. Die rechtwinkligen Dreiecke FSO und OSG sind ähnlich und so gilt $\overline{SG} = \overline{SO}^2 / \overline{FS}$. Der Abstand \overline{SO} ergibt sich aus dem rechtwinkligen Dreieck OMS mit $\overline{SO}^2 = \overline{MO}^2 + \overline{MS}^2$.

Fluchtet die Linie l in S , ist also $\overline{FS} = 0$, kann der Schnittpunkt G nicht berechnet werden. In diesem Fall sind die rechtwinkligen Linien parallel zum Horizont orientiert. Ist die Linie l parallel zum Horizont orientiert, existiert F nicht. In diesem Fall fluchten die rechtwinkligen Linien in S .

Diese geometrische Konstruktion geht von einem Lochkameramodell aus. Sie ist nicht anwendbar auf verzerrende Weitwinkelobjektive. Da in der Nähe des Horizontes die Berechnungen instabil werden, bleiben die dort lokalisierten Objekte unberücksichtigt. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge werden für Schrägsichten in der Vorverarbeitungsstufe die Objekte Corner generiert.

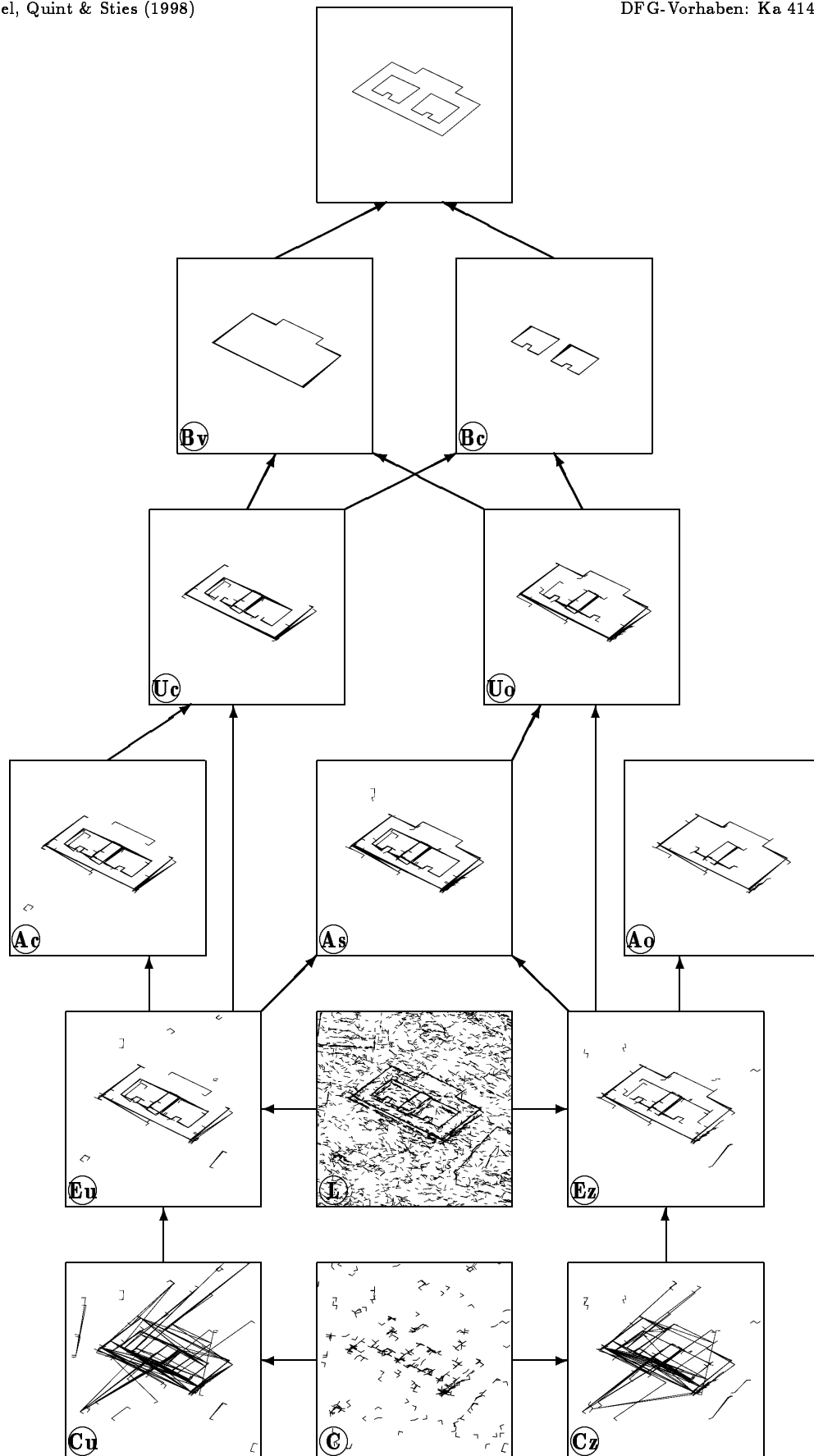


Abb. 3-19: Zwischenergebnisse zu Abb. 3-17 (Schrägsicht)

3.2 Kartenanalyse

Im Bereich der Wissensakquisition für geographische Informationssysteme (GIS) werden für verschiedene Aufgabenstellungen Bildanalyseverfahren eingesetzt. In manchen Fällen kann davon ausgegangen werden, daß für das GIS bereits eine Szenenbeschreibung in Form einer Karte vorliegt.

Ein Ziel der Bildanalyse kann z.B. darin liegen, zusätzliche Beschreibungen oder Interpretationen zur Karte aus dem Bild zu gewinnen. Liegt z.B. eine Karte zu einem urbanen Gebiet vor, in der typischerweise lediglich der Grundriß von Gebäuden verzeichnet ist, so kann das Ziel einer Bildanalyse die Erweiterung der Beschreibung durch Extraktion von Gebäudehöhen, Dachformen oder Feststellung der Nutzung von Hofflächen liegen. Geht man davon aus, daß die Karte zum Zeitpunkt der Bildaufnahme aktuell ist, so kann die Information aus der Karte als Vorwissen bei der Bildanalyse genutzt werden um z.B. den Berechnungsaufwand zu reduzieren (Beschränkung des Suchraumes).

Eine andere Aufgabe der Bildanalyse ist die Änderungsanalyse zur Kartenfortführung. In diesem Fall setzen wir voraus, daß die Karte zum Zeitpunkt der Bildaufnahme nicht aktuell ist.

Sowohl für die Bildanalyse unter Verwendung der Karte wie auch für die Kartenfortführung ist eine hierarchische Beschreibung der Karte hilfreich. Diese Beschreibung wird unter Verwendung von parametrischen und generischen Modellen durch eine Kartenanalyse erzeugt.

Wir verwenden eine großmaßstäbige Vektorkarte, die in verschiedenen Layern organisiert ist, wobei jeder Layer eine andere Klasse von Objekten enthält. Einer dieser Layer enthält große Gebäude mit ihren Teilen.

3.2.1 Generisches Gebäudemodell

Die Aufgabe des ersten Schrittes der Kartenanalyse ist es, Gebäudeteile zu separieren, eingeschlossene Flächen zu bestimmen und Gebäudeteile zu gruppieren. Abb. 3-20a zeigt ein Produktionsnetz eines generischen Modells zur Analyse von Gebäudekomplexen, das die topologischen Eigenschaften Verbundenheit, Einschließungen und Enthaltensein untersucht.

Ausgehend von Objekten LINE, werden Objekte POLY zusammengesetzt, wenn zwei Linien einen gemeinsamen Endpunkt besitzen, der nicht Verzweigungspunkt ist (P1). Solche Polygone können durch die Produktion P2 mit Objekten LINE verlängert werden. Besitzt ein Polygon an beiden Endpunkten einen Verzweigungspunkt, so wird daraus ein Objekt unverzweigtes Polygon (POLY_U) erzeugt (P3). Objekte LINE, die schon zu Beginn zwei Verzweigungspunkte besitzen, werden durch Produktion P4 direkt in Objekte POLY_U überführt.

Auf der Basis der unverzweigten Polygone POLY_U werden nun die geschlossenen Polygone gesucht, die minimale abgrenzbare Flächen einschließen (Maschen). Dazu werden Objekte POLY_U so verbunden, daß ein Pfad mit maximalem Fortsetzungswinkel

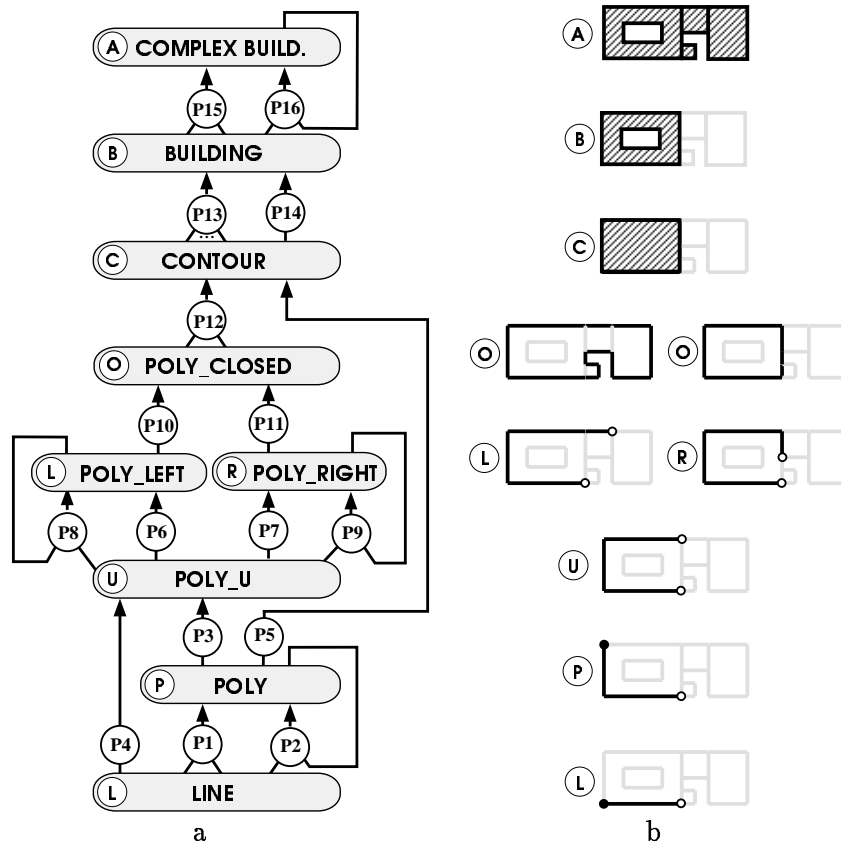


Abb. 3-20: a) Produktionsnetz COMPLEX_BUILDING, b) Beispiele für Instanzen

(POLY_LEFT) (P6, P8) und ein Pfad mit minimalem Fortsetzungswinkel (POLY_RIGHT) (P7, P9) verfolgt wird.

Schließen sich diese Polygone durch die Produktionen P10 und P11, so werden daraus Objekte POLY_CLOSED erzeugt. Aus den Objekten POLY_CLOSED wird durch paarweise Überlagerung der eingeschlossenen Fläche jeweils ein Objekt CONTOUR, bestimmt: die Kontur, die die kleinere Fläche besitzt (P12). Können Polygone ohne Verzweigungspunkte geschlossen werden, so wird durch die Produktion P5 direkt ein Objekt CONTOUR erzeugt. Liegen in einer Kontur eine oder mehrere Innenkonturen, so werden diese zu einem Objekt BUILDING zusammengefaßt (P13). Die Produktion P14 überführt Gebäudekonturen, die weder in anderen Konturen liegen, noch selbst Konturen enthalten, in Objekte BUILDING. Aneinanderliegende Objekte BUILDING werden zu einem Objekt COMPLEX_BUILDING zusammengefaßt (P14) und eventuell um weitere Gebäude erweitert.

Ein Beispiel für eine Kartenanalyse mit dem vorgestellten Produktionsnetz COMPLEX_BUILDING ist in Abb. 3-21 zu sehen. Ein Ausschnitt aus einer gescannten Karte zeigt ein Gebäude mit zwei inneren Höfen und einer nicht-konvexen Form (Abb. 3-21a).

Die zugehörige digitalisierte Karte beschreibt das Gebäude symbolisch in einer Karten-

blattebene durch eine Menge von Linien (Abb. 3-21b). Diese Linien werden durch Anwendung der Produktionen des Produktionsnetzes analysiert. Da das untersuchte Gebäude nicht Teil eines Gebäudekomplexes ist und daher keine Verzweigungspunkte besitzt, konnten nur die Produktionen P1, P2, P5 und P13 angewandt werden, um die Objekte POLY (P), CONTOUR (C) und BUILDING (B) zu erzeugen.

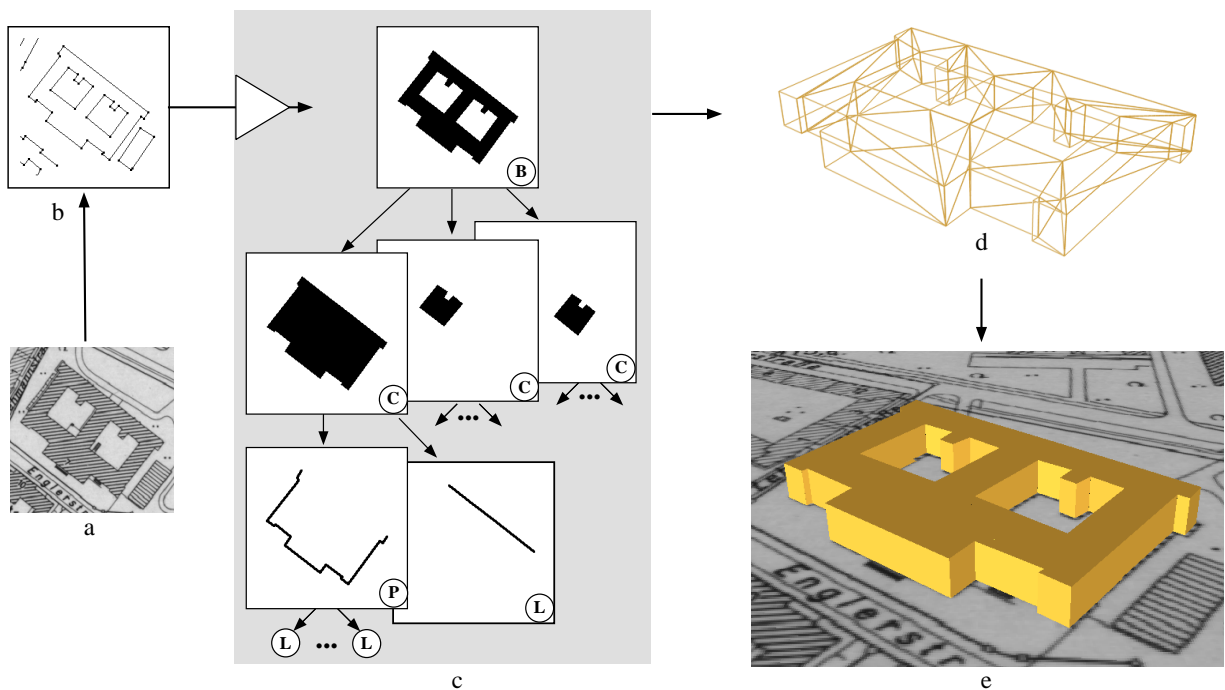


Abb. 3-21: Kartenanalyse COMPLEX_BUILDING [111]

Mit Hilfe des Ableitungsgraphen des Gebäudes (Abb. 3-21c) kann eine hierarchische Beschreibung des Gebäudes mit den Beschreibungsebenen (B), (C), und (L) angegeben werden. Die Eigenschaften des Gebäudes werden auf Ebenen mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad beschrieben; so zum Beispiel auf der Ebene (B) mit den Attributen: überbaute Fläche, umgebendes Rechteck, Anzahl der inneren Höfe, Schwerpunkt, Trägheitsachsen, oder auf der Ebene (C) mit: Fläche der Teile, Durchmesser, Schwerpunkt, oder auf der Ebene (L) mit: Koordinaten der Konturlinien.

Neben den genannten Merkmalen für die Objekte der Karte wird auch bestimmt, ob das Objekt aus rechtwinkligen Konturen besteht. Dazu wird ein Histogramm über die Orientierung der zu allen Polygonen eines Gebäudes gehörenden Linien bestimmt. In einem zweiten Histogramm werden die Linien mit ihrer Länge gewichtet. In dem längengewichteten Histogramm werden Spitzen (Peaks) gesucht, die mit ihrer Orientierungsumgebung ($\pm 10^\circ$) einen Mindestanteil am Gesamthistogramm besitzen. Bei rechtwinkligen Gebäuden müssen die beiden Spitzen eine Orientierungsdifferenz von 90° besitzen. Sind in einer langen Kontur kleine Bögen enthalten, so äußern sie sich im gewichteten Richtungshistogramm kaum. Im ungewichteten Histogramm zeigen viele kleine Linienstücke von Bögen im Verhältnis zu wenigen Geradenstücken der Hauptrichtungen einen deutlichen Anteil am Histogramm. In einem solchen Fall wird die Kontur

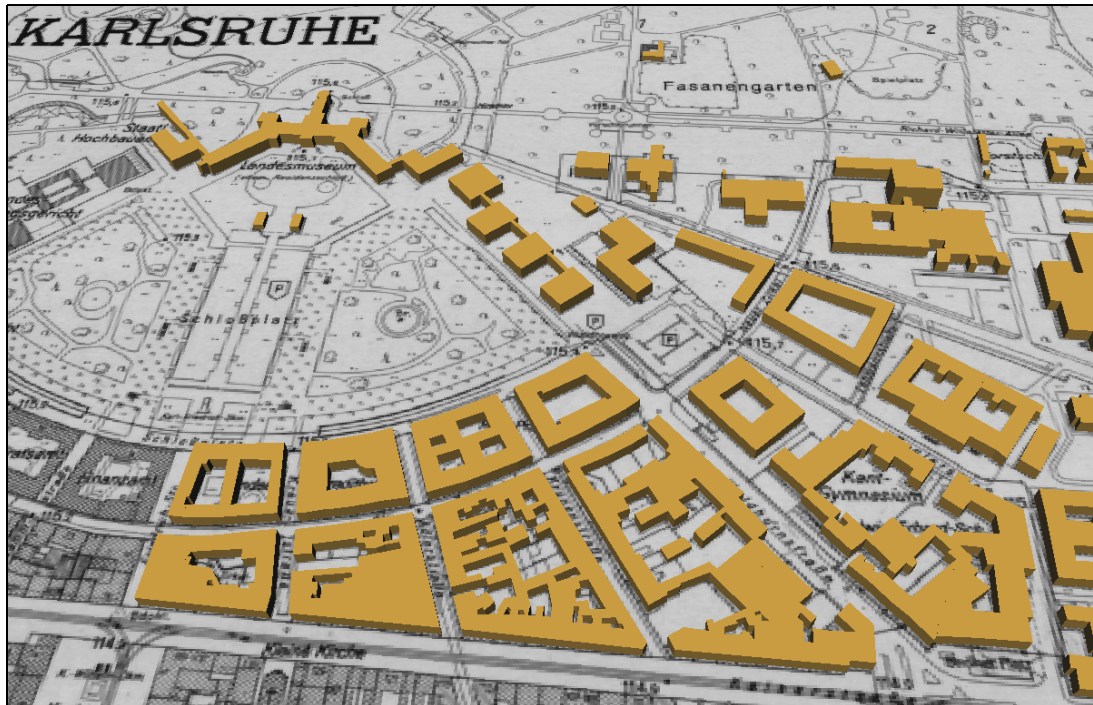


Abb. 3-22: Ergebnis der Kartenanalyse [111]

als nicht-rechtwinklig abgewiesen. Im Beispiel von Abb. 3-23 wurde gefordert, daß 95% der gesamten Länge der Linien in einer der beiden rechtwinkligen Hauptrichtungen orientiert sein soll.

Auf dem Gebiet der 3D-Erkennung und -Rekonstruktion aus Bildern wie auch zum Zwecke der Simulation kann es hilfreich sein, eine Karte zum Erzeugen eines einfachen 3D-Modells zu benutzen. Nimmt man eine Standardhöhe für die Gebäude dieser Klasse an, so kann die 2D-Beschreibung einer Kartenblattebene leicht zu einer groben 3D-Beschreibung mit prismatischen Objekten (Drahtmodell) erweitert werden.

Für die Modellierung von Projektionen sind Verdeckungen zu berücksichtigen. Dazu wird das Drahtmodell mit einer automatischen Triangulierung in ein Oberflächenmodell umgewandelt (Abb. 3-21d). Abb. 3-21e zeigt das ausgegebene 3D-Objekt mit der unterlegten Karte. Das Ergebnis für einen größeren Ausschnitt der Stadtkarte von Karlsruhe zeigt Abb. 3-22.

3.2.2 Parametrisches Gebäudemodell

Viele Gebäudegrundrisse weisen Strukturen auf, die durch rechte Winkel beschrieben werden können. Ein Produktionsnetz zur Erfassung zweier einfacher Gebäudegrundrisse ist in Abb. 3-24 dargestellt. Ausgehend von den Objekten LINE werden zunächst Objekte CORNER zusammengesetzt (P1), wenn sie einen rechten Winkel bilden. Lassen sich zwei Objekte CORNER so zusammensetzen, daß ein Rechteck gebildet werden kann,



Abb. 3-23: Generische Konturanalyse. (Gebäude: grün - rechteckig, rot - nicht rechteckig)

so wird durch Produktion P2 ein Objekt RECTANGLE generiert. Lassen sich zwei Objekte CORNER rechtwinklig zu einer konvexen Form zusammensetzen, so wird ein offenes Rechteck (RECTANGLE_O) generiert (P3). Solch ein Objekt kann mit einem weiteren Winkel zu dem geschlossenen Objekt BUILDING_CO zusammengefügt werden (P4).

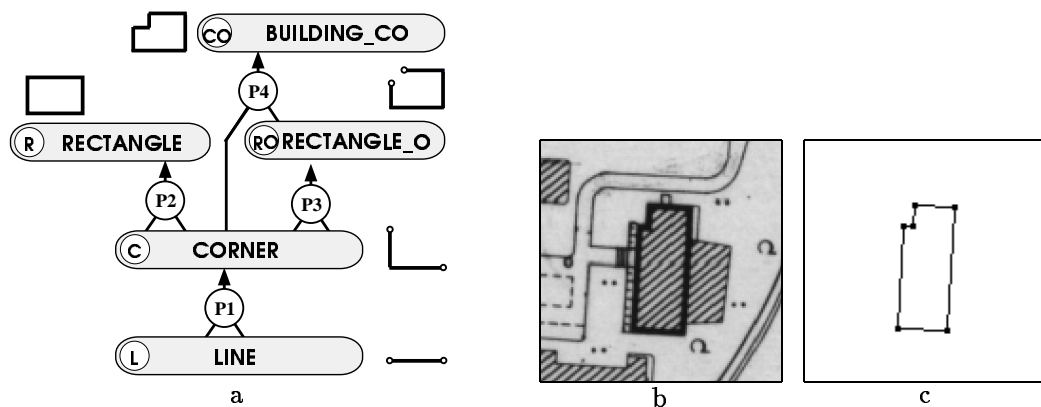


Abb. 3-24: Kartenanalyse mit parametrischem Modell. a) Produktionsnetz, b) Gescannte Karte, c) Digitalisierte Karte

Abb. 3-24b zeigt einen Ausschnitt aus einer gescannten Karte mit einem Hochhaus. Die zugehörige digitalisierte Karte beschreibt das Gebäude in einer Kartenblattebene symbolisch durch eine Menge von Linien (Abb. 3-24c) aus dem Layer Hochhaus. Diese

Linien werden durch Anwendung der Produktionen des Produktionsnetzes in Abb. 3-20 analysiert.

Die Tatsache, daß die Linien ein einfach geschlossenes Polygon ohne innere Höfe bilden und keine weiteren Polygone enthalten, zeigt, daß ein Objekt von topologisch einfacher Gestalt vorliegt. Durch die anschließende Analyse mit dem Produktionsnetz in Abb. 3-24 erfahren wir dann, daß dieses Gebäude die Form eines Rechtecks mit einer offenen Ecke hat.

3.3 Verifikation

Erarbeitet man neue Karten für bereits kartographisch erfaßte Gebiete, so ist es nicht notwendig, alle Objekte wie Gebäude und Verkehrswege aus dem Bildmaterial neu abzuleiten. Stattdessen kann man auf die existierenden Karten zurückgreifen und lediglich die Änderungen untersuchen. In einem ersten Schritt wird daher geprüft, ob die in der Karte verzeichneten Objekte durch das Bildmaterial bestätigt werden können.

Da der Ort und die horizontale Ausdehnung der betrachteten Objekte bekannt sind, kann die Untersuchung in der 3D-Szene räumlich begrenzt bzw. in der Karte auf die entsprechenden 2D-Ausschnitte beschränkt werden.

3.3.1 Vergleich zwischen Objektmerkmalen

Die Verifikation von Objekten der Karte kann auf verschiedenen Ebenen der symbolischen Beschreibung ausgeführt werden (vergl. Abb. 3-21). Während sich auf hohem Abstraktionsniveau globale Attribute wie z.B. Position des Schwerpunkts, Trägheitsachse oder Flächengröße anbieten, lassen sich auf niedrigem Niveau die Koordinaten der Konturlinien vergleichen. Für einen Vergleich der aus der Bildanalyse gewonnenen 3D-Beschreibungen mit der Karte wird der Grundriß herangezogen. Ein Objekt aus der Kartenanalyse sei durch die Bildanalyse verifiziert, wenn die Ähnlichkeit groß genug ist bzw. der Abstandswert entsprechend klein ist. Die Güte der Verifikation ergibt sich aus dem Abstandswert.

Für einen Vergleich auf der Ebene der Konturen läßt sich z.B. die Lage der Eckpunkte bewerten. Da sich die zu vergleichenden Objektkonturen von Karte und Bild in der Anzahl der Eckpunkte unterscheiden können, wird zur Berechnung des Abstandsmaßes zunächst die Objektkontur E_a mit der höheren Anzahl n_{max} von Eckpunkten bestimmt:

$$E_a := \begin{cases} E_{Karte} & \text{falls } |E_{Bild}| \leq |E_{Karte}| \\ E_{Bild} & \text{sonst} \end{cases} \quad E_b := \begin{cases} E_{Bild} & \text{falls } |E_{Bild}| \leq |E_{Karte}| \\ E_{Karte} & \text{sonst} \end{cases}$$

Zu jedem der Punkte $e_{ia} \in E_a$ wird das Minimum der Abstände zu den Punkten $x \in E_b$: $\min \{dist(e_{ia}, x) | x \in E_b\}$ gebildet. Dabei sei e_{ib} der Punkt mit diesem minimalen Abstand. Mit einer Interpretation der Punktfolge mit der Länge $n_{max} := |E_a|$ als Vektor ergibt sich daraus das Abstandsmaß:

$$a = \frac{1}{n_{max}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{max}} (e_{ai}(x, y) - e_{bi}(x, y))^2}$$

Prinzipiell lassen sich auch die durch die Polygone begrenzten Flächen vergleichen. Als Ähnlichkeitsmaß bietet sich der Quotient aus Schnittfläche und Vereinigungsfläche an.

3.3.2 Vergleich zwischen symbolischen Formbeschreibungen

Topographische Karten in verschiedenen Maßstäben liefern typischerweise Szeneninformationen mit unterschiedlichem Detailreichtum. Abb. 3-25 zeigt vier Beispiele.

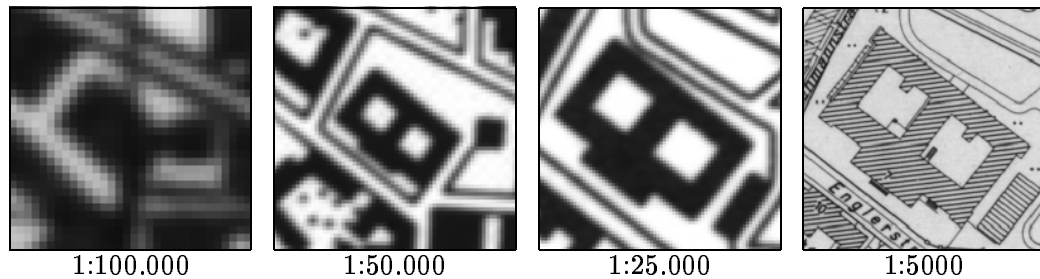


Abb. 3-25: Topographische Karten in unterschiedlichen Maßstäben [114].

Auch zwischen Karten und Luftbildern oder Abbildungen anderer Sensoren (z.B. IR, SAR) gibt es häufig Unterschiede in der Auflösung bzw. Detaildarstellung.

Vergleicht man nun Objektbeschreibungen desselben Szenenobjektes aus unterschiedlichen Informationsquellen, so können die symbolischen Beschreibungen ein vollkommen anderes Aussehen haben.

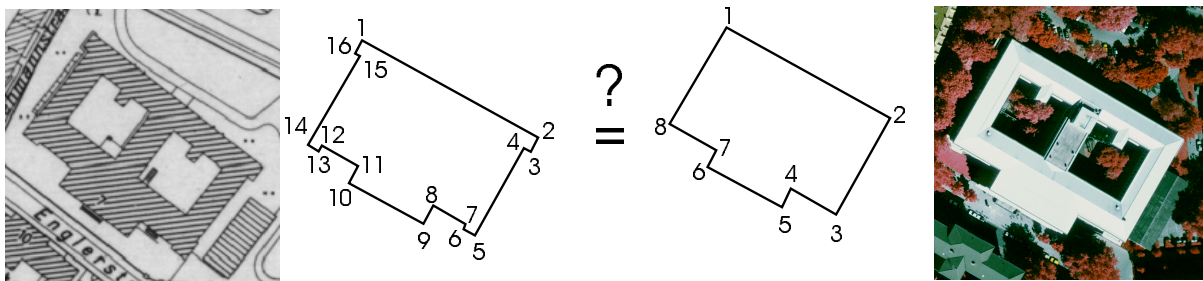


Abb. 3-26: Vergleich auf symbolischer Ebene

Abb. 3-26 zeigt zwei Polygone vom gleichen Szenenobjekt, gewonnen aus unterschiedlichen Informationsquellen. Während die Kontur mit den acht Ecken, die aus dem Luftbild gewonnen wurde, durch das Konzept `B_UCO_VEX` beschrieben werden kann (siehe Abb. 3-15a und Abb. 3-16Bv), liegt für die linke Kontur in Abb. 3-26 mit den 16 Ecken, die aus der Karte stammt, keine gesamtheitliche Objektbeschreibung vor. Lediglich Teile der Kontur aus der Karte können durch Grundelemente beschrieben werden. So ergeben nach dem Produktionsnetz von Abb. 3-15a z.B. die Ecken {8,9,10,11} das Objekt `U_STRUC_O` oder die Ecken {16,1,2,3} das Objekt `U_STRUC_C`.

Fragt man nach der Identität der beiden Objekte, so wird man, aufgrund der symbolischen Beschreibungen, diese nicht feststellen können. Nach dem visuellen Eindruck würde man jedoch das charakteristische Aussehen in den groben Zügen der Objekte als ähnlich oder gar gleich bezeichnen, wenn man die kleinen Gebäudevorsprünge wie z.B. die Ecken {2,3,4} oder {5,6,7} vernachlässigt. Bei solchen Betrachtungen ist es notwendig, die detailliertere Darstellung von der Form her zu verallgemeinern - also zu generalisieren.

3.3.3 Generalisierung symbolischer Formbeschreibungen

In der Kartographie spielt die Generalisierung bei der Erzeugung einer kleinmaßstäbigen Karte aus einer großmaßstäbigen Karte eine wichtige Rolle. Dabei können verschiedene Teilprozesse unterschieden werden [30]: (i) Vereinfachen, (ii) Vergrößern, (iii) Verdrängen, (iv) Zusammenfassen, (v) Auswählen, (vi) Typisieren und (vii) Betonieren.

Bei der manuellen Generalisierung wird sowohl die Vereinfachung des Umrisses und der Form wie auch die graphische Lesbarkeit gleichzeitig berücksichtigt. Mit der Berücksichtigung der *Charakteristik* und *Wichtigkeit* der Karteneinträge besitzt der Prozess eine subjektive bzw. zweckbezogene Komponente. So dürfen z.B. bei der Erstellung einer Stadtkarte wichtige Gebäude oder Denkmäler in ihrem charakteristischen Grundriß nicht entstellt werden oder gar verloren gehen.

Zur Automatisierung der Generalisierung existieren eine Reihe von Ansätzen. Entsprechend dem benutzten Datentyp werden Prozeduren zur Generalisierung von Rasterdaten und Vektordaten unterschieden. Unterschiedliche Objekttypen erfordern unterschiedliche Generalisierungsmethoden. Methoden, die für natürliche Objekte (z.B. Flüsse) verwendet werden, können im allgemeinen nicht für künstliche Objekte (z.B. Gebäude) verwendet werden.

Ein Ansatz zur automatischen Generalisierung von topographischen Karten auf der Basis von Vektordaten wurde von Staufenbiel [102] vorgestellt. Im Vordergrund seiner Arbeit steht dabei die Transformation von Gebäuden des Maßstabs 1:5000 in den Maßstab 1:25000. Diese Algorithmen wurden am Institut für Kartographie der Universität Hannover weiterentwickelt und sind heute als modulares System (CHANGE) in einem kommerziellen Produkt (PHOCUS) verfügbar.

Generell besteht im Bereich der GIS-Systeme steigender Bedarf an Generalisierungswerkzeugen, mit denen aus einer detaillierten Master-Datenbasis Mehrzweck-Datenbasen und Kartenprodukte abgeleitet werden. Typische Probleme bei der automatischen Kartenerstellung liegen in der Konflikterkennung und -lösung. Diese Konflikte stammen von der Kombination von Entwurfsfaktoren wie Kartensymbolen, Ausgangsauflösung und Ähnlichkeit von Objekten. Eine Übersicht über aktuelle Probleme und Forschungsthemen gibt der Report des ICA Workshops on Map Generalization [57].

In den Teilprozessen der Generalisierung von Vektordaten und der strukturellen Verfahren der Mustererkennung, wie wir sie durch Produktionsnetze modellieren, lassen sich ähnliche Vorgehensweisen finden. In beiden Prozeduren werden zur Reduktion der Komplexität Strukturen zusammengefaßt und durch einfachere Strukturen ersetzt. Im Gegensatz zu einer kartographischen Generalisierung sind wir hier nur an geometrischen Aspekten der Generalisierung interessiert. So spielt z.B. die Lesbarkeit keine Rolle.

Im folgenden betrachten wir nur einfache Ersetzungen von komplexen rechtwinkligen Polygonen durch weniger komplexe rechtwinklige Polygone. Die Ersetzungen können auch durch Produktionen beschrieben werden. Abb. 3-27 zeigt einige Beispiele für solche Produktionen, die ein Polygon mit sechs oder acht Punkten in ein Polygon mit vier Punkten überführen. Eine Ersetzung wird ausgeführt, wenn die schraffierte Fläche A

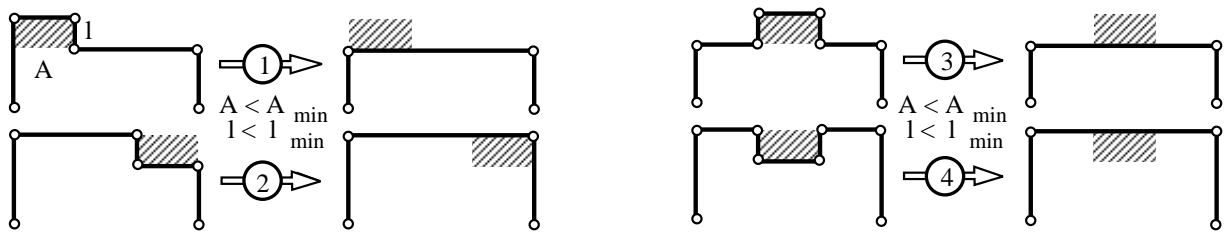


Abb. 3-27: Vereinfachung von rechtwinkligen Strukturen (6 und 8 Eckpunkte in 4 Eckpunkte)

kleiner als A_{min} ist und die Länge l der kurzen Linie kleiner als l_{min} ist. Die Parameter A_{min} und l_{min} hängen von dem Grad der Generalisierung ab.



Abb. 3-28: Generalisierung der Karte in verschiedenen Skalendimensionen

Solche Ersetzungen können nun mit unterschiedlichem Grad der Generalisierung aufeinanderfolgend ausgeführt werden, wobei man eine Sequenz von symbolischen Beschreibungen für verschiedene Skalen erhält. Abb. 3-28 zeigt eine Sequenz von generalisierten rechtwinkligen Kartenobjekten. Ausgehend von der Orginaldarstellung Abb. 3-28a wurde l_{min} stufenweise auf 4m (Abb. 3-28b) , 8m (Abb. 3-28c) und 12m (Abb. 3-28d) gesetzt. Bei der Formvereinfachung bleiben die Objekte rechtwinklig und stellen in der einfachsten Form ein Rechteck dar. Bei der Generalisierung gehen keine Objekte verloren.

Abb. 3-29a-d zeigt ein Beispiel für drei Schritte der Generalisierung, die die Zahl der Polygonpunkte von 32 auf 12 reduziert. Die Gebäudekonturen in Abb. 3-29b (24 Punkte) bestehen aus dem äußeren Polygon B_UCO_VEX und den beiden Inneren Polygonen B_UCO_CAV. Dies stimmt genau überein mit der Beschreibung aus Abb. 3-29e, die man aus der Analyse des Bildes in Schrägsicht (Abb. 3-17) erhält.

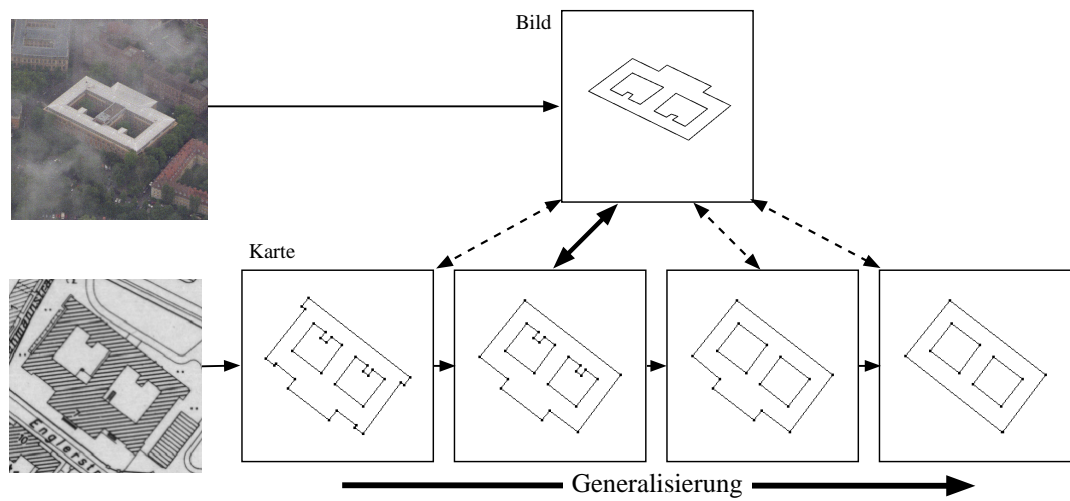


Abb. 3-29: Generalisierung eines Objektes der Karte und Vergleich mit dem Objekt des Bildes

3.4 Verfahrensprüfung

Bei der Untersuchung von Verfahren unterscheiden wir abhängig von den verwendeten Bilddaten die Verfahrensprüfung auf der Basis von a) synthetischen Objekten, b) Modellobjekten und c) realen Objekten.

3.4.1 Verfahrensprüfung mit Bilddaten synthetischer Objekte

Zur Überprüfung der diskriminierenden Eigenschaften eines Produktionsnetzes ist eine hohe Anzahl von Luftbildern mit entsprechendem Ground Truth notwendig. Dies ist aufwendig und kostenintensiv. Aus diesem Grunde schlagen wir zur Überprüfung eine Testumgebung (Test bed) vor.

Wie kann man nun prüfen, ob mit der gewählten Einstellung der Parameterintervalle die Objekte einer gewünschten Klasse tatsächlich erfaßt werden? Zur Überprüfung bietet man dem Analysesystem eine Stichprobe von projizierten 2D-Repräsentationen der festen Modelle einer Klasse an. Bei einer fehlerfreien Analyse müssen die rekonstruierten Objekte und die festen Modelle gleich sein. Die Generierung der 2D-Repräsentationen von einem parametrischen Modell, wie auch der Vergleich von Modellen und rekonstruierten Objekten kann durch eine Testumgebung automatisch durchgeführt werden.

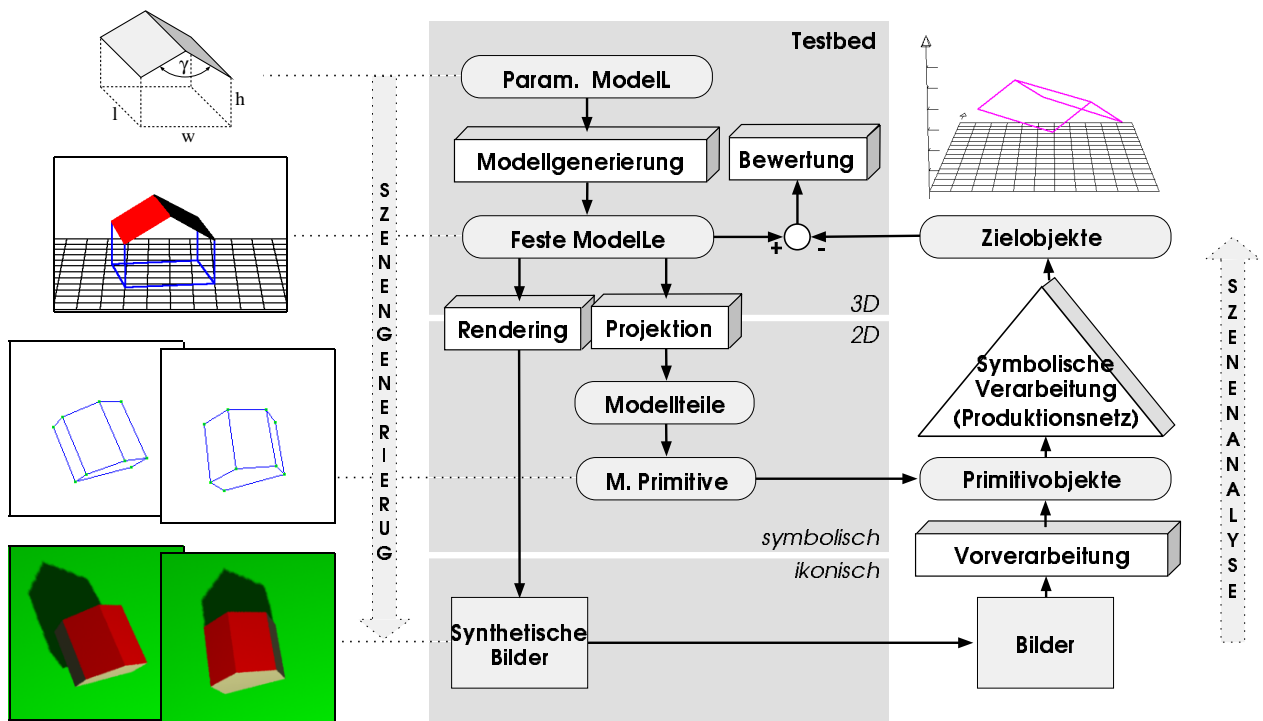


Abb. 3-30: Test bed für das Produktionsnetz DACH (parametrisches Modell) [110]

Abb. 3-30 zeigt die Struktur der Testumgebung für ein parametrisches 3D-Modell. Ausgehend von dem *parametrischen* Modell werden durch zufällige Auswahl von Parameterwerten aus den spezifizierten Parameterintervallen (z.B. $90^\circ \leq \gamma \leq 170^\circ$) *formfeste* Modelle erzeugt. Mit zufälligen Werten für Orientierung und Position der *formfesten* Modelle wird eine Modellszene aus *festen* Modellen aufgebaut. Statt einer zufälligen

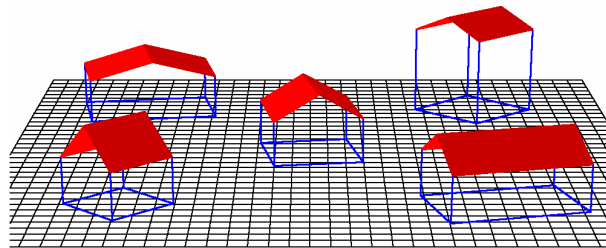


Abb. 3-31: Automatisch generierte Szene mit Objekten HAUS (feste Modelle)

Auswahl der Parameter kann auch eine systematisch Auswahl erfolgen. Beispielsweise kann eine Kombination von Extremwerten (z.B. l_{min} , w_{min} , h_{min} , γ_{max}) und die Positionierung und Orientierung kann in bestimmten Strukturen erfolgen (z.B. Reihen von Häusern mit gleicher Giebelorientierung).

Unter Kenntnis von bildspezifischen Parametern (Kameraorientierung, Bildgröße und -auflösung usw.) wird das Szenenmodell in die Bildebene in Form einer *symbolischen* oder *ikonischen* Repräsentation projiziert.

- Eine symbolische Repräsentation eignet sich zur Prüfung des Produktionsnetzes ohne die Vorverarbeitung (innere Schleife in Abb.3-30). Die Modelloberflächen werden in die 2D-Modellteile projiziert und durch einen Hidden-Line Algorithmus nachverarbeitet. Die Konturen der Modellteile (z.B. Parallelogramm) werden in Primitivobjekte (z.B. Linien) zerlegt, die dem implementierten Produktionsnetz angeboten werden.
- Eine *ikonische* Repräsentation eignet sich zur Prüfung des Analysesystems einschließlich der Vorverarbeitung (äußere Schleife in Abb. 3-30). Durch einen Rendering-Prozeß, der zusätzliche Szeneninformation zur Beleuchtung und Reflexion benötigt, werden synthetische Bilder erzeugt. Diese Bilder dienen als Eingangsdaten für das Analysesystem.

Zusätzliche Objekte, geometrische Störungen und Rauschen lassen die synthetischen Bilder realistischer aussehen. Beispielsweise treten in Abb. 3-30 zu den Dächern zusätzliche Strukturen durch Hauswände und Schatten auf. Die Ergebnisse der Analyse (Zielobjekte) werden mit den festen Modellen verglichen und Abweichungen bestimmt. Die Testumgebung ist ebenso hilfreich bei der Simulation kritischer Situationen für die 3D-Rekonstruktion (z.B. eine kleine Triangulationsbasis) und der Bestimmung von Grenzen des Analysesystems.

Für Untersuchungen mit komplexen Objektstrukturen in der Szenengenerierung-Szenenanalyse-Schleife bieten sich als *feste* Modelle auch Stadtmodelle an, wie sie z.B. in [25], [26] oder [29] dargestellt sind.

3.4.2 Verfahrensprüfung mit Bilddaten von Modellobjekten

Mit zunehmenden Anspruch an die photorealistische Erscheinung synthetischer Objekte steigt der Aufwand für die Modellierung und Bildgenerierung erheblich an. Andererseits ist die systematische Aufnahme von Bilddaten realer Objekte durch eine Befliegung sehr kostenintensiv. Zusätzlich muß bei unbekanntenen Szenen für die automatische Verfahrensprüfung erst eine Szenenbeschreibung (Ground-Truth) aufgenommen werden. Eine Alternative dazu bilden für bestimmte Untersuchungen Bilddaten von Modellobjekten (siehe z.B. [53], [39], [34]). Sie können witterungsunabhängig, kostengünstig und unter reproduzierbaren Bedingungen aufgenommen werden.

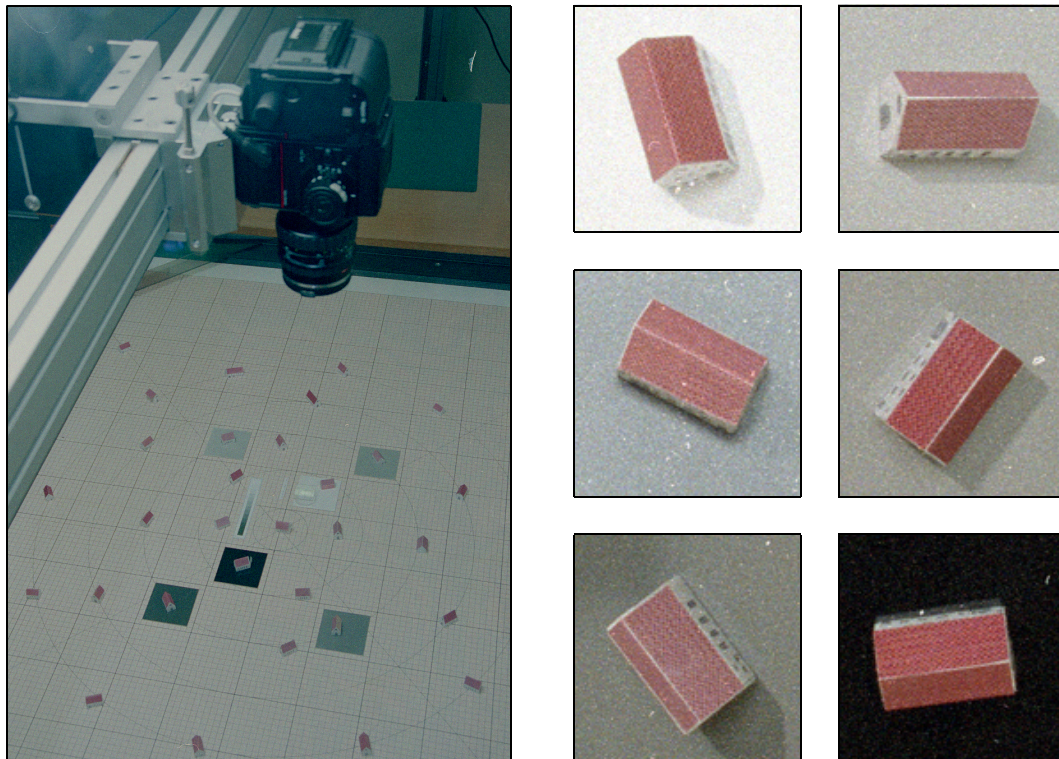


Abb. 3-32: Aufnahme von Modellobjekten [113]

Ein Beispiel für die Aufnahme von Modellobjekten zeigt Abb. 3-32. Das Modell eines einfachen Giebelhauses wurde aus verschiedenen Richtungen mit unterschiedlicher Beleuchtung und vor unterschiedlich hellem Hintergrund aufgenommen. Sollen Verfahren geprüft werden, die komplexe Zusammenhänge auswerten, sind einfache Modellszenarien nicht mehr ausreichend. Komplexe Modellszenarien findet man beispielsweise bei Stadtmodellen. Abb. 3-33 zeigt ein Stadtmodell von Karlsruhe.

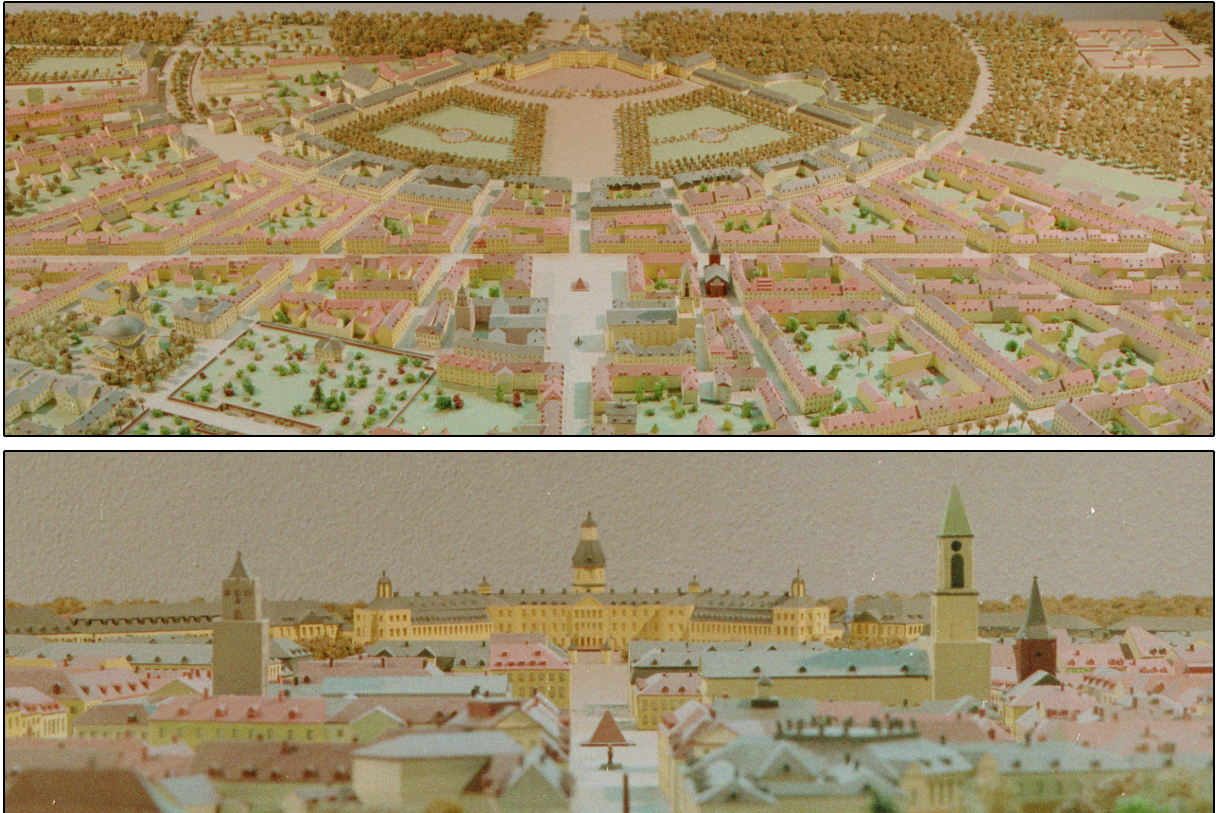


Abb. 3-33: Modellobjekte der Szene Karlsruhe.

Mit freundlicher Unterstützung des Museums im Prinz Max-Palais, Karlsruhe

3.4.3 Verfahrensprüfung mit Bilddaten realer Objekte

Neben den Untersuchungen mit synthetischen Bildern und Bildern von Modellen ist es für eine Verfahrensprüfung unerlässlich, Bilddaten von realen Szenen aufzunehmen und zu analysieren. Um das in Abb. 3-3 dargestellten Produktionsnetz zu überprüfen und die Ergebnisse zu bewerten, wurden Bilder aus einer Datenbasis ausgewählt, die für einen Test zum Bildverstehen [100] aufbereitet wurden. Für die verfügbaren Stereo-Bildpaare waren die Kameraparameter und Projektionsgleichungen gegeben. Die Aufgabe besteht in der Detektion von man-made-Strukturen wie Gebäuden, Messung ihrer Geometrie und Beschreibung in einer geeigneten Weise.

Die Ergebnisse der Analyse des ISPRS Datensatzes FLAT sind in Abb. 3-35 dargestellt. Für die 3D-Visualisierung der erkannten Gebäude wurde von einem flachen Gelände ausgegangen, und auf diese Ebene das linke Bild überlagert.

Die Ergebnisse zeigen, daß mit dem Produktionsnetz prinzipiell die Erkennung von einfachen Giebeldächern aus Luftbildern möglich ist. Der Szenenbereich, der durch das linke und rechte Bild des Datensatzes FLAT dargestellt wird, enthält 18 Häuser. Von diesen können 14 Häuser durch das Objekt DACH detektiert werden. Für ein Haus (Abb. 3-35 Quadrant d7) wurde ein Hinweis durch das Objekt DACH_FLÄCHE gelie-



Abb. 3-34: Testdatensatz FLAT (Stereobildpaar)

fert. Drei Häuser wurden nicht detektiert. Zwei dieser nicht erkannten Häuser (Abb. 3-35-e7,-f8) konnten nicht rekonstruiert werden, da sie kein einfaches Giebeldach besitzen und nicht dem Modell entsprechen. Für das dritte Haus (Abb. 3-35 Quadrant a9) konnte kein Objekt DACH generiert werden, da durch den schwachen Kontrast im rechten Bild korrespondierende Objekte U_STRUKTUR nicht aufgebaut werden konnten.

Im Gegensatz zu einer Beschreibung der Realität (ground truth) kann das Ergebnis einer Bildanalyse nur eine wahrgenommene Realität (perceived truth) wiedergeben. Um

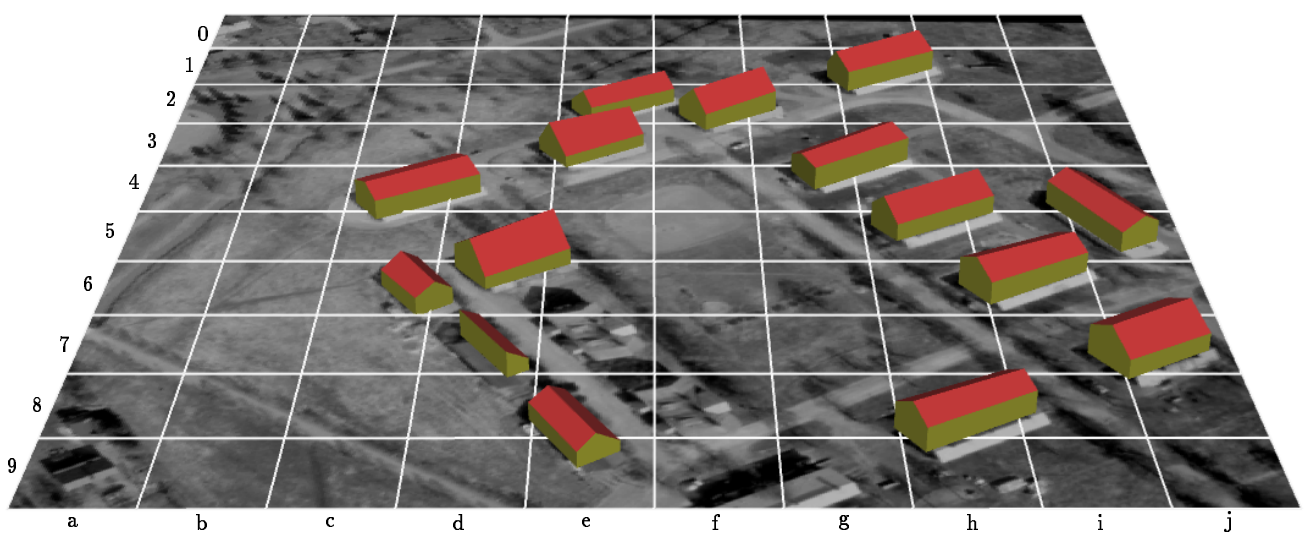


Abb. 3-35: 3D-Visualisierung der rekonstruierten Gebäude aus dem ISPRS-Testdatensatz FLAT [109]

die Ergebnisse zu bewerten, ist ein Vergleich zwischen der wahrgenommenen Realität (perceived truth) und der Realität (ground truth) nötig. Einen solchen Vergleich hat die ISPRS-Arbeitsgruppe III/3 durchgeführt. Für die mittleren Abweichungen (RMS) der Koordinaten der Dächer wurden folgende Werte bestimmt: $\sigma_x[\text{m}] = 0.41$, $\sigma_y[\text{m}] = 0.37$, $\sigma_z[\text{m}] = 0.99$. Der Vergleich ist zusammen mit den Ergebnissen anderer Forschungsgruppen in [100] veröffentlicht.

4. Analyse flächenhaft ausgedehnter Objekte

Zur Analyse der flächenhaft ausgedehnten Objekte wurde am IPF in diesem Projekt das System MOSES (Map Oriented SEMantic Image UnderStanding) entwickelt. Dieses System wurde zum Teil bereits im Zwischenbericht II [107] zu diesem Projekt beschrieben. Wir wollen auf die dort beschriebenen Teile hier nur übersichtsartig eingehen und danach die im jetzigen Berichtszeitraum durchgeführten Entwicklungen beschreiben.

4.1 Objektmodelle

Ein wesentlicher Bestandteil eines Systems sind die in dem System verwendeten Objektmodelle (kurz: Modelle). Beim Entwurf der Modelle sind die spezifischen Merkmale der Aufgabenstellung zu berücksichtigen. Die wichtigsten Randbedingungen, die bei der Modellierung in MOSES beachtet werden, sind:

- Zur Auswertung der Luftbilder kann auf Vorwissen zurückgegriffen werden. Zu diesem Vorwissen gehört einerseits allgemeines Wissen des Menschen über seine Umwelt und andererseits spezielles, z.B. aus Karten gewonnenes Wissen über eine bestimmte Szene. Beide Wissensarten sind entsprechend zu repräsentieren und der Bildauswertung zugänglich zu machen.
- Sowohl Bild als auch Karte sind Abbildungen einer Szene. Dieselbe Realität ist jedoch auf unterschiedliche Art in Karte und Bild dargestellt (vgl. auch Abschnitt 1.2 in [107]). Den Gemeinsamkeiten und Besonderheiten der beiden Abbildungen ist bei der Modellierung Rechnung zu tragen.
- Das System soll nicht nur zur Erkennung *einer* Szene eingesetzt werden. Es ist also eine leichte Anpaßbarkeit des Systems an verschiedene Szenen und Szenentypen gefordert.

Um diesen Randbedingungen gerecht zu werden, wurde in unserem System das Wissen auf mehrere Modelle verteilt. Diese Modelle sind voneinander abhängig und bilden eine *Modellhierarchie*. Abb. 4-1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Modelle und die Beziehungen zwischen ihnen. Die Pfeile geben die Richtung des Datenflusses an.

Auf der konzeptionellen Ebene unterscheiden wir, in Erweiterung des Schemas aus [71], drei Bereiche: den Szenenbereich, den Bildbereich und den Kartenbereich (vgl. Abb. 4-1). Im Szenenbereich ist die zu beschreibende Szene der realen Welt angesiedelt. Der Bildbereich und der Kartenbereich enthalten die Abbildung einer Szene in einem Bild und im anderen Fall in einer Karte. Für jeden dieser drei Bereiche stellen wir mindestens ein Modell zur Verfügung.

Auf der Repräsentationsebene und auf der Implementierungsebene haben die Modelle ähnliche Eigenschaften: Wir repräsentieren die Modelle in semantischen Netzen und zu

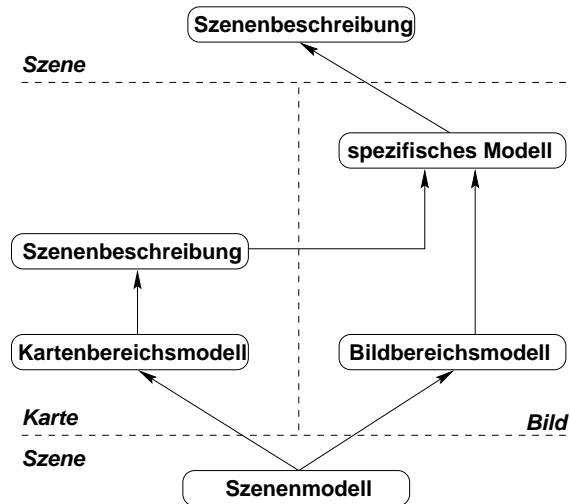


Abb. 4-1: Modellhierarchie zur Luftbildauswertung

ihrer Implementierung verwenden wir das Programmsystem ERNEST. Die Modelle wurden im Detail bereits in den Abschnitten 4.2 und 4.3 in [107] vorgestellt. Wir erwähnen hier nur die wichtigsten Eigenschaften.

4.1.1 Szenenmodell

Das *Szenenmodell* beschreibt eine allgemeine Szene zum Zweck der Bildauswertung. Es enthält überwiegend Erfahrungswissen des Systementwicklers über Szenen der realen Welt. Die Beschreibung erfolgt durch die Angabe der Objekte, die in einer Szene vorkommen können, durch die Angabe von Beziehungen zwischen diesen Objekten und durch die Angabe von Eigenschaften der Objekte.

4.1.2 Bildbereichsmodell und Kartenbereichsmodell

Das *Bildbereichsmodell* ist die Projektion des Szenenmodells in den Bildbereich. Es ist ein generisches Objektmodell, das die Abbildungen der Szenenobjekte in einem Luftbild beschreibt. Anstatt "generisches Modell im Bildbereich" verwenden wir dafür den einfacheren Namen "Bildbereichsmodell" – obwohl es das Modell der im Luftbild abgebildeten Objekte und nicht das Modell des Bildes ist.

Das *Kartenbereichsmodell* ist die Projektion des Szenenmodells in den Kartenbereich. Auch dieses ist ein generisches Objektmodell, das aber die Abbildungen der Szenenobjekte in einer Karte beschreibt. Wir verwenden hier den einfacheren Namen "Kartenbereichsmodell" und weisen darauf hin, daß darunter nicht ein kartographisches Modell zu verstehen ist.

Unter Projektion des Szenenmodells in den Bildbereich oder den Kartenbereich verstehen wir hier nicht nur die rein geometrische Projektion im Sinne einer projektiven Ab-

bildung aus einem 3D-Raum in einen 2D-Raum, sondern ganz allgemein die Anpassung der Objektbeschreibung an die Erscheinungsform der Objekte im jeweiligen Bereich. So werden z.B. im Kartenbereichsmodell keine Kraftfahrzeuge als Bestandteile eines Parkplatzes angegeben, da Kraftfahrzeuge in Karten nicht abgebildet sind.

Im Unterschied zum Szenenmodell besitzen das Kartenbereichs- und das Bildbereichsmodell auch prozedural repräsentiertes Wissen. Dieses Wissen wird in Form von Prozeduren in einer Programmiersprache implementiert und dem deklarativ repräsentierten Teil des Modells zugeordnet. Es sind im wesentlichen zwei Arten von Wissen, die prozedural repräsentiert und implementiert werden: Das Wissen über die Berechnung von Eigenschaften der modellierten Objekte aus den Karten oder den Bildern wird in den Attributberechnungsfunktionen und den inversen Attributberechnungsfunktionen implementiert. Das Wissen über die Bewertung der Zwischenergebnisse und Endergebnisse der Auswertung wird in den Bewertungsfunktionen implementiert.

4.1.3 Spezifisches Modell

Das *spezifische Modell zur Bildauswertung* (oder kurz: spezifisches Modell) wird automatisch durch die Kombination des Bildbereichsmodells mit der kartenbezogenen Szenenbeschreibung erstellt. Gegenüber dem Bildbereichsmodell enthält das spezifische Modell als wesentliche Erweiterung strukturelle und numerische Beschränkungen, die aus der kartenbezogenen Szenenbeschreibung gewonnen wurden. Das Verfahren zur Erstellung des spezifischen Modells stellen wir in Abschnitt 4.2.1 vor.

4.2 Prozeßmodell

Gleichermaßen wichtig für die Erstellung einer Szenenbeschreibung aus einem digitalen Luftbild sind das Objektmodell und das Prozeßmodell. Das Prozeßmodell beschreibt die Vorgehensweise zur Nutzung des in den Objektmodellen gespeicherten Wissens. Wir bezeichnen als *Strategie* zur Luftbildauswertung die Gesamtheit der Überlegungen auf konzeptioneller Ebene, nach denen vorgegangen wird, um mittels automatischer Auswertung von Luftbildern eine Szenenbeschreibung zu erstellen. Die Umsetzung der Strategie erfolgt in unserem System mit Hilfe eines *Kontrollalgorithmus zur Wissensnutzung*. Wir stellen in diesem Kapitel zunächst unsere Strategie zur Luftbildauswertung vor und gehen danach auf den Kontrollalgorithmus zur Wissensnutzung ein.

4.2.1 Die Strategie zur Luftbildauswertung

Das Leitmotiv der Strategie in unserem System ist eine umfassende Nutzung von Wissen zur automatischen Luftbildauswertung. Von Interesse ist dabei insbesondere die Nutzung von solchem Wissen, das aus topographischen Karten gewonnen wird. Dieser Grundgedanke hat entscheidenden Einfluß auf die Aufteilung des Wissens auf verschiedene Modelle (siehe Abschnitt 4.1), und er beeinflusst natürlich die im System ver-

wendete Vorgehensweise zur Erstellung einer Szenenbeschreibung mittels automatischer Luftbilddauswertung.

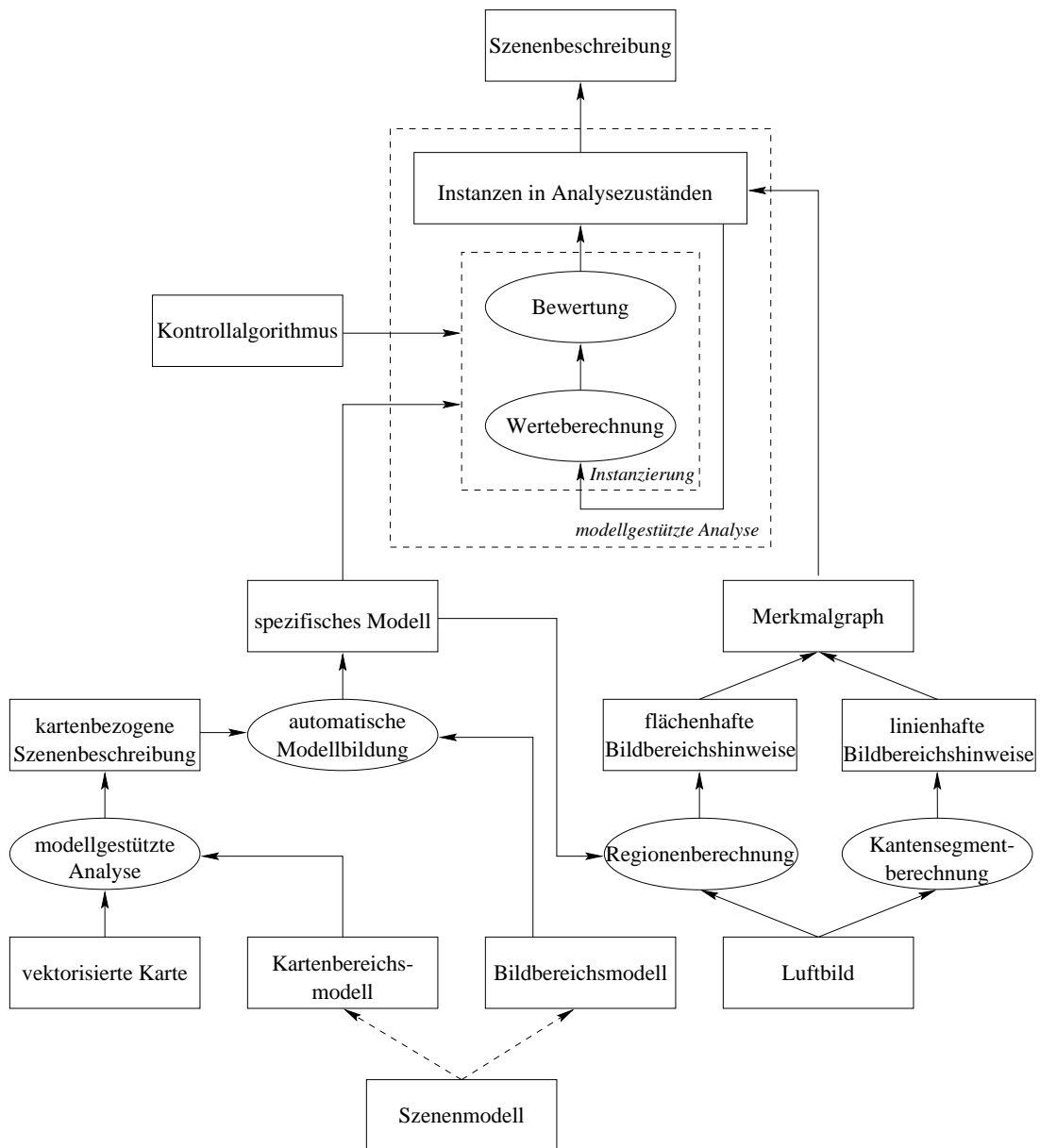


Abb. 4-2: Ablauf der Luftbilddauswertung

Diese Vorgehensweise ist in Abb. 4-2 detailliert dargestellt. Zur Darstellung der Verfahrensschritte haben wir Ellipsen verwendet, während Rechtecke Daten und Modelle symbolisieren. Pfeile geben die Richtung des Prozeßflusses an. Die Pfeile sind unterbrochen dargestellt, falls der Schritt interaktiv durchzuführen ist. Sie sind mit durchgezogener Linie gezeichnet, falls es sich um einen automatischen Schritt handelt. Wir beziehen uns auf Abb. 4-2 und besprechen im folgenden die automatisch durchgeführten Schritte:

Erster Schritt. Als erster Schritt auf dem Weg von Luftbild und Karte zur Szenenbeschreibung wird die Analyse der Karte durchgeführt. Ziel dieses Schrittes ist es, automatisch solche Informationen über die zu analysierende Szene zu erhalten, die über das Allgemeinwissen zu Szenen der realen Welt hinausgehen. Durch die Analyse der Karte wird semantisches Wissen (Art der Szenenobjekte) sowie geometrisches und topologisches Wissen (Lage- und Nachbarschaftsinformationen) über die zu analysierende Szene gewonnen. Das Ergebnis dieses Schrittes ist die kartenbezogene Szenenbeschreibung. Das Verfahren zur Kartenanalyse wurde bereits in [107] dargestellt.

Zweiter Schritt. Als zweiter Schritt wird durch Kombination der kartenbezogenen Szenenbeschreibung mit dem Bildbereichsmodell das spezifische Modell zur Bildauswertung erstellt.

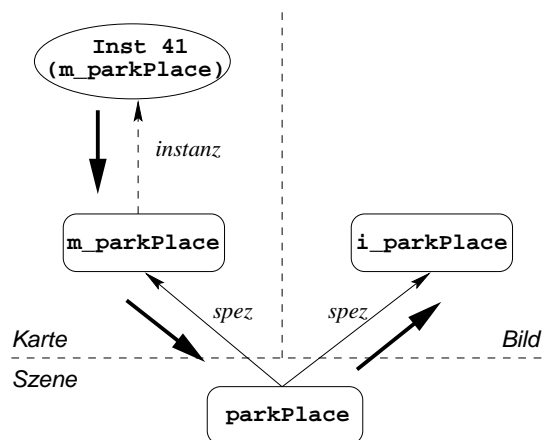


Abb. 4-3: Bestimmung des Partner-Konzeptes der Instanz `m_parkPlace`

Bevor der Algorithmus zur Erstellung des spezifischen Modells vorgestellt wird, sei noch der Begriff *Partner-Konzept* und das Verfahren zur Bestimmung des Partner-Konzeptes erläutert. Wir definieren das Partner-Konzept als das korrespondierende Konzept aus dem Bildbereichsmodell zu einer Instanz der kartenbezogenen Szenenbeschreibung.

Zur Beschreibung des Verfahrens beziehen wir uns auf Abb. 4-3, in der die Bestimmung des Partner-Konzeptes für die Instanz Nr. 41 `m_parkPlace` dargestellt ist. Die dick eingezeichneten Pfeile geben den Verfahrensfluß an. Ausgehend von einer Instanz aus der kartenbezogenen Szenenbeschreibung gelangt man durch Rückverfolgung der Instanzkante zu einem Konzept aus dem Kartenbereichsmodell. In Abb. 4-3 ist dieses das Konzept `m_parkPlace`. Von diesem gelangt man zu einem Konzept im Szenenmodell, indem man der Spezialisierungskante aus dem Szenenmodell ins Kartenbereichsmodell in umgekehrter Richtung folgt. Von dem Konzept im Szenenmodell gelangt man schließlich direkt zum Partner-Konzept, indem man der Spezialisierungskante in das Bildbereichsmodell folgt. Für die Instanz Nr. 41 `m_parkPlace` findet man als Partner-Konzept das Konzept `i_parkPlace`.

Zur Erstellung des spezifischen Modells wird der in Abb. 4-4 dargestellte Algorithmus

| |
|---|
| FUNKTION <i>spezifisches_modell</i> (instanz) |
| neuKonz := erzeuge neues Konzept |
| <i>spezialisierung</i> (<i>partner_konzept</i> (instanz)) := neuKonz |
| FOR alle Konkretisierungen von instanz |
| hilfInstanz := <i>konkretisierung</i> (instanz) |
| neuKante := erzeuge neue Konkretisierungskante für neuKonz |
| <i>zielkonzept</i> (neuKante) := <i>spezifisches_modell</i> (hilfInstanz) |
| <i>zielkonzept</i> (neuKante) := <i>generalisierung</i> (<i>partner_konzept</i> (hilfInstanz)) |
| FOR alle Bestandteile von instanz |
| hilfInstanz := <i>bestandteil</i> (instanz) |
| neuKante := erzeuge neue Bestandteilkante für neuKonz |
| <i>zielkonzept</i> (neuKante) := <i>spezifisches_modell</i> (hilfInstanz) |
| <i>zielkonzept</i> (neuKante) := <i>generalisierung</i> (<i>partner_konzept</i> (hilfInstanz)) |
| füge ein Beschränkungen aus instanz in neuKonz |
| RETURN neuKonz |

Abb. 4-4: Algorithmus zur Erstellung des spezifischen Modells

verwendet. Der Algorithmus startet mit der Instanz, die in der kartenbezogenen Szenenbeschreibung für das Konzept des Analyseziels erzeugt wurde. Es wird ein neues Konzept erzeugt und als Spezialisierung des Partner-Konzeptes dieser Instanz eingetragen. Dann werden die Liste der Konkretisierungen und die Liste der Bestandteile der Instanz durchlaufen. Für jede Konkretisierungs- und jede Bestandteilkante der Instanz wird eine entsprechende Kante in dem neu erstellten Konzept erzeugt. Als Zielkonzepte der erstellten Kanten werden zwei Konzepte eingetragen: erstens das Konzept, das durch rekursiven Aufruf unseres Algorithmus für die Konkretisierung- oder Bestandteil-Instanz erzeugt wird und zweitens die Generalisierung des Partner-Konzeptes der Konkretisierung- oder Bestandteil-Instanz. Schließlich werden Beschränkungen aus der Instanz in das neu erzeugte Konzept eingetragen.

Durch dieses Verfahren werden strukturelle und numerische Eigenschaften der Szenenbeschreibung in das spezifische Modell übertragen. Die strukturellen Eigenschaften der Szenenbeschreibung werden in das spezifische Modell übertragen, indem die Bestandteil- und die Konkretisierungshierarchie der kartenbezogenen Szenenbeschreibung durchquert werden und dabei neue Konzepte für das spezialisierte Modell rekursiv erzeugt werden. Neben den neu erzeugten Konzepten werden als Ziele der Konkretisierungs- und der Bestandteilkanten jedoch auch die Generalisierungen der entsprechenden Partner-Konzeptes aus dem Bildbereichsmodell eingetragen. Sind mehrere Konzepte Ziel einer Kante, so bilden sie eine Exklusiv-Oder Liste, d.h. in dem Analyseergebnis wird als Ziel der Kante nur die Instanz eines der Konzepte aus der Liste eingetragen werden. Welche Instanz das sein wird, wird erst zur Laufzeit der Analyse entschieden.

Durch diese Gestaltung des spezifischen Modells ist es möglich, sowohl den Inhalt der

Karte zu überprüfen, als auch eine von der kartenbezogenen Szenenbeschreibung abweichende Interpretation vorzunehmen. Ein aus der Karte bekanntes Szenenobjekt wurde dann erfolgreich überprüft, wenn für das entsprechende neu erzeugte Konzept des spezifischen Modells eine Instanz im Endergebnis enthalten ist. Anderenfalls wurde die Generalisierung des Partner-Konzeptes instanziiert und damit eine andere Interpretation der Szene als die aus der kartenbezogenen Szenenbeschreibung bekannte vorgenommen. Ergebnisse hierfür werden in Abschnitt 4.4.2 diskutiert.

Numerische Eigenschaften der Szenenbeschreibung werden als Beschränkungen zu den Attributen der neu erzeugten Konzepte des spezifischen Modells eingetragen. Diese Eigenschaften sind überwiegend geometrische Merkmale wie z.B. die Lage der einzelnen Strukturen. Sie wurden in der Kartenanalyse berechnet und in den Attributen der Instanzen der kartenbezogenen Szenenbeschreibung gespeichert. Nach der Eintragung als Beschränkungen im spezifischen Modell definieren sie die Zentren von Erwartungsbereichen für im Bild zu erkennende Strukturen. In Abb. 4-5b sind z.B. die Zentren dieser Erwartungsbereiche für die Seiten der Kontur eines Parkplatzes nach geeigneter Transformation in das Luftbild eingezeichnet. Die Ausdehnungen der Erwartungsbereiche, die aus der Genauigkeit der Transformation zwischen Bildbereich und Szenenbereich abgeleitet werden, sind im Bildbereichsmodell angegeben und werden in das spezifische Modell vererbt. Ein Ausschnitt aus dem automatisch erstellten spezifischen Modell, der die Bestandteil- und die Konkretisierungshierarchie für einen Parkplatz zeigt, ist in Abb. 4-5a dargestellt.

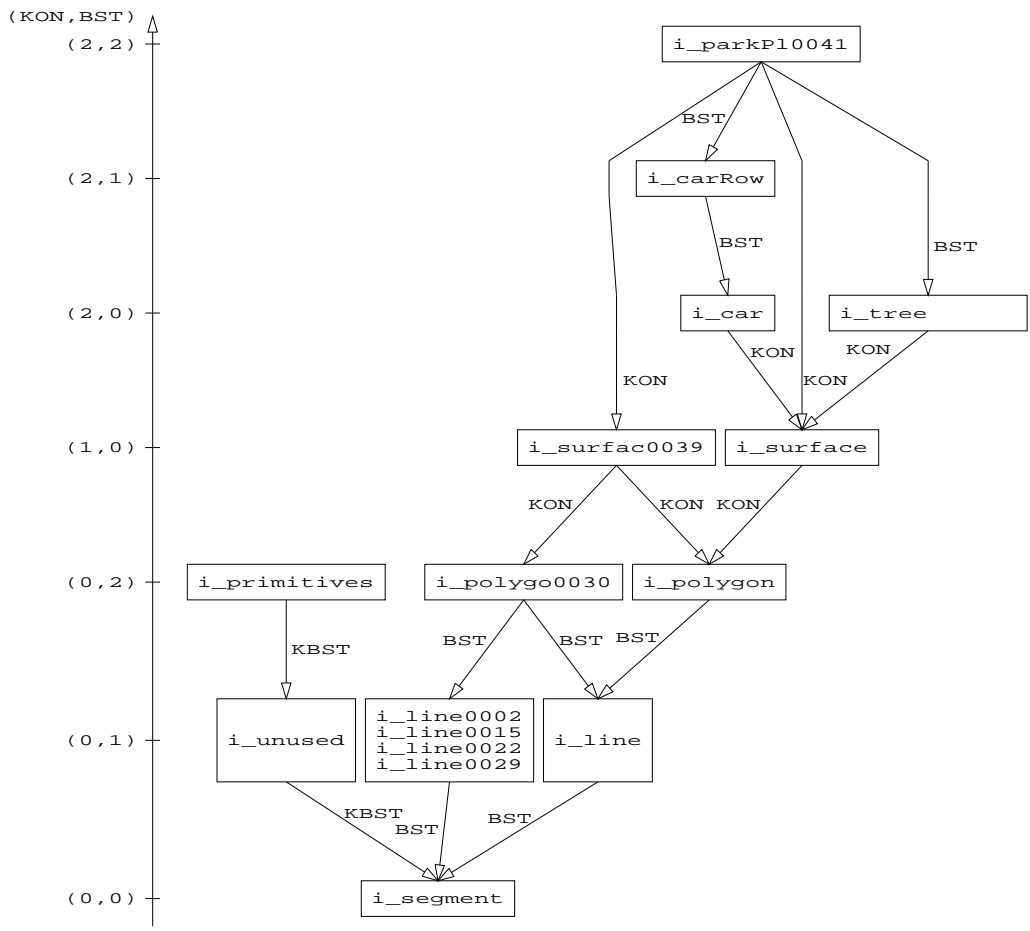
Dritter Schritt. Im dritten Schritt werden Regionen und Kantensegmente aus dem digitalen Luftbild berechnet. Die hierzu verwendeten Verfahren wurden bereits in Kapitel 2 des Zwischenberichtes [107] beschrieben.

Vierter Schritt. Als vierter Schritt schließlich erfolgt die eigentliche Auswertung des Luftbildes unter Verwendung des im zweiten Schritt erstellten spezifischen Modells. Als Eingangsdaten für die Luftbildauswertung dienen die im dritten Schritt erzeugten Bildbereichshinweise. Die Auswertung des Luftbildes wird in drei Phasen durchgeführt:

- Verifikation,
- Erweiterung der Objektbeschreibung und
- Erkennung neuer Objekte.

In allen drei Phasen dieses vierten Schrittes ist der prinzipielle Ablauf der Luftbildauswertung derselbe. Schematisch und vereinfacht ist dieser Ablauf in dem mit unterbrochener Linie umrahmten und mit *modellgestützte Analyse* bezeichneten Bereich der Abb. 4-2 dargestellt. Die Steuerung des Ablaufs erfolgt durch einen anwendungsunabhängigen Kontrollalgorithmus. Bevor wir diesen in Abschnitt 4.2.2 vorstellen, wollen wir noch die drei Phasen auf konzeptioneller Ebene besprechen.

In der Phase der *Verifikation* wird versucht, die durch die Analyse der Karte bekannten Szenenobjekte im Luftbild zu bestätigen. Da der Grundriß der Objekte (mit der der Karte eigenen Genauigkeit) bekannt ist, wird zunächst versucht, diese Konturen der



a



b

Abb. 4-5: Ausschnitt aus dem automatisch erstellten spezifischen Modell. a) Bestandteil- und Konkretisierungshierarchie, b) Projektion der Erwartungsbereiche für Konzepte der Familie i_line in das Luftbild

Objekte im Bild zu finden. Anschließend werden zur Erhärtung der Hypothesen objektspezifische Merkmale im Luftbild überprüft.

Je allgemeiner ein Modell ist, um so vielfältiger sind bei Vorhandensein von Störungen die Zuordnungsmöglichkeiten zwischen Teilen des Modells und den Bildbereichshinweisen. Viel eingeschränkter sind die Zuordnungsmöglichkeiten zwischen Bildbereichshinweisen und einem spezifischen Modell. Daher ermöglicht die Verwendung des spezifischen Modells zur Verifikation die Durchführung der Bildauswertung mit geringerem Aufwand und mit weitaus größerer Zielstrebigkeit als bei Verwendung eines generischen Modells.

Ein weiterer Vorteil der Durchführung der Verifikation mit dem spezifischen Modell ist, daß es damit möglich ist, eine größere Vielfalt von Objekten zu behandeln als bei Verwendung eines generischen Modells: Das automatisch erstellte spezifische Modell der Szene besteht aus vielen Teil-Modellen. Jedes dieser Teil-Modelle beschreibt zwar nur *ein* in der Karte dargestelltes Objekt, aber es existiert für *jedes* in der Karte dargestellte Objekt ein eigenes Teil-Modell. Generische Modelle hingegen beschreiben prinzipiell eine größere Anzahl von Objekten. Um Fehlzuordnungen zu vermeiden, müssen jedoch auch generische Modelle in ihrer Allgemeinheit beschränkt werden. Da aber die generischen Modelle "von Hand" erstellt werden und damit nicht beliebig viele in einem System vorhanden sind, kann es leicht vorkommen, daß für manche Objekte keines der erstellten Modelle passend ist.

Neben diesen Vorteilen sind jedoch auch Risiken mit der Verwendung des spezifischen Modells zur Verifikation verbunden. Insbesondere kann es passieren, daß sich die Bildauswertung zu stark am Modell orientiert und dann in die Bilddaten Strukturen "hineininterpretiert" werden, die es in der Realität gar nicht gibt. Daß es der Bildauswertung in unserem System dennoch möglich ist, sich auch bei Verwendung des spezifischen Modells von diesem zu lösen, zeigen wir in Abschnitt 4.4.2.

Es ist zu erwarten, daß sich viele Objekte der Szene in der Zeit zwischen Kartenaufnahme und Erstellung des Luftbildes nur wenig oder gar nicht verändert haben. Deshalb kann davon ausgegangen werden, daß nach einer erfolgreichen Verifikation bereits für einen großen Teil der Szene eine Szenenbeschreibung erstellt werden konnte. Diese Szenenbeschreibung bildet einen Kontext, der in den nachfolgenden Phasen genutzt wird.

Als erstes wird dieser Kontext in der der Verifikation folgenden Phase zur *Erweiterung der Objektbeschreibung* verwendet. In dieser Phase werden für die bereits verifizierten Objekte der Szene solche Eigenschaften aus den Bilddaten berechnet, die aus den Kartendaten nicht extrahierbar sind. Dabei wird insbesondere der semantische und räumliche Kontext der verifizierten Objekte ausgenutzt, um Fehlinterpretationen zu vermeiden und zielstrebig zum Ergebnis zu gelangen. Wir beschreiben Ergebnisse zur Erweiterung der Objektbeschreibung in Abschnitt 4.4.1 am Beispiel von Parkplätzen. Dort werden parkende Kraftfahrzeuge erkannt und zu typischen geometrischen Anordnungen von Fahrzeugen auf Parkplätzen gruppiert.

In der sich anschließenden Phase der *Erkennung neuer Objekte* wird die Szenenbeschreibung auf Bereiche des Luftbildes außerhalb der bereits verifizierten Objekte ausge-

dehnt. Mit dem Begriff “neue Objekte” bezeichnen wir hier solche Objekte (Gebäude, Parkplätze, Wiesen usw.) aus der Szene, die nicht in der Karte abgebildet sind. In vielen Fällen ist die sich ändernde Realität zwischen dem Datum der Kartenaufnahme und dem Datum der Erstellung des Luftbildes der Grund dafür, daß diese Objekte nicht in der Karte abgebildet sind. Wegen des Fehlens dieser Objekte in der Karte ist für sie kein spezifisches Modell verfügbar. Ihre Erkennung und Rekonstruktion erfolgt also unter Verwendung eines generischen Modells.

Doch auch in dieser Phase kann von dem Kontext, der in den beiden vorhergehenden Phasen erstellt wurde, profitiert werden. Dazu werden zu Beginn dieser Phase Statistiken der numerischen Eigenschaften (z.B. der Radiometrie) der bereits erkannten Objekte erstellt und daraus automatisch Beschränkungen für die entsprechenden Eigenschaften der neuen Objekte abgeleitet. Wir bezeichnen diesen Vorgang jedoch nicht als *Lernen*, da hier nicht selbstständig neues Wissen aus Beispielen abgeleitet wird, sondern lediglich eine Parameteradaption stattfindet. Wie jedoch in Abschnitt 4.4.2 gezeigt wird, können damit gute Ergebnisse erzielt werden.

Wir stellen als nächstes die Umsetzung dieser Strategie zur Luftbildauswertung mittels eines anwendungsunabhängigen Kontrollalgorithmus vor.

4.2.2 Das Verfahren zur Wissensnutzung

Bei der Bedeutungszuweisung mit einem semantischen Netz wird eine Verbindung zwischen einer Teilmenge des Eingangssignals (Bild) und einem Konzept hergestellt. Ist das erfolgt, so bildet diese Teilmenge eine Instanz für das betreffende Konzept. Diese Aktion wird als *Instanziierung* bezeichnet.

Eine weitere Aktion des Analysevorgangs ist die *Expansion*. Während der Expansion wird Wissen, das durch die bis dahin durchgeführten Instanzierungen erworben wurde, durch das Netz fortgepflanzt und anderen Konzepten zugänglich gemacht. Instanzierung und Expansion wechseln im Lauf der Analyse.

Die Steuerung der Analyse, d.h. die Entscheidung, welche Aktion als nächste durchzuführen ist, wird von einem *Kontrollalgorithmus* auf der Basis des aktuellen Analysezustandes anhand von sechs anwendungsunabhängigen Regeln [47] vorgenommen. Für eine formale Behandlung dieser Regeln verweisen wir auf die Literatur und stellen hier den Kontrollalgorithmus am Beispiel der Bildanalyse¹ vor.

Der Kontrollalgorithmus

Wir betrachten die Erkennung des inneren Begrenzungspolygons des Gebäudes aus Abb. 4-6a. Als Eingangsdaten für den Erkennungsprozeß werden die aus dem Bild berechneten Kantensegmente, die in Abb. 4-6a als weiße Linien dargestellt sind, verwendet. Das von unserem System automatisch erstellte spezifische Modell dieses Begrenzungspolygons ist in Abb. 4-6b dargestellt.

¹Das Gesagte gilt sinngemäß auch für die Kartenanalyse.

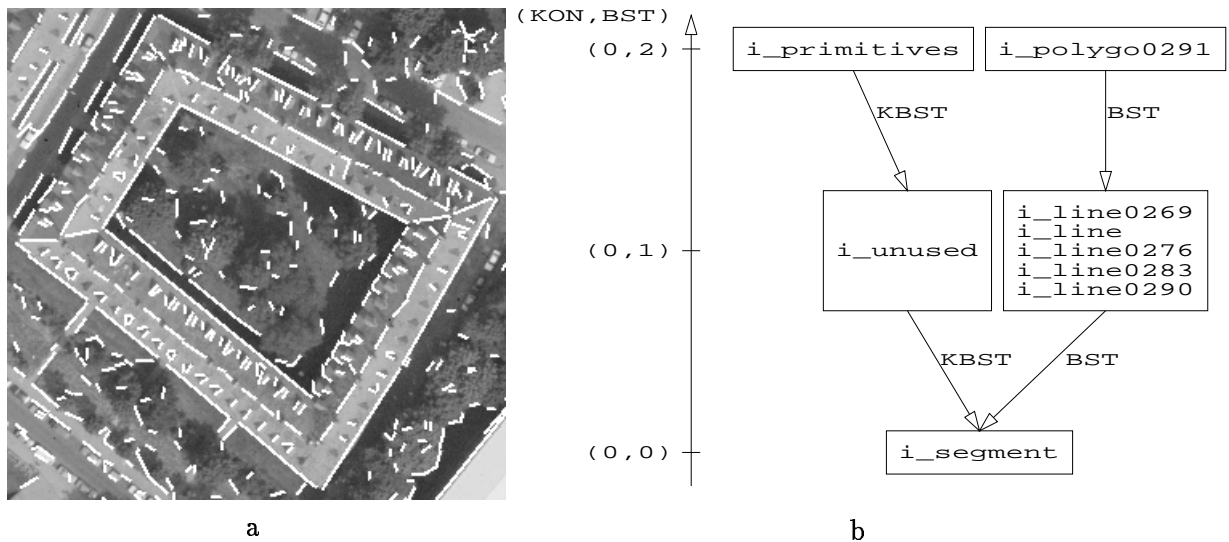


Abb. 4-6: a) Ausschnitt aus einem Luftbild; die berechneten Kantensegmente sind als weiße Linien eingezeichnet. b) Automatisch erstelltes spezifisches Modell für das innere Begrenzungs-polygon des Gebäudes aus a)

Das Polygon wird durch das Konzept `i_polygo0291` repräsentiert. Die von diesem Konzept ausgehenden vier Bestandteilkanten (sie sind in Abb. 4-6b wegen ihrer Ähnlichkeit zu einer Kante zusammengefaßt) zeigen auf die vier Konzepte `i_line0269`, `i_line0276`, `i_line0283` und `i_line0290`, die die vier aus der Karte bekannten Seiten des Polygons darstellen. Als Zielkonzept der Bestandteilkanten ist jeweils neben den vier genannten Konzepten auch noch das Konzept `i_line` eingetragen. Dieses ist ein generisches Modell für eine Seite einer Objektkontur. Für das Konzept `i_line` wird immer dann eine Instanzierung vorgenommen, wenn die Instanzierung für eine der aus der Karte bekannten Seiten des Polygons, z.B. wegen veränderter Realität, fehlgeschlagen ist. Damit ist eine vom Karteninhalt abweichende Interpretation der Bilddaten möglich (vgl. auch Abschnitt 4.2.1).

Jede Polygonseite kann aus mehreren Kantensegmenten bestehen, die jeweils durch das Konzept `i_segment` repräsentiert sind. In Abb. 4-6b sind auch noch die Konzepte `i_primitives` und `i_unused` enthalten, die zur Speicherung und Konsistenzhaltung der Menge aller Bildbereichshinweise verwendet werden. Sie sind für die vorliegende Erklärung nicht von Bedeutung.

Der stufenweise Fortschritt der Analyse ist in Abb. 4-7 und Abb. 4-8 dargestellt. Für ausgewählte Zwischenstufen der Analyse sind auf der linken Seite der Abbildung die Beschreibungsgraphen der Zwischenergebnisse und auf der rechten Seite der Abbildung die Projektion der Zwischenergebnisse in das Luftbild dargestellt.

Initialisierungsphase

Die Analyse beginnt mit der Angabe des Zielkonzeptes. Hier ist dies das Konzept `i_polygo0291`. Für dieses Konzept wird versucht, eine Instanz zu erzeugen. Eine

Instanziierung ist jedoch nur möglich, wenn bereits Instanzen für alle obligatorischen, nicht kontextabhängigen Bestandteile eines Konzeptes existieren. Zu Beginn der Analyse ist das noch nicht der Fall. Ersatzweise wird daher ein modifiziertes Konzept für `i_polygo0291` erzeugt. Es findet also zunächst eine Expansion statt. Diese Situation ist in Abb. 4-7A dargestellt.

Dieses Verfahren wird mit einem Bestandteil des soeben erzeugten modifizierten Konzeptes fortgesetzt, und rekursiv weiter, bis ein Konzept erreicht wird, das keine Bestandteile oder Konkretisierungen besitzt. Solche Konzepte werden *Konzepte ohne Dekomposition* genannt. Ein Konzept ohne Dekomposition ist in unserem Beispiel `i_segment`. In der in Abb. 4-7B dargestellten Situation sind für alle Konzepte vom Zielkonzept bis zum Konzept ohne Dekomposition modifizierte Konzepte erstellt. Modifizierte Konzepte sind Zwischenergebnisse, die Beschränkungen für die Attributwerte der Instanzen enthalten. Die Beschränkungen für eine Instanz des Konzeptes `i_segment` sind in Abb. 4-7B als Rechtecke mit unterbrochenen Linien in das Luftbild eingezeichnet. Sie wurden während der Expansion aus dem modifizierten Konzept `i_line0269` in das neu zu erzeugende modifizierte Konzept für `i_segment` übertragen. Die Beschränkungen für das Konzept `i_line0269` wurden durch die Analyse der Karte gewonnen.

Wechsel von Instanziierung und Expansion

Nachdem für das Konzept ohne Dekomposition ein modifiziertes Konzept erstellt wurde, kann als nächstes eine Instanz für dieses Konzept erstellt werden. Die Instanziierung für `i_segment` wird durchgeführt, indem aus der Menge aller Bildbereichshinweise (gespeichert in der Instanz für `i_primitives`) ein Kantensegment ausgewählt wird, das dem Modell entspricht. Der Fall, daß es zunächst mehrere Alternativen zur Erfüllung der Modellanforderungen geben kann, wird später betrachtet. In Abb. 4-7C ist die Situation nach der Instanziierung dargestellt. Der Beschreibungsgraph enthält nun eine Instanz für `i_segment`; diese Instanz ist als weiße Linie in das Luftbild eingezeichnet. Eine Seite eines Polygons besteht aus mindestens einem Kantensegment. Da für dieses nun eine Instanz erzeugt worden ist, kann sofort auch für die Polygonseite `i_line0269` eine Instanz erzeugt werden (Abb. 4-7C).

Prinzipiell sind nun zwei Wege verfolgbar: einerseits kann man versuchen, die Instanz für die Polygonseite zu erweitern, indem nach einem Kantensegment in Verlängerung der bereits instanziierten Kantensegmente gesucht wird, oder andererseits erklärt man die bisher erzeugte Instanz der Polygonseite für vollständig und instanziiert die nächste Polygonseite. Diese beiden Möglichkeiten sind in Form der rechteckigen, mit unterbrochener Linie gezeichneten Suchbereiche im Luftbild in Abb. 4-7D dargestellt. Wir betrachten zunächst den Fall der Instanziierung der nächsten Polygonseite.

Durch die Instanziierung der ersten Polygonseite `i_line0269` wurde Wissen aus den Bilddaten gewonnen. Nach erfolgter Instanziierung wird dieses Wissen durch das Netz fortgepflanzt. Zunächst erfolgt dies in umgekehrter Richtung der Bestandteilkanten, also von der Polygonseite zum Polygon. Durch diese *bottom-up*-Expansion wird das modifizierte Konzept `i_polygo0291` aktualisiert. Daran anschließend werden modifizierte Konzepte für die nächste Polygonseite `i_line0276` und rekursiv weiter bis zu

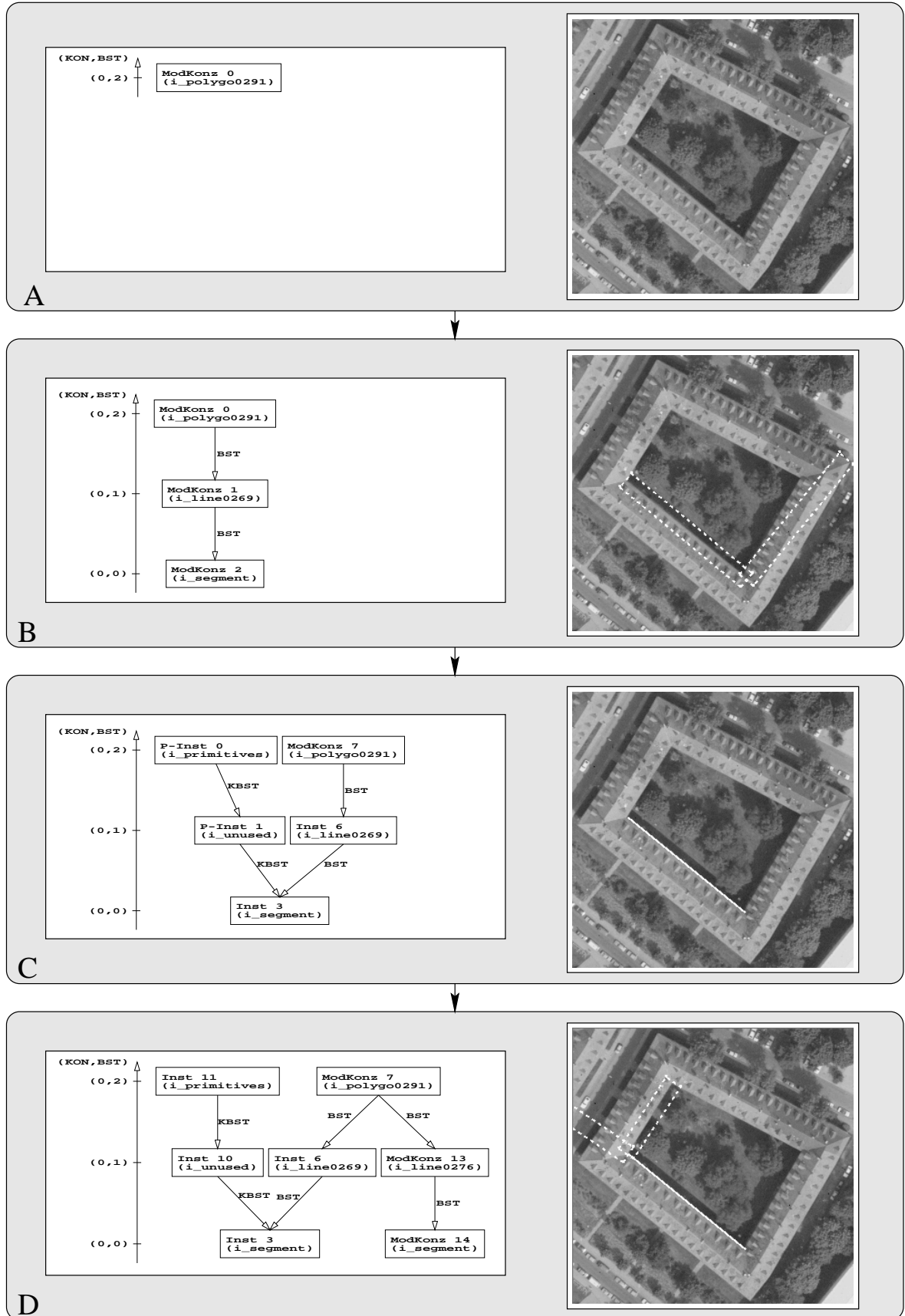


Abb. 4-7: Typischer Ablauf des Analyseprozesses (Teil 1)

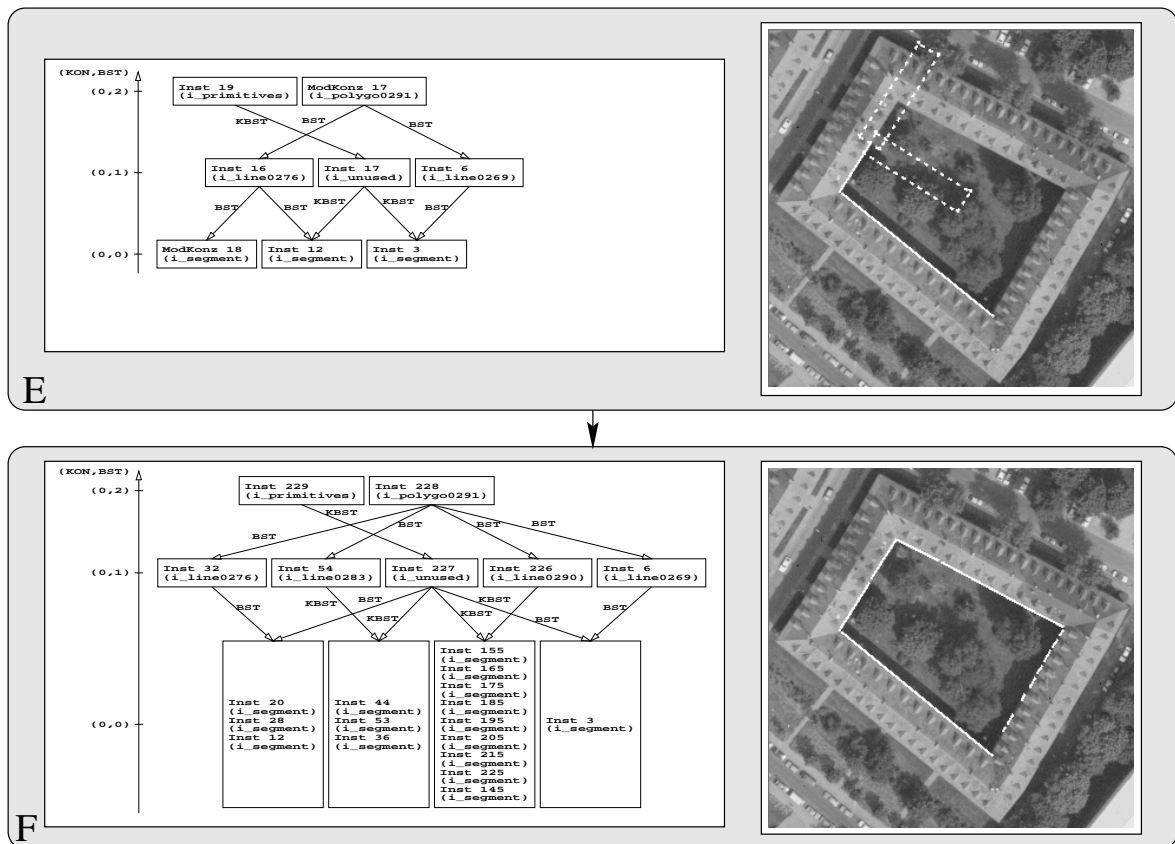


Abb. 4-8: Typischer Ablauf des Analyseprozesses (Teil 2)

einem Konzept ohne Dekomposition erzeugt. Diese Expansion ist nun *top-down*, da Wissen von Objekten auf höheren Abstraktionsebenen in Objekte niedrigerer Abstraktionsebenen übertragen wird. Die geschilderte Situation wird von dem Beschreibungsgraphen in Abb. 4-7D dargestellt.

An die Expansion schließt sich die Instanzierung des modifizierten Konzeptes Nr. 14 *i_segment* (Abb. 4-7D) an. Dabei wird die Instanz Nr. 12 (Abb. 4-8E) für *i_segment* durch Auswahl eines zu den Beschränkungen passenden Kantensegments erzeugt. Die erzeugte Instanz ist als weiße Linie im Luftbild in Abb. 4-8E eingezeichnet. Anschließend an die Instanzierung für *i_segment* wird die Instanz Nr. 16 für *i_line0276* erzeugt.

Wieder hat man danach zwei Möglichkeiten, die Analyse fortzusetzen: man verlängert die zweite Polygonseite durch Erzeugung neuer Instanzen für *i_segment*, oder man erklärt die zweite Polygonseite in ihrem aktuellen Zustand für vollständig und beginnt mit der Instanzierung der nächsten Polygonseite. Beide Möglichkeiten sind durch die weißen, mit unterbrochener Linie gezeichneten Suchbereiche im Luftbild in Abb. 4-8E dargestellt.

Wir verfolgen nun die Möglichkeit der Verlängerung der zweiten Polygonseite. Eingeleitet wird sie durch die Erstellung eines modifizierten Konzeptes für *i_segment* als Bestandteil der zweiten Polygonseite. Dieses ist das modifizierte Konzept Nr. 18 in

Abb. 4-8E. Durch die top-down-Expansion wird der Suchbereich für die folgende Instanzierung eingeschränkt. Von den beiden in das Luftbild eingezeichneten Suchbereichen ist für die hier verfolgte Variante der in Verlängerung der bisher gefundenen, zweiten Polygonseite liegende Suchbereich gültig. Durch Vergleich mit dem entsprechenden Suchbereich aus Abb. 4-7D wird der Wissensgewinn bei fortschreitender Analyse und die Bedeutung der Expansion deutlich.

Die Analyse wird mit der Instanzierung des zuletzt erzeugten modifizierten Konzeptes fortgesetzt. Daran anschließend werden, ähnlich wie bisher beschrieben, im Wechsel von Expansion und Instanzierung modifizierte Konzepte erstellt, verändert und schließlich Instanzen gebildet. Der Prozeß wird so lange fortgesetzt, bis für das Zielkonzept eine Instanz gebildet wurde. Dieser Zustand, der Endzustand der Analyse, wird Abb. 4-8F erreicht.

Der im Endzustand der Analyse enthaltene Beschreibungsgraph gibt den Aufbau des Polygons an: Das Polygon hat vier Seiten, und die einzelnen Seiten bestehen aus einer unterschiedlichen Anzahl (zwischen eins und neun) von Kantensegmenten. Die dem Polygon zugeordneten Kantensegmente sind in das Luftbild als weiße Linien eingezeichnet.

Anwendungsabhängige und anwendungsunabhängige Verfahrensteile

Wie dargestellt, erfolgt die Analyse stets als ein Wechsel von Expansion und Instanzierung. Die Reihenfolge, in der die Konzepte expandiert oder instanziiert werden, ist dabei jedoch nicht vom Inhalt des Konzeptes abhängig. Sie ist lediglich vom Bestandteil- und vom Konkretisierungsgrad des Konzeptes abhängig: Die Expansion wird für Konzepte mit hohen Graden eher ausgeführt als für Konzepte mit niedrigen Graden, während die Reihenfolge bei der Instanzierung umgekehrt ist. Damit wird die Analyse stets nach dem gleichen Verfahren durchgeführt. Der Kontrollalgorithmus ist also anwendungsunabhängig.

Natürlich müssen während der Analyse auch anwendungsspezifische Prozeduren ausgeführt werden. Diese Prozeduren sind jedoch Teil des Objektmodells: Im Sinne einer objektorientierten Repräsentation "weiß" jedes Konzept, wie es seine Attribute berechnen kann oder wie seine Instanzen zu bewerten sind. Diese Prozeduren werden in einer anwendungsunabhängigen, vorab festgelegten Reihenfolge [48] vom Kontrollalgorithmus bei jeder Expansion oder Instanzierung eines Konzeptes aufgerufen.

Die Analyse als Suche

Wie aus der Beschreibung des Analyseablaufs deutlich wird, treten während der Analyse immer wieder Situationen auf, in deren Anschluß es mehrere Möglichkeiten gibt, die Analyse fortzusetzen. Ein Beispiel dafür ist, wenn scheinbar mehrere Bildbereichshinweise gleichzeitig den Modellanforderungen genügen. So liegen in dem in Abb. 4-7B eingezeichneten Suchbereich mehrere Kantensegmente (vgl. dazu Abb. 4-6a, in der alle Kantensegmente eingezeichnet sind). Alle Kantensegmente, die in dem Suchbereich liegen, erfüllen die in diesem Stadium der Analyse zunächst vorhandenen Modellanforderungen. Erst im weiteren Verlauf der Analyse wird man entscheiden können, ob

einzelne Kantensegmente tatsächlich alle Modellanforderungen erfüllen und z.B. zusammen mit anderen Kantensegmenten ein Polygon bilden.

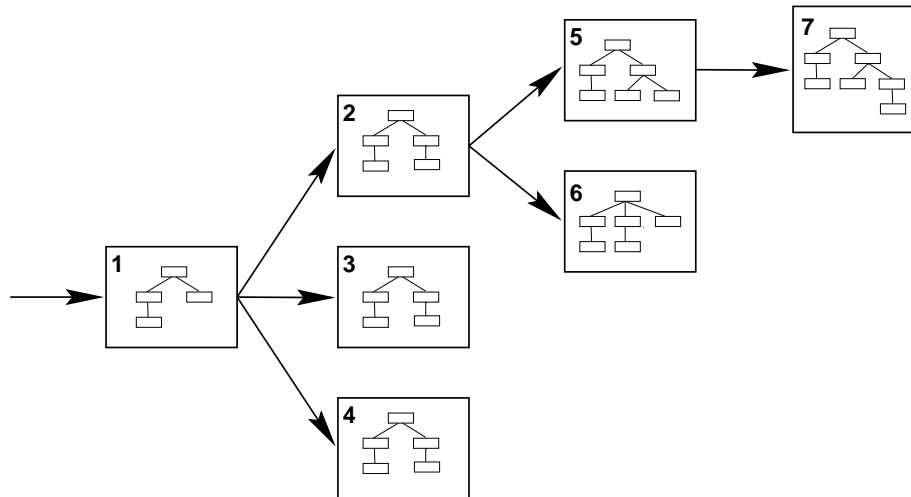


Abb. 4-9: Analysezustände. Jeder Zustand enthält ein Zwischenergebnis, bestehend aus Instanzen und modifizierten Konzepten. Die Zwischenergebnisse sind in Form von Beschreibungsgraphen in den Zuständen skizziert.

Auch in Situationen wie sie in Abb. 4-7D und 4-8E dargestellt sind, kann die Analyse auf verschiedene Arten fortgesetzt werden. So kann z.B. versucht werden, die Polygonseite, für die bereits eine Instanz besteht, um weitere Kantensegmente zu verlängern. Es kann aber auch mit der Instanzierung der nächsten Polygonseite begonnen werden. Diese Möglichkeiten zur Fortsetzung der Analyse führen nicht nur, wie im vorhergehenden Beispiel, zu unterschiedlichen Attributwerten der Instanzen, sondern auch zu unterschiedlichen Strukturen der Zwischenergebnisse.

Analysezustände

Damit die entstehenden Zwischenergebnisse in sich konsistent sind, werden *Analysezustände* definiert. Ein Analysezustand ist eine solche Konfiguration von modifizierten Konzepten und Instanzen, bei der es zu keinem Konzept des Modells konkurrierende modifizierte Konzepte oder Instanzen gibt. In Situationen, d.h. Analysezuständen, in denen es mehrere Möglichkeiten gibt, die Analyse fortzusetzen, wird daher für jede dieser Möglichkeiten ein neuer Zustand als Nachfolger des aktuellen Zustandes erzeugt. So gab es z.B. in dem mit Nr. 1 bezeichneten Analysezustand aus Abb. 4-9 drei Möglichkeiten, die Analyse fortzusetzen. Dementsprechend wurden die Zustände mit den Nummern 2, 3 und 4 als Nachfolger des Zustandes Nr. 1 erzeugt. Die Zwischenergebnisse in den Zuständen Nr. 2, 3 und 4 sind identisch in dem Teil, der bereits in Zustand Nr. 1 vorhanden war. Sie unterscheiden sich durch die Ergebnisse der Instanzierung oder Expansion, die beim Übergang von Zustand Nr. 1 zu seinen Nachfolgern durchgeführt wurde.

Die Analysezustände können als Knoten graphisch dargestellt werden. Verbindet man

die Zustände mit ihren Nachfolgezuständen, so entsteht ein Baum (Abb. 4-9). Wir bezeichnen diesen Baum als *Suchbaum*. Je entfernter die Analysezustände vom Wurzelknoten des Suchbaums sind, um so vollständiger sind die Zwischenergebnisse. Verfolgt man den Pfad von einem Analysezustand zurück zum Anfangszustand der Analyse, so kann die Entstehungsgeschichte des entsprechenden Zwischenergebnisses nachvollzogen werden. Damit kann *erklärt* werden, aufgrund welcher Ereignisse, Sachverhalte oder Entscheidungen ein Ergebnis zustande gekommen ist.

Für den Analyseprozeß selbst ist es jedoch nicht notwendig, daß alle Zustände, beginnend vom Anfangszustand der Analyse bis zu dem zuletzt erzeugten Zustand zur Verfügung stehen. Sobald für einen Zustand Nachfolgezustände erzeugt wurden, ist der Zugriff auf diesen Zustand nicht mehr erforderlich, da die gesamte Information des Zustandes ja in seinen Nachfolgern enthalten ist. So sind z.B. zu dem Zeitpunkt, zu dem der in Abb. 4-9 dargestellte Schnappschuß der Analyse erzeugt wurde, nur noch die Zustände Nr. 3, 4, 6 und 7 notwendig. Diese Zustände enthalten untereinander konkurrierende Zwischenergebnisse, die zu unterschiedlichen Analyseergebnissen führen.

Formulierung der Suchaufgabe

Vordergründiges Ziel der Analyse ist es, das *richtige* Analyseergebnis zu finden. Unter einem richtigen Analyseergebnis verstehen wir eine solche Interpretation des Bildes, die frei von Widersprüchen mit dem zur Analyse verwendeten Modell ist. In der Praxis wird es jedoch nicht möglich sein, ein Modell derart zu erstellen, daß nur das die Realität widerspiegelnde Analyseergebnis, also das richtige Ergebnis, widerspruchsfrei zum Modell ist. Man behilft sich deshalb mit einem *Optimalitätskriterium* und *sucht* nach dem Ergebnis, das dieses Kriterium am besten erfüllt.

Damit sind zwei wichtige Eigenschaften des Analyseprozesses genannt: Die Analyse ist als eine *Optimierungsaufgabe* definiert und sie wird in Form eines *Suchprozesses* durchgeführt. Gesucht wird aus der Menge der Analysezustände eine Folge von Zuständen, die vom Anfangszustand der Analyse zu dem Zustand führt, der das optimale Ergebnis im Sinne des definierten Kriteriums enthält. Man sucht also nach einem Pfad im Suchbaum, der von der Wurzel des Baumes zu dem Blatt führt, welches das optimale Ergebnis enthält. Im Unterschied zu vielen anderen Suchaufgaben liegt hier die Menge der Zustände jedoch nicht bereits *vor* der Suche vor, sondern sie wird *während* der Suche erzeugt.

Wie bereits beschrieben, ist es in der Regel nicht möglich, sofort nach der Erzeugung eines neuen Analysezustandes zu entscheiden, ob der in diesem Zustand eröffnete Pfad zum Erfolg führt. Daher ist eine Möglichkeit, die Suche zu gestalten, die, für *jeden* Pfad im Suchbaum die Entwicklung so lange fortzusetzen, bis entweder feststeht, daß dieser Pfad nicht zum Ziel führt, oder bis das Ziel erreicht ist. Das bedeutet, daß eine *vollständige* Suche durchgeführt wird. Der Aufwand hierfür ist jedoch sehr groß. Hat z.B. ein Zustand i Folgezustände, und jeder dieser Folgezustände j Nachfolger, so sind bereits $i \times j$ Pfade zu verfolgen. Es wird deutlich, daß die Anzahl der Pfade exponentiell mit der Tiefe des Suchbaums steigt. Eine vollständige Suche garantiert zwar das Finden des Zustandes mit dem optimalen Ergebnis, sie ist jedoch in vielen Fällen wegen

der extrem hohen Anzahl der Pfade im Suchbaum nicht durchführbar.

Heuristische Suchverfahren

Alternativ zur vollständigen Suche sind aus der Literatur (siehe z.B. [10,79]) eine Reihe von heuristischen Verfahren zur Suche in Graphen bekannt. Die sogenannten *blinden* Suchverfahren, wie z.B. die Tiefensuche oder die Breitensuche wählen "blind", d.h. ohne Beachtung eines Gütekriteriums den Zustand aus, mit dem die Analyse fortgesetzt wird.

Im Unterschied zu den blinden Suchverfahren werden bei den *informierten* Suchverfahren Bewertungen der Zustände verwendet, um den Zustand auszuwählen, mit dem die Analyse fortgeführt wird. Falls es möglich ist, eine Schätzung der Bewertung von zukünftigen Analysezuständen abzugeben, kann der A^* -Algorithmus [79] angewendet werden. In der Literatur wird der A^* -Algorithmus häufig unter Verwendung von Kostenfunktionen beschrieben. Wir wollen hier den Algorithmus unter Verwendung von Gütefunktionen beschreiben.

Ähnlich wie bei den anderen informierten Suchverfahren auch, wählt man beim A^* -Algorithmus zur Fortführung der Analyse *den* Knoten aus der Menge der Blätter des Suchbaums aus, der die beste Gütefunktion besitzt. In Abb. 4-10 ist ein Suchbaum zu einem gegebenen Zeitpunkt der Analyse dargestellt. Die mit durchgezogener Linie gezeichneten Suchbaumknoten repräsentieren in der Vergangenheit erzeugte Analysezustände. Die mit unterbrochener Linie gezeichneten Suchbaumknoten deuten mögliche zukünftige Analysezustände an. Zur Fortführung der Analyse wird in dem dargestellten Beispiel der Zustand mit der besten Güte aus der Menge der mit 6, 9, 10, 11 und 13 bezeichneten Zustände gewählt.

Die Güte $f(n)$ für einen Zustand n der Analyse setzt sich beim A^* -Algorithmus aus zwei Anteilen zusammen:

$$f(n) = g(n) + h^*(n). \quad (4-1)$$

Der Anteil $g(n)$ der Güte repräsentiert die bereits erzielte Güte des aktuellen Zustandes. Der Anteil $h^*(n)$ ist eine Schätzung der Güte, die in der Zukunft noch erzielt werden kann. Die Gesamtgüte $f(n)$ ist also eine Schätzung der zu erwartenden Güte des aus dem aktuellen Pfad erreichbaren Zielzustandes.

Eine wesentliche Eigenschaft des A^* -Algorithmus ist, daß bei Einhaltung einer Zulässigkeitsbedingung der beste Zielzustand gefunden wird, und zwar auch dann, wenn die Analyse immer nur mit dem Zustand mit dem aktuell größten Wert $f(n)$ fortgesetzt wird und alle anderen Zustände nicht weiter verfolgt werden. Diese Zulässigkeitsbedingung fordert, daß die Schätzung $h^*(n)$ eine Überschätzung der tatsächlichen zukünftigen Güte $h(n)$ sei:

$$h^*(n) \geq h(n) . \quad (4-2)$$

Bei der Beschreibung des Analyseprozesses wurde dargestellt, daß die Analyse als eine Optimierungsaufgabe formuliert werden kann. Daher bietet es sich an, als Güte zur Steuerung des A^* -Algorithmus dasselbe Kriterium zu benutzen, das auch zur Definition des optimalen Ergebnisses verwendet wird.

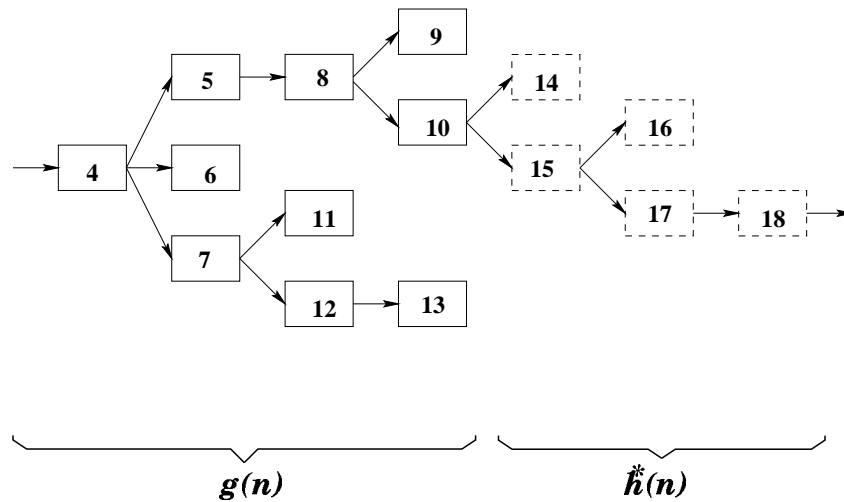


Abb. 4-10: Bewertungsfunktionen für den A^* -Algorithmus

Die Berechnung der Güte eines Zwischenergebnisses in einem Zustand der Analyse ist sicherlich möglich. Schwieriger gestaltet sich hingegen die Schätzung der in Zukunft auf dem Weg vom aktuellen Analysezustand zu dem noch unbekanntem Zielzustand erreichbaren Güte. Eine Unterschätzung der zukünftigen Güte kann dazu führen, daß das optimale Ergebnis nicht gefunden wird. Man wird bei der Schätzung der zukünftigen Güte also geneigt sein, eher eine stärkere Überschätzung als eine Unterschätzung vorzunehmen. Eine starke Überschätzung führt jedoch dazu, daß auch viele Zustände zunächst verfolgt werden, von denen es sich später erweisen wird, daß sie nicht zu dem gewünschten Ziel führen. Bei einer starken Überschätzung erhält die Suche somit eine Tendenz zur Breitensuche.

Um ein zielgerichtetes Vorgehen zu erreichen, wird daher eine Variante des A^* -Algorithmus, der ϵ - A^* -Algorithmus [83], vorgeschlagen. Bei ihm wird die Gütefunktion des A^* -Algorithmus nach Gl. (4-1) ersetzt durch:

$$f_\epsilon(n) = g(n) + (1 - \epsilon)h^*(n) ,$$

wobei $0 \leq \epsilon \leq 1$ eine kleine Zahl ist. Die Funktionen $g(n)$ und $h^*(n)$ haben dieselbe Bedeutung wie in Gl. (4-1). Abhängig von ϵ ist eine Unterschätzung der zukünftig erreichbaren Güte möglich und daher kann das Finden der optimalen Lösung nicht mehr garantiert werden. Es wurde jedoch gezeigt [83], daß bei Verwendung des ϵ - A^* -Algorithmus der Verlust an Optimalität im ungünstigsten Fall auf $\frac{\epsilon}{1-\epsilon}$ Prozent der optimalen Lösung begrenzt ist. Wir verwenden den ϵ - A^* -Algorithmus für die Durchführung der Analyse.

Eine Möglichkeit, die Bewertungen der Analysezustände aus den Bewertungen der Instanzen und modifizierten Konzepte abzuleiten, wird in Kapitel 4.3 vorgestellt. Es ist wichtig zu bemerken, daß die Bewertungen nicht Teil des Verfahrens zur Wissensnutzung, sondern Teil des Modells sind: jedes Konzept "weiß", wie die eigenen Instanzen zu bewerten sind.

4.3 Bewertungen

Die Bewertungen erfüllen in dem vorgestellten System zur Luftbildauswertung zwei Aufgaben. Ihre Hauptaufgabe ist die Steuerung der Bildauswertung. Sie erfüllen diese Aufgabe, indem die Analyse mit dem Zustand fortgesetzt wird, der die beste Bewertung hat. Für diesen Zweck der "Sortierung" der Analysezustände ist es erforderlich, daß die Funktionen zur Berechnung der Bewertungen monotone Funktionen sind. Beim Entwurf der Bewertungsfunktionen ist auch darauf zu achten, daß Zustände, die unterschiedlich weit in der Erstellung des Ergebnisses fortgeschritten sind, miteinander vergleichbar bleiben. Für die Aufgabe der Steuerung der Analyse ist es jedoch nicht erforderlich, für die Bewertungen einen Minimalwert und einen Maximalwert festzulegen.

Die zweite Aufgabe der Bewertungen in unserem System ist es, ein Maß für die Güte zu sein, mit der das Analyseziel erreicht wurde. Um diese Aufgabe zu erfüllen, behandeln wir die Bewertungen als *Vertrauensmaße*. Ganz allgemein ist ein Vertrauensmaß eine subjektiv bestimmte Zahl aus einem festgelegten Wertebereich, die das Vertrauen, die Erwartung, den persönlichen Glauben eines Menschen in das Eintreffen eines Ereignisses quantifiziert. Je größer diese Zahl ist, desto größer ist das Vertrauen, daß dieses Ereignis eintritt. Formale Definitionen für Vertrauensmaße im Rahmen verschiedener Theorien geben wir in Abschnitt 4.3.2.

Wir legen also für die Bewertungen einen definierten Wertebereich fest. Die Vergabe des Minimalwerts bedeutet fehlende Übereinstimmung zwischen Analyseergebnis und Modell oder fehlendes Vertrauen in das Erreichen des Analyseziels. Die Vergabe des Maximalwerts bedeutet vollständige Übereinstimmung oder volles Vertrauen.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Bewertungen eine Beurteilung des Erfolgs der Analyse im Kontext des eigenen Systems ermöglichen, nicht aber einen Vergleich unterschiedlicher Systeme bei der Lösung einer (derselben) Aufgabe. Das ist deswegen nicht möglich, weil Vertrauensmaße keine objektiven, sondern subjektive Größen sind. Wir diskutieren die subjektive Natur der Vertrauensmaße und ihr Verhältnis zu Wahrscheinlichkeiten.

4.3.1 Vertrauensmaße vs. Wahrscheinlichkeiten

Vertrauensmaße sind laut Definition *subjektive Größen*. Das ist auch auf dem Gebiet der Luftbildauswertung nicht anders. Wenn Vertrauensmaße den Grad der Übereinstimmung zwischen einem Ergebnis oder Zwischenergebnis der Bildauswertung und dem Modell angeben, so wird man sich fragen, wie "Übereinstimmung" definiert ist. Eine mögliche Definition wäre z.B. die geometrische Paßgenauigkeit (eventuell nach geeigneten Transformationen) zwischen dem Modell und der aus dem Luftbild erzeugten Beschreibung. Da ein Modell jedoch ein generalisiertes, idealisiertes Abbild der Realität ist (vgl. auch Kapitel 2), kann eine vollständige Übereinstimmung gar nicht möglich sein. Der Systementwickler wird manche Abweichungen zwischen Ergebnis und Modell stärker gewichten, andere Abweichungen weniger stark. Diese Gewichtung ist von seinen Erfahrungen und seinem Vorwissen abhängig.

Da aber für Vertrauensmaße üblicherweise der Wertebereich zwischen 0 und 1 oder 0 und 100 gewählt wird, entstehen Assoziationen zu Wahrscheinlichkeiten, etwa in der Art, daß das Vertrauensmaß die Wahrscheinlichkeit angäbe, mit der das Ergebnis dem Modell entspricht.

Diese Assoziationen sind falsch. Vertrauensmaße werden vom Menschen vergeben und sind damit subjektive Größen. Wahrscheinlichkeiten als Grenzwerte einer relativen Häufigkeit sind objektive Größen, die unabhängig von ihrer Wahrnehmung durch den Menschen existieren. So ist z.B. die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses "Kopf" beim Wurf einer Münze: $P(K) = 0.5$, unabhängig von der Präferenz des Menschen für den Ausgang des Experiments.

Damit die Angabe einer Wahrscheinlichkeit überhaupt einen Sinn hat, müssen der Ereignisraum und das Experiment genau spezifiziert sein. Bei der Beschreibung des Experiments müssen die (makroskopischen) Randbedingungen angegeben werden, die sich bei einer Wiederholung nicht ändern dürfen. Gleichzeitig sollen sich jedoch (mikroskopische) Bedingungen ändern, um überhaupt einen anderen Ausgang des Experiments zu ermöglichen.

Im Umfeld der in dieser Arbeit behandelten Anwendung ist es schwierig, ein Experiment zur Zuordnung von Bildbereichshinweisen zu einem Modell zu definieren und die Randbedingungen anzugeben, die sich bei der Wiederholung des Experiments ändern dürfen, sowie auch die anderen Randbedingungen anzugeben, die sich nicht ändern sollen. Das ist aber notwendig, um zumindest gedanklich das Experiment beliebig oft wiederholen zu können und so die Wahrscheinlichkeiten bestimmen zu können. Die Angabe der Randbedingungen des Experiments ist wohl am schwierigsten. So kann man sich z.B. fragen, ob das Vorhandensein eines Baumes, der die Dachkante eines Gebäudes im Luftbild verdeckt, oder die Tatsache, daß die Straße neben einem Gebäude denselben Grauwert wie das Gebäudedach hat, "Zufälle" sind oder nicht. Die genannten Beispiele könnten als Störungen für die Gebäudeerkennung aufgefaßt werden, doch gleichzeitig sind diese Störungen makroskopische Objekte, die selbst modelliert werden könnten und zu erkennen wären.

Die hier vorgestellten und auf das Umfeld unserer Anwendung beschränkten Überlegungen werden durch Theorien in der modernen Wissenschaftsphilosophie unterstützt. In seiner Formulierung der Erkenntnistheorie führt Karl Popper "als erster den Gedanken der *Bewährung* oder des *Bewährungsgrades* ein, um eindeutig zu zeigen, daß jede probabilistische Theorie der Bevorzugung (und damit jede probabilistische Theorie der Induktion) absurd ist." Er gelangt zu der Schlußfolgerung, "daß die *Vorzugswürdigkeit einer Hypothese keine Wahrscheinlichkeit im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung sein kann.*" (Zitate aus [85], Hervorhebungen im Original).

Es erscheint uns somit nicht möglich, objektive Maßzahlen, Wahrscheinlichkeiten für Hypothesen, die durch die Zuordnung von Bildbereichshinweisen zum Modell aufgestellt werden, anzugeben. Vielmehr bleibt es dem Systementwickler vorbehalten, auf Grund seiner Erfahrung, nach bestem Wissen und Gewissen, die Vertrauensmaße unter der Verwendung verschiedener Heuristiken zu vergeben. Das bedeutet jedoch nicht, daß auf die Behandlung der Vertrauensmaße innerhalb eines Formalismus verzichtet werden

muß.

4.3.2 Bayessche Theorie und Dempster–Shafer–Theorie

Die Bayessche Theorie (siehe z.B. [84]) und die Dempster–Shafer–Theorie [96] bieten beide einen formalen Rahmen zur Behandlung von Vertrauensmaßen. Wir wollen hier nur die wichtigsten Begriffe der beiden Theorien vorstellen und sie miteinander vergleichen.

Bayessche Theorie

Gegeben sei der Ereignisraum Ω :

$$\Omega = \{a_k\} , \quad k = 1, \dots, K , \quad A_i \subseteq \Omega \quad (4-3)$$

als Menge der Elementarereignisse a_k und A_i sei ein beliebiges Ereignis aus diesem Ereignisraum.

Das Vertrauensmaß $P(A_i)$ für ein Ereignis A_i ist eine Zahl, die, bei Behandlung im Rahmen der Bayesschen Theorie, den Axiomen der Wahrscheinlichkeitslehre genügt:

$$0 \leq P(A_i) \leq 1 \quad (4-4)$$

$$P(\emptyset) = 0 , \quad P(\Omega) = 1 \quad (4-5)$$

$$P(A_i \cup A_j) = P(A_i) + P(A_j) - P(A_i \cap A_j) . \quad (4-6)$$

Der Wertebereich für Vertrauensmaße ist zwischen 0 und 1 (Gl. (4-4)), der Minimalwert wird für das unmögliche Ereignis und der Maximalwert für das sichere Ereignis vergeben (Gl. (4-5)), und für das Vertrauen in die Vereinigung zweier Ereignisse gilt Gl. (4-6).

Wir betonen erneut, daß trotz der in der Literatur üblichen Bezeichnung dieser Größen mit dem Formelzeichen $P(\cdot)$ und trotz der Tatsache, daß diese Größen die Axiome der Wahrscheinlichkeitslehre erfüllen, es sich bei ihnen nicht um Wahrscheinlichkeiten handelt (vgl. auch verschiedene Aufsätze in Kapitel 6 von [97]).

In der Bayesschen Theorie können die Vertrauensmaße als die Bereitschaft einer Person interpretiert werden, Wetten zu den diesen Maßen entsprechenden Quoten anzubieten. Die Anwendbarkeit der Rechenregeln der Wahrscheinlichkeitslehre auf die Vertrauensmaße wird begründet mit der Tatsache, daß die Person, die Wetten anbietet, diese Regeln befolgen muß, wenn sie nicht will, daß ein Gegner *systematisch* Gewinne erzielt. Dies kann anhand eines Beispiels deutlich gemacht werden.

Man betrachte das Geschehen in der Fußball–Bundesliga in der Saison 1996/97. Die Frage: “Wer wird deutscher Fußballmeister 1997?” spannt einen Ereignisraum gebildet aus 18 Elementarereignissen auf, da jede der 18 Mannschaften Meister werden könnte. Aufgrund verschiedener Überlegungen definiert Fußballexperte A seine Vertrauensmaße

für die Elementarereignisse. Mit Hilfe der Rechenregeln der Wahrscheinlichkeitslehre können dann die Vertrauensmaße für alle anderen Ereignisse berechnet werden.

Fußballexperte A ist von der Richtigkeit der von ihm aufgestellten Vertrauensmaße überzeugt und bietet Wetten mit Quoten entsprechend diesen Maßen an. Wir betrachten zwei Ereignisse: "Fußballmeister wird Bayern München", für das der Experte ein Vertrauensmaß $P(M'97 = BM) = 0.45$ festgelegt hat, und "Fußballmeister wird Borussia Dortmund". Für dieses Ereignis hat der Experte das Vertrauensmaß $P(M'97 = BD) = 0.35$ festgelegt. Für das Ereignis $M'97 = BM$ ergibt sich gemäß den Festlegungen die Wettquote $0.45 : 0.55$, d.h. Experte A setzt 45 Pfennig auf das Eintreten des Ereignisses oder 55 Pfennig auf das Ausbleiben des Ereignisses. Liegt er mit seinem Tip richtig, zieht er von seinem Wettgegner den gesetzten Betrag ein, liegt er falsch, muß er an seinen Gegner dessen gesetzten Betrag (also das Komplement zu seinem gesetzten Betrag) bezahlen. Experte A bietet auch eine Wette für oder gegen das Ereignis $M'97 = BD$ zu der Quote $0.35 : 0.65$ an.

Gemäß Gl. (4-6) berechnet sich das Vertrauen in das Ereignis "Meister wird Bayern München oder Borussia Dortmund" zu:

$$P(M'97 = BM \cup BD) = 0.45 + 0.35 - 0 = 0.8 \text{ .}$$

Mißachtet Fußballexperte A jedoch dieses Axiom, indem er sein Vertrauensmaß für dieses Ereignis zu $P(M'97 = BM \cup BD) = 0.7$ festlegt und dementsprechend auch Wetten anbietet, so ist es für Laie B möglich, systematisch Gewinne zu erzielen. Man kann leicht nachvollziehen, daß, wenn Fußballlaie B die Wetten: auf das Ereignis $M'97 \neq BM$ mit dem Einsatz 0.55, auf das Ereignis $M'97 \neq BD$ mit dem Einsatz 0.65 und schließlich auf das Ereignis $M'97 = BM \cup BD$ mit dem Einsatz 0.7 annimmt, er immer einen Gesamtgewinn verzeichnet, unabhängig vom tatsächlichen Ausgang des Experiments.

Der sichere Gesamtgewinn ist jedoch nur deshalb möglich, weil Fußballexperte A *beidseitige* Wetten anbietet, er also keine Präferenz für einen bestimmten Ausgang eines Experiments äußert und gleichermaßen Wetten für oder gegen ein Ereignis annimmt. An dieser Stelle setzt die Kritik der Vertreter der Dempster-Shafer-Theorie an, die es als nicht notwendig erachten, für alle möglichen Ausgänge eines Experiments Wetten anzunehmen. Läßt man die beidseitigen Wettangebote fallen und äußert man seine Präferenz für nur einen Ausgang eines Experiments, so können die Bedingungen des Axioms (4-6) schwächer gefaßt werden.

Dempster-Shafer-Theorie

Unter Verwendung derselben Notationen für Ereignisse und Ereignisräume wie in den Definitionen (4-3) bilden folgende Axiome die Grundlage der Dempster-Shafer-Theorie:

$$0 \leq Bel(A_i) \leq 1 \tag{4-7}$$

$$Bel(\emptyset) = 0 \text{ , } Bel(\Omega) = 1 \tag{4-8}$$

$$Bel(A_i \cup A_j) \geq Bel(A_i) + Bel(A_j) - Bel(A_i \cap A_j) \text{ .} \tag{4-9}$$

Im Unterschied zur Bayesschen Theorie werden die Vertrauensmaße in der Dempster-Shafer-Theorie mit dem Symbol $Bel(A_i)$ bezeichnet. Bel ist die Abkürzung für den im englischen Sprachgebrauch verwendeten Begriff *belief*. Wir übersetzen diesen Begriff mit *Vertrauensmaß*. Die Axiome der Dempster-Shafer-Theorie sind analog zu den Gl. (4-4)–(4-6). Lediglich in Gl. (4-9) wurde die größer-gleich-Beziehung anstatt der Gleichheitsbeziehung verwendet. Deswegen ist es in der Dempster-Shafer-Theorie im allgemeinen schwieriger als in der Bayesschen Theorie, eine konsistente Zuweisung von Vertrauensmaßen zu den Ereignissen eines Ereignisraumes vorzunehmen. Man behilft sich mit der *Vertrauensdichte* $m(A_i)$ (englisch *basic belief assignment* oder *basic belief masses*). Sie ist definiert als eine Funktion auf der Potenzmenge des Ereignisraumes und erfüllt folgende Eigenschaften:

$$m : 2^\Omega \rightarrow [0, 1] \quad (4-10)$$

$$m(\emptyset) = 0 \quad (4-11)$$

$$\sum_{A_i \subseteq \Omega} m(A_i) = 1 . \quad (4-12)$$

Enthält der Ereignisraum K Elementarereignisse, so sind hier 2^K Werte der Vertrauensdichte zu spezifizieren, gegenüber K Werten bei der Bayesschen Theorie. Die Vertrauensdichte $m(A_i)$ wird interpretiert als das Vertrauen, das dem Eintreten genau des Ereignisses A_i entgegengebracht wird, unter Ausschluß jeder echten Teilmenge dieses Ereignisses. Das Vertrauensmaß für ein Ereignis A_i erhält man als die Summe der Vertrauensdichten aller Teilmengen des Ereignisses:

$$Bel(A_i) = \sum_{A_j \subseteq A_i} m(A_j) . \quad (4-13)$$

Neben dem Vertrauensmaß wird in der Dempster-Shafer-Theorie auch die *Plausibilität* $Pl(A_i)$ definiert als die Summe der Vertrauensdichten aller Ereignisse, die nicht gegen das Ereignis A_i sprechen:

$$Pl(A_i) = \sum_{A_j \cap A_i \neq \emptyset} m(A_j) = \sum_{A_k \subseteq \Omega} m(A_k) - \sum_{A_l \subseteq \bar{A}_i} m(A_l) = 1 - Bel(\bar{A}_i) . \quad (4-14)$$

Vertrauensmaß und Plausibilität werden häufig als die unteren und oberen Grenzen einer unbekanntem Wahrscheinlichkeit interpretiert. Das ist jedoch nicht zulässig, da die Existenz einer Wahrscheinlichkeit gar nicht feststeht. Vertrauensmaß und Plausibilität können jedoch als die Grenzen einer mit Ungewißheit behafteten Bewertung angesehen werden. Die Differenz zwischen Plausibilität und Vertrauensmaß ist ein Maß für die Ungewißheit. Vollständige Ungewißheit kann in der Dempster-Shafer-Theorie modelliert werden, indem für die Vertrauensdichte folgende Zuweisung gewählt wird:

$$\begin{aligned} m(A_i) &= 0, & \forall A_i \subset \Omega \\ m(\Omega) &= 1 . \end{aligned}$$

Eine solche Vertrauensdichte wird *leere Vertrauensdichte* (englisch *vacuous belief assignment*) genannt. Bedingt durch diese Wahl ist das Vertrauensmaß für jedes Ereignis A_i des Ereignisraumes: $Bel(A_i) = 0$, und die Plausibilität ist: $Pl(A_i) = 1$.

Wird die Vertrauensdichte so festgelegt, daß für jedes Ereignis A_i gilt:

$$Bel(A_i) + Bel(\bar{A}_i) = 1, \quad \forall A_i \subseteq \Omega,$$

so entspricht² die Dempster–Shafer–Theorie der Bayesschen Theorie. Es kann leicht nachgeprüft werden, daß in diesem Fall folgende Gleichheit erfüllt ist:

$$Bel(A_i) = Pl(A_i), \quad \forall A_i \subseteq \Omega.$$

Die Vertrauensmaße der Dempster–Shafer–Theorie werden als das Vertrauen in eine Informationsquelle interpretiert. Wir wollen das erneut am Beispiel der Fußball-Bundesliga deutlich machen. Fußballexperte A stelle die Behauptung auf: “Bayern München wird deutscher Fußballmeister 1997”. Wir bezeichnen dieses Ereignis in vereinfachter Notation mit BM . Um ein Vertrauensmaß zu erhalten, bewertet man die Informationsquelle bezüglich ihrer Möglichkeiten, eine korrekte Vorhersage des Ausgangs des Experiments zu liefern und überträgt diese Bewertung auf das Ereignis. Würde man z.B. dem Fußballexperten A aufgrund seines fußballerischen Sachverstandes, der Kenntnis der Stärken und Schwächen der Gegner usw. zutrauen, zu 60% eine korrekte Vorhersage zu treffen, so würde man als Vertrauensmaß für das Ereignis “Bayern München wird Meister” den Wert $Bel_1(BM) = 0.6$ übernehmen. Unter ausschließlicher Beachtung dieser Aussage erhält man für einen Ereignisraum, der nur die Ereignisse BM und \bar{BM} enthält, folgende Vertrauensdichte³:

$$m_1(BM) = 0.6 \quad m_1(\bar{BM}) = 0 \quad m_1(\Omega) = 0.4.$$

Man beachte, daß damit nicht automatisch, wie in der Bayesschen Theorie, für das Ereignis “Bayern München wird nicht Meister” der Wert der Vertrauensdichte (und damit auch das Vertrauensmaß) $m_1(\bar{BM}) = 0.4$ angenommen wird. Vielmehr wird dafür der Wert Null angenommen, da über dieses Ereignis keine Aussage vorhanden ist. Die verbleibende Quantität wird der Vertrauensdichte für das sichere Ereignis zugewiesen und ist damit ein explizites Maß für die Unsicherheit.

Wie berechnet man die Vertrauensmaße für ein Ereignis, wenn mehrere, voneinander unabhängige Informationsquellen zur Verfügung stehen? Stellt z.B. Fußballexperte B, ohne von der Aussage von A Kenntnis zu haben, ebenfalls die Behauptung auf: “Bayern München wird deutscher Fußballmeister 1997”, und bewertet man diese Aussage mit $Bel_2(BM) = 0.7$, so führt das zu folgender Vertrauensdichte auf dem Ereignisraum:

$$m_2(BM) = 0.7 \quad m_2(\bar{BM}) = 0 \quad m_2(\Omega) = 0.3.$$

Man hat nun für denselben Ereignisraum zwei Vertrauensdichten aus unterschiedlichen Quellen. In der Dempster–Shafer–Theorie kombiniert man sie mit Hilfe der *Regel von*

²Diese Eigenschaft ist eine direkte Folge des Axioms (4-6) der Bayesschen Theorie.

³Da es sich um einen Ereignisraum mit nur zwei Ereignissen handelt, sind in diesem Beispiel die Vertrauensmaße, außer für das sichere Ereignis, gleich den Werten der Vertrauensdichte.

Dempster zur parallelen Kombination [96]. Gemäß dieser Regel erhält man die resultierende Vertrauensdichte $m = m_1 \oplus m_2$ aus der Kombination von zwei auf demselben Ereignisraum Ω definierten Vertrauensdichten m_1 und m_2 mit der Formel:

$$m(A_k) = \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A_k} m_1(A_i) m_2(A_j)}{1 - \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j)} . \quad (4-15)$$

In unserem Beispiel berechnet man die Vertrauensdichte für das Ereignis BM :

$$m(BM) = \frac{m_1(BM) m_2(BM) + m_1(BM) m_2(\Omega) + m_1(\Omega) m_2(BM)}{1 - m_1(BM) m_2(\overline{BM}) - m_1(\overline{BM}) m_2(BM)} = 0.88 .$$

Analog berechnet man auch die Vertrauensdichten für die anderen Ereignisse des Ereignisraumes zu:

$$m(\overline{BM}) = 0 \quad \text{und} \quad m(\Omega) = 0.12 .$$

Die Kombinationsregel (4-15) ist kommutativ und assoziativ, also kann die Kombination von mehr als zwei Vertrauensdichten paarweise und in beliebiger Reihenfolge durchgeführt werden. Wie man es erwarten würde, hat die Kombinationsregel (4-15) auch die Eigenschaft, daß sich eine Vertrauensdichte bei der Kombination mit einer leeren Vertrauensdichte nicht ändert, da die leere Vertrauensdichte ja keine zusätzlichen Informationen, sondern nur Ungewißheit enthält.

Diskussion

Sowohl die Dempster–Shafer–Theorie als auch die Bayessche Theorie eignen sich als mathematisches Regelwerk für die Arbeit mit Vertrauensmaßen. Die Dempster–Shafer–Theorie ist dabei gewissermaßen eine Erweiterung der Bayesschen Theorie. Bei einer bestimmten Wahl der Vertrauensdichte gehorchen die Vertrauensmaße der Dempster–Shafer–Theorie nämlich auch den Axiomen der Wahrscheinlichkeitslehre. Ein Pendant für Gl. (4-15) gibt es in der Bayesschen Theorie jedoch nicht.

Das ist dadurch erklärbar, daß in der Bayesschen Theorie die Vertrauensmaße eher im Sinne von “subjektiven Wahrscheinlichkeiten” interpretiert werden und dem Ereignis selbst anhaften. Dadurch sind mehrere unterschiedliche Vertrauensmaße für ein einziges Ereignis nicht möglich. Im Gegensatz dazu läßt die Semantik der Dempster–Shafer–Theorie mehrere Vertrauensmaße für ein Ereignis zu. Sie interpretiert die Vertrauensmaße als Bewertungen der Informationsquellen.

Das bedeutet aber nicht, daß es nicht möglich ist, die Situation mehrerer Informationsquellen, die unterschiedliche Vertrauensmaße liefern, in der Bayesschen Theorie zu behandeln. Man kann diese Situation mit Hilfe der bedingten Vertrauensmaße (analog den bedingten Wahrscheinlichkeiten) modellieren, wobei die verschiedenen Informationsquellen dann in den Bedingungsteil aufgenommen werden.

Die Dempster–Shafer–Theorie erlaubt es, die Ungewißheit explizit zu modellieren. Vollständige Ungewißheit wird dadurch ausgedrückt, daß:

$$\forall A_i : \quad Bel(A_i) = 0 \quad \wedge \quad Pl(A_i) = 1 ,$$

unabhängig von der Anzahl der Ereignisse des Ereignisraumes. Das ist in der Bayeschen Theorie nicht ohne weiteres möglich. Ungewißheit kann zwar dadurch modelliert werden, daß den Ereignissen gleiche Vertrauensmaße zugewiesen werden, jedoch sind diese Vertrauensmaße dann von der Größe des Ereignisraumes abhängig.

Die Dempster–Shafer–Theorie zwingt nicht dazu, zweiseitige Wetten anzubieten, d.h. die Differenz des Vertrauensmaßes eines Ereignisses zur Einheit wird nicht automatisch als das Vertrauensmaß des gegenteiligen Ereignisses interpretiert. Wir machen uns diese Eigenschaft zu Nutze und zeigen in den nächsten Abschnitten, wie durch Modellierung der Bewertungen in der Dempster–Shafer–Theorie die Bewertungsfunktion für den A^* -Algorithmus erstellt werden kann.

4.3.3 Fortpflanzung von Vertrauensmaßen

Die Regel von Dempster zur parallelen Kombination (Gl. (4-15)) erlaubt die Kombination von Vertrauensmaßen innerhalb eines Ereignisraumes. In wissensbasierten Systemen ist oftmals jedoch auch die Fortpflanzung von Vertrauensmaßen über verschiedene Ereignisräume notwendig. In der Literatur sind mehrere Ansätze hierfür entwickelt worden. Einen allgemeinen Überblick zur Behandlung von Vertrauensmaßen in wissensbasierten Systemen findet man z.B. in [49]. Wir besprechen einige Ansätze, die zur Fortpflanzung von Vertrauensmaßen im Rahmen der Dempster–Shafer–Theorie entwickelt wurden.

Bekannte Verfahren

Verfahren von Ishizuka

Unter Verwendung einer Notation ähnlich der, wie sie auch in Programmiersprachen Anwendung findet, seien zwei Regeln in einem Expertensystem gegeben:

Regel 1:

| | | | | | |
|---------|-----------|------|---------------|------|------------------------|
| if | $X = X_1$ | then | $H = H_{X_1}$ | with | $m_{H X}(H_{X_1} X_1)$ |
| else if | $X = X_2$ | then | $H = H_{X_2}$ | with | $m_{H X}(H_{X_2} X_2)$ |
| | | | \vdots | | |
| else | | | $H = H_0$ | with | 1 |

Regel 2:

| | | | | | |
|---------|-----------|------|---------------|------|------------------------|
| if | $Y = Y_1$ | then | $H = H_{Y_1}$ | with | $m_{H Y}(H_{Y_1} Y_1)$ |
| else if | $Y = Y_2$ | then | $H = H_{Y_2}$ | with | $m_{H Y}(H_{Y_2} Y_2)$ |
| | | | \vdots | | |
| else | | | $H = H_0$ | with | 1 |

(4 – 16)

Die Prämissen (Ereignisse) X_i für Regel 1 sind aus dem Ereignisraum Ω_X und die für Regel 2 aus dem Ereignisraum Ω_Y . Beide Regeln erstellen Hypothesen (Ereignisse) im Ereignisraum Ω_H . Wir setzen voraus, daß die Werte der Vertrauensdich-

ten $m_X(X_i|E_X)$ und $m_Y(Y_j|E_Y)$ für die in den Regeln vorkommenden Ereignisse $X_i \subseteq \Omega_X$ und $Y_j \subseteq \Omega_Y$ bezüglich E_X sowie E_Y bekannt sind. Wir bezeichnen E_X (ebenso auch E_Y) als *Informationsquelle* und verstehen darunter die Menge aller Annahmen und Fakten, die Einfluß auf die Aufstellung der Vertrauensdichte m_X hatte. Weiterhin seien die bedingten Vertrauensdichten $m_{H|X}(H_{X_i}|X_i)$ und $m_{H|Y}(H_{Y_j}|Y_j)$ durch die Expertensystemregeln gegeben. Gesucht werden die Vertrauensdichten für die Hypothesen $H_m \subseteq \Omega_H$ in bezug auf die Informationsquellen E_X und E_Y .

In dem Verfahren von [42] wird angenommen, daß sich die Prämissen der beiden Regeln nicht überlappen, d.h. $X_i \cap X_j = \emptyset$ und $Y_i \cap Y_j = \emptyset, \forall i, j$. Die Vertrauensdichte für eine Hypothese H_{X_i} bezüglich der Informationsquelle E_X wird nach der Formel:

$$m_{H_{X_i}}(H_{X_i}|E_X) = m_{H|X}(H_{X_i}|X_i)Bel(X_i|E_X) \tag{4-17}$$

berechnet. Die Vertrauensmaße $Bel(X_i|E_X)$ werden dabei gemäß ihrer Definition mit der Gleichung:

$$Bel(X_i|E_X) = \sum_{X_k \subseteq X_i} m_X(X_k|E_X)$$

berechnet. Die Vertrauensdichte für H_0 wird schließlich mit Hilfe der Normierungsbedingung berechnet:

$$m_{H_X}(H_0|E_X) = 1 - \sum_{X_i} m_{H|X}(H_{X_i}|X_i)Bel(X_i|E_X) .$$

Ähnlich werden auch die Vertrauensdichten $m_{H_Y}(H_{Y_j}|E_Y)$ bezüglich der Informationsquelle E_Y berechnet. Danach werden die so erhaltenen Vertrauensdichten $m_{H_X}(H_{X_i}|E_X)$ und $m_{H_Y}(H_{Y_j}|E_Y)$ mit Gl. (4-15) kombiniert, und man erhält die resultierende Vertrauensdichte auf dem Ereignisraum Ω_H bezüglich der Informationsquellen E_X und E_Y .

Verfahren von Ginsberg

In dem Verfahren von [24] wird von jeweils dichotomen Ereignisräumen, d.h. von Ereignisräumen bestehend aus zwei Elementen ausgegangen:

$$\begin{aligned} \Omega_X &= \{x, \bar{x}\} \\ \Omega_Y &= \{y, \bar{y}\} \\ \Omega_H &= \{h, \bar{h}\} . \end{aligned}$$

Die Fortpflanzung der Bewertungen über Expertensystemregeln der Form:

$$\begin{aligned} \text{if } X = x \text{ then } H = h & \text{ with } m_{H|X}(h|x) \\ & H = \bar{h} \text{ with } m_{H|X}(\bar{h}|x) \end{aligned}$$

wird intuitiv abgeleitet, indem die Vertrauensmaße⁴ der Prämissen als untere und obere Grenzen einer unbekannteren Wahrscheinlichkeit interpretiert werden. Ist $m_X(x|E_X)$ die

⁴Im Falle dichotomer Ereignisräume ist das Vertrauensmaß einer Prämisse gleich ihrer Vertrauensdichte.

untere Grenze für die Wahrscheinlichkeit, daß $X = x$, also X wahr ist, so ergibt sich die untere Grenze für die Wahrscheinlichkeit, daß H wahr ist, als:

$$m_{H_X}(h|E_X) = m_{H|X}(h|x) m_X(x|E_X) .$$

Ähnlich sind die Überlegungen für die untere Grenze der Wahrscheinlichkeit, daß H falsch ist:

$$m_{H_X}(\bar{h}|E_X) = m_{H|X}(\bar{h}|x) m_X(x|E_X) .$$

Ähnlich wie bei dem Verfahren von Ishizuka werden anschließend die Vertrauensdichten mit Hilfe der Gl. (4-15) kombiniert.

Verfahren von Yen

Ein quasi-probabilistischer Ansatz wird in [122,123] eingeführt. In diesem Ansatz werden die Vertrauensmaße der Expertensystemregeln mit Hilfe von bedingten Wahrscheinlichkeiten gemessen. Die Prämissen der Expertensystemregeln sind nicht, wie in den bisher vorgestellten Ansätzen, Untermengen X_i des Ereignisraumes Ω_X , sondern Elemente x_i dieses Ereignisraumes. Die Prämissen $x_i \in \Omega_X$ können schnittmengenfreie Hypothesen $H_{ji} \subseteq \Omega_H$, $H_{ji} \cap H_{jk} = \emptyset, \forall i, k$ generieren.

Die Expertensystemregeln haben die allgemeine Form:

$$\begin{array}{llll} \text{if } X = x_1 & \text{then } H = H_{11} & \text{with } P(H_{11}|x_1) \\ & H = H_{21} & \text{with } P(H_{21}|x_1) \\ & \vdots & \\ \text{else if } X = x_2 & \text{then } H = H_{12} & \text{with } P(H_{12}|x_2) \\ & H = H_{22} & \text{with } P(H_{22}|x_2) \\ & \vdots & \\ \vdots & & \\ \text{else if } X = x_K & \text{then } H = H_{1K} & \text{with } P(H_{1K}|x_K) \\ & H = H_{2K} & \text{with } P(H_{2K}|x_K) \\ & \vdots & \end{array}$$

wobei $P(H_{ji}|x_i) \neq 0$ und

$$\sum_{j=1}^{N_i} P(H_{ji}|x_i) = 1 .$$

Die Fortpflanzung der Vertrauensmaße wird mit Hilfe der Gleichung:

$$m_{H_X}(H|E_X) = \sum_{i=1}^K P(H|x_i) P(x_i|E_X) \tag{4-18}$$

durchgeführt. Daran anschließend wird eine Regel ähnlich der Regel von Dempster zur Kombination der Vertrauensmaße aus verschiedenen Informationsquellen verwendet. Yen vergleicht die Regel von Dempster mit der Bayesschen Regel und stellt fest, daß bei

der Verwendung der Regel von Dempster die a-priori-“Wahrscheinlichkeiten” übergewichtet werden. Daher werden in Yen’s Arbeit sogenannte *Sicherheitsmaße* eingeführt, das sind auf die a-priori-“Wahrscheinlichkeiten” normierte Vertrauensmaße. Diese Sicherheitsmaße werden in der von Yen aufgestellten Kombinationsregel verwendet.

Ein neues Verfahren

Die vorgestellten Verfahren besitzen Defizite, die in Abschnitt 4.3.3.3 diskutiert werden. Wir stellen ein neues Verfahren vor, das diese Defizite beseitigt.

Die Aufgabenstellung bleibt unverändert: Gegeben sei der Ereignisraum $\Omega_X = \{x_1, \dots, x_K\}$ mit der Vertrauensdichte $m_X(X_j|E_X)$ bezüglich der Informationsquelle E_X . Ereignisse $X_j \subseteq \Omega_X$ bedingen Hypothesen $H_i \subseteq \Omega_H$ aus dem Ereignisraum $\Omega_H = \{h_1, \dots, h_M\}$. Ebenso sei der Ereignisraum Ω_Y gegeben, der ebenfalls Ereignisse aus Ω_H bedingt. Gesucht werden die Vertrauensmaße der Hypothesen aus Ω_H bezüglich der Informationsquellen E_X und E_Y .

In den bisher vorgestellten Ansätzen ist es lediglich für die in den Expertensystemregeln auftretenden Ereignisse erforderlich, bedingte “Wahrscheinlichkeiten” oder bedingte Vertrauensmaße zu spezifizieren. In unserem Verfahren ist formal eine vollständige Spezifikation der bedingten Vertrauensdichten $m_{H|X}(H_i|X_j)$ und $m_{H|Y}(H_i|Y_k)$ auf dem Ereignisraum Ω_H notwendig. Die Anzahl der anzugebenden Werte der bedingten Vertrauensdichte steigt exponentiell mit der Größe der Ereignisräume. Besteht z.B. der Ereignisraum Ω_X aus K Elementen und der Ereignisraum Ω_H aus M Elementen, so sind insgesamt $(2^K - 1) \times (2^M - 1)$ Werte der bedingten Vertrauensdichte zu spezifizieren. In der Praxis wird die Anzahl der tatsächlich anzugebenden Werte jedoch kleiner sein, da viele der bedingten Vertrauensdichten implizit als Null angenommen werden. Ein Beispiel für die Wahl der bedingten Vertrauensdichten wird in Abschnitt 4.3.4.2 gegeben.

Zur Fortpflanzung der Vertrauensmaße, d.h. für die Berechnung der Vertrauensdichte auf dem Ereignisraum Ω_H bezüglich der Informationsquelle E_X schlagen wir folgende Gleichungen vor:

$$\begin{aligned} m_{H_X}(\emptyset|E_X) &= 0 \\ m_{H_X}(H_i|E_X) &= \sum_{X_j \subseteq \Omega_X} m_{H|X}(H_i|X_j) m_X(X_j|E_X) . \end{aligned} \quad (4-19)$$

Die Werte $m_{H_X}(H_i|E_X)$ erfüllen die Bedingungen einer Vertrauensdichte.

Zur Berechnung der Vertrauensmaße für Ereignisse aus Ω_H werden zunächst mit Hilfe der Gl. (4-19) die Vertrauensdichten auf Ω_H bezüglich jeder Informationsquelle berechnet. Anschließend werden die so berechneten Vertrauensdichten mit Hilfe der Gl. (4-15) kombiniert. Da diese Regel kommutativ und assoziativ ist, kann die Kombination auch für mehr als zwei Informationsquellen vorgenommen werden, indem sie schrittweise auf Paare angewendet wird:

$$m_H(H_k|E_X, E_Y) = \frac{\sum_{H_i \cap H_j = H_k} m_{H_X}(H_i|E_X) m_{H_Y}(H_j|E_Y)}{1 - \sum_{H_i \cap H_j = \emptyset} m_{H_X}(H_i|E_X) m_{H_Y}(H_j|E_Y)} .$$

Mit der bekannten resultierenden Vertrauensdichte auf dem Ereignisraum Ω_H bezüglich aller Informationsquellen $\{E\}$ kann das Vertrauensmaß für eine Hypothese H_k gemäß Gl. (4-13) berechnet werden:

$$Bel(H_k|\{E\}) = \sum_{H_i \subseteq H_k} m_H(H_i|\{E\}) .$$

Diskussion

In dem Ansatz von [42] wird angenommen, daß die Prämissen in den Expertensystemregeln paarweise einander ausschließend sind. Das impliziert jedoch nicht, daß die Hypothesen, die durch die Regeln (4-16) aufgestellt werden, ebenfalls einander ausschließend sind. Im Gegenteil, eine Hypothese kann sehr wohl von unterschiedlichen Prämissen bejaht werden. Dieser Tatsache wird in Gl. (4-17) jedoch nicht Rechnung getragen. Im Gegensatz dazu erfaßt die Fortpflanzung der Vertrauensdichten nach den von uns vorgeschlagenen Gl. (4-19) die Anteile aller Prämissen einer Regel.

Der Ansatz aus [24] wurde lediglich für dichotome Ereignisräume entwickelt und hat daher nur eingeschränkte Gültigkeit. Außerdem werden dort die Vertrauensmaße als untere und obere Grenze einer unbekanntem Wahrscheinlichkeit interpretiert, eine in der Dempster–Shafer–Theorie umstrittene Interpretation.

Durch die Einführung eines quasi–probabilistischen Ansatzes ist es in den Arbeiten [122,123] erforderlich, ein vollständiges Wahrscheinlichkeitsmodell aller Prämissen zu kennen. Damit wird ein Schritt weg von der Dempster–Shafer–Theorie, die diese Forderung nicht stellt, und hin zur Bayesschen Theorie gemacht. In dem von uns entwickelten Ansatz wird, wie in der Dempster–Shafer–Theorie üblich, “nur” die Existenz einer Vertrauensdichte für die beteiligten Ereignisräume vorausgesetzt.

Die von uns vorgeschlagenen Gleichungen zur Fortpflanzung der Vertrauensmaße (Gl. (4-19)) sind formal ähnlich der in [122] vorgeschlagenen Gleichung (Gl. (4-18)). Dennoch bestehen Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen. Die bedingten Vertrauensmaße $m_{H|X}(H_i|X_j)$ (bei Yen mit der Bezeichnung $P(H_{j_i}|x_i)$), für die in [122] gefordert wird, daß sie von Null verschieden sein müssen, brauchen in dem von uns vorgeschlagenen Ansatz keinen anderen Restriktionen zu genügen, als nur die Eigenschaften einer Vertrauensdichte nach den Bedingungen der Gl. (4-12) zu erfüllen. Insbesondere dürfen sie auch Null sein.

Die Ansätze unterscheiden sich auch dadurch, daß in den Gl. (4-19) Vertrauensdichten $m_X(X_j|E_X)$ für *Untermengen* des Ereignisraumes verwendet werden, während in dem Ansatz nach Gl. (4-18) “Wahrscheinlichkeiten” $P(x_j|E_X)$ für *Elemente* des Ereignisraumes verwendet werden. Die Verwendung der Vertrauensdichten für Untermengen hat als Folge, daß in unserem Ansatz ein Term, der die Vertrauensdichte des sicheren Ereignisses enthält, addiert wird:

$$m_{H_X}(H_i|E_X) = \sum_{X_j \subset \Omega_X} m_{H|X}(H_i|X_j) m_X(X_j|E_X) + m_{H|X}(H_i|\Omega_X) m_X(\Omega_X|E_X) .$$

Mit Hilfe von $m_X(\Omega_X|E_X)$ wird der Grad der Ungewißheit bezüglich Ereignissen aus Ω_X modelliert. Das heißt, daß zur Vertrauensdichte für die Hypothese H_i auch ein Term beiträgt, der den Anteil der Vertrauensdichte in die Hypothese H_i enthält, wenn kein Wissen über Ereignisse aus Ω_X verfügbar ist. Der Term $m_{H|X}(H_i|\Omega_X)$ ist das Maß für das Vertrauen in exakt H_i , wenn bekannt ist, daß keine Informationen bezüglich eines Ereignisses aus Ω_X verfügbar sind. Damit ist mit dem neu vorgestellten Ansatz auch die Fortpflanzung von Ungewißheit möglich.

In dem Ansatz aus [122] ist es auch unklar, wie die Fortpflanzung der Vertrauensmaße über Ketten von Regeln erfolgen kann. Der Grund dafür ist, daß die "Wahrscheinlichkeiten" für die Prämissen in einer nachfolgenden Regel im allgemeinen nicht als Ergebnisse der Fortpflanzung über die vorhergehenden Regeln der Kette erzielt werden. Gl. (4-18) liefert nämlich Vertrauensdichten für Untermengen des Ereignisraumes und nicht "Wahrscheinlichkeiten" für Elemente des Ereignisraumes. Im Gegensatz dazu ist mit unserem Verfahren auch die Fortpflanzung der Vertrauensmaße in einer hierarchischen Umgebung möglich, da als Eingangsdaten für die Fortpflanzung der Bewertungen Vertrauensdichten erwartet werden. Diese werden als Ergebnisse der vorhergehenden Stufe geliefert.

Schlußfolgernd kann man sagen, daß unser Ansatz zur Fortpflanzung der Vertrauensmaße allgemeingültiger formuliert ist als die drei anderen vorgestellten Verfahren und daß er deren Nachteile beseitigt.

4.3.4 Bewertung der Instanzen

Wie bereits erläutert, erfüllen die Bewertungen in dem hier vorgestellten System zur Luftbilddauswertung zwei Aufgaben: sie werden zur Auswahl des Zustandes, mit dem die Analyse fortgesetzt wird, verwendet, und sie liefern ein Maß für die Güte, mit der das Analyseziel erreicht wird. Um diese Aufgaben erfüllen zu können, werden alle Instanzen und modifizierten Konzepte, die im Lauf der Analyse erzeugt werden, bewertet. Die Bewertung einer Instanz oder eines modifizierten Konzeptes⁵ setzt sich aus den Bewertungen ihrer Komponenten, d.h. aus den Bewertungen ihrer Attribute, ihrer Bestandteil- und Konkretisierungskanten sowie aus den Bewertungen der Relationen, die für sie spezifiziert wurden, zusammen. Die Bewertungen werden mit Hilfe von Bewertungsfunktionen berechnet, die Teil des Modells sind und bei dem Konzept, zu dem die Instanz gehört, angegeben werden.

Vorgehensweise zur Instanzbewertung

Durch die Instanzierung, also durch die Zuordnung einer Teilmenge der Bildbereichshinweise zu einem Konzept, wird die Hypothese: "Diese Teilmenge erfüllt die in dem Konzept angegebenen Anforderungen" aufgestellt. In vielen Fällen kann jedoch erst im späteren Verlauf der Analyse entschieden werden, ob diese Hypothese tatsächlich zu-

⁵Instanzen und modifizierte Konzepte werden ähnlich bewertet. Zur Vereinfachung der Sprache werden wir im weiteren Verlauf dieses Kapitels nur noch von Instanzen sprechen, die Aussagen gelten jedoch unverändert auch für modifizierte Konzepte.

trifft. Deshalb kommt es vor, daß in Zwischenstadien der Analyse Hypothesen aufgestellt und zunächst weiter verfolgt werden, die sich später als falsch erweisen. Jede Instanzierung ist also ein “Experiment” auf einem Ereignisraum mit zwei Ereignissen. Diese Ereignisse sind:

- “die Bildbereichshinweise erfüllen die Modellanforderungen” und
- “die Bildbereichshinweise erfüllen die Modellanforderungen” nicht.

Wir bezeichnen diese Ereignisse als das *Wahr-Ereignis* und das *Falsch-Ereignis*.

Wir entwickeln die Bewertungsfunktionen für die Attribute, Relationen und Kanten so, daß sie als Ergebnis zwei Werte zwischen 0 und 1 liefern. Ein Wert stellt das Vertrauen in das Wahr-Ereignis dar, der andere Wert das Vertrauen in das Falsch-Ereignis. Je größer der Wert ist, umso größer ist das Vertrauen in das entsprechende Ereignis. Auf diese Art und Weise wird eine Vertrauensdichte im Sinne der Dempster-Shafer-Theorie auf dem Ereignisraum erzeugt.

Die Bewertungen der Attribute, Relationen und Kanten können als Informationsquellen betrachtet werden, die jede für sich Hinweise für das Eintreten des Wahr-Ereignisses oder des Falsch-Ereignisses bei der Zuordnung einer Teilmenge der Bildbereichshinweise zu einem Konzept liefern. Da bei der Spezifikation der Attribute und Relationen darauf geachtet wird, daß eine Eigenschaft der Instanz nur in einer Komponente repräsentiert wird, können diese Informationsquellen als unabhängig betrachtet werden. Eine Gesamtbewertung der Instanz erhält man, indem man die Bewertungen der Attribute, Relationen und Kanten, die zu dieser Instanz gehören, mit Hilfe der Gl. (4-15) kombiniert. Wir erläutern die Vorgehensweise zur Bewertung der Komponenten einer Instanz anhand von Beispielen.

Attributbewertung

Auf der Ebene der Konzepte, die die Konturlinien repräsentieren (Konzeptfamilie *i_line* in Abb. 4-5a), bewerten wir das Attribut, das die geometrischen Eigenschaften der Konturlinie enthält, mit Hilfe einer Distanzfunktion zwischen der Modellkontur und den ihr zugeordneten Kantensegmenten. Die Bewertungsfunktion wird aus einer Metrik, die mit Hilfe von quadratisch integrierbaren Funktionen auf einer parametrischen Darstellung von Strecken definiert ist, abgeleitet.

Wir beschreiben die geometrischen Eigenschaften eines aus dem Bild berechneten Kantensegments (einer Strecke) mit den kartesischen Koordinaten des Startpunktes, mit der Länge und mit dem Winkel, den die Strecke mit der positiven x -Achse bildet (siehe Abb. 4-11)a. Die Koordinaten des Startpunktes können Werte im Bereich $(x, y) \in \mathbf{R}^2$ annehmen, die Länge der Strecke liegt im Bereich $l \in \mathbf{R}_+$ und der Winkel gehört zum Intervall $\theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. Das kartesische Produkt dieser Bereiche bildet den Raum $\mathbf{S} = (x, y, l, \theta)$, in dem eine Strecke s_i durch den Punkt $s_i = (x_i, y_i, l_i, \theta_i)$ parametrisch beschrieben ist.

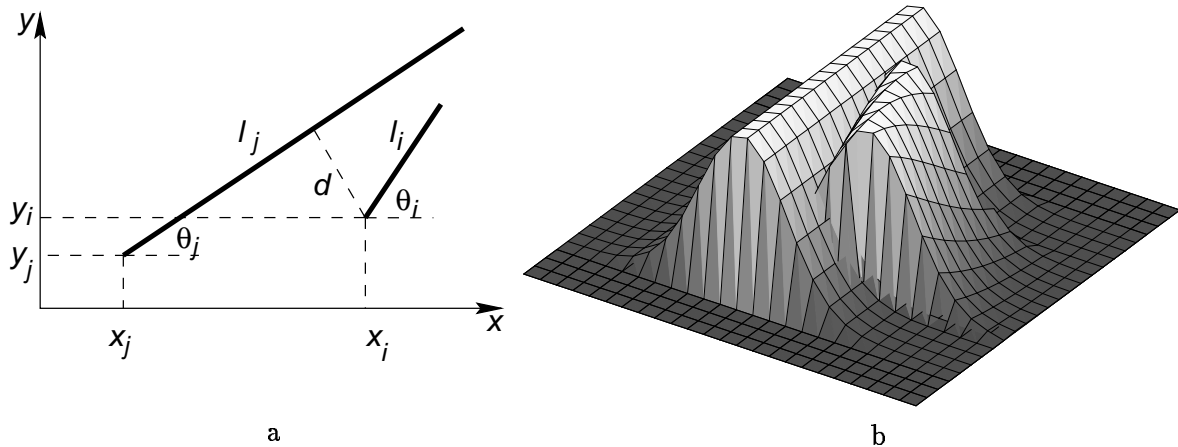


Abb. 4-11: a) Parameter zur Beschreibung einer Strecke, b) Lage-Nachbarschaftsfunktionen für die zwei Strecken aus a)

Der Raum $\mathbf{S} = (x, y, l, \theta)$ ist jedoch verschieden von dem gewöhnlichen kartesischen Raum \mathbf{R}^n . Daher verwenden wir nicht die euklidische Metrik zur Berechnung des Abstandes zwischen zwei Punkten, sondern wir definieren eine Metrik auf einem isomorphen Raum von quadratisch integrierbaren Funktionen.

Jedem Punkt s_i aus \mathbf{S} wird eine Funktion $n_i(x, y, l, \theta)$ aus dem Raum $\mathcal{L}^2(\mathbf{S})$ der quadratisch integrierbaren Funktionen zugeordnet. Wir bezeichnen diese Funktionen als *Nachbarschaftsfunktionen*. Als Abstand zwischen zwei Strecken s_i und s_j verwenden wir den Abstand zwischen den zugeordneten Funktionen n_i und n_j . Es ist bekannt [13], daß die Abstandsfunktion:

$$d_{ij} = \left[\int_{\mathbf{S}} (n_i(x, y, l, \theta) - n_j(x, y, l, \theta))^2 dx dy dl d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4-20}$$

die notwendigen und hinreichenden Bedingungen erfüllt, um eine Metrik auf dem Raum $\mathcal{L}^2(\mathbf{S})$ zu induzieren.

Wählt man die Funktionen $n_i(x, y, l, \theta)$ so, daß ihre Norm in der induzierten Metrik gleich 1 ist, so vereinfacht sich Gl. (4-20) zu:

$$d_{ij} = \left[2 - 2 \int_{\mathbf{S}} n_i(x, y, l, \theta) n_j(x, y, l, \theta) dx dy dl d\theta \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{4-21}$$

Sind die Strecken s_i und s_j identisch, so nimmt der Abstand d_{ij} nach Gl. (4-21) seinen Minimalwert Null an. Da wir jedoch die *Güte* einer Zuordnung bewerten möchten, ist es wünschenswert, daß die Bewertungsfunktion bei identischen Strecken den Maximalwert annimmt. Wir verwenden daher als Bewertungsfunktion ein aus Gl. (4-21) abgeleitetes Maß:

$$m_{ij} = \int_{\mathbf{S}} n_i(x, y, l, \theta) n_j(x, y, l, \theta) dx dy dl d\theta. \tag{4-22}$$

Dieses Maß, wir wollen es als *Modelltreue* bezeichnen, entspricht dem Cosinus des Winkels, der von den beiden Vektoren n_i und n_j im Raum $\mathcal{L}^2(\mathbf{S})$ gebildet wird. Es kann als eine Art Korrelation zwischen den beiden Strecken aufgefaßt werden.

Die Nachbarschaftsfunktion n_i muß passend gewählt werden. Wir konstruieren die Nachbarschaftsfunktion als ein Produkt von drei quadratisch integrierbaren Funktionen, die jeweils auf den Bereichen \mathbf{R}^2 , \mathbf{R}_+ und $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ definiert sind:

$$n_i(x, y, l, \theta) = f_i(x, y) g_i(l) h_i(\theta).$$

Entsprechend ihrem Definitionsbereich vergeben wir die Bezeichnungen der Funktionen: $f_i(x, y)$ sei die *Lage-Nachbarschaftsfunktion*, $g_i(l)$ sei die *Länge-Nachbarschaftsfunktion* und $h_i(\theta)$ sei die *Winkel-Nachbarschaftsfunktion*. Bei der Definition dieser drei Nachbarschaftsfunktionen beachten wir das physikalische Modell der Bildentstehung und verwenden Heuristiken.

Bei der Berechnung der Kantensegmente aus dem Luftbild, bei der Bestimmung der Transformationsparameter zwischen dem Bildkoordinatensystem und dem Weltkoordinatensystem sowie auch bei der Kartenaufnahme und Kartendigitalisierung können Störungen die "wahre" Lage sowohl der aus dem Bild berechneten Kantensegmente als auch der durch automatische Kartenanalyse gewonnenen Modellkontur beeinflussen. Faßt man all diese Einflüsse zusammen, so kann man näherungsweise annehmen, daß die Lage der aus dem Bild berechneten Kantensegmente normalverteilt um die vom Modell angegebene Lage ist.

Aus diesem Grund wählen wir für die Lage-Nachbarschaftsfunktion der Strecken eine Funktion ähnlich der Gaußschen Glocke. Da wir die Bewertung eines Kantensegments unabhängig von seiner Lage entlang der Modellkontur gestalten wollen, wird die Funktion konstant entlang der Länge der Strecke gewählt. Wir wählen für $f_i(x, y)$:

$$f_i(x, y) = K_{xy} \exp \left(-\frac{((x - x_i) \sin \theta_i - (y - y_i) \cos \theta_i)^2}{2\sigma_{xy}^2} \right) \quad (4-23)$$

für Punkte (x, y) zwischen der Endpunkten der Strecke, also $\{(x, y) \mid (x - x_i) \cos \theta_i + (y - y_i) \sin \theta_i \geq 0 \wedge (x - x_i) \cos \theta_i + (y - y_i) \sin \theta_i \leq l_i\}$, sowie $f_i(x, y) = 0$ sonst. Den Parameter σ_{xy} aus Gl. (4-23) wählen wir gleich dem mittleren quadratischen Fehler der Transformation zwischen Bildkoordinatensystem und Weltkoordinatensystem. In Abb. 4-11b sind die Lage-Nachbarschaftsfunktionen für die zwei Strecken aus Abb. 4-11a dargestellt.

Die Länge-Nachbarschaftsfunktion wählen wir so, daß der aus ihr resultierende Anteil der Bewertung proportional dem Längenverhältnis der Strecken ist. Das führt zu der Wahl:

$$g_i(l) = \begin{cases} K_l \sqrt{l} & \text{für } l \in [0, l_i] \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Für kleine Winkelabweichungen können für die Winkel-Nachbarschaftsfunktion ähnliche Überlegungen wie für die Lage-Nachbarschaftsfunktion durchgeführt werden. Beachtend, daß der Definitionsbereich für die Winkel-Nachbarschaftsfunktion nur das Intervall $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ ist, wählen wir für die Winkel-Nachbarschaftsfunktion anstelle einer Gaußschen Funktion eine trigonometrische Funktion:

$$h_i(\theta) = K_\theta \cos(\theta - \theta_i) .$$

Die Konstanten K_{xy}, K_l und K_θ werden so bestimmt, daß die Norm der Nachbarschaftsfunktionen in der induzierten Metrik gleich 1 ist.

Mit dieser Wahl der Nachbarschaftsfunktionen kann das Integral aus Gl. (4-22) zur Berechnung der Modelltreue separiert werden und die Integrale über die Produkte der Länge- und der Winkel-Nachbarschaftsfunktionen können in geschlossener Form ausgedrückt werden. Man erhält nach Durchführung der Rechenoperationen:

$$\int_{\mathbf{R}_+} g_i(l)g_j(l)dl = \frac{\min(l_i, l_j)^2}{l_i l_j} \tag{4-24}$$

und

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} h_i(\theta)h_j(\theta)d\theta = \cos(\theta_i - \theta_j) . \tag{4-25}$$

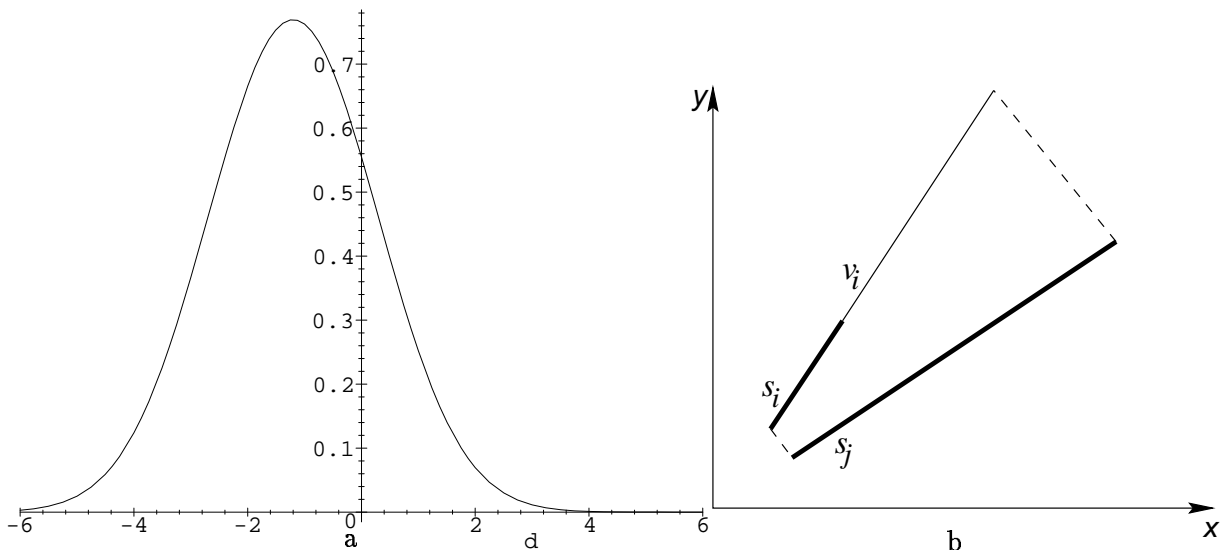


Abb. 4-12: a) Modelltreue als Funktion der Entfernung d (Definition von d siehe Abb. 4-11a),
 b) Verlängerung von bereits instanziierten Kantensegmenten s_i in "idealer" Weise zur Berechnung des Vertrauens in das "Falsch"-Ereignis. v_i ist die "ideale" Verlängerung.

Das Integral über das Produkt der Lage-Nachbarschaftsfunktionen läßt sich im allgemeinen Fall nicht in einer geschlossenen Form ausdrücken. Eine gute Näherungslösung für den Fall kleiner Winkeldifferenzen zwischen den Strecken ist jedoch gegeben durch:

$$\int_{\mathbf{R}^2} f_i(x, y)f_j(x, y)dx dy = \frac{\sqrt{\pi}\sigma_{xy}}{l_i \sin \Delta\theta} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{u_1 \sin \Delta\theta - Q}{\sigma_{xy} \sqrt{2 + 2 \cos \Delta\theta^2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{u_2 \sin \Delta\theta - Q}{\sigma_{xy} \sqrt{2 + 2 \cos \Delta\theta^2}} \right) \right) , \tag{4-26}$$

wobei $\Delta\theta = \theta_j - \theta_i$ und $Q = -(x_i - x_j) \sin \theta_j + (y_i - y_j) \cos \theta_j$. Die Koordinaten u_1 und u_2 sind die Koordinaten des Start- und des Endpunktes der Strecke s_i in einem Koordinatensystem u_0v , dessen Ursprung im Startpunkt der Strecke s_j liegt und dessen u -Achse parallel zur Strecke s_j ist. Mit erf bezeichnen wir die Gaußsche Fehlerfunktion.

Die Modelltreue erhält man als Produkt der drei Anteile aus Gl. (4-24), Gl. (4-25) und Gl. (4-26). In Abb. 4-12a ist die Abhängigkeit der Modelltreue von der "Entfernung" d (siehe dazu Abb. 4-11a) zwischen den Strecken dargestellt. Man beobachtet, daß wie erwartet die Modelltreue bei größer werdender Entfernung d kleiner wird, während sie bei fallender Entfernung steigt. Die Modelltreue erreicht ihren Maximalwert in der Regel jedoch nicht für $d = 0$, da d ja eine willkürlich definierte Entfernung ist. Qualitativ ähnliches Verhalten beobachtet man auch bei der Veränderung der anderen Parameter der Strecken.

Die so definierte Modelltreue wird als das Vertrauensmaß für das Wahr-Ereignis interpretiert. Um das Vertrauensmaß für das Falsch-Ereignis zu berechnen, werden folgende Überlegungen durchgeführt: Aufgrund verschiedener Einflüsse kann eine Seite einer Objektkontur "aufgebrochen" sein, d.h. aus mehreren Kantensegmenten bestehen. Die Zuweisung der Kantensegmente erfolgt schrittweise, eines nach dem anderen. Daher kann nicht bereits nach der Zuweisung einiger Kantensegmente zu der Modellkontur davon ausgegangen werden, daß die noch fehlenden Teile Hinweise für das Falsch-Ereignis sind. Es ist möglich, daß die noch fehlenden Teile in Zukunft gefunden werden.

Um das Vertrauensmaß für das Falsch-Ereignis zu berechnen, werden daher, wie in Abb. 4-12b dargestellt, bereits gefundene Kantensegmente in "idealer" Weise verlängert. Für diese "ideal" verlängerten Kantensegmente wird mit dem beschriebenen Verfahren das Vertrauen in das Wahr-Ereignis berechnet. Die Differenz dieses Vertrauens zu dem maximal möglichen Wert 1 wird als das Vertrauen in das Falsch-Ereignis interpretiert. Diese Vorgehensweise berücksichtigt gleichzeitig auch die Anforderungen des A^* -Algorithmus nach einer Überschätzung der zukünftigen Güte dadurch, daß die Bewertung für das Falsch-Ereignis unterschätzt wird.

In Abb. 4-13a ist das Ergebnis der Bewertung der geometrischen Eigenschaften der Kantensegmente mit dem hier vorgestellten Verfahren dargestellt. Das Vertrauen in das Wahr-Ereignis, also: "das ausgewählte Kantensegment (weiße Linie in Abb. 4-13a) entspricht dem Modell (unterbrochene weiße Linie in Abb. 4-13a)", wurde zu $m(S) = 0.474$ bestimmt, während das Vertrauen in das Falsch-Ereignis zu $m(\bar{S}) = 0.0454$ bestimmt wurde.

Kantenbewertung

Mit Hilfe der Funktionen zur Kantenbewertung werden die Bewertungen von Teilobjekten oder von Konkretisierungen eines Objektes in das Objekt selbst übertragen. Die in unserem System verwendeten Funktionen zur Kantenbewertung sind Implementierungen des in Abschnitt 4.3.3.2 vorgestellten Verfahrens zur Fortpflanzung der Vertrauensmaße. Zum besseren Verständnis wollen wir die Anwendung dieses Verfahrens an einem Beispiel demonstrieren.

Wir betrachten die Berechnung der Vertrauensmaße für das innere Begrenzungspolygon des Gebäudes aus Abb. 4-13a aus den für seine Kanten berechneten Vertrauensmaße. Im spezifischen Modell ist dieses Begrenzungspolygon durch das Konzept `i_polygo0291` repräsentiert. Es hat als Bestandteile die Konzepte `i_line0269`,

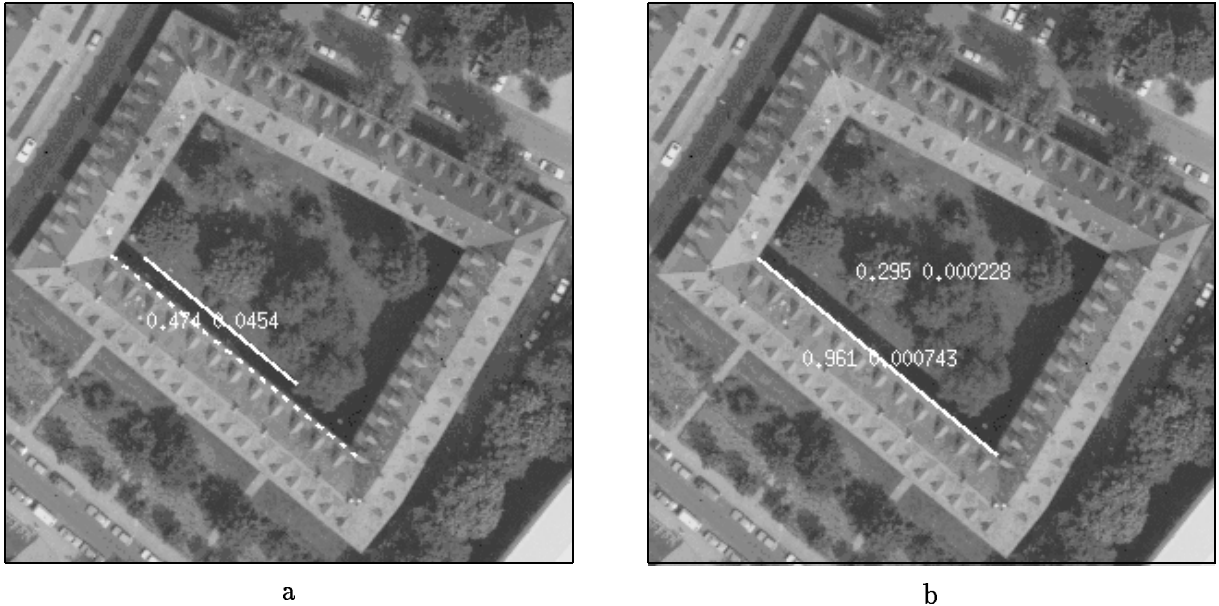


Abb. 4-13: a) Beispiel für die Bewertung der geometrischen Eigenschaften der Kantensegmente. Vertrauen in das Wahr-Ereignis: 0.474, Vertrauen in das Falsch-Ereignis: 0.0454.
 b) Beispiel zur Kantenbewertung. Die Zahlen über dem weiß gezeichneten Kantensegment sind die Vertrauensdichten im Ereignisraum der Konturlinie. Die Zahlen in der Mitte des Gebäudes sind die Vertrauensdichten im Ereignisraum des Polygons

$i_line0276$, $i_line0283$ und $i_line0290$ (vgl. auch Abschnitt 4.2.2 und Abb. 4-6b). Mit Hilfe des in Abschnitt 4.3.4.1 vorgestellten Verfahrens werden die geometrischen Eigenschaften der Kantensegmente bewertet. Weiterhin werden mit heuristischen Maßen ihre Gradientenstärke und Polarität bewertet. Durch Kombination dieser Attributbewertungen mittels Gl. (4-15) erhält man die Vertrauensmaße auf der Ebene der Konturlinien. Die Größe $m_{K_i}(K|E)$ sei der Wert der Vertrauensdichte für das Wahr-Ereignis K und die Größe $m_{K_i}(\bar{K}|E)$ sei der Wert der Vertrauensdichte für das Falsch-Ereignis \bar{K} im Ereignisraum der Konturlinie K_i , $i \in \{0269, 0276, 0283, 0290\}$. Mit der Bezeichnung E fassen wir die Informationsquellen zusammen, die zur Berechnung der Vertrauensdichte beigetragen haben.

Für das in Abb. 4-13b dargestellte Beispiel wurden die Werte der Vertrauensdichte für die Ereignisse im Ereignisraum der Konturlinie $i_line0269$ zu: $m_{K_{0269}}(K|E) = 0.961$, $m_{K_{0269}}(\bar{K}|E) = 0.000743$ und $m_{K_{0269}}(\Omega_{K_{0269}}|E) = 0.038257$ ermittelt. Da in dem in Abb. 4-13b dargestellten Zustand die Analyse noch nicht so weit fortgeschritten ist, daß auch eine Instanzierung der anderen Konturlinien vorgenommen wurde, wählen wir für deren Ereignisräume die leere Vertrauensdichte, die explizit unsere Ungewißheit bezüglich dieser Ereignisse modelliert: $m_{K_j}(K|E) = 0$, $m_{K_j}(\bar{K}|E) = 0$ und $m_{K_j}(\Omega_{K_j}|E) = 1$ für $j \in \{0276, 0283, 0290\}$.

Die Hypothesen auf der Ebene der Konturlinien bilden im Verbund eine Informationsquelle für Hypothesen auf der Ebene des Polygons. Damit kann der Ereignisraum $\Omega_{\{K_i\}}$, dessen Ereignisse das Wahr-Ereignis P oder das Falsch-Ereignis \bar{P} für das Po-

lygon bedingen, als das kartesische Produkt der einzelnen Ereignisräume Ω_{K_i} auf der Ebene der Konturlinien K_i , $i \in \{0269, 0276, 0283, 0290\}$ gebildet werden. Da die Instanzierungen der einzelnen Konturlinien als unabhängig betrachtet werden können, kann die Vertrauensdichte für ein Verbundereignis $\{k_i\} \subseteq \Omega_{\{K_i\}}$ als das Produkt der Vertrauensdichten der Einzelereignisse $k_i \subseteq \Omega_{K_i}$ berechnet werden:

$$m_{\{K_i\}}(\{k_i\}|E) = \prod_i m_{K_i}(k_i|E) . \quad (4-27)$$

Zur Fortpflanzung der Vertrauensmaße ist es erforderlich, auch die bedingten Vertrauensdichten $m_{P|\{K_i\}}(p|\{k_i\})$, $p \subseteq \Omega_P$ anzugeben. Bei der Fortpflanzung der Vertrauensmaße von der Ebene der Konturlinien zur Ebene der Polygone nehmen wir an, daß jede Konturlinie einen Beitrag leistet, der proportional dem Verhältnis ihrer Länge zur Umfangslänge des Polygons ist. Entsprechend diesen Überlegungen wählt man die bedingten Vertrauensdichten zu:

$$m_{P|\{K_i\}}(p|\{k_i\}) = \frac{\sum_i \delta_{PK}(p, k_i) l_i}{\sum_i l_i} . \quad (4-28)$$

Dabei ist l_i die Länge der Modellkonturlinie i_line_i und $\delta_{PK}(p, k_i)$ eine Kronecker-Funktion. Diese Funktion nimmt den Wert 1 an, wenn die Hypothesen p und k_i sich entsprechen (z.B. beide bezeichnen das Wahr-Ereignis oder beide bezeichnen das Falsch-Ereignis). In den anderen Fällen nimmt sie den Wert Null an.

Setzt man die Festlegungen nach Gl. (4-27) und Gl. (4-28) in die Gleichungen (4-19) ein, so erhält man die in Abb. 4-13b dargestellten Werte für die Vertrauensdichte auf der Ebene des Polygons:

$$m_{P_{0291}}(P|E) = 0.295 \quad m_{P_{0291}}(\bar{P}|E) = 0.000228$$

Die Differenz von der Summe dieser beiden Werte zu 1 ist ein explizites Maß für die Ungewißheit auf der Ebene der Polygone in diesem Zustand der Analyse: $m_{P_{0291}}(\Omega_P|E) = 0.704$.

In dem in diesem Beispiel dargestellten Zustand wurde erst für eine Konturlinie des Polygons eine Instanzierung durchgeführt. Mit dem Fortschreiten der Analyse und der Durchführung der Instanzierungen für die anderen Konturlinien des Polygons werden die für sie angenommenen leeren Vertrauensdichten durch die auf der Basis der instanziierten Bildbereichshinweise berechneten Vertrauensdichten ersetzt. Dann nimmt die Ungewißheit auf der Ebene der Polygone ab.

4.3.5 Bewertung der Analysezustände

Die Bewertungen der Analysezustände müssen so aufgebaut sein, daß sie auch den Vergleich von Zuständen ermöglichen, die unterschiedlich weit in der Erstellung des Endergebnisses fortgeschritten sind. Je weiter ein Zustand in der Analyse fortgeschritten ist, umso mehr Instanzen enthält er. Darum ist ein einfaches Maß wie z.B. die Summe der

Bewertungen aller im Zustand enthaltenen Instanzen als Bewertung des Analysezustandes ungeeignet.

Die Bewertung einer Instanz setzt sich aus Attributbewertungen, Relationsbewertungen und Kantenbewertungen zusammen. Die Attribut- und Relationsbewertungsfunktionen beurteilen Informationen, die auf der hierarchischen Ebene der Instanz erstmals gewonnen wurden. Über die Kantenbewertungen werden die Bewertungen der Bestandteile und Konkretisierungen einer Instanz erfaßt. Das bedeutet, daß die Bewertung einer Instanz immer auch die Bewertung des “unter ihr hängenden” Teilnetzes enthält. So enthält z.B. die Bewertung der Instanz Nr. 32 aus Abb. 4-7, Stufe F auch die Bewertungen der Instanzen Nr. 12, 20 und 28.

Wir wählen als Bewertung des Analysezustandes die Bewertung der Instanz des Zielkonzeptes. Da diese Instanz auf der höchsten Hierarchiestufe des Netzes angesiedelt ist, umfaßt ihre Bewertung die Bewertungen aller Instanzen aus dem Zustand. Da diese jedoch nicht einfach als Summe, sondern, durch die Fortpflanzung der Bewertungen gemäß Abschnitt 4.3.3.2, “interpretiert” im Hinblick auf das Erreichen des Analyseziels in der Bewertung der Instanz des Zielkonzeptes enthalten sind, bleiben auch die Bewertungen unterschiedlich weit fortgeschrittener Analysezustände vergleichbar.

Der Ereignisraum auf der Ebene der Instanz des Zielkonzeptes sei Ω_Z . Mit Z bezeichnen wir das Wahr-Ereignis, d.h. “die Instanzen dieses Zustandes entsprechen dem Modell”, und mit \bar{Z} bezeichnen wir das Falsch-Ereignis. Die Berechnung und Fortpflanzung der Bewertungen mit den in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren liefert uns für diese Ereignisse die Vertrauensdichten $m(Z|E_n)$ und $m(\bar{Z}|E_n)$. Mit E_n bezeichnen wir alle Informationsquellen, die in dem Knoten n zur Berechnung der Vertrauensdichten beigetragen haben.

Außer den beiden Vertrauensdichten für die Ereignisse Z und \bar{Z} erhalten wir auch die Vertrauensdichte $m(\Omega_Z|E_n)$, welche ein Maß für die Ungewißheit im Zustand n ist. Diese Ungewißheit rührt daher, daß, neben dem Vertrauen für und gegen eine Hypothese, ein Teil des Vertrauens unzugewiesen bleiben kann. Das trifft insbesondere dann zu, wenn ein Konzept optionale Bestandteile hat, deren Vorhandensein das Vertrauen in die Wahr-Hypothese verstärkt, deren Fehlen jedoch nicht unbedingt zu steigendem Vertrauen in die Falsch-Hypothese führt. Weiterhin besteht auch noch die Ungewißheit bezüglich zukünftiger Instanzierungen. Teile dieser Ungewißheit können in Zukunft die Wahr-Hypothese oder die Falsch-Hypothese unterstützen.

Zur Steuerung der Analyse wählen wir die Gütefunktionen des A^* -Algorithmus wie folgt: Als Güte des Pfades vom Wurzelknoten des Suchbaums bis zum aktuellen Knoten n verwenden wir das Vertrauen in die Wahr-Hypothese Z auf der Ebene des Zielkonzeptes in diesem Knoten:

$$g(n) = m(Z|E_n) = Bel(Z|E_n) .$$

Als Schätzung der in Zukunft erreichbaren Güte des Pfades vom aktuellen Knoten bis zu dem noch unbekanntem Zielknoten des Suchbaums verwenden wir:

$$h^*(n) = m(\Omega_Z|E_n) .$$

Diese Wahl erfüllt die Zulässigkeitsbedingung (4-2), die eine Überschätzung der tatsächlichen Güte fordert, da nur ein Teil der Vertrauensdichte $m(\Omega_Z|E_n)$ in Zukunft die Wahr-Hypothese Z unterstützen wird.

Damit erhält man für die Gütefunktion des A^* -Algorithmus:

$$f(n) = m(Z|E_n) + m(\Omega_Z|E_n) = 1 - m(\bar{Z}|E_n) = Pl(Z|E_n) .$$

Die Plausibilität für das Ereignis, daß die Instanzen aus dem aktuellen Analysezustand dem Modell entsprechen, dient somit als Gütefunktion für den A^* -Algorithmus. Für den ε - A^* -Algorithmus ergibt sich eine leicht modifizierte Gütefunktion:

$$f_\varepsilon(n) = m(Z|E_n) + (1 - \varepsilon)m(\Omega_Z|E_n) = \varepsilon Bel(Z|E_n) + (1 - \varepsilon) Pl(Z|E_n) .$$

Zur Durchführung der Bildauswertung wurde der ε - A^* -Algorithmus verwendet. Wir zeigen, daß damit eine erfolgreiche Steuerung der Bildauswertung möglich ist.

4.4 Ergebnisse

Wir wollen die Leistungsfähigkeit des Systems zur Luftbildauswertung anhand experimenteller Untersuchungen nachweisen. Dazu besprechen wir Ergebnisse der einzelnen Schritte und Phasen (vgl. Abschnitt 4.2.1) der im System verfolgten Strategie.

Für die im *ersten Schritt* durchgeführte Kartenanalyse wurden die Ergebnisse bereits im Zwischenbericht [107] vorgestellt. Ebenso wurden dort auch Ergebnisse des *zweiten Schrittes*, der automatischen Erstellung des spezifischen Modells, und des *dritten Schrittes*, der Berechnung von linienhaften und flächenhaften Bildbereichshinweisen, präsentiert.

Wir wenden uns in diesem Bericht daher den Ergebnissen der im *vierten Schritt* ablaufenden eigentlichen Bildauswertung zu. Diese wird in den drei Phasen: Verifikation, Erweiterung der Objektbeschreibung und Erkennung neuer Objekte durchgeführt. Die Ergebnisse späterer Phasen enthalten selbstverständlich auch die Ergebnisse früherer Phasen. In der Phase der Erweiterung der Objektbeschreibung werden zum ersten Mal über den Karteninhalt hinausgehende Informationen aus dem Luftbild extrahiert. Wir wollen zunächst diese Phase besprechen und anschließend auf die Ergebnisse der Erkennung neuer Objekte im Luftbild eingehen.

4.4.1 Erweiterung der Objektbeschreibung

Bilder sind, was ihren Informationsgehalt angeht, reichhaltiger als Karten. Das gilt für zwei Aspekte: einerseits sind die Objekte der realen Welt in großmaßstäbigen Luftbildern wesentlich detaillierter abgebildet als in Karten vergleichbaren Maßstabs, und andererseits sind in den Luftbildern auch Objekte sichtbar, die in Karten nicht eingezeichnet sind. Durch die Auswertung von Luftbildern besteht also auch die Möglichkeit, eine im Vergleich zum Kartenwissen erweiterte Beschreibung der Szenenobjekte zu erstellen.

Wir zeigen die Anwendung unseres Verfahrens zur Erweiterung der Objektbeschreibung am Beispiel von Parkplätzen. Parkplätze unterscheiden sich von anderen Objekten wie z.B. Gebäuden in mehrerlei Hinsicht:

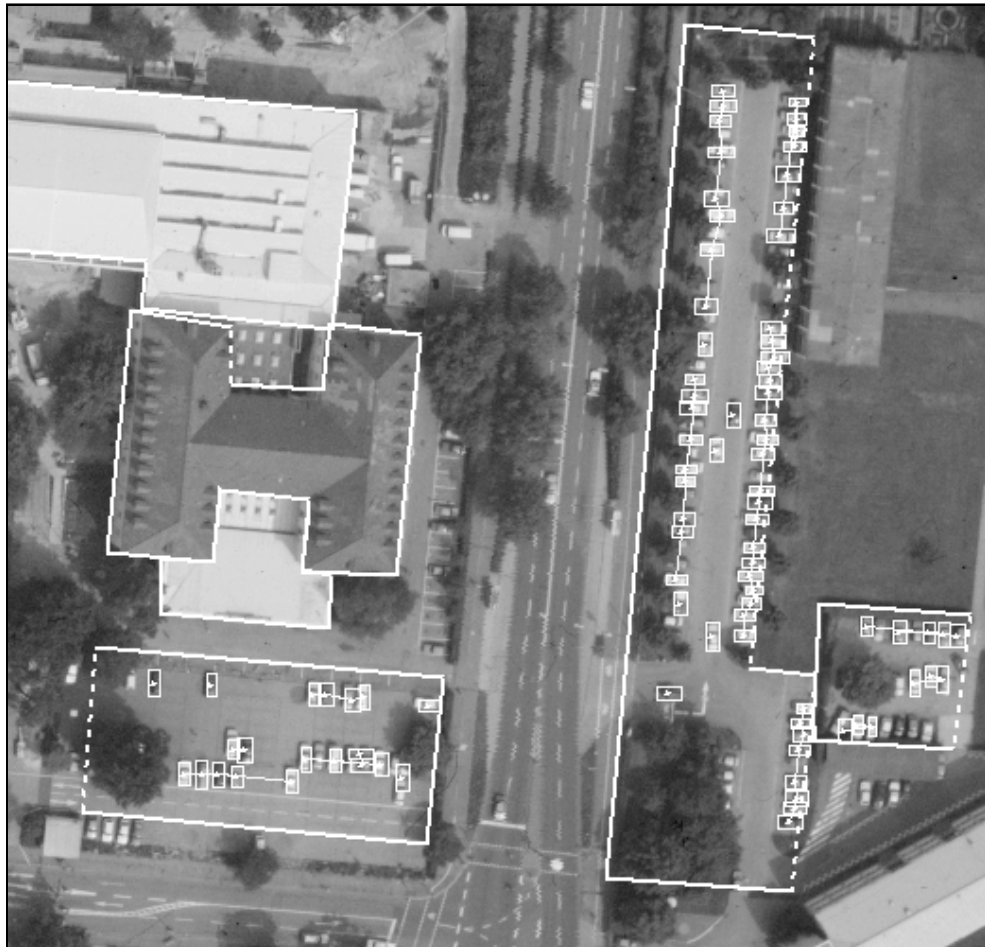
- Parkplätze sind Flächen, die in vielen Fällen erst durch die Funktion, die sie erfüllen (Nutzung), als Parkplätze erkannt werden können.
- Parkplätze sind zusammengesetzte Objekte, auf denen sich neben Kraftfahrzeugen z.B. auch Büsche oder Bäume befinden können.
- Die Grenzen eines Parkplatzes sind in vielen Fällen in einem Luftbild nicht erkennbar. Der Grund dafür können Verdeckungen sein, oder auch die Tatsache, daß diese Grenzen nur administrative Grenzen sind.

Wie auch bei der Erkennung von Gebäuden wird bei der Erkennung von Parkplätzen zunächst versucht, die aus der Karte vorhergesagte Kontur im Luftbild zu verifizieren. Da dieses aus den zuvor genannten Gründen jedoch nicht immer erfolgreich sein kann, werden fehlende Zuordnungen zwischen der vorhergesagten Kontur und Kantensegmenten in umfangreicherem Maße zugelassen als dies z.B. bei Gebäuden der Fall ist. Die (partiell) verifizierte Kontur dient jedoch zur räumlichen Beschränkung der Suche nach parkenden Kraftfahrzeugen. Erkannte Kraftfahrzeuge werden zu typischen geometrischen Anordnungen von parkenden Fahrzeugen gruppiert. Aus solchen Anordnungen werden Hypothesen für die Erkennung weiterer Kraftfahrzeuge auf dem Parkplatz abgeleitet. Die Erkennung eines Parkplatzes ist erst nach der Erkennung der Kraftfahrzeuge abgeschlossen.

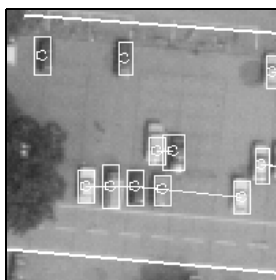
Ein Beispiel für die Auswertung einer Parkplatzszene ist in Abb. 4-14a dargestellt. Die aus Kantensegmenten zusammengesetzten Objektkonturen sind als dicke weiße Linien im Luftbild dargestellt. Aus der Karte bekannte Konturen, für die keine Entsprechung in der Menge der Bildbereichshinweise gefunden wurde, sind mit unterbrochener Linie dargestellt. Ebenfalls in weißer Farbe ist das umschreibende Rechteck der erkannten Kraftfahrzeuge dargestellt. Die Zusammengehörigkeit der Kraftfahrzeuge zu einer Gruppierung ist durch eine sie verbindende weiße Linie angezeigt.

Bevor wir die Ergebnisse bei Parkplätzen und Kraftfahrzeugen besprechen, wollen wir auf die Ergebnisse für die Gebäude in der Szene eingehen. Für eine Konturlinie des H-förmigen Gebäudes konnte aufgrund fehlenden Kontrastes im Luftbild keine Entsprechung in der Menge der Kantensegmente gefunden werden. Weiterhin wurden zur Rekonstruktion der äußeren linken Konturlinie des Gebäudes nicht wie bei den anderen Konturen Kantensegmente, die von einer Dachkante stammen, verwendet, sondern Kantensegmente von der Grundrißkante. Durch die Verwendung von 3D-Daten wäre es leichter möglich, solche fehlerhaften Zuordnungen zu vermeiden. Abgesehen von diesen beiden Fehlern war jedoch, wie aus der Abbildung ersichtlich ist, die Verifikation der Gebäude insgesamt erfolgreich.

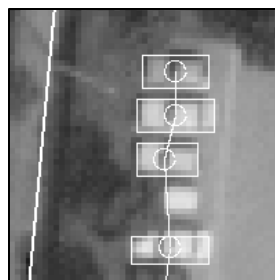
Konturlinien der Parkplätze wurden dort nicht detektiert, wo diese wegen Verdeckungen durch Vegetation oder parkende Kraftfahrzeuge nicht sichtbar waren. Für den L-förmigen Parkplatz kann dafür, nach der Erkennung der Kraftfahrzeuge an diesen Stel-



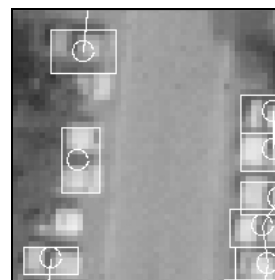
a



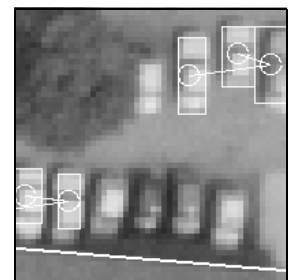
b



c



d



e

Abb. 4-14: Ergebnis der Bildauswertung. Die aus dem Luftbild rekonstruierten Objektkonturen sind als dicke, weiße, durchgezogene Linien dargestellt; Konturen, für die keine Entsprechung in der Menge der Kantensegmente gefunden wurde, sind als unterbrochene Linien dargestellt.

Erkannte Kraftfahrzeuge sind mit weißen Rechtecken umrahmt; die zu einer Gruppierung gehörenden Kraftfahrzeuge sind mit dünnen weißen Linien verbunden.

len, die Erklärung durch das System selbst gegeben werden. Die nicht detektierte Kontur auf der linken Seite des Parkplatzes nahe des H-förmigen Gebäudes kann vom System jedoch nicht erklärt werden. Der Grund dafür ist, daß an dieser Stelle Verdeckungen durch Bäume auftreten, die Erkennung von Bäumen aber noch nicht in unserem System implementiert ist.

Die beiden in der Abbildung annähernd horizontal verlaufenden Grenzen des Parkplatzes nahe des H-förmigen Gebäudes sind administrative Grenzen. Durch Begehung konnte festgestellt werden, daß der gesamte Bereich, der in der Abbildung unterhalb und rechts des H-förmigen Gebäudes liegt, gepflastert ist. Den beiden horizontalen Grenzen wurden in der Bildauswertung weiße Markierungen, die Stellflächen und Fahrbahnen auf dem Parkplatz anzeigen, zugeordnet. Die in der Karte angegebenen Grenzen des Parkplatzes sind parallel zu diesen Markierungen und liegen unweit davon. Aus diesem Grund, und auch weil die Markierungen wegen ihres hohen Kontrastes zur Umgebung zu mit hoher Güte im Luftbild detektierten Kantensegmenten führen, sind die Bewertungen dieser Grenzen hoch. Nach der Erkennung der Kraftfahrzeuge wird die Verifikation dieses Parkplatzes daher vom System als erfolgreich eingestuft.

Beachtet man jedoch, daß dort eine größere Fläche als die des in der Karte angegebenen Parkplatzes gepflastert ist und daß auch außerhalb der administrativen Grenzen des Parkplatzes Fahrzeuge parken, so könnte man vom System erwarten, daß die aus der Karte bekannten Grenzen des Parkplatzes korrigiert werden. Wegen den geschilderten Randbedingungen ist das System in dem hier vorgestellten Fall dazu nicht in der Lage. In Abschnitt 4.4.2 stellen wir jedoch ein Beispiel vor, in dem das System selbstständig die aus der Karte bekannten Grenzen eines Parkplatzes korrigiert. Durch eine Erweiterung der Modelle wäre es denkbar, daß das System auch in dem hier vorgestellten Fall eine Verbesserung der Parkplatzgrenzen vornehmen könnte.

Die Erkennung der Kraftfahrzeuge und ihre Gruppierung zu typischen geometrischen Anordnungen (hier Reihen parkender Fahrzeuge) ist, wie in Abb. 4-14a zu erkennen ist, insgesamt gesehen erfolgreich. Einige Kraftfahrzeuge wurden von dem System jedoch nicht erfaßt. Wir wollen die Gründe dafür anhand der vergrößert dargestellten Beispiele in Abb. 4-14b bis e besprechen.

In Abb. 4-14b ist ein Detail des Parkplatzes nahe dem H-förmigen Gebäude dargestellt. Alle Kraftfahrzeuge aus dem Ausschnitt wurden richtig erkannt, außer dem am weitesten links stehenden Fahrzeug in der mittleren Reihe. Hier wurde die Motorhaube des Fahrzeugs ihm fälschlicherweise nicht zugeordnet. Weil dieses Fahrzeug versetzt gegenüber dem neben ihm stehenden ist, ragt seine Motorhaube aus der zu bildenden Reihe heraus. Die Fahrzeughypothese aber, die nur aus den dem Dach und dem Kofferraum entsprechenden Bildregionen gebildet wurde, paßt besser in eine Reihe mit dem neben ihm stehenden Fahrzeug. Da in diesem Fall bereits die aus zwei Bildregionen gebildete Fahrzeughypothese das parametrische Modell (geometrische Abmessungen und Formparameter) für ein Fahrzeug erfüllte, wurde diese Hypothese akzeptiert.

Abb. 4-14c und Abb. 4-14d zeigen Details des L-förmigen Parkplatzes. In Abb. 4-14c ist ein Beispiel für ein wegen Verdeckungen nicht erkanntes Kraftfahrzeug dargestellt. In Abb. 4-14d führten die Verdeckungen von großen Teilen der Kraftfahrzeuge dazu,

daß die Motorhauben zweier benachbarter Fahrzeuge zusammengefaßt wurden und fälschlicherweise als ein Fahrzeug erkannt wurden. Begünstigt wurde dies durch die Tatsache, daß die beiden Fahrzeuge sehr nahe beieinander stehen und dieselbe Farbe haben.

Ein anderer Einfluß der Farbe auf das Erkennungsergebnis ist in Abb. 4-14e dargestellt. Die im Modell geforderte Ähnlichkeit der Farben derjenigen Bildregionen, die zusammen eine Kraftfahrzeughypothese bilden können, ist für einige der in der Abbildung enthaltenen Fahrzeuge nicht erfüllt. Deshalb wurden diese nicht als solche erkannt.

Trotz der Tatsache, daß nicht alle Kraftfahrzeuge auf den Parkplätzen richtig erkannt wurden, kann zusammenfassend festgestellt werden, daß für den überwiegenden Anteil der Fahrzeuge ihre Erkennung und Gruppierung erfolgreich war. Insbesondere konnte durch die Erkennung der Kraftfahrzeuge die Sicherheit erhöht werden, mit der die Parkplätze erkannt wurden.

Wir wollen betonen, daß keine Strukturen des Bildes, die nicht von Kraftfahrzeugen stammen, als Kraftfahrzeuge erkannt wurden. Das ist nicht nur ein Verdienst des parametrischen Teils des Kraftfahrzeugmodells, sondern insbesondere auch ein Verdienst des strukturellen Teils des Modells. Kraftfahrzeuge sind als optionale und kontextabhängige Bestandteile von Parkplätzen modelliert, nicht jedoch von Gebäuden oder anderen Objekten (Straßen sind z.Z. nicht in unserem System integriert). Damit wird vom System gar nicht erst der Versuch unternommen, Strukturen des Bildes, die sich z.B. auf den Dächern von Gebäuden befinden, als Kraftfahrzeuge zu interpretieren — obwohl es dort Strukturen gibt, die das parametrische Modell für Kraftfahrzeuge erfüllen. Das ist ein Vorteil einer überwiegend modellgesteuerten Strategie gegenüber einem überwiegend datengetriebenen Ansatz. Solche Inkonsistenzen, wie sie hier am Beispiel der Kraftfahrzeuge auf Gebäudedächern dargestellt wurden, können durchaus bei einem datengetriebenen Ansatz erzeugt werden; sie müssen dann in einer nachfolgenden Stufe der Konsistenzprüfung wieder aus dem Ergebnis entfernt werden. Bei einer modellgesteuerten Strategie ist es jedoch unwahrscheinlich, daß diese Inkonsistenzen überhaupt entstehen.

4.4.2 Erkennung neuer Objekte

In der dritten Phase der Bildauswertung (vgl. Abschnitt 4.2.1) wird die Szenenbeschreibung vervollständigt, indem unter Nutzung des gewonnenen Kontextes Objekte rekonstruiert und erkannt werden, die nicht in der Karte abgebildet sind. Wir diskutieren die Ergebnisse hierzu anhand der in Abb. 4-15 dargestellten Szene. In der Abbildung sind, nach Transformation in das Bildkoordinatensystem, die aus der Karte bekannten Objektkonturen dargestellt: mit durchgezogenen weißen Linien die Konturen der Gebäude und mit unterbrochenen weißen Linien die Konturen der Parkplätze. In der Karte sind für die in Abb. 4-15 dargestellte Szene auch die Konturen der Straßen enthalten; da in unserem System zum gegenwärtigen Zeitpunkt Straßen jedoch nicht behandelt werden, wurden die Straßenkonturen auch nicht aus der Karte extrahiert und sind in der Abbildung nicht dargestellt.

Zur Vereinfachung wollen wir die Objekte, für die aus der Karte Konturinformation ge-



Abb. 4-15: Ausschnitt aus einem Luftbild. Weiße Linien: aus der Karte bekannte Objektkonturen, durchgezogene Linien: Gebäudekonturen, unterbrochene Linien: Parkplatzkonturen

wonnen wurde, benennen. Im folgenden bezeichnen wir das Gebäude mit den vier Flügeln als *Gebäude 1*, das Gebäude im rechten, unteren Bereich der Abb. 4-15 als *Gebäude 2*, den langgestreckten Parkplatz als *Parkplatz 1* und den Parkplatz in dreiecksähnlicher Form als *Parkplatz 2*.

Wie man bemerkt, sind für große Teile der in der Abb. 4-15 dargestellten Szene keine Informationen in der Karte enthalten. Obwohl eine großmaßstäbige Karte (DGK5, Maßstab 1:5000) verwendet wurde, fällt weiterhin auf, daß die Objektkonturen in der Karte zum Teil ungenau sind. Das trifft für eine Kontur des linken Flügels von Gebäude 1 und insbesondere für die Konturen von Parkplatz 1 zu.

Bevor wir die Erkennung neuer Objekte diskutieren, wollen wir daher auch die Verifikation der Kartenobjekte ansprechen. Die Ergebnisse der Luftbildauswertung sind in Abb. 4-16 dargestellt. Die aus den Bildbereichshinweisen rekonstruierten Konturen der erkannten Objekte sind als weiße Linien in der Abbildung dargestellt. Dabei wurden verwendet:

- dicke durchgezogene weiße Linien für die Konturen der Gebäude,

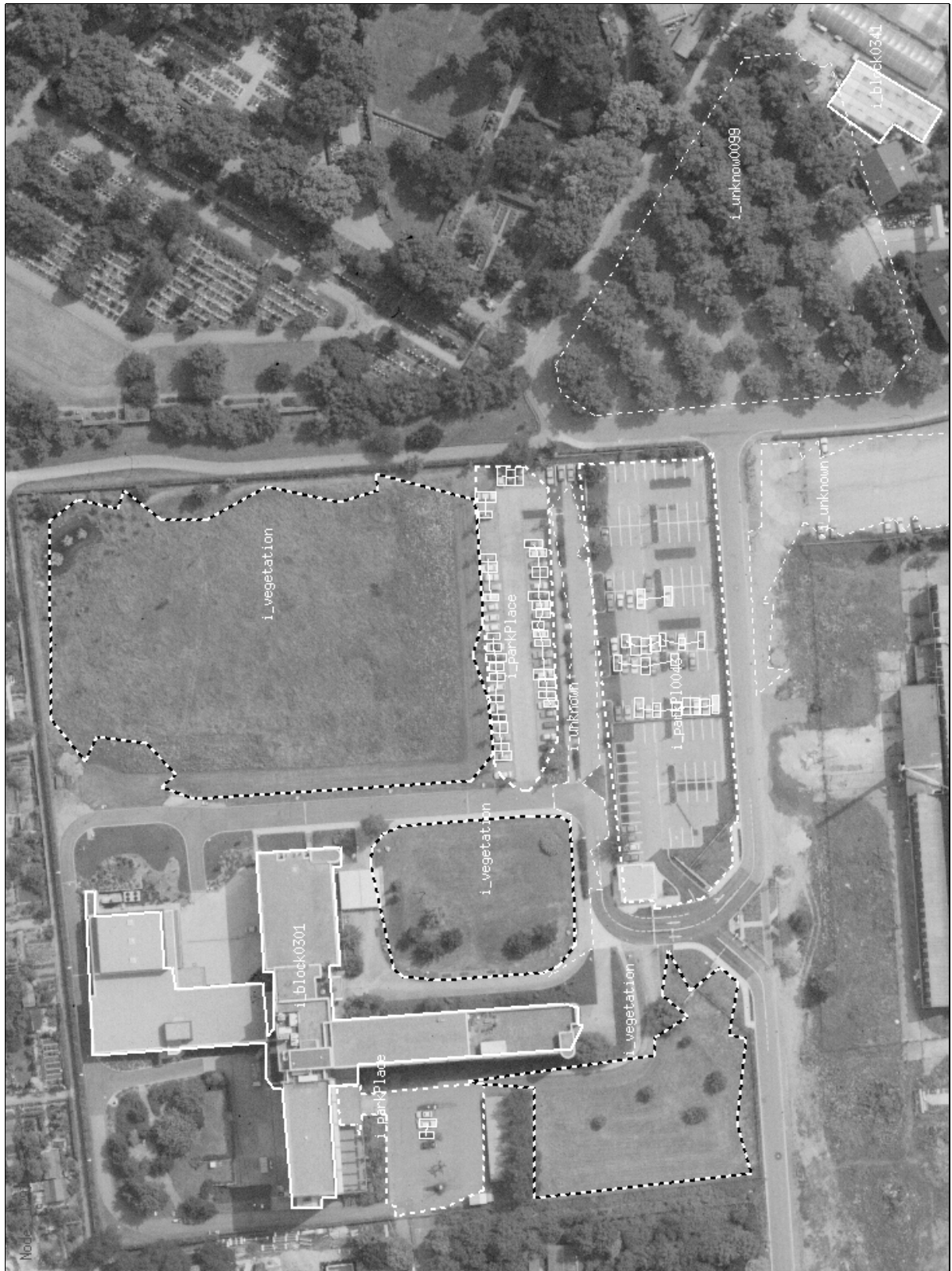


Abb. 4-16: Ergebnis der Bildauswertung für die Szene aus Abb. 4-15. Dicke durchgezogene Linien: Gebäude, dünne durchgezogene Linien: Kraftfahrzeuge und Gruppierungen von Kraftfahrzeugen, dicke unterbrochene Linien: Parkplätze, dünne unterbrochene Linien: als “nicht bekannt” klassifizierte Objekte, schwarz-weiße Linien: Grünflächen.
(Das Luftbild wurde zu Darstellungszwecken um 90° gedreht.)

- dünne durchgezogene weiße Linien für das umschreibende Rechteck eines Kraftfahrzeugs und die Darstellung der Zugehörigkeit von Kraftfahrzeugen zu einer Gruppierung,
- dicke unterbrochene weiße Linien für die Konturen der Parkplätze,
- dünne unterbrochene weiße Linien für die Konturen von Objekten, die der Klasse “nicht bekannt” zugewiesen wurden und
- schwarz-weiße Linien für die Konturen von Grünflächen.

Wie in Abb. 4-16 erkennbar ist, war die Verifikation der beiden Gebäude erfolgreich. Für Gebäude 1 konnte die Konturlinie des linken⁶ Flügels verbessert werden. Allerdings wurden die Objektkonturen im Bereich des Übergangs vom rechten Flügel zum oberen Flügel von Gebäude 1 falsch rekonstruiert. Wegen Schatten ist die Objektkontur dort im Luftbild nicht sichtbar. Die in der Nähe auftretenden starken Schattenkanten wurden dagegen fälschlicherweise als Objektkontur erkannt. Durch eine Erweiterung des Systems erscheint es möglich, den Schattenwurf zu modellieren und damit solche Fehlzugeordnungen zu vermeiden. Über Verfahren zur Modellierung und Nutzung des Schattens für die Bildauswertung berichteten bereits [52,98].

Für Parkplatz 1 war die Verifikation erfolgreich. Insbesondere konnte für ihn die in der Karte fehlerhaft abgebildete Kontur verbessert werden. Der Bereich des Parkplatzes 2 hingegen wurde nicht als Parkplatz erkannt. In der Realität befindet sich dort tatsächlich ein Parkplatz, der jedoch fast vollständig mit Bäumen bewachsen ist. Daher ist es selbst dem Menschen nicht möglich, allein durch Betrachtung des Luftbildes in diesem Bereich einen Parkplatz zu erkennen. Da weder die aus der Karte vorgegebenen Konturen im Luftbild wiedergefunden wurden, noch (und das war letztendlich ausschlaggebend) Kraftfahrzeuge in diesem Bereich detektiert wurden, wurde von unserem System Unentscheidbarkeit signalisiert, indem es diesen Bereich des Luftbildes der Klasse “nicht bekannt” zuwies. Aufgrund der besonderen Bedingungen betrachten wir dies jedoch nicht als einen Fehlschlag, sondern als einen Erfolg. Auf die Gründe, warum dieser Bereich nicht als “Wald” oder “Fläche mit Bäumen” klassifiziert wurde, wird später eingegangen.

Die Schlußfolgerungen aus Abschnitt 4.4.1 bezüglich der Erkennung von Kraftfahrzeugen auf Parkplätzen wurden auch durch die Ergebnisse für die hier untersuchte Szene bestätigt. Es wurde weiterhin festgestellt, daß die auf Parkplatz 1 nicht erkannten Kraftfahrzeuge hauptsächlich deswegen nicht erkannt wurden, weil bei der Berechnung der flächenhaften Bildbereichshinweise die diesen Fahrzeugen entsprechenden Regionen mit den Regionen der Stellflächenmarkierungen verschmolzen wurden. Zur Behebung dieses Nachteils bietet sich als Erweiterung des Systems an, vor der Erkennung der Kraftfahrzeuge den Bereich des Bildes, für den eine Parkplatzhypothese aufgestellt wurde, mit auf die Radiometrie der Parkplatzfläche abgestimmten Verfahrensparametern erneut zu segmentieren. Selbstverständlich braucht dieses iterative Vorgehen für eine verbesserte Berechnung der Bildbereichshinweise durch Ausnutzung von Zwisch-

⁶ Die Angaben “rechts”, “links”, “oben”, “unten” beziehen sich jeweils auf Abb. 4-15.

energebnissen der Szenenbeschreibung nicht auf Parkplätze beschränkt zu bleiben, sondern kann auch auf andere Objektklassen angewendet werden.

Nach der erweiterten Beschreibung der verifizierten Objekte werden Hypothesen für neue Objekte, also Objekte, die aus verschiedenen Gründen in der Karte nicht abgebildet sind, aufgestellt. Als Aufmerksamkeitsbereiche dienen Regionen des Bildes, die wegen ihrer Größe und ihrer Radiometrie auffällig sind. Um die Beschränkungen für die Eigenschaften der Objekte (z.B. Farbe eines Parkplatzes) an die Gegebenheiten der aktuellen Szene und des aktuellen Luftbildes anzupassen, werden zuvor Statistiken dieser Eigenschaften der bereits verifizierten Objekte berechnet.

Derart wurden in der Szene in Abb. 4-16 weitere Parkplätze und Grünflächen gefunden. Erfolgreich erkannt und rekonstruiert wurde der Parkplatz oberhalb (vgl. Fußnote 6) des Parkplatzes 1. Der Großteil der Kraftfahrzeuge auf diesem Parkplatz wurde detektiert und in Reihen parkender Fahrzeuge gruppiert.

Richtig erkannt und durch parkende Kraftfahrzeuge bestätigt wurde auch der Parkplatz links von Gebäude 1. Die von dem System rekonstruierte Konturlinie ist im oberen Bereich des Parkplatzes jedoch zum Teil fehlerhaft. Hier wurde ein T-förmiger Bereich dem Parkplatz zugeordnet, von dem durch Begehung festgestellt wurde, daß es sich in Wirklichkeit um eine Terrasse und Stufen, die zu dieser Terrasse führen, handelt.

Für einen Bereich des Luftbildes, der unterhalb von Parkplatz 1 liegt, wurde eine Parkplatz-Hypothese aufgestellt. Die radiometrischen Eigenschaften dieses Bereichs sind ähnlich den radiometrischen Eigenschaften der bereits erkannten Parkplätze. Wegen seiner Form und weil die dort parkenden Fahrzeuge wegen fehlerhafter Segmentierung nicht detektiert wurden, wurde dieser Bereich nicht als Parkplatz erkannt, sondern der Klasse "nicht bekannt" zugewiesen. Ähnlich verhält es sich auch für den langgestreckten Bereich oberhalb von Parkplatz 1. Für diesen Bereich, eigentlich eine Straße, wurde wegen seiner Form die Parkplatz-Hypothese nicht akzeptiert. Er wurde der Klasse "nicht bekannt" zugewiesen — eine vertretbare Entscheidung, da Straßen nicht modelliert und damit dem System unbekannt sind.

Die Erkennung und Rekonstruktion weitgehend homogener Grünflächen konnte mit dem System erfolgreich durchgeführt werden. Die Grenzen des Systems werden jedoch in Bereichen der Szene wie z.B. denen, die im rechten Teil der Abb. 4-15 dargestellt sind, deutlich. Der Baumbestand, der einerseits nicht so dicht ist, daß ihm ein homogen texturierter Bereich im Luftbild entsprechen würde, und andererseits dichter ist als einzelne, isoliert stehende Bäume, sowie auch die ansonsten durch beetähnliche Strukturen und Wege stark gegliederte Landschaft führen dazu, daß die nach der Segmentierung entstehenden Regionen sehr komplizierte Formen haben. Die aus dem Luftbild berechneten Kantensegmente sind ebenfalls sehr unregelmäßig, so daß es mit den im System enthaltenen Modellen zur Zeit nicht möglich ist, daraus sinnvolle Strukturen zu bilden. Überhaupt erscheinen für solche Bereiche der Szene statistische Ansätze erfolgversprechender zu sein als strukturelle Ansätze.

Wir wollen zum Schluß der Diskussion der Ergebnisse die Aufmerksamkeit noch auf einen Bereich des Parkplatzes 1 richten. In der dem Gebäude 1 zugewandten Ecke dieses Parkplatzes (vgl. Abb. 4-16) ist im Luftbild eine quadratische Struktur erkennbar,

die dieselbe Farbe wie der Parkplatz hat. Nicht nur dem System, sondern auch dem menschlichen Betrachter ist es nicht möglich, zu entscheiden, ob diese Struktur Teil des Parkplatzes ist und sich durch eine Markierung auf dem Boden leicht von ihrer Umgebung abhebt, oder ob sie vielleicht einem Gebäude entspricht. Durch Besuch vor Ort konnte festgestellt werden, daß es sich dabei um ein Pförtnerhäuschen handelt.

Damit wird erneut die Bedeutung der Karte (oder einer anderen, ähnliche Informationen liefernden Quelle) deutlich. Hätte man einen konkreten Hinweis auf ein Gebäude an dieser Stelle, so wäre es nicht nur dem Menschen, sondern vermutlich auch dem System möglich gewesen, das Vorhandensein des Gebäudes zu bestätigen — aufbauend auf Überlegungen, daß das zufällige Auftreten einer Struktur im Luftbild, deren Radiometrie der von Gebäudedächern entspricht und die eine ähnliche Form und ähnliche Abmessungen als das von der anderen Informationsquelle an derselben Stelle vorhergesagte Gebäude hat, sehr unwahrscheinlich ist.

Ebenso ergibt sich damit die Notwendigkeit einer 3D-Auswertung von mehreren Luftbilder (Kap. 3.1.1) oder direkt gemessener Höheninformation (Kap. 7).

5. Fusion der Analyseergebnisse

Um für die Ermittlung der Versiegelungsstufen alle Ergebnisse der strukturellen Analysen verwerten zu können, wurden die in Kapitel 3 und 4 erkannten Objekte zusammengeführt. Dazu wurden die Straßen aus der strukturellen Analyse mit dem BPI-System als zusätzliche Objekte in das semantische Netz eingetragen. Abb. 5-1 zeigt die Vereinigungsmenge der Objekte aus beiden Verfahren exemplarisch an einem Gelände, das einen kleinen Ausschnitt des bearbeiteten Gebietes enthält. Vor der Fusion wurde ein



Abb. 5-1: Fusion der Analyseergebnisse

Streifen als "unbekannt" klassifiziert. Nach der Fusion ist bekannt, daß dieser Streifen eine Straße ist. Diese Information wird wie folgt verarbeitet: Die gelieferten Objekte wurden als Instanzen in das semantische Netz eingetragen. Da diese Bereiche instanziiert sind, wird im weiteren Verlauf der Analyse die Suche nicht mehr an diese Stelle gelenkt.

6. Zuordnung der Bodenversiegelung

In Kapitel 2 des Zwischenberichtes I zum laufenden Vorhaben [103] wurden Überlegungen zur Definition der Versiegelungseigenschaften dargestellt. Es wurde gezeigt, daß es nicht möglich ist, eine allgemeingültige Definition der Versiegelung zu geben, da die Versiegelungseigenschaft durch unterschiedlichen Kontext beeinflußt wird (Versiegelung bezüglich Grundwasserneubildung, Versiegelung bezüglich lokalem Kleinklima, Versiegelung auf Basis amtlicher Nutzungsdaten usw.).

Es wurden jedoch Tabellen erarbeitet, in denen den Objekten einer Szene Versiegelungsgrade zugeordnet werden. Wenn es nun möglich wird, eine bezüglich der für die Versiegelung relevanten Objekte vollständige Beschreibung der Szene zu erstellen, so ist der Schritt von dieser zur Gewinnung von Versiegelungsaussagen lediglich ein Tabellenzuordnungsverfahren. Damit wird die Erkennung und Beschreibung der Objekte einer Szene zur wichtigsten Voraussetzung im Prozeß der Bestimmung der Bodenversiegelung.

6.1 Zuordnung auf Basis der Objekterkennung

In den vorangehenden Kapiteln wurden die in diesem Projekt entwickelten Verfahren zur Erkennung und Beschreibung der Objekte einer Szene vorgestellt. Mit diesen Verfahren ist es möglich, insbesondere durch die Verwendung von Kartenwissen automatisch einen Teil der Objekte in der Szene zu erkennen. Es sind dies überwiegend Objekte wie Gebäude, Parkplätze, Straßen – im Wesentlichen also Objekte, die vom Menschen geschaffen wurden und gut ausgeprägte, weitgehend regelmäßige Konturen besitzen.

Für die automatisch erkannten und beschriebenen Objekte werden die Bodenversiegelungswerte gemäß ihrer Klasse aus einer Tabelle entnommen. Der so ermittelte Wert wird dann der gesamten von dem Objekt überdeckten Fläche als Bodenversiegelungswert zugewiesen. Wir betrachten als Beispiel die Szene aus Abb. 4-16. In dieser Szene wurden die Gebäude, Straßen und Parkplätze sowie ein Teil der Grünflächen vom entwickelten System automatisch erkannt. Um eine Versiegelungsaussage zu gewinnen, werden die Gebäude, Straßen und Parkplätze der Klasse *weitgehend versiegelt* zugeordnet, während die Grünflächen der Klasse *weitgehend unversiegelt* zugeordnet werden. Eine stärkere Differenzierung des Versiegelungsgrades, z.B. in 5 Stufen zwischen den Extremwerten *unversiegelt* und *vollständig versiegelt* ist sinnvoll und möglich, soweit die entsprechenden Fachleute sich auf objektklassenbezogene Versiegelungsstufen einigen. Eine noch weitergehende Differenzierung wie z.B. die Einteilung in 10 % - Stufen erscheint wenig vertrauenswert, wenn man die Vertrauenswerte in die Ergebnisse der automatischen Strukturanalyse beachtet.

Für andere Teile der Szene konnten diese Verfahren zur Bildauswertung keine Ergebnisse liefern. Es sind dies insbesondere Gebiete mit unregelmäßiger Vegetation sowie auch die „Zwischenräume“ zwischen den Objekten. Auch für diese Bereiche ist eine

Aussage über die Bodenversiegelung erforderlich. Um sie zu erhalten, wurden die Regionen (vgl. Abschnitt 2.2 in [108]) des Bildes, die nach der Bildauswertung keinen Objekten zugeordnet waren, aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften klassifiziert. Die spektralen Eigenschaften einer Region sind jedoch nicht aussagekräftig genug, um allein mit ihnen die Zugehörigkeit der Region zu einem Objekt bestimmen zu können. Wir haben also eine Klassifikation der Regionen direkt in die Versiegelungsklassen *weitgehend versiegelt* und *weitgehend unversiegelt* vorgenommen.

Als Merkmale der Region wurden aus dem Farbluftbild die mittlere Intensität jeweils in den Kanälen Rot, Grün und Blau berechnet. Mit diesen Merkmalen wurde für interaktiv ausgewählte Regionen ein Klassifikator auf der Basis eines RCE-Netzwerkes [44] trainiert. Mit diesem Klassifikator wurden den Regionen, für die die automatische Strukturanalyse dieses Projekts keine Ergebnisse lieferte, Versiegelungsklassen zugeordnet.

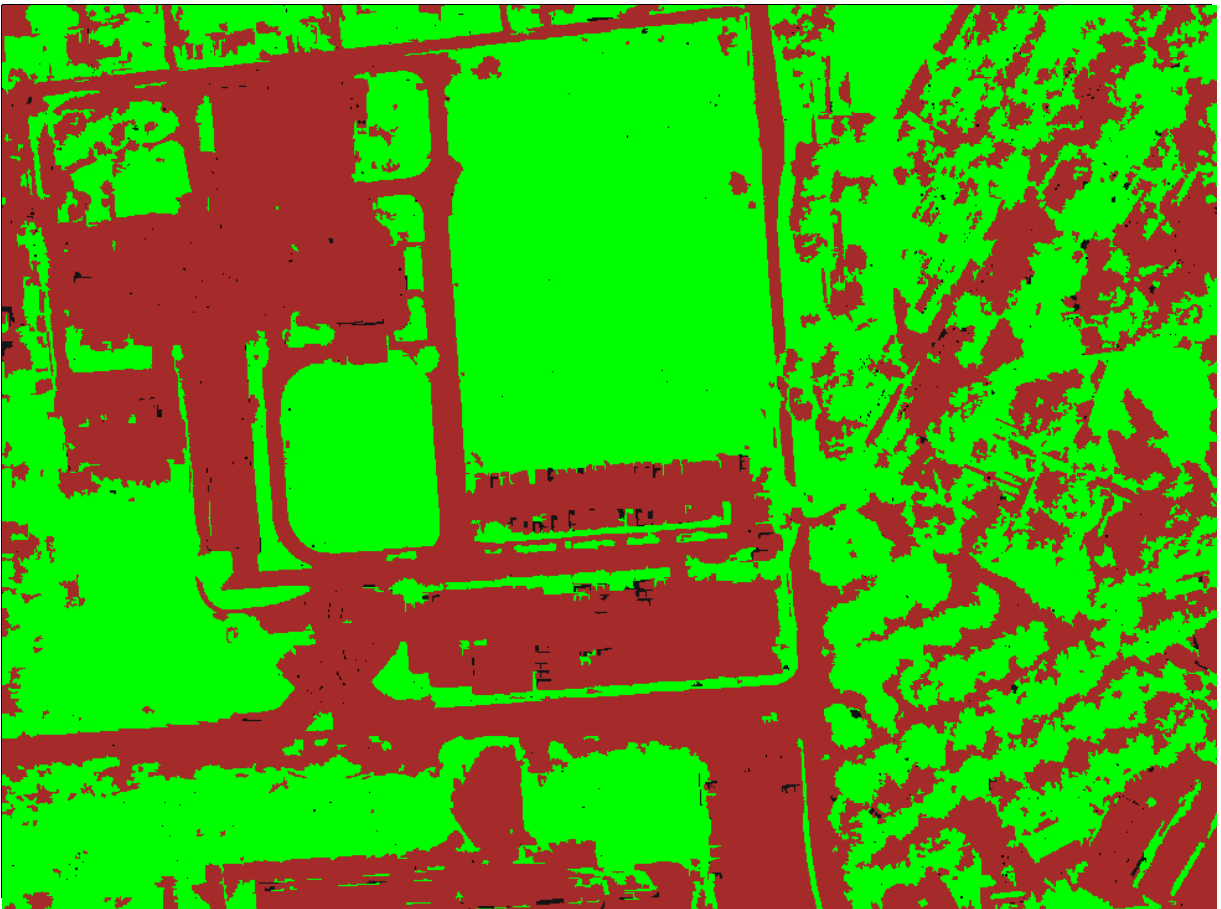


Abb. 6-1: Bestimmung der Bodenversiegelung mittels struktureller Bildauswertung (grün: *weitgehend unversiegelt*; braun: *weitgehend versiegelt*; schwarz: Rückweisung).

Das Ergebnis der Bestimmung der Bodenversiegelung ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Regionen, die der Klasse *weitgehend unversiegelt* angehören, sind in grüner Farbe dargestellt. Regionen, die der Klasse *weitgehend versiegelt* angehören, sind in brauner Farbe

dargestellt. Insgesamt wurde eine Fläche von 327687 Bildpunkten entsprechend 3.25 ha als weitgehend versiegelt bestimmt, während eine Fläche von 386759 Bildpunkten entsprechend 3.83 ha als weitgehend unversiegelt eingestuft wurde. Für Regionen mit insgesamt 954 Bildpunkten, entsprechend 94.6 m² wurde keine Versiegelungsaussage gewonnen, da diese vom Klassifikator als unentscheidbar zurückgewiesen wurden. Diese Flächenanteile sind in Abb. 6-1 in schwarzer Farbe dargestellt.

Für die untersuchten Gebiete stehen keine vollflächigen, durch Begehung aufgenommene Versiegelungswerte zur Verfügung, so daß eine quantitative Beurteilung der Qualität der automatisch bestimmten Versiegelungswerte nicht möglich ist. Lediglich qualitativ, durch visuelle Interpretation des Luftbildes durch den Menschen und Vergleich mit dem automatisch erzielten Ergebnis können Aussagen über die Zuverlässigkeit des letzteren gemacht werden.

Man bemerkt (vgl. Abb. 4-16 und Abb. 6-1), daß für weite Teile der Szene die Zuordnung der Versiegelungsklassen von dem automatischen Verfahren korrekt vorgenommen wurde. Insbesondere in den Gebieten mit Gebäuden, Parkplätzen und Straßen sind die Grenzen zwischen versiegelten und nicht versiegelten Flächen sehr gut erfaßt – so daß diese Objekte selbst in Abb. 6-1 noch erkennbar sind.

Erwartungsgemäß sind in den Bereichen der Szene, in denen die automatische Bildauswertung keine Ergebnisse lieferte, die Versiegelungsaussagen weniger genau. Betrachtet man z.B. den mit Bäumen bedeckten Parkplatz, der von der automatischen Bildauswertung als unentscheidbar zurückgewiesen wurde (vgl. Abschnitt 4.4.2), so sieht man in Abb. 6-1, daß nach der Klassifikation die von den Baumkronen bedeckte Fläche als weitgehend unversiegelt, während die Zwischenräume zwischen den Baumkronen, wo die Parkplatzoberfläche sichtbar ist, als weitgehend versiegelt eingestuft wurden. Man kann diskutieren, ob dieses Ergebnis der Realität entspricht.

An diesem Beispiel werden erneut die prinzipiellen Grenzen einer Methode deutlich, die nur auf der Klassifikation der Rückstreueigenschaften der sichtbaren Oberfläche beruht und keine Interpretation und Zuordnung von Bildbereichen zu Objekten vornimmt. Es zeigt sich einmal mehr die Notwendigkeit, Verfahren zu entwickeln, mit denen eine automatische Interpretation von Luftbildern möglich ist. In diesem Forschungsvorhaben wurden Verfahren vorgestellt, die in der Lage sind, bestimmte Objektklassen aus den Luftbildern zu erkennen und zu beschreiben.

6.2 Zuordnung mit anderen Verfahren

Trotz einschränkender Randbedingungen ist das in diesem Forschungsvorhaben erarbeitete Verfahren in seiner Leistungsfähigkeit anderen Verfahren überlegen. Dies wird deutlich, wenn man sich die Ergebnisse betrachtet, die mit anderen Verfahren für die Szene aus Abb. 4-16 erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Versiegelung in einer Szene zu bestimmen, ist die, auf die Interpretation des Luftbildes zu verzichten und die Regionen, die mit dem in Abschnitt 2.2 des Zwischenberichtes [108] vorgestellten Verfahren gewonnen werden, direkt in Ver-

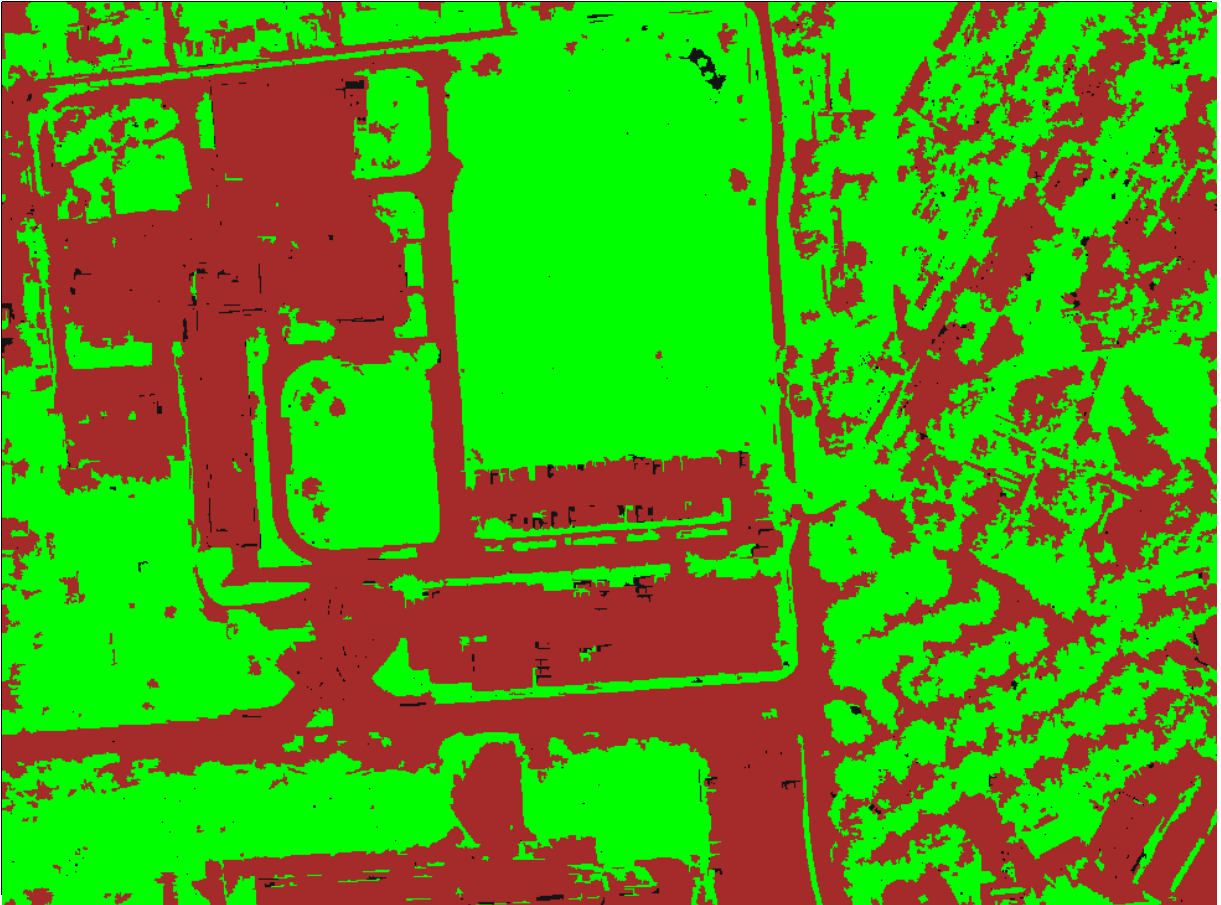


Abb. 6-2: Bestimmung der Bodenversiegelung mittels Klassifikation der Rückstreueigenschaften von Regionen (grün: weitgehend unversiegelt, braun: weitgehend versiegelt, schwarz: Rückweisung).

siegelungsklassen einzuteilen. Geht man so vor, so erhält man das Ergebnis aus Abb. 6-2. Es wurde dieselbe Farbcodierung wie bei Abb. 6-1 verwendet.

Mit dieser Methode (Methode 2) wurden insgesamt 324841 Bildpunkte, entsprechend einer Fläche von 3,22 ha als weitgehend versiegelt erfaßt, während 389605 Bildpunkte, entsprechend 3,86 ha als weitgehend unversiegelt erfaßt wurden. Zufällig wurden in dieser Szene mit dieser Methode genau wie mit dem in Abschnitt 6.1 vorgestellten Verfahren (Methode 1) auch 954 Bildpunkte, entsprechend 94.6 m² als unentscheidbar zurückgewiesen. Diese zurückgewiesenen Bereiche sind jedoch bei den beiden Verfahren nicht dieselben (vgl. die mit schwarzer Farbe dargestellten Bildpunkte in den Abb. 6-1 und 6-2).

Obwohl rein quantitativ betrachtet der Unterschied zwischen den mit Methode 1 und Methode 2 erzielten Versiegelungsaussagen klein ist, so bemerkt man bei vergleichender Betrachtung der Abb. 6-2 und 6-1 auffällige Unterschiede. So wurden z.B. mit Methode 2 in der Grünfläche in der Nähe des vierflügligen Gebäudes fälschlicherweise mehrere Bereiche als weitgehend versiegelt ausgewiesen. Mit Methode 1 wurden diese korrekt als

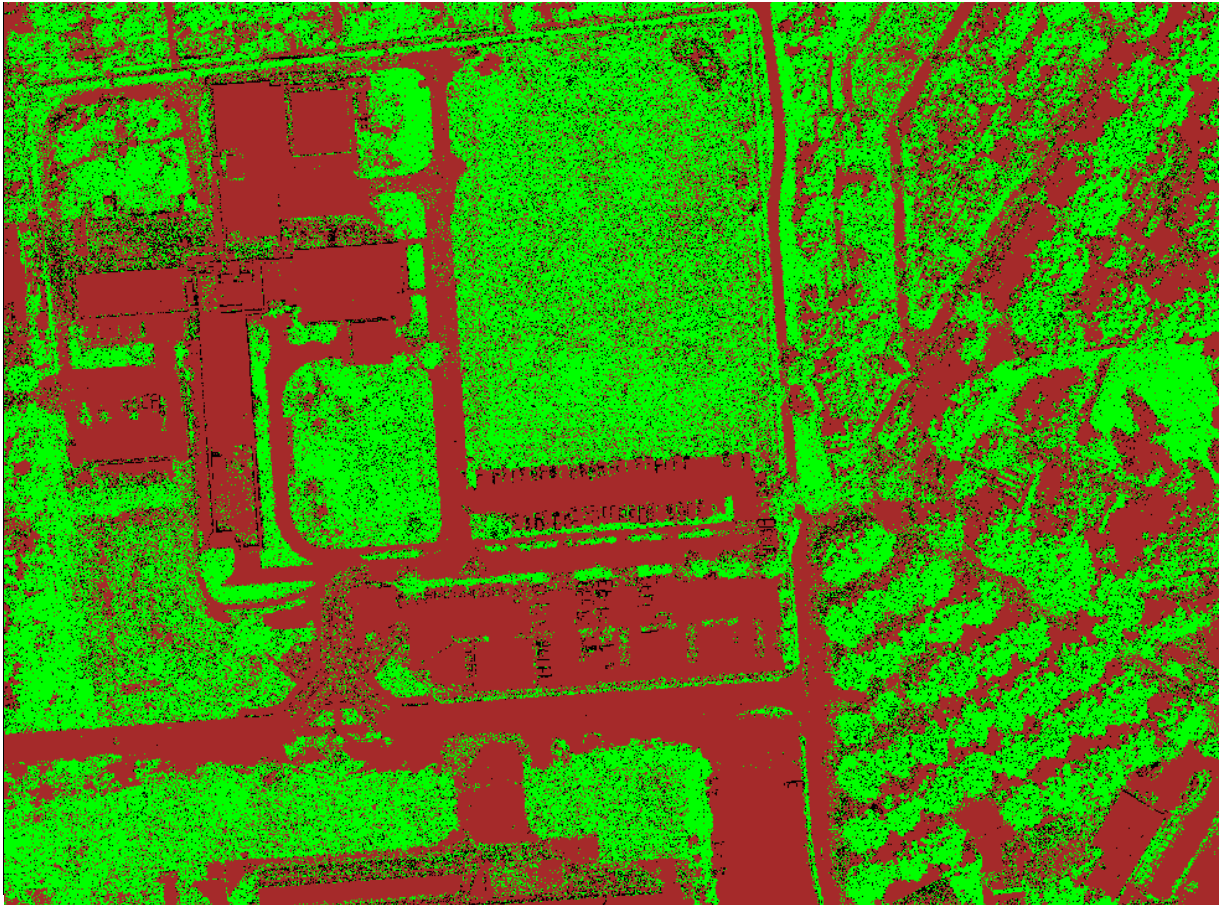


Abb. 6-3: Bestimmung der Bodenversiegelung mittels Klassifikation der Rückstreueigenschaften von Bildpunkten (grün: weitgehend unversiegelt, braun: weitgehend versiegelt, schwarz: Rückweisung).

weitgehend unversiegelt eingestuft. Mit Methode 2 wurden mehrere Flächen auf dem Dach des vierflügeligen Gebäudes als weitgehend unversiegelt klassifiziert. Der Weg am linken Bildrand, der die große Grünfläche umschließt, wurden mit Methode 2 in Teilen fälschlicherweise als weitgehend unversiegelt klassifiziert. Diese offensichtlichen Fehlklassifikationen konnten bei der objektorientierten Methode 1 vermieden werden.

Selbstverständlich stimmen die Ergebnisse von Methode 1 und Methode 2 in den Gebieten überein, in denen die automatische Strukturerkennung keine Ergebnisse lieferte: hier kam ja sowohl bei Methode 1 als auch bei Methode 2 dasselbe Verfahren zum Einsatz. In den Gebieten, in denen die automatische Strukturerkennung erfolgreich war, ist Methode 1 der Methode 2 jedoch überlegen. Daß der Unterschied in der Flächenbilanz zwischen beiden Ergebnissen quantitativ gering ist, liegt daran, daß durch Fehlklassifikationen in die eine und in die andere Richtung sich diese im Gesamtergebnis teilweise aufheben.

Eine weitere, aufwandssparende Methode zur Bestimmung der Versiegelung besteht

darin, vorab auf die Zusammenfassung der Bildpunkte zu Regionen zu verzichten und direkt eine Klassifikation der Bildpunkte in Versiegelungsklassen vorzunehmen. Bei dieser Methode (Methode 3) wurden die Intensitäten der Bildpunkte in den Kanälen Rot, Grün und Blau des Farbluftbildes als Merkmale verwendet; als Klassifikator wurde ebenso wie bei Methode 2 und teilweise bei Methode 1 das RCE-Netzwerk verwendet.

Das Ergebnis der Bestimmung der Versiegelung ist in Abb. 6-3 dargestellt. Man bemerkt, daß bei dieser Methode sehr viele Bildpunkte vom Klassifikator zurückgewiesen werden und daß durch fehlenden Kontext weit mehr Fehlklassifikationen auftreten als bei den beiden anderen Methoden: z.B. werden Bereiche auf den Gebäudedächern oder auf den Parkplätzen in größerem Umfang als zuvor als weitgehend unversiegelt eingestuft. Diese Methode erweist sich somit insgesamt gesehen als am wenigsten geeignet.

6.3 Schlußfolgerung

Die durchgeführten Experimente bestätigen die Annahme, daß die Klassifikation von Bildpunkten in Versiegelungsklassen unter Verwendung der spektralen Signaturen in Farbluftbildern zu unbefriedigenden Ergebnissen führt. Bessere Ergebnisse werden mit Verfahren erzielt, die vor der Klassifikation eine Zusammenfassung von Bildpunkten zu Regionen vornehmen und somit auch Nachbarschaftsbeziehungen berücksichtigen.

Eine weitere Steigerung der Zuverlässigkeit kann erzielt werden, wenn Bereiche des Luftbildes interpretiert und Objektklassen zugeordnet werden und erst in einem nachfolgenden Schritt den Objektklassen über eine Tabelle Versiegelungsgrade zugewiesen werden. Ein solches Vorgehen erweist sich als vorteilhaft insbesondere auch für den vorliegenden Fall, daß es unterschiedliche Definitionen für die Versiegelung bezüglich verschiedener Aspekte gibt (vgl. [103]).

7. Ausblick

In diesem Forschungsvorhaben wurden Verfahren zur automatischen Auswertung von Luftbildern erarbeitet, die es gestatten, bestimmte Objektklassen automatisch in Luftbildern zu erkennen und zu beschreiben. Für Teile der Szene mit diesen Objektklassen kann die Versiegelung zuverlässig bestimmt werden. Für die Teile der Szene, in denen die Objekterkennung versagt, wurde als Ersatz ein Verfahren mit Klassifikation der Regionen verwendet.

Es ist jedoch anzustreben, die Verfahren zur automatischen Luftbildauswertung weiter in Richtung *Erstellung einer vollständigen Szenenbeschreibung* voranzubringen. Dafür spricht zum einen die größere Sicherheit der Aussagen, die mit einem tieferen Verständnis der abgebildeten Szene zu erwarten sind, zum anderen auch die Verwertbarkeit der Szenenbeschreibungen für andere Anwendungsgebiete.

Im städtischen Bereich sind jedoch durch die Komplexität der urbanen Strukturen Schwierigkeiten bei der expliziten Beschreibung und Interpretation der Objekte zu erwarten. Ausdrucksvolle hierarchische Formbeschreibungen wie z.B. in Abb. 3-15 gezeigt, sind aufgrund der Vielfältigkeit der Strukturen nur beschränkt möglich. Hier besteht weltweit noch Forschungsbedarf.

Die ermittelte Bodenversiegelung städtischer Siedlungsbereiche wird typischerweise in Form einer Karte dargestellt. Dreidimensionale Objekte wie Gebäude oder Baumbestände werden hier als zweidimensionale Objekte wiedergegeben. Die in Kap. 3.1 zur Luftbildanalyse vorgestellten Modellierungen der Gebäude zeigen, daß durch strukturelle Bildanalyse auch dreidimensionale Szenenbeschreibungen aus Mehrfachaufnahmen gewonnen werden können.

Dreidimensionale Stadtmodelle finden zunehmendes Interesse in der Stadt- und Regionalplanung. Zur Visualisierungen werden häufig Oberflächen z.B. von Gebäuden mit Texturen belegt. Die Anforderung an eine photorealistische Erscheinung der Oberflächen oder der Vegetation hängt von dem geplanten Verwendungszweck ab. Aber auch zur Einsatzplanung und als Basis zur Simulation z.B. in den Bereichen der Umwelttechnik [1] oder Telekommunikation [46] besteht eine starke Nachfrage nach geometrischen Gebäudebeschreibungen.

Neben der klassischen Vorgehensweise, Höhendaten aus Stereo-Bildpaaren zu gewinnen, bieten sich neuerdings auch Daten an, die durch Befliegung mit Laserscannern gewonnen werden [54,20]. Laserhöhendaten sind heute mit einer Boden-Auflösung von unter einem Meter und einer Höhenauflösung von ca. einem Dezimeter erhältlich. Zur Erkennung und Rekonstruktion von einfachen Gebäuden aus Höhendaten existieren einige Ansätze (siehe z.B.[117]).

Da die Analyse von Höhendaten zur Bestimmung von Gebäuden sehr vielversprechend erscheint, wurden zur Abschätzung der Verwendbarkeit erste Untersuchungen durchgeführt. Ein einfaches 3D-Stadtmodell, bestehend aus prismatischen Objekten, läßt sich aus der digitalen Karte in Verbindung mit den Laserhöhendaten gewinnen.

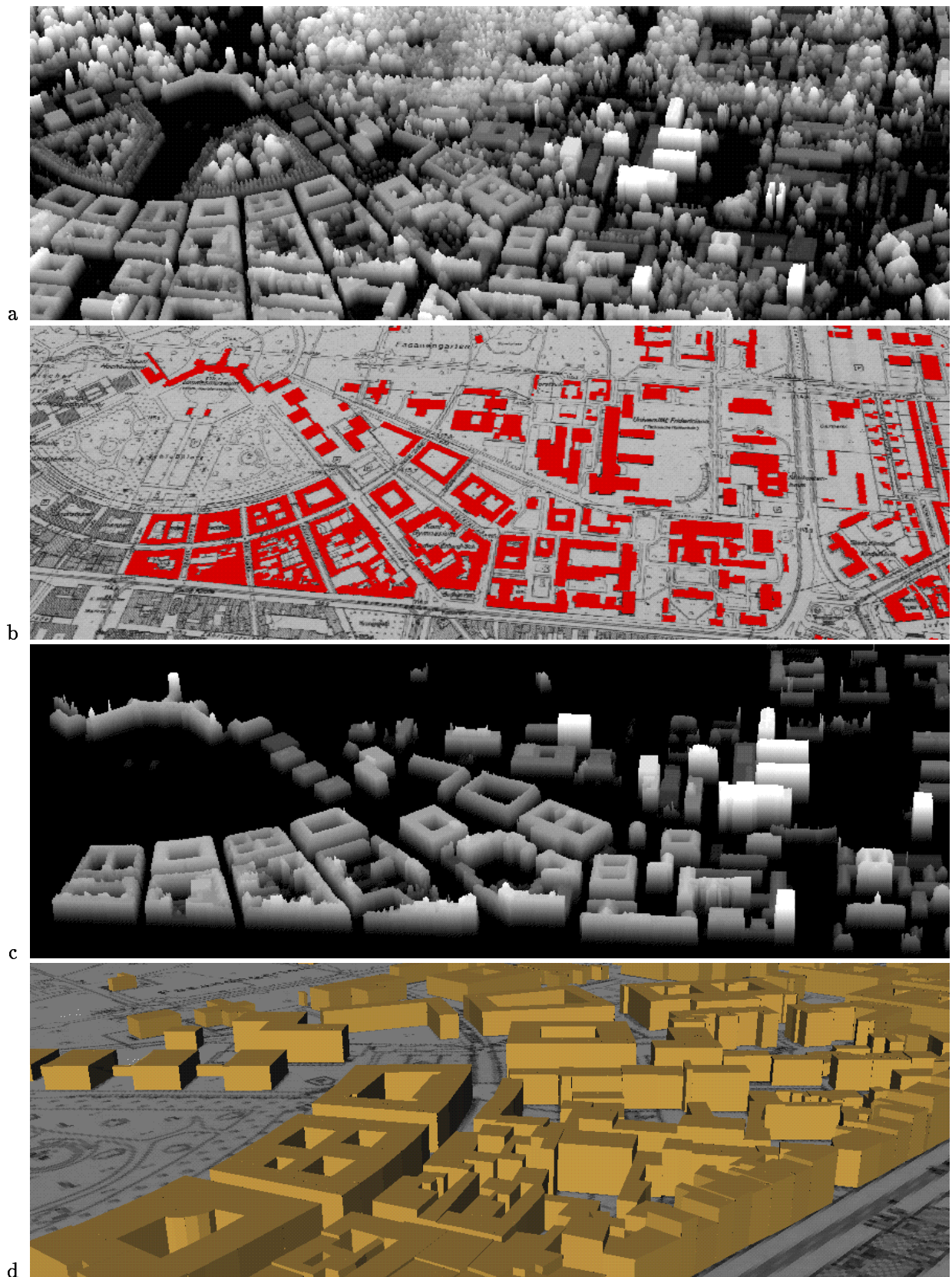


Abb. 7-1: Generierung eines Stadtmodells [115]. a) Laser-Höhendaten [40,54]
 b) Digitale Karte, c) maskierte Laser-Höhendaten, d) prismatische Gebäudemodelle

Dazu wird zunächst die digitale Karte (Gebäude) mit dem Produktionsnetz aus Abb. 3-20 analysiert. In der Menge der Gebäudelinienn werden topologische Eigenschaften wie Verbundenheit, Geschlossenheit und Enthaltensein untersucht, um Gebäudeteile zu separieren, eingeschlossene Flächen zu bestimmen und Gebäudeteile zu gruppieren. Das Ergebnis ist eine hierarchische Beschreibung der Kartenobjekte.

Die Kartenobjekte (Abb. 7-1b rot) werden dann zur Maskierung der Höhendaten (Abb. 7-1a) verwendet. Man erhält nach Gebäuden (Abb. 7-1c) und "Nicht-Gebäuden" bzw. Umgebung getrennte Höhendaten. Für jedes Kartenobjekt wird aus den Höhenmeßdaten über der Grundrißfläche eine mittlere Höhe berechnet und ein prismatisches 3D-Drahtmodell erstellt. Die Oberflächen dieses 3D-Objektes werden trianguliert und können dann in Zusammenhang mit Rasterdaten wie z.B. Karte (Abb. 7-1d), Luftbild oder Höhenbild aus verschiedenen Ansichten visualisiert werden.

Bei Verwendung einer aktuellen Karte sind in den Höhendaten der Umgebung keine Gebäude enthalten. Zeigen diese Daten trotzdem gebäudeähnliche Strukturen, so kann diese Information verwendet werden, um neue Gebäude, die nicht in der Karte eingezeichnet sind, zu detektieren und das Stadtmodell um diese Änderungen fortzuführen.

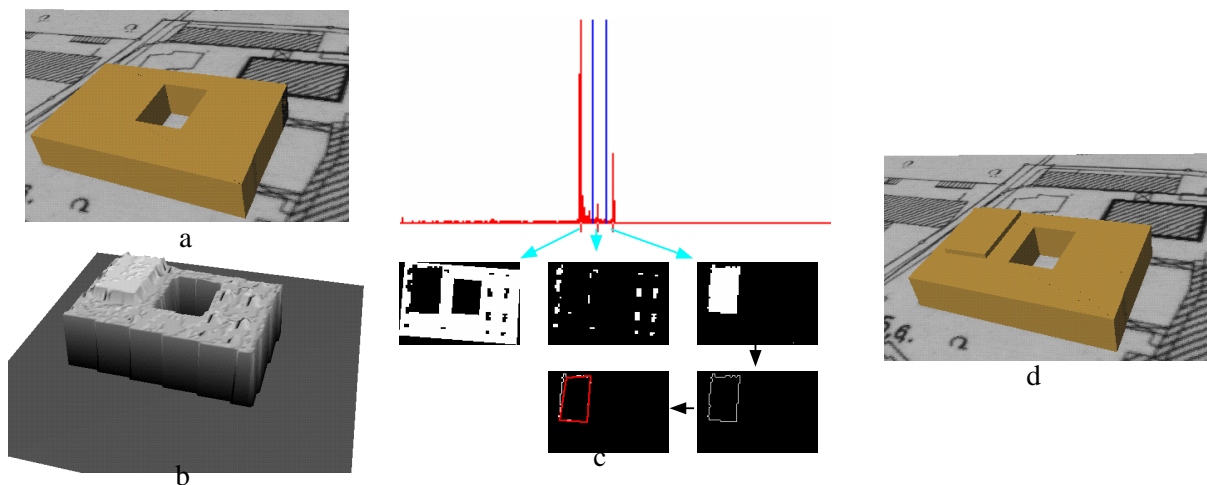


Abb. 7-2: Erweiterung der Gebäudebeschreibungen

Für manche Anwendungen werden detailliertere Beschreibungen der Gebäude benötigt als in Abb. 7-2a gezeigt. In Verbindung mit einer Histogrammanalyse (Abb. 7-2c) der maskierten Höhendaten (Abb. 7-2b) lassen sich weiter Gebäudedetails, die nicht in der Karte enthalten sind, extrahieren [115]. Abb. 7-2d zeigt ein Beispiel, bei dem aus den Höhendaten ein Gebäudeaufbau extrahiert wird und die Objektbeschreibung bereichert.

Literaturverzeichnis

- [1] Adrian G, Fiedler F (1991) Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. *Beitr. Phys. Atmosph.*, 64, 27-48
- [2] Achen M (1993) Untersuchungen über Nutzungsmöglichkeiten von Satellitenbilddaten für eine ökologisch orientierte Stadtplanung am Beispiel Heidelberg. Heidelberg: Selbstverlag des Geographischen Institutes der Universität Heidelberg
- [3] AdV (1989) ATKIS-Gesamtdokumentation. Bonn: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen
- [4] Ade F (1997) The role of artificial intelligence in the reconstruction of man-made objects from aerial images. In: Gruen A, Baltsavias EP, Henricsson O (eds) Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II). Basel: Birkhäuser,
- [5] Aho A, Ullman J (1972) *The Theory of Parsing, Translation and Compiling*. London: Prentice-Hall
- [6] Allder WR, Elassal AA (1983) USGS Circular 895-C: USGS digital cartographic data standards, Digital line graphs from 1:24000-scale maps. Supt. of docs. No.: I 19.4/2:895-C
- [7] Digital line graphs from 1:24000-scale maps. Data Users Guide 1, U.S. Dept. of the Interior, USGS, 1986.
- [8] Bähr HP, Quint F, Stilla U (1995) Modellbasierte Verfahren der Luftbildanalyse zur Kartenfortführung. *ZPF Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 63(6): 224-234
- [9] Bässmann H, Besslich P (1989) *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung* Berlin: Springer
- [10] Barr A, Feigenbaum EA (1982) *The handbook of artificial intelligence*. Vol. 2, Kaufmann: Los Altos, CA
- [11] Brachman RJ (1977) *What's in a Concept: Structural Foundations for Semantic Networks*. Cambridge, Mass: Bolt Beranek & Newman
- [12] Brockhaus (1991) *Brockhaus-Enzyklopädie*. 19. Auflage, Bd. 14 Mannheim: Brockhaus
- [13] Bronstein IN, Semendjajew KA (1987) *Taschenbuch der Mathematik*. Thun: Harri Deutsch
- [14] Bunke H (1985) *Modellgesteuerte Bildanalyse*. Stuttgart: Teubner

- [15] Cohen FS, Cooper DB (1987) Simple parallel hierarchical and relaxation algorithms for segmenting noncausal markovian random fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **9**: 195-219
- [16] Davis WA, Lee DL (1986) Fast search algorithms for associative memories. *IEEE Transactions on Computers*, C-35: 456-461
- [17] Dunham JG (1986) Optimum uniform piecewise linear approximation of planar curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8**: 67-75
- [18] Findler NV (1979) *Associative Networks*. New York: Academic Press
- [19] Förstner W (1992) Semantische Modellierung und Extraktion räumlicher Objekte aus Bildern und Karten – ein gemeinsames Forschungsvorhaben der deutschen Photogrammetrie und Kartographie (<http://www.ipb.uni-bonn.de/SM/schwer.ps>)
- [20] Frieß P (1996) Applications of the ALTM for 3D-data acquisition. Proceedings, OEEPE-Workshop 3D-City Models, Universität Bonn, Institut für Photogrammetrie
- [21] Fügler H, Lütjen K, Jurkiewicz K (1990) Kontextsensitive Bildanalyse in Luftbildern. In: Großkopf RE (ed) *Mustererkennung 1990*, 12. DAGM-Symposium. Berlin: Springer, 585-592
- [22] Fügler H, Jurkiewicz K, Lütjen K, Stilla U (1992) Ein wissensbasiertes System für die automatische Bildanalyse. In: Fritz LW, Lucas JR (eds) *International archives of photogrammetry and remote sensing, Int. soc. f. photogram. a rem. sen. (ISPRS), XVIIth Congress, Washington. Bethesda, MD: ASPRS, Vol XXIX, Commission III*, 167-172
- [23] Fügler H, Stein G, Stilla U (1994) Multi-populations evolution strategies for structural image analysis. *IEEE Conference on Evolutionary Computation (ICEC'94)*, Orlando, Vol I, 229-234
- [24] Ginsberg ML (1984) Non-monotonic reasoning using Dempster's Rule Proceedings of the AAAI-84, 126-129
- [25] Gülch E (1997) Application of semi-automatic building acquisition. In: Gruen A, Baltsavias EP, Henricsson O (eds), 129-138
- [26] Gruber M, Kofler M, Leberl F (1997) Managing large 3D urban database contents supporting phototexture and level of detail. In: Gruen A, Baltsavias EP, Henricsson O (eds), 377-386
- [27] Gruen A, Kuebler O, Agouris P (1995) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images*. Basel: Birkhäuser
- [28] Gruen A, Baltsavias EP, Henricsson O (1997) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II)*. Basel: Birkhäuser

- [29] Gruen A, Dan H (1997) TOBAGO - a topology builder for the automated generation of building models. In: Gruen A, Baltsavias EP, Henricsson O (eds), 149-160
- [30] Hake G (1982) Kartographie I. Berlin: de Gruyter.
- [31] Haala N, Hahn M (1995) Data fusion for the detection and reconstruction of buildings. In: Gruen A, Kuebler O, Agouris P (eds) Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images, 211-220. Basel: Birkhäuser.
- [32] Haralick RM, Shapiro LG (1985) Survey, image segmentation techniques. *Computer Vision Graphics Image Process.* **29**: 100-132
- [33] Harbeck R (1994) Das Geoinformationssystem ATKIS und seine Nutzung in Wirtschaft und Verwaltung. Bonn-Bad Godesberg: Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen
- [34] Hecker P (1996) Analysis of aerial images for ILS inspection. In: Jähne B et al (eds) Mustererkennung 1996. Berlin: Springer
- [35] Henricsson O (1996) Analysis of image structures using color attributes and similarity relations. Zürich: ETH, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Diss.
- [36] Herman M, Kanade T (1986) Incremental reconstruction of 3D scenes from multiple, complex images. *Artificial Intelligence*, **30**: 289-341
- [37] Huertas A (1983) Using shadows in the interpretation of aerial images. University of Southern California: Report USC-ISG 104
- [38] Huertas A, Nevatia R (1988) Detecting buildings in aerial images. *Computer Vision, Graphic and Image Processing*, **41**: 131-152
- [39] Huertas A, Bejanin M, Nevatia R (1995) Model Registration and Validation. In: Gruen A, Kuebler O, Agouris P (eds) Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images. Basel: Birkhäuser, 33-42
- [40] Datenquelle: IPG, Universität Karlsruhe
- [41] Irvin RB, McKeown DM (1989) Methods for exploiting the relationship between buildings and their shadows in aerial imagery *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **19**: 1564-1575
- [42] Ishizuka M, Fu KS, Yao JTP (1982) Inference Procedures under Uncertainty for the Problem Reducing Method. *Information Science* **28**: 179-206
- [43] Klausmann P, Fries S, Willersinn D, Stilla U, Thönnessen U (1998) Application-oriented assessment of CV algorithms. In: Jähne B (eds) Handbook of computer vision and applications. In press.
- [44] König A, Korn A, Quint F, Glesner M (1993) Two neural models for fast category learning - neural associative memories and the restricted coulomb energy model. In: Gielen S, Kappen B (eds) Proceedings of the international conference on artificial neural networks ICANN'93, Amsterdam: Springer, 784

- [45] Korn A (1988) Toward a symbolic representation of intensity changes in images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **10**: 610–625
- [46] Kürner T, Cichon DJ, Wiesbeck W (1993) Concepts and results for 3D digital terrain-based wave propagation models: An overview. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 11: 1002-1012
- [47] Kummert F (1992) Flexible Steuerung eines sprachverstehenden Systems mit homogener Wissensbasis. Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz. Sankt Augustin: Infix
- [48] Kummert F, Niemann H, Prectel R, Sagerer G (1993) Control and explanation in a signal understanding environment. *Signal Processing*, **3**: 111-145
- [49] Kruse R, Schwecke E, Heinsohn J (1991) Uncertainty and Vagueness in Knowledge Based Systems. Berlin: Springer
- [50] Ledermann W, Vajda S (1985) Combinatorics and geometry. Chichester: Wiley
- [51] Liedtke CE, Ender M (1989) Wissensbasierte Bildverarbeitung. Berlin: Springer
- [52] Lin C, Huertas A, Nevatia R (1994) Detection of buildings using perceptual grouping and shadows. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, Washington 62-69
- [53] Lin C, Huertas A, Nevatia R (1994) Detection of buildings from monocular images. In: Gruen A, Kuebler O, Agouris P (eds) Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images. Basel: Birkhäuser, 125-134
- [54] Lohr U, Eibert M (1995) The TopoSys laser scanner-system. In: Fritsch D, Hobbie D (eds) Photogrammetric Week '95. Heidelberg: Wichmann
- [55] Lütjen K (1986) Ein Blackboard-basiertes Produktionssystem für die automatische Bildauswertung. In: Hartmann G (ed) Mustererkennung 1986, 8. DAGM-Symposium. Berlin: Springer, 164-168
- [56] Lütjen K, Füger H, Greif HJ, Jurkiewicz K (1987) Auswahlverfahren für die wissensbasierte Bildauswertung mit dem blackboard-orientierten Produktionssystem BPI. In: Paulus E (ed) Mustererkennung 1987, 9. DAGM-Symposium. Berlin: Springer, 290-294
- [57] Mackaness WA, Weibel R, Buttenfield BP (1997) Report of the 1997 ICA Workshop on Map Generalization. Gävle, Sweden. <http://www.geo.unizh.ch/ICA/>
- [58] Matsuyama T, Hwang V (1990) SIGMA: A knowledge-based aerial image understanding system. New York: Plenum Press
- [59] Mayer H (1998) Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr.494, München.
- [60] McGlone JC, Shufelt JA (1994) Projective and object space geometry for monocular building extraction. *IEEE Comp. Soc. Conf. on CVPR*, 54-61

- [61] McKeown DM, Harvey WA, McDermott (1985) Rule-based interpretation of aerial imagery. , **7**: 570-585
- [62] McKeown DM (1987) The role of artificial intelligence in the integration of remotely sensed data with geographic information systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **25**: 330-348
- [63] McKeown DM, Denlinger JL (1988) Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. Proceedings: Computer Vision and Pattern Recognition, Ann Arbor, Michigan, 662-672
- [64] McKeown DM (1990) Toward automatic cartographic feature extraction. In: Pau LF (ed) Mapping and Spatial Modelling for Navigation. NATO ASI Series, F 65, 149-180 Berlin: Springer
- [65] McKeown DM et al. (1994) Research in automated analysis of remotely sensed imagery: 1993–1994 Proceedings of the 1994 ARPA Image Understanding Workshop, Monterey, CA
- [66] Michaelsen E, Stilla U (1998) Remarks on the notation of coordinate grammars. In: Amin A, Dori D, Pudil P, Freeman H (eds) Advances in Pattern Recognition, Joint IAPR Int. Workshops SSPR'98 and SPR'98. 421-428, Springer: Berlin
- [67] Michaelsen E, Wankmüller U, Stilla U (1998) Wissenserwerb für Produktionsnetze zur 3D-Erkennung von Fahrzeugen. In: Levi P (ed) Mustererkennung 1998. Berlin: Springer
- [68] Minsky M (1975) A framework for representing knowledge. In: Winston PH (ed) The Psychology of Computer Vision. 211-277, New York: Mac Graw Hill
- [69] Mohan R, Nevatia R (1989) Using perceptual organization to extract 3-D structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**: 1121-1139.
- [70] Nagao M, Matsuyama T (1980) A structural analysis of complex aerial Photographs. New York: Plenum
- [71] Nagel HH (1987) Principles of (Low-Level) Computer Vision. In: Haton JP (ed) Fundamentals in computer understanding: Speech and vision. Cambridge: Cambridge University Press, 113-139
- [72] Nicolin B, Gabler R (1987) A knowledge-based system for the analysis of aerial images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **25**: 317-329
- [73] Niemann H, Bunke H (1987) Künstliche Intelligenz in Bild- und Sprachanalyse. Stuttgart: Teubner
- [74] Niemann H (1990) Pattern analysis and understanding. Berlin: Springer
- [75] Niemann H, Sagerer G, Schröder S (1990) ERNEST: A semantic network system for pattern understanding. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12**: 883-905

- [76] Nilsson NJ (1980) Principles of artificial intelligence. Palo Alto: Tioga
- [77] Nevatia R, Babu KR (1980) Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, **13**: 257-269
- [78] Newell A (1962) Some problems of basic organization in problem-solving programs. In: Yovits MC, Jacobi GT, Goldstein GD (eds) Proceedings second conference on self-organizing systems, Spartan Books, 393-423
- [79] Nilsson NJ (1980) Principles of artificial intelligence. Palo Alto: Tioga Publ. Co.
- [80] Nii HP (1986) Blackboard systems. *AI Magazine*, 7: 38-53, 82-106
- [81] Pavlidis T (1982) Algorithms for graphics and image processing. Berlin: Springer
- [82] Post E (1943) Formal reductions of the general combinatorial problem. *American Journal of Mathematics*, **65**: 197-268
- [83] Pearl J (1984) Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving Reading, Mass.: Addison-Wesley
- [84] Pearl J (1986) Fusion, propagation and structuring in belief networks. *Artificial Intelligence*, **29**: 241-288
- [85] Popper KR (1993) Objektive Erkenntnis: Ein evolutionärer Entwurf. Hamburg: Hoffmann und Campe
- [86] Quam LH (1978) Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, Palo Alto, CA 51-55
- [87] Quillian MR (1968) Semantic memory. In: Minsky M (ed) Semantic information processing Cambridge, MA: MIT Press
- [88] Quint F (1994) Bildsegmentierung mit einem Bayesschen Ansatz. Technischer Bericht, Karlsruhe: Universität, IPF
- [89] Quint F (1997) Kartengestützte Interpretation monokularer Luftbilder. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Diss., Nr. 477. München: Bayerische Akademie der Wissenschaften.
- [90] Ramer U (1972) An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Computer Graphics and Image Processing*, **1**: 244-256
- [91] Rapp F (1995) Modell und Realität. *ZPF Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, **63**(6): 220-223
- [92] Reisig W (1991) Petri nets. New York: Springer
- [93] Rembold U (1987) Einführung in die Informatik. München: Hanser
- [94] Sagerer G (1990) Automatisches Verstehen gesprochener Sprache. Mannheim: BI Wissenschaftsverlag

- [95] Salomaa AK (1973) Formal languages. New York: Academic Press
- [96] Shafer G (1976) A mathematical theory of evidence. Princeton University Press
- [97] Shafer G, Pearl J (1990) Readings in uncertain reasoning. San Mateo, Ca.: Kaufmann
- [98] Shufelt J, McKeown DM (1993) Fusion of monocular cues to detect man-made structures in aerial imagery. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **57(3)**: 307-330
- [99] Sester M (1995) Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Diss., Nr. 441. München: Bayerische Akademie der Wissenschaften.
- [100] Sester M, Schneider W, Fritsch D (1996) Results of the test on image understanding of ISPRS working group III/3. ISPRS, XVIIIth Congress, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B3, 768-773
- [101] Sowa JF (1991) Principles of Semantic Networks – Explorations in the Representation of Knowledge. San Mateo, Ca.: Morgan Kaufmann
- [102] Staufenbiel W (1973) Zur Automatisierung der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Universität Hannover, Nr. 51
- [103] Sties M, Stilla U, Zheng Y (1992) Analyse von Luft- und Satellitenbildern zur automatischen Ermittlung der Bodenversiegelung städtischer Siedlungsbereiche. DFG-Zwischenbericht I. Ettlingen: FGAN-FIM / Karlsruhe: Universität, IPF
- [104] Stilla U, Jurkiewicz K (1991) Objektklassifikation mit einem blackboardorientierten Inferenzmechanismus. Ettlingen: FIM/FGAN, FIM-Bericht Nr. 230
- [105] Stilla U, Hajdu A (1994) Map-aided structural analysis of aerial images. In: Ebner H, Heipke C, Eder K (eds) Spatial information from digital photogrammetry and computer vision. ISPRS Commission III Symposium, Munich. Bellingham: SPIE, Vol. 30, Part 3/2, 769-775
- [106] Stilla U (1995) Map-aided structural analysis of aerial images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50(4): 3-10
- [107] Stilla U, Michaelsen E, Lütjen K (1995) Structural 3D-analysis of aerial images with a blackboard-based production system. In: Gruen A, Kuebler O, Agouris P (eds) Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images. Basel: Birkhäuser, 53-62
- [108] Stilla U, Quint F, Sties M (1995) Analyse von Luft- und Satellitenbildern zur automatischen Ermittlung der Bodenversiegelung städtischer Siedlungsbereiche. DFG-Zwischenbericht II. Ettlingen: FGAN-FIM / Karlsruhe: Universität, IPF

- [109] Stilla U, Jurkiewicz K (1996) Structural 3D-analysis of urban scenes from aerial images. ISPRS, XVIIIth Congress, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B3, 832-838
- [110] Stilla U, Michaelsen E, Lütjen K (1996) Automatic extraction of buildings from aerial images. In: Leberl F, Kalliany R, Gruber M (eds) Mapping buildings, roads and other man-made structures from images. Wien: Oldenburg, 229-244
- [111] Stilla U, Michaelsen E (1997) Semantic modelling of man-made objects by production nets. In: Gruen A, Baltsavias EP, Henricsson O (eds) Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II). Basel: Birkhäuser, 43-52
- [112] Stilla U, Geibel R, Jurkiewicz K (1997) Building reconstruction using different views and context knowledge. In: Baltsavias EP, et al. (eds) 3D Reconstruction and Modelling of Topographic Objects. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32, Part 3-4W2, 129-136
- [113] Stilla U (1997) Extraktion von Gebäuden aus Luftbildern mit Produktionsnetzen. In: List FK (ed) Photogrammetrie im Wandel: Lehre - Forschung - Anwendung. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung DGPF, Band 6, 347-355
- [114] Stilla U, Michaelsen E, Jurkiewicz K (1998) Structural analysis of right-angled building contours. In: Schenk T, Habib A (eds) Object recognition and scene classification from multi-spectral and multi-sensor pixels. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32, Part 3/1, 379-386
- [115] Stilla U, Geibel R, Repasi E (1998) Generation and update of 3D-city models from maps and elevation data. MVA'98 (In Vorbereitung).
- [116] Torkar D, Bric V (1996) On automatic restitution of buildings from aerial stereo images. In: Leberl F, Kalliany R, Gruber M (eds) Mapping buildings, roads and other man-made structures from images. Wien: Oldenburg, 245-257
- [117] Weidner U, Brunn A (1997) Extracting buildings from digital surface models. In: Baltsavias EP, et al. (eds) 3D Reconstruction and Modelling of Topographic Objects. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32, Part 3-4W2, 27-34
- [118] Willuhn W (1997) Integrating models for object recognition. Technical Report 175, CV-Group, Communication Technology Lab, ETH Zürich
- [119] Wiman H, Axelsson P (1996) Finding 3D-structures in multiple aerial images using lines and regions. ISPRS, XVIIIth Congress, International archives of photogrammetry and remote sensing, Vol. 31, Part B3, 953-959
- [120] Winston PH (1984) Artificial intelligence. Reading: Addison-Wesley

- [121] Woods W (1975) What's in a link: Foundations for semantic networks. In: Bobrow D, Collins A (eds) *Representation and Understanding*, 35-82, New York: Academic Press
- [122] Yen J (1989) GERTIS: a Dempster-Shafer Approach to Diagnosing Hierarchical Hypotheses. *Communications of the ACM*, **32**(5): 573-585
- [123] Yen J (1989) Implementing evidential reasoning in expert systems. In: Kanal LN, Levitt TS, Lemmer JF (eds) *Uncertainty in artificial intelligence 3. Machine Intelligence and Pattern Recognition*, 8, Amsterdam: North-Holland, 333-344