



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

Zwischenbericht II

U. Stilla ▽, F. Quint □, M. Sties □

DFG-Vorhaben : Ka 414/9 und Ba 686/7
Berichtszeitraum : 01.01.93 - 31.12.94

Februar 1995

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Verzeichnis der Abbildungen	iv
Verzeichnis der Tabellen	vii
Kurzfassung	viii
1. Einleitung [<i>U. Stilla, F. Quint</i>]	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Karte und Luftbild	4
1.3 Vorgehensweise zur kartengestützte Bildanalyse	8
2. Vorverarbeitung [<i>U. Stilla, F. Quint</i>]	9
2.1 Konturorientierte Vorverarbeitung [<i>U. Stilla</i>]	9
2.1.1 Kantendetektion	9
2.1.2 Konturapproximation	11
2.2 Flächensegmentierung [<i>F. Quint</i>]	16
2.2.1 Bekannte Verfahren	16
2.2.2 Modellannahmen	17
2.2.3 Wahrscheinlichkeiten und Dichtefunktionen	18
2.2.4 Berechnung des Homogenitätsmaßes	19
2.2.5 Bemerkungen	21
2.2.6 Beispiele für verschiedene Modelle der Lichtintensitäten	22
2.2.7 Ergebnisse	25
3. Analyse von Gebäuden und Straßen [<i>U. Stilla</i>]	31
3.1 Analysesystem	31
3.1.1 Produktionssysteme	31
3.1.2 Blackboard-Architektur	33
3.1.3 BPI-System	34
3.1.4 Bildanalyse und Suchproblem	39
3.2 Modellierung	48

3.2.1	Strukturanalyse mit 2D-Modellen	50
3.2.2	Strukturanalyse mit 3D-Modellen	53
3.2.3	Verifikation von Objekten	57
3.3	Verwendung von Kartenwissen	61
3.3.1	Aufbereitung des Kartenwissens	61
3.3.2	Kartenwissen zur Beeinflussung der Bearbeitungsreihenfolge	63
3.3.3	Kartenwissen zur Parametrisierung der Modelle	70
3.4	Ergebnisse	71
4.	Analyse von flächenhaft ausgedehnten Objekten [F. Quint]	74
4.1	Analysesystem	74
4.1.1	Semantische Netze	74
4.1.2	Das semantische Netzwerksystem ERNEST	76
4.2	Verwendung von Kartenwissen	82
4.2.1	Struktur des Analyseprozesses	82
4.2.2	Generatives Modell	83
4.2.3	Generische Modelle	84
4.2.4	Instantiierung und Szenenbeschreibung im Kartenbereich	85
4.2.5	Automatische Modellbildung und ausgeprägtes Modell im Bildbereich	85
4.2.6	Instantiierung und Szenenbeschreibung im Bildbereich	86
4.3	Modellierung	86
4.3.1	Deklaratives Wissen	87
4.3.2	Prozedurales Wissen	89
4.4	Ergebnisse	94
4.4.1	Kartenanalyse	94
4.4.2	Erstellung des ausgeprägten Modells im Bildbereich	99
5.	Zusammenfügung der Verifikationsergebnisse [U. Stilla, F. Quint]	105
5.1	Erweiterung des Datenaustauschformates	106
6.	Zuordnung der Bodenversiegelung [F. Quint]	108
7.	Zusammenfassung [U. Stilla, F. Quint]	109

A. Anhang	112
A.1 Auswahlverfahren für n Bewertungskomponenten	112
A.2 Modifikationen des Auswahlverfahrens	115
Literaturverzeichnis	117

Verzeichnis der Abbildungen

1-1	Ausschnitt aus Karte und Luftbild	5
1-2	Gegenüberstellung von Ausschnitten der Karte und des Luftbildes	6
1-3	Ausschnitt aus der digitalen Karte	7
1-4	Ablauf der kartengestützten Bildanalyse	8
2-1	Schematische Darstellung zur konturorientierten Vorverarbeitung	9
2-2	Mehrschwellenverfahren	10
2-3	Konturapproximation durch ein Polygon	12
2-4	Konturapproximation durch ein Polygon (nach Ramer)	15
2-5	Segmentierungsergebnisse des Testbildes	28
2-6	Grauwertprofile	29
2-7	Segmentierungsergebnisse des Luftbildes	29
3-1	Tabelle der Produktionen und Produktionsnetz	32
3-2	Blackboard-Architektur	33
3-3	Schematischer Aufbau des Assoziativspeichers	34
3-4	BPI-System: Datenfluß	36
3-5	Aufbau der Zielinstantz E7	38
3-6	Schema zur Generierung der Primitivobjekte ECKE	39
3-7	Graphische Darstellung der Liste von Primitivobjekten ECKE	40
3-8	Paarungen von Objekten ECKE mit schwachem Prädikat	42
3-9	Produktionsnetz zum Aufbau des Zielobjektes Rechteck	42
3-10	Beispiel zur Auswahl kompatibler Objekte ECKE	44
3-11	Paarungen von Objekten ECKE mit starkem Prädikat	45
3-12	Graphische Darstellung der Analyseergebnisse.	46
3-13	Zusammenstellung von Produktionsnetzen zum Aufbau des Zielobjektes Rechteck	47
3-14	Objektmodell "Streifen"	49
3-15	Objekt Strassennetz: Produktionstabelle und Produktionsnetz	50
3-16	Ausschnitt aus der Karte	51
3-17	Ableitungsgraph der Kreuzung	51
3-18	Schrittweiser Aufbau der Kreuzung mit Index 472 aus Teilobjekten	52

3-19 Aufnahme von Luftbildern	53
3-20 Produktionsnetz Quaderkante	54
3-21 3D - Rekonstruktion	55
3-22 3D-Analyse	56
3-23 Produktionsnetz zur Verifikation	58
3-24 Ableitungsgraph eines verifizierten Objektes	59
3-25 Graphische Darstellung der Objekte des Ableitungsgraphen	60
3-26 Bildbeschreibungsgraph einer Kreuzung	62
3-27 Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Bewertung eines neu generierten Objektes	64
3-28 Graphische Darstellung der Zusammenfassung zweier Bewertungskompo- nenten	65
3-29 Schematische Darstellung der Bildung von Objektmengen aufgrund der Bewertung	66
3-30 Verschiedene Vorgehensweisen bei dem Auswahlverfahren	68
3-31 Vorgehensweise D beim Auswahlverfahren	69
3-32 Bildbeschreibungsgraph und abgeleitete Erwartungsbereiche	71
3-33 Primitivobjekte	72
3-34 Ergebnis der Bildanalyse	73
4-1 Beispiel für ein semantisches Netz mit Generalisierungs- und Bestandteil- kanten	75
4-2 Beispiel für ein semantisches Netz	77
4-3 Struktur des Analyseprozesses	83
4-4 Bestandteilhierarchie des generischen Modells im Kartenbereich	87
4-5 Spezialisierungshierarchie des generischen Modells im Kartenbereich. . . .	88
4-6 Konzeptfluß für <i>KPolygon</i>	91
4-7 Bearbeitungsreihenfolge während der Instantiierung.	93
4-8 Bildbeschreibungsgraph und Kartenszene mit Instanzen	95
4-9 Analysezustände und Bildbeschreibungsgraphen	96
4-10 Instantiierung von optionalen Kanten für <i>KPolygon</i>	97
4-11 Vollständig instantiiertes Polygon	98
4-12 Vollständig instantiiertes <i>KKleingarten</i>	99
4-13 Beschreibungsgraph als Ergebnis der Kartenanalyse	100

4-14	Ausgeprägtes Modell	102
5-1	Zusammenfügung der Verifikationsergebnisse	105
5-2	Syntax eines Eintrages in der Austauschdatei	107
A-1	Auswahlverfahren C für n Bewertungskomponenten	112
A-2	Auswahlverfahren durch Mengenbildung	113
A-3	Graphische Darstellung der Objektauswahl in verschiedenen Modi	116

Verzeichnis der Tabellen

2-1	„Momentsummen“ bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit	20
-----	--	----

Kurzfassung

U. STILLA (FIM), F. QUINT (IPF)

Ziel dieses Projektes ist 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. Als Kontextinformationen werden kartographische Darstellungen des Bildgebietes verwendet. Die von den Projektpartnern FIM und IPF vorgeschlagene Vorgehensweise zur kartengestützten Bildanalyse ist zweistufig. In der ersten Stufe erfolgt eine Verifikation der aus der Karte bekannten Objekte im Luftbild. In der nachfolgenden Stufe ist eine Klassifikation der nicht bearbeiteten Objekten des Luftbildes vorgesehen. In dem vorliegenden Zwischenbericht wird beschrieben, wie durch die Bildanalyse Objekte verifiziert werden und dazu das Wissen aus einer zum Luftbild korrespondierenden Karte eingesetzt wird. Die zu analysierenden Objekte wurden zwischen FIM und IPF so aufgeteilt, daß vom FIM vorwiegend Straßen und Gebäude und vom IPF vorwiegend flächenhaft ausgedehnte Objekte analysiert werden.

Zur Analyse der **Straßen und Gebäude** wird beim FIM das blackboardbasiertes Produktionssystem BPI eingesetzt. Das Produktionssystem besteht aus einer globalen Datenbasis, einer Systemsteuerung und einer Menge von Produktionen. Die Produktionen geben an, wie eine gegebene Menge von Objekten in ein komplexeres Objekt überführt wird. Die globale Datenbasis ist als Assoziativspeicher realisiert; die Systemsteuerung erfolgt über eine prioritätsgeordnete Warteschlange. Jeder Produktion kann ein Verarbeitungsmodul zugeordnet werden, das spezielle Relationen von Objekten überprüft und bei Erfüllung eine objektspezifische Generierungsfunktion durchführt.

Ein Zielobjekt wird ausgehend von den Primitivobjekten schrittweise durch wiederholte Anwendung von Produktionen zusammengesetzt. Das prinzipielle Zusammenwirken der Produktionen und die stufenweise Überführung von Objekten in Objekte einer höheren Abstraktionsstufe wird anschaulich durch ein Produktionsnetz dargestellt. Die zum Aufbau der konkreten Objekte durchgeführten Zusammensetzungen werden durch Verzeigerungen festgehalten und durch Ableitungsgraphen dargestellt. Der Ableitungsgraph erfaßt alle generierten Zwischenergebnisse (Teilobjekte) und spiegelt den speziellen Ablauf des Analyse- bzw. Synthesevorgangs wider.

Zur Bereitstellung des Kontextwissens für die Luftbildanalyse wird zunächst die digitale Karte analysiert. Dazu werden ein Menge von Produktionen auf die Objekte der Karte angewendet. Das Ergebnis der Kartenanalyse ist ein Ableitungsgraph. Eine anschließende Analyse des Ableitungsgraphen liefert einen reduzierten Graphen zur Bildbeschreibung, den sogenannten Bildbeschreibungsgraphen, der den Karteninhalt durch attributierte Objekte und Relationen beschreibt. Mit dem Bildbeschreibungsgraphen wird die Kartenbeschreibung in verschiedenen Stufen (Bildbeschreibungsstufen) bereitgestellt.

Ausgehend von den im Bildbeschreibungsgraph bereitgestellten Informationen werden Erwartungen für im Luftbild zu generierende Objekte aufgestellt. Zur Aufstellung sol-

cher Erwartungen wird aus dem Bildbeschreibungsgraphen zunächst ein Bildbeschreibungstext generiert, der die erwarteten Objekte in den Bildbeschreibungsstufen mit den Attributwerten ausgewählter Attribute beschreibt. Da durch Störungen Abweichungen erwarteter Attributwerte auftreten können, wurden Toleranzklassen eingeführt und entsprechende Intervalle der Attributwerte (Erwartungsbereiche) definiert. Den Intervallen werden für die Zuweisung eines Wertes unterschiedlich hohe Erwartungen zugeordnet. Ein neu generiertes Objekt erhält durch Vergleich der Attributwerte mit den Modellvorstellungen eine Bewertung μ (Modelltreue). Aus den Abweichungen zu den aus der Karte erwarteten Attributwerten wird in ähnlicher Weise eine Bewertung ϵ (Erwartungsstreuung) bestimmt. Durch ein mengenorientiertes Auswahlverfahren wird aus den Bewertungen ϵ und μ die Priorität für die Bearbeitung abgeleitet. Die Bildanalyse kann für diese Verifikationsaufgabe abgebrochen werden, wenn die aus der Karte zu überprüfenden Objekte mit ausreichender Übereinstimmung im Luftbild gefunden werden.

Zur Analyse der **flächenhaft ausgedehnten Objekte** wird beim IPF ein System auf der Basis des semantischen Netzes ERNEST eingesetzt. ERNEST wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes entwickelt.

Ein semantisches Netz beinhaltet zwei Arten von Wissen: deklaratives Wissen und prozedurales Wissen. Das deklarative Wissen wird in Form von Knoten und Kanten repräsentiert. Knoten sind komplexe Datenstrukturen, bestehend aus einer Vielzahl von Substrukturen. Die wichtigsten Knotenarten sind Konzepte und Instanzen. Ein Konzept repräsentiert ganz allgemein Begriffe, Objekte, Ideen, während Instanzen konkrete Ausprägungen eines Konzeptes sind. Über die Kanten können Beziehungen zwischen den Knoten repräsentiert werden. Das prozedurale Wissen beinhaltet Funktionen zur Berechnung von Eigenschaften und zur Bewertung der Knoten und der Kanten, sowie Funktionen zur Steuerung der Analyse.

Die Nutzung des Wissens geschieht in einem semantischen Netz durch den Instantiierungsprozeß. Dabei werden aus den Konzepten unter Auswertung der Sensordaten Instanzen gebildet.

Zur Verifikation der flächenhaft ausgedehnten Objekte im Luftbild wird ein dreistufiges Konzept vorgestellt. Mit Hilfe eines generischen Modells zur Analyse der Karte wird eine Beschreibung der aktuellen Szene im Kartenbereich erstellt. Diese Szenenbeschreibung wird in den Bildbereich transformiert. Durch Kombination mit einem generischen Modell zur Bildanalyse wird automatisch ein für die Analyse der vorliegenden Szene spezialisiertes semantisches Netz erstellt. Mit Hilfe dieses, auf die Analyse der aktuellen Szene spezialisierten Modells wird nun die Bildanalyse durchgeführt. Die Verifikation wird damit nicht in Form eines Vergleichs der Ergebnisse von zwei parallel ablaufenden Analyseprozessen (Karten- und Bildanalyse) durchgeführt, sondern die Ergebnisse des weniger fehleranfälligen Analyseprozesses (Kartenanalyse) werden als Modell für die Durchführung der Bildanalyse verwendet.

Die Szenenbeschreibung im Bildbereich ist das Ergebnis der Analyse des Bildes mit dem zur Analyse der vorliegenden Szene spezialisierten Modell. Die Instanzen repräsentieren die zu verifizierenden Objekte der Szene. Sie werden durch ihre Koordinaten im Bildbereich, durch objektspezifische Merkmale, die aus den Bilddaten extrahiert werden

(z.B. Farbe der einzelnen Objektflächen) und durch einen Gütefaktor beschrieben. Der Gütefaktor gibt an, wie gut die aus dem Bild extrahierten Merkmale mit der Modellvorstellung (der Ausprägung der Objekte im Kartenbereich) übereinstimmen. Damit ist er auch ein Maß für die Verifikationsgüte.

Dadurch, daß die Verifikationsaufgabe mit Hilfe des automatisch aufgestellten semantischen Netzes als ein modellgesteuertes Verfahren konzipiert ist, werden nur für die im Modell (also in der Karte) enthaltenen Objekte Aussagen getroffen. Die Interpretation der in der Verifikationsphase nicht bearbeiteten Bildmerkmale wird in der nachfolgenden Klassifikationsphase vorgenommen.

Die Ergebnisse der von beiden Projektpartnern durchgeführten Verifikationsprozesse sind Graphen, die das analysierte Bild beschreiben. Um ein vollständiges Verifikationsergebnis zu erhalten, werden die von FIM und IPF generierten Beschreibungsgraphen zusammengeführt. Dafür wurde ein gemeinsames Datenformat entwickelt, das sich zur Übertragung von Beschreibungsgraphen eignet.

Den verifizierten und in der gemeinsamen Datenbasis enthaltenen Objekten werden Bodenversiegelungswerte zugewiesen. Dazu werden die in der ersten Phase des laufenden Vorhabens erstellten Tabellen verwendet, in denen eine Zuordnung zwischen Objektklasse und Versiegelungswert enthalten ist.

Zur Überprüfung der entwickelten Verfahren wurden Luftbildaufnahmen eines städtischen Gebietes (Stadt Karlsruhe) verwendet. Die Kontextinformationen wurden aus entsprechenden Ausschnitten einer digitalen Karte (DGK5), die nach Objektklassen getrennt in einem GIS vorliegt, gewonnen. Um die geometrische Information der Karte zu nutzen, erfolgte eine Registrierung zwischen digitaler Karte und Luftbild durch manuelle Bestimmung von Paßpunkten und einer Parameterschätzung zur ebenen Affintransformation. Zur Generierung von Primitivobjekten werden verschiedene Verfahren zur Kantenextraktion und Flächensegmentierung eingesetzt.

1. Einleitung

U. STILLA (FIM), F. QUINT (IPF)

1.1 Zielsetzung

Die Analyse von Luft- und Satellitenbildern zur Erkundung und Überwachung der Umwelt erschließt sich immer neue Anwendungsgebiete und gewinnt zunehmend an Bedeutung. In vielen Anwendungsfällen ist sie die einzige Möglichkeit zur Lösung der vorgegebenen Aufgaben. Mit steigender Zuverlässigkeit ihrer Aussagen und kostengünstigen Lösungen durch zunehmende Automatisierung werden in speziellen Anwendungen andere Techniken (meistens Landbegehung) verdrängt. In diesem Zusammenhang ist es naheliegend, daß in der internationalen Forschungsgemeinschaft Anstrengungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse unternommen werden und nach Wegen zur Automatisierung der Verfahren gesucht wird.

Einen Schub erhalten die Automatisierungsbestrebungen durch die Tatsache, daß in naher Zukunft eine Vielzahl geographischer Daten zur Verfügung stehen werden. Zur Zeit werden von den Landesvermessungsämtern topographische Karten in digitaler Form erstellt. Dies trifft nicht nur für die Bundesrepublik zu (siehe z.B. [21]) sondern auch für viele andere Staaten.

Das gemeinsame Forschungsprojekt von FIM und IPF hat sich zum Ziel gesetzt, spezielle Ansätze zur automatischen Auswertung von Luftbildern zu entwickeln. Durch Verwendung von in digitaler Form vorliegenden topographischen Daten bei der Bildanalyse soll die Zuverlässigkeit der Verfahren gesteigert werden. Durch die Automatisierung der Verfahren soll der Mensch bei seiner Arbeit unterstützt werden; an eine vollständige Ersetzung des Menschen ist derzeit nicht zu denken.

Als Anwendungsgebiet wurde die Bestimmung der Bodenversiegelung in städtischen Gebieten gewählt, das als Thema sowohl für Umweltforscher als auch für Städteplaner von großem Interesse ist. Bisherige Ansätze zur Bestimmung der Versiegelung aus Luftbildern versuchen anhand der sogenannten *Vegetationsindizes* Aussagen über die Bedeckung der Erdoberfläche mit Vegetation zu machen und daraus auf die Versiegelung zu schließen (siehe z.B. [1]). Der Vegetationsindex ist ein aus den Rückstreuungseigenschaften der Erdoberfläche in verschiedenen Frequenzbereichen abgeleitetes Maß für 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.

In dem gemeinsam von FIM und IPF verfolgten Ansatz wird zur Auswertung der Bilddaten nicht nur die aus den Bilddaten selbst extrahierte Information verwendet, sondern es wird Zusatzinformation vorwiegend aus digital vorliegenden topographischen Karten verwendet. In Abschnitt 1.2 wird auf das Verhältnis der in der Karte zu der im Bild enthaltenen Information näher eingegangen.

Die Auswertung der Bilder erfolgt 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. In dem ersten Zwischenbericht ([73]) zum laufenden Vorhaben wird in Kapitel 2 die Versiegelung unter mehreren Aspekten untersucht. Es wird gezeigt, daß die Bestimmung der Versiegelung über die Zuordnung von festgelegten Versiegelungsgraden zu einzelnen Objekten zweckmäßig ist. Damit kann, bei Kenntnis der in der Szene enthaltenen Objekten 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. Hierfür werden von den Projektpartnern zwei Systeme verwendet: ein blackboardbasiertes Produktionssystem [33] und ein semantisches Netz [50].

Für die kartengestützte Auswertung der Luftbilder wird von den Projektpartnern ein zweistufiger Ansatz vorgeschlagen: in der ersten Phase erfolgt die Verifikation der in der Karte vermerkten Objekten in den Bilddaten, während die Auflösung von Widersprüchen zwischen Bild und Karte in der zweiten Phase unter Nutzung des in der ersten Phase gewonnenen Wissens vorgenommen wird. Gemäß Projektantrag ist für den aktuellen Berichtszeitraum die Verifikation der Kartenobjekte im Bild vorgesehen.

Zwischen FIM und IPF wurde eine Arbeitsteilung derart vorgenommen, daß vom Projektpartner FIM Häuser und Straßen bearbeitet werden, während der Projektpartner IPF flächenhafte Objekte bearbeitet. Dabei wurde den bisherigen Erfahrungen der Projektpartner in der Bearbeitung von Objektklassen Rechnung getragen. Die von den Projektpartnern verifizierten Objekte werden ausgetauscht und in die Datenbank des jeweils anderen Projektpartners eingebaut.

Ziel der Verifikation ist es, die in der topographischen Karte vermerkten Objekte im Bild zu finden und die Güte der Korrespondenz zu bewerten. Zur Bildanalyse wird das abgetastete Luftbild und die digitale topographische Karte verwendet. Zusätzlich fließt allgemeines Wissen über die Umwelt in die Modellbildung ein.

Aus den Bilddaten werden strukturelle Merkmale berechnet in Form von Geraden- und Flächenstücken. Die Motivation hierfür ist, daß das Kartenwissen in seiner Natur vorwiegend geometrisch ist und somit eine Zuordnung der Bild- und Kartenmerkmale vereinfacht wird. Die vom FIM und IPF verwendeten Verfahren zur Merkmalbildung werden in Kapitel 2 vorgestellt.

Für die Repräsentation und Nutzung des Kartenwissens wird ein blackboardbasiertes Produktionssystem (Projektpartner FIM) und ein semantisches Netz (Projektpartner IPF) verwendet. Es wird gezeigt, wie in zwei unterschiedlichen Wissensrepräsentationsformalismen a-priori Wissen zur Modellerstellung und zur Steuerung des Verifikati-

onsprozesses genutzt werden kann.

Mit dem verwendeten **Produktionssystem** erfolgt eine schrittweise Analyse von Strukturen, wobei Ergebnisse von zunehmendem Abstraktionsgrad entstehen. Die Strukturen eines Bildes oder einer Karte werden analysiert, indem komplexe Strukturen aus weniger komplexen Strukturen zusammengesetzt werden. Zunächst wird die Karte analysiert, um den Karteninhalt für eine Bildanalyse entsprechend aufzubereiten. Das Ergebnis dieser Kartenanalyse ist ein spezieller Graph, der das Kartenwissen in verschiedenen Bildbeschreibungsstufen bereitstellt. Mit dem Kartenwissen wird der Ablauf der nachfolgenden Bildanalyse gesteuert. Für die Verifikationsaufgabe kann der Suchraum eingeschränkt und damit die Bearbeitungszeit erheblich reduziert werden. In Kapitel 3 wird die Vorgehensweise zur Strukturanalyse beschrieben und dargestellt, wie das Wissen aus der zum Luftbild korrespondierenden Karte bei der Verifikation genutzt wird.

In dem verwendeten **semantischen Netz** erfolgt die Instanziierung in einem gemischten modell- und datengesteuerten Verfahren (Kombination einer top-down mit einer bottom-up Strategie). Durch die Einbringung des Kartenwissens in das semantische Netz kann bei der Bildanalyse der Suchraum sehr stark eingeschränkt werden und damit der Aufwand beträchtlich reduziert werden. In Kapitel 4 wird gezeigt, wie aus einem semantischen Netz, das allgemeines Wissen über die Objekte einer Szene enthält, durch Analyse der Karte automatisch ein neues semantisches Netz zur Bildanalyse der aktuellen Szene gewonnen wird.

Als Ergebnis der Verifikationsphase werden Listen von Objekten geliefert. Diese Objekte werden durch ihre geometrischen Eigenschaften sowie durch ein Maß, das die Übereinstimmung des im Bild gefundenen Objektes mit dem Kartenobjekt angibt, charakterisiert. Über die gemeinsame Schnittstelle werden die von den Projektpartnern verifizierten Objekte ausgetauscht. Nach Einbau in die eigene Datenbasis dienen sie im nächsten Projektabschnitt zur Erweiterung des semantischen Wissens, das in der Klassifikationsphase genutzt wird.

1.2 Karte und Luftbild

Karte und Luftbild geben als Abbildungen der Erdoberfläche von den erfaßten Bereichen bestimmte Eigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder (siehe Abb. 1-1). Durch Analyse der Abbildungen wird versucht auf die realen Objekte bzw. Bereiche der Erdoberfläche zu schließen, die hinsichtlich eines bestimmten Aspektes der Bodenversiegelung mit ihren Eigenschaften zur Versiegelung beitragen. Die in Karte und Luftbild von einem Objekt dargestellten Eigenschaften können sehr unterschiedlich sein. Eine Gegenüberstellung von Ausschnitten aus Karte und Luftbild zeigt Abb. 1-2.

Während Gebäude in der Karte durch ihren Grundriß (Abb. 1-2Aa) vermerkt sind, werden sie im Luftbild vornehmlich durch die Dächer wahrgenommen (Abb. 1-2Ab). Die Erkennung eines Gebäudes im Luftbild wird somit durch die Erkennung des Daches durchgeführt. Über die spezielle Form und die Helligkeit bzw. Farbe des Daches liegen in der Karte keine Informationen vor. So ist aus Abb. 1-2Aa nicht zu entnehmen, daß das linke Gebäude ein Runddach und das rechte Gebäude ein Giebeldach besitzt, wobei ein Teil des Daches rot erscheint (Abb. 1-2Ab).

In Abb. 1-2Ba ist der Eingang einer Tiefgarage gekennzeichnet, der in Abb. 1-2Bb nicht erkennbar ist. Die im Luftbild Abb. 1-2Bb sichtbaren Wege zwischen den Gebäuden sind in der Karte Abb. 1-2Ba nicht vermerkt.

Die in der Karte Abb. 1-2Ca dargestellten Straßen (z.B. Lehmannstraße) sind teilweise aufgrund der Verdeckung im Luftbild Abb. 1-2Cb nicht sichtbar. Als Parkplätze genutzte Flächen (Abb. 1-2Cb) sind in der Karte nicht eingezeichnet.

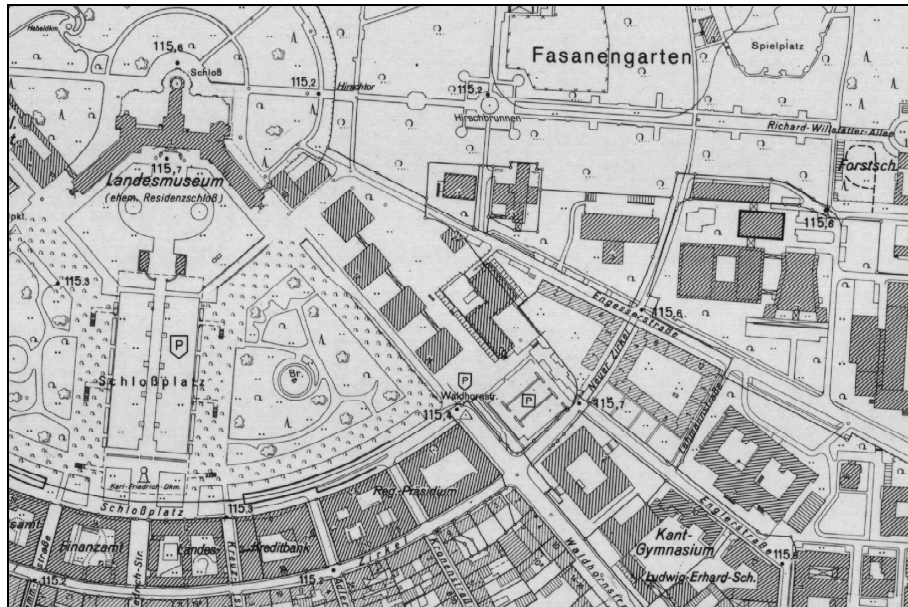
Zur Nutzung und Versiegelung der Innenhöfe kann aufgrund der Karte (z.B. Abb. 1-2Ca) kaum eine Aussage gemacht werden. Das Luftbild (Abb. 1-2Cb) zeigt im Innenhof des rechten Gebäudes eine teilweise Begrünung, im Innenhof des linken Gebäudes keine Begrünung.

Die in der Karte dargestellten Objektbegrenzungen sind mit den im Bild sichtbaren Konturen nicht überall genau deckungsgleich. Dies kann verschiedene Ursachen haben:

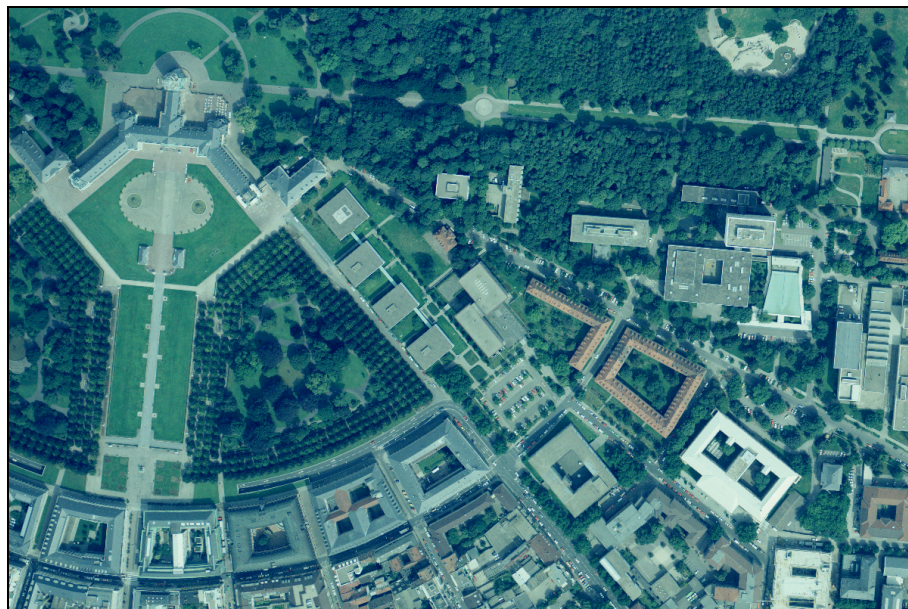
- Beispielsweise stehen Dachkanten oftmals über den Grundriß hinaus.
- Bei hohen Gebäuden liegen die Dächer aufgrund der Projektion nicht über dem Grundriß. Dies macht sich besonders an Bildrändern bemerkbar.
- Durch Bäume treten Verdeckungen auf.

In manchen Bildbereichen kann ein Rückschluß von Karte und Bild auf die Realität nur sehr vage vorgenommen werden. So kann aufgrund von Abb. 1-2Da und Abb. 1-2Db nur vage die Existenz der in der Karte eingezeichneten Wege bestätigt werden.

Durch das unterschiedliche Aufnahmedatum von Karte und Luftbild ergeben sich mit der veränderten Realität weitere Unterschiede in ihrem Inhalt. Diese Unterschiede sind häufig in besiedelten Gebieten aufgrund von reger Bautätigkeit zu finden.



a



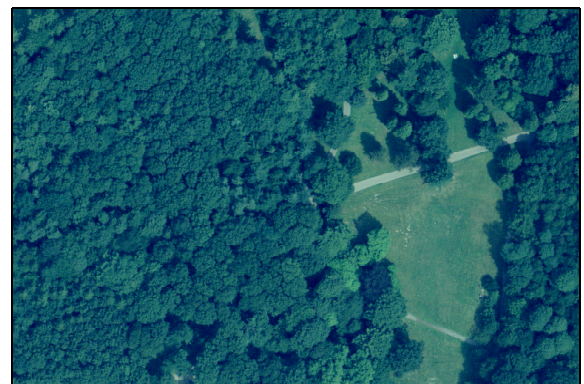
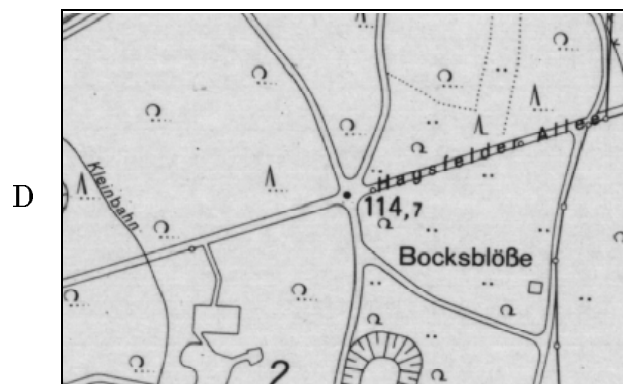
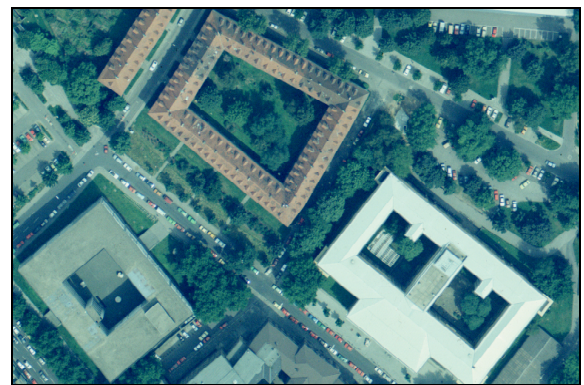
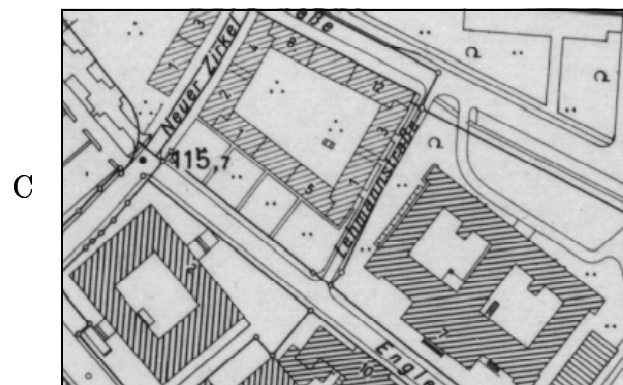
b

Abb. 1-1: Ausschnitt aus Karte und Luftbild.

a) Deutsche Grundkarte 1 : 5000 (DGK5), Ausschnitt aus Blatt Nr. 6916.27 (Karlsruhe)

(Mit Erlaubnis des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg,
Außenstelle Karlsruhe, vom 26.03.1992. AZ.: 5.11-KA/90)

b) Ausschnitt aus einem Farbluftbild vom Maßstab 1 : 6300



a

b

Abb. 1-2: Gegenüberstellung von Ausschnitten der Karte und des Luftbildes

Für ein Testgebiet wurde von den Kartenblättern der DGK5 (Abb. 1-1) manuell eine digitale Karte aufgenommen [73]. Die Konturen von Objekten der Karte wurden getrennt nach Objektklassen (Kartenblattebenen) aufgenommen. Es wurden folgende Objektklassen unterschieden:

Nr.	Objektklasse	Nr.	Objektklasse
1	Einzelhäuser	4	Hofflächen
2	Große Gebäude	8	Parkplätze
3	Hochhäuser	9	Spielplätze
5	Hauptstraßen	10	Kleingärten
6	Straßen	11	Wald
7	Wege		

Die Konturen jeder Klasse liegen in Form von Polygonen vor. Abb. 1-3 zeigt einen Ausschnitt der digitalen Karten mit den Objektklassen *Grosse Gebäude* und *Straßen*

Um die geometrischen Informationen der Karte für die Luftbildanalyse zu nutzen, erfolgt eine Registrierung zwischen digitaler Karte und Luftbild durch manuelle Bestimmung von Paßpunkten und eine anschließende Parameterschätzung zur ebenen Affintransformation (siehe [73]).

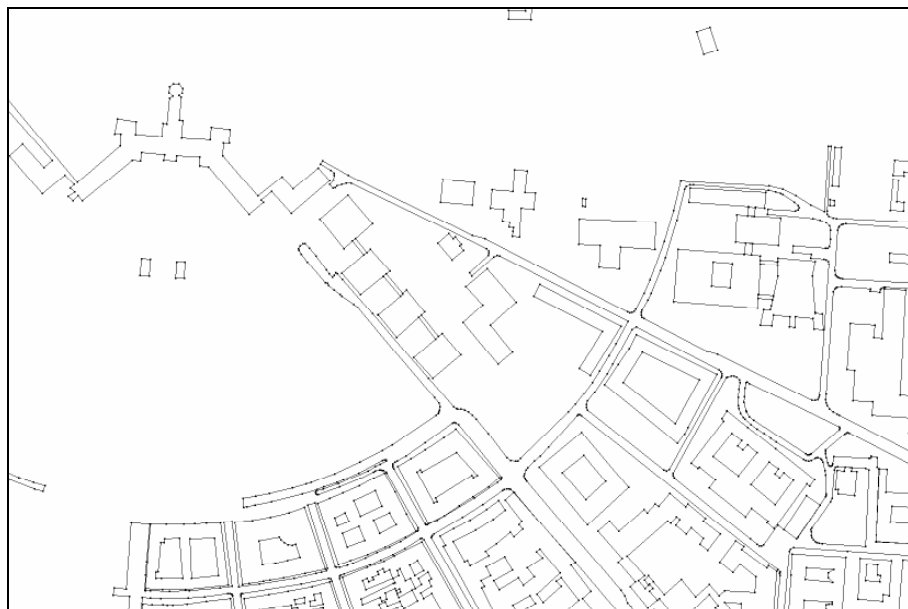


Abb. 1-3: Ausschnitt aus der digitalen Karte

1.3 Vorgehensweise zur kartengestützte Bildanalyse

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der kartengestützten Bildanalyse ist schematisch in Abb. 1-4 dargestellt. Eine Szene der Realität wurde durch Aufnahme einer Karte und

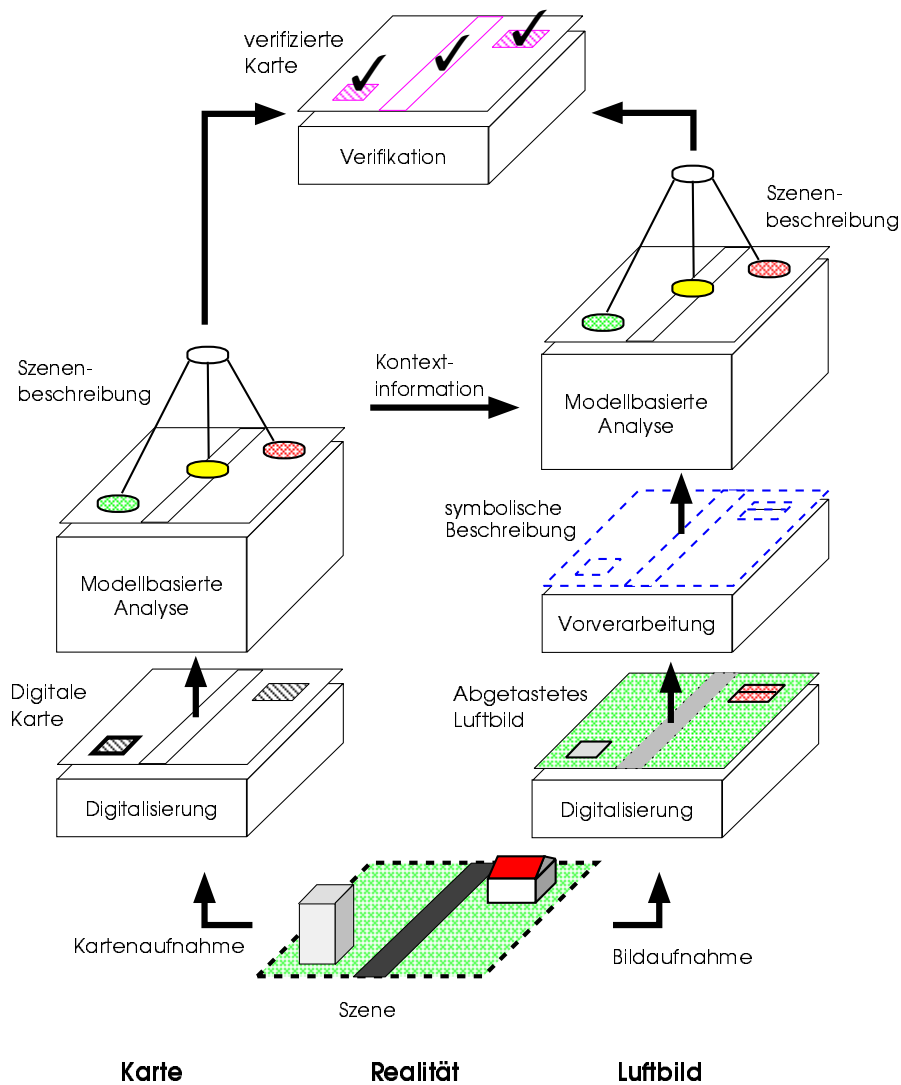


Abb. 1-4: Ablauf der kartengestützten Bildanalyse

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 symbolische Beschreibung wird in einer modellbasierten Analyse (Bildanalyse) eine Szenenbeschreibung erstellt. Für diese Analyse wird die Szenenbeschreibung der Karte genutzt. In einer anschließenden Verifikation werden Objekte der Szenenbeschreibungen von Karte und Luftbild verglichen und eine neue Karte erstellt.

2. Vorverarbeitung

U. STILLA (FIM), F. QUINT (IPF)

In der Vorverarbeitung wird das abgetastete Luftbild, das in ikonischer Form vorliegt, in eine symbolische Form überführt. Dazu werden konturorientierte und flächenorientierte Verfahren der Segmentation eingesetzt. Die symbolische Repräsentation des Bildes ist die Basis der nachfolgenden Analyse.

2.1 Konturorientierte Vorverarbeitung

U. STILLA (FIM)

Die konturorientierte Vorverarbeitung wird zweistufig durchgeführt (Abb. 2-1). In der ersten Stufe, der *Kantendetektion*, werden Konturpunkte bestimmt und zu Konturlinien verkettet. In der zweiten Stufe, der *Konturapproximation*, werden die Konturlinien durch Primitivobjekte angenähert.

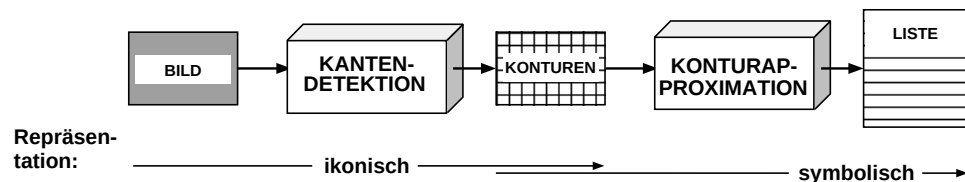


Abb. 2-1: Schematische Darstellung zur konturorientierten Vorverarbeitung

2.1.1 Kantendetektion

Zur Kantendetektion wird ein Mehrschwellenverfahren und ein Verfahren auf der Basis des Gradienten verwendet.

Mehrschwellenverfahren

Beim Mehrschwellenverfahren wird das Grauwertbild mit unterschiedlichen Schwellwerten $g_{min} < g_{ti} < g_{max}$ zunächst in eine Sequenz von Binärbildern überführt. In jedem der Binärbilder werden die Konturlinien der so entstandenen Segmente bestimmt. Stellt man sich die Grauwerte des Bildes als Höhen eines Gebirges vor, so erhält man durch Segmentierung und Konturlinienverfolgung die Höhenlinien des Gebirges. In Bereichen mit hoher Steigung entstehen viele Konturlinien; in Bereichen mit geringer Steigung wenige Konturlinien.

Die Zahl der Schwellwerte n_{th} wird in Abhängigkeit vom verwendeten Bildmaterial eingestellt. Heben sich zu untersuchende Objekte nur durch geringen Kontrast vom Hintergrund ab, so ist die Zahl der Schwellen n_{th} groß zu wählen. Besitzt man Vorkenntnisse über Intensitäten von Objekten im Grauwertbild, wie dies z.B. bei Verwendung

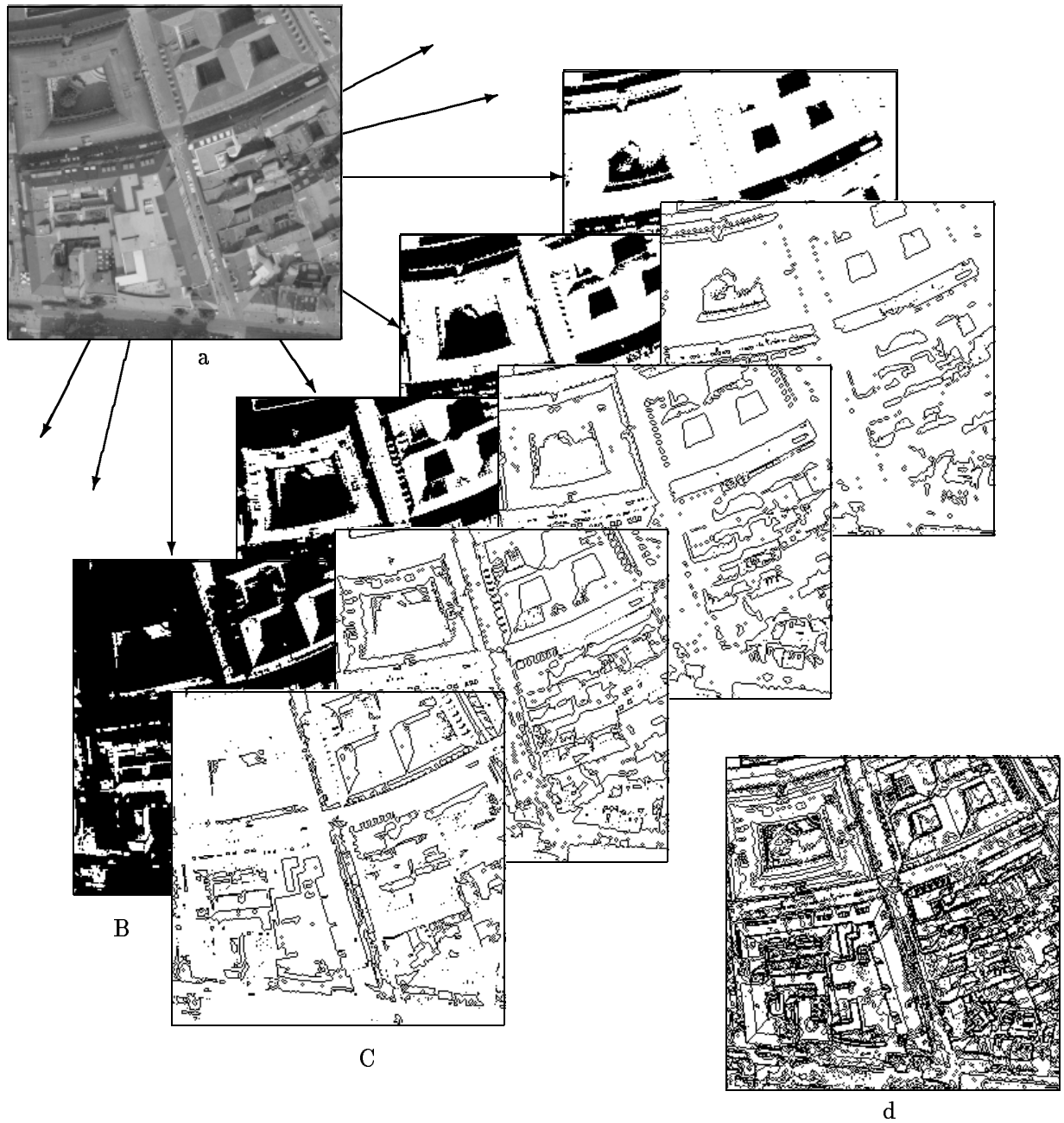


Abb. 2-2: Mehrschwellenverfahren ($n_{th} = 8$). a) Bildausschnitt, B) Binärbildsequenz
C) Konturbildsequenz, d) Überlagerte Konturen

von IR-Sensoren der Fall sein kann, so kann auch eine bestimmte Verteilung ϕ_{th} der Schwellwerte vorgegeben werden. Für das in dieser Arbeit untersuchte Bildmaterial wurden die Schwellwerte äquidistant verteilt.

Das Mehrschwellenverfahren wird somit durch die Parameter $\boxed{n_{th}}$ und $\boxed{\phi_{th}}$ bestimmt.

In Abb. 2-2 ist ein Beispiel zum Mehrschwellenverfahren dargestellt. Der in Abb. 2-2a dargestellte Ausschnitt aus dem Luftbild wurde mit $n_{th} = 8$ Schwellwerten und äquidistanter Verteilung in eine Binärbildsequenz überführt. Abb. 2-2B zeigt vier Bilder dieser Binärbildsequenz und Abb. 2-2C die zugehörigen Konturbilder. Eine Überlagerung der acht Konturbilder ist in Abb. 2-2d zu sehen.

Kantendetektion durch Gradientenbildung

Alternativ zum Mehrschwellenverfahren steht eine Kantendetektion durch Gradientenbildung zur Verfügung. Zur Bestimmung des Gradienten werden NAG-Operatoren nach Korn ([27]) verwendet. Die Faltungsmaske des NAG-Operators ergibt sich aus der normierten Ableitung einer zweidimensionalen Gaußfunktion. Konturpunkte, für die der Gradientenbetrag entlang der Gradientenrichtung ein lokales Maximum aufweist, werden markiert. Während des Aufsammelns werden die Konturpunktketten auf eine Breite von einem Bildpunkt verdünnt und Lücken senkrecht zur Gradientenrichtung geschlossen.

2.1.2 Konturapproximation

In der zweiten Stufe der Vorverarbeitung werden durch die Konturapproximation geordnete Mengen von Konturpunkten (Konturpunktketten) in Primitivobjekte überführt.

Zur Beschreibung einer Konturpunktkette durch ebene Kurven stehen eine Reihe von interpolierenden und approximierenden Verfahren (siehe [58,5]) zur Verfügung. Während man in der Computergraphik Konturen bzw. Oberflächen häufig durch kubische Polynome (B-Splines oder Bezier-Kurven) beschreibt, verwendet man zur Formanalyse überwiegend Geradenstücke, Ecken oder Kreisbögen. Bei einer Approximation durch Geradenstücke kann eine Konturline in einfacher Form durch ein Polygon dargestellt werden. Verschiedene Verfahren, die eine stückweise lineare Approximation von ebenen Kurven durchführen, sind in [15] vergleichend gegenübergestellt.

Konturapproximation durch ein Split-Verfahren

Im folgenden wird ein Split-Verfahren an einem Beispiel beschrieben. Gegeben sei eine Konturpunktkette P mit $n \geq n_{pmin}$ Punkten $\{p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$. Die Konturpunktkette wird in aneinanderhängende Segmente der Länge n_{step} aufgeteilt und segmentweise untersucht. Für jedes Segment wird iterativ ein Polygon bestimmt.

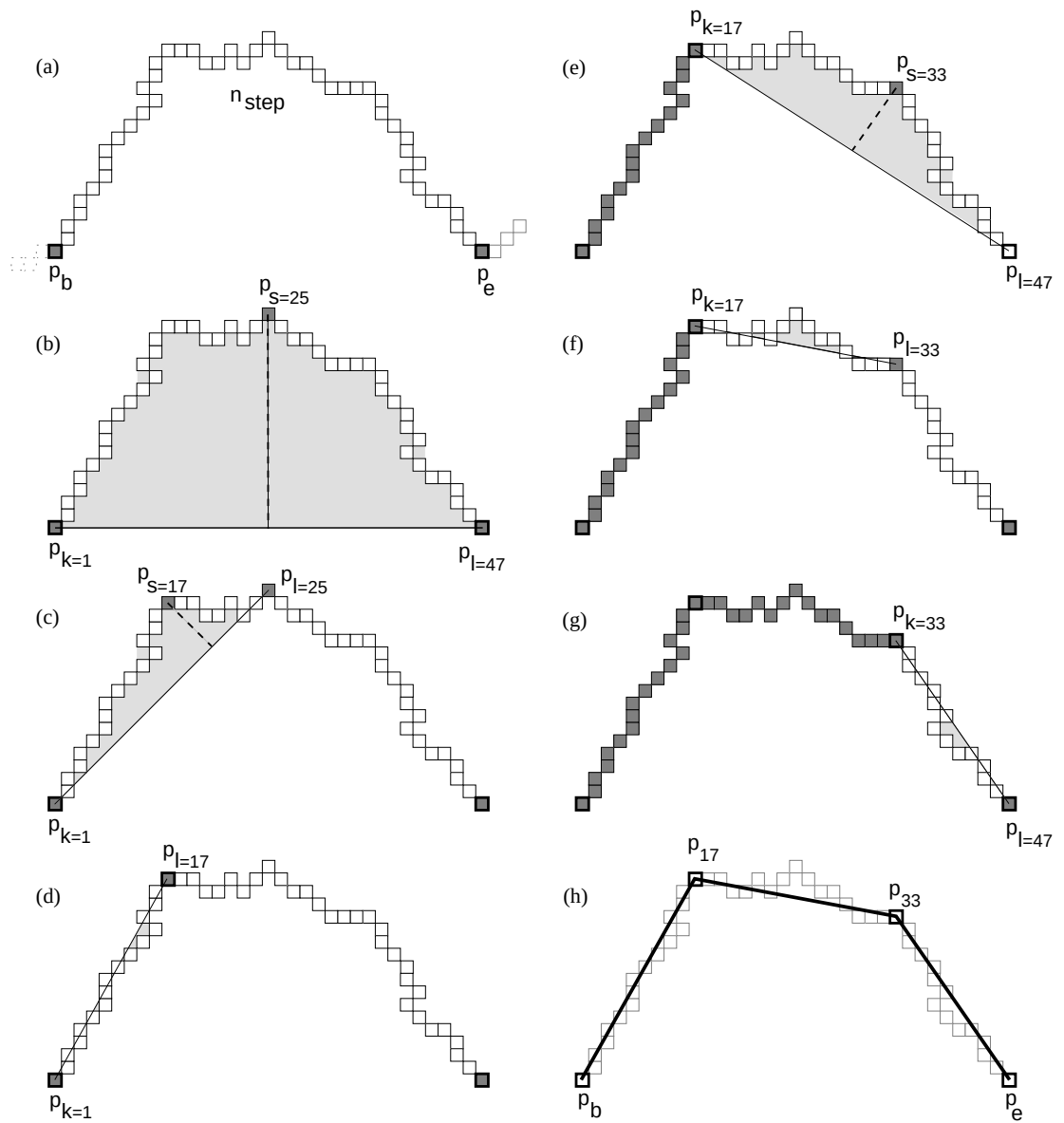


Abb. 2-3: Beispiel zur Approximation eines Kontursegmentes durch ein Polygon.
a)-h) siehe Text

Ein Segment der Länge n_{step} besitze den Startpunkt p_b und den Endpunkt p_e . Zur Bestimmung des Polygons werden schrittweise Segmentstücke $P_{kl} \subseteq P_{be}$ mit den Punkten $\{p_k, \dots, p_i, \dots, p_l\}$ und der Länge n_{kl} durch jeweils ein Geradenstück $\overline{p_k p_l}$ approximiert und die Approximationsgüte geprüft. Zur Bestimmung der Güte wird ein Fehlermaß d_{appr} definiert:

$$d_{appr} = \sqrt{\frac{1}{n_{kl}} \sum_{p_i \in P_{kl}} d(p_i)^2} \quad (2-1)$$

Dabei bezeichnet $d(p_i)$ den Abstand zwischen p_i und der Geraden, die zu $\overline{p_k p_l}$ gehört. Es wird geprüft, ob d_{appr} unterhalb einer akzeptierten Fehlerschranke d_{max} liegt. Liegt d_{appr} unterhalb dieser Schranke, wird das Geradenstück $\overline{p_k p_l}$ als Approximation für das Segmentstück P_{kl} akzeptiert. Erfüllt das Geradenstück die Approximationsgüte nicht, so wird ein kürzeres Segmentstück mit ausreichender Approximationsgüte gesucht.

Diese Vorgehensweise führt bei kleiner Fehlerschranke möglicherweise zu sehr kurzen Segmentstücken. Da dies oftmals unerwünscht ist, wird weiterhin eine Schranke n_{min} für die minimale Länge eines Segmentstückes eingeführt.

Eine Approximation durch $\overline{p_k p_l}$ wird dann akzeptiert, wenn

$$d \leq d_{max} \quad (2-2)$$

oder

$$n_{kl} < n_{min} \quad (2-3)$$

erfüllt ist. Ist keine der Bedingungen erfüllt, so wird ein kürzeres Segmentstück $P_{ks} \subset P_{kl}$ bestimmt. Dazu wird der Scheitelpunkt p_s ermittelt, der sich aus

$$p_s \in P_{kl} \quad \text{mit} \quad d(p_s) = \max_{k < i < l} |d(p_i)| \quad (2-4)$$

ergibt, also den größten Abstand zur Geraden durch $\overline{p_k p_l}$ besitzt. Gibt es mehrere Punkte p_i , die die Bedingung nach Gl. 2-4 erfüllen, so wird der Punkt mit kleinstem Index i gewählt. Das Segmentstück P_{ks} wird durch ein Geradenstück approximiert und die Untersuchung wie für P_{kl} wiederholt. Das Aufteilen (Splitting) wird solange fortgeführt, bis eine Approximation durch $\overline{p_k p_j}$ akzeptiert wird. Das entsprechende Segmentstück P_{kj} gilt dann als bearbeitet. Mit dem unbearbeiteten Segmentstück P_{je} wird in gleicher Weise fortgefahren ($P_{kl} := P_{je}$), bis das Segment P_{be} vollständig bearbeitet ist.

Abb. 2-3 verdeutlicht den Algorithmus an einem Beispiel. Gegeben ist in diesem Beispiel ein Segment P_{be} von der Länge $n_{step} = 47$ mit Startpunkt p_b und Endpunkt p_e (Abb. 2-3a), wobei für den Index $b=1$ und den Index $e=47$ angenommen wird. Das Segmentstück P_{kl} , das durch ein Geradenstück $\overline{p_k p_l}$ approximiert wird, entspricht zunächst mit $p_k := p_b$ und $p_l := p_e$ dem Segment P_{be} .

Dem Segment wird das Geradenstück $\overline{p_1 p_{47}}$ zugeordnet (Abb. 2-3b) und zur Beurteilung der Güte der Fehler d_{appr} berechnet. Für das in Abb. 2-3b dargestellte Beispiel nehmen wir an, daß die erforderliche Güte (Gl. 2-2) und die minimale Länge des Segmentstückes (Gl. 2-3) nicht erreicht sind. Daher wird der Punkt mit dem größten Abstand bestimmt (p_{25}), der den Scheitelpunkt p_s darstellt, und $p_l := p_s$ gesetzt. Für das

nun kürzere Segment P_{kl} mit $k=1$ und $l=25$ (Abb. 2-3c) wird eine Approximation mit dem Geradenstück $\overline{p_1 p_{25}}$ durchgeführt und die Güte berechnet. Auch für diese Approximation sei keine der Bedingungen nach Gl. 2-2 und Gl. 2-3 erfüllt, so das wiederum der Scheitelpunkt p_s bestimmt und das sich daraus ergebende Segmentstück durch $\overline{p_1 p_{17}}$ approximiert wird (Abb. 2-3d). Der für die Approximation berechnete Fehler d_{appr} liege unter der vorgegeben Fehlerschranke d_{max} . Das Geradenstück wird akzeptiert und das Segmentstück $P_{1,17}$ als bearbeitet markiert (Abb. 2-3e).

Das verbleibende Segmentstück $P_{kl}:=P_{je}$ wird durch $\overline{p_{17} p_{47}}$ approximiert (Abb. 2-3e). Da auch hier der Fehler $d_{appr} > d_{max}$ sei, wird der Scheitelpunkt bestimmt (p_{33}) und das linke Segmentstück P_{kl} durch $\overline{p_{17} p_{33}}$ approximiert (Abb. 2-3f). Das Geradenstück wird akzeptiert, das entstprechende Segmentstück markiert und das verbleibende Segmentstück durch $\overline{p_{33} p_{47}}$ approximiert (Abb. 2-3g). Nimmt man an, daß auch dieses Geradenstück $\overline{p_k p_e}$ akzeptiert wird, so ist die Approximation für das Segment P_{be} beendet. Das Segment wird nun durch das Polygon der akzeptierten Geradenstücke ($\overline{p_b p_{17}}$, $\overline{p_{17} p_{33}}$, $\overline{p_{33} p_e}$) dargestellt (Abb. 2-3h).

Um Störungen zu eliminieren, werden sehr kurze Konturpunktketten nicht approximiert und bleiben unberücksichtigt. Die minimale akzeptierte Länge n_{pmin} einer Konturpunkt-kette wird festgelegt mit

$$n_{pmin} = n_{step} \cdot m_{min} \quad \text{mit} \quad m_{min} \geq 1, \quad (2-5)$$

wobei der Parameter m_{min} in Abhängigkeit vom Datenmaterial eingestellt wird.

Durch die beschriebene Vorgehensweise bilden die Endpunkte (p_b , p_e) der Segmente automatisch auch Punkte des Polygons, das die Konturpunkt-kette repräsentiert. Da die Zuordnung dieser Polygonpunkte unabhängig vom Konturverlauf erfolgt und Geradenstücke an diesen Stellen möglicherweise eine nicht "repräsentative" Darstellung ergeben, kann die Konturapproximation durch Wahl von anderen Segmenten wiederholt werden. Dazu werden die betrachteten Segmente m mal um einen Offset n_{offset} verschoben ($p_{b+m \cdot n_{offset}}$, $p_{e+m \cdot n_{offset}}$) und

$$m \cdot n_{offset} < n_{step} \quad (2-6)$$

gewählt.

Durch die Wahl von n_{step} wird die maximale Länge der Primitivobjekte LINIE festgelegt.

Als Fehler d_{appr} können auch andere Maße, als das von Gl. 2-1 herangezogen werden. So bietet sich zur Beurteilung der Approximationsgüte auch die maximale Abweichung

$$d_{appr} = \max_{k < i < l} |d(p_i)| \quad (2-7)$$

oder die absolute Fläche zwischen Segmentstück und Geradenstück an.

Die Konturapproximation wird somit durch folgende Parameter bestimmt:

$$\boxed{m_{min}}, \boxed{n_{step}}, \boxed{n_{smin}}, \boxed{d_{max}}, \boxed{n_{offset}}.$$

Konturapproximation nach Ramer

Ein ähnliches Verfahren zur Konturapproximation von ebenen Kurven wird von Ramer [64] beschrieben. Es zeichnet sich als reines Split-Verfahren durch den geringen Rechenaufwand aus. Ein Laufzeitvergleich verschiedener Verfahren der Approximation von ebenen Kurven durch Geradenstücke ist in dem Beitrag von Dunham [15] angegeben.

Die Vorgehensweise unterscheidet sich dadurch, daß der für jeden Split-Vorgang bestimmte Scheitelpunkt p_s auch einen neuen Punkt im Polygon darstellt. Das heißt, bei jedem Split-Vorgang werden zwei Geradenstücke bestimmt, deren Approximationsgüte untersucht wird. Der Vorgang der Approximation läßt sich anschaulich durch einen Binarbaum beschreiben, bei dem das Aufteilen (Splitting) durch jeweils zwei Kanten und die entstandenen Geradenstücke durch Knoten dargestellt werden.

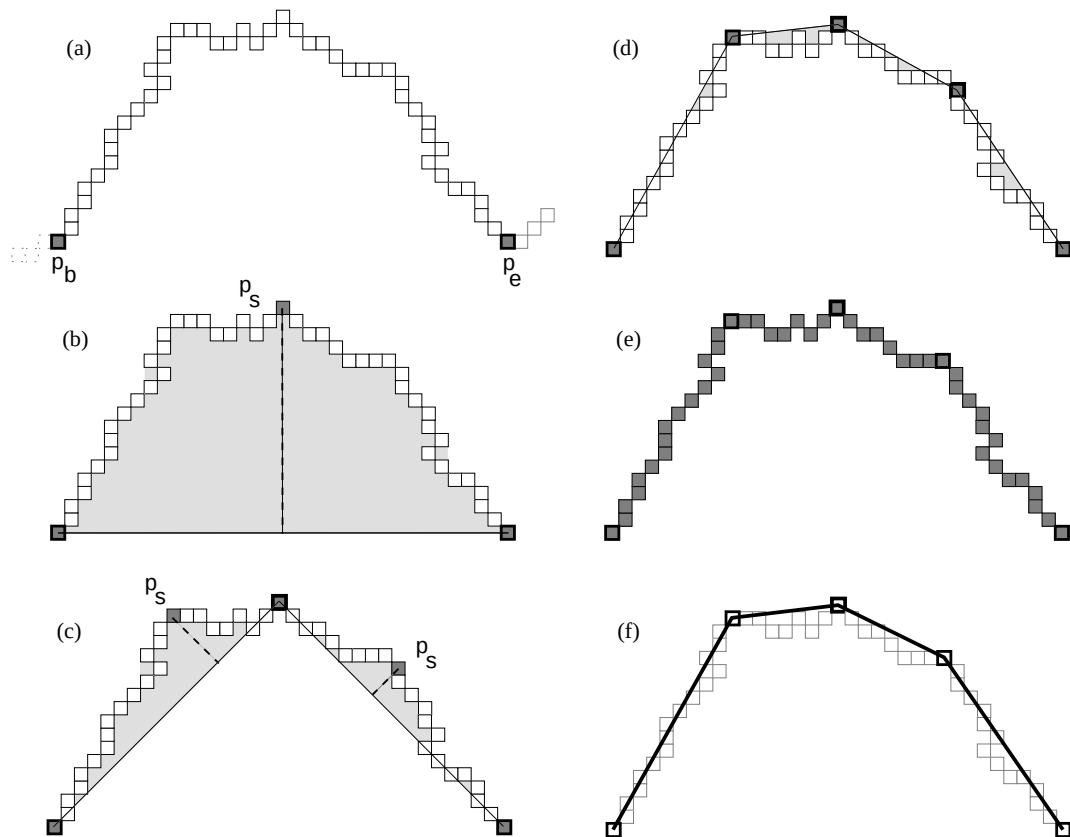


Abb. 2-4: Beispiel zur Approximation eines Kontursegmentes durch ein Polygon (nach Ramer).
a)-f) siehe Text

Zum Vergleich ist diese Vorgehensweise mit dem in Abb. 2-3a vorgestellten Beispiel mit gleichen Abbruchkriterien in Abb. 2-4 gegenübergestellt. Abb. 2-3h und Abb. 2-4f zeigen, das beim ersten Verfahren drei Geradenstücke und beim zweiten Verfahren vier Geradenstücke generiert werden. Die unnötige Generierung von kurzen Geradenstücken, in der Literatur als *Übersegmentierung* bezeichnet, wird als typischer Nachteil der reinen Split-Verfahren gesehen [5].

2.2 Flächensegmentierung

F. QUINT (IPF)

In den folgenden Abschnitten wird ein im Rahmen des vorliegenden Projektes am IPF entwickelter neuartiger Ansatz zur Segmentierung von Bildern vorgestellt.

Unter Segmentierung verstehen wir die Aufteilung des Bildes in disjunkte Teilgebiete. Für ein solches Teilgebiet verwenden wir die Bezeichnung Region. Alle Bildpunkte, die durch die Segmentierung einer Region zugeordnet wurden, müssen in Anlehnung an [57] zwei Eigenschaften erfüllen:

- alle Bildpunkte einer Region müssen mindestens einen Nachbarn haben, der auch dieser Region angehört (Zusammenhangsbedingung),
- alle Bildpunkte der Region müssen ein Prädikat $\mathcal{H}$ erfüllen (Homogenitätsbedingung).

2.2.1 Bekannte Verfahren

Die Segmentierung ist neben der Kantendetektion eines der am häufigsten untersuchten Verfahren in der Literatur zur Bildauswertung. Im Laufe der Jahre wurden zahlreiche Ansätze zur Segmentierung von Bildern erprobt, bisher konnte sich noch kein universelles Verfahren herauskristallisieren. Die in regelmäßigen Abständen erscheinenden Übersichtsartikel erleichtern die Einordnung der Vielzahl der Forschungsaktivitäten zur Segmentierung. Es seien hier die Artikel von Riseman und Arbib [66], Haralick und Shapiro [20] und Pal und Pal [56] erwähnt.

Riseman und Arbib nehmen eine Einteilung der Verfahren in kantenorientierte Verfahren und flächenorientierte Verfahren vor. Haralick und Shapiro teilen die Verfahren nach der Art der Ballung ein. Sie unterscheiden zwischen

- *Measurement space guided spatial clustering schemes*,
- *Region growing schemes*, die wiederum in
 - *Single linkage region growing schemes*,
 - *Hybrid linkage region growing schemes* und
 - *Centroid linkage region growing schemes*

eingeteilt werden,

- *Spatial clustering schemes* und
- *Split and merge schemes*.

Die Autoren beachten als Unterscheidungsmerkmal dabei hauptsächlich den Kontrollalgorithmus bei der Bildung neuer Regionen. Im Gegensatz dazu teilen Pal und Pal ihre Verfahren hauptsächlich nach dem verwendeten Homogenitätsmaß ein:

- Schwellwertverfahren im Grauwertbereich
- Iterative Pixel-Klassifikation
 - Relaxationsmethoden
 - Markov-Random-Field Ansätze
 - Neuronale Netze
- Oberflächenbasierte Segmentierung
- Verfahren zur Segmentierung von mehrkanaligen Bildern
- Segmentierung beruhend auf Kantendetektion
- Fuzzy-Set Ansätze in folgenden Bereichen
 - Schwellwertverfahren
 - Clustering
 - Kantendetektion

2.2.2 Modellannahmen

Das hier entwickelte Segmentiervverfahren ist als ein Bereichswachstumverfahren implementiert: für einen noch keiner Region zugeordneten Bildpunkt wird das Homogenitätsmaß dieses Punktes mit den ihm benachbarten Regionen überprüft. Ist es für eine Region erfüllt, wird der Bildpunkt dieser Region zugeordnet. Die Überprüfung der Homogenitätsbedingung $\mathcal{H}$ wird mit einem Maximum-a-posteriori Ansatz durchgeführt.

Für die Aufstellung des Homogenitätsmaßes wird streng nach der Bayesschen Regel vorgefahren. Alle hierfür vorgenommenen Modellannahmen werden in den folgenden Abschnitten explizit angegeben.

Bilderzeugung

Die Lichtintensitäten der Szene werden über die Bildaufnahme in die Grauwerte des Bildes abgebildet. Während des im allgemeinen gestörten Abbildungsvorganges überlagert sich den Lichtintensitäten additiv Rauschen. Es wird angenommen, daß das Rauschen statistisch unabhängig von den Lichtintensitäten $I(x, y)$ sowie normalverteilt und mittelwertfrei ist.

Für die Lichtintensitäten der Szene wird angenommen, daß sie folgendem Bildungsgesetz gehorchen:

$$I(x, y) = a\phi(x, y) + b\psi(x, y) + c\chi(x, y), \quad (2 - 8)$$

$I(x, y)$ ist die Lichtintensität in der Szene an der Position (x, y) mit den Weltkoordinaten (x_W, y_W) , für die die Abbildung gilt: $x = p_1(x_W, y_W), y = p_2(x_W, y_W)$. Dabei sind (x, y) die Bildkoordinaten des abgebildeten Szenenpunktes, und p_1, p_2 die bekannten Abbildungsfunktionen.

Die gesamte Szene setzt sich also stückweise aus Bereichen zusammen, deren Lichtintensitäten der Gl.(2-8) gehorchen. Diese Bereiche gilt es zu finden, es sind die von uns gesuchten Regionen.

Die Funktionen $\phi(x, y), \psi(x, y), \chi(x, y)$ sind beliebige, reellwertige Funktionen der Bildkoordinaten (x, y) . Sie werden als bekannt vorausgesetzt. Es ist nicht notwendig, daß dieselben Funktionen $\phi(x, y), \psi(x, y), \chi(x, y)$ für das gesamte Bild gelten, sie müssen nur für eine Region einheitlich sein. Dies ist notwendig, da diese Funktionen die Homogenitätseigenschaft einer Region verkörpern.

Die Parameter a, b, c werden als Realisierungen von jeweils einem Zufallsprozeß über der Menge der Regionen des Bildes betrachtet. Sie sind unbekannt und müssen geschätzt werden.

Während der Bildaufnahme werden die Lichtintensitäten durch Rauschen additiv verfälscht. Meßbar sind die Grauwerte des Bildes $g(x, y)$:

$$g(x, y) = I(x, y) + n, \quad (2-9)$$

wobei n die Realisierung des Rauschprozesses darstellt.

Gemäß Gl. 2-9 ist das Aufnahmesystem ein lineares System. Nichtlinearitäten aufgrund von Begrenzung und Sättigung während der Aufnahme werden vernachlässigt, ebenso wie Abtast- und Quantisierungseffekte.

Homogenitätsmaß

Die bereits zu einer Region $\mathcal{R}$ gehörenden Bildpunkte (x_k, y_k) , $k = 1, \dots, N$ erfüllen mit ihren Lichtintensitäten die Gleichung:

$$I(x_k, y_k) = a\phi(x_k, y_k) + b\psi(x_k, y_k) + c\chi(x_k, y_k), \quad (2-10)$$

Ein Bildpunkt (x_0, y_0) mit dem meßbaren Grauwert $g_0(x_0, y_0)$ erfüllt das Homogenitätsmaß der Region $\mathcal{R}$, wenn seine Lichtintensität die Gleichung:

$$I(x_0, y_0) = a\phi(x_0, y_0) + b\psi(x_0, y_0) + c\chi(x_0, y_0), \quad (2-11)$$

erfüllt. In diesem Fall sei $\mathcal{H} = 1$. Ansonsten sei $\mathcal{H} = 0$.

2.2.3 Wahrscheinlichkeiten und Dichtefunktionen

Zur Vereinfachung der Notation werden wir die Angabe der Koordinaten durch die Angabe ihres Index ersetzt, d.h., wir bezeichnen:

$$I(x_k, y_k) \equiv I_k \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned}
g(x_k, y_k) &\equiv g_k \\
\phi(x_k, y_k) &\equiv \phi_k \\
\psi(x_k, y_k) &\equiv \psi_k \\
\chi(x_k, y_k) &\equiv \chi_k.
\end{aligned}$$

Gemäß der Definition des Homogenitätsmaßes hat die Hypothese $\mathcal{H} = 1$ (d.h. die Hypothese: der Bildpunkt (x_0, y_0) gehört der Region $\mathcal{R}$ an) folgende bedingte Wahrscheinlichkeit:

$$P_{\mathcal{H}}(\mathcal{H} = 1|a, b, c, I_0) = \begin{cases} 1 & : I_0 = a\phi_0 + b\psi_0 + c\chi_0 \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} \quad (2-13)$$

$P_{\mathcal{H}}(\mathcal{H} = 0|a, b, c, I_0)$ ist komplementär zu $P_{\mathcal{H}}(\mathcal{H} = 1|a, b, c, I_0)$.

Die meßbaren Grauwerte entstehen durch Addition von mittelwertfreiem, normalverteiltem Rauschen zu den Lichtintensitäten. Die bedingte Dichtefunktion des Grauwertes g_0 des Bildpunktes (x_0, y_0) ist damit:

$$f_g(g_0|I_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(g_0 - I_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-14)$$

Ähnlich ist die Dichtefunktion der Grauwerte der Bildpunkte, die bereits der Region $\mathcal{R}$ angehören:

$$f_g(g_k|a, b, c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(g_k - (a\phi_k + b\psi_k + c\chi_k))^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2-15)$$

Für die Parameter a , b und c wird angenommen, daß sie normalverteilte Zufallsvariablen mit den Mittelwerten m_a, m_b bzw. m_c und den Standardabweichungen σ_a, σ_b bzw. σ_c sind. Ihre Dichtefunktionen sind demnach:

$$f_a(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \exp\left(-\frac{(a - m_a)^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (2-16)$$

$$f_b(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \exp\left(-\frac{(b - m_b)^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (2-17)$$

$$f_c(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left(-\frac{(c - m_c)^2}{2\sigma_c^2}\right) \quad (2-18)$$

Für die Dichtefunktion von I_0 wird eine Gleichverteilung im Bereich $[0, 255]$ angenommen.

2.2.4 Berechnung des Homogenitätsmaßes

Bekannt sind die Grauwerte $g_0, \dots, g_N$ des Bildes, so daß eine Überprüfung des Homogenitätsmaßes (siehe Gl. 2-11) nicht direkt erfolgen kann, sondern nur indirekt über diese

Grauwerte. Die Wahrscheinlichkeit $P(\mathcal{H} = 1|g_0, g_1, \dots, g_N)$, mit der dieses Homogenitätsmaß erfüllt ist, kann aus den angegebenen Wahrscheinlichkeiten über das Bayessche Gesetz berechnet werden.

Für eine detaillierte Beschreibung der Wahrscheinlichkeit und ihre Berechnung wird auf [63] verwiesen.

$\hat{s}_\phi = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi_k^2 + \frac{\sigma^2}{N\sigma_a^2}$	$\hat{s}_\phi^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \phi_k^2 + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_a^2}$
$\hat{s}_\psi = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \psi_k^2 + \frac{\sigma^2}{N\sigma_b^2}$	$\hat{s}_\psi^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \psi_k^2 + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_b^2}$
$\hat{s}_\chi = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \chi_k^2 + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2}$	$\hat{s}_\chi^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \chi_k^2 + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_c^2}$
$l_{\phi\psi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi_k \psi_k$	$l_{\phi\psi}^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \phi_k \psi_k$
$l_{\phi\chi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi_k \chi_k$	$l_{\phi\chi}^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \phi_k \chi_k$
$l_{\psi\chi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \psi_k \chi_k$	$l_{\psi\chi}^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \psi_k \chi_k$
$s_g = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g_k^2$	$s_g^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N g_k^2$
$\hat{l}_{\phi g} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi_k g_k + \frac{\sigma^2}{N\sigma_a^2} m_a$	$\hat{l}_{\phi g}^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \phi_k g_k + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_a^2} m_a$
$\hat{l}_{\psi g} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \psi_k g_k + \frac{\sigma^2}{N\sigma_b^2} m_b$	$\hat{l}_{\psi g}^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \psi_k g_k + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_b^2} m_b$
$\hat{l}_{\chi g} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \chi_k g_k + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2} m_c$	$\hat{l}_{\chi g}^* = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \chi_k g_k + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_c^2} m_c$

Tabelle 2-1: „Momentsummen“ bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit

Mit den Bezeichnungen aus Tabelle 2-1 für die auftretenden Summen führen wir die „Korrelationsmatrizen“:

$$\hat{K}_{\phi\psi\chi} = \begin{pmatrix} \hat{s}_\phi & l_{\phi\psi} & l_{\phi\chi} \\ l_{\phi\psi} & \hat{s}_\psi & l_{\psi\chi} \\ l_{\phi\chi} & l_{\psi\chi} & \hat{s}_\chi \end{pmatrix} \quad (2-19)$$

$$\hat{K}_{\phi\psi\chi}^* = \begin{pmatrix} \hat{s}_\phi^* & l_{\phi\psi}^* & l_{\phi\chi}^* \\ l_{\phi\psi}^* & \hat{s}_\psi^* & l_{\psi\chi}^* \\ l_{\phi\chi}^* & l_{\psi\chi}^* & \hat{s}_\chi^* \end{pmatrix} \quad (2-20)$$

und:

$$\hat{K}_{\phi\psi\chi g} = \begin{pmatrix} \hat{s}_\phi & l_{\phi\psi} & l_{\phi\chi} & \hat{l}_{\phi g} \\ l_{\phi\psi} & \hat{s}_\psi & l_{\psi\chi} & \hat{l}_{\psi g} \\ l_{\phi\chi} & l_{\psi\chi} & \hat{s}_\chi & \hat{l}_{\chi g} \\ \hat{l}_{\phi g} & \hat{l}_{\psi g} & \hat{l}_{\chi g} & s_g \end{pmatrix} \quad (2-21)$$

$$\hat{K}_{\phi\psi\chi g}^* = \begin{pmatrix} \hat{s}_\phi^* & l_{\phi\psi}^* & l_{\phi\chi}^* & \hat{l}_{\phi g}^* \\ l_{\phi\psi}^* & \hat{s}_\psi^* & l_{\psi\chi}^* & \hat{l}_{\psi g}^* \\ l_{\phi\chi}^* & l_{\psi\chi}^* & \hat{s}_\chi^* & \hat{l}_{\chi g}^* \\ \hat{l}_{\phi g}^* & \hat{l}_{\psi g}^* & \hat{l}_{\chi g}^* & s_g^* \end{pmatrix} \quad (2-22)$$

ein. Der Faktor:

$$f_{g_0} = \Phi_0\left(\frac{g_0}{\sigma}\right) + \Phi_0\left(\frac{255 - g_0}{\sigma}\right) \quad (2-23)$$

ist mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsintegrals:

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (2-24)$$

definiert.

Bei den Notationen wurden folgende Konventionen eingehalten:

- Die Notation mit hochgestelltem * besagt, daß die Summenbildung in der Momentberechnung sowohl über die N bereits zu der Region $\mathcal{R}$ gehörenden Bildpunkte $(x_k, y_k), k = 1, \dots, N$ als auch über den Bildpunkt (x_0, y_0) durchgeführt wird. Der Bildpunkt (x_0, y_0) ist derjenige, für den gerade das Homogenitätsmaß getestet wird. Bei den Notationen ohne hochgestelltes * wird die Summenbildung nur über die bereits zu der Region $\mathcal{R}$ gehörenden Bildpunkte durchgeführt.
- Ein „Dach“ ($\hat{}$) über einem Bezeichner bedeutet, daß die entsprechende Momentsumme mit a-priori Information korrigiert wurde.

Man erhält für die gesuchte Wahrscheinlichkeit $P(\mathcal{H}|g_0, g_1, \dots, g_N) = P$:

$$P = \frac{1}{f_{g_0} \sqrt{2\pi}\sigma} \frac{N^{\frac{3}{2}} \sqrt{\det \hat{K}_{\phi\psi\chi}}}{(N+1)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\det \hat{K}_{\phi\psi\chi}^*}} \exp\left(\frac{N \det \hat{K}_{\phi\psi\chi g}}{2\sigma^2 \det \hat{K}_{\phi\psi\chi}} - \frac{(N+1) \det \hat{K}_{\phi\psi\chi g}^*}{2\sigma^2 \det \hat{K}_{\phi\psi\chi}^*}\right) \quad (2-25)$$

2.2.5 Bemerkungen

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit P , mit der ein Bildpunkt (x_0, y_0) das Homogenitätsmaß einer Region $\mathcal{R}$ erfüllt, ist die Kenntnis der Modellfunktionen $\phi(x, y), \psi(x, y), \chi(x, y)$ erforderlich. Es ist jedoch nicht die Kenntnis der aktuellen Parameter a, b, c (Repräsentanten von Zufallsprozessen) erforderlich, die die eigentliche Realisierung der Intensitäten I_k der Szene über die Modellfunktionen steuern. Es ist ebenfalls nicht erforderlich, daß die Modellfunktionen für die gesamte zu segmentierende

Szene unverändert bleiben. Unterschiedliche Regionen können unterschiedliche Modellfunktionen haben.

Während der Segmentierung werden, im Gegensatz zu den meisten bekannten Segmentierungsverfahren nach dem Prinzip der Funktionsapproximationen, die Parameter a, b, c nicht explizit berechnet.

Die Berechnung der Momentsummen nach Gleichung (2-1) kann iterativ erfolgen. Man bemerkt, daß die mit (*) gekennzeichneten Größen („neue“ Größen) bei einer erfolgreichen Zuordnung des Bildpunktes (x_0, y_0) zu der Region $\mathcal{R}$ im nächsten Zuordnungsversuch zu den „alten“ Größen (die ohne (*) bezeichneten) werden. Für die Berechnung der Momentsummen nach Gleichung (2-1) sind demnach pro Zuordnungsschritt zehn Additionen und Multiplikationen erforderlich. Für die Berechnung der Determinanten der Matrizen sind insgesamt $3! + 4! = 30$ Additionen und Multiplikationen erforderlich. Für die vollständige Berechnung der Wahrscheinlichkeit sind einige weitere Multiplikationen und Divisionen, sowie die Auswertung einer Exponentialfunktion und einer Wurzelfunktion notwendig. Unabhängig von der Größe einer Region ist der Aufwand für die Zuordnung eines neuen Bildpunktes zu der Region konstant. Damit steigt der Aufwand zur Segmentierung eines Bildes linear mit der Größe des Bildes.

Man entscheidet sich für die Zugehörigkeit eines Bildpunktes zu einer Region, wenn die Wahrscheinlichkeit aus Gleichung 2-25 eine gegebene Schwelle überschreitet. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt Werte aus dem Intervall $[0, 1]$ an. Es kann gezeigt werden, daß $P_{max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ eine obere Schranke für den Ausdruck aus Gleichung 2-25 darstellt. Der Faktor f_{g_0} ist nur von g_0 und von σ abhängig, nicht jedoch von der zu segmentierenden Region. Sein Maximalwert ist 1. Er kann damit beim Vergleich der Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten ebenfalls weggelassen werden, und man erhält als Maß für die Zugehörigkeit des zu segmentierenden Punktes zu einer Region:

$$Z_{norm} = \frac{N^{\frac{3}{2}} \sqrt{\det \hat{K}_{\phi\psi\chi}}}{(N+1)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\det \hat{K}_{\phi\psi\chi}^*}} \exp \left(\frac{N \det \hat{K}_{\phi\psi\chi g}}{2\sigma^2 \det \hat{K}_{\phi\psi\chi}} - \frac{(N+1) \det \hat{K}_{\phi\psi\chi g}^*}{2\sigma^2 \det \hat{K}_{\phi\psi\chi}^*} \right), \quad (2-26)$$

einen Wert, der ebenfalls auf das Intervall $[0, 1]$ normiert ist.

2.2.6 Beispiele für verschiedene Modelle der Lichtintensitäten

Ebenenmodell

Es wird angenommen, daß sich die Funktion der Lichtintensitäten der Szene stückweise aus Ebenen zusammensetzt. Diese Annahme ist exakt erfüllt bei Abstandsbildern, wenn die Objekte der Szene ebene Begrenzungsflächen haben. Sie trifft mit guter Näherung auch für Grauwertbilder ohne nennenswerte Textur zu.

Unter dieser Annahme ist:

$$\phi(x, y) = x \quad \psi(x, y) = y \quad \chi(x, y) = 1 \quad (2-27)$$

Man erhält somit für die Korrelationsmatrizen:

$$\hat{K}_{xy} = \begin{pmatrix} \hat{s}_x & l_{xy} & m_x \\ l_{xy} & \hat{s}_y & m_y \\ m_x & m_y & 1 + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2} \end{pmatrix} \quad (2-28)$$

$$\hat{K}_{xy}^* = \begin{pmatrix} \hat{s}_x^* & l_{xy}^* & m_x^* \\ l_{xy}^* & \hat{s}_y^* & m_y^* \\ m_x^* & m_y^* & 1 + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_c^2} \end{pmatrix} \quad (2-29)$$

und:

$$\hat{K}_{xyg} = \begin{pmatrix} \hat{s}_x & l_{xy} & m_x & \hat{l}_{xg} \\ l_{xy} & \hat{s}_y & m_y & \hat{l}_{yg} \\ m_x & m_y & 1 + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2} & m_g + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2}m_c \\ \hat{l}_{xg} & \hat{l}_{yg} & m_g + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2}m_c & s_g \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

$$\hat{K}_{xyg}^* = \begin{pmatrix} \hat{s}_x^* & l_{xy}^* & m_x^* & \hat{l}_{xg}^* \\ l_{xy}^* & \hat{s}_y^* & m_y^* & \hat{l}_{yg}^* \\ m_x^* & m_y^* & 1 + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_c^2} & m_g + \frac{\sigma^2}{(N+1)\sigma_c^2}m_c \\ \hat{l}_{xg}^* & \hat{l}_{yg}^* & m_g + \frac{\sigma^2}{N\sigma_c^2}m_c & s_g^* \end{pmatrix} \quad (2-31)$$

Vereinfachungen

Nimmt man weiterhin an, daß es keine bevorzugte Neigungsrichtung der Ebenen gibt, dann ist $m_a = 0$ und $m_b = 0$. Wenn die Varianzen der Parameter a, b, c in der Größenordnung der Varianz des Rauschens sind, dann ist bereits für Regionen, die mehr als 10 Bildpunkte enthalten, der Summand $\frac{\sigma^2}{N\sigma_{(a,b,c)}^2}$ gegenüber 1 vernachlässigbar.

Damit werden die Matrizen zu:

$$K_{xy} = \begin{pmatrix} s_x & l_{xy} & m_x \\ l_{xy} & s_y & m_y \\ m_x & m_y & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \lambda_{xy} \\ \lambda_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix} = \Lambda_{xy} \quad (2-32)$$

$$K_{xy}^* = \begin{pmatrix} s_x^* & l_{xy}^* & m_x^* \\ l_{xy}^* & s_y^* & m_y^* \\ m_x^* & m_y^* & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{*2} & \lambda_{xy}^* \\ \lambda_{xy}^* & \sigma_y^{*2} \end{pmatrix} = \Lambda_{xy}^* \quad (2-33)$$

und:

$$\hat{K}_{xyg} = \begin{pmatrix} s_x & l_{xy} & m_x & l_{xg} \\ l_{xy} & s_y & m_y & l_{yg} \\ m_x & m_y & 1 & \hat{m}_g \\ l_{xg} & l_{yg} & \hat{m}_g & s_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \lambda_{xy} & \hat{\lambda}_{xg} \\ \lambda_{xy} & \sigma_y^2 & \hat{\lambda}_{yg} \\ \hat{\lambda}_{xg} & \hat{\lambda}_{yg} & \hat{\sigma}_g^2 \end{pmatrix} = \hat{\Lambda}_{xyg} \quad (2-34)$$

$$\hat{K}_{xyg}^* = \begin{pmatrix} s_x^* & l_{xy}^* & m_x^* & l_{xg}^* \\ l_{xy}^* & s_y^* & m_y^* & l_{yg}^* \\ m_x^* & m_y^* & 1 & \hat{m}_g^* \\ l_{xg}^* & l_{yg}^* & \hat{m}_g^* & s_g^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{*2} & \lambda_{xy}^* & \hat{\lambda}_{xg}^* \\ \lambda_{xy}^* & \sigma_y^{*2} & \hat{\lambda}_{yg}^* \\ \hat{\lambda}_{xg}^* & \hat{\lambda}_{yg}^* & \hat{\sigma}_g^{*2} \end{pmatrix} = \hat{\Lambda}_{xyg}^* \quad (2-35)$$

Keine a-priori Information

Hat man keine a-priori Information über bevorzugte Lagen oder Neigungen der Grauwertebeinen, so kann man diese Situation durch den Grenzwert der Varianzen $\sigma_{(a,b,c)}$ nach unendlich modellieren.

Dadurch verschwinden in den Gleichungen aus Tabelle (2-1) die a-priori „Korrekturterme“, und man erhält für die Kovarianzmatrizen:

$$\Lambda_{xy} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \lambda_{xy} \\ \lambda_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \quad (2-36)$$

$$\Lambda_{xy}^* = \begin{pmatrix} \sigma_x^{*2} & \lambda_{xy}^* \\ \lambda_{xy}^* & \sigma_y^{*2} \end{pmatrix} \quad (2-37)$$

und:

$$\Lambda_{xyg} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \lambda_{xy} & \lambda_{xg} \\ \lambda_{xy} & \sigma_y^2 & \lambda_{yg} \\ \lambda_{xg} & \lambda_{yg} & \sigma_g^2 \end{pmatrix} \quad (2-38)$$

$$\Lambda_{xyg}^* = \begin{pmatrix} \sigma_x^{*2} & \lambda_{xy}^* & \lambda_{xg}^* \\ \lambda_{xy}^* & \sigma_y^{*2} & \lambda_{yg}^* \\ \lambda_{xg}^* & \lambda_{yg}^* & \sigma_g^{*2} \end{pmatrix} \quad (2-39)$$

und für die Wahrscheinlichkeit:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma f_{g_0}} \sqrt{\frac{N^3 \det \Lambda_{xy}}{(N+1)^3 \det \Lambda_{xy}^*}} \exp \left(\frac{N \det \Lambda_{xyg}}{2\sigma^2 \det \Lambda_{xy}} - \frac{(N+1) \det \Lambda_{xyg}^*}{2\sigma^2 \det \Lambda_{xy}^*} \right) \quad (2-40)$$

Texturen

Autoregressive Modelle, Markov Random Fields und Gibbs Random Fields werden häufig zur Beschreibung von Texturen eingesetzt. Solche Ansätze sind in der Literatur u.a. in [7], [12], [14], [72], [65] anzutreffen. Den Methoden gemeinsam ist der hohe Rechenaufwand sowie die Schätzung der zahlreichen Parameter, die notwendig sind, um die Verteilungen zu definieren.

Der hier vorgestellte Ansatz kann auf Texturen erweitert werden, indem ein autoregressives Bildungsgesetz für Texturen zu Grunde gelegt wird:

$$I(x_0, y_0) = \sum_{k \in V} a_k g_k(x_k, y_k), \quad (2-41)$$

wobei V eine Umgebung um den Punkt (x_0, y_0) ist. Die Grauwerte g_k in den Punkten (x_k, y_k) aus der Nachbarschaft entsprechen den Funktionen ϕ, ψ, χ aus Gleichung 2-8, die Parameter a_k des autoregressiven Modells sind zu schätzen.

Dieser Fall unterscheidet sich von dem bisher behandelten nur durch seine Dimensionalität: anstatt von drei Parametern enthält das Bildungsgesetz jetzt eine der Größe der Umgebung V entsprechende Anzahl von Parametern. Aufgrund der Symmetrie ist zu erwarten, daß auch hierfür eine geschlossene Lösung für die Wahrscheinlichkeit, mit der das Homogenitätsmaß erfüllt ist, angegeben werden kann, die der aus Gleichung 2-25 ähnlich ist. Der mathematische Beweis hierfür muß jedoch noch erbracht werden.

Mehrkanalige Bilder

Die Erweiterung auf mehrkanalige Bilder kann direkt vorgenommen werden: die Wahrscheinlichkeiten für die Erfüllung des Homogenitätsmaßes können für jeden Kanal getrennt gerechnet werden und schließlich zu einer kumulativen Wahrscheinlichkeit kombiniert werden, auf deren Basis die Entscheidung vorgenommen wird. Zur Berechnung der kumulativen Wahrscheinlichkeit können verschiedene aus der Literatur bekannte Verfahren angewendet werden, z.B.:

- Wahl der höchsten Wahrscheinlichkeit der einzelnen Kanäle
- Mittelwert der Wahrscheinlichkeiten der drei Kanäle
- gewichteter Mittelwert, wobei die Wichtungskoeffizienten z.B. umgekehrt proportional zu Signal/Rauschverhältnis des entsprechenden Kanals gewählt werden können.

2.2.7 Ergebnisse

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde am IPF ein Flächenwachstumsverfahren entwickelt, das zur Segmentierung das hier vorgestellte Homogenitätsmaß benutzt. Zur Bewertung der Güte der erzielbaren Segmentierungsergebnisse wurden eine Reihe von Versuchen sowohl an künstlich erstellten Bildern als auch an Luftbildern aus dem Testgebiet durchgeführt.

Es ist kein objektives, exaktes Maß zur Bewertung der Güte einer Segmentierung bekannt. Dies ist darin begründet, daß bei häufig anzutreffenden, fließenden Grauwertübergängen selbst der Operateur oftmals nicht in der Lage ist, eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Bildpunkte zu Regionen zu treffen. Deshalb seien die Ergebnisse der nachfolgenden Versuche auch nicht quantifiziert, sondern wir beschränken uns auf qualitative Aussagen zum Verhalten des Verfahrens.

Die Ergebnisse wurden mit dem Flächenwachstumsverfahren erzielt, wobei als Homogenitätsmaß der geschilderte wahrscheinlichkeitsbasierte Ansatz unter der Voraussetzung des ebenen Modells für die Lichtintensitäten verwendet wurde.

Bilddaten

Zur Überprüfung der Sensitivität eines Verfahrens auf unterschiedliche Parameter eignen sich als Testdaten künstlich generierte Bilder. In Abb. 2-5a ist das in den Versuchen verwendete Bild dargestellt. Das Bild enthält vier Regionen vor einem homogenen Hintergrund (Grauwert 0):

1. im oberen Bereich eine Region, deren Grauwerte mit einer konstanten Steigung von 2 Grauwerten je Spalte bis zur Bildmitte wachsen und in Zeilenrichtung konstant sind
2. daran anschließend eine Region ähnlich der ersten, jedoch mit fallenden Grauwerten,
3. im mittleren Bereich eine Region, deren Grauwerte eine Abhängigkeit zweiten Grades (Parabel) von der Spaltennummer haben und
4. im unteren Bereich eine Region, bei der sowohl in Zeilen- als auch in Spaltenrichtung die Grauwerte linear von ihrer Position abhängen.

Während der Hintergrund, die beiden ersten und die vierte Region den Modellannahmen entsprechen, verletzt die dritte Region diese Annahmen.

Die Segmentierungseigenschaften des Verfahrens werden weiterhin an einem Ausschnitt aus dem Luftbild (Abb. 2-7a) gezeigt. Hierbei erfüllt die Region des Hausdaches annähernd die Modellvoraussetzungen, während das Gebiet des Waldes eine sehr starke Textur besitzt und damit auch stark von den Modellannahmen abweicht.

Zu dem künstlich generierten Bild wurde mittelwertfreies, weißes Rauschen mit unterschiedlichen Varianzen addiert. Die eingebrachten Störungen sind in einem Grauwertprofil sichtbar. In Abb. 2-6a ist das Grauwertprofil entlang einer Zeile durch die Regionen 2 und 3 dargestellt, während in Abb. 2-6b das Grauwertprofil entlang einer Spalte wiedergegeben ist. Beide Profile sind aus dem mit einer Varianz des Rauschens von 100 gestörten Bild entnommen.

Einfluß des Rauschens

Für Rauschvarianzen von 10, 30 und 100, die dem künstlichen Bild hinzu addiert wurden, sind die Segmentierungsergebnisse in den Abbildungen 2-5b, 2-5c und 2-5d dargestellt. Bei diesen Versuchen wurde der Verfahrensparameter σ^2 aus den Formeln in Tabelle 2-1 gleich der jeweiligen Varianz des Rauschens gewählt. Die weiteren Parametereinstellungen sind: $m_a = m_b = 0$, $m_c = 128$, $\sigma_a = \sigma_b = 1$, $\sigma_c = 5$. Es sind dies Vorgabewerte der

Implementierung, die nicht optimiert wurden. Für diese Versuche wurde als Entscheidungsschwelle für die normierte Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit nach Gleichung 2-26 der Wert 0.8 gewählt.

Die dargestellten Segmentierungsergebnisse sind sogenannte Markenbilder, bei denen alle Bildpunkte, die einer Region angehören, mit derselben Farbe dargestellt sind. Es zeigt sich, daß bei angepaßtem Parameter σ^2 an die Varianz des Rauschens die einzelnen Regionen segmentiert werden. Lediglich bei großen Werten für die Varianz des Rauschens (Abb. 2-5e), bei denen die Rauschintensität viel größer ist als die Steigungen der Grauwerte innerhalb einer Region, verschmelzen die Regionen 1 und 2 teilweise mit dem Hintergrund. Dies hat seine Ursache auch darin, daß die Grauwerte der Regionen bis auf den Grauwert des Hintergrunds abfallen, es gibt hier keine Diskontinuität der Grauwerte, sondern nur eine Diskontinuität im Bildungsgesetz der Grauwerte. Region 4 wird selbst bei der Rauschvarianz von 100 noch richtig segmentiert, an ihren Grenzen ist ein Grauwertunterschied zum Hintergrund vorhanden. Region 3 entspricht nicht den hier getroffenen Modellannahmen einer linearen Abhängigkeit der Grauwerte von ihrer Position und wird dementsprechend in mehrere Bereiche aufgeteilt. Die Anzahl der entstehenden Bereiche ist nicht so sehr von der Varianz des Rauschens abhängig, als vielmehr vom Parameter σ^2 , der ja ein Maß für die zulässigen Abweichungen von den getroffenen Modellannahmen ist.

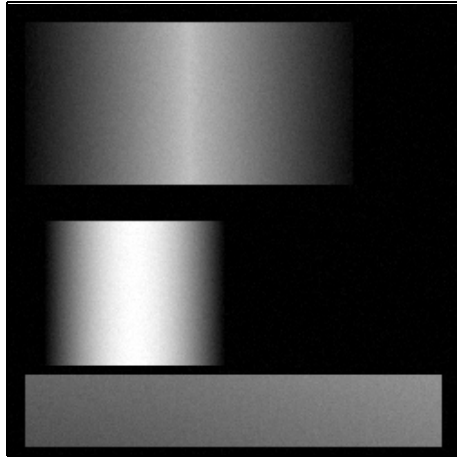
Einfluß der Verfahrensparameter

In diesem Rahmen soll nur der Einfluß des Parameters σ^2 auf die Ergebnisse der Segmentierung betrachtet werden. Dazu wurde in dieser Versuchsreihe die Varianz des künstlich addierten Rauschens auf dem konstanten Wert 30 gehalten, während der Parameter σ^2 verändert wurde. Für die anderen Parameter des Verfahrens wurden die bereits erwähnten Werte beibehalten. In Abb. 2-5e ist $\sigma^2 = 10$ kleiner als die Varianz des Rauschens, in Abb. 2-5f ist $\sigma^2 = 100$ größer als die Varianz des Rauschens. Der angepaßte Fall ist schließlich in Abb. 2-5d dargestellt.

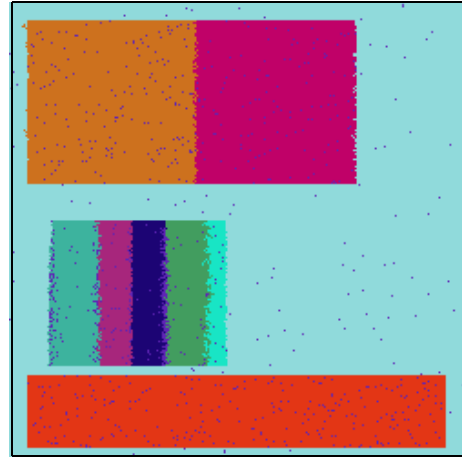
Ein zu klein eingestellter Wert für σ^2 führt zu einer korrekten Segmentierung der einzelnen Regionen, doch gibt es viele Bildpunkte, die aufgrund einer höheren Intensität des Rauschens zurückgewiesen werden. Da es sich hierbei jedoch hauptsächlich um isolierte Punkte handelt, können diese z.B. mit Hilfe morphologischer Operationen der korrekten Region zugeordnet werden. Im angepaßten Fall erzielt man ein gutes Segmentierungsergebnis, während bei zu groß eingestelltem Wert für σ^2 , ähnlich wie bei dem in Abb. 2-5d dargestellten und bereits besprochenen Fall, ein teilweises Verschmelzen der Regionen 1 und 2 mit dem Hintergrund auftritt.

Segmentierung der Luftbilder

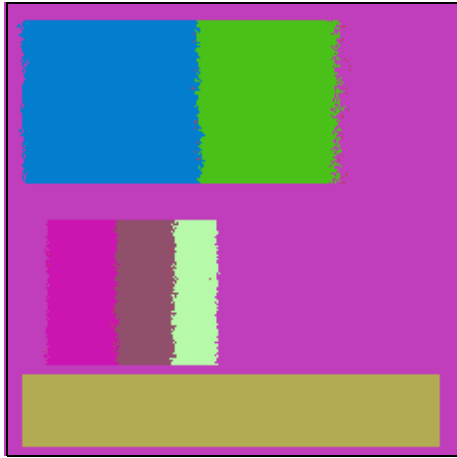
In den Abbildungen 2-7b, 2-7c und 2-7d sind die Ergebnisse der Segmentierung des Ausschnittes aus dem Luftbild dargestellt. In dieser Versuchsreihe wurden für den Verfahrensparameter σ^2 die Werte 10, 30 und 100 (in der Reihenfolge der Aufzählung) ge-



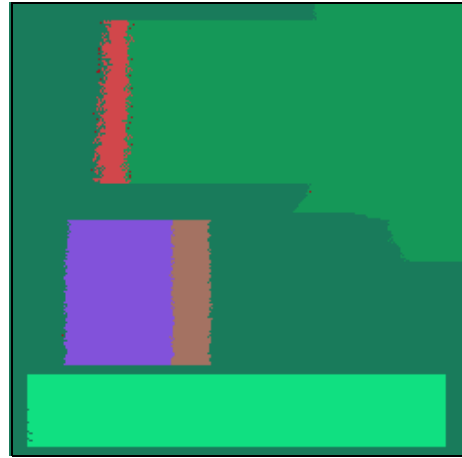
a



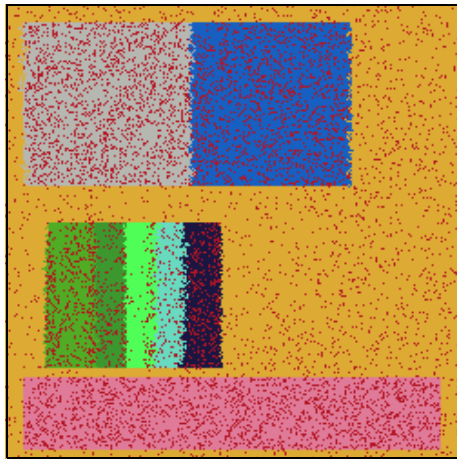
b



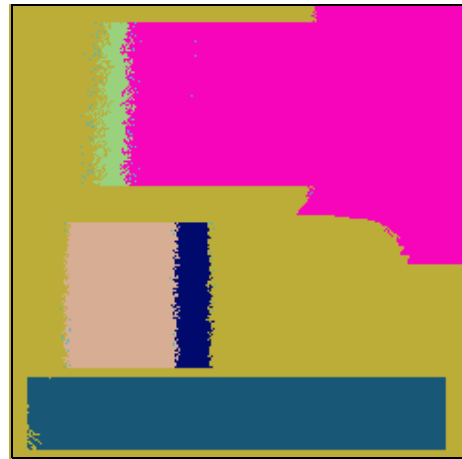
c



d



e



f

Abb. 2-5: Segmentierungsergebnisse des Testbildes. a) künstlich generiertes Testbild,
b) $\sigma_{Rausch}^2 = 10$, $\sigma^2 = 10$, $Z_{norm}=0.8$, c) $\sigma_{Rausch}^2 = 30$, $\sigma^2 = 30$, $Z_{norm}=0.8$,
d) $\sigma_{Rausch}^2 = 100$, $\sigma^2 = 100$, $Z_{norm}=0.8$, e) $\sigma_{Rausch}^2 = 30$, $\sigma^2 = 10$, $Z_{norm}=0.8$,
f) $\sigma_{Rausch}^2 = 30$, $\sigma^2 = 100$, $Z_{norm}=0.8$

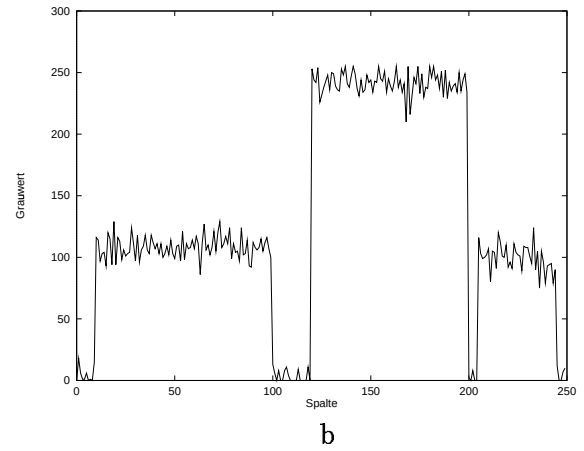
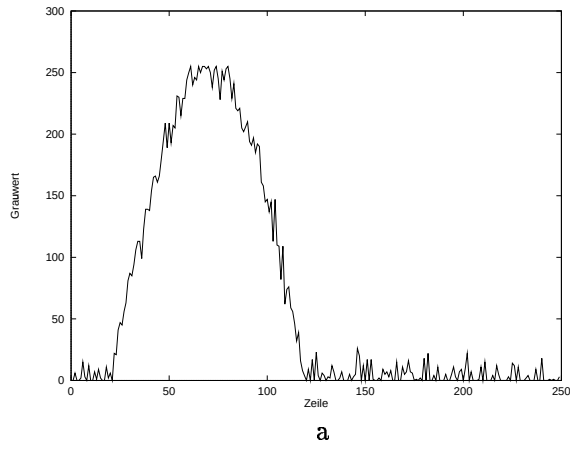


Abb. 2-6: Grauwertprofil. a) entlang einer Zeile, b) entlang einer Spalte

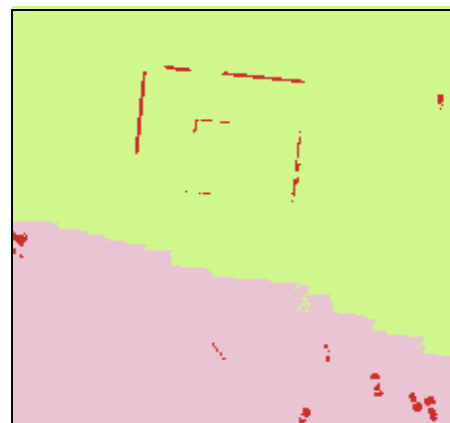
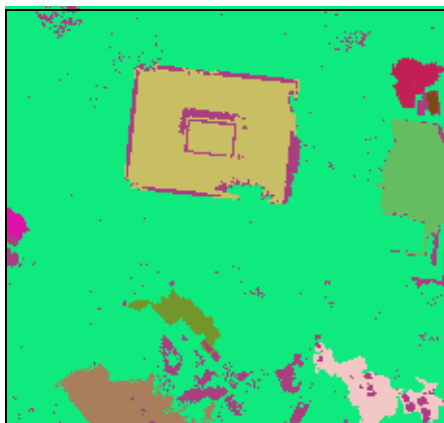
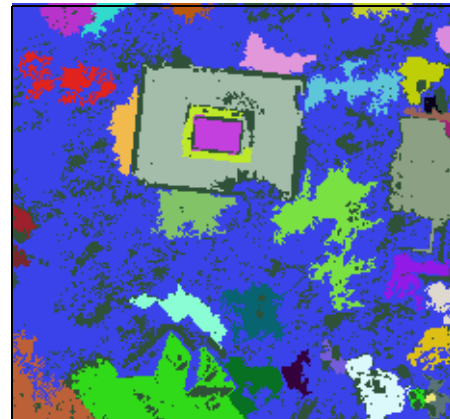


Abb. 2-7: Segmentierungsergebnisse des Luftbildes. a) Ausschnitt aus dem Luftbild, b) $\sigma^2 = 10$ und $Z_{norm} = 0.8$, c) $\sigma^2 = 30$ und $Z_{norm} = 0.8$, d) $\sigma^2 = 100$ und $Z_{norm} = 0.8$

wählt. Das Ergebnis aus Abb. 2-7b zeigt, daß die im Bild vorhandenen Häuser gut vom Hintergrund getrennt wurden, daß die stark texturierte Fläche des Waldes jedoch in mehrere Regionen unterteilt wurde.

Bei der Wahl von $\sigma^2 = 30$ (Abb. 2-7c) ist der Wald weitgehend einer Region zugeschlagen worden, das Ergebnis ist insgesamt besser als das aus Abb. 2-7b. Allerdings wurden bereits Teile (eine Hälfte des Daches) des Hauses am unteren Bildrand, dessen Grauwerte sich nur wenig von denen des umgebenden Waldes unterscheiden, bereits der Waldfläche zugeschlagen.

Die Wahl $\sigma^2 = 100$ (Abb. 2-7d) schließlich ist eindeutig zu hoch, hier findet ein starkes Verschmelzen der einzelnen Regionen statt.

Schlußbemerkungen

Das hier vorgestellte Verfahren eignet sich zur Segmentierung von mit Rauschen behafteten Bildern, wobei selbst bei großen Rauschintensitäten gute Ergebnisse erzielt werden. Es werden Abweichungen der Parameter von den angepaßten Einstellungen und auch Abweichungen vom Modell toleriert.

Es wurden hier nur die Einflüsse unterschiedlicher Rauschintensitäten und der Veränderung des Parameters σ^2 auf das Segmentierungsergebnis kurz dargestellt. Für weitergehende Untersuchungen zur Sensitivität des Verfahrens gegenüber Einstellungen der unterschiedlichen Parameter, insbesondere auch gegenüber der Entscheidungsschwelle sowie des Einsatzes des Verfahrens auf mehrkanalige Bilder wird auf [29] verwiesen.

Die hier gezeigten Versuche wurden unter der Annahme eines Ebenenmodells durchgeführt. Erweiterungen des Modells für die Segmentierung von Texturen sind geplant. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden Regionen gewonnen, die später bei der Analyse des Bildes mit Hilfe des semantischen Netzes verwendet werden.

3. Analyse von Gebäuden und Straßen

U. STILLA (FIM)

3.1 Analysesystem

Zur Analyse von Strukturen in komplexen Szenen wird beim FIM das sogenannte BPI-System [33] eingesetzt. BPI steht als Abkürzung für: **B**lackboard-based **P**roduction System for **I**mage Understanding. Dieses Produktionssystem ist speziell für die Bildauswertung ausgelegt und in einer Blackboard-Architektur implementiert. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Begriffe *Produktionssystem* und *Blackboard-Architektur* erläutert und dann die Realisierung des BPI-Systems dargestellt. An einem Beispiel wird folgend das mit der Bildanalyse verbundene Suchproblem diskutiert.

3.1.1 Produktionssysteme

Produktionssysteme wurden erstmals von Post [59] vorgestellt. Ein Produktionssystem besteht aus den grundlegenden drei Komponenten [11,49,54]:

- einer Datenbasis,
- einer Menge von Produktionsregeln und
- einer Systemsteuerung.

Eine Produktionsregel oder Produktion ist eine Anweisung in der Form:

WENN diese *Bedingung* erfüllt ist, DANN diese *Aktion* ausführen.

Die Ausführung der Aktion führt zu einer Datenänderung in der Datenbasis. Die Systemsteuerung kontrolliert die Systemaktivität und trifft die Auswahl, welche der Produktionen mit erfülltem Bedingungsteil zuerst zur Ausführung kommt.

Der Aufbau von komplexeren Strukturen aus weniger komplexen Strukturen mittels Produktionen kann durch ein Ersetzungssystem beschrieben werden. In Anlehnung an die formalen Sprachen [68] 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 [74]:

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

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.

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. 3-1a spezifizierten Produktionen $\{P_1, P_2, P_3\}$, die Teilobjekte $\{C, D, E\}$ zusammengesetzt, wobei die Objekte E die Zielobjekte bilden.

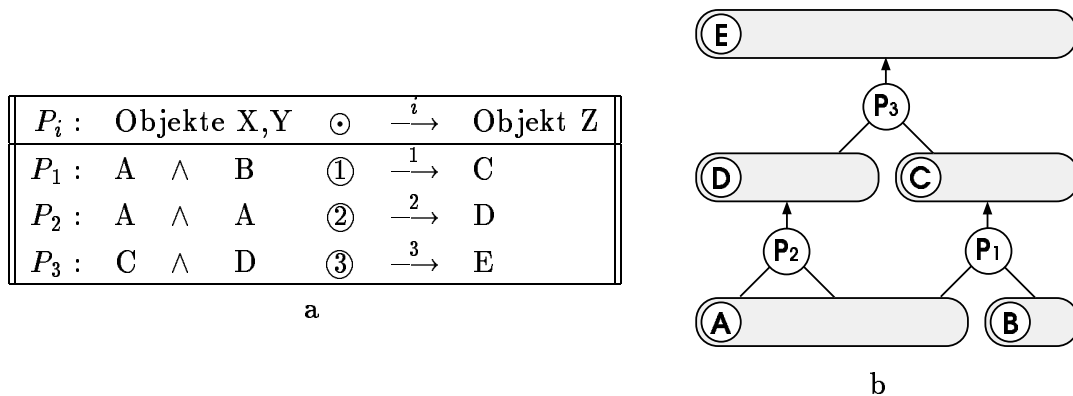


Abb. 3-1: Produktionen. a) Tabelle der Produktionen, b) Produktionsnetz

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. 3-1b dargestellte Produktionsnetz gibt ebenso wie die Tabelle (Abb. 3-1a) den Zusammenhang zwischen den in Grammatik G_{Bsp} angegebenen Objekttypen (Objektkonzepten) 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. 3-17).

Bei dem Entwurf eines Produktionsnetzes zur Mustererkennung wird durch Wahl von geeigneten Objektkonzepten und Prädikaten erwartet, daß die in den einzelnen Stufen generierte Anzahl der Instanzen zu höheren Stufen hin abnimmt. Wenn dies der Fall ist, wirkt das Produktionsnetz auf angebotene Strukturen wie ein Filter. Eine ungünstige Wahl der Objektkonzepte und Prädikate kann zu einer *kombinatorischen Explosion* (siehe z.B [30]) im Suchraum führen.

3.1.2 Blackboard-Architektur

Die Blackboard-Architektur wurde erstmals in [53] vorgestellt. Die grundlegende Arbeitsweise kann anschaulich durch eine Metapher dargestellt werden:

”Man stelle sich vor, daß zur kooperativen Lösung eines Problems eine Gruppe von Spezialisten mit unterschiedlichen Wissen benötigt wird. Die Spezialisten sind alle um eine Tafel (Blackboard) versammelt, um Zwischenergebnisse und Hypothesen zu diskutieren. Sobald durch einen Spezialisten Daten auf die Tafel geschrieben werden, können andere Spezialisten entscheiden, ob sie die Daten verwenden können. Die Spezialisten schreiben ihre eigenen Ergebnisse auf die Tafel, um zum Problemlösungsprozeß beizutragen. Diese Zwischenergebnisse können möglicherweise von anderen Spezialisten wiederum verwendet werden, um den Problemlösungsprozeß fortzuführen. Der Prozeß läuft so lange, bis eine Lösung für das Problem gefunden wird oder keiner der Spezialisten mehr mit den auf der Tafel angeschriebenen Daten etwas anfangen kann.”

Die grundlegenden Komponenten eines Blackboardsystems sind in Abb. 3-2 dargestellt. Im Blackboardsystem übernehmen sogenannte *Wissensquellen* (*knowledge sources*) die Rolle der Spezialisten und eine *globale Datenbasis* wird als Tafel (*blackboard*) genutzt. Einer dem System zugefügten *Steuereinheit* (*control unit*) kommt die Rolle eines Diskussionsleiters zu.

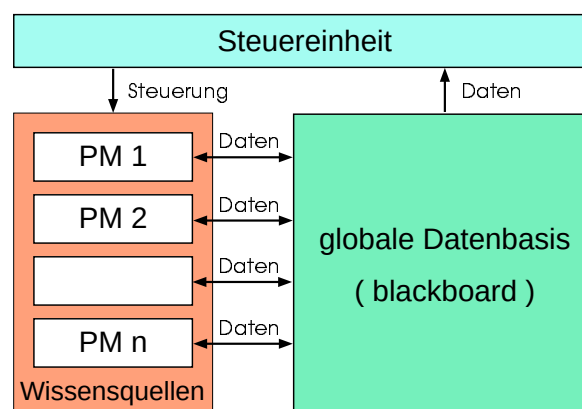


Abb. 3-2: Blackboard-Architektur

3.1.3 BPI-System

Im BPI-System ist die globale Datenbasis in Form eines *Assoziativspeichers* realisiert und die Steuereinheit besitzt eine prioritätsgeordnete Warteschlange. Die Wissensquellen sind durch unabhängige Verarbeitungsmodulare (PM1...PMn) implementiert, die nur über das Blackboard kommunizieren. Unter dem Aspekt eines Produktionssystems realisieren die Verarbeitungsmodulare die Überprüfung der *Bedingung* und Ausführung der *Aktion* einer Produktion. Jedes Verarbeitungsmodul ist einer Produktion zugeordnet. Der Parser des BPI-Systems arbeitet, ähnlich wie bei den Tabellenparsern [2], kumulativ, d.h. die ersetzte Konfiguration wird nicht gelöscht. Alle erzeugten Zwischenergebnisse (Teilobjekte) bleiben also für die Dauer einer Analyse im Blackboard gespeichert.

Assoziativspeicher

Ein schneller inhaltsadressierter Zugriff auf Objektmengen wird durch eine spezielle Hardwarerealisierung eines Assoziativspeichers ermöglicht. Das Speicherkonzept, das die Datenbasis in invertierter Form bereitstellt, ist in Abb. 3-3 verdeutlicht.

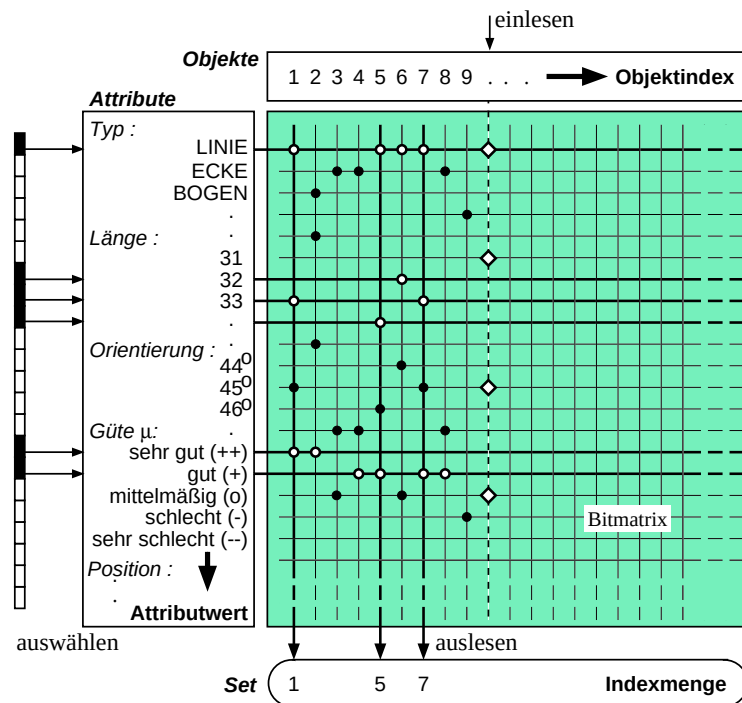


Abb. 3-3: Schematischer Aufbau des Assoziativspeichers (nach [33,75])

Die Zuordnung von Attributwerten zu Objekten erfolgt über eine Bitmatrix, wobei in den Spalten die Objekte (gekennzeichnet durch den Index) und in den Zeilen die einzelnen Attributwerte (z.B. *Länge=31*, *Länge=32*, *Länge=33* usw.) eingetragen sind. Das heißt, jedem Attributwert ist ein Bitvektor (Zeile) zugeordnet, der für jedes Objekt eine

Bitposition besitzt. In diesen Bitvektoren wird vermerkt, welche Objekte den zum Bitvektor gehörigen Attributwert besitzen. Ein neues Objekt wird *eingelassen* (Abb. 3-3 oben), indem in einer freien Spalte die zugehörigen Attributwerte durch Setzen entsprechender Bits markiert werden. Als Beispiel ist in Abb. 3-3 das Objekt LINIE mit der *Länge=31*, der *Orientierung=45°* und der *Güte=mittelmäßig* durch vier Rauten gekennzeichnet. Der gezielte *Zugriff* auf Objektmengen (Abb. 3-3 links) erfolgt durch Angabe von Attributwerten, Attributintervallen und Mengenoperatoren (z.B. alle Objekte des Typs: LINIE, mit der *Länge > 31* und der *Güte gut (+)* oder *sehr gut (++)*). Durch logische Verknüpfung der Mengen ist ein effizienter Zugriff möglich [13]. Von der Hardware wird eine Indexmenge *ausgelesen*, in der alle Objekte enthalten sind, die die ausgewählten Attributwerte besitzen. (Abb. 3-3 unten; die Bedingung erfüllen die Objekte mit dem Index: 1,5,7)

Datenfluß im BPI-System

Der Datenfluß im BPI-System ist in Abb. 3-4 schematisch dargestellt. Zu Beginn einer Analyse werden die Primitivobjekte mit ihren Attributwerten im Blackboard gespeichert (1). Weiterhin werden sie als bewertete *Elemente* in die prioritätsgeordnete Warteschlange eingetragen (2). Dann beginnt die datengetriebene Analyse mit der Verarbeitung von Elementen, die entsprechend ihrer Bewertung in die Warteschlange eingeordnet sind.

Das erste Element wird aus der Warteschlange entnommen und geprüft, ob dem Element X eine Hypothese Z zugeordnet ist.

Ist dies nicht der Fall (3), werden dem Element eine oder mehrere Hypothesen zugewiesen und die Element-Hypothesen-Paare (Verarbeitungselemente $X|Z$) wieder in die Warteschlange eingefügt (4). So werden beispielsweise für ein Element LINIE, das die Hypothesen *Teil_von_LANGELINIE* und *Teil_von_STREIFEN* erhält, zwei Verarbeitungselemente eingetragen. Wird ein Verarbeitungselement $X|Z$ aus der Warteschlange entnommen (5), so stößt dieses Verarbeitungselement zur Überprüfung der Hypothese *Teil_von_Z* ein spezielles Verifikationsprogramm (Verarbeitungsmodul) an.

In dem Verarbeitungsmodul Z wird versucht, eine Bestätigung der Hypothese zu erzielen und gegebenenfalls das Objekt Z zu generieren. Diese vom *triggernden* Element $X|Z$ angeforderte Verarbeitung findet in vier Schritten (Z1-Z4) statt.

- Z1:** Zunächst werden in Abhängigkeit der Attributwerte von X Suchbereiche für die Attributwerte von Objekt Y bestimmt.
- Z2:** Die Suchbereiche werden logisch verknüpft und die Objekte Y assoziativ ausgewählt (6). Die ausgelesene Indexmenge wird untersucht.
- Z3:** Kann die Hypothese bestätigt werden (7) d.h. die Indexmenge ist nicht leer, so werden aus den Attributwerten der Instanzen X und Y die Attributwerte der neuen Instanz Z inklusive der Bewertung berechnet. Kann die Hypothese nicht

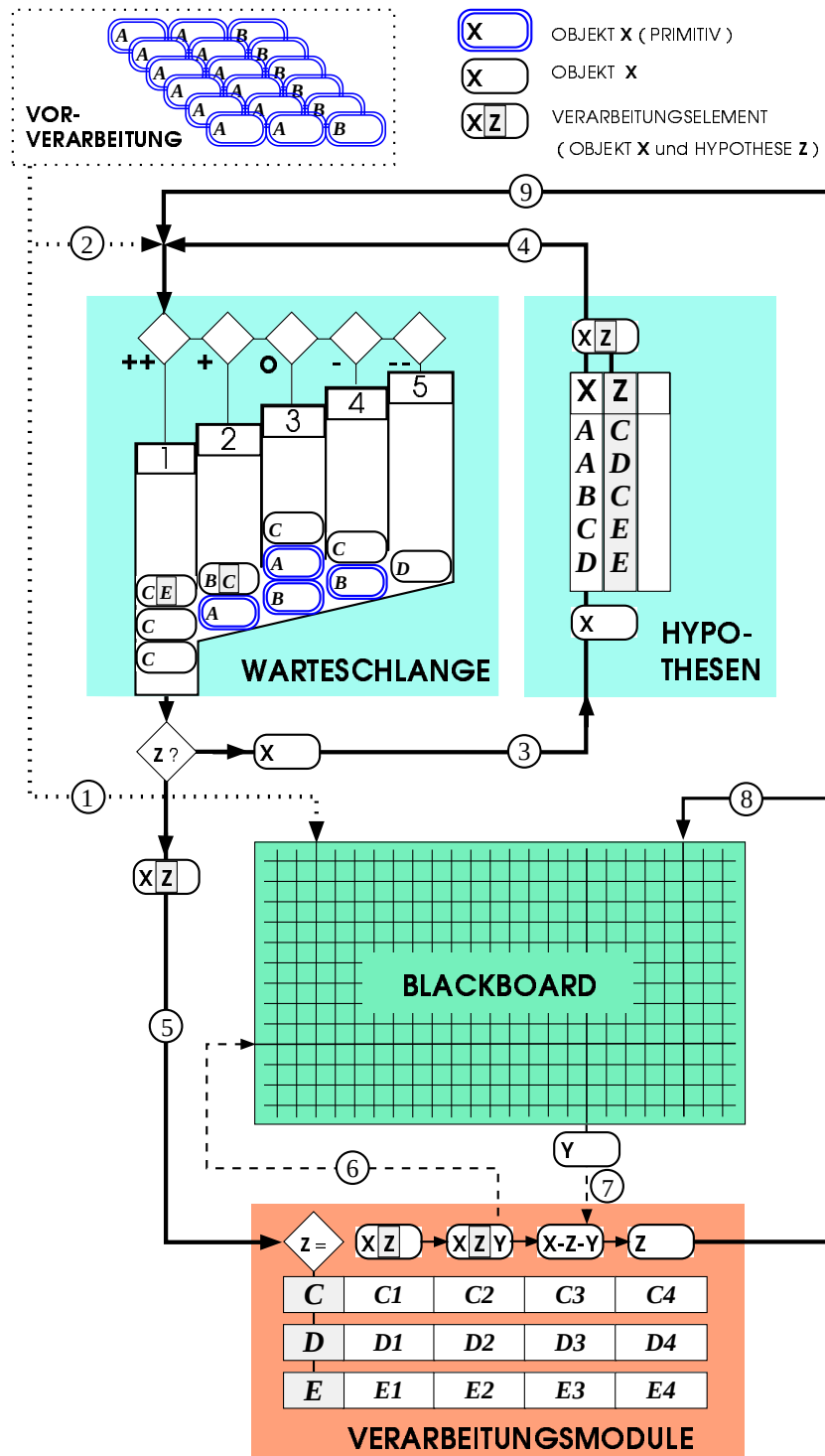


Abb. 3-4: BPI-System: Datenfluß (nach [33,75])

bestätigt werden, d.h. die Indexmenge ist leer, wird die angeforderte Verarbeitung abgebrochen und das nächste Element aus der Warteschlange entnommen.

Z4: Im letzten Schritt wird geprüft, ob die neue Instanz Z bereits im Blackboard existiert. Ist Z nicht vorhanden, so wird es ins Blackboard eingetragen (8) und ein Element entsprechend der Bewertung in die Warteschlange eingetragen (9). Ist Z bereits vorhanden, so wird die Verarbeitung abgebrochen und das nächste Element aus der Warteschlange entnommen.

Das Verarbeitungsmodul realisiert in den Schritten Z1 und Z2 die Überprüfung des Bedingungsteils einer Produktion P_i und in den Schritten Z3 und Z4 die objektspezifische Funktion $\xrightarrow{i}$ zur Generierung von Z (siehe S. 32). Weitere Erläuterungen zur allgemeinen Struktur der Verarbeitungsmodule und zur Überprüfung spezieller geometrischer Relationen findet man in [74].

In verschiedenen Regionen des Bildes wachsen so kompatible Objekte zu komplexeren Objekten heran. Der Aufbau von Teilobjekten wird solange fortgeführt, bis die Menge der zu verarbeitenden Elemente in der Warteschlange leer ist oder die Zielobjekte aufgebaut sind. Die Art der Problemlösung läßt sich mit einem Puzzle-Spiel vergleichen [55], bei dem man durch den Vorgang von *Suchen* und *Probieren* solange passende Teile zusammenfügt, bis eine vorgegebene Struktur vollständig zusammengesetzt ist. Der bei der Bildanalyse durchgeführte Prozeß kann als Suche (siehe Kap. 3.1.4) nach zulässigen Konfigurationen von Objekten interpretiert werden.

Funktion der Verarbeitungsmodule und Analyseablauf

Der Analyseablauf soll an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden. Gehen wir davon aus, daß als Primitivobjekte nur die vier Instanzen $\{A_1, A_2, A_3, B_4\}$ vorliegen, wobei der Buchstabe den Objekttyp und der Index die Generierungsreihenfolge angibt. Die Instanzen sollen solche Attribute besitzen, daß die Struktur der Konfiguration durch das Symbol E bzw. Zielobjekt E beschrieben wird. Die zugrundeliegenden Produktionen seien die bereits in Abb. 3-1a angenommenen Produktionen P_1 , P_2 und P_3 .

Aufgrund der Produktionen P_1 und P_2 können den Instanzen A_1 , A_2 und A_3 jeweils die Hypothesen *Teil_von_C* und *Teil_von_D* und der Instanz B_4 die Hypothese *Teil_von_C* zugeordnet werden (siehe Abb. 3-4).

Nehmen wir an, daß aus der Warteschlange das Verarbeitungselement $A_1|C$ (Objekt A_1 mit der Hypothese *Teil_von_C*) entnommen wird. Dieses Element *triggert* das Verarbeitungsmodul C, wodurch ein Objekt B gesucht wird, das mit A_1 das Prädikat $\odot$ erfüllt. B_4 sei mit A_1 kompatibel, so daß die Instanz C_5 generiert wird. In Abb. 3-5a ist dieser Vorgang graphisch dargestellt, wobei das triggernde Objekt mit dem vom Objekt ausgehenden Pfeil, die Erfüllung des Bedingungsteils durch den Knoten $\odot$ und die Erzeugung durch den vom Knoten ausgehenden Pfeil gekennzeichnet ist.

Das Objekt C_5 wird wiederum in das Blackboard und als Element in die Warteschlange eingetragen. Nun werde dem Element C_5 die Hypothese *Teil_von_E* zugeordnet und die-

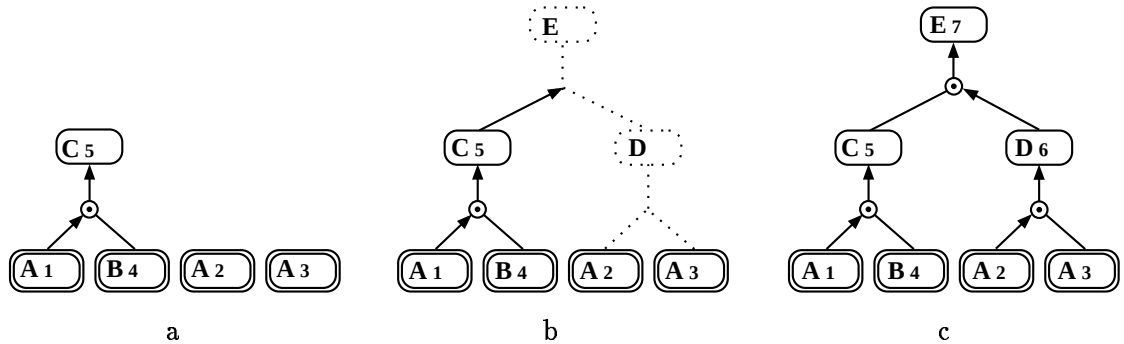


Abb. 3-5: Aufbau der Zielinstanz E_7 (nach [75])

ses Verarbeitungselement $C_5|E$ als nächstes aus der Warteschlange entnommen. In dem vom Element C_5 getriggerten Verarbeitungsmodul E wird das Objekt D gesucht. Da nun das Verarbeitungselement $C_5|E$ vor den Elementen A_2 und A_3 triggert, konnte das Objekt D noch nicht generiert werden (siehe Abb. 3-5b). Da Objekt D nicht existiert, geht die Überprüfung der Hypothese negativ aus und Objekt E wird nicht generiert.

Im weiteren Verlauf der Analyse werden jedoch die Verarbeitungselemente $A_2|D$ oder $A_3|D$ triggern um das Objekt D zu generieren (siehe Abb. 3-5c). Das Verarbeitungselement $D|E$ wiederum wird das bereits generierte Objekt C_5 finden, um das Zielobjekt E aufzubauen.

Um den dargestellten Ablauf auszuführen, muß somit sowohl dem Element C als auch dem Element D die Hypothese *Teil_von_E* zugeordnet werden und beide Verarbeitungselemente müssen das Verarbeitungsmodul E triggern können. Sind in der Eingangskonfiguration einer Produktion Objekte verschiedenen Typs angegeben, wie z.B. in P_3 (Abb. 3-1a), so kann auch die Konstruktion der Suchbereiche unterschiedlich sein, je nachdem ob Verarbeitungselement C oder D das Verarbeitungsmodul E triggert.

Sind in der Eingangskonfiguration einer Produktion nur Primitivobjekte enthalten, wie z.B. in P_1 (Abb. 3-1a), so ist eine *beidseitige* Hypothesenzuweisung zur Generierung von C nicht zwingend notwendig. Da die Primitivobjekte nicht aus anderen Objekten erzeugt werden, kann von ihrer Existenz zu Beginn einer Analyse ausgegangen werden. Soll jedoch bei der datengetriebenen Analyse die Reihenfolge der Generierung von Instanzen nur von den vorliegenden Instanzen selber abhängen und a priori nicht beschränkt sein, so ist eine beidseitige Hypothesenzuweisung notwendig.

Triggern im Laufe einer Analyse beispielsweise die Verarbeitungselemente $A_2|D$ und $A_3|D$ jeweils das Verarbeitungsmodul D , so wird durch den Schritt Z4 (siehe S. 35) des Verarbeitungsmoduls (Abb. 3-4 D4) sichergestellt, daß die Instanz D_6 mit den gleichen Attributwerten nicht zweimal generiert wird.

3.1.4 Bildanalyse und Suchproblem

Die Arbeitsweise eines Produktionssystems kann durch einen Suchprozeß gekennzeichnet werden [54]. Es werden dabei solange Produktionen ausprobiert, bis eine Sequenz von Produktionen gefunden wird, die einen Zustand der Datenbasis erreichen, der einem Abbruchkriterium genügt. Der Suchvorgang bei der Bildanalyse wird im folgenden an einem Beispiel verdeutlicht.

Nehmen wir an, daß zu erkennende Objekte im Bild eine rechteckförmige Kontur besitzen, nur an bestimmten, durch ein Raster beschriebenen Positionen auftreten und auch nur bestimmte Orientierungen besitzen. Der Bildinhalt sei für eine Analyse hinreichend durch eine Menge der Primitivobjekte vom Typ ECKE erfaßt. Die Primitivobjekte werden in einer Vorverarbeitungsstufe erzeugt.

Stellen wir uns vor, daß zur Detektion der Ecken an bestimmten Positionen im Bild eine Korrelation mit Masken durchgeführt wird (siehe z.B. [75]). Dabei werden acht Masken mit den Orientierungen $\varphi = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$ verwendet und geprüft, welche Maske die maximale Übereinstimmung erreicht (Abb. 3-6). Die Position $p=(x,y)$ und Orientierung φ der Maske bilden die Attributwerte der Primitivobjekte ECKE, die in eine Liste eingetragen werden. Zusätzlich wird eine Güte g aus dem Korrelationswert abgeleitet.

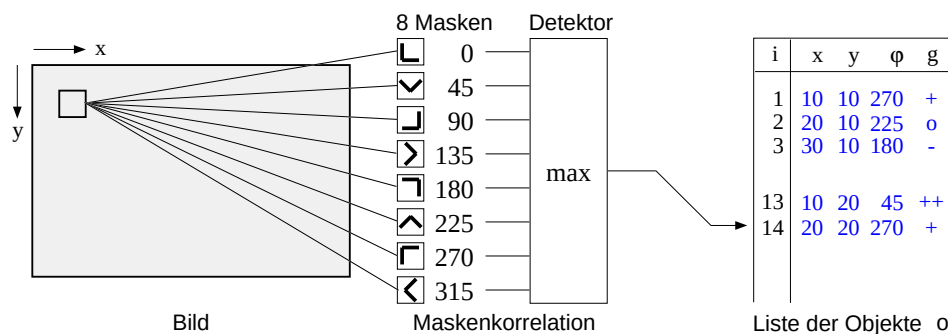


Abb. 3-6: Schema zur Generierung der Primitivobjekte ECKE

Gegeben: Gegeben ist eine Liste von Primitivobjekten o_i , die die Attribute x, y und φ tragen. Aufgrund von Störungen werden nun nicht nur die tatsächlichen Ecken der Rechtecke detektiert, sondern zusätzlich auch Ecken, die nicht zu rechteckförmigen Objekten gehören. Es wird weiterhin angenommen, daß vier Ecken, die aufgrund von Störungen entstanden sind, nicht zufällig genau so positioniert und orientiert sind, daß sie ein Rechteck bilden. Die Objekte einer angenommenen Liste mit 96 Primitivobjekten sind in Abb. 3-7 graphisch dargestellt.

Aufgabe: Aufgabe ist es, ein oder mehrere Rechtecke zu finden, die sich aus vier Primitivobjekten ECKE zusammensetzen lassen. Im weiteren soll bei der Aufgabenstellung noch unterschieden werden, ob es sich um eine *Verifikation* (bzw. Lokalisation) oder um eine *Klassifikation* handelt. Beispielsweise könnte die Aufgabe lauten für eine

Welche Ecken bilden ein Rechteck ?

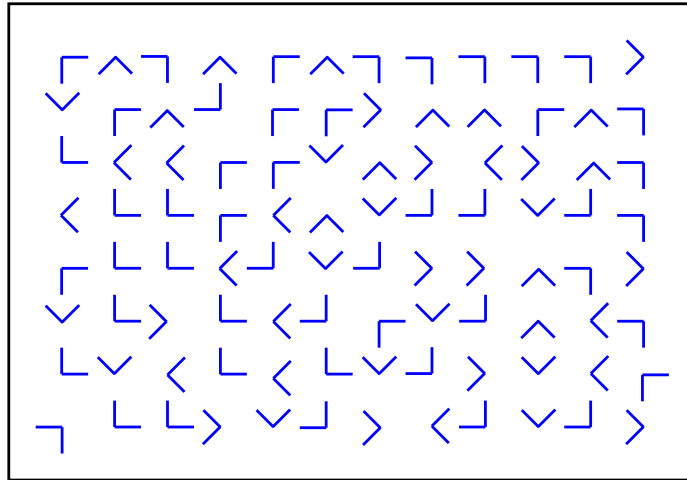


Abb. 3-7: Graphische Darstellung der Liste von Primitivobjekte ECKE.

Verifikation: Ist in dem Bild das Rechteck enthalten?

oder: Wo im Bild befindet sich das Rechteck?

oder: Ist in dem Bild wenigstens ein Rechteck enthalten?

Klassifikation: Welche Primitivobjekte bilden ein Rechteck, welche nicht?

Während im ersten Fall eine Analyse nach der Bestimmung eines oder auch mehrerer vorgegebener Zielobjekte abgebrochen werden kann, ist im zweiten Fall eine vollkommene Untersuchung aller möglichen Zielobjekte notwendig.

Bei der **Lösung** der Aufgabe sollen einige Aspekte zur Vorgehensweise und Komplexität dargestellt werden: Ein einfacher Ansatz zur vollständigen Suche kann wie folgt beschrieben werden: Man greife aus der Menge der Primitivobjekte systematisch nacheinander jeweils eine Probe von vier Instanzen $S = \{o_i, o_j, o_l, o_m\}$ heraus und prüfe durch Auswertung der Attributwerte, ob die vier Instanzen ein Rechteck bilden.

Geordnete Probe. Werden für die Überprüfung die *geordneten* Proben von k Elementen aus n Elementen gebildet, so sind insgesamt $n_v = \frac{n!}{(n-k)!}$ Proben zu bilden. Im vorliegenden Beispiel fallen zur Überprüfung mit $n_E=96$ und $k=4$ demnach $n_v = n_E(n_E - 1)(n_E - 2)(n_E - 3) = 79.727.040$ Proben an.

Ungeordnete Probe. Werden für die Überprüfung die *ungeordneten* Proben von k Elementen aus n Elementen gebildet, so sind insgesamt $n_v = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ Proben zu bilden. Im vorliegenden Beispiel fallen zur Überprüfung mit $n_E=96$ und $k=4$ demnach $n_v = n_E(n_E - 1)(n_E - 2)(n_E - 3)/1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 3.321.960$ Proben an. Wie bei der geordneten Probe ist $n_v \sim n_E^4$. Der Algorithmus zur Bildung der Proben S stellt sich wie folgt dar:

```

FOR i:= 1 TO (n-3) DO
  FOR j:= (i+1) TO (n-2) DO
    FOR l:= (j+1) TO (n-1) DO
      FOR m:= (l+1) TO n DO
        Prüfe  $S = \{o_i, o_j, o_l, o_m\}$ 
      ENDFOR
    ENDFOR
  ENDFOR
ENDFOR

```

Teilmengen prüfen. Die Zahl der zu untersuchenden Proben S kann gesenkt werden, wenn bereits schon bei einer Teilmenge S' der Probe S an k' Instanzen ersichtlich ist, daß die Überprüfung negativ ausfällt, d.h. das Zielobjekt durch die k' Instanzen nicht aufgebaut werden kann. Alle Proben S , die die Teilmenge S' enthalten, brauchen dann nicht mehr untersucht zu werden. Daher ist es sinnvoll, stufenweise Teilmengen der Proben zu bilden, z.B. zweielementige Teilmengen S_2 und dreielementige Teilmengen S_3 und zunächst diese zu untersuchen. Sind die beiden Instanzen einer zweielementigen Teilmenge S_2 nicht kompatibel, so entfällt auch die Untersuchung der verbundenen vierelementigen Proben.

```

FOR i:= 1 TO (n-3) DO
  FOR j:= (i+1) TO (n-2) DO
    Prüfe  $S_2 = \{o_i, o_j\}$ 
    IF  $S_2$  kompatibel THEN
      FOR l:= (j+1) TO (n-1) DO
        Prüfe  $S_3 = \{o_i, o_j, o_l\}$ 
        IF  $S_3$  kompatibel THEN
          FOR m:= (l+1) TO n DO
            Prüfe  $S_4 = \{o_i, o_j, o_l, o_m\}$ 
          ENDFOR
        ENDIF
      ENDFOR
    ENDIF
  ENDFOR
ENDFOR

```

Könnte für Proben von Teilmengen festgestellt werden, daß die Instanzen kompatibel sind, so bietet sich unter bestimmten Bedingungen eine Speicherung des Zwischenergebnisses an.

Diese Zwischenergebnisse können auch als Teilobjekte bezeichnet werden. Im vorliegenden Beispiel soll die zweielementige Probe benachbarter Objekte den Namen KANTE (K) und die dreielementigen Proben den Namen WINKEL (W) erhalten (siehe Beispiel in Abb. 3-9).

Die Gesamtzahl der durchzuführenden Überprüfungen hängt nun nicht mehr alleine von der Anzahl der Primitivobjekte, sondern auch von der Anzahl der auf jeder Stufe gene-

rierten Teilobjekte ab. Die Anzahl der generierten Teilobjekte wird generell durch die repräsentierten Bildinhalte und die verwendete Grammatik bestimmt.

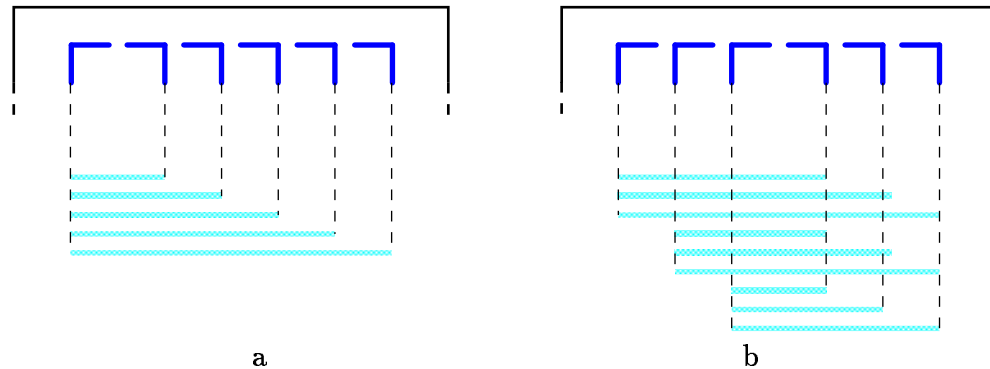


Abb. 3-8: Paarungen von Objekten ECKE mit schwachem Prädikat (unscharfer geometrischen Bedingung). a) Beispiel A, b) Beispiel B

In Abb. 3-8 sind zwei Beispiele mit jeweils sechs Primitivobjekten ECKE dargestellt. Während im Beispiel A nur fünf Teilobjekte KANTE erzeugt werden können, sind es im Beispiel B neun Teilobjekte KANTE.

Zur Untersuchung des Aufwands soll die *Anwendung* einer einzelnen Produktion betrachtet werden. Durch mehrfache *Überprüfung* und *Ausführung* der Produktion werde eine bestimmte Eingangsmenge von Objekten (z.B. ECKE) in eine Ausgangsmenge von Objekten einer höheren Stufe (z.B. KANTE) überführt (siehe P_1 in Abb. 3-9). Ein Ob-

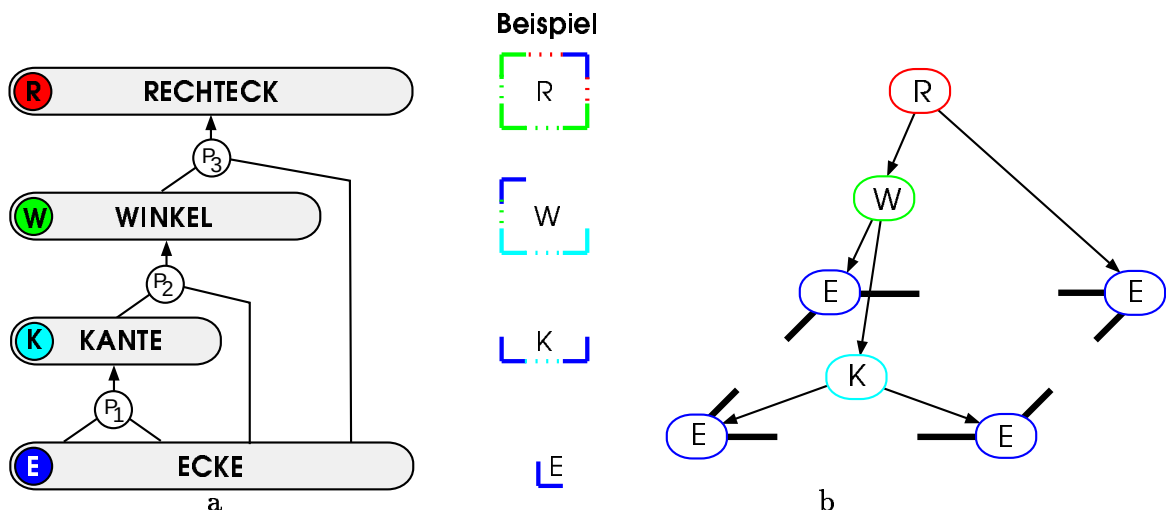


Abb. 3-9: a) Produktionsnetz zum Aufbau des Zielobjektes RECHTECK, b) Ableitungsgraph in 3D-Darstellung

jekt KANTE wird aus zwei kompatiblen Objekten ECKE gebildet. Ordnet man jedem Element ECKE die Hypothese *Teil_von_KANTE* zu, so sind zur Überprüfung der Hypothesen n_E Elemente mit $(n_E - 1)$ Elementen zu kombinieren und somit $n_E(n_E - 1)$

Überprüfungen durchzuführen. Dabei werden $\frac{n_E(n_E-1)}{2}$ ungeordnete Paarungen untersucht, d.h. es können maximal $\frac{n_E(n_E-1)}{2}$ Objekte generiert werden.

Die Zahl der durchzuführenden Überprüfungen n_v kann wegen der quadratischen Abhängigkeit $n_v \sim n_E^2$ bei dieser Vorgehensweise sehr hoch werden. Die Anzahl der Überprüfungen kann gesenkt werden, wenn zu einem Objekt o_t nur solche Objekte o_i betrachtet werden, die aufgrund der Attributwerte von o_t für eine kompatible Paarung in Frage kommen.

Orientierung. Geht man beispielsweise von einem Objekt ECKE mit der Orientierung $\varphi_t = 270^\circ$ aus, so kommen für die Bildung eines Objektes KANTE nur Objekte ECKE mit der Orientierung $\varphi = 180^\circ$ oder $\varphi = 0^\circ$ in Frage (siehe Abb. 3-10b). Zur Orientierung φ_t eines Objektes werden die kompatiblen Orientierungen durch den Orientierungsbereich R_φ definiert:

$$R_\varphi = \{ \varphi; (\varphi = \varphi_t - 90^\circ) \vee (\varphi = \varphi_t + 90^\circ) \}$$

Die Menge S der kompatiblen Objekte ergibt sich aus der Menge der Objekte ECKE, deren Orientierung im Orientierungsbereich R_φ liegt:

$$S = \{ o; Typ(o) = ECKE \} \cap \{ o; \varphi(o) \in R_\varphi \}$$

Die Objekte der Menge S sind in Abb. 3-10 grün markiert. Im Beispiel aus Abb. 3-7 sind die acht vorkommenden Orientierungen gleichverteilt, d.h. zu jeder Orientierung existieren 12 Objekte. Für diesen Fall reduzieren sich die zu einem Objekt auszuführenden paarweisen Überprüfungen von $n_{vt} = (n_E - 1) = 95$ auf $n_{vt} = 2 (n_E/8) = 24$.

Position. Eine Einschränkung der zu überprüfenden Menge von Objekten kann ebenso über die Position erreicht werden. Beispielsweise braucht man zu einem Objekt mit der Position $p_t = (x_t, y_t)$ nur solche Objekte betrachten, die auf der gleichen Zeile, der gleichen Spalte und den Diagonalen durch (x_t, y_t) liegen. Bezeichnet R_A die Menge der in Frage kommenden Positionen, so ergibt sich die zu untersuchende Menge S aus der Menge der Objekte ECKE, deren Position in dem Positionierungsbereich (Fläche) R_A liegt:

$$S = \{ o; Typ(o) = ECKE \} \cap \{ o; p(o) \in R_A \}$$

Position und Orientierung. Durch Verknüpfung der Einschränkungen zur Position und Orientierung erreicht man eine weitere Reduktion der zu untersuchenden Paarungen.

$$S = \{ o; Typ(o) = ECKE \} \cap \{ o; p(o) \in R_A \} \cap \{ o; \varphi(o) \in R_\varphi \}$$

Position mit Orientierung. Der Positionierungsbereich R_A kann unter Berücksichtigung der Orientierung φ_t weitergehend eingeschränkt werden. Liegt für ein Objekt ECKE beispielsweise die Orientierung $\varphi_t = 270^\circ$ vor, so brauchen nur Objekte auf der Spalte x_t und Zeile y_t , nicht jedoch auf den Diagonalen durch (x_t, y_t) berücksichtigt zu werden (siehe Abb. 3-10). Weiterhin kommen für eine Paarung auch nur rechts in der Zeile und unterhalb in der Spalte liegende Objekte in Frage. Damit ergeben sich für die Zeile und Spalte die Positionierungsbereiche R_{A1} und R_{A2} :

$$R_{A1} = \{ (x, y); (x > x_t) \wedge (y = y_t) \}$$

$$R_{A2} = \{ (x, y); (x = x_t) \wedge (y > y_t) \}$$

Objekte, deren Position in R_{A1} liegt sind nur dann kompatibel, wenn sie die Orientierung $\varphi = 180^\circ$ besitzen. Das entsprechende gilt für R_{A2} und $\varphi = 0^\circ$, so daß der Orientierungsbereich R_φ in R_{φ_1} und R_{φ_2} unterschieden wird:

$$R_{\varphi_1} = \{ \varphi; (\varphi = \varphi_t - 90^\circ) \}$$

$$R_{\varphi_2} = \{ \varphi; (\varphi = \varphi_t + 90^\circ) \}$$

Verwendet man die Positionierungsbereiche R_{A1} und R_{A2} und die Orientierungsbereiche R_{φ_1} und R_{φ_2} zur Bildung der zu untersuchende Menge S in folgender weise:

$$S = \{ o; Typ(o) = ECKE \} \cap ((\{ o; p(o) \in R_{A1} \} \cap \{ o; \varphi(o) \in R_{\varphi_1} \}) \cup (\{ o; p(o) \in R_{A2} \} \cap \{ o; \varphi(o) \in R_{\varphi_2} \}))$$

so bilden alle Objekte in S kompatible Objekte zum Objekt o_t . Weitere Reduktionen der Überprüfungen erreicht man jeweils durch logische UND-Verknüpfung von zusätzlichen Einschränkungen bezüglich der Attributwerte.

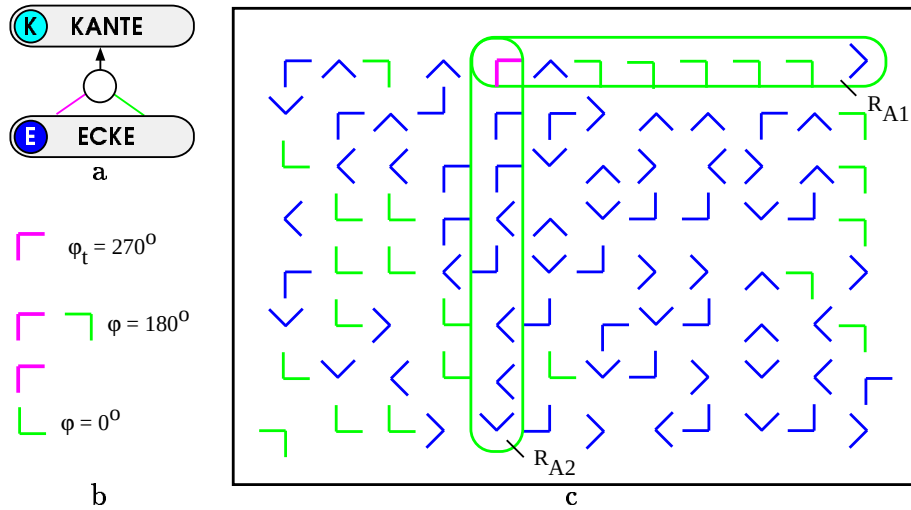


Abb. 3-10: Beispiel zur Auswahl kompatibler Objekte ECKE.

Können bei den Produktionen die Prädikate *scharf* gefaßt werden, weil beispielsweise die geometrischen Eigenschaften eines erwarteten oder zu verifizierenden Objektes bekannt sind, so sinkt nicht nur die Zahl der Überprüfungen, sondern auch die Zahl der generierten Teilobjekte. Wird angenommen, daß die Größe eines zu verifizierenden Rechtecks bekannt ist, so können von den in Abb. 3-8 dargestellten Kanten (Paarungen von Objekten ECKE) aufgrund ihrer Länge einige Paarungen ausgeschlossen werden (Abb. 3-11).

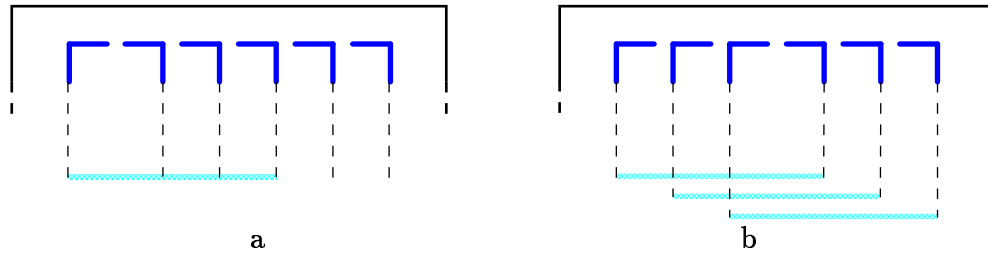


Abb. 3-11: Paarungen von Objekten ECKE mit starkem Prädikat (scharfer geometrischen Bedingung). a) Beispiel A, b) Beispiel B

In den Beispielen der Abb. 3-11 ist von jedem Objekt aus eine Überprüfung durchzuführen; also sechs Überprüfungen mit jeweils einer Paarung. Ist der Erwartungswert für die Mächtigkeit der zu einem Objekt zugehörigen Paarungen ≤ 1 , so reduziert sich die Zahl der Überprüfungen auf die Anzahl der Objekte eines Typs.

Für diesen Fall sinkt die anfänglich angenommene Komplexität von $n(n-1)$ auf n , also um eine Dimension. Eine ausführliche Diskussion zur Komplexität, insbesondere auch unter Berücksichtigung der Bildgröße, findet man in [41].

Bei der vorangegangenen Betrachtung wird davon ausgegangen, daß die Bildung und Verknüpfung von Mengen mit *bestimmten* Attributwerten in einfacher Weise und effizient durchgeführt werden kann. Die Basis für diese Annahme wird durch den assoziativen Zugriff (Abb. 3-3) auf die Datenbasis geschaffen (Kap. 3.1.3).

Für eine Aufgabe im Sinne der *Verifikation* (siehe S. 40) wird man möglichst nur solche Objektmengen untersuchen und nur solche Produktionen anwenden, die zum Aufbau des erwarteten Zielobjektes führen. Wird das Zielobjekt gefunden, kann die Analyse abgebrochen werden. Will man das Zielobjekt mit möglichst wenig Rechenaufwand aufbauen, so spielt die Bearbeitungsreihenfolge eine Rolle. Die Bearbeitungsreihenfolge wird durch die Güte der in der Warteschlange enthaltenen Elemente bestimmt. Auf die Vorgehensweise dieser unvollständigen Suche wird in Kap. 3.3.2 eingegangen.

Liegt eine Aufgabe im Sinne einer *Klassifikation* vor, so müssen alle Elemente überprüft werden. Der Berechnungsaufwand ist abhängig von der Anzahl aller bearbeiteten Elemente, nicht jedoch von deren Bewertung. Es sei n_X die Anzahl der Objekte vom Typ X. Nehmen wir an, daß aus n_E Primitivobjekten ECKE, n_K Teilobjekte KANTE, n_W Teilobjekte WINKEL und n_R Zielobjekte RECHTECK generiert werden. Wird jedem von n_X Objekten X eine Hypothese Z zugeordnet, so entstehen ebensoviel Objekt-Hypothesen-Paare, also $n_{X|Z}$ Verarbeitungselemente. Verwendet man das in Abb. 3-9 dargestellte Produktionsnetz, so sind n_v Überprüfungen anzusetzen:

$$n_v = n_{E|K} + n_{K|W} + n_{E|W} + n_{W|R} + n_{E|R} = 3 n_E + n_K + n_W$$

Geht man davon aus, daß alle Primitivobjekte ECKE zu Beginn der Analyse vorliegen, so sind die $(n_{E|W} + n_{E|R})$ Verarbeitungselemente nicht zwingend notwendig.

Das Analyseergebnis einer Klassifikation ist in Abb. 3-12 graphisch dargestellt.

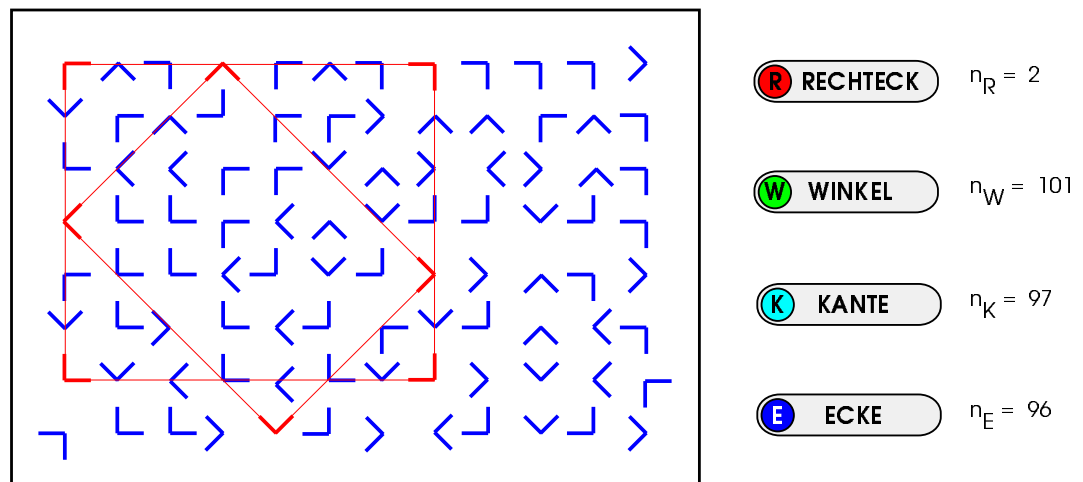


Abb. 3-12: Graphische Darstellung der Analyseergebnisse.

Entwurf des Produktionsnetzes

Der Aufbau eines Zielobjektes aus einer gegebenen Menge von Primitivobjekten kann in verschiedener Weise erfolgen. Je nach Definition von Konzepten für Teilobjekte und Verwendung von Prädikaten ergeben sich unterschiedliche Grammatiken und entsprechende Produktionsnetze. In Abb. 3-13 ist eine Zusammenstellung verschiedener Produktionsnetze für die in Abb. 3-7 dargestellte Aufgabenstellung angegeben. Abb. 3-13Aa zeigt noch einmal das bereits in Abb. 3-9a dargestellte Produktionsnetz. Die Abb. 3-13Ba und Abb. 3-13Ca zeigen zwei weitere Produktionsnetze zur Generierung des Zielobjektes RECHTECK. Im Gegensatz zu dem vorher gezeigten Produktionsnetz sind die Prädikate der Produktionen P_2 und P_3 anders definiert.

Bei dem Produktionsnetz Abb. 3-13Ba wird aus zwei Objekten KANTE direkt ein Objekt RECHTECK generiert. Das Produktionsnetz enthält nur zwei Produktionen. Ein Beispiel für einen Ableitungsgraphen, der sich durch Verwendung des Produktionsnetzes Abb. 3-13Ba ergibt, zeigt Abb. 3-13Bb.

Bei dem Produktionsnetz Abb. 3-13Ca wird aus zwei Objekten KANTE, die dasselbe Objekt ECKE als Vorgängerobjekt besitzen, das Objekt WINKEL generiert. Das Objekt RECHTECK wird wiederum aus zwei Objekten WINKEL zusammengesetzt. Ein Beispiel für einen Ableitungsgraphen, der sich durch Verwendung des Produktionsnetzes Abb. 3-13Ca ergibt, zeigt Abb. 3-13Cb.

Zur Unterscheidung der Produktionsnetze wollen wir die entstehenden Ableitungsgraphen in verschiedene Typen einteilen. Abb. 3-13b zeigt jeweils einen Repräsentanten von Ableitungsgraphen des Typs I, II, III.

Typ III: Der Ableitungsgraph ist baumförmig. Die Teilobjekte wurden jeweils durch Hinzufügen eines weiteren Primitivobjektes aufgebaut.

Typ II: Der Ableitungsgraph ist baumförmig. Die Teilobjekte können aus anderen Teilobjekten ohne Hinzufügen eines Primitivobjektes aufgebaut sein.

Typ I: Der Ableitungsgraph ist nicht baumförmig.

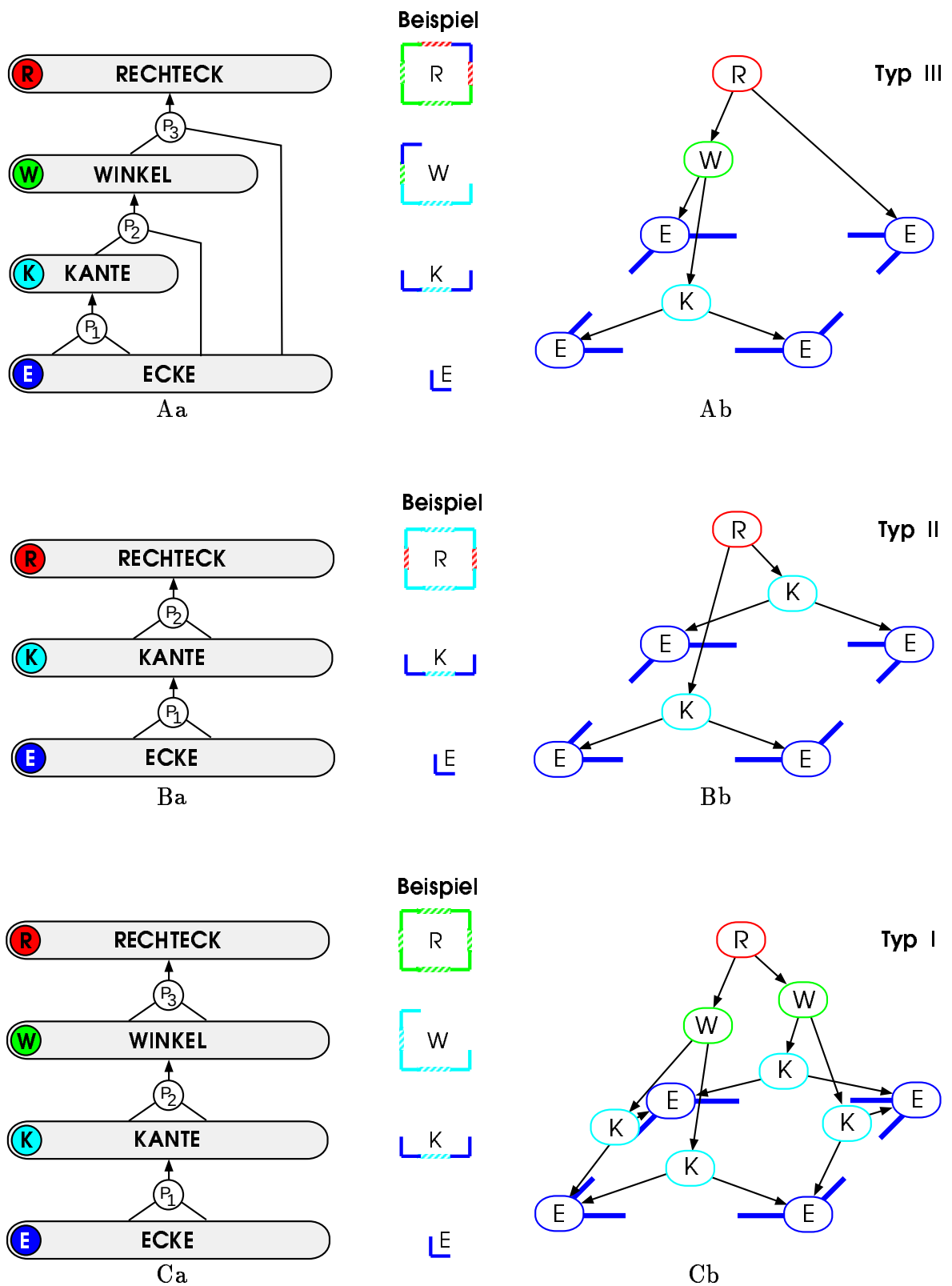


Abb. 3-13: Zusammenstellung von Produktionsnetzen (A,B,C) zum Aufbau des Zielobjektes Rechteck. a) Produktionsnetze zum Aufbau des Zielobjektes Rechteck
b) Ableitungsgraphen in 3D-Darstellung

3.2 Modellierung

Durch Objektmodelle wird das für die Analyse notwendige spezifische Wissen über Objekte (z.B. die Anordnung von Teilobjekten, markante Eigenschaften, Vorschriften zur Berechnung von Attributwerten usw.) erfaßt. Ein Objektmodell enthält neben dem Objektkonzept eine Menge von objektspezifischen Parametern. Mit dem Objektkonzept werden Objekte begrifflich erfaßt und der Rahmen für die Beschreibung eines speziellen Objektes (der Instanz) bereitgestellt. Die objektspezifischen Parameter werden unterschieden in:

Modellparameter bestimmen die geometrischen Merkmale einer idealen Konfiguration.

Toleranzparameter bestimmen die erlaubten geometrischen Abweichungen zur idealen Konfiguration.

Bewertungsparameter bestimmen die Funktionen zur Ermittlung der Bewertung.

Nehmen wir als Beispiel das Objektmodell STREIFEN (siehe Abb. 3-14), das zur Erfassung eines streifenförmigen Vierecks verwendet wird. Unter dem Objektkonzept STREIFEN wollen wir eine Konfiguration von zwei gleich langen, parallel angeordneten und gegenüberliegenden Geradenstücken (Objekt LANGEINIE) verstehen, deren Länge viel größer ist als ihr Abstand zueinander (Abb. 3-14a). Das Objektkonzept STREIFEN (S) (Abb. 3-14d) besitzt zur Beschreibung einer Instanz die Attribute: *Breite* w , *Länge* l , *Orientierung* φ , *Position* p , *Bewertung* μ und einige *Hilfsattribute*. Die Hilfsattribute wie z.B. *Eckpunkte* des Objektes STREIFEN werden für den assoziativen Zugriff und eine schnelle graphische Ausgabe zusätzlich gespeichert.

Benutzt man nun dieses Modell z.B. zur Erfassung von Straßen oder Straßenstücken einer bestimmten Straßenklasse mit typischer Breite, so läßt sich das Modell mit den Modellparametern *Breite* w_0 und *Mindestlänge* l_0 konkretisieren. Für die *Mindestlänge* nehmen wir $l_0 = 2w$ an.

Der Wert eines Modellparameters kann für ein bestimmtes Objektkonzept typisch sein. So unterscheiden sich z.B. die Objektkonzepte LANDSTRASSE und WEG durch den Modellparameter *Breite* w_0 .

Liegen Werte von Modellparametern a priori nicht fest, sondern werden beispielsweise erst während der Analyse mit Hilfe von Kontextinformationen bestimmt, wie etwa beim Objektkonzept STREIFEN, so bezeichnen wir das Modell als *parametrisiertes* Modell. Entsprechend werden Produktionen, denen Modellparameter beim Aufruf übergeben werden, als *parametrisierte* Produktionen bezeichnet.

Bei der Bearbeitung von Bildern natürlicher Szenen ist davon auszugehen, daß zum einen die Attribute der zu einer Klasse zählenden Individuen gewissen Streuungen unterliegen und zum andern auch Streuungen in den Attributwerten aufgrund von Störungen bei der Bildaufnahme und durch die Verarbeitung entstehen. Bei der Zuordnung von Objektkonzepten zu entsprechenden Strukturen sind also bestimmte Abweichungen in den Attributwerten zu tolerieren.

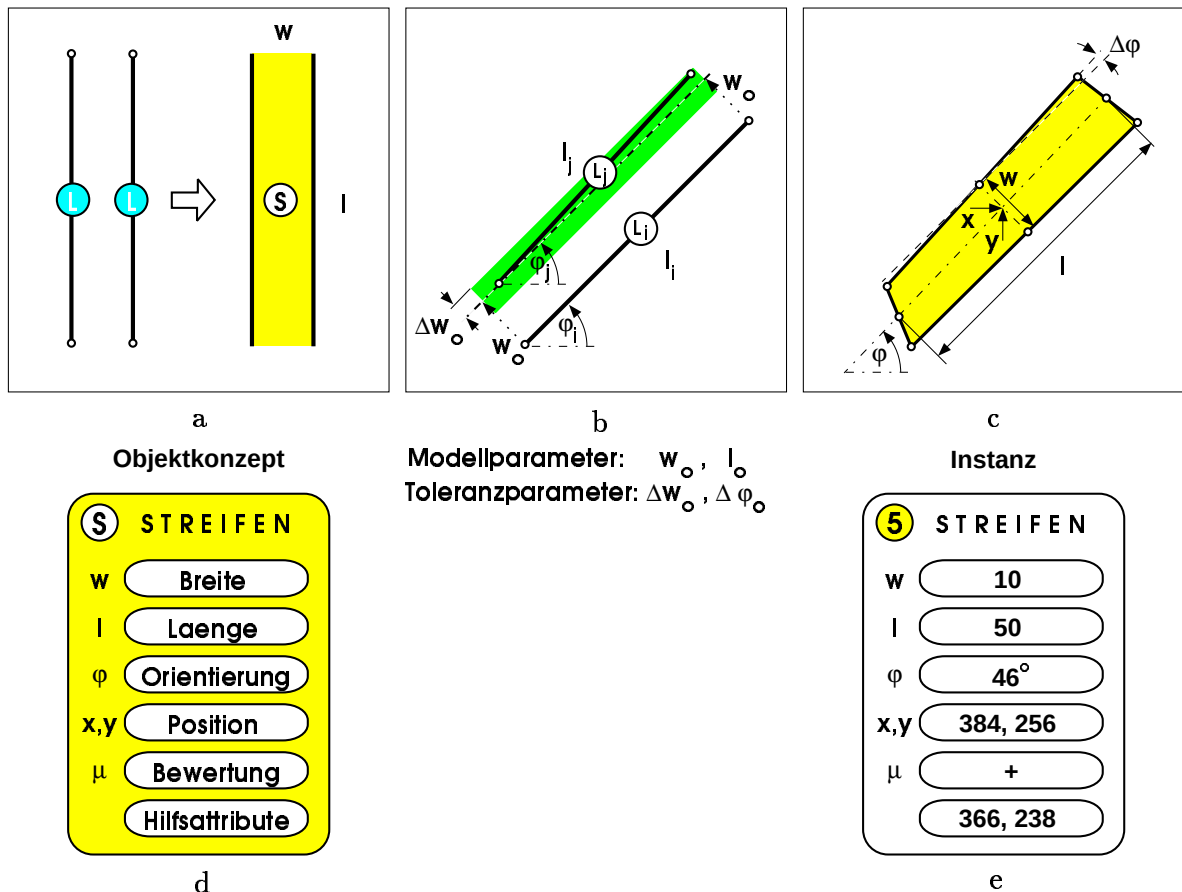


Abb. 3-14: Objektmodell STREIFEN. a) Objektkonzept (geometrische Darstellung), b) Suchfläche, c) Instanz (geometrische Darstellung), d) Objektkonzept, e) Instanz

So kann es vorkommen, daß beispielsweise die als parallel angenommenen Geradenstücke eines Streifens aufgrund von Störungen nicht exakt die gleiche Orientierung φ besitzen oder der tatsächliche Abstand w der Geraden nicht genau mit der angenommenen Streifenbreite w_0 übereinstimmt. Ebenso ist es möglich, daß die Geradenstücke in ihrer Lage gegeneinander verschoben sind oder in ihrer Länge differieren. Die zugelassenen Abweichungen von den Sollwerten werden durch die Toleranzparameter bestimmt. So werden z.B. mit den Toleranzparametern $\Delta w_0, \Delta \varphi_0$ Streifen der Breite $w_0 - \Delta w_0$ bis $w_0 + \Delta w_0$ akzeptiert, wobei die Geradenstücke zu einander maximal um den Winkel $\Delta \varphi_0$ abweichen dürfen.

Mit den Toleranzparametern werden Attributintervalle festgelegt, mit denen für den assoziativen Zugriff Suchbereiche (S. 35, Schritt Z1) aufgespannt werden. So wird z.B. ausgehend von dem Objekt L_i für die Position (x_j, y_j) von Objekte L_j eine rechteckige Suchfläche im Abstand w_0 konstruiert, die die Länge l_i und die Breite $2\Delta w_0$ besitzt (Abb. 3-14b). Für die Orientierung φ_j wird der Suchbereich $\varphi_i - \Delta \varphi_0$ bis $\varphi_i + \Delta \varphi_0$ aufgespannt. Mit den Toleranzparametern werden auch die zulässigen Abweichungen bei der Prüfung der Identität (S. 37, Schritt Z4) festgelegt.

Die Attributwerte der Instanz STREIFEN (z.B. *Breite w*, *Länge l*) werden aus der gefundenen Konfiguration von Geradenstücken (z.B. aus dem mittleren Abstand, der mittleren Länge) errechnet (Abb. 3-14c). Aufgrund der Abweichungen der Instanz zu den Modellvorstellungen wird die Bewertung μ bestimmt.

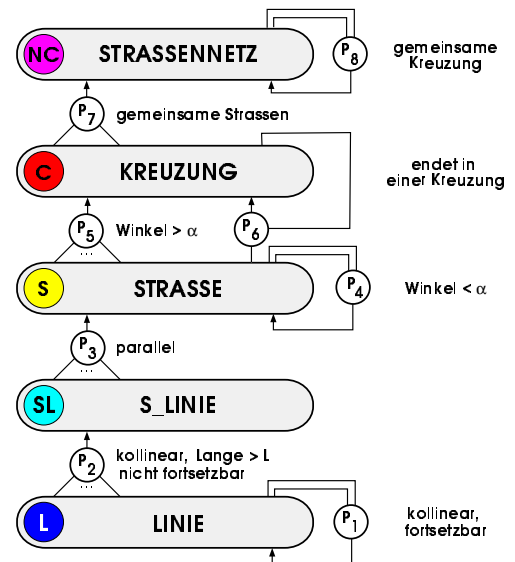
3.2.1 Strukturanalyse mit 2D-Modellen

Zur Analyse von ebenen Strukturen werden 2D-Modelle verwendet. So werden beispielsweise die Strukturen der Karte mit Hilfe von 2D-Modellen analysiert. Ebenso werden 2D-Modelle zur Analyse der Strukturen von Luftbildern verwendet, wenn die entsprechenden Objekte auf der Erdoberfläche näherungsweise als eben betrachtet werden können. Dies trifft in dem untersuchten Testgebiet beispielsweise für die Objektklasse *Strasse* zu. Unter bestimmten Aufnahmebedingungen können auch die Strukturen in Luftbilder von nicht ebenen Objekten, wie z.B. Häusern, mit Hilfe von 2D-Modellen analysiert werden (siehe Beispiel in Abb. 3-23).

Als Beispiel für die Analyse der Objektklasse *Strasse* aus der Karte ist im folgenden ein einfaches Produktionssystem mit acht Produktionen ($P_1 - P_8$) in Abb. 3-15a dargestellt. Ausgehend von den Primitivobjekten LINIE (L) kann durch wiederholte Anwendung der Produktionen (P_1-P_8) über die Objekte S_LINIE (SL), STRASSE (S) und KREUZUNG (C) das Objekt STRASSENNETZ (NC) aufgebaut werden. Der Zusammenhang zwischen den in P_1-P_8 verwendeten Objektkonzepten und den Produktionen ist durch das Produktionsnetz in Abb. 3-15b verdeutlicht.

P_i	Objekte X,Y	$\odot$	$\xrightarrow{i}$	Objekt Z
P_1	L $\wedge$ L	--	$\xrightarrow{1}$	L
P_2	L $\wedge$ L	- / -	$\xrightarrow{2}$	SL
P_3	SL $\wedge$ SL	$\parallel$	$\xrightarrow{3}$	S
P_4	S $\wedge$ S	--	$\xrightarrow{4}$	S
P_5	S $\wedge$ S	$\angle$	$\xrightarrow{5}$	C
P_6	C $\wedge$ S	- +	$\xrightarrow{6}$	C
P_7	C $\wedge$ C	$\in$	$\xrightarrow{7}$	NC
P_8	NC $\wedge$ NC	$\in$	$\xrightarrow{8}$	NC
--	kollinear, fortsetzbar			
- / -	kollinear, nicht fortsetzbar, Länge > L			
$\parallel$	parallel zueinander			
$\angle$	in einem best. Winkel zueinander			
- +	mündet in			
$\in$	konsistent, enthalten dieselben Objekte			

a



b

Abb. 3-15: Objekt STRASSENNETZ. [76] a) Tabelle der Produktionen, b) Produktionsnetz

Mit dem in Abb. 3-15b dargestellten Produktionsnetz wurde die Objektklasse *Strasse* der digitalen Karte analysiert. Die Geradenstücke der Objektklasse *Strasse*, die die

Menge der Primitivobjekte LINIE bilden, sind für einen Kartenausschnitt in Abb. 3-16b in blau dargestellt.

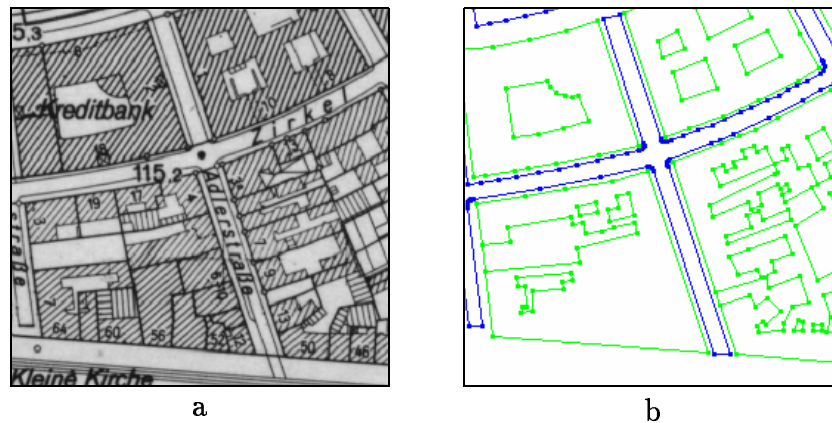


Abb. 3-16: Ausschnitt aus der Karte. a) Kartenblatt DGK5, b) digitalisierte Karte

Das Ergebnis der Strukturanalyse bilden ein oder mehrere Zielobjekte mit den zugehörigen Ableitungsgraphen. Ein Teil eines Ableitungsgraphen ist exemplarisch für die Instanz KREUZUNG 472 in Form eines Ableitungsbaumes mit den Objekten KREUZUNG, STRASSE und S_LINIE in Abb. 3-17 dargestellt.

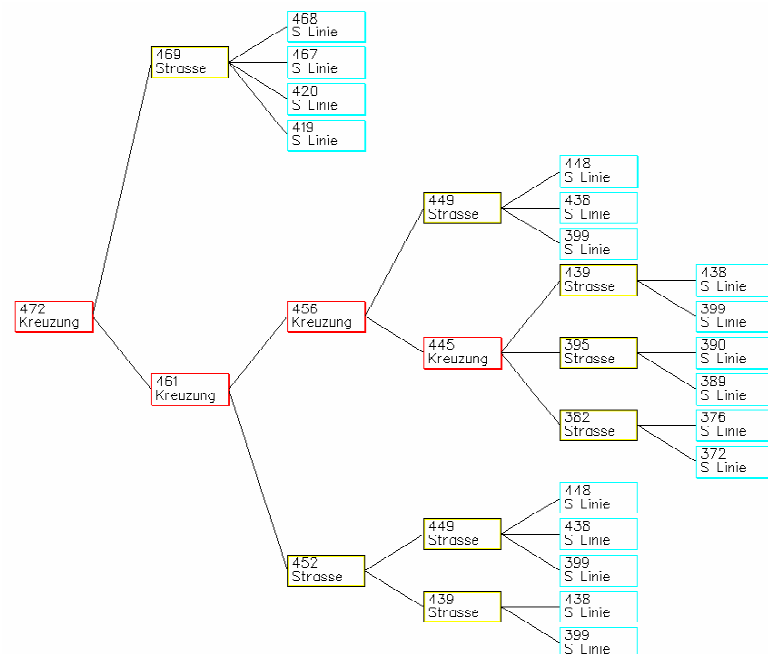


Abb. 3-17: Ableitungsgraph der KREUZUNG mit Index 472 [73,76]

Objekte vom Typ LINIE wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Die Generierungsreihenfolge der Instanzen läßt sich aus dem Index ablesen, der in aufsteigender Weise fortlaufend vergeben wird. Der aus dem Ableitungsgraph zu entneh-

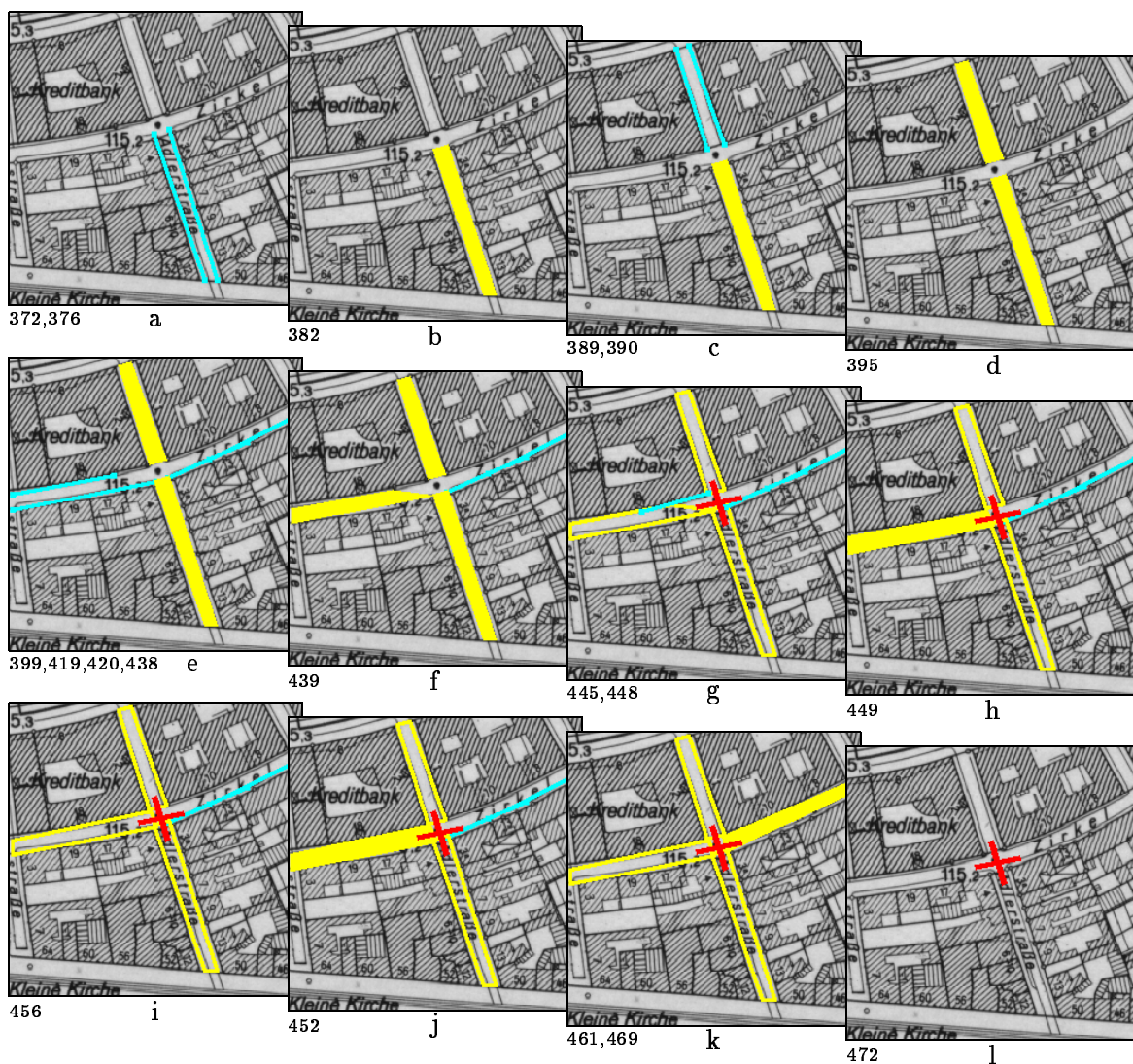


Abb. 3-18: a-l) Schrittweiser Aufbau der KREUZUNG 472 aus Teilobjekten (siehe Abb. 3-17)
Zur Darstellung wurde das Kartenblatt der DGK5 (Abb. 1-1a) unterlegt. [73,76]

mende schrittweise Aufbau der KREUZUNG 472 ist in Abb. 3-18 durch Darstellung der Teilobjekte veranschaulicht.

3.2.2 Strukturanalyse mit 3D-Modellen

Zur Analyse der Objektklasse *Hochhäuser* wurde ein 3D-Ansatz verfolgt und ein einfaches Objektmodell entworfen [77]. Bei dem Objektmodell wird angenommen, daß sich ein Hochhaus idealerweise durch einen Quader beschreiben läßt und daß jeweils zwei Quaderflächen (dieselbe Wand- und Dachfläche) in Aufnahmen mit unterschiedlicher Perspektive sichtbar sind (Abb. 3-19). Die beiden senkrecht zueinander stehenden Flächen bilden eine Quaderkante, deren Höhe über Grund charakteristisch für Hochhäuser ist.

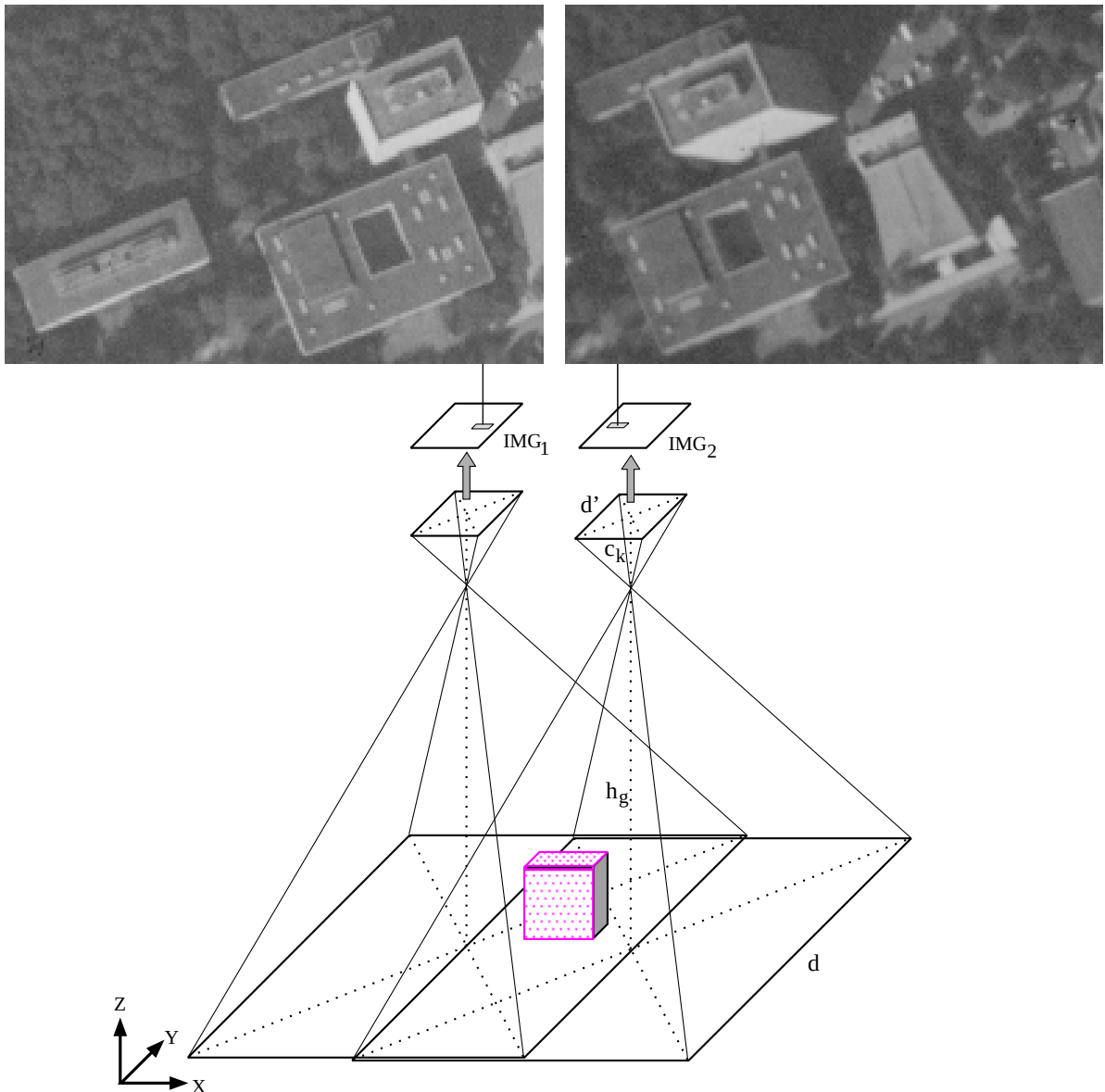


Abb. 3-19: Aufnahme der Luftbilder. (Bildausschnitte $192 * 128$ Bildpunkte, (Aufnahmehöhe $h_g=6\text{km}$, $d=9.2\text{km}$, Bildgröße $d'=230\text{mm}$, Brennweite $c_k=153.57\text{mm}$)

Da das bisher zur 2D-Analyse verwendete Bilddatenmaterial im Maßstab 1:6300 (siehe Abb. 1-1 und [73]) wegen der unzureichenden Überlappung im Testgebiet und der für

eine 3D-Analyse ungünstigen Brennweite ($f=304.82$ mm) nicht geeignet erschien, wurde mit kürzerer Brennweite ($f=153.57$ mm) aufgenommenes Bilddatenmaterial (Maßstab 1:40000), aufbereitet (Abb. 3-19). Nach einer durch manuelle Bestimmung von Paßpunkten durchgeführten Registrierung der Bilder mit der Karte, wurden die unbekannten Aufnahmeparameter der Bilder iterativ über den räumlichen Rückwärtsschnitt [71] errechnet.

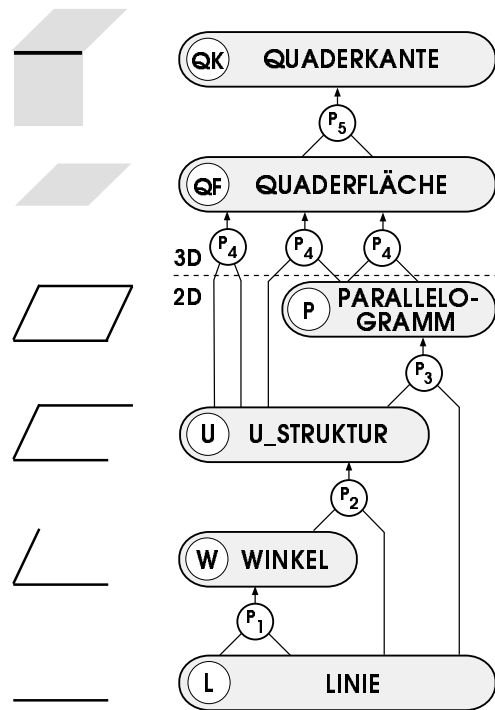


Abb. 3-20: Produktionsnetz QUADERKANTE

Ein Produktionsnetz zur Ermittlung der Objekte QUADERKANTE ist in Abb. 3-20 dargestellt. Die Erstellung einer Objektbeschreibung in der 3D-Szene erfolgt zweistufig. In den verschiedenen aufgenommenen Bildern werden unabhängig voneinander in einer 2D-Analyse zunächst aus den Primitivobjekten LINIE die Mengen der Teilobjekte WINKEL, U-STRUKTUR und PARALLELOGRAMM mit den Produktionen P_1 , P_2 und P_3 generiert. Die 2D-Objekte U-STRUKTUR und PARALLELOGRAMM bilden die Primitivobjekte der nachfolgenden 3D-Analyse.

In der 3D-Analyse wird versucht, Paare von 2D-Objekten aus unterschiedlichen Aufnahmen zu finden, die dieselbe Oberfläche eines 3D-Objektes abbilden. Dazu werden hypothetisch Paarungen von 2D-Objekten gebildet und die Strahlen durch den Mittelpunkt der Objekte untersucht. Die Strahlen sind definiert durch Stützvektor (Kamerastandort) und Richtungsvektor. Den Richtungsvektor erhält man durch Umkehrabbildung der Projektion. Sind die Objekte eines Paares die Abbildungen derselben ebenen Oberfläche des 3D-Objektes, so schneiden sich unter idealen Bedingungen die Strahlen im Mittelpunkt der Oberfläche des 3D-Objektes (Abb. 3-21a).

Die Störungen bei der Aufnahme und Verarbeitung der Bilder und eine ungenaue Be-

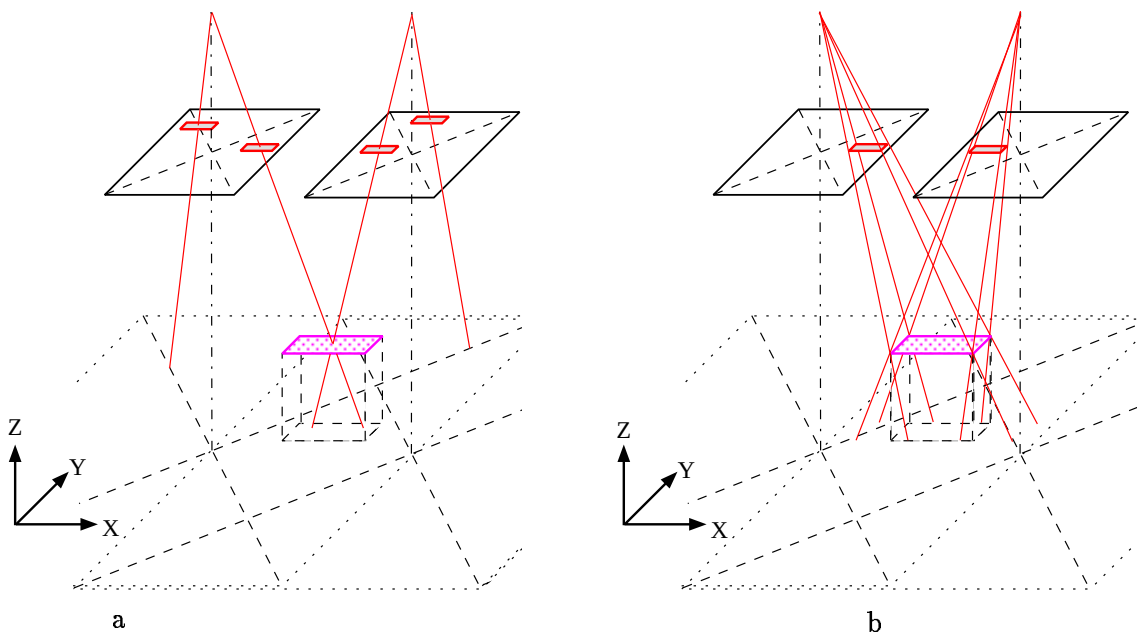


Abb. 3-21: 3D - Rekonstruktion.

a) korrespondierende Mittelpunkte, b) korrespondierende Eckpunkte

stimmung der Kameraparameter führen dazu, daß der Schnittpunkt verschoben wird oder sich die Strahlen überhaupt nicht schneiden. Daher wird der Abstand zwischen den Strahlen bestimmt. Die 2D-Objekte werden als *nicht korrespondierend* bezeichnet, wenn der Abstand einen Schwellwert überschreitet. Zusätzlich erfolgen modellgestützte Plausibilitätsuntersuchungen; z.B. zur Lage des Objektes: Punkte des 3D-Objektes können nicht hinter der Kamera oder unterhalb der Erdoberfläche liegen.

Scheidet das Paar bei dieser Überprüfung nicht aus, werden die Korrespondenzen der Eckpunkte in gleicher Weise untersucht (Abb. 3-21b). Korrespondieren auch die Eckpunkte, so kann die Lage des Objektes im Raum bestimmt werden. Zusätzlich wird geprüft, ob die Ecken des Objektes näherungsweise in einer Ebene liegen.

Korrespondieren 2D-Objekte (U-STRUKTUR oder PARALLELOGRAMM) in unterschiedlichen Aufnahmen, so werden daraus Teilobjekte QUADERFLÄCHE generiert (Produktion P_4).

Liegen Objekte QUADERFLÄCHE so zueinander, daß sie einen rechten Winkel bilden und die Kanten parallel aneinander liegen, so wird im Objektraum das Zielobjekt QUADERKANTE zusammengesetzt (Produktion P_5). Nach den Modellvorstellungen müssen die Normalenvektoren der Objekte QUADERFLÄCHE näherungsweise waagrecht oder senkrecht sein.

Teilergebnisse der Bildanalyse sind in Abb. 3-22 dargestellt. Abb. 3-22a zeigt die Menge der in einem bestimmten Raumbereich gefundenen Objekte QUADERKANTE. Aus dieser Menge wurde ein Objekt QUADERKANTE ausgewählt (Abb. 3-22b) und die am Aufbau beteiligten dreidimensional beschriebenen Vorgängerobjekte QUADERFLÄCHE (Abb. 3-22c, Abb. 3-22d) und die zweidimensional beschriebenen Vorgängerobjekte PARALLELOGRAMM (Abb. 3-22e bis h) graphisch dargestellt.

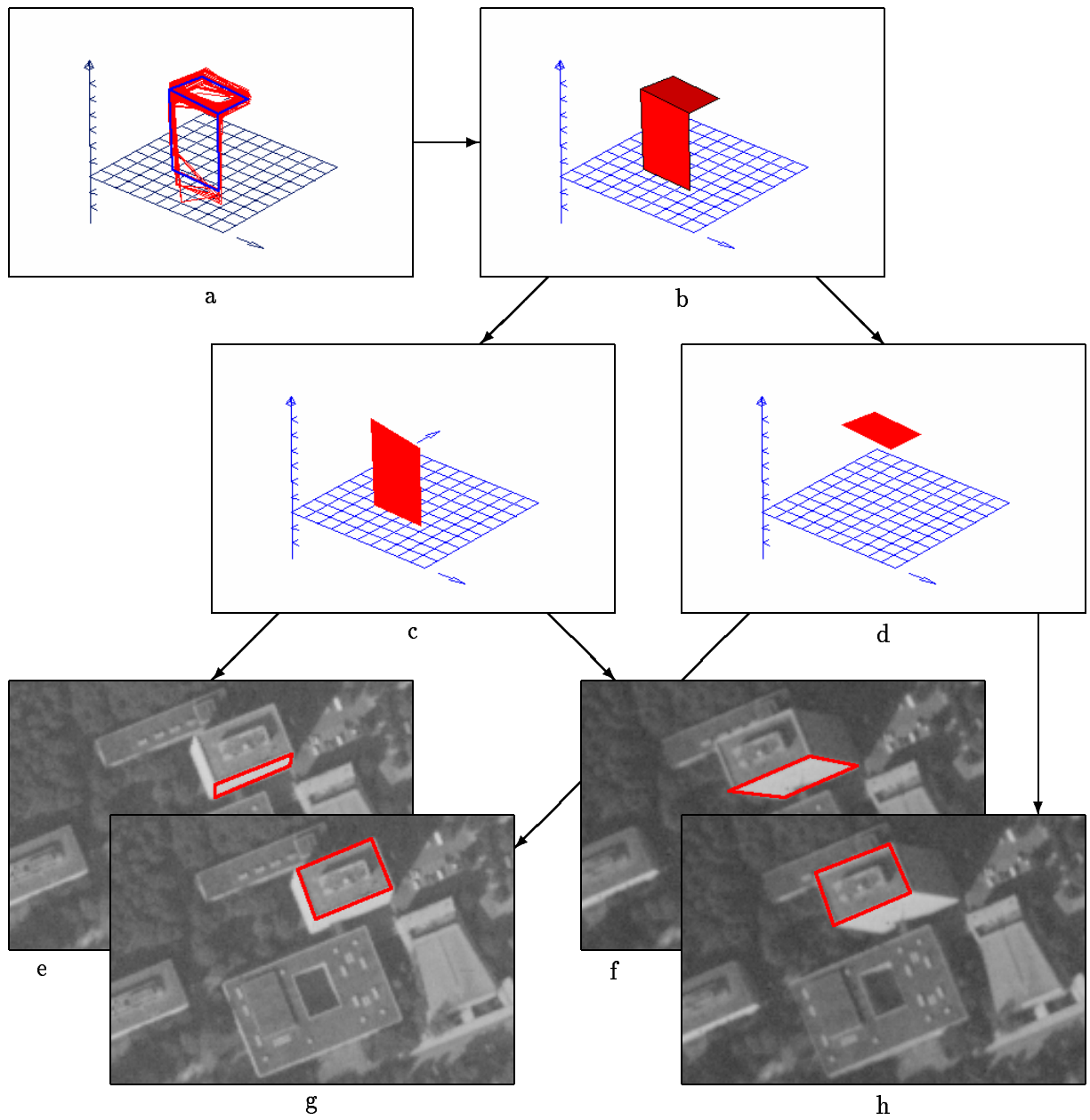


Abb. 3-22: 3D-Analyse. a) Objekte QUADERKANTE, b) ausgewähltes Objekt QUADERKANTE, c-d) Teilobjekte QUADERFLÄCHE, e-h) Teilobjekte PARALLELOGRAMM

3.2.3 Verifikation von Objekten

Der Vergleich von Karteninhalten und Bildinhalten wird objektbezogen in der "High-Level"-Ebene durchgeführt. Die zu vergleichenden Strukturen von Karte und Bild sind dazu durch Objekte mit ähnlich hohem Abstraktionsgrad zu beschreiben. Für diese Zielobjekte der Karte und des Luftbildes sind entsprechende Produktionsnetze aufzustellen. Zur Unterscheidung der Objekte von Karte und Luftbild erhalten die Objekte der Karte im Namen den vorangestellten Buchstaben *m* (map) und die Objekte des Luftbildes im Namen den vorangestellten Buchstaben *i* (image). Zum Vergleich werden die Attributwerte der M_OBJEKTE und I_OBJEKTE oder die Attributwerte ihrer zugehörigen Teilobjekte herangezogen und ein Ähnlichkeitswert bestimmt. Objekte gelten als verifiziert, wenn ein vorgegebener Wert des Ähnlichkeitsmaßes überschritten wird.

Die Verifikation wird in Form einer Produktion formuliert, wobei in der Eingangskonfiguration die Objekte M_OBJEKT und I_OBJEKT stehen und als Prädikat die Ähnlichkeit erfüllt sein muß. Die Produktion generiert ein *verifiziertes* Objekt, das im Namen den vorangestellten Buchstaben *w* (world) trägt. Mit dem Objektkonzept W_OBJEKT werden die Produktionsnetze von Karte und Luftbild verkettet. Die Instanzen von W_OBJEKT besitzen Zeiger, die auf die Zielobjekte der Karte und des Luftbildes weisen.

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Verifikation von Objekten der Karte wird am Beispiel der Objektklasse *Hochhäuser* demonstriert. Für die Klasse *Hochhäuser* wurde ein einfaches 2D-Objektmodell entworfen. Bei dem Objektmodell wird angenommen, daß sich ein Hochhaus durch einen Quader beschreiben läßt und daß die Außenkanten des Daches in einer Senkrechtaufnahme näherungsweise als Rechteck erscheinen. Bei der Darstellung des Hochhauses in der Karte wird ebenfalls von einem rechteckigen Grundriß ausgegangen.

Für die Karte und das Luftbild wird der Einfachheit halber das gleiche Produktionsnetz erstellt. Die Geradenstücke der digitalen Karte bilden die Menge der Primitivobjekte M_LINIE (mP); die Geradenstücke des vorverarbeiteten Luftbildes bilden die Menge der Primitivobjekte I_LINIE (iP) (siehe Abb. 3-23). Ausgehend von den Primitivobjekten werden in der Kartenanalyse über die Teilobjekte M_LANGELINIE (mL) und M_WINKEL (mW) die Zielobjekte M_RECHTECK (mR) aufgebaut. In der Luftbildanalyse werden die Zielobjekte I_RECHTECK (iR) über die Teilobjekte I_LANGELINIE (iL) und I_WINKEL (iW) aufgebaut.

Bei dem Vergleich von Karte und Luftbild, wird in der Verifikationsphase der Karteninhalt anhand des Luftbildes überprüft. Es wird davon ausgegangen, daß die Kartenanalyse vor einer Luftbildanalyse durchgeführt wird oder aber zumindest die Menge der Objekte M_RECHTECK vor der Generierung des ersten Objektes I_RECHTECK zur Verfügung steht. Ausgehend von einem Objekt I_RECHTECK wird die Produktion P_7 getriggert, die bei erfüllten Bedingungsteil jeweils ein Objekt W_RECHTECK generiert. Die geometrischen Attributwerte des Objektes W_RECHTECK werden vom Objekt M_RECHTECK übernommen. Die Bewertung μ wird aufgrund der Lage und Ähnlichkeit mit dem Objekt I_RECHTECK bestimmt.

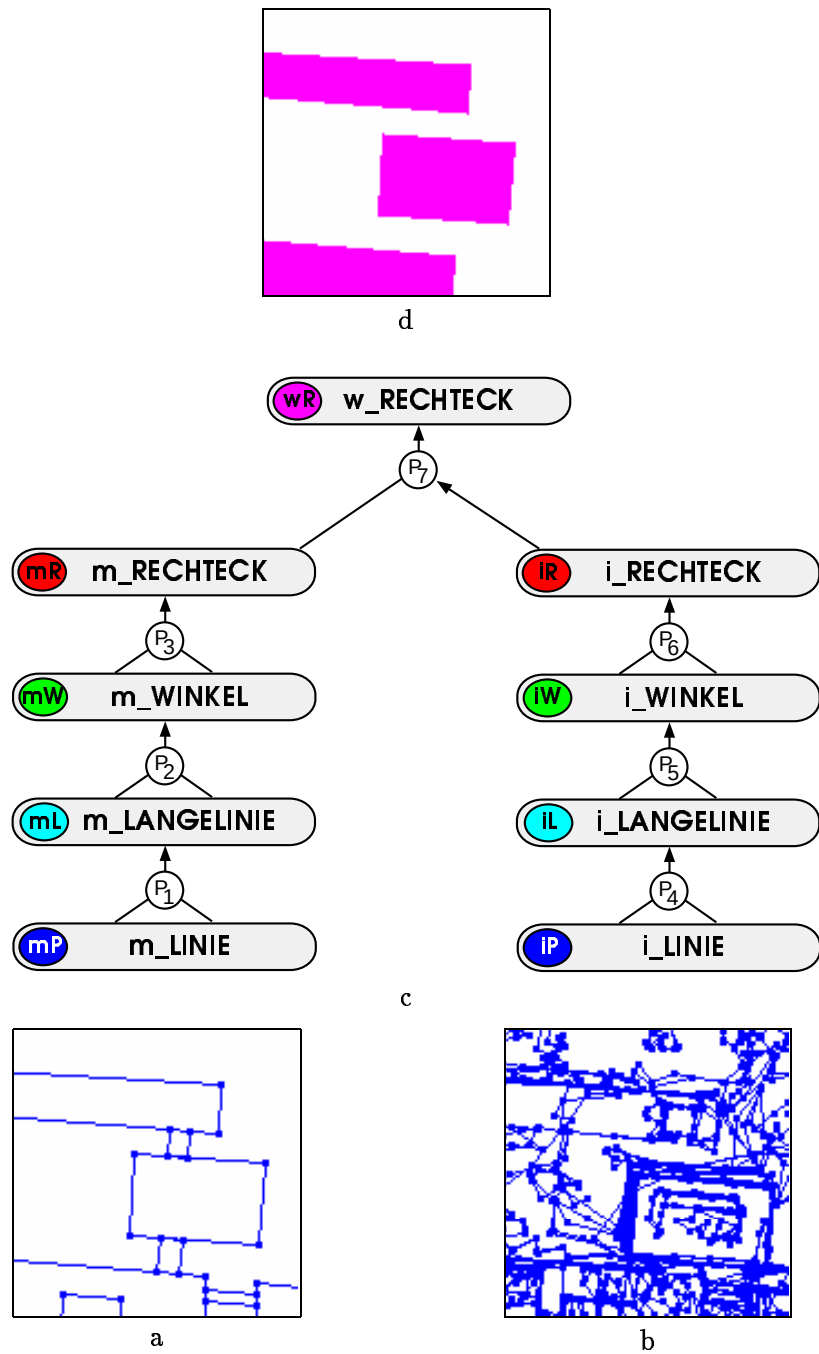


Abb. 3-23: Produktionsnetz zur Verifikation.
 a) Menge der Objekte m_LINIE, b) Menge der Objekte i_LINIE
 c) Produktionsnetz, d) Menge der verifizierten Objekte w_RECHTECK

Mit dem in Abb. 3-15c dargestellten Produktionsnetz wurde ein Karten- und Bildanalyse mit Verifikation durchgeführt. Für die Kartenanalyse wurden die Geradenstücke der Objektklasse *Hochhaus* und *GrosseGebäude* als Primitivobjekte M_LINIE verwendet. Abb. 3-15a zeigt einen Ausschnitt der graphisch dargestellten Menge der Objekte M_LINIE. Für die Bildanalyse wurden die in der Vorverarbeitungsstufe generierten Geradenstücke als Primitivobjekte I_LINIE verwendet. Abb. 3-15b zeigt einen Ausschnitt der graphisch dargestellten Menge der Objekte I_LINIE. Die Menge der Objekte W_RECHTECK ist graphisch durch einen Ausschnitt in Abb. 3-15d dargestellt.

Aus der Menge der generierten Objekte W_RECHTECK wird das Objekt mit der Indexnummer 15570 herausgegriffen. Es ist das in Abb. 3-23d in der Mitte dargestellte Rechteck. Zu diesem Objekt wird über die Verzeigerungen die Menge der Vorgänger zusammengestellt. Zum Zwecke einer übersichtlichen Darstellung wurden durch eine Mengenoperation aus der Menge der Vorgänger alle Objekte M_LINIE und I_LINIE entfernt. Der aus dem Objekt 15570 mit der Menge der Vorgänger automatisch erstellte Ableitungsbaum ist in Abb. 3-24 dargestellt.

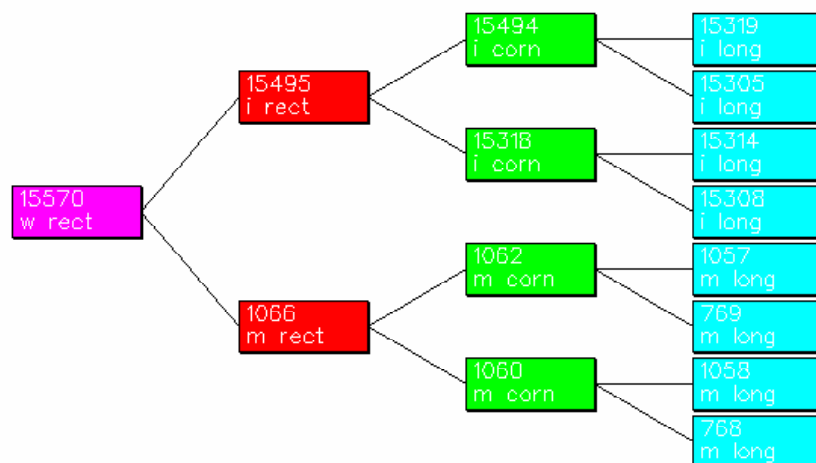


Abb. 3-24: Ableitungsgraph eines verifizierten Objektes.
(rect: RECHTECK, corn: WINKEL, long: LANGE LINIE)

Die 15 Instanzen des in Abb. 3-24 abgebildeten Ableitungsgraphen sind in Abb. 3-25 mit unterlegtem Grauwertbild der Karte bzw. des Luftbildes graphisch dargestellt.

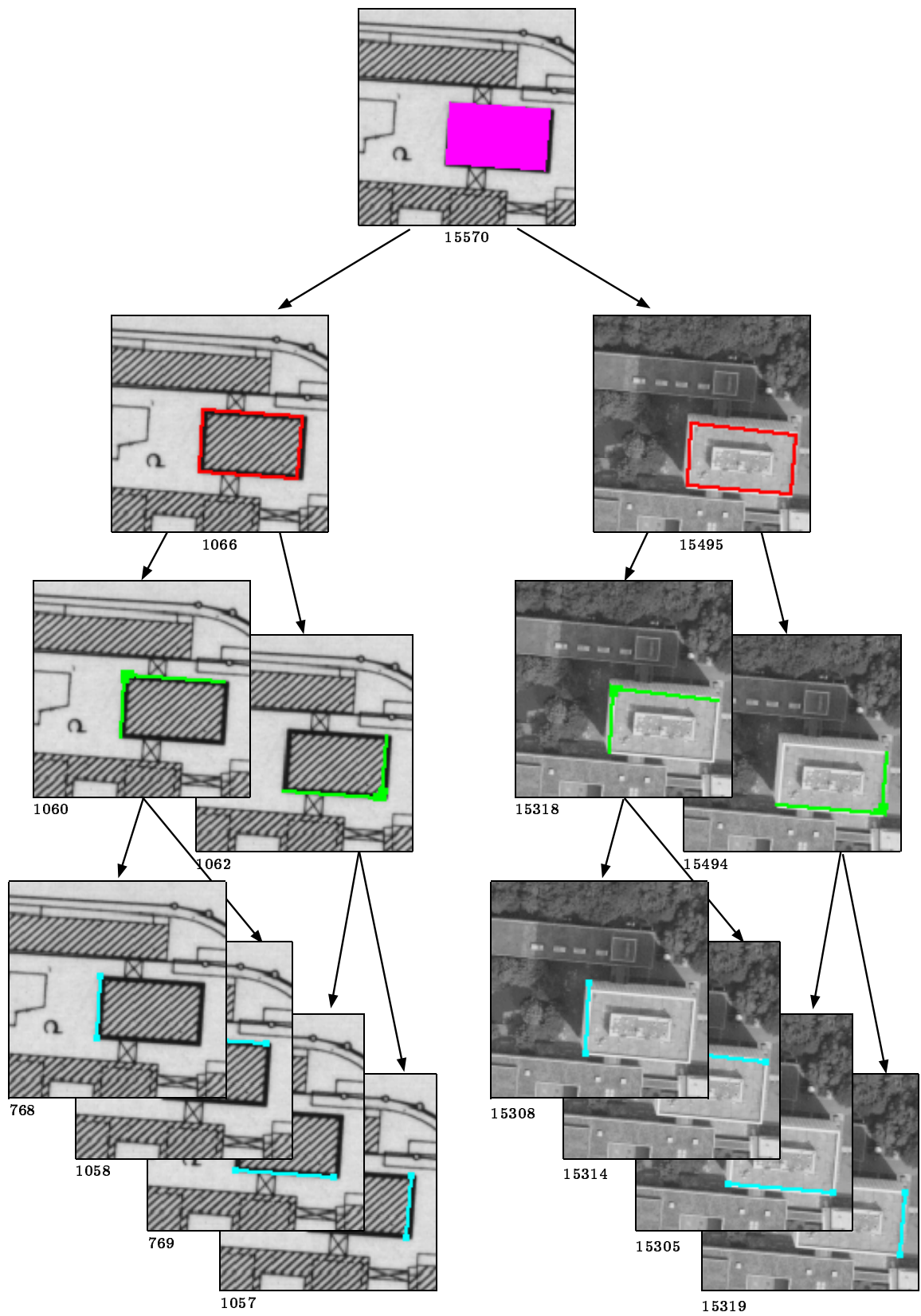


Abb. 3-25: Graphische Darstellung der Objekte des Ableitungsgraphen (Abb. 3-24)

3.3 Verwendung von Kartenwissen

Zusätzliches Kontextwissen, das aus einer Karte stammt, kann in verschiedener Art und Weise für eine Bildanalyse genutzt werden. So kann beispielsweise das Kartenwissen bereits im Low-Level-Bereich (Vorverarbeitung) genutzt werden, um Modelle für die Linienextraktion zu parametrisieren. In der vorliegenden Arbeit soll dieses Wissen im Medium-Level- bzw. High-Level-Bereich genutzt werden.

Im folgenden werden zwei Möglichkeiten zur Verwendung von Kartenwissen dargestellt:

- Kartenwissen zur Beeinflussung der Bearbeitungsreihenfolge
- Kartenwissen zur Parametrisierung von Objektmodellen

Zur Nutzung des Kartenwissens ist zunächst eine Aufbereitung notwendig. Die in [73] bereits erläuterte Vorgehensweise ist im folgenden Kapitel 3.3.1 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

3.3.1 Aufbereitung des Kartenwissens

Als Quelle der Kontextinformation wird die digitale Karte, die in Form von verschiedenen Kartenblattebenen (Objektklassen) vorliegt, herangezogen. Aus den einzelnen Kartenblattebenen werden die geometrischen Informationen der Polygone (Koordinaten) verwendet. Topologische Informationen werden nicht ausgewertet. Mit diesen Informationen werden attributierte Primitivobjekte *LINIE* generiert, die als Menge von Geradenstücken die Karte darstellen.

Stellt man die Primitivobjekte graphisch dar (wie z. B. in Abb. 3-16), so fällt es dem menschlichen Betrachter leicht, eine Einbindung in den Kontext vorzunehmen und eine Bedeutung zuzuordnen. Die Information, daß z. B. die Linie *i* einen Teil der östlichen Begrenzung einer Straße mit der *Breite w* und Orientierung φ bildet, liegt jedoch explizit nicht vor. Um dieses Kontextwissen für die Luftbildanalyse in geeigneter Form bereitzustellen, wird die Struktur der digitalen Karte analysiert.

Dazu wird ein Produktionssystem eingesetzt, wie es in Abb. 3-15 durch die Tabelle der Produktionen und das Produktionsnetz angegeben ist. Das Ergebnis der Strukturanalyse bilden ein oder mehrere Zielobjekte mit den zugehörigen Ableitungsgraphen (siehe Beispiel Abb. 3-17). Da im Ableitungsgraphen alle generierten Zwischenergebnisse (Teilobjekte) erfaßt sind, spiegelt er den speziellen Ablauf des Analyse- bzw. Synthesevorganges wider (siehe Beispiel Abb. 3-18). Für eine allgemeine Beschreibung der Karte ist dies jedoch nicht von Interesse.

Eine anschließende Analyse des Ableitungsgraphen liefert einen reduzierten Graphen zur Beschreibung der Karte, den sogenannten Bildbeschreibungsgraphen [73]. Wie beim Ableitungsgraph beschreiben beim Bildbeschreibungsgraph die Knoten Instanzen und die Kanten die *Teil_von*-Relation (Abb. 3-26a). Beim Bildbeschreibungsgraph wird jedoch der Karteninhalt in verschiedenen Hierarchiestufen (Bildbeschreibungsstufen) bereitgestellt. In Abb. 3-26 sind die Objekte des Bildbeschreibungsgraphen in den

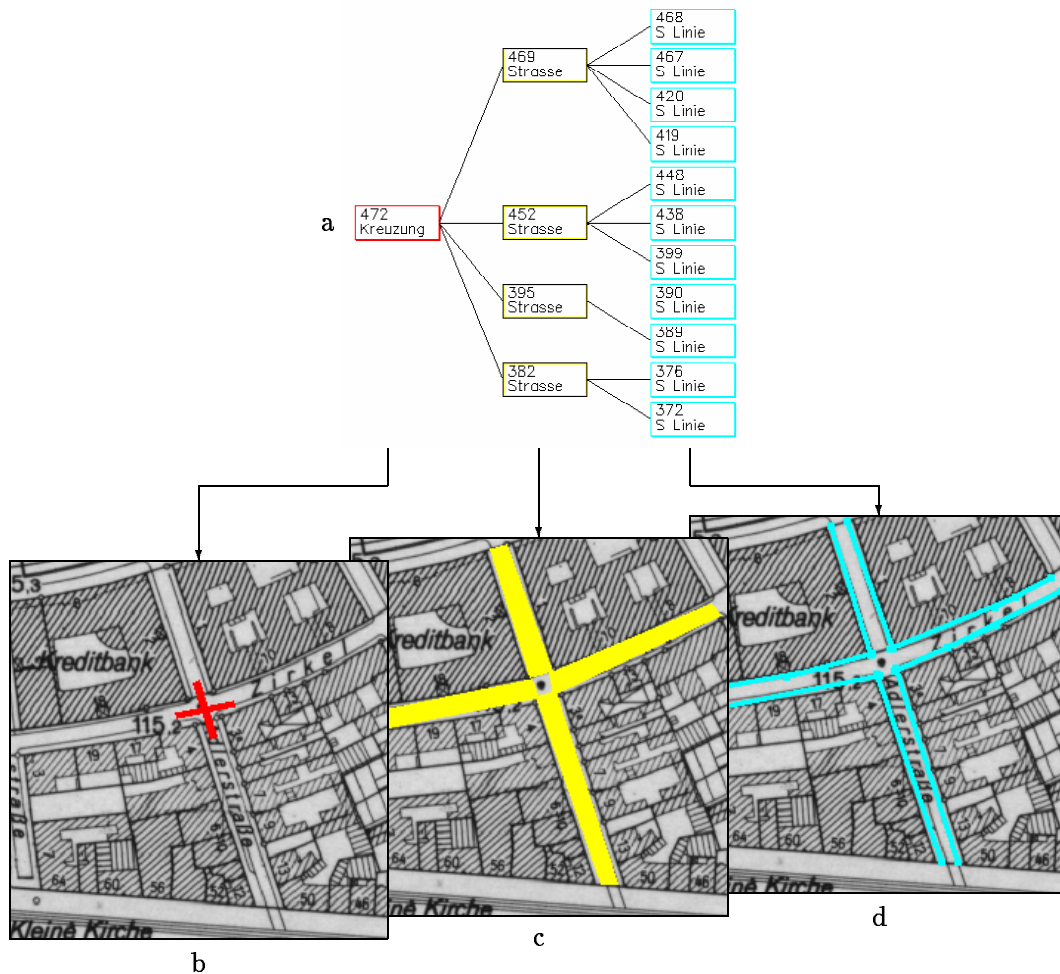


Abb. 3-26: Bildbeschreibungsgraph der KREUZUNG 472 (vergleiche Abb. 3-17) mit graphischer Darstellung der Objekte in den Bildbeschreibungsstufen
b) KREUZUNG, c) STRASSE und d) S_LINIE [76]

Bildbeschreibungsstufen KREUZUNG (Abb. 3-26b), STRASSE (Abb. 3-26c) und S_LINIE (Abb. 3-26d) dargestellt.

Wie bereits in Kap. 1.2 erwähnt, wurde eine Registrierung zwischen digitaler Karte und Luftbild durchgeführt, um geometrische Informationen von Objekten in der Karte für die Luftbildanalyse zu nutzen.

3.3.2 Kartenwissen zur Beeinflussung der Bearbeitungsreihenfolge

Die Systemsteuerung des Produktionssystems beeinflusst, wie in Kapitel 3.1.3.2 beschrieben, die Reihenfolge der Abarbeitung von Verarbeitungseinheiten. Dadurch wird auch die Reihenfolge der Generierung komplexerer Objekte beeinflusst. Der Ablauf der Analyse kann durch externes Wissen gesteuert werden, indem man die Reihenfolge verändert. Um durch die Steuerung der Bearbeitungsreihenfolge einen Vorteil zu erhalten, muß die Analyse bei Erreichen eines bestimmten Zustandes abgebrochen werden oder Bildbereiche als bearbeitet markiert werden.

Bewertung eines Objektes

Die Objekte tragen neben den geometrischen Attributen das Attribut *Bewertung* μ (siehe Abb. 3-14). Der Wert dieses Attributes wird bei der Generierung durch eine Bewertung des Objektes aufgrund des Grades seiner Übereinstimmung mit der Modellvorstellung bestimmt. Aus der Bewertung wird die Priorität des Objektes für die Warteschlange abgeleitet. Prinzipiell wird durch Veränderung der Bewertungen die Bearbeitungsreihenfolge beeinflusst. Dies kann zur Steuerung der Analyse durch Kartenwissen genutzt werden. Zur Veränderung der Bearbeitungsreihenfolge wird zusätzlich zur *Bewertung* μ eine zweite Bewertung eingeführt. Diese wird *Bewertung bezüglich der Erwartungstreue* genannt. Sie ist umso höher, je mehr ein Objekt einem aufgrund der Karteninformation erwarteten Objekt entspricht. Analog kann bei der Bewertung μ von der *Bewertung bezüglich der Modelltreue* gesprochen werden. Die beiden Bewertungskomponenten werden mit ε (Erwartungstreue) bzw. μ (Modelltreue) bezeichnet. Die Vorgehensweise bei der Generierung und Bewertung eines Objektes zeigt Abb. 3-27. Erfüllt eine Eingangskonfiguration von Objekten ein spezielles Prädikat, so wird durch eine Produktion das neue Objekt generiert. Dieses neue Objekt wird nun zweifach bewertet. Die rechte Seite der Abb. 3-27 zeigt zunächst die bisher durchgeführte Bewertung: Aus dem Vergleich des neu generierten Objektes mit der Modellvorstellung erhält man die für die *Modelltreue* charakteristischen Werte. Für ein Objekt STREIFEN sind in Abb. 3-27 beispielhaft zwei Werte dargestellt:

Bei dem Wert l handelt es sich um das Attribut *Länge*. Einem längeren Objekt STREIFEN soll eher die Hypothese, es sei Teil eines Objektes Strasse, zugeordnet werden als einem kürzeren Objekt. Die Bewertung ist demnach von der Länge abhängig. Der Ausdruck $\Delta\gamma$ bezeichnet die Winkeldifferenz zweier Objekte LINIE, aus denen sich das neu generierte Objekt STREIFEN zusammensetzt. Je kleiner $\Delta\gamma$ ist, desto mehr entspricht das Objekt STREIFEN der Modellvorstellung. Die (hier beispielhaft) beschriebenen Werte sind Grundlage der Bewertung μ bezüglich der Modelltreue.

Bei dem Entwurf der Produktionen wurde versucht, die objektspezifischen Bewertungsfunktionen ohne Vererbung aufzustellen. D. h. es wird bei einem neu generierten Objekt lediglich die Übereinstimmung mit der idealen Vorstellung des Modells bewertet; die Bewertung der aufbauenden Objektteile bleibt unberücksichtigt. Läßt sich beispielsweise ein Objekt Streifen aus schlecht (–) bewerteten Objekten Linie mit paralleler Anordnung in einem vorgegebenen Abstand in idealer Weise zusammensetzen, so erhält

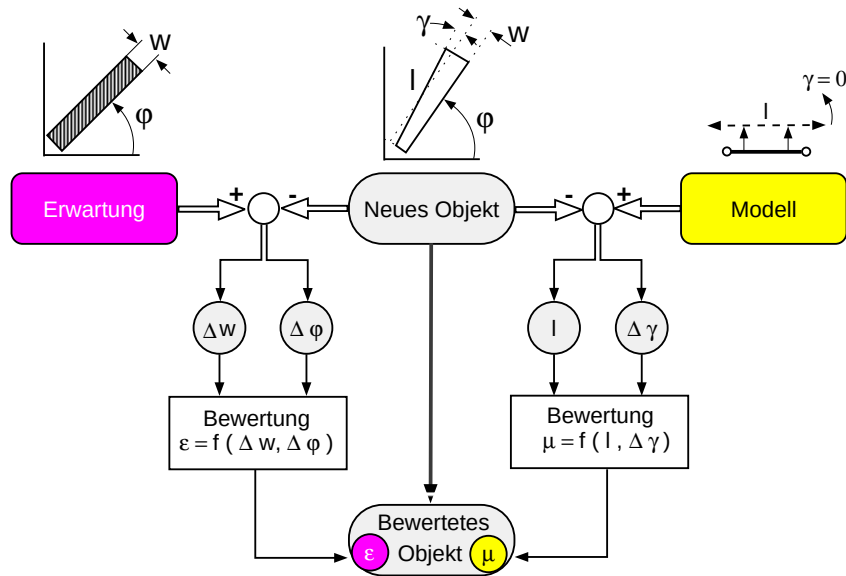


Abb. 3-27: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Bewertung eines neu generierten Objektes [76]

das Objekt eine sehr gute (++) Bewertung.

Die linke Seite der Abb. 3-27 zeigt die neue Bewertung, die aus der Karteninformation resultiert. Das neu generierte Objekt wird mit einem aufgrund der Karte erwarteten Objekt verglichen. Beide Objekte besitzen Attribute, hier beispielsweise die Breite w und die Orientierung φ . Die Differenzen (hier Δw und $\Delta \varphi$) der Attributwerte beider Objekte sind ein Maß für die Bewertung ε bezüglich der Erwartungstreue. Ein neu generiertes Objekt ist nun mit den beiden Bewertungen ε und μ versehen.

Ableitung der Bearbeitungsreihenfolge durch Zusammenfassung der Bewertungskomponenten

Eine einfache Vorgehensweise zur Ableitung der Bearbeitungsreihenfolge aus zwei Bewertungskomponenten bildet das Zusammenfassen der zwei Bewertungskomponenten mit Hilfe einer Bewertungsfunktion. Die resultierende Gesamtbewertung bildet dann die Grundlage für die Prioritätszuweisung. Als Bewertungsfunktionen sind zahlreiche Abstandsmaße bekannt.

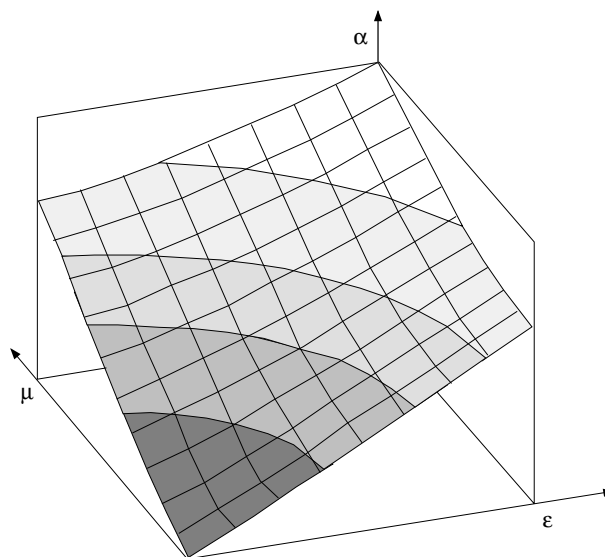


Abb. 3-28: Graphische Darstellung der Zusammenfassung zweier Bewertungskomponenten durch Bildung des quadratischen Mittels

Ein einfaches Beispiel einer solchen Funktion ist das quadratische Mittel. Aus den beiden Bewertungskomponenten ϵ und μ wird über die Funktion

$$\alpha = \sqrt{\epsilon^2 + \mu^2}$$

die Gesamtbewertung α berechnet. In Abb. 3-28 sind die Werte für α über der von ϵ und μ aufgespannten Ebene aufgetragen. Zusätzlich zum Gitter sind Linien, die Bereiche verschiedener Schraffur voneinander trennen, eingezeichnet. Diese Linien verbinden Punkte gleicher Gesamtbewertung. Der Einfluß der einzelnen Bewertungskomponenten kann durch eine Gewichtung verändert werden. Die Höhe der Gesamtbewertung bestimmt die Priorität: Je höher ein Objekt bewertet ist, desto eher wird es bearbeitet.

Ableitung der Bearbeitungsreihenfolge durch ein mengenorientiertes Auswahlverfahren

Die Bestimmung der Bearbeitungsreihenfolge durch ein mengenorientiertes Auswahlverfahren soll an einem Beispiel dargestellt werden. Wir gehen von einem Objektkonzept aus, bei dem ein Objekt als Attribute die Bewertungskomponente ε (Erwartungstreue) und die Bewertungskomponente μ (Modelltreue) trägt (vgl. Abb. 3-27). In dem Beispiel werden sechs unterschiedlich bewertete Objektinstanzen a bis f angenommen (Abb. 3-29a). Zur Bewertung werden die in fünf Stufen diskretisierten Attributwerte sehr gut (++), gut (+), mittel (o), schlecht (-) und sehr schlecht (--) verwendet.

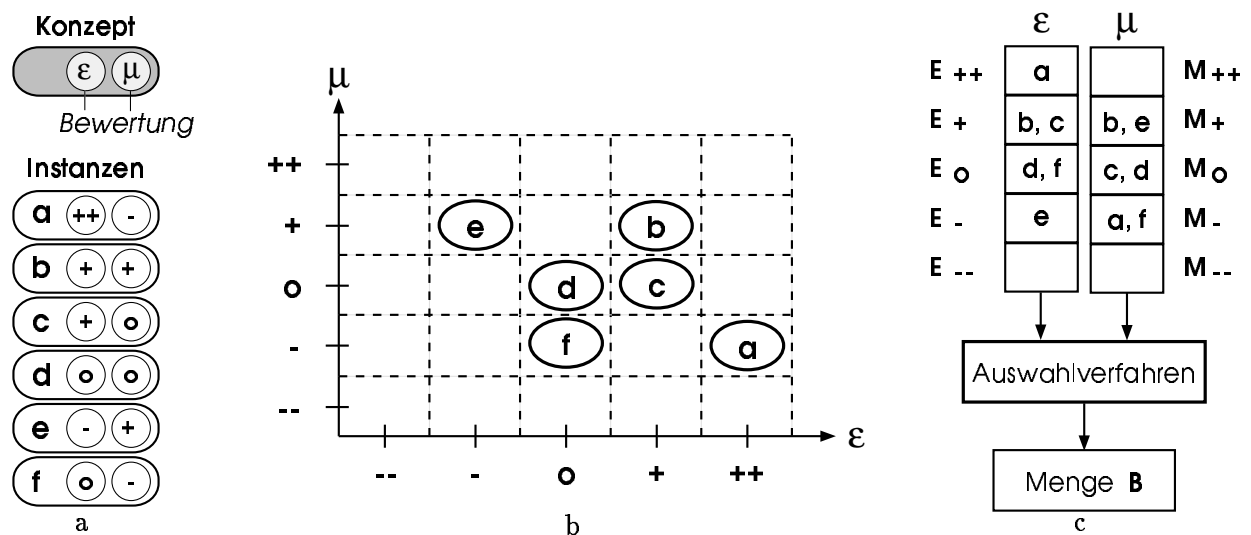


Abb. 3-29: Schematische Darstellung der Bildung von Objektmengen aufgrund der Bewertung

Der durch die beiden Bewertungskomponenten ε und μ aufgespannte Attributraum lässt sich in Form eines Diagrammes darstellen (Abb. 3-29b). Die Positionen der sechs Objektinstanzen im Attributraum sind durch die entsprechenden Buchstaben gekennzeichnet. Durch die Diskretisierung der Attributwerte sind die Objekte in einem Raster angeordnet, das in Abb. 3-29b durch gestrichelte Linien angedeutet ist. Die Spalten bilden Mengen gleicher Bewertung ε ; die Zeilen bilden Mengen gleicher Bewertung μ . Beispielsweise enthält die Menge aller Objekte, die eine gute (+) Bewertung ε bezüglich der Erwartungstreue besitzen, die Elemente b und c. Mengen gleicher Bewertung ε werden mit E_ν , Mengen gleicher Bewertung μ mit M_ν bezeichnet. Der Index $\nu \in \{++, +, o, -, --\}$ gibt die Höhe der Bewertung an. Die Mengen E_ν und M_ν sind in Abb. 3-29c noch einmal getrennt dargestellt.

Bei jedem Verarbeitungszyklus der Analyse wird ein Auswahlverfahren aufgerufen, das durch Verknüpfung der dargestellten Mengen die Menge B der als nächste zu bearbeitenden Objekte ausgewählt. In das Auswahlverfahren gehen Vertrauensmaße für Karte und Luftbild ein. Ein höheres Vertrauensmaß für die Karte gegenüber dem Vertrauensmaß für das Luftbild gibt der Bewertung bezüglich der Erwartungstreue mehr Gewicht als der Bewertung bezüglich der Modelltreue.

Vorgehensweisen bei der mengenorientierten Auswahl

Mit Aufruf des Auswahlverfahrens wird durch Verknüpfung von Objektmengen beider Bewertungskomponenten (ε und μ) jeweils die Menge B der zur Zeit *besten* Objekte bestimmt. Die ausgewählten Objekte stehen dann einer Hypothesenzuweisung bzw. einer Verarbeitung durch das Verarbeitungsmodul zur Verfügung (siehe Abb. 3-4).

Zur formalen Darstellung des mengenorientierten Auswahlverfahrens werden für die Indexwerte von ν statt der Symbole $\{++, +, \circ, -, --\}$ die Zahlen $\{0, 1, 2, 3, 4\}$ verwendet, wobei die folgenden Entsprechungen bestehen:

$$++ \hat{=} 0, \quad + \hat{=} 1, \quad \circ \hat{=} 2, \quad - \hat{=} 3, \quad -- \hat{=} 4.$$

Weiterhin wird ein Startindex ν_0 definiert, der zur prinzipiellen Darstellung der Verfahren mit $\nu_0 = 0$ angenommen wird. Es wird davon ausgegangen, daß mindestens ein Objekt vorhanden ist, das bezüglich der Komponenten ε und μ bewertet ist. Zur Bestimmung der Menge B der *besten* Objekte bieten sich verschiedene Vorgehensweisen an (siehe Abb. 3-30):

- A) Bildung der Schnittmenge: Die Menge B ergibt sich zunächst aus der Schnittmenge der Objektmengen $E_{++} \cup \dots \cup E_q$ und $M_{++} \cup \dots \cup M_q$ beginnend mit der höchsten Bewertung ($q=++$). Es wird also auf Objekte zugegriffen, die sowohl bezüglich der Bewertungskomponente ε als auch der Bewertungskomponente μ sehr hoch ($++$) bewertet wurden. Sollte die Menge B leer sein, wird der Index q um eins erhöht ($q=+$) und erneut die Schnittmenge gebildet. Dies wird so oft wiederholt, bis mindestens ein Objekt gefunden wird.
- B) Bildung der Vereinigungsmenge: Die Menge B ergibt sich zunächst aus der Vereinigungsmenge der Objektmengen $E_{++} \cup \dots \cup E_q$ und $M_{++} \cup \dots \cup M_q$ beginnend mit der höchsten Bewertung ($q=++$). Es wird also auf Objekte zugegriffen, die mindestens bezüglich einer Bewertungskomponente (ε oder μ) sehr hoch ($++$) bewertet wurden. Sollte die Menge B leer sein, wird der Index q um eins erhöht ($q=+$) und erneut die Vereinigungsmenge gebildet. Dies wird so oft wiederholt, bis mindestens ein Objekt gefunden wird.
- C) Kombinierte Bildung von Schnittmenge und Vereinigungsmenge: Die Vorgehensweise C stellt eine Kombination der beiden zuvor beschriebenen Vorgehensweisen dar. Zunächst wird wie bei der Vorgehensweise A die Schnittmenge der Objektmengen $E_{++} \cup \dots \cup E_q$ und $M_{++} \cup \dots \cup M_q$ beginnend mit der höchsten Bewertung ($q=++$) gebildet. Ist die Menge B leer, wird wie bei der Vorgehensweise B die Menge B durch Vereinigung der beiden Objektmengen gewonnen. Ist diese Menge auch leer, wird der Index q um eins erhöht ($q=+$) und erneut zuerst die Schnittmenge untersucht und dann die Vereinigungsmenge. Dies wird so oft wiederholt, bis mindestens ein Objekt gefunden wird.

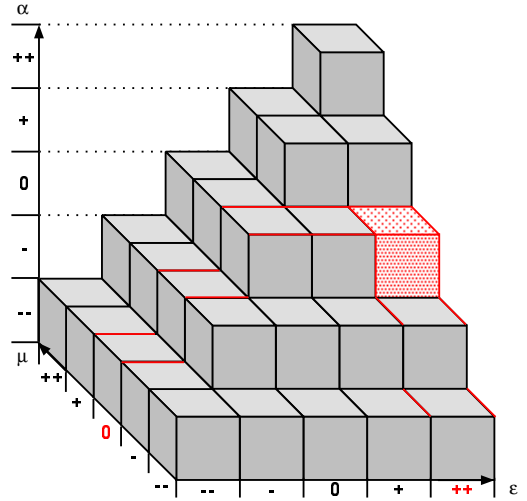
Mit einer bestimmten Vorgehensweise beim Auswahlverfahren wird eine Reihenfolge des Zugriffs auf verschiedene Objektmengen festgelegt. Aus der Reihenfolge kann für die

```

BEGIN
   $q := \nu_0$ 
  DO UNTIL  $B \neq \{\}$ 
     $B := \{\bigcup_{\nu=0}^q E_\nu\} \cap \{\bigcup_{\nu=0}^q M_\nu\}$ 
    IF  $B = \{\}$  THEN
       $q := q + 1$ 
    ENDIF
  ENDDO
END

```

Vorgehensweise A

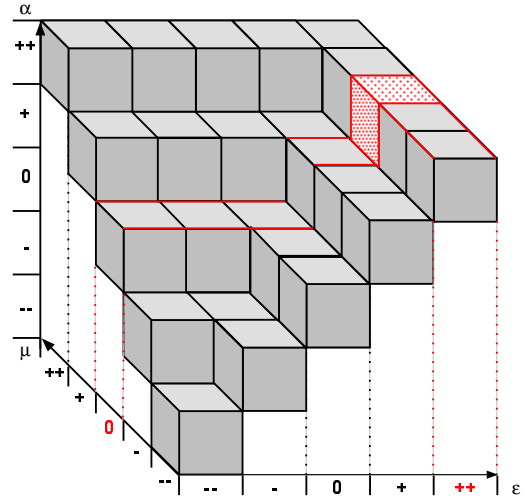


```

BEGIN
   $q := \nu_0$ 
  DO UNTIL  $B \neq \{\}$ 
     $B := \{\bigcup_{\nu=0}^q E_\nu\} \cup \{\bigcup_{\nu=0}^q M_\nu\}$ 
    IF  $B = \{\}$  THEN
       $q := q + 1$ 
    ENDIF
  ENDDO
END

```

Vorgehensweise B



```

BEGIN
   $q := \nu_0$ 
  DO UNTIL  $B \neq \{\}$ 
     $B := \{\bigcup_{\nu=0}^q E_\nu\} \cap \{\bigcup_{\nu=0}^q M_\nu\}$ 
    IF  $B = \{\}$  THEN
       $B := \{\bigcup_{\nu=0}^q E_\nu\} \cup \{\bigcup_{\nu=0}^q M_\nu\}$ 
      IF  $B = \{\}$  THEN
         $q := q + 1$ 
      ENDIF
    ENDIF
  ENDDO
END

```

Vorgehensweise C

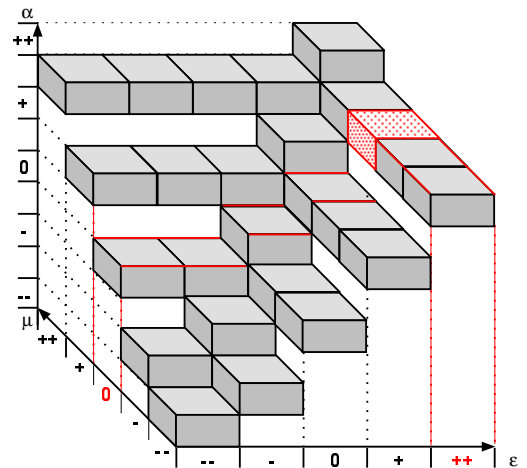


Abb. 3-30: Verschiedene Vorgehensweisen (A,B,C) bei dem Auswahlverfahren

Objekte eine Priorität abgeleitet werden. Ein Objekt wird um so eher bearbeitet, je höher die Priorität ist.

Die Ableitung der Priorität α bzw. die resultierende Gesamtbewertung ist für die drei Vorgehensweisen ähnlich wie in Abb. 3-28 jeweils durch eine Graphik veranschaulicht (Abb. 3-30). Die Stufe der Priorität ist über den diskreten Werten ($++$, $+$, 0 , $-$, $--$) der Bewertungskomponenten aufgetragen. Jeder Kombination der in Form von Intervallen dargestellten Werte (ε, μ) (vergl. Abb. 3-29b) ist ein Quader zugeordnet, dessen Höhenlage die Priorität α angibt. Quader gleicher Höhenlage besitzen die gleiche Gesamtbewertung und bilden eine Prioritätsstufe. Zur Bestimmung der Menge B wird von oben beginnend stufenweise auf die Menge von Objekten assoziativ zugegriffen, deren Bewertungen (ε, μ) in der gleichen Stufe liegen.

Ein Objekt mit der Bewertung $\varepsilon=++$ und $\mu=0$ ist bei der Vorgehensweise A in der dritten Stufe ($\alpha=0$), bei der Vorgehensweise B in der ersten Stufe ($\alpha=++$) und bei der Vorgehensweise C in der zweiten Stufe ($\alpha=++/+$) anzutreffen (siehe Einfärbung in Abb. 3-30).

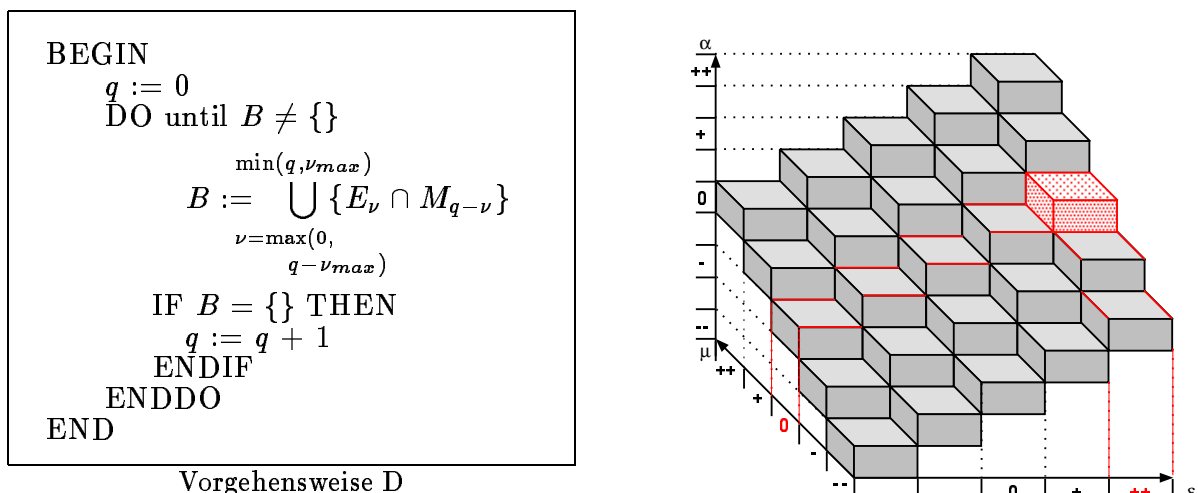


Abb. 3-31: Vorgehensweise D beim Auswahlverfahren

In der Vorgehensweise A wird ein Objekt nur dann gut bewertet, wenn es bezüglich beider Kriterien gut bewertet ist. Die Gesamtbewertung richtet sich also nach dem Minimum von beiden Bewertungskomponenten. Die Vorgehensweise eignet sich z. B. zur Bewertung der Sicherheit eines Objektes. (Beispiel: Ein Objekt ist so sicher wie die unsicherste Komponente.)

In der Vorgehensweise B wird ein Objekt schon dann gut bewertet, wenn es bezüglich eines Kriteriums gut bewertet ist. Die Gesamtbewertung richtet sich also nach dem Maximum von beiden Bewertungskomponenten. Die Vorgehensweise eignet sich z. B. zur Bewertung der Auffälligkeit eines Objektes. (Beispiel: Ein Objekt ist so auffällig wie die auffälligste Komponente.)

In der Vorgehensweise C wird versucht, eine Menge von Objekten zu bestimmen, die bezüglich möglichst vieler Bewertungskomponenten als *beste* Objekte bezeichnet werden

können. Die Vorgehensweise mit zwei Bewertungskomponenten stellt dabei einen Spezialfall des Auswahlverfahrens für n Bewertungskomponenten dar (Kap. A.1). Durch die Kombination von Vorgehensweise A und B wird in der Vorgehensweise C eine größere Zahl von Prioritätsstufen erreicht.

In Abb. 3-31 ist eine Verteilung der Quader dargestellt, die der Verteilung in Abb. 3-28 ähnlich sieht. In der Vorgehensweise D wird ein Objekt dann gut bewertet, wenn es bezüglich beider Kriterien im arithmetischen Mittel gut bewertet ist. Eine schlechte Bewertung bezüglich einer Bewertungskomponente kann durch die gute Bewertung der anderen Bewertungskomponente kompensiert werden.

3.3.3 Kartenwissen zur Parametrisierung der Modelle

Bei der in Kapitel 3.3.2 dargestellten Vorgehensweise wird die Information aus der Karte zur Beschleunigung des Verifikationsprozesses eingesetzt. Sie wurde nicht genutzt, um Objektmodelle zu spezifizieren. Die Information der Karte kann unmittelbar in die Objektmodelle eingebracht werden, wenn bei der Analyse parametrisierte Produktionen verwendet werden.

Beispielsweise kann einer Produktion für das Objekt STREIFEN als Parameter die Breite w_0 übergeben werden. Für die Produktion KREUZUNG kann als Parameter der Winkel zwischen den kreuzenden Objekten übergeben werden.

Triggert ein Verarbeitungselement ein Prozeßmodul, so werden vor dem Aufstellen der Suchbereiche die notwendigen Modellparameter aus der Kartenbeschreibung entnommen. Dazu wird in Abhängigkeit vom Typ des triggernden Objektes auf eine entsprechende Bildbeschreibungsstufe zurückgegriffen.

3.4 Ergebnisse

Ergebnisse der Strukturanalyse von Karte und Luftbild mit 2D-Modellen und 3D-Modellen wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt. Ein Analyseergebnis, das unter Nutzung von Kartenwissen gewonnen wurde, ist an dem Beispiel der Objektklasse *Strassen* dargestellt.

Da eine ausreichend genaue Registrierung zwischen Karte und Luftbild vorliegt, wird zur Beeinflussung der Bearbeitungsreihenfolge das Attribut *Positon* von erwarteten Objekten herangezogen. Die Erwartungen werden mit Hilfe des Bildbeschreibungsgraph (Abb. 3-32a) aufgestellt. Zur Bestimmung der Bewertung ϵ werden Toleranzklassen ein-

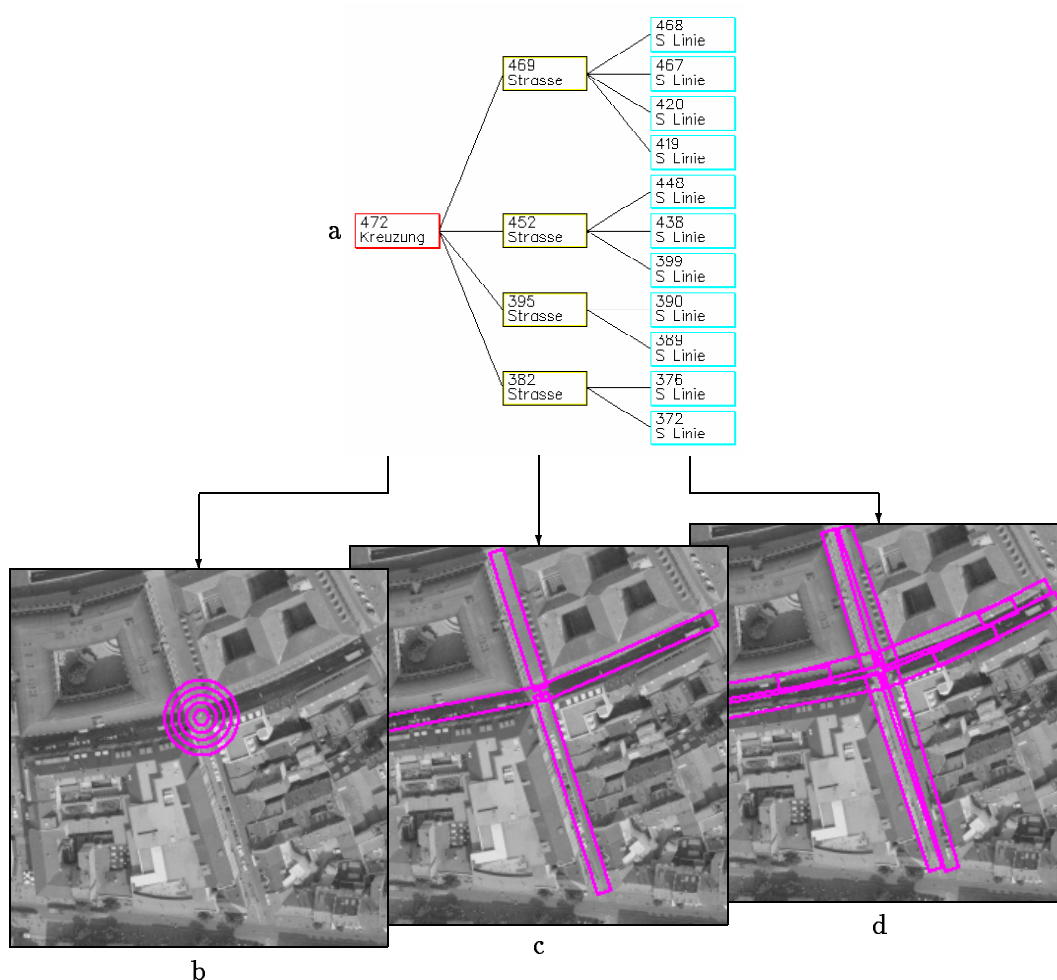


Abb. 3-32: a) Objekte des Bildbeschreibungsgraphen. Abgeleitete Erwartungsbereiche (Erwartungsflächen) im Luftbild für die Bildbeschreibungsstufen
b) KREUZUNG, c) STRASSE, d) LINIE [76]

geführt und entsprechende Intervalle der Attributwerte (Erwartungsbereiche) definiert. Den Erwartungsbereichen werden für die Zuweisung eines Wertes verschieden hohe Erwartungen (z.B. von sehr hoch (++) bis sehr niedrig (--)) zugeordnet. Für das Attribut

Position (x,y) läßt sich ein Erwartungsbereich anschaulich durch eine Fläche (Erwartungsfläche) darstellen. Wird eine Kreuzung erwartet, ergeben sich mit den Toleranzklassen $\{++,+,o,-,-\}$ für das Attribut *Position* geschachtelte Erwartungsflächen. Bei Annahme gleichwahrscheinlicher Abweichungen in alle Richtungen bilden die Grenzen der Erwartungsflächen konzentrische Kreise (siehe Abb. 3-32b). Die Erwartungen werden den Flächen in absteigender Reihenfolge zugeordnet, die innerste Kreisfläche eine *sehr hohe* Erwartung (++) und der äußere Kreisring eine *sehr niedrige* Erwartung (-) erhält. Die Grenzen der Erwartungsflächen mit *sehr hoher* Erwartung {++} sind für die Positionen der mittleren Endpunkte von Objekten STREIFEN (STRASSEN) in Abb. 3-32c und für die Endpunkte von Objekten S_LINIE in Abb. 3-32d dargestellt.

Die Analyse des Luftbildes erfolgt in ähnlicher Weise, wie die der Karte. Das Produktionsnetz zur Kartenanalyse ist in Abb. 3-15 dargestellt. Der Aufbau einer I_KREUZUNG erfolgt über die Objekte I_LANGERSTREIFEN, I_STREIFEN, I_LANGELINIE und I_LINE.

Die Generierung der Primitivobjekte I_LINIE geschieht in der Vorverarbeitungsstufe. Das Ergebnis der Vorverarbeitung für den in Abb. 3-32 dargestellten Bildausschnitt zeigt Abb. 3-33 (vergl. Abb. 2-2)

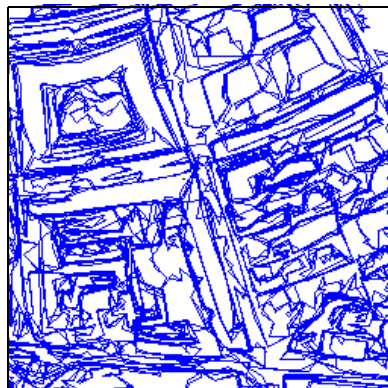
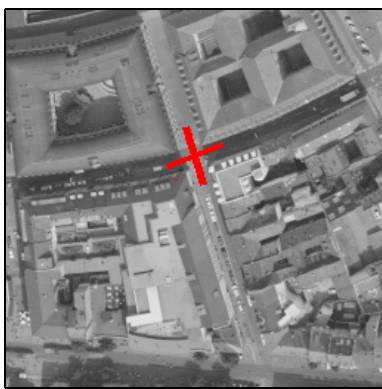


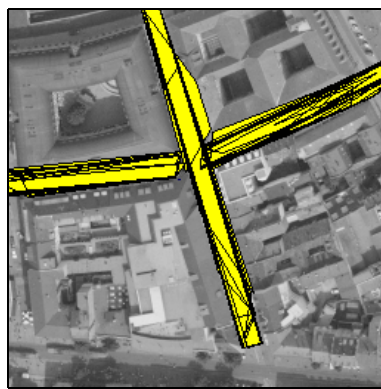
Abb. 3-33: Primitivobjekte [76] (vergl. Abb.2-2)

Ziel der Analyse war es, ein Strassennetz mit Kreuzungen zu verifizieren. Ein Teilergebnis der Luftbildanalyse zeigt Abb. 3-34. Eine zu verifizierende Kreuzung ist durch das Objekt I_KREUZUNG dargestellt (Abb. 3-34a), bzw. bei einer Darstellung durch niedrigere Beschreibungsstufen durch die am Aufbau beteiligten Objekte (Vorgänger) I_STREIFEN (Abb. 3-34b) und I_LANGELINIE (Abb. 3-34c).

Der Vergleich einer Luftbildauswertung ohne Karte und mit Karte hat gezeigt [26], daß durch den Einsatz des Kartenwissens für die Verifikation eine deutliche Reduktion der Bearbeitungszeit erreicht werden konnte.



a



b



c

Abb. 3-34: Teilergebnis der Bildanalyse in den Bildbeschreibungsstufen:
a) KREUZUNG, b) STREIFEN, c) LANGE LINIE [76]

4. Analyse von flächenhaft ausgedehnten Objekten

F. QUINT (IPF)

4.1 Analysesystem

Die Durchführung der Verifikation der in der Karte vermerkten Objekte im Luftbild und, in der nächsten Projektphase, die Klassifikation von nicht verifizierten Objekten erfordert neben den Bildverarbeitungsschritten auf ikonischer Ebene und der Bildung von Merkmalen auch Verfahren auf einer höheren, symbolischen Ebene. Zur Auswertung der Bilddaten wird allgemeines, aus den Erfahrungen des Verfahrensspezifizierers resultierendes Wissen und das in der Karte enthaltene spezielle Wissen verwendet. Damit muß das für die Auswertung verwendete System fähig sein, die Wissensrepräsentation und die Wissensnutzung vorzunehmen. In der Literatur sind mehrere Formalismen zur Wissensrepräsentation und Inferenz bekannt (siehe z.B. [48]):

- Prädikatenlogik erster Ordnung,
- Regelbasierte Systeme (Produktionssysteme),
- Formale Grammatiken,
- Augmentierte Übergangsnetzwerke,
- Semantische Netzwerke

Semantische Netzwerke gehören zu den am weitesten verbreiteten Schemata zur expliziten Wissensrepräsentation. In den folgenden Abschnitten werden übersichtshaft die Eigenschaften semantischer Netzwerke beschrieben und anschließend die Systemumgebung ERNEST IPF verwendet wird. Die Systemumgebung ERNEST wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes an der Universität Erlangen–Nürnberg entwickelt

4.1.1 Semantische Netze

Semantische Netzwerke wurden bereits Ende der 60er Jahre als ein Formalismus zur Wissensrepräsentation eingeführt [62]. Ein Entwicklungsschub fand Mitte bis Ende der 70er Jahre statt, wobei wesentliche Impulse von der Arbeit von Minsky [42] ausgingen. Die Grundidee semantischer Netze ist, beliebige Begriffe (z.B. Objekte, Ereignisse, Sachverhalte) in Knoten darzustellen. Beziehungen zwischen diesen Begriffen werden mit Hilfe von Kanten zwischen den entsprechenden Knoten repräsentiert. Die Begriffe werden als Konzepte bezeichnet. Zur Beschreibung der Konzepte stehen Attribute zur Verfügung.

Um eine eindeutige Interpretation zu bekommen, ist es notwendig, die Anzahl der Arten von Kanten und Knoten zu begrenzen. Die meisten Netze erlauben drei Arten von

Kanten, die gleichzeitig über Teilordnungsrelationen eine Hierarchie im Netzwerk festlegen. Entsprechend den Kanten sind diese Organisationsachsen:

Klassifikationsachse: Ein Objekt der realen Welt wird einem generischen Typ zugeordnet. Diese Achse forciert die Unterscheidung zwischen einem Konzept und der Instanz eines Konzeptes.

Aggregationsachse: Sie erzeugt eine Hierarchie über Konzepten oder Instanzen und anderen Konzepten oder Instanzen, wobei letztere Teil der ersteren sind.

Generalisierungsachse: Entlang einer Generalisierungsachse bewegt man sich von einem allgemeinen Konzept zu spezielleren Konzepten.

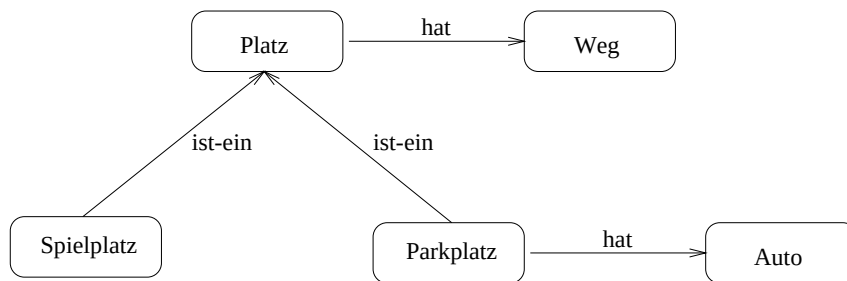


Abb. 4-1: Beispiel für ein semantisches Netz mit Generalisierungs- und Bestandteilkanten

In Abb. 4-1 ist ein Beispiel für ein semantisches Netz dargestellt. Das Konzept *Platz* ist ein Oberbegriff für die Konzepte *Spielplatz* und *Parkplatz*. Die Kanten von *Spielplatz* und *Parkplatz* zu *Platz*, die in der Abbildung mit *ist-ein* gekennzeichnet sind, sind Generalisierungskanten und realisieren die Generalisierungshierarchie. In vielen Implementierungen sind zu den einzelnen Kanten auch die Kanten in umgekehrter Richtung vorhanden. Die (nicht eingezeichnete) Kante von *Platz* zu *Parkplatz* wäre eine Spezialisierungskante. Entlang dieser Kanten erfolgt eine Vererbung von Eigenschaften: das speziellere Konzept erbt die Eigenschaften des allgemeinen Konzeptes. So erben in obigem Beispiel sowohl das Konzept *Spielplatz* als auch das Konzept *Parkplatz* die Bestandteilkante von *Platz*, die auf das Konzept *Weg* zeigt.

Bestandteilkanten (in der Zeichnung mit *hat* gekennzeichnet) erzeugen eine Beziehung zwischen einem Konzept und anderen Konzepten, die Teile des ersteren sind. Das Konzept *Parkplatz* hat in Abb. 4-1 zusätzlich zu dem geerbten Bestandteil *Weg* noch das Bestandteil *Auto*.

Die Konzepte eines semantischen Netzes können durch komplexere Datenstrukturen beschrieben werden. Auch für sie gilt, daß es notwendig ist, ihre Art (Syntax) und Bedeutung (Semantik) genau festzulegen, um eine eindeutige Interpretation zu bekommen. Diese Datenstrukturen beschreiben Eigenschaften des Konzeptes, dem sie zugeordnet sind. Werden numerische Eigenschaften beschrieben, so spricht man auch von Attributen, bei strukturellen Eigenschaften sind es Relationen. Diese Datenstrukturen kön-

nen nicht nur Werte enthalten, mit denen die betreffende Eigenschaft quantitativ beschrieben wird, sondern auch Funktionen, die die Berechnungsmethode für diese Werte angeben. Damit kann in einem semantischen Netz nicht nur deklaratives Wissen (Darstellung von Begriffen und Beziehungen zwischen diesen) gespeichert werden, sondern auch prozedurales Wissen.

Zur Nutzung des in einem semantischen Netz gespeicherten Wissens sind Kontrollalgorithmen notwendig. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze: in ERNEST werden unter Berücksichtigung der Sensordaten die Konzepte instantiiert, während im *Klassifikator* [70] für KL-ONE Instanzen als neue Konzepte in die durch die Wissensbasis gegebene Hierarchie eingeordnet werden.

Bekannte Implementationen von semantischen Netzen sind KL-ONE [8] und PSN [44].

4.1.2 Das semantische Netzwerksystem ERNEST

Das semantische Netzwerksystem ERNEST wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes am Lehrstuhl für Informatik 5 (Mustererkennung) der Universität Erlangen–Nürnberg entwickelt. Es ist ein semantisches Netz, das für den Einsatz in der Mustererkennung konzipiert wurde. Hier kann nur ein Überblick der wichtigsten Eigenschaften von ERNEST gegeben werden, eine detaillierte Beschreibung ist z.B. in [50], [67], [28] enthalten.

Syntax und Semantik des Netzes

Die Syntax wird gebildet aus den im Netz verfügbaren Datenstrukturen, unabhängig von der Bedeutung, die ihnen zugewiesen wird. Die Semantik beschreibt, wie die einzelnen Datenstrukturen zur Repräsentation des deklarativen Wissens verwendet werden.

ERNEST besteht aus:

- 3 Knotenarten: Konzept, modifiziertes Konzept und Instanz,
- 5 Kantenarten: Spezialisierungskanten, Bestandteilkanten, Konkretisierungskanten, Instanzkanten und Modellkanten,
- 9 Substrukturen: Attributbeschreibung, Kantenbeschreibung, Relationsbeschreibung, Modalitätsbeschreibung, Wertebeschreibung, Funktionsbeschreibung, Identifikation, Bereich und Adjazenz.

In den nachfolgenden Abschnitten beziehen wir uns auf das Beispielnetz aus Abb. 4-2.

Die Knoten sind komplexe Datenstrukturen, bestehend aus einer Vielzahl von Substrukturen. Sie sind die übergeordneten Wissensrepräsentationsformen, alle anderen in ERNEST vorkommenden Wissensspeicher sind als Substrukturen eines Knotens erreichbar.

Ein **Konzept** repräsentiert ganz allgemein Begriffe, Objekte, Ideen. Es charakterisiert sie über ihre gemeinsamen Eigenschaften. So steht z.B. das Konzept *Platz* für unbebaute Flächen, deren Länge und Breite in derselben Größenordnung sind und die bestimmte städtebauliche Funktionen erfüllen. Die Konzepte sind in Abb. 4-2 umrahmt.

Die Aufgabe eines Bildauswertesystemes ist es, Bereichen der Bildfunktion eine Bedeutung zuzuweisen. Dies geschieht in einem semantischen Netz dadurch, daß eine Verbindung zwischen dem Ausschnitt des Bildsignals und einem **Konzept** hergestellt wird: eine **Instanz** wird erzeugt. Instanzen repräsentieren also eine spezielle Ausprägung eines Konzeptes, die aus der Menge der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten gebildet werden konnte. In der Datenstruktur **Instanz** sind alle von **Konzept** bereitgestellten Fächer mit konkreten Werten belegt, die aus dem Signal ermittelt wurden. Eine Instanz für *Platz* ist z.B. der Marktplatz der Stadt Karlsruhe.

Bei der Berechnung einer Instanz können mehrere Zwischenstufen auftreten. Insbesondere können Instanzen die von anderen Konzepten bereits berechnet wurden und einen Einfluß auf den Wertebereich von Attributen des aktuellen Konzeptes haben. Diese Zwischenstufen werden in ERNEST durch die Knotenart **modifiziertes Konzept** repräsentiert. Sie unterscheiden sich von den dazugehörenden Konzepten hauptsächlich durch einen eingeschränkteren Wertebereich ihrer Attribute.

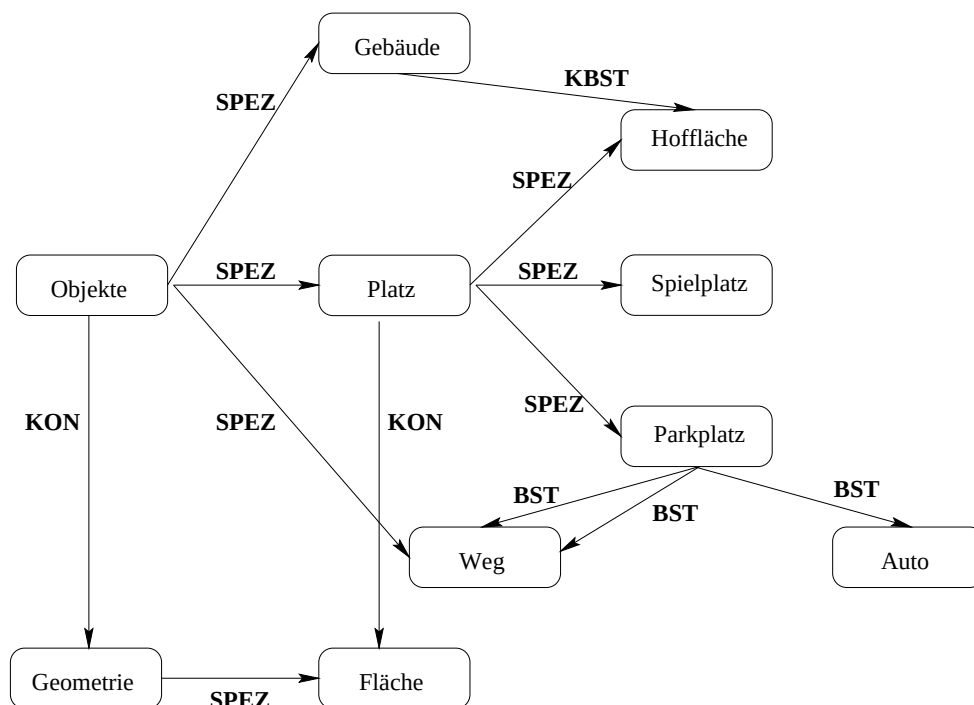


Abb. 4-2: Beispiel für ein semantisches Netz

Die Kanten und ihre in ERNEST aus Effizienzgründen vorhandenen Inversen verbinden einzelne Knoten miteinander. Sie sind als Substrukturen der Knoten realisiert und können nur bestimmte Knotentypen miteinander verbinden. So sind z.B. **Spezialisierungskanten** nur zwischen Konzepten und modifizierten Konzepten oder

zwischen Instanzen möglich, nicht jedoch von einem Konzept zu einer Instanz.

Um das semantische Netz auf formale Korrektheit überprüfen zu können und um einen anwendungsunabhängigen Kontrollalgorithmus zu gewährleisten, müssen alle Kanten außer den Instanz-Kanten eine Halbordnung auf der Menge der Konzepte induzieren. Dies ist dann der Fall, wenn das Netz bezüglich dieser vier Kantentypen zyklensfrei ist. Von Bedeutung für die Reihenfolge in der Instantiierung sind die dadurch aufgestellten Bestands-, Konkretisierung- und Spezialisierungshierarchien.

Die **Instanzkanten** verbinden, wie bereits erwähnt, Instanzen mit den Konzepten, zu denen sie gehören. Sie müssen nicht vom Verfahrensspezifizierer bei der Erstellung des semantischen Netzes angegeben werden, sondern werden durch den Kontrollalgorithmus während des Analyselaufes erstellt.

Die **Spezialisierungskanten** realisieren die Generalisierungshierarchie eines Netzes. Sie verbinden ein allgemeines Konzept mit einem spezielleren Konzept, wie z.B. *Platz* mit *Parkplatz*. Entlang dieser Kanten wird eine Vererbung von Eigenschaften vorgenommen, und zwar vom allgemeinen Konzept zum speziellen Konzept. Diese Vererbung kann jedoch auch für einzelne Substrukturen unterbunden werden, und spezielle Konzepte können zusätzliche Eigenschaften besitzen, die nicht vom allgemeinen Konzept geerbt sind. In ERNEST werden Kantenbeschreibungen, Attributbeschreibungen und Relationsbeschreibungen vererbt. Die **Spezialisierungskanten** sind in Abb. 4-2 durch **SPEZ** gekennzeichnet.

Modellkanten sind spezifisch für ERNEST und verbinden Konzepte eines Modellschemas mit den in einer Wissensakquisitionsphase erzeugten Konzepten.

Die **Konkretisierungskanten** und **Bestandteilkanten** sind einander ähnlich. Beide sind nicht wie die anderen Kanten als einfache Verweise auf ein anderes Konzept oder eine andere Instanz realisiert, sondern werden durch eine komplexe Datenstruktur, die **Kantenbeschreibung** spezifiziert. Die **Konkretisierungskanten** sind in Abb. 4-2 durch **KON** gekennzeichnet, die **Bestandteilkanten** durch **BST**.

Konkretisierungskanten sind spezifisch für ERNEST und verbinden Konzepte auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Die Einführung der Abstraktionsebenen begünstigt die Gruppierung der Konzepte in verschiedene Schichten, wobei die Konzepte innerhalb einer Schicht als „ähnlich konkret“ oder „ähnlich abstrakt“ anzusehen sind. Gehört das Konzept *Platz* z.B. zur Abstraktionsebene *Objekte in Siedlungen*, so wäre eine Konkretisierung in der Abstraktionsebene *Geometrie* das Konzept *Fläche*. Die konkreteste Schicht umfaßt die Konzepte im Signalebene, während die abstrakteste Schicht das Analyseziel enthält. Dazwischen können beliebig viele weitere Abstraktionsebenen eingeordnet werden. Spezialisierungskanten und Bestandteilkanten sind nur zwischen Konzepten derselben Abstraktionsebene erlaubt.

Bestandteilkanten verbinden ein Konzept mit anderen Konzepten, die Teile des ersten sind. Sie realisieren die Bestandteilhierarchie und geben den Aufbau eines Konzeptes aus seinen Einzelteilen an. Bestandteilkanten können, wie auch Konkretisierungskanten, kontextabhängig sein. Kontextabhängigkeit bedeutet, daß ein Bestandteil eines Konzeptes erst identifiziert werden kann, wenn das Konzept bereits identifiziert ist. So ist z.B. eine *Hofffläche* auch ein *Platz*. Doch kann dieser Platz erst dann in seiner

speziellen Ausprägung als Hoffläche und damit als Bestandteil eines Gebäudekomplexes identifiziert werden, wenn der Gebäudekomplex bereits erkannt (instantiiert) ist. Kontextabhängige Bestandteilkanten sind in Abb. 4-2 durch **KBST** gekennzeichnet.

Die Substrukturen sind Datenstrukturen, die zur Beschreibung von Eigenschaften, Relationen und Datenelementen dienen.

Attribute dienen der Beschreibung eines Konzeptes durch Angabe von numerischen oder symbolischen Merkmalen. Zur Angabe der geometrischen Ausdehnungen des Konzepts *Platz* würde man dafür z.B. die Attribute *Länge* und *Breite* vorsehen. Um eine Vermischung von Merkmalen, die der Beschreibung eines Konzeptes dienen, mit Hilfsgrößen, die in der Analyse benötigt werden, zu vermeiden, wurden in ERNEST Analyseparameter eingeführt.

Attribute und Analyseparameter werden über die Substruktur **Attributbeschreibung** spezifiziert. Sie enthält mehrere Fächer, die wichtigsten sind:

- ein Bezeichner, der die funktionale Rolle des Attributes angibt,
- eine Substruktur des Typs **Bereich** zur Angabe von Restriktionen,
- eine **Funktionsbeschreibung** zur Angabe der Berechnungsfunktion,
- eine **Funktionsbeschreibung** zur Angabe der Bewertungsfunktion.

Kantenbeschreibungen modellieren die Bestandteil- und Konkretisierungskanten in ERNEST, die etwas komplexer sind als die anderen Kanten. Neben dem Zielknoten enthalten Kantenbeschreibungen insbesondere die funktionale Rolle der Kanten. Damit ist es möglich, einem Konzept unterschiedliche Funktionen als Teil oder Konkretisierung zuzuweisen. Ein Konzept *Weg* kann z.B. Bestandteil von *Parkplatz* sein mit der funktionalen Rolle *Zufahrtsweg* und mit der funktionalen Rolle *Parkplatzweg*. Weiterhin ist es möglich, die Vielfachheit einer Kante anzugeben sowie über eine **Funktionsbeschreibung** eine Bewertungsfunktion zu spezifizieren.

Über **Relationsbeschreibungen** können Strukturrelationen zwischen einem Konzept und seinen Bestandteilen und Konkretisierungen oder zwischen den Bestandteilen oder Konkretisierungen angegeben werden.

Funktionsbeschreibungen sind in den drei zuvor genannten Substrukturen enthalten, aber auch direkt in einem Konzept und sie dienen zur Angabe von Werteberechnungs- oder Bewertungsfunktionen, die Teil des prozeduralen Wissens sind und vom Verfahrensspezifizierer erstellt werden. Für die Werteberechnungsfunktionen können auch die inversen Funktionen angegeben werden, über die die Fortpflanzung von Wertebeschränkungen möglich ist.

Bei der Beschreibung eines Konzeptes kann es notwendige Bestandteile und Konkretisierungen geben oder solche, die optional oder inhärent vorhanden sein können. Die Menge notwendiger, optionaler und inhärent vorhandener Bestandteile oder Konkretisierungen wird in ERNEST als Modalitätsmenge bezeichnet. Diese wird über die

Modalitätsbeschreibung angegeben. Für ein Konzept können mehrere Modalitätsmengen angegeben werden.

Über Adjazenzen können räumlichen und zeitlichen Nachbarschaften spezifiziert werden, während Identifikationen zur Unterscheidung von Instantiierungspfaden dienen.

Einzelne Zahlenwerte werden in ERNEST über Datenstrukturen des Typs Wertebeschreibung verwaltet, während über Bereichsbeschreibungen Intervalle, Mengen und Verteilungen angegeben werden können.

Die in ERNEST verwendeten und hier kurz vorgestellten Datenstrukturen und Wissensrepräsentationsformalismen beinhalten Erweiterungen gegenüber den in klassischen semantischen Netzen verwendeten Datenstrukturen. Diese Erweiterungen wurden mit dem Ziel des Einsatzes von ERNEST in Mustererkennungsaufgaben vorgenommen. Die wichtigsten sind:

- Der Knotentyp **modifiziertes Konzept** wurde zur Darstellung von Beschränkungen auf noch nicht instantiierten Konzepten eingeführt.
- Die Kantenart **Konkretisierungskante** verbindet Konzepte in unterschiedlichen Abstraktionsebenen.
- Es kann zwischen kontextabhängigen und kontextunabhängigen Bestandteilen eines Konzeptes unterschieden werden.
- Bei einer jeden Werteberechnungsfunktion ist die Angabe einer inversen Funktion erlaubt, mit der Beschränkungen über modifizierte Konzepte propagiert werden können.
- Mit Hilfe der Modalitätsmengen können unterschiedliche Objektbeschreibungen in einem Konzept vereint werden.
- Über die **Adjazenzen** ist eine Darstellung von räumlichen und zeitlichen Einschränkungen möglich.

Pragmatik des Netzwerkes

Während Syntax und Semantik die Repräsentation des Wissens innerhalb des semantischen Netzwerkes bestimmen, gibt die Pragmatik die Nutzung des Wissens an. Die Nutzung des Wissens geschieht in ERNEST durch den Instantiierungsprozeß, in dem aus den Konzepten aufgrund der Sensordaten konkrete Ausprägungen, die Instanzen, gebildet werden.

Hierzu besitzt ERNEST einen problemunabhängigen Kontrollalgorithmus. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Algorithmus ist, daß das Netz formal konsistent ist (siehe Seite 78). Die Reihenfolge, in der die Instantiierungen erfolgen, hängt vom Aufbau des Netzes ab, und zwar speziell von der im Netz realisierten Bestandteil- und Konkretisierungshierarchie. Sie hängt jedoch nicht von der Bedeutung der einzelnen Konzepte ab.

Die Bearbeitungsreihenfolge wird durch sechs Regeln festgelegt, die hier nur übersichtlich beschrieben werden. Sie bestimmen den sogenannten *Netzfluß*. Aus einem Konzept wird zuerst ein modifiziertes Konzept gebildet und anschließend (eventuell über den Zwischenschritt einer partiellen Instanz) eine Instanz. Zur Bildung einer Instanz ist es notwendig, daß für alle obligatorischen Teilkonzepte mindestens eine partiellen Instanz existiert. Partielle Instanzen sind Instanzen, für deren Bildung das Vorhandensein ihrer kontextabhängigen Bestandteile nicht notwendig ist. Ist die Bildung neuer Instanzen nicht möglich, so erfolgt die Erweiterung vorhandener Instanzen durch die Instantiierung ihrer optionalen Bestandteile oder Konkretisierungen. Diese Aktionen werden datengetrieben durchgeführt und stellen die Instantiierungsphase des Netzes dar. Sie hat Priorität vor der Expansionsphase, die modellgesteuert durchgeführt wird, und in der modifizierte Konzepte gebildet werden. In der Expansionsphase werden die als a-priori Wissen bekannten oder während des Analyselaufs ermittelten Beschränkungen für Attributwerte in die modifizierten Konzepte übertragen.

In der Instantiierungsphase werden für das in Bearbeitung stehenden Konzept die Funktionen in folgender, fest vorgegebener Reihenfolge aufgerufen:

1. Kantenbewertungsfunktionen,
2. Attributberechnungsfunktionen,
3. Attributbewertungsfunktionen,
4. Relationsbewertungsfunktionen,
5. Konzeptbewertungsfunktionen.

In der Expansionsphase werden zusätzlich und vor dem Aufruf obiger Funktionen noch die

- invertierten Kantenbewertungsfunktionen,
- invertierten Attributberechnungsfunktionen,
- invertierten Relationsbewertungsfunktionen

aufgerufen. Diese Aufrufreihenfolge bestimmt den sogenannten *Konzeptfluß*. Sowohl Konzeptfluß als auch Netzfluß können vor Beginn der Analyse bestimmt werden. Sie bestimmen die Verarbeitungsreihenfolge innerhalb eines Knotens des Suchbaums.

Liefert eine Attributberechnungsfunktion mehrere konkurrierende Werte oder Beschränkungen, so wird der Suchbaum aufgespalten, indem so viele Nachfolger des aktuellen Knotens erzeugt werden, wie Werte von der Funktion als Ergebnis geliefert wurden. Die Auswahl des nächsten zu bearbeitenden Knotens geschieht über einen A*-Algorithmus [6] durch Auswahl des Knotens mit der höchsten Bewertung. Die Bewertung der Knoten ist anwendungsabhängig, und das notwendige prozedurale Wissen dafür muß vom Verfahrensspezifizierer zur Verfügung gestellt werden. In der Regel wird die Knotenbewertung aus der Bewertung der Instanzen des Knotens abgeleitet.

4.2 Verwendung von Kartenwissen

Motivation

Die in semantischen Netzen implementierten Mechanismen der Vererbung sowie die Ausprägung von Hierarchien ermöglichen eine effiziente Modellierung des zur Problemlösung verwendeten Wissens. Dadurch können mit vergleichsweise geringem Aufwand semantische Netze zur Lösung allgemeiner Mustererkennungsaufgaben erstellt werden.

Steht nur allgemeines Wissen über eine zu lösende Aufgabe zur Verfügung, so wird der Vorteil der leichten Erstellbarkeit des semantischen Netzes in der Regel von der geringen Leistungsfähigkeit und Spezifität des Netzes überschattet. Hat man genaue Kenntnis des zu analysierenden Problems, so wird das mit hohem Aufwand erstellte Netz für die spezielle Aufgabenstellung üblicherweise bessere Ergebnisse liefern als ein mit allgemeinem Wissen erstelltes Netz. Es ist jedoch sehr auf die Lösung des speziellen Problems zugeschnitten, und bei geringfügigen Änderungen in den zu analysierenden Daten muß erneut ein hoher Aufwand für die Erstellung eines neuen Netzes erbracht werden. Diesem Nachteil der einerseits leichten Erstellbarkeit kombiniert mit geringer Leistungsfähigkeit und andererseits der aufwendigen Wissens eingabe kombiniert mit hoher Spezifität soll mit dem im folgenden dargestellten Ansatz begegnet werden.

Ein dreistufiges Konzept für die Modellierung und Nutzung des Wissens wird vorgestellt. Netze, die allgemeines Wissen enthalten, werden nach wie vor durch den Verfahrensspezifizierer erstellt, während das auf die Analyse der vorliegenden Szene spezialisierte Netz automatisch aus allgemeinem Wissen und Ergebnissen der Kartenanalyse erstellt wird.

4.2.1 Struktur des Analyseprozesses

Die Analyse der Bilddaten zur Verifikation des Karteninhaltes ist als ein modellgesteuertes Verfahren konzipiert. Wesentlicher Bestandteil des Modells ist dabei das zu verifizierende Kartenwissen. Als Modellierungsumgebung dient das semantische Netzwerksystem ERNEST [50]. Im Laufe des Analyseprozesses werden mehrere Modelle erstellt. Für jedes Modell wird ein eigenes semantisches Netz bereitgestellt.

Die Struktur des Analyseprozesses ist in Abb. 4-3 dargestellt. Darin sind semantische Netze (Modelle) und Analyseergebnisse mit Rechtecken dargestellt, während Prozesse mit Ellipsen symbolisiert sind. Die Richtung der Pfeile gibt die Richtung des Datenflusses an. Nachfolgend werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Modellen beschrieben sowie übersichtlich ihre Inhalte. Die Modellbildung für einzelne Konzepte wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

Wir unterscheiden, in Erweiterung des Konzeptes aus [46], drei Bereiche: den Szenenbereich, den Bildbereich und den Kartenbereich. Der Szenenbereich stellt unsere natürliche Umgebung, die reale Welt dar. Beschreibungen im Szenenbereich sind Beschreibungen unserer Umgebung, so, wie wir sie mit unseren Sinnesorganen wahrnehmen oder

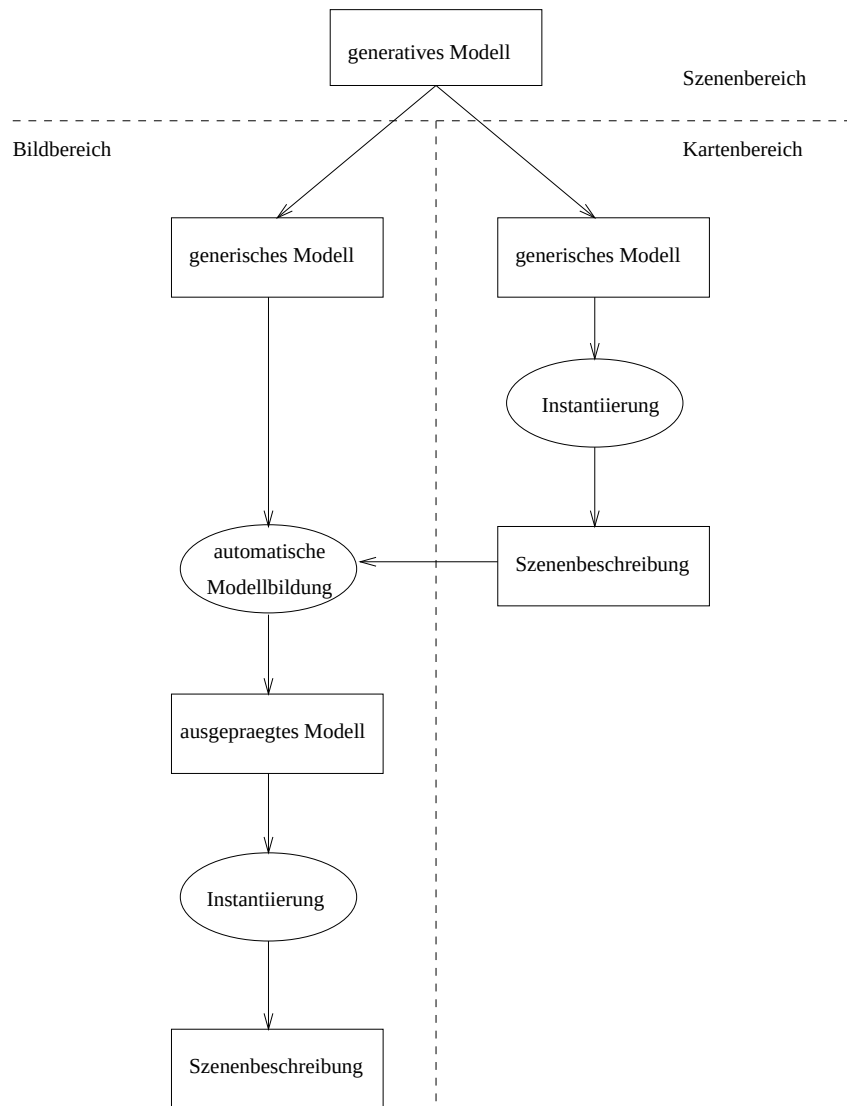


Abb. 4-3: Struktur des Analyseprozesses

wie wir sie aus allgemeinem Wissen und von Erfahrungen her kennen. Im Kartenbereich und im Bildbereich werden Abbildungen der realen Welt, der Szene, in einer Karte bzw. in einer photographische Aufnahme beschrieben.

4.2.2 Generatives Modell

Das generative Modell ist ein semantisches Netz, das die zu analysierenden Bereiche der Umwelt im Szenenbereich beschreibt. Seine Aufgabe ist es, gemeinsame Eigenschaften der Repräsentationen der Szenenobjekte im Bild- und Kartenbereich zu modellieren.

Das generative Modell enthält ausschließlich **deklaratives Wissen**: Konzepte, die die interessierenden Objekte in der realen Welt benennen und beschreiben. Die Beschreibung der Objekte im Szenenbereich ist unabhängig von den Abbildungen der Objekte

im Bildbereich oder im Kartenbereich. D.h., es wird zur Beschreibung allgemeines Wissen über die Objekte verwendet. Die Beschreibung kann erfolgen, ohne daß dem Modelersteller die Abbildung des Objektes im Bild- oder Kartenbereich bekannt ist. So wird z.B. ein Haus über die Angabe seiner Teile *Dachfläche* und *Seitenfläche* beschrieben.

Aus Gründen der Aufwandsminimierung wird jedoch bereits bei der Erstellung des generativen Modells das Analyseziel beachtet, und die für die Analyse irrelevanten Teile werden nicht mit in die Beschreibung aufgenommen. Da bereits bekannt ist, daß z.B. Eingangstüren von Gebäuden weder in der Karte vermerkt sind noch im Luftbild sichtbar sind, brauchen sie bereits bei der allgemeinen Beschreibung der Gebäude im generativen Modell nicht angegeben werden.

Die Beschreibung der Objekte erfolgt durch die Angabe von Attributen und der Bestandteile des Objektes. Gleichzeitig wird eine Spezialisierungshierarchie aufgebaut, so daß gemeinsame Eigenschaften von Objekten nur einmal angegeben werden müssen. So gibt es z.B. das Konzept *MenschPlatz*, das eine vom Menschen geschaffenen Fläche bezeichnet, als Oberkonzept für *Parkplatz* und *Hofffläche*.

Da eine Analyse der Szene im Szenenbereich nicht durchgeführt wird, braucht das generative Modell kein **prozedurales Wissen** zu enthalten.

4.2.3 Generische Modelle

Die generischen Modelle im Bildbereich und im Kartenbereich werden durch den Verfahrensspezifizierer aus dem generativen Modell erstellt. Sie sind eine Projektion des allgemeinen Wissens über die Szene in den Bild- bzw. Kartenbereich. Zusätzlich dazu werden sie durch Besonderheiten der Analyse im Bild- bzw. Kartenbereich ergänzt.

Deklaratives Wissen

Das deklarative Wissen des generativen Modells im Szenenbereich wird vollständig für die generischen Modelle übernommen. Damit enthalten die generischen Modelle dieselben Konzepte, Kanten und Attribute der Konzepte wie das generative Modell. Dieses erreicht man dadurch, daß die Konzepte der generischen Modelle im Karten-, bzw. Bildbereich jeweils als Spezialisierungen der Konzepte des generativen Modells eingetragen werden.

Neben diesen Gemeinsamkeiten zwischen den generischen Modellen im Bild- und Kartenbereich gibt es auch Unterschiede im deklarativen Wissen der beiden Modelle. Damit wird man den unterschiedlichen Repräsentationen der Szene in den beiden Bereichen gerecht. So sind z.B. im Bildbereich Kraftfahrzeuge sichtbar, während sie im Kartenbereich nicht vorhanden sind. Deswegen müssen im Kartenbereich die Bestandteilkanten, die als Zielkonzept das Konzept *Auto* haben, als gelöscht eingetragen werden. Weitere Besonderheiten können über die Angabe von Analyseparametern modelliert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Modelle wird in Abschnitt 4.3 gegeben.

Prozedurales Wissen

Das prozedurale Wissen der beiden generischen Modelle besteht aus Funktionen zur Berechnung der Attribute und Analyseparameter der Konzepte sowie zur Bewertung der berechneten Attribute, der Kanten und der Strukturrelationen. Diese Funktionen sind unterschiedlich für den Bild- und den Kartenbereich und werden vom Verfahrensspezifizierer erstellt. Weil das prozedurale Wissen nicht szenenspezifisch ist, ist es nur einmal beim Aufbau des Systems anzugeben. Es wird in nachfolgend beschriebenen ausgeprägten Modelle zur Bildanalyse unverändert übernommen.

4.2.4 Instantiierung und Szenenbeschreibung im Kartenbereich

Im Unterschied zum generativen Modell können mit beiden generischen Modellen Analysevorgänge durchgeführt werden. Beide Modelle enthalten allgemeines Wissen über die Umwelt, sie enthalten jedoch kein spezifisches Wissen über die aktuell zu analysierende Szene. Dieses wird erst durch Analyse der Szene gewonnen. Die Szenenanalyse wird in unserem Ansatz mit dem generischen Modell jedoch nur im Kartenbereich durchgeführt. Die Analyse im Bildbereich wird mittels des ausgeprägten Modells durchgeführt.

Da die Begrenzungslinien der Objekte in der Karte bereits digital vorliegen und Objektklassen zugeordnet sind, entfällt bei der Instantiierung im Kartenbereich die Phase der Merkmalbildung. Die vorliegenden Merkmale sind, im Rahmen des im Kartenbereich vorhandenen Wissens, exakt. Die im Kartenbereich erstellte Szenenbeschreibung ist damit weniger fehleranfällig als eine anhand des generischen Modells erstellte Beschreibung der Szene im Bildbereich. Diese Szenenbeschreibung im Kartenbereich wird nun zur Unterstützung der Bildanalyse herangezogen. Beispiele für die Szenenbeschreibung im Kartenbereich werden in Abschnitt 4.4 gegeben.

4.2.5 Automatische Modellbildung und ausgeprägtes Modell im Bildbereich

Durch die Registrierung der Karte und des Bildes (siehe Abschnitt 3.3 des ersten Zwischenberichte [73]) können die bekannten geometrischen Merkmale der Instanzen aus der Szenenbeschreibung im Kartenbereich in den Bildbereich transformiert werden. Für die aus der Karte extrahierten Objekte können somit Erwartungsbereiche im Bild definiert werden. Die Form der Objekte ist ebenfalls bekannt.

Mit diesen Informationen kann das generische Modell im Bildbereich spezialisiert werden. Es sind nicht nur Aussagen der allgemeinen Art:

- „In der Szene werden Kleingärten erwartet.“

oder

- „Ein Gebäude kann eine Hoffläche besitzen.“

möglich, sondern man kann z.B. konkret angeben:

- „Ein Kleingarten in Form eines Fünfeckes befindet sich bei den angegebenen Bildkoordinaten.“

oder

- „Das Gebäude mit der (internen) Nummer 12 besitzt zwei Hofflächen, während das Gebäude mit der (internen) Nummer 14 keine Hofflächen besitzt.“

Damit wird die Verifikation in der hier vorgestellten Vorgehensweise nicht als ein Vergleich der Ergebnisse von zwei parallel ablaufenden Analyseprozessen (Karten- und Bildanalyse) durchgeführt, sondern die Ergebnisse des weniger fehleranfälligen Analyseprozesses werden als Modell für die Durchführung des zweiten Analyseprozesses verwendet.

Dieses ausgeprägte Modell zur Bildanalyse (ebenfalls ein semantisches Netz) wird automatisch aus dem Ergebnis der Szenenanalyse im Kartenbereich und dem generischen Modell im Bildbereich erstellt. Es enthält als Konzepte die in der Karte vermerkten Objekte, projiziert in den Bildbereich. Die Eigenschaften der Objekte sind dem Analyseergebnis im Kartenbereich entnommen, während das prozedurale Wissen aus dem generischen Modell im Bildbereich stammt. Auf die Erstellung dieses Modells wird in Abschnitt 4.4 näher eingegangen.

4.2.6 Instantiierung und Szenenbeschreibung im Bildbereich

Die Szenenbeschreibung im Bildbereich ist das Ergebnis der Analyse des Bildes mit dem ausgeprägten Modell im Bildbereich. Die Instanzen repräsentieren die zu verifizierenden Objekte der Szene. Sie werden durch ihre Koordinaten im Bildbereich, durch objektspezifische Merkmale, die aus den Bilddaten extrahiert werden (z.B. Farbe der einzelnen Objektflächen) und durch einen Gütefaktor beschrieben. Dieser gibt an, wie gut die aus dem Bild extrahierten Merkmale mit der Modellvorstellung (der Ausprägung der Objekte im Kartenbereich) übereinstimmen. Damit ist dieser Gütefaktor auch ein Maß für die Verifikation.

Dadurch, daß die Verifikationsaufgabe mittels des aufgestellten semantischen Netzes als modellgesteuertes Verfahren konzipiert ist, werden nur für die im Modell enthaltenen Objekte Aussagen getroffen. Weitere Objekte werden in der Verifikationsphase nicht erzeugt. Die Interpretation der Bildmerkmale, die in der Verifikationsphase keinem Modell zugeordnet wurden, wird in der nachfolgenden Klassifikationsphase vorgenommen.

4.3 Modellierung

In diesem Abschnitt wird beispielhaft am generischen Modell im Kartenbereich gezeigt, wie das Modell der Szene aufgebaut ist. Im nächsten Abschnitt wird das deklarative

Wissen vorgestellt. Anschließend wird am Beispiel eines Konzeptes das prozedurale Wissen erläutert.

4.3.1 Deklaratives Wissen

Bei der Beschreibung von Objekten mittels eines semantischen Netzes werden die Objekte im semantischen Netz durch Konzepte repräsentiert. Demnach hat auch der zu beschreibende Ausschnitt der realen Welt in seiner Repräsentation im Kartenbereich ein korrespondierendes Konzept im semantischen Netz. Dieses Konzept trägt in unserer Implementation den Namen *KSzene*.

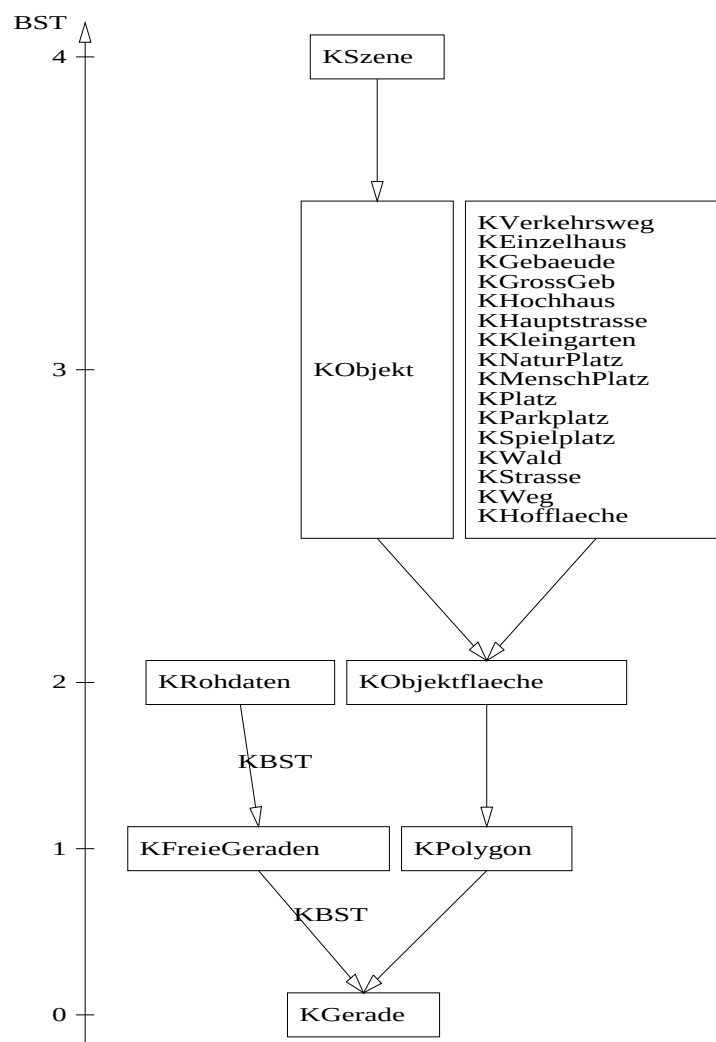


Abb. 4-4: Bestandteilhierarchie des generischen Modells im Kartenbereich.
Zur Erklärung, siehe Text

Es wurde die Konvention eingehalten, die Namen aller Konzepte im Kartenbereich mit einem vorangestellten *K* zu beginnen. Diese Konzepte sind Spezialisierungen der ihnen entsprechenden Konzepte ohne vorangestelltes *K* aus dem Szenenbereich. D.h., das

Konzept *KSzene* aus dem Kartenbereich ist eine Spezialisierung des Konzeptes *Szene* aus dem Szenenbereich. Entsprechendes gilt für die Konzepte im Bildbereich: hier wird dem Namen ein *B* vorangestellt.

Die Bestandteilrelation baut im semantischen Netz eine Hierarchie auf: die Bestandteilhierarchie. Die graphische Darstellung der Bestandteilhierarchie des generischen Modells im Kartenbereich wurde mit Hilfe der Erklärungskomponente *seexplain* von ER-NEST [60] erstellt und ist in Abb. 4-4 dargestellt. Die Konzepte sind mit Rechtecken eingerahmt dargestellt, die Pfeile der Bestandteilkanten zeigen in Richtung der Teile. Kontextabhängige Bestandteilkanten sind mit KBST gekennzeichnet. Auf der vertikalen Achse ist der Bestandteilgrad der Konzepte angegeben.

Bestandteile der Szene sind die in ihr vorhandenen Objekte: Gebäude, Straßen, Grünflächen, Kraftfahrzeuge usw. In dem semantischen Netz spiegelt sich das darin wider, daß eine Bestandteilkante vom Konzept *KSzene* zu dem Konzept *KObjekt* zeigt. Das Konzept *KObjekt* repräsentiert dabei im Netz die in der Szene vorkommenden Objekte.

Die Tatsache, daß viele Objekte in der Szene vorhanden sein können, wird im semantischen Netz über die Vielfachheit einer Kante angegeben. Hierzu sind zwei Angaben erforderlich: eine untere und eine obere Grenze. Die untere Grenze bestimmt die Mindestanzahl der Teile, die instantiiert werden müssen, bevor das übergeordnete Konzept instantiiert werden kann. Diese Teile werden als obligatorische Teile bezeichnet. Die über die Mindestanzahl hinausgehende Anzahl von Teilen sind optionale Teile. Da die Anzahl der Objekte der Szene nicht bekannt ist, werden die Objekte als optionale Teile der Szene modelliert. Auf die Instantiierung der optionalen Teile wird bei der Beschreibung des prozeduralen Wissens näher eingegangen.

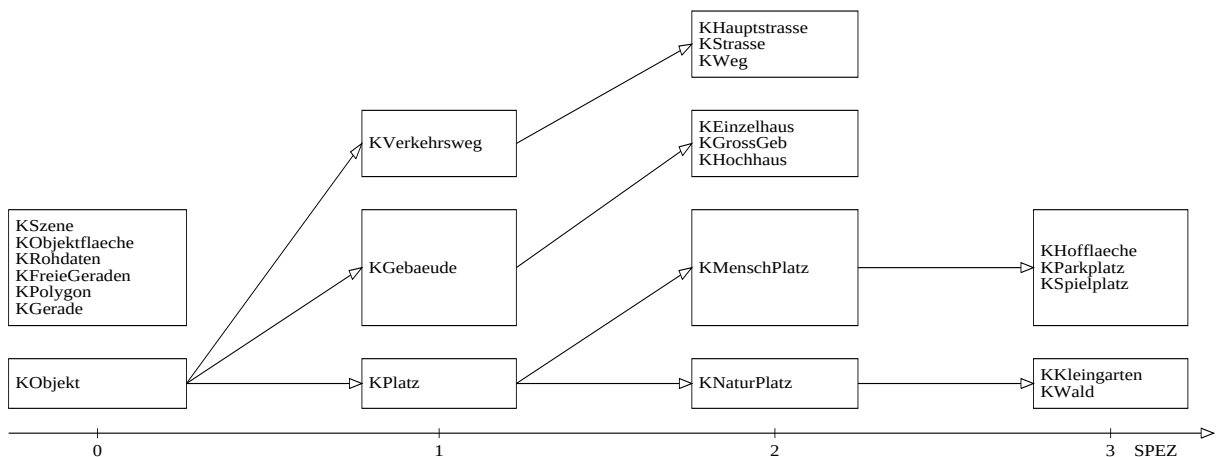


Abb. 4-5: Spezialisierungshierarchie des generischen Modells im Kartenbereich.

Die Spezialisierungen des Konzeptes *KObjekt* sind in Abb. 4-5 dargestellt. Zu den Spezialisierungen des Konzeptes *KObjekt* gehören die in der Karte zu erwartenden Objektklassen. Zusätzlich dazu wurden weitere Konzepte eingeführt, die Eigenschaften der in der Karte vorkommenden Objektklassen zusammenfassen. Das Konzept *KVerkehrsweg* ist Oberkonzept für *KHauptstrasse*, *KStrasse* und *KWeg*. *KPlatz* hat als Spezialisierung

gen *KNaturPlatz* und *KMenschPlatz*, die ihrerseits als Spezialisierungen die Konzepte *KWald* und *KKleingarten* bzw. *KParkplatz* und *KHofflaeche* haben. *KGebaeude* schließlich ist Oberkonzept für *KGrossGeb*, *KHochhaus* und *KEinzelhaus*.

Das Konzept *KObjekt* hat als Bestandteil das Konzept *KObjektflaeche*. Letzteres repräsentiert die im Bild und in der Karte sichtbaren Außenflächen eines Objektes. Da in der Karte nur die Grundfläche eines Objektes vermerkt ist, ist die Vielfachheit dieser Bestandteilkante im generischen Modell im Kartenbereich 1.

Das Konzept *KObjektflaeche* hat als Bestandteile mehrere Konzepte mit dem Namen *KPolygon*. Letztere repräsentieren die Begrenzungen der Objektfläche. In ERNEST bilden die Bestandteilkanten eine geordnete Menge, d.h. anhand ihrer Ordnungszahl läßt sich eine Bestandteilkante, und damit auch die Instanz, auf die diese Bestandteilkante im Analyseergebnis zeigt, identifizieren. Die Attributberechnungsfunktionen für *KPolygon* wurden so implementiert, daß die erste Bestandteilinstanz *KPolygon* immer die äußere Begrenzung der Objektfläche ist. Eventuelle weitere Instanzen *KPolygon* sind dann innere Begrenzungen.

Bestandteile von *KPolygon* sind Geraden, die mit dem Konzept *KGerade* modelliert werden. Die Bestandteilkante von *KPolygon* zu *KGerade* ist ebenfalls vielfach, und es entscheidet sich während des Analyseprozesses, wieviele Instanzen *KGerade* für ein gegebenes Polygon notwendig sind.

Die beiden Konzepte *KRohdaten* und *KFreieGeraden* dienen zur Modellierung der Kartendaten, die zur Analyse zur Verfügung stehen. Bei der Instantiierung von *KRohdaten* werden die digitalisierten Konturen der Karte in die Datenstrukturen des semantischen Netzes eingelesen. Während eines Analyselaufs muß bei einer jeden Veränderung eines Bestandteils eines Konzeptes das Konzept neu instantiiert werden. Dieses ist jedoch für das Konzept *KRohdaten* zu verhindern, weshalb in dem Fach *Identifikation* der Konzeptbeschreibung die Kennung *UNIQUE* angegeben wird.

Kontextabhängiger Bestandteil von *KRohdaten* ist das Konzept *KFreieGeraden*. Eine Kontur aus der Karte ist Bestandteil genau eines Objektes der Szene. Deshalb darf eine Gerade auch nur einmal zur Instantiierung innerhalb eines Zweiges des Suchbaums verwendet werden. Das Löschen einer bereits zur Instantiierung verwendeten Geraden aus der Liste der Rohdaten ist jedoch nicht möglich, da bei einer Aufspaltung des Suchbaums in mehrere Zweige eine Gerade in unterschiedlichen Stufen des Analyseprozesses unterschiedlichen Objekten zugeordnet werden kann. Aus diesem Grund wurde das Konzept *KFreieGeraden* eingeführt, das Verweise auf die in einem Zweig des Suchbaumes noch zur Verfügung stehenden Geraden enthält. *KFreieGeraden* muß kontextabhängiges Bestandteil der Rohdaten sein, da es erst instantiiert werden kann, nachdem das Konzept *KRohdaten* instantiiert wurde. *KFreieGeraden* hat als kontextabhängiges Bestandteil mit vielfacher Bestandteilkante schließlich noch das Konzept *KGerade*.

4.3.2 Prozedurales Wissen

Das vom Verfahrensentwickler zu spezifizierende prozedurale Wissen gliedert sich in drei Kategorien: Attributberechnungsfunktionen, Bewertungsfunktionen und Funktio-

nen zur Steuerung der Analyse. In den nächsten Abschnitten wird am Beispiel des Konzeptes *KPolygon* auf diese Funktionen eingegangen.

Attributberechnungsfunktionen

Das Konzept *KPolygon* hat die Attribute *fxpoly* und *klasse* sowie den Analyseparameter *geschlossen*.

Das Attribut *fxpoly* beinhaltet die geometrischen Merkmale des Polygons und ist als Liste von (x,y) Koordinaten abgelegt, die die Koordinaten der Polygoneckpunkte repräsentieren. Diese Liste wird im Laufe der Analyse nach und nach zu einem vollständigen Polygonzug aufgebaut. Damit treten während der Analyse Zustände auf, in denen das Polygon noch unvollständig (ein offener Polygonzug) ist. Dies ist in einem semantischen Netz nicht zu vermeiden, da immer zuerst eine Instantiierung erfolgen muß, bevor eine Werteberechnung durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund wurde der Analyseparameter *geschlossen* eingeführt.

Die Berechnung des Attributes *fxpoly* ist natürlich abhängig von den Bestandteilen des Polygons: den zum Polygon gehörenden Geraden. Da diese Information bei den zu einem Polygon gehörenden Geraden bereits vorliegt, braucht in der Attributberechnungsfunktion des Polygons nur die geometrische Information aus seinen Bestandteilen (den zum Polygon gehörenden Geraden) kopiert werden.

Allerdings muß man dafür Sorge tragen, daß bei der Instantiierung der Geraden nur die auch wirklich ein Polygon bildenden Geraden als Bestandteile des Polygons eingetragen werden. Ist einmal eine Gerade als Bestandteil eines Polygons festgelegt, so kann als weiterer Bestandteil des Polygons nur eine Gerade gewählt werden, bei der ein Endpunkt mit einem Endpunkt der bereits zum Polygon gehörenden Geraden übereinstimmt¹. Diese Beschränkung in der Attributberechnung der Geraden wird über die sogenannte inverse Attributberechnungsfunktion des Konzeptes Polygon mitgeteilt. Die inverse Attributberechnungsfunktion für das Attribut *fxpoly* hat Zugriff auf das Attribut *fxpoly* selbst und liefert als Ergebnis die Endpunkte des noch offenen Polygonzugs. Dieses Ergebnis der inversen Attributberechnungsfunktion wird als Parameter der Attributberechnungsfunktion des Attributes *fxline* im Konzept *KGerade* übergeben. Damit kann bei der Instantiierung einer neuen Instanz *KGerade* eine Gerade aus der Liste *KFreieGeraden* ausgesucht werden, die das in Bearbeitung befindende *KPolygon* vervollständigt.

Die Konturen der Karte liegen digitalisiert vor, und ihre Zugehörigkeit zu den einzelnen Objektklassen ist bekannt. Damit kann das Attribut *klasse* aus den Kartendaten übernommen werden. Beginnend mit den Rohdaten wird ihre Klasse mitgeführt und während der Instantiierung über die Bestandteilhierarchie bis zu den Konzepten *KObjekt* weitergeleitet. Hier wird sie zur Durchführung der Spezialisierungen verwendet.

Der Analyseparameter *geschlossen* des Polygons vermerkt, ob im aktuellen Analysezu-

¹Durch die Digitalisierung der Karte in der Umgebung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO wird in diesem Anwendungsfall erzwungen, daß die Endpunkte der einzelnen Geraden genau übereinstimmen. Das ist jedoch nicht Bedingung.

stand der Polygonzug bereits zu einem Polygon geschlossen wurde oder nicht. Dieser Parameter wird bei der Instantiierung optionaler Bestandteile und Bestandteilkanten benötigt. Da nicht bekannt ist, aus wievielen Geraden ein Polygon besteht, ist die Anzahl der Bestandteilkanten von *KPolygon* variabel. Es werden so lange Bestandteile von *KPolygon* (also Instanzen von *KGerade*) erzeugt, bis das Polygon geschlossen ist. Die Entscheidung über die Erzeugung dieser „optionalen“ Bestandteilkanten wird in den Funktionen zur Steuerung der Analyse vorgenommen. Dort kann auf den Analyseparameter *geschlossen* zurückgegriffen werden.

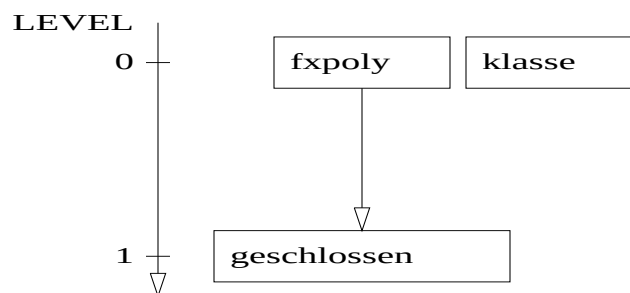


Abb. 4-6: Konzeptfluß für *KPolygon*.

Die einzelnen Attribute und Analyseparameter eines Konzeptes können voneinander abhängen. Zum Beispiel hängt der Analyseparameter *geschlossen* von dem Attribut *fxpoly* ab, da nur aufgrund der in diesem Attribut gespeicherten Information festgestellt werden kann, ob der Polygonzug bereits geschlossen ist. Diese Abhängigkeiten müssen bei der Aufrufreihenfolge der einzelnen Attributberechnungsfunktionen berücksichtigt werden. Sie werden als Konzeptfluß bezeichnet und werden von ERNEST automatisch ermittelt. In Abb. 4-6 ist der Konzeptfluß für das Konzept *KPolygon* dargestellt: der Analyseparameter *geschlossen* kann nur ermittelt werden, nachdem das Attribut *fxpoly* berechnet wurde, während die Berechnung von *klasse* unabhängig von den anderen Attributen und Analyseparametern ist.

Bewertungsfunktionen

Die Bewertungsfunktionen werden in ERNEST zur Auswahl des Suchbaumknotens verwendet, mit dem die Analyse fortgesetzt wird. Die Bewertung des Knotens setzt sich zusammen aus den Bewertungen der im Knoten vorhandenen Instanzen. Die Bewertung der Instanzen wird schließlich aus der Bewertung ihrer Attribute und ihrer Kanten bestimmt.

Da für die Verifikationsaufgabe davon ausgegangen wird, daß die Kartendaten ein getreues Abbild der zu analysierenden Szene sind und durch das manuelle Digitalisieren der Karte keine Widersprüche oder Mehrdeutigkeiten auftreten, erhalten alle berechneten Attribute und Bestandteilkanten jeweils die höchste Bewertung.

Funktionen zur Steuerung der Analyse

Über verschiedene vom Systemprogrammierer zu erstellende Funktionen ist eine Steuerung des Analysevorgangs möglich. Diese Funktionen lassen sich grob in vier Klassen einteilen:

- Initialisierungsfunktionen,
- Funktionen zur Knotenauswahl und Knotenbewertung,
- Funktionen zum Abbruch des Analysevorgangs,
- Funktionen zur Behandlung der optionalen Kanten.

Die Initialisierungsfunktionen ermöglichen es dem Systemprogrammierer, vor Beginn der eigentlichen Analyse bzw. nach ihrem Ende vor- und nachbereitende Aktionen durchzuführen. Für die Analyse der Kartenszene war ihre Verwendung nicht notwendig.

Die Funktionen zur Knotenauswahl und Bewertung werden vom Kontrollalgorithmus des semantischen Netzes aufgerufen, nachdem alle Instanziierungen, Werteberechnungen und Bewertungen durchgeführt wurden. Sie dienen der Auswahl des Knotens, mit dem die Analyse fortgesetzt wird. Aus den bereits im vorhergehenden Abschnitt angeführten Gründen werden bei der Analyse der Kartenszene die Attribute einheitlich bewertet. Als Bewertung des Knotens wird daher die Bewertung seiner Zielinstanz übernommen. Durch die gewählte Struktur des Analyseprozesses wird die Erzeugung konkurrierender Knoten vermieden, so daß die Auswahl des nächsten Knotens eindeutig ist.

Der Analysevorgang wird abgebrochen, nachdem alle aus der Karte digitalisierten Konturen verarbeitet wurden.

Da im generischen Modell der Kartenanalyse nicht bekannt ist, wieviele Objekte in der Szene vorhanden sind, zu welchen Klassen sie gehören und aus wievielen Geraden die Polygone bestehen, sind die entsprechenden Bestandteilkanten vielfach und werden als optionale Kanten behandelt. Damit kommt der Funktion zur Behandlung optionaler Kanten eine zentrale Bedeutung in der Steuerung des Analysevorgangs zu.

Der Kontrollalgorithmus des semantischen Netzes bietet in jedem Knoten die Erzeugung der möglichen optionalen Bestandteilkanten und Spezialisierungen an. Werden in einem Knoten mehrere optionalen Kanten oder Spezialisierungen erzeugt, so spaltet sich der Suchbaum, und die einzelnen Zweige konkurrieren in den nachfolgenden Stufen der Analyse. Aufgrund der Eindeutigkeit der Kartendaten ist diese Konkurrenz nicht erwünscht, sie würde nur zu einer unnötigen Vergrößerung des Suchbaums führen.

Daher wird bei der Kartenanalyse in einem Knoten nur eine optionale Kante oder eine Spezialisierung gleichzeitig erzeugt. Sobald die Klasse eines Objektes bekannt ist, werden für dieses Objekt die Spezialisierungen durchgeführt. Anschließend werden die optionalen Kanten erzeugt, und zwar beginnend mit den Instanzen mit dem niedrigsten Bestandteilgrad bis zu den Instanzen mit dem höchsten Bestandteilgrad.

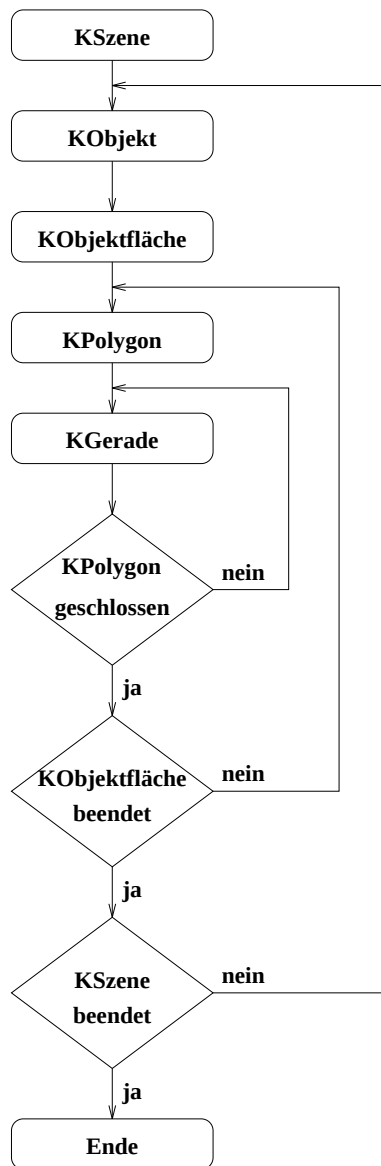


Abb. 4-7: Bearbeitungsreihenfolge während der Instantiierung. Zur Erklärung siehe Text.

Die Instantiierungen erfolgen damit nach dem in Abbildung 4-7 gezeigten Schema. Zur Vereinfachung wurden die Instantiierungen der Konzepte *KFreieGeraden* und *KRohdaten* sowie die Bildung der Spezialisierungen nicht dargestellt. Mit Rechtecken sind die Instantiierungen der Konzepte symbolisiert, während die Rauten die in der Funktion zur Behandlung optionaler Kanten durchgeführten Abfragen symbolisieren. Die Darstellung ist insofern ungenau, daß der Kontrollalgorithmus in jedem Knoten alle Abfragen anbietet. Durch die Auswertung der bei den einzelnen Instanzen gespeicherten Analyseparametern (wie z.B. *geschlossen* bei *KPolygon*) wird die in der Abbildung dargestellte Bearbeitungsreihenfolge erzwungen.

4.4 Ergebnisse

Die Erkennung der in der Karte vorhandenen Objekte aus den digital vorliegenden Kartenkonturen und der Aufbau des Bildbeschreibungsgraphen im semantischen Netz wird am Beispiel eines Ausschnittes aus dem Gelände der Universität Karlsruhe gezeigt. Dabei werden einige Charakteristika der Analyse mittels des erstellten semantischen Netzes erläutert. Die graphischen Darstellungen der unterschiedlichen Analysezustände des semantischen Netzes wurden durch die Erklärungskomponenten des Netzes erstellt.

Im darauffolgenden Abschnitt wird gezeigt, wie das Ergebnis der Kartenanalyse zur Erstellung eines neuen Netzes zur Analyse im Bildbereich verwendet werden kann.

4.4.1 Kartenanalyse

Wie bereits beschrieben, ist im Kontrollalgorithmus des semantischen Netzes eine kombinierte modellgetriebene („top-down“) und datengetriebene („bottom-up“) Suche implementiert. Zu Beginn einer Instantiierungsphase erfolgt eine modellgesteuerte Suche: das Zielkonzept der Analyse wird versucht zu instantiieren. In unserem Fall ist das Zielkonzept der Analyse die Kartenszene, also das Konzept mit dem Namen *KSzene* (siehe auch Abb. 4-4). Eine vollständige Instantiierung eines Konzeptes ist erst möglich, wenn Instanzen seiner Bestandteile bereits gebildet wurden. Das ist zu Anfang der Analyse noch nicht der Fall, so daß für das Konzept *KSzene* zunächst ein modifiziertes Konzept gebildet wird. Damit wird es nun möglich, die Instantiierung der Bestandteile von *KSzene* vorzunehmen. Dieses Vorgehen wird entsprechend der Bestandteilhierarchie verfolgt, bis ein Konzept ohne weitere Bestandteile instantiiert werden kann. Aufgrund der in dem konkreten Fall umfangreichen Zwischenschritte wird auf die Darstellung der Instantiierung der kompletten Hierarchie an dieser Stelle verzichtet. In einem der nachfolgenden Abschnitte wird anhand der Bildung optionaler Kanten für *KObjektfläche* ein Beispiel dieser Instantiierungen erläutert.

Bei der Erstellung des semantischen Netzes zur Kartenanalyse ist natürlich die Anzahl der in der zu analysierenden Szene vorhandenen Objekte nicht bekannt. Damit kann die Dimension der vorkommenden Bestandteilkanten auch nicht exakt angegeben werden. Das bedeutet für die Implementierung in ERNEST, daß die Anzahl der obligatori-

schen Kanten den kleinstmöglichen Wert 1 annehmen muß und die Bildung von optionalen Kanten vorzusehen ist. Weiterhin enthält das semantische Netz zur Kartenanalyse Spezialisierungskanten, deren Instantiierung nach der Instantiierung der obligatorischen Teile angeboten wird.

Durchführung der Spezialisierungen

Nach Instantiierung der jeweils einen obligatorischen Kante je Konzept ist der in Abbildung 4-8a dargestellte Analysezustand erreicht. Die instantiierte Gerade, die in den Kartenausschnitt eingeblendet ist, ist in Abb. 4-8b dargestellt.

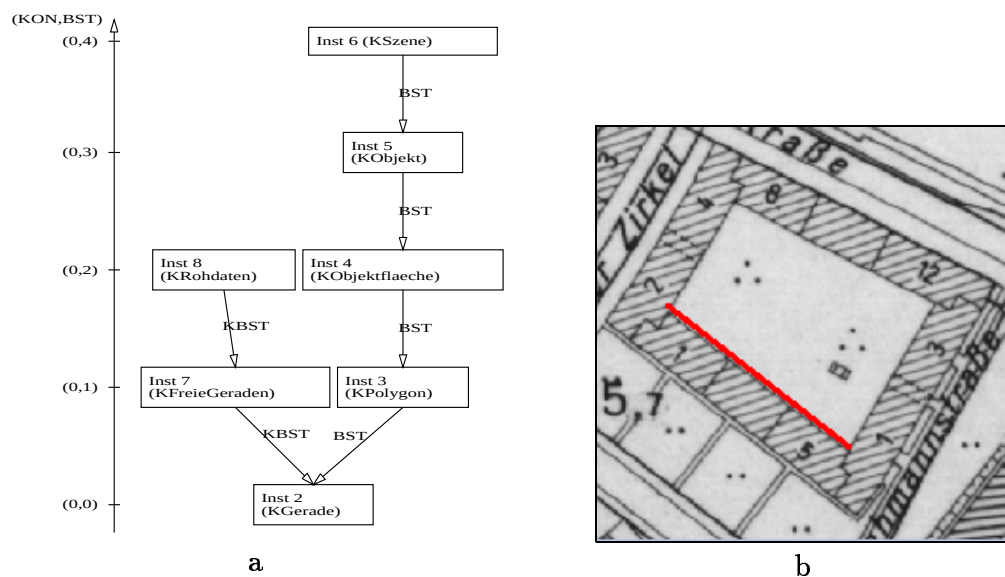


Abb. 4-8: Analysezustand nach der Bildung der obligatorischen Kanten
a) Bildbeschreibungsgraph nach Instantiierung der obligatorischen Kanten.
b) Ausschnitt aus der Kartenszene mit überlagerter Gerade.

In diesem Analysezustand wird vom Kontrollalgorithmus des semantischen Netzes die Bildung der optionalen Kanten und der Spezialisierungen angeboten. An dieser Stelle ist eine Verzweigung des Suchbaumes möglich, und zwar wenn gleichzeitig Spezialisierungen gebildet werden und optionale Kanten für die bereits vorhandenen Instanzen (*KPolygon*, *KObjektfläche* und *KSzene*). Da in diesem Fall eine Verzweigung des Suchbaumes nicht zu unterschiedlichen, konkurrierenden Analyseergebnissen führt, werden zuerst die möglichen Spezialisierungen durchgeführt und anschließend die optionalen Kanten für die Instanzen in steigender Reihenfolge ihres Bestandteilgrades gebildet.

In Abbildung 4-9 a-f sind die Analysezustände in den sechs aufeinanderfolgenden Knoten des Suchbaums dargestellt, in denen die Spezialisierung der Instanz Nr. 5 *KObjekt* aus Abb. 4-8a durchgeführt wird. Bei der Durchführung der Spezialisierung wird das Attribut *klasse* der Instanz *KObjekt* ausgewertet. Dieses Attribut wurde über die Instanzen *KObjektfläche* und *KPolygon* aus dem Attribut *klasse* der Instanz *KGerade* be-

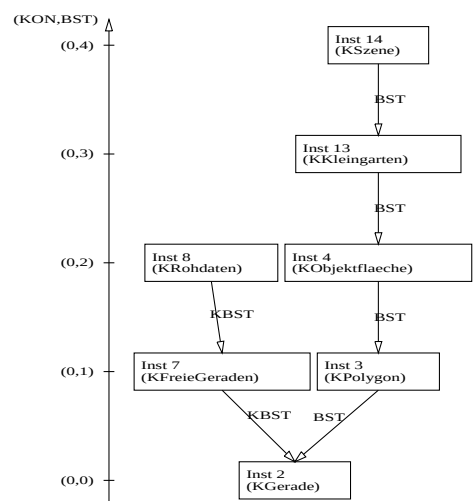
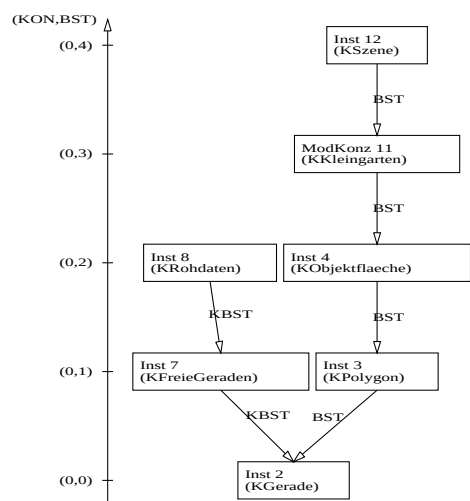
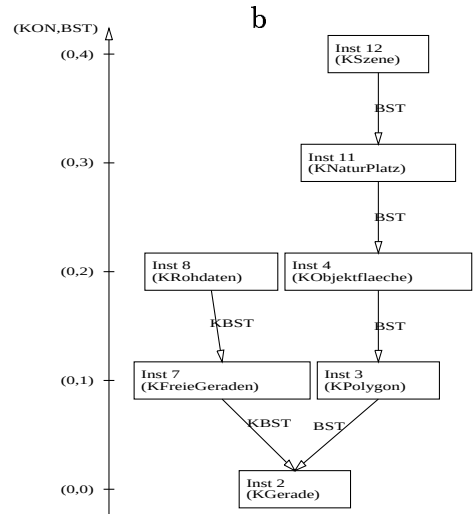
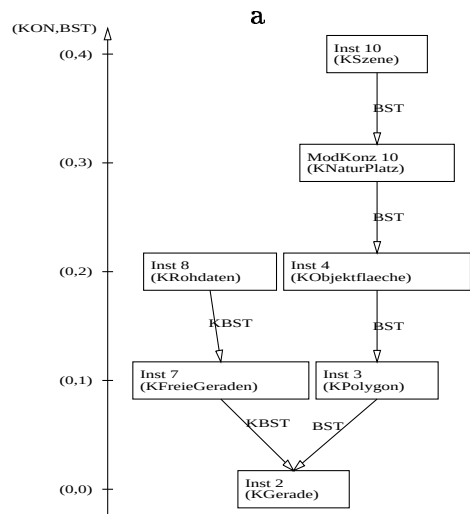
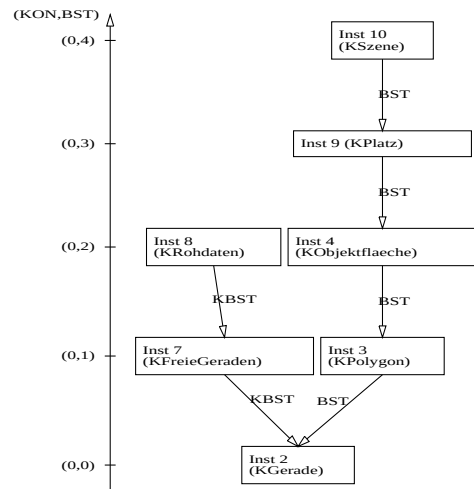
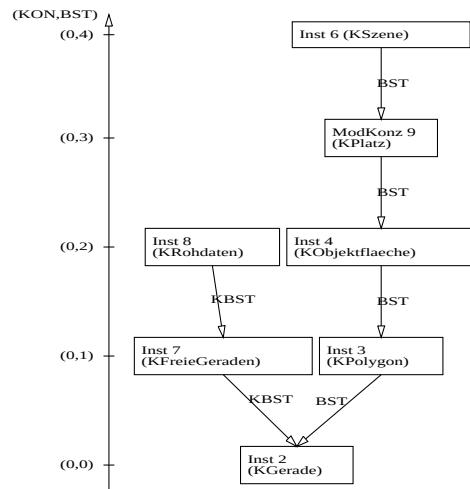


Abb. 4-9: a)-f) Bildbeschreibungsgraphen während der Bildung von Spezialisierungen

rechnet. Letzteres ist bekannt, da bei der Digitalisierung den Konturen der Karte Klassen zugewiesen wurden. Die Instanz Nr. 5 *KObjekt* wird entsprechend ihrer Spezialisierungshierarchie (Abb. 4-5) über Instanzen des Typs *KPlatz*(Abb. 4-9b) und *KNatur-Platz* (Abb. 4-9c-d) zu einer Instanz des Typs *KKleingarten* (Abb. 4-9e-f) spezialisiert. Die Bildung der Instanzen erfolgt gemäß den Regeln im semantischen Netz über ein modifiziertes Konzept. Weiterhin ist zu beobachten, daß für die sich in der Bestandteilhierarchie oberhalb von *KObjekt* befindlichen Instanzen (in unserem Fall nur *KSzene*) jeweils eine Neuberechnung der Attribute und dementsprechend eine Neuintantiierung erfolgt. So wird die Instanz Nr. 6 *KSzene* in die Instanz Nr. 14 *KSzene* überführt.

Instantiierung optionaler Kanten

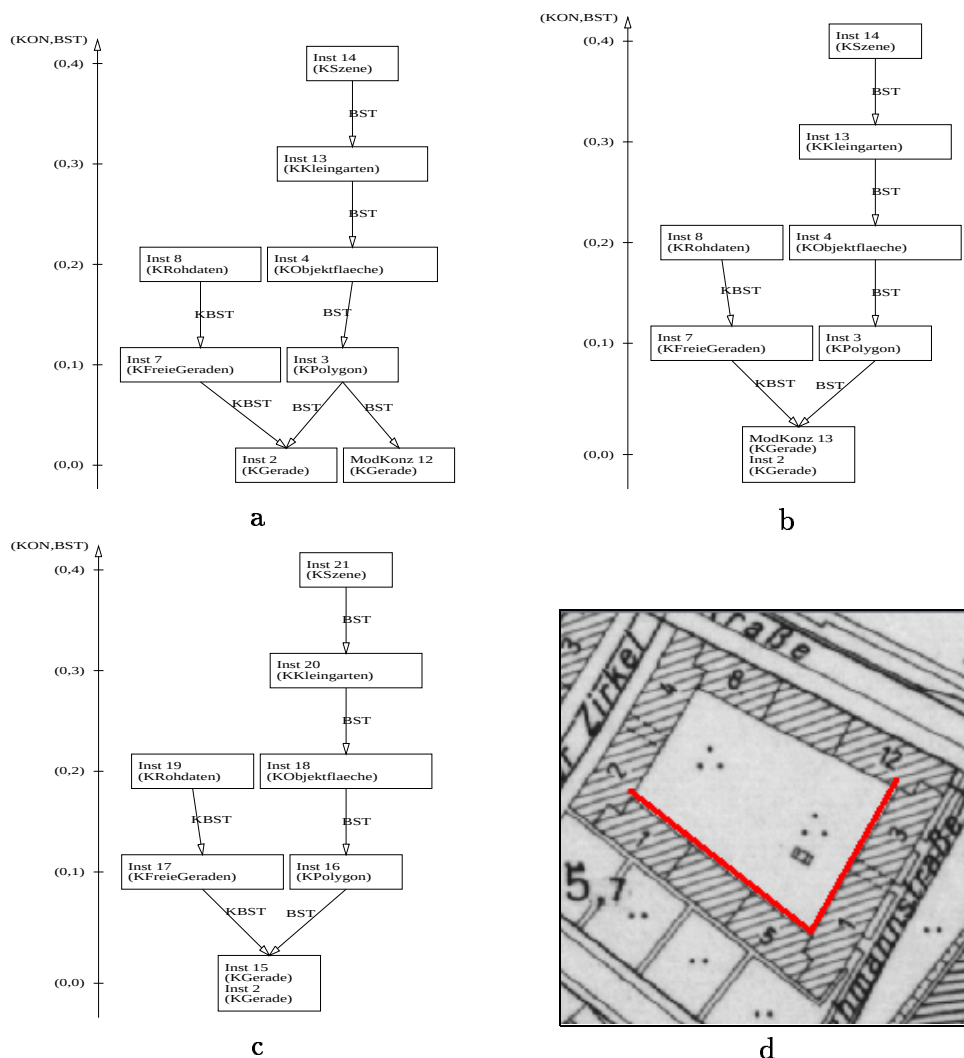


Abb. 4-10: Instantiierung von optionalen Kanten für *KPolygon*

Nach Durchführung der Spezialisierungen werden, beginnend mit der Instanz mit dem niedrigsten Bestandteilgrad, soweit möglich optionale Kanten instantiiert. Dieser Vorgang ist in Abbildung 4-10 für die Instanz Nr. 3 *KPolygon* dargestellt. Es wird zu-

nächst ein modifiziertes Konzept *KGerade* gebildet (Abb. 4-10a), dessen Attribute werden anschließend unter Berücksichtigung der Restriktionen aus der Instanz Nr. 3 *KPolygon* und der Instanz Nr. 7 *KFreieGeraden* berechnet (Abb. 4-10b) und schließlich erfolgt die Instantiierung der *KGerade* sowie die Neuintantiierung der beiden Instanzen, die die *KGerade* als Bestandteil haben (Abb. 4-10c). Das Ergebnis dieses Vorganges ist in Abb. 4-10d in das Grauwertbild der Karte eingeblendet.

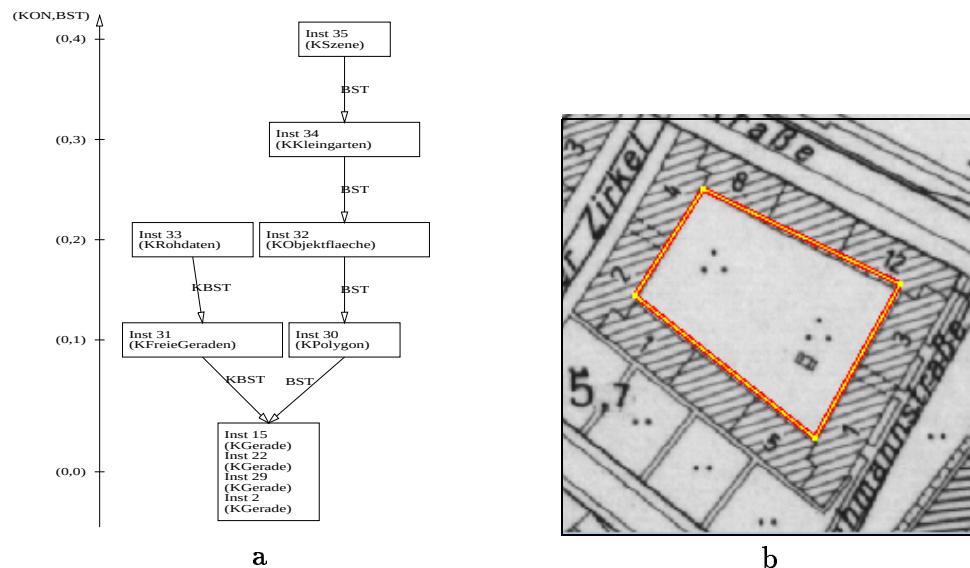


Abb. 4-11: Vollständig instantiiertes Polygon. a) Graph, b) Kartenszene

Die Instantiierung optionaler Kanten für *KPolygon* wird fortgesetzt, bis ein vollständiges Polygon gebildet werden konnte. Das Ergebnis ist in Abb. 4-11 dargestellt. Erst jetzt ist die Instanz Nr. 30 *KPolygon* wirklich ein Polygon, alle ihre Vorgänger waren nur Polygonzüge. Hierbei wird eine charakteristische Eigenschaft der semantischen Netze deutlich: um eine Attributberechnung durchführen zu können, muß zuerst eine Instanz gebildet werden. Diese Eigenschaft ist eine Folge der mit höherer Priorität durchgeführten modellgesteuerten Vorgehensweise gegenüber der datengesteuerten Vorgehensweise. So wird auch in diesem Fall eine Instanz *KPolygon* gebildet, obwohl das entsprechende Objekt aus der Kartenszene noch gar kein Polygon, sondern erst ein Polygonzug ist. Um dennoch den Unterschied zwischen den verschiedenen Stadien des *KPolygon* festzuhalten, wurde der bereits erwähnte Analyseparameter *geschlossen* eingeführt.

Danach werden optionale Kanten für das Konzept *KObjektfläche* gebildet. Bestandteile von *KObjektfläche* sind mehrere Polygone, wobei das erste die äußere Grenze der Fläche und die weiteren Polygone eventuelle innere Begrenzungen repräsentieren. Im Falle der Instanz Nr. 34 *KKleingarten* aus Abb. 4-11 sind keine inneren Begrenzungen vorhanden. Dennoch muß entsprechend der zuvor geschilderten Eigenschaften des semantischen Netzes zuerst eine Instantiierung für die Teile der *KObjektfläche*: *KPolygon* und *KGerade* erfolgen, bevor festgestellt werden kann, daß ihre Attribute nicht berechenbar sind. In entsprechenden Analyseparameter wird bei den Instanzen Nr. 36 und Nr. 37

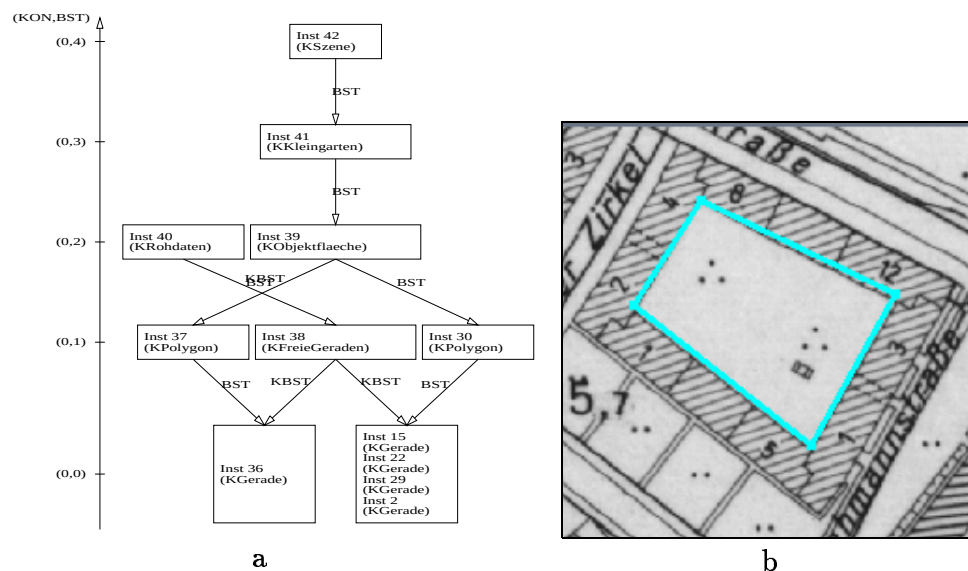


Abb. 4-12: Vollständig instantiiertes *KKleingarten*. a) Graph, b) Kartenszene

aus Abb. 4-12 vermerkt, daß die Attribute nicht berechenbar sind, da Merkmale mit passenden Eigenschaften fehlen. Damit sind für die Instanz Nr. 34 *KKleingarten* und für ihre Bestandteile die möglichen optionalen Kanten instantiiert. Instanz Nr. 34 wird zur Instanz Nr. 41 neuinstantiiert und erfährt keine Veränderungen mehr im Laufe des Analyseprozesses. Die Instantiierung des ihr entsprechenden Kleingartens aus dem Kartenbereich ist beendet. Der dazugehörige Bildbeschreibungsgraph ist in Abb. 4-12a dargestellt, die in das Grauwertbild der Karte projizierten Merkmale in Abb. 4-12b. Die unterschiedlichen Farbe der in die Karte eingeblendeten Merkmale in den Abbildungen 4-10d, 4-11b und 4-12b widerspiegeln die unterschiedlichen Zustände der Analyse.

Als nächster Schritt in der Analyse der Kartenszene werden optionale Kanten für die Instanz *KScene* gebildet. Das geschieht ähnlich der bereits beschriebenen Vorgehensweise. Die Instantiierung optionaler Kanten der Instanz *KScene* endet, wenn alle Konturen des Ausschnittes in den Beschreibungsgraphen eingebaut wurden. In Abbildung 4-13 ist der mittels Analyse durch das generische Modell im Kartenbereich erstellte Beschreibungsggraph für den Beispielausschnitt aus der Karte dargestellt, wobei nur die im Ausschnitt vorkommenden Objektklassen des IPF berücksichtigt wurden.

4.4.2 Erstellung des ausgeprägten Modells im Bildbereich

Ein wichtiges Merkmal des hier vorgestellten Verfahrens ist die automatische Erstellung des Netzes zur Bildanalyse aus einem generischen Modell im Bildbereich und den Ergebnissen der Kartenanalyse. Letztere wurden in vorhergehendem Abschnitt vorgestellt. Nun soll gezeigt werden, wie sie mit dem a-priori Wissen aus dem generischen Modell zu einem neuen semantischen Netz kombiniert werden, das die Verifikation der Kartenobjekte im Bild erlaubt.

Das generische Modell im Bildbereich enthält, wie in Abschnitt 4.3 dargestellt, Konzepte, mit denen die in der Szene vorkommenden Objekte beschrieben werden. Es

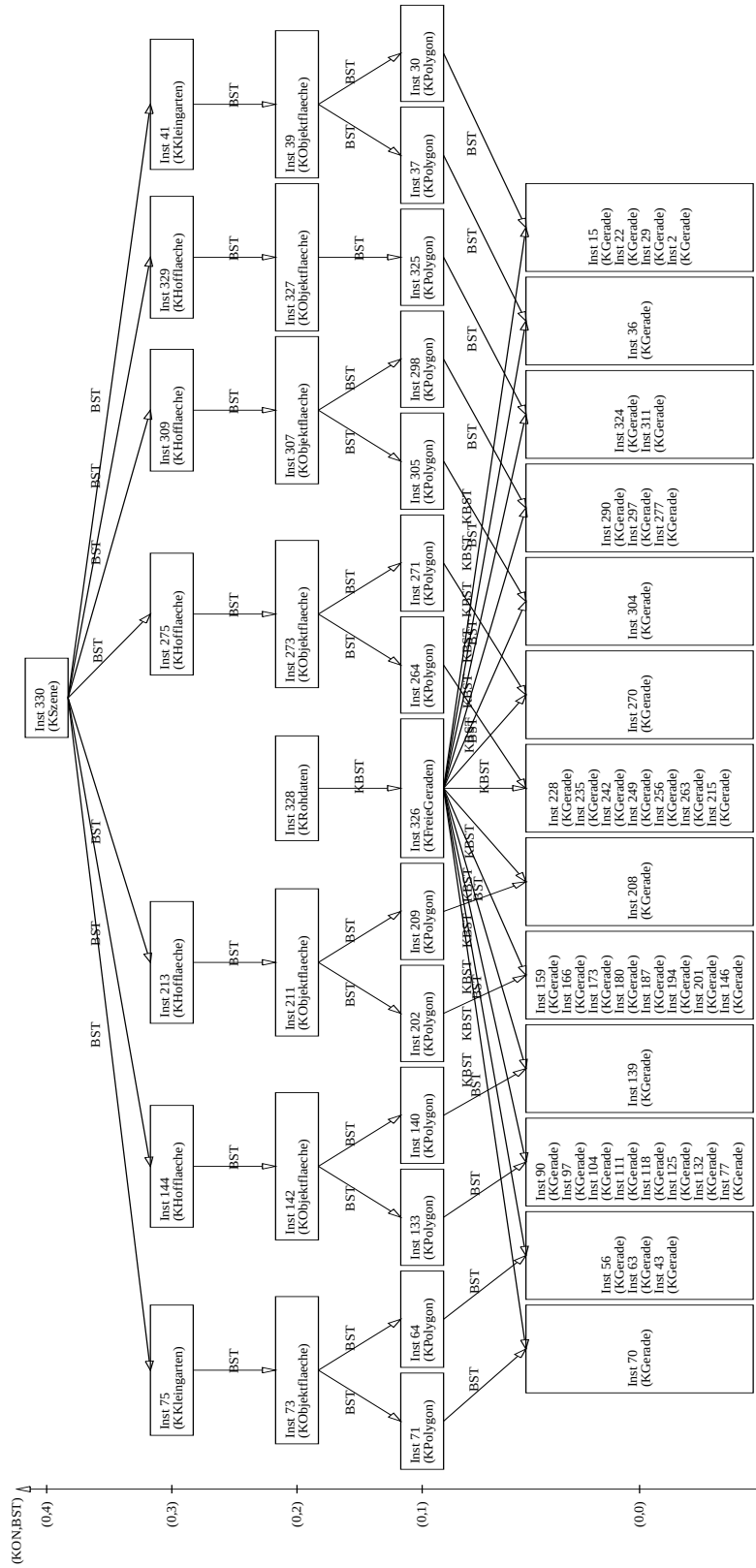


Abb. 4-13: Beschreibungsgraph als Ergebnis der Kartenanalyse

ist zum Zeitpunkt der Erstellung des generischen Modells jedoch nicht bekannt, wie viele Objekte in der Szene vorkommen und wie ihre Verteilung auf die unterschiedlichen Klassen ist. Die Größe und Lage der Objekte in der Szene ist ebenfalls nicht bekannt.

Dieses Wissen ist jedoch nach der Durchführung der Kartenanalyse vorhanden. Selbstverständlich ist das Wissen nicht für die in der Szene vorhandenen Objekte bekannt, sondern nur für die Szenenobjekte, die in der Karte eingetragen sind. Ebenfalls sind die Lage, Größe und Form der Objekte nach der Kartenanalyse auch nur mit der der Karte eigenen Genauigkeit bekannt. Aufgabe der Verifikation ist es aber, die Objekte in der Karte zu bestätigen oder zu verwerfen und gegebenenfalls Korrekturen ihrer Attribute (Lage, Größe usw.) vorzunehmen. Das aus der Kartenanalyse gewonnene Wissen ist damit zum einen Vergleichsgrundlage und zum anderen dient es dazu, den Suchraum bei der Bildanalyse einzuschränken.

Eine Analyse wird in einem semantischen Netz immer durch den Vorgang einer Instanziierung durchgeführt. Unser Konzept für die Verifikation ist nun, daß nicht versucht wird, über die Bildanalyse Objekte aus dem Bild zu instantiieren und anschließend mit den aus der Karte instantiierten Objekten zu vergleichen, sondern direkt die zu verifizierenden Objekte des Kartenbereichs im Bildbereich zu instantiieren. Damit muß nicht z.B. irgendein Kleingarten im Bild gefunden werden, dessen Eigenschaften im generischen Modell nur allgemein angegeben werden können, da sie ja für die gesamte Klasse gelten müssen, sondern es wird versucht, einen konkreten Kleingarten zu instantiieren, dessen Eigenschaften aus der Kartenanalyse bekannt sind.

Die aus der Kartenanalyse bekannten Eigenschaften müssen in das semantische Netz zur Bildanalyse übertragen werden. ERNEST bietet hierfür den Mechanismus der Restriktionen an. Für die Attribute können Restriktionen eingetragen werden, die bei der Ausführung der Attributberechnungs- und der Attributbewertungsfunktionen übergeben werden. Bei der Berechnung der Attribute dienen die Restriktionen als Vorgabewerte und engen somit den Suchbereich ein, während sie in den Bewertungsfunktionen als Grundlage für den Vergleich zwischen Karteninformation und Bildinformation dienen.

Zur Kombination der Ergebnisse der Kartenanalyse mit dem generischen Modell zur Bildanalyse zu dem ausgeprägten Modell zur Bildanalyse wurde ein Programm erstellt, das nicht an spezifische generische Modelle gebunden ist. Es benötigt als einzige Voraussetzung, daß die Konzepte des generischen Modells im Bildbereich und des generischen Modells im Kartenbereich, dessen Instanzen ja das Ergebnis der Kartenanalyse ist, Spezialisierungen von jeweils einem gemeinsamen, allgemeinem Konzept sind. Das ist in unserem Fall durch das generative Modell im Szenenbereich gegeben. Diese Voraussetzung ist notwendig, um die Zuordnung zwischen den sich entsprechenden Konzepten im Bild- und im Kartenbereich, die dasselbe Objekt des Szenenbereichs beschreiben, feststellen zu können.

Für das Zielkonzept des generischen Modells im Bildbereich (in unserem Fall *BSzene* wird im Analyseergebnis die Instanz des dem Zielkonzept entsprechenden Konzeptes aus dem Kartenbereich (d.h. Instanz von *KSzene*) gesucht. Die Kanten, die Instanzen, auf die diese Kanten zeigen und die Attribute der Instanzen werden in die Konzepte des

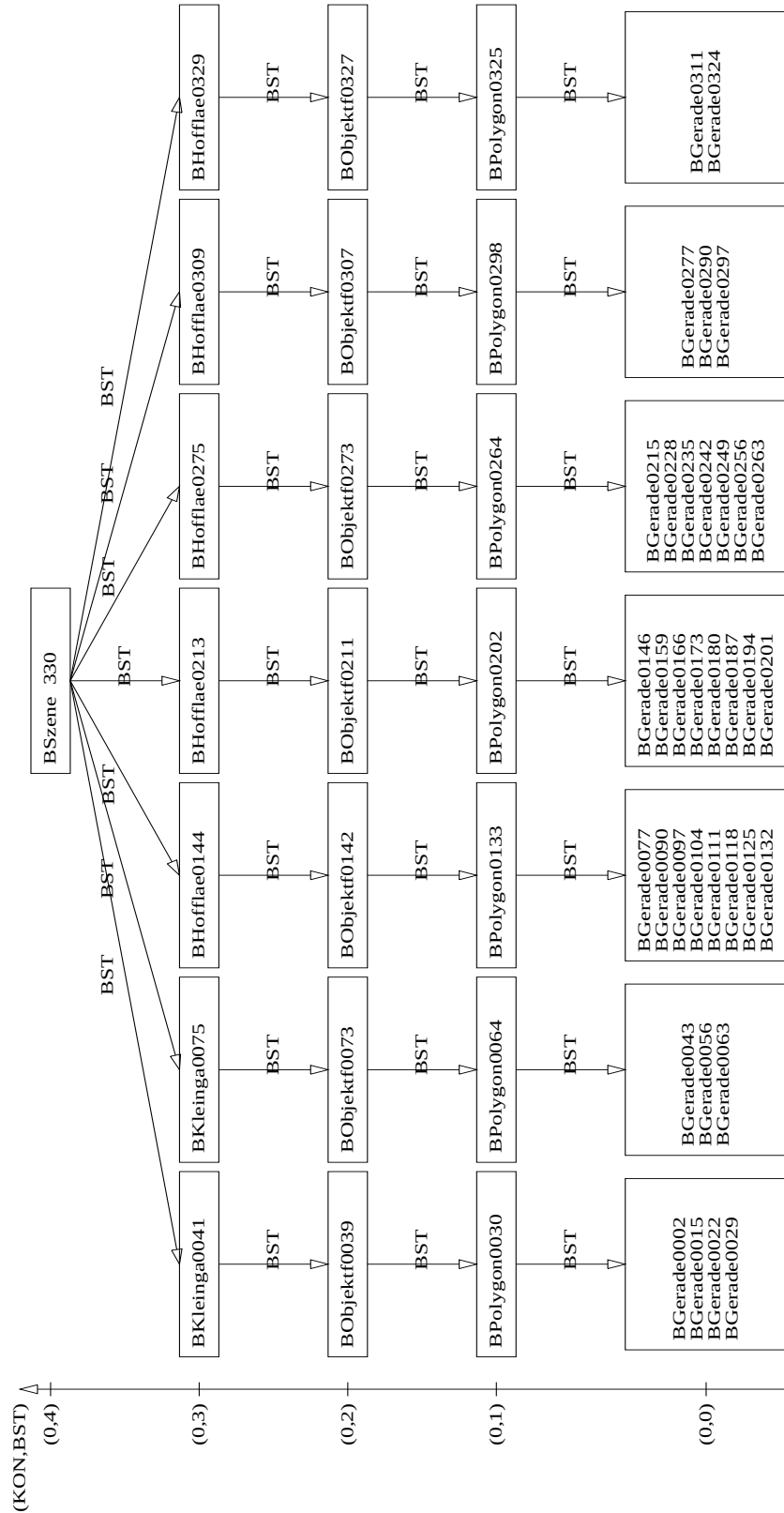


Abb. 4-14: Bestandteilhierarchie des automatisch erstellten ausgeprägten Modells zur Bildanalyse

generischen Modells im Bildbereich kopiert. Die Vorgehensweise beim Kopieren ist für jedes Konzept dieselbe, wird rekursiv auf den Baum angewendet und wird im folgenden beschrieben.

Die Bestandteilhierarchie des automatisch erstellten ausgeprägten Modells zur Bildanalyse für den im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Ausschnitt der Szene ist in Abb. 4-14 dargestellt. Auf diese Abbildung wird bei der Vorstellung des Verfahrens Bezug genommen.

Ein Konzept im ausgeprägten Modell zur Bildanalyse wird erzeugt, indem zunächst das entsprechende Konzept aus dem generischen Modell zur Bildanalyse kopiert wird. Der Name des neuen Konzeptes ergibt sich aus dem Namen des alten Konzeptes, an den die Instanznummer der dem Konzept entsprechenden Instanz aus der Kartenanalyse angehängt wird; z.B. ist das Konzept *BSzene 330* aus Abb. 4-14 entstanden aus dem Konzept *BSzene* des generischen Modells im Bildbereich und der Instanz Nr. 330 *KSzene* (siehe Abb. 4-13).

Die Analyseparameter, Analyserelationen, Strukturrelationen, Modalitäten und Konzeptbewertungen werden von dem Konzept aus dem generischen Modell im Bildbereich übernommen. Die entsprechenden Größen der Instanz aus dem Kartenbereich werden für die Erstellung des ausgeprägten Modells nicht beachtet, da diese spezifisch für die Analyse im Karten- oder Bildbereich sind.

Die Attribute, lokalen Attribute und geerbten Attribute zusammen mit ihren Berechnungsfunktionen und Bewertungsfunktionen des Konzepts werden aus dem generischen Modell übernommen. Für diejenigen Attribute, die auch in der Instanz aus dem Ergebnis der Kartenanalyse vorhanden sind, wird eine Beschränkung eingetragen. Die Beschränkung ist der Attributwert der Instanz.

Lokale und geerbte Bestandteil- und Konkretisierungskanten werden ähnlich behandelt. Für alle solchen Kanten des Konzeptes im generischen Modell werden die entsprechenden Kanten in der Instanz des Analyseergebnisses gesucht. Da die Kanten des Modells eine höhere Dimension als eins haben können, können im Analyseergebnis mehrere Ausprägungen einer Kante vorhanden sein. Wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert wurde, können Instanzen erzeugt werden, die jedoch keine Entsprechung in den Daten haben. Dies ist in ihren Analyseparametern vermerkt. Für diese Instanzen darf jedoch kein Konzept im ausgeprägten Modell erzeugt werden. Für jede Ausprägung einer Kante wird überprüft, ob die dazugehörige Instanz „gültig“ ist. Falls ja, wird das entsprechende Konzept im generischen Modell gesucht und nach den geschilderten Regeln rekursiv kopiert. Dementsprechend treten die nur eine Gerade beinhaltenden Polygone aus Abb. 4-13, die wegen fehlender innerer Begrenzungen der Objektflächen keine gültigen Attribute enthielten, im ausgeprägten Modell zur Bildanalyse als Konzepte nicht mehr auf.

Im ausgeprägten Modell sind auch keine vielfachen Bestandteilkanten mehr notwendig. Durch die Analyse der Karte ist nun bekannt, wieviele Objekte in der Szene enthalten sind oder aus wievielen Geraden ein Polygon besteht und es können entsprechend viele Kanten mit der Vielfachheit jeweils eins erzeugt werden. In Abb. 4-14 hat das Konzept *BSzene 330* sieben unterschiedliche Bestandteilkanten. Sie sind alle durch Kopieren der

Bestandteilkante des Konzeptes *BSzene* entstanden, haben jedoch im Gegensatz zu dieser nur die Vielfachheit 1 und zeigen auf unterschiedliche Konzepte.

Da von den einzelnen Objekten der Szene bekannt ist, welcher Klasse sie angehören und bei der automatischen Erstellung des semantischen Netzes die Aufwandsersparnis durch die Angabe gemeinsamer Eigenschaften bei Oberkonzepten nicht ins Gewicht fällt, werden im ausgeprägten Modell zur Bildanalyse keine Spezialisierungskanten erzeugt. Für ein Konzept aus dem generischen Modell wird überprüft, ob es Spezialisierungen besitzt. Ist dies der Fall, so wird das Konzept nicht in das ausführliche Modell übernommen, sondern die von ihm ausgehenden Spezialisierungskanten werden verfolgt, bis Konzepte mit dem Spezialisierungsgrad Null (ein Konzept ohne weitere Spezialisierungen) gefunden werden. Es wird überprüft, welche der Spezialisierungen in der entsprechenden Instanz im Analyseergebnis realisiert wurde. Diese Spezialisierung wird nun als Konzept in das ausführliche Modell übernommen. Demnach sind im ausführlichen Modell zur Bildanalyse (Abb. 4-14) keine Konzepte des Typs *BObjekt* oder *BPlatz* mehr enthalten, sondern nur ihre Spezialisierungen wie *BKleingarten* und *BHofffläche*.

5. Zusammenfügung der Verifikationsergebnisse

U. STILLA (FIM), F. QUINT (IPF)

Die Ergebnisse des von beiden Projektpartnern durchgeführten Verifikationsprozesses (Abb. 5-1) sind Graphen, die das analysierte Bild beschreiben. Die Bildbeschreibungsgraphen geben die Bestandteilhierarchie der Szene wieder. Jeder Knoten der Graphen repräsentiert ein Objekt oder ein Teilobjekt der Szene, und der Wurzelknoten des Graphen repräsentiert die Szene als Ganzes. Von einem Knoten ausgehende Kanten führen zu den Bestandteilen des in dem Knoten repräsentierten Objektes. Beispiele für die nach der Analyse entstehenden Bildbeschreibungsgraphen sind in Kapitel 3 in Abb. 3-26 (für die Analyse mit dem Produktionssystem) und in Kapitel 4 in Abb. 4-13 (für die Analyse mit dem semantischen Netz) dargestellt. Jeder Knoten enthält eine Bewertung, die angibt, wie gut die aus dem Bild berechneten Merkmale den zum Teil aus der Karte gewonnenen, zum Teil den allgemeinen Erfahrungen des Verfahrensentwicklers entstammenden Modellvorstellungen entsprechen.

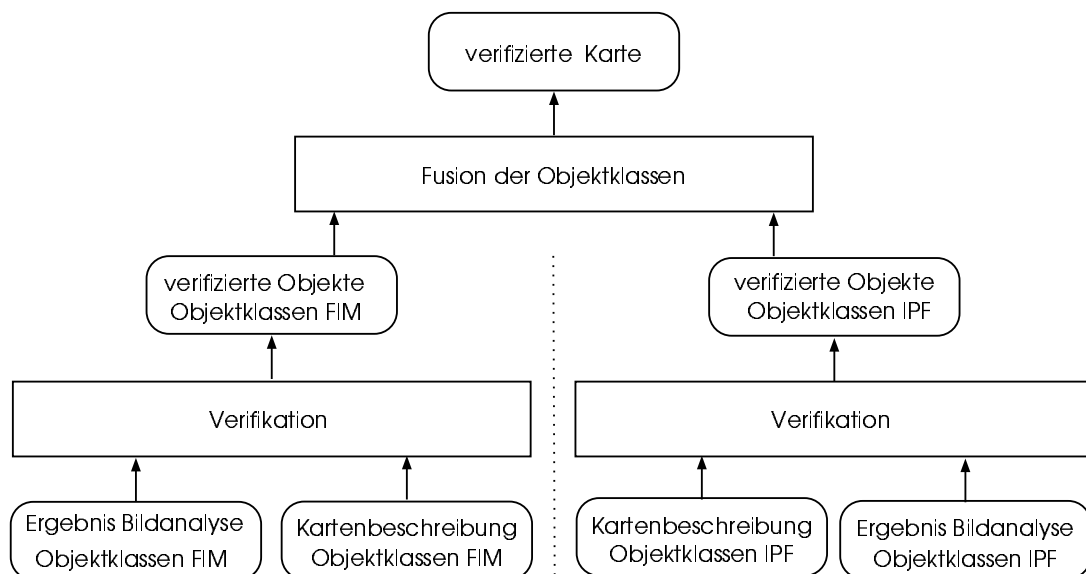


Abb. 5-1: Zusammenfügung der Verifikationsergebnisse

Wie in den vorangestellten Kapiteln berichtet, ist das Kartenwissen Vergleichsbasis in der Verifikationsphase. Man stellt zunächst die Hypothese auf, die kartographische Abbildung der Realität entspricht der Wirklichkeit zum Zeitpunkt der Bildaufnahme. Dadurch ist ein lokaler Vergleich zwischen der in den Bildbereich transformierten Abbildung eines Kartenobjektes und den aus dem Bild extrahierten Merkmalen möglich. Die Berechnungen werden für die einzelnen Objektklassen getrennt durchgeführt, und ein Datenaustausch zwischen semantischem Netz und dem Produktionssystem BPI ist während der Laufzeit des Verifikationsprozesses nicht erforderlich.

Die so erstellten Beschreibungen des Bildes sind wegen der vereinbarten Arbeitsteilung zwischen FIM und IPF und wegen der Tatsache, daß nur die in der Karte vermerkten

Objekte verifiziert werden können, zunächst noch unvollständig. Um ein vollständiges Verifikationsergebnis zu erhalten, werden die von IPF und FIM generierten Beschreibungsgraphen zusammengeführt. Da es keine Konflikte zwischen den beiden Teilergebnissen geben kann, ist eine Zusammenführung der Ergebnisse durch einfache Vereinigung der beiden Teilergebnisse in der gemeinsamen Datenbasis möglich. Das Schema der Zusammenführung der Verifikationsergebnisse ist in Abb. 5-1 dargestellt.

Für die Zusammenführung der Verifikationsergebnisse wurde ein gemeinsames Datenformat benutzt, das sich zur Übertragung der Beschreibungsgraphen eignet. Dieses Format wird in Abschnitt 5.1 beschrieben.

Die ausschließliche Verwendung von lokalen Merkmalen ist in der Klassifikationsphase nicht möglich, da

- keine durch das Kartenwissen spezialisierten Modelle verwendet werden können und
- einzelne Objekte nur im Kontext anderer Objekte erkannt werden können (z.B. Hofffläche in Verbindung mit Gebäude).

Der für die Durchführung der Klassifikation notwendige Kontext ist durch das Verifikationsergebnis gegeben, und darum stellt das in der gemeinsamen Datenbasis enthaltene vollständige Verifikationsergebnis die Basis zur Durchführung der Klassifikation für beide Projektpartner dar.

5.1 Erweiterung des Datenaustauschformates

Zur Datenkommunikation zwischen der gemeinsamen Datenbasis der Projektpartner, in der die digitale Karte vorliegt, und den Analysesystemen von FIM und IPF wurde bisher das DLG-Format [73] verwendet.

Um eine Übergabe von hierarchisch strukturierten Analyseergebnissen mit beliebigen Attributen zu ermöglichen, sowie auch der Möglichkeit zur Übermittlung der Struktur Rechnung zu tragen, wurde ein zusätzliches Austauschformat vereinbart und die entsprechenden Module zur Konvertierung bereitgestellt.

Der Ergebnisaustausch wird über Dateien im ASCII-Format durchgeführt. Jedem Knoten des Beschreibungsgraphen entspricht ein Eintrag in der Austauschdatei.

In Abb. 5-2 ist die allgemeine Syntax eines Eintrages dargestellt. Jeder Eintrag in der Datei ist durch eine ganze Zahl, ihren INDEX, eindeutig gekennzeichnet. Entsprechend den unterschiedlichen Bedeutungen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, die Knoten im Beschreibungsgraphen haben können (z.B. Straßen, Gebäude, Wälder, Polygone, Geradenstücke), gibt es unterschiedliche Typen von Einträgen. Diese werden durch Schlüsselworte im Feld TYPE unterschieden. Es folgen mehrere Zeilen mit typspezifischen Einträgen, die Merkmale des entsprechenden Objektes wiedergeben. Das Feld **belief** enthält die Bewertung des Eintrages.

```

INDEX: Bezeichner
TYPE: Eintragstyp
      eintragsspezifische Zeilen
      (belief: Bewertung )
DOWN_LIST: Liste von Bezeich-
            ner
UP_LIST: Liste von Bezeichner
#

```

Abb. 5-2: Syntax eines Eintrages in der Austauschdatei

DOWN_LIST und UP_LIST stellen schließlich die Mechanismen zur Repräsentation der Kanten der Beschreibungsgraphen zur Verfügung. DOWN_LIST enthält eine Liste von Indizes der untergeordneten Knoten des aktuellen Eintrags, während UP_LIST die Indizes der übergeordneten Knoten enthält. Ein Eintrag wird durch das Schlüsselzeichen # abgeschlossen.

6. Zuordnung der Bodenversiegelung

F. QUINT (IPF)

In Kapitel 2 des Zwischenberichtes I zum laufenden Vorhaben [73] wurden Überlegungen zur Definition der Versiegelungseigenschaft durchgeführt. 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 Rückstreueigenschaften der Erdoberfläche, Versiegelung bezüglich Grundwasserneubildung, Versiegelung bezüglich lokales Kleinklima usw.). Es konnten jedoch Tabellen erarbeitet werden, in denen einzelnen Objektklassen Versiegelungsgrade zugeordnet werden.

Unter Verwendung dieser Tabellen werden den in dieser Projektphase verifizierten Objekten Versiegelungsgrade zugewiesen. Die Zuweisung von Versiegelungsgraden wird nach der Zusammenführung der Verifikationsergebnisse auf der gemeinsamen Datenbasis vorgenommen. Diese Arbeiten sind bis zum Stichtag der Berichtserstellung noch nicht durchgeführt worden, sie werden jedoch bis zum Ende des laufenden Förderabschnittes für die Verifikationsergebnisse durchgeführt.

Die Versiegelungsaussage zum Abschluß der Verifikationsphase kann jedoch nur als ein Teilergebnis betrachtet werden, da sie sich, obwohl aufgrund der aus dem Bild extrahierten Merkmale erarbeitet, nur auf die in der Karte vermerkten Objekte bezieht. Die Erstellung einer endgültigen Versiegelungsaussage für die analysierte Szene ist nach der Durchführung einer erfolgreichen Klassifikation im beantragten dritten Förderabschnitt des Vorhabens möglich.

7. Zusammenfassung

U. STILLA (FIM), F. QUINT (IPF)

Ziel dieses Projektes ist es, eine kontextorientierte automatische Bildauswertung durchzuführen, die eine Bildstrukturerkennung unter Verwendung von zwei- und dreidimensionalen Modellen umfaßt. Als Kontextinformationen werden kartographische Darstellungen des Bildgebietes verwendet.

Im Bereich der Mustererkennung werden zunehmend wissensbasierte Verfahren zur symbolischen Analyse und Beschreibung von Bilddaten eingesetzt. Eine spezielle Variante sind die strukturorientierten hierarchischen Verfahren, die Strukturhierarchien aufbauen, indem komplexe Strukturen aus weniger komplexen Strukturen zusammengesetzt werden. Bei diesem Ansatz erfolgt die Analyse schrittweise, wobei unter stetem Bezug auf die zu analysierenden Muster, Ergebnisse von zunehmenden Abstraktionsgrad entstehen.

Das von den Projektpartnern FIM und IPF vorgeschlagene Verfahren zur kartengestützten Bildanalyse beinhaltet zwei Phasen. In der ersten Phase erfolgt eine Verifikation der aus der Karte bekannten Objekte im Luftbild. In der nachfolgenden Phase ist eine Klassifikation der nicht bearbeiteten Strukturen des Luftbildes vorgesehen. In dem vorliegenden Zwischenbericht wird beschrieben, wie durch die Bildanalyse Objekte verifiziert werden und dazu das Wissen aus einer zum Luftbild korrespondierenden Karte eingesetzt wird.

Die zu analysierenden Strukturen wurden zwischen FIM und IPF aufgeteilt, so daß vom FIM vorwiegend Gebäude und Straßen, während vom IPF flächenhaft ausgedehnte Objekte analysiert werden. Beim FIM wird zur Analyse ein blackboardbasiertes Produktionssystem (BPI) eingesetzt, während das IPF ein Analysesystem auf der Basis eines semantischen Netzes entwickelt hat.

Zur Strukturanalyse der Gebäude und Straßen wird das blackboardbasierte Produktionssystem BPI eingesetzt. Ein Produktionssystem besteht typischerweise aus einer globalen Datenbasis (Blackboard), einer Systemsteuerung (Auswahlmodul) und einer Menge von Produktionen (Wissensquellen). Die globale Datenbasis ist hier als Assoziativspeicher realisiert. Die Systemsteuerung erfolgt über eine prioritätsgeordnete Warteschlange. Die Produktionen geben an, wie eine gegebene Menge von Objekten in ein komplexeres Objekt überführt wird. Jede Produktion ist durch ein Verarbeitungsmodul (Überprüfungsmodul) realisiert, das die geometrische Relation von Objekten überprüft und bei Erfüllung der geometrischen Bedingung eine objektspezifische Generierungsfunktion durchführt. Die Objekte sind als generische Modelle beschrieben.

Ein Zielobjekt wird ausgehend von den Primitivobjekten schrittweise durch wiederholte Anwendung von Produktionen zusammengesetzt. Das prinzipielle Zusammenwirken der Produktionen und die stufenweise Überführung von Objekten in Objekte einer höheren Abstraktionsstufe wird anschaulich durch ein Produktionsnetz dargestellt. Die zum Aufbau der konkreten Objekte durchgeführten Zusammensetzungen werden durch Verzeigerung festgehalten und können durch einen Ableitungsgraphen dargestellt werden. Da im Ableitungsgraph alle generierten Zwischenergebnisse (Teilobjekte) erfaßt sind,

spiegelt er den speziellen Ablauf des Analyse- bzw. Synthesevorgangs wider.

Zur Bereitstellung des Kontextwissens für die Luftbildanalyse wird zunächst die digitale Karte analysiert. Dazu werden datengetrieben eine Menge von Produktionen angewendet. Das Ergebnis der Kartenanalyse ist ein Ableitungsgraph. Für eine allgemeine Bildbeschreibung ist dieser Graph nicht von Interesse. Eine anschließende Analyse des Ableitungsgraphen liefert einen reduzierten Graphen zur Bildbeschreibung, den sogenannten Bildbeschreibungsgraphen, der den Karteninhalt durch attributierte Objekte und Relationen zwischen den Objekten beschreibt. Mit dem Bildbeschreibungsgraphen wird die Kartenbeschreibung in verschiedenen Stufen (Bildbeschreibungsstufen) bereitgestellt.

Ausgehend von den im Bildbeschreibungsgraph bereitgestellten Informationen werden Erwartungen für im Luftbild zu generierende Objekte aufgestellt. Zur Aufstellung solcher Erwartungen wird aus dem Bildbeschreibungsgraphen zunächst ein Bildbeschreibungstext generiert, der die erwarteten Objekte in den Bildbeschreibungsstufen mit ausgewählten Attributen und konkreten Attributwerten beschreibt. Da durch Störungen Abweichungen erwarteter Attributwerte auftreten können, wurden Toleranzklassen eingeführt und entsprechende Intervalle der Attributwerte (Erwartungsbereiche) definiert. Den Intervallen werden für die Zuweisung eines Wertes unterschiedlich hohe Erwartungen zugeordnet. Ein neu generiertes Objekt erhält durch Vergleich der Attributwerte mit den Modellvorstellungen eine Bewertung μ (Modelltreue). Durch logische Verknüpfung von Erwartungsbereichen wird aus den Abweichungen zu den aus der Karte erwarteten Attributwerten in ähnlicher Weise eine Bewertung ϵ (Erwartungstreue) bestimmt. Durch ein mengenorientiertes Auswahlverfahren wird aus den Bewertungen ϵ und μ die Priorität für die Bearbeitung abgeleitet. Die Bildanalyse kann für eine Verifikationsaufgabe abgebrochen werden, wenn die aus der Karte zu überprüfenden Objekte mit ausreichender Übereinstimmung im Luftbild gefunden werden.

Zur Analyse der flächenhaft ausgedehnten Objekte wird ein System auf der Basis des semantischen Netzes ERNEST eingesetzt. ERNEST wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes entwickelt.

Ein semantisches Netz beinhaltet zwei Arten von Wissen: deklaratives Wissen und prozedurales Wissen. Das deklarative Wissen wird in Form von Knoten und Kanten repräsentiert. Knoten sind komplexe Datenstrukturen, bestehend aus einer Vielzahl von Substrukturen. Die wichtigsten Knotenarten sind Konzepte und Instanzen. Ein Konzept repräsentiert ganz allgemein Begriffe, Objekte, Ideen, während Instanzen konkrete Ausprägungen eines Konzeptes sind. Über die Kanten können Beziehungen zwischen den Knoten repräsentiert werden. Das prozedurale Wissen beinhaltet Funktionen zur Berechnung von Eigenschaften und zur Bewertung der Knoten und der Kanten, sowie Funktionen zur Steuerung der Analyse.

Die Nutzung des Wissens geschieht in einem semantischen Netz durch den Instantiierungsprozeß. Dabei werden aus den Konzepten unter Auswertung der Sensordaten Instanzen gebildet.

Zur Verifikation der flächenhaft ausgedehnten Objekte im Luftbild wird ein dreistufiges Konzept vorgestellt. Mit Hilfe eines generischen Modells zur Analyse der Karte

wird eine Beschreibung der aktuellen Szene im Kartenbereich erstellt. Diese Szenenbeschreibung wird in den Bildbereich transformiert und durch Kombination mit einem generischen Modell zur Bildanalyse wird automatisch ein für die Analyse der vorliegenden Szene spezialisiertes semantisches Netz erstellt. Mit Hilfe dieses, auf die Analyse der aktuellen Szene spezialisierten Modells wird nun die Bildanalyse durchgeführt. Die Verifikation wird damit nicht in Form eines Vergleichs der Ergebnisse von zwei parallel ablaufenden Analyseprozessen (Karten- und Bildanalyse) durchgeführt, sondern die Ergebnisse des weniger fehleranfälligen Analyseprozesses (Kartenanalyse) werden als Modell für die Durchführung der Bildanalyse verwendet.

Die Szenenbeschreibung im Bildbereich ist das Ergebnis der Analyse des Bildes mit dem zur Analyse der vorliegenden Szene spezialisierten Modell. Die Instanzen repräsentieren die zu verifizierenden Objekte der Szene. Sie werden durch ihre Koordinaten im Bildbereich, durch objektspezifische Merkmale, die aus den Bilddaten extrahiert werden (z.B. Farbe der einzelnen Objektflächen) und durch einen Gütefaktor beschrieben. Der Gütefaktor gibt an, wie gut die aus dem Bild extrahierten Merkmale mit der Modellvorstellung (der Ausprägung der Objekte im Kartenbereich) übereinstimmen. Damit ist er auch ein Maß für die Verifikationsgüte.

Dadurch, daß die Verifikationsaufgabe mit Hilfe des automatisch aufgestellten semantischen Netzes als ein modellgesteuertes Verfahren konzipiert ist, werden nur für die im Modell (also in der Karte) enthaltenen Objekte Aussagen getroffen. Die Interpretation der in der Verifikationsphase nicht bearbeiteten Bildmerkmale wird in der nachfolgenden Klassifikationsphase vorgenommen.

Die Ergebnisse der von beiden Projektpartnern durchgeführten Verifikationsprozesse sind Graphen, die das analysierte Bild beschreiben. Um ein vollständiges Verifikationsergebnis zu erhalten, werden die von FIM und IPF generierten Beschreibungsgraphen zusammengeführt. Dafür wurde ein gemeinsames Datenformat entwickelt, das sich zur Übertragung von Beschreibungsgraphen eignet.

Zur Überprüfung der entwickelten Verfahren wurden Luftbildaufnahmen eines städtischen Gebietes (Stadt Karlsruhe) verwendet. Die Kontextinformationen wurden aus entsprechenden Ausschnitten einer digitalen Karte (DGK5), die nach Objektklassen getrennt in einem GIS vorliegt, gewonnen.

Um die geometrische Information der Karte zu nutzen, erfolgt eine Registrierung zwischen digitaler Karte und Luftbild durch manuelle Bestimmung von Paßpunkten und einer Parameterschätzung zur ebenen Affintransformation.

Zur Generierung von Primitivobjekten werden verschiedene Verfahren zur Kantenextraktion und Flächensegmentierung eingesetzt.

A. Anhang

A.1 Auswahlverfahren für n Bewertungskomponenten

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Bestimmung der Menge B für n Bewertungskomponenten ist durch den in Abb. A-1 dargestellten Algorithmus angegeben. Das Auswahlverfahren C nach Abb. 3-30 stellt den Spezialfall für zwei Bewertungskomponenten dar. Die Bewertungskomponenten werden dabei nicht, wie in Kap. 3.3.2 und in Abb. 3-30C dargestellt, durch Großbuchstaben, sondern durch den Index i gekennzeichnet.

<pre> BEGIN $q := \nu_0$ DO UNTIL $B \neq \{\}$ $k := n$ DO UNTIL $B \neq \{\}$ OR $k=0$ $B := \bigcup_{\substack{J \subseteq I \\ J =k}} \bigcap_{i \in J} \bigcup_{\nu=0}^q M_{i\nu}$ IF $B = \{\}$ THEN $k := k - 1$ ENDIF ENDDO IF $B = \{\}$ THEN $q := q + 1$ ENDIF ENDDO END </pre>	B Menge der Elemente mit höchster Gesamtbewertung $M_{i\nu}$ Menge der Elemente, die bezüglich der Komponente i die Bewertung ν besitzen i Index der Bewertungskomponente ($i \in I$) ν Index der Bewertungsstufe ν_0 Startindex der Bewertungsstufe q betrachtete Bewertungsstufe n Anzahl der vorkommenden Bewertungskomponenten k Anzahl der betrachteten Bewertungskomponenten I Indexmenge ($I = 1, \dots, n$) J k-elementige Indexuntermenge von I $\binom{n}{k}$ Anzahl der Indexuntermengen J
---	--

Abb. A-1: Auswahlverfahren C für n Bewertungskomponenten

Bei dem Auswahlverfahren wird schrittweise versucht, eine Menge von Elementen zu bestimmen, die bezüglich möglichst vieler Bewertungskomponenten als *beste* Elemente bezeichnet werden können. Zur Bestimmung dieser Menge B werden für jede Bewertungskomponente i die Mengen der Elemente gebildet, deren Bewertung zwischen 0 und q liegt. Mit jeweils k der so gebildeten Bewertungskomponenten-Mengen werden $\binom{n}{k}$ Schnittmengen erzeugt und diese vereinigt.

Beginnend mit der höchsten Bewertungsstufe $q=\nu_0$ und wird auf Elemente zugegriffen, die bezüglich aller ($k=n$) Bewertungskomponenten diese Bewertung besitzen. Die Menge der Elemente ergibt sich aus der Schnittmenge aller Bewertungskomponenten-Mengen mit $\nu=\nu_0$. Werden keine Elemente gefunden, ist also B die leere Menge, so

werden die Anforderungen gesenkt und auf Elemente zugegriffen, die bezüglich $k = n - 1$ Bewertungskomponenten diese Bewertung besitzen. Die Menge der Elemente ergibt sich aus der Vereinigung der $\binom{n}{k}$ Schnittmengen von jeweils k Bewertungskomponenten-Mengen mit $\nu = \nu_0$. Werden keine Elemente gefunden, so werden die Anforderungen weiter gesenkt und der Vorgang mit $k = n - 2$ wiederholt. Ist $k = 1$, so wird auf Elemente zugegriffen, die wenigstens bezüglich irgend einer Bewertungskomponente die Bewertung $\nu = \nu_0$ besitzen. Die Menge der Elemente ergibt sich aus der Vereinigung aller Bewertungskomponenten-Mengen mit $\nu = \nu_0$.

Werden keine Elemente gefunden, so wird die Anforderungen bezüglich der Bewertung gesenkt ($q = q + 1$) und die Prozedur beginnend mit $k = n$ wiederholt. Dabei werden jeweils maximal n Schritte in jeder Bewertungsstufe durchlaufen. Dies wird solange wiederholt bis Elemente in der Menge B gefunden werden.

Mit dem Suchen nach der Menge B werden mit dem schrittweise Senken der Anforderungen Prioritätsstufen durchlaufen. Für n Bewertungskomponenten und n_ν Bewertungsstufen ergeben sich unter Berücksichtigung, daß die n Schritte der untersten Bewertungsstufe ν identische Mengen liefern, $n_\nu n - (n - 1)$ Prioritätsstufen.

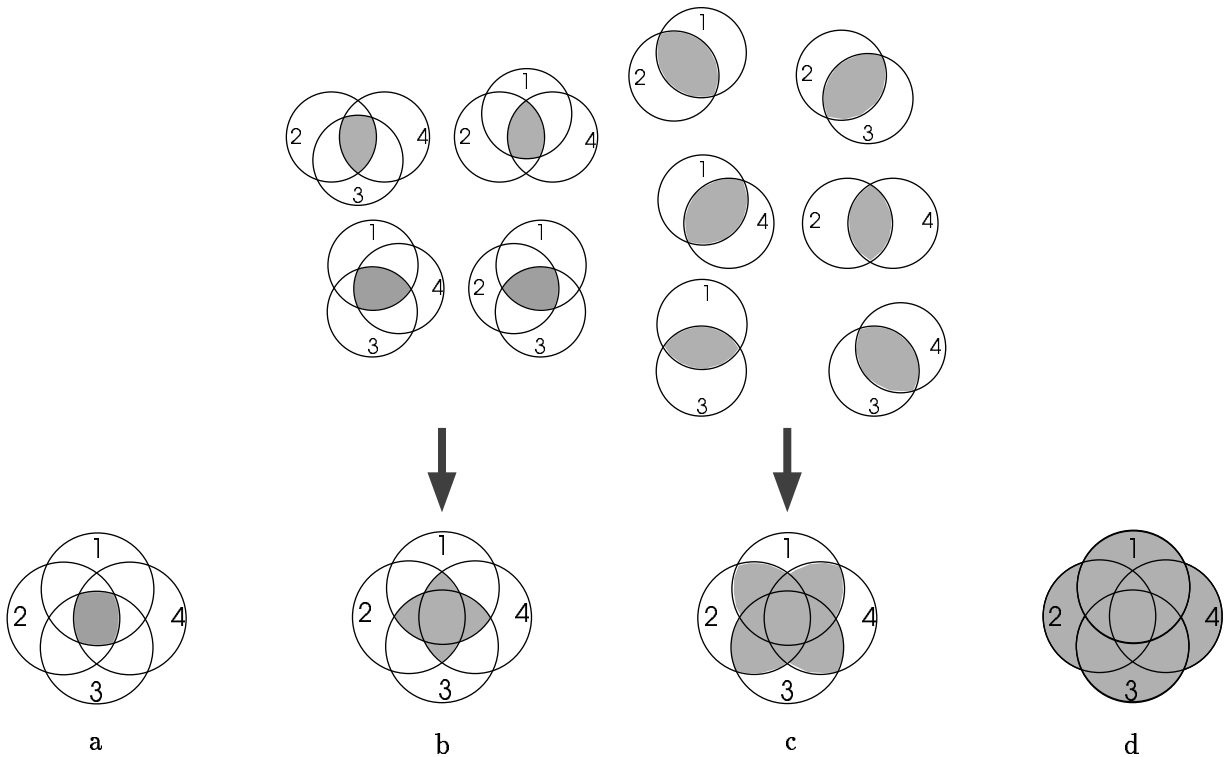


Abb. A-2: Auswahlverfahren durch Mengenbildung

Der Algorithmus zur Bestimmung der Menge B soll an einem Beispiel mit $n = 4$ Bewertungskomponenten für die Bewertungsstufe $\nu = 0$ verdeutlicht werden. Da nur die oberste Stufe ($q = \nu$) der Bewertungskomponenten betrachtet wird, ergibt sich für $\bigcup_{\nu=\nu_0}^q M_{i\nu} = M_{i0}$. Für diesen Fall kann man den Index ν weglassen und die Mengen M_i der vier Bewertungskomponenten mit M_1, M_2, M_3 und M_4 bezeichnen. Zur

Bestimmung der Menge B werden für die Bewertungsstufe $\nu=0$ maximal $n=4$ Prioritätsschritte durchlaufen.

k=4: Im ersten Schritt werden von jeder möglichen 4-er Kombination die $\binom{4}{4}=1$ Schnittmengen gebildet und vereinigt (siehe Abb. A-2a). B bildet die Schnittmenge der vier Mengen .

$$B := M_1 \cap M_2 \cap M_3 \cap M_4$$

k=3: Im zweiten Schritt werden von jeder möglichen 3-er Kombinationen die $\binom{4}{3}=4$ Schnittmengen gebildet und miteinander vereinigt (siehe Abb. A-2b).

$$B := (M_1 \cap M_2 \cap M_3) \cup (M_1 \cap M_2 \cap M_4) \cup (M_1 \cap M_3 \cap M_4) \cup (M_2 \cap M_3 \cap M_4)$$

k=2: Im dritten Schritt werden von jeder möglichen 2-er Kombinationen die $\binom{4}{2}=6$ Schnittmengen gebildet und miteinander vereinigt (siehe Abb. A-2c).

$$B := (M_1 \cap M_2) \cup (M_1 \cap M_3) \cup (M_1 \cap M_4) \cup (M_2 \cap M_3) \cup (M_2 \cap M_4) \cup (M_3 \cap M_4)$$

k=1: Im vierten Schritt werden von jeder möglichen 1-er Kombination die $\binom{4}{1}=4$ Schnittmengen gebildet und miteinander vereinigt (siehe Abb. A-2d). B bildet die Vereinigung der vier Mengen.

$$B := M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4$$

A.2 Modifikationen des Auswahlverfahrens

Bei der prinzipiellen Darstellung des Auswahlverfahrens wurde der Startindex mit $\nu_0 = 0$ angenommen. Davon muß jedoch nicht ausgegangen werden. Bei Aufruf des Auswahlmechanismus kann zwischen drei Modi gewählt werden, die angeben, wie in Abhängigkeit von der Besetzung der Objektmengen der Startindex ν_0 gewählt werden soll.

Der erste Schritt wird bei allen Modi ausgeführt: Für jede Bewertungskomponente wird der minimale Index ermittelt, dessen Menge nichtleer ist. Anders ausgedrückt, wird jeweils der Index der höchstbewerteten nichtleeren Menge ermittelt (Gl. A-1, A-2).

$$\varepsilon_{min} = \min_{E_\varrho \neq \{\}} \varrho \quad (\text{A} - 1)$$

$$\mu_{min} = \min_{M_\sigma \neq \{\}} \sigma \quad (\text{A} - 2)$$

- o In Modus 1 erhält der Startindex den Wert des Minimums der ermittelten Indizes. Es wird also auf der höchsten Bewertungsstufe begonnen, auf der sich in mindestens einer Objektmenge mindestens ein Objekt befindet (Gl. A-3).

$$\nu_0 = \min(\varepsilon_{min}, \mu_{min}) \quad (\text{A} - 3)$$

- o In Modus 2 gibt es zwei Startindizes ν_1 und ν_2 , die nach den Gl. A-4 und A-5 bestimmt werden.

$$\nu_1 = \varepsilon_{min} \quad (\text{A} - 4)$$

$$\nu_2 = \mu_{min} \quad (\text{A} - 5)$$

Der Auswahlalgorithmus nach Abb. 3-30C stellt sich nun wie folgt dar:

```

BEGIN
   $q_1 := \nu_1, q_2 := \nu_2$ 
  DO UNTIL  $B \neq \{\}$ 
     $B := E_{\nu_1} \cap M_{\nu_2}$ 
    IF  $B = \{\}$  THEN
       $B := E_{\nu_1} \cup M_{\nu_2}$ 
    ENDIF
  ENDDO
END

```

Bei jeder Bewertungskomponente wird auf der höchsten besetzten Stufe begonnen.

- o In Modus 3 erhält der Startindex den Wert des Maximums der ermittelten Indizes (Gl. A-6). Es wird also auf der höchsten Bewertungsstufe begonnen, auf der sich in den Objektmengen aller Bewertungskomponenten jeweils mindestens ein Objekt befindet.

$$\nu_0 = \max(\varepsilon_{min}, \mu_{min}) \quad (\text{A} - 6)$$

Der Auswahlalgorithmus nach Abb. 3-30C reduziert sich dann auf eine Zeile:

$$B := \left\{ \bigcup_{\nu=0}^{\nu_0} E_{\nu} \right\} \cap \left\{ \bigcup_{\nu=0}^{\nu_0} M_{\nu} \right\} \quad (A-7)$$

Eine Übersicht der Modi in graphischer Darstellung zeigt Abb. A-3. Oben sind die Objektmengen der beiden Bewertungskomponenten dargestellt. Sie enthalten beispielhaft die Objekte a bis f. Die Objekte werden jeweils in der unten dargestellten Reihenfolge bearbeitet. Die Mengen, die zur Auswahl herangezogen werden, sind jeweils durch Schraffur hervorgehoben.

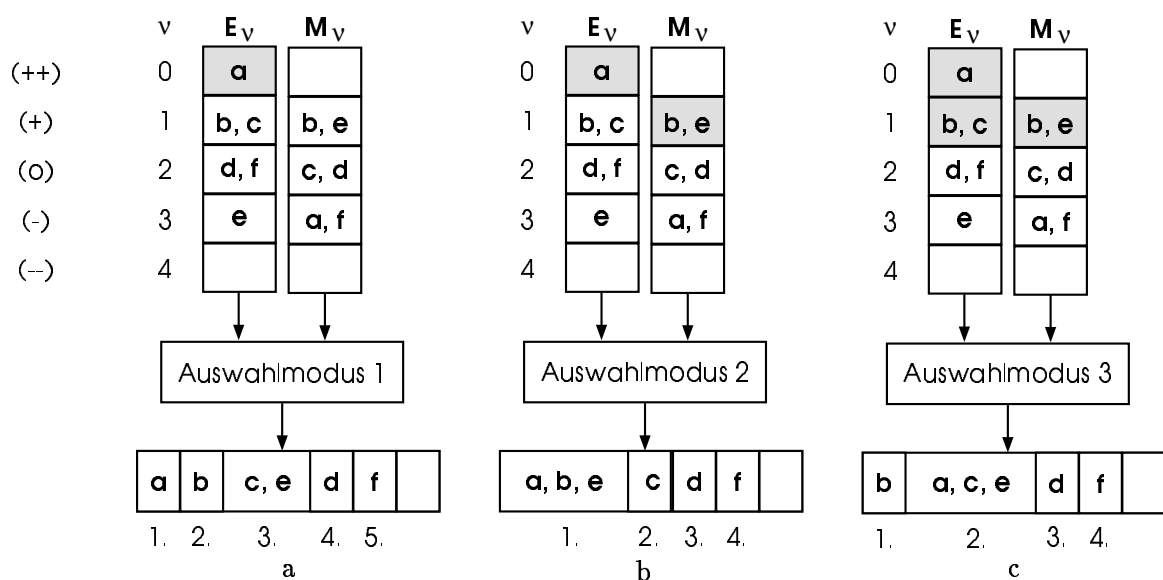


Abb. A-3: Graphische Darstellung der Objektauswahl in verschiedenen Modi
(Erläuterungen siehe Text)

Literaturverzeichnis

- [1] Achen M (1993) Untersuchungen über Nutzungsmöglichkeiten von Satellitenbild-daten für eine ökologisch orientierte Stadtplanung am Beispiel Heidelberg. Heidelberg: Selbstverlag des Geographischen Institutes der Universität Heidelberg
- [2] Aho A, Ullman J (1972) The Theory of Parsing, Translation and Compiling. London: Prentice-Hall
- [3] 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
- [4] Digital line graphs from 1:24000-scale maps. Data Users Guide 1, U.S. Dept. of the Interior, USGS, 1986.
- [5] Bässmann H, Besslich P (1989) Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bild-verarbeitung Berlin: Springer
- [6] Barr A, Feigenbaum EA (1982) The handbook of artificial intelligence. Vol. 2, Kaufmann: Los Altos, CA
- [7] Bouman CA, Shapiro M (1994) Multiscale random field model for Bayesian image segmentation. *IEEE Transactions of Image Processing*, **3**: 162-177
- [8] Brachman RJ, Schmolze JG (1985) An overview of the KL-ONE knowledge repre-sentation system. *Cognitive Science*, **9**: 171-216
- [9] Brooks RA (1981) Symbolic reasoning about 3-D models and 2-D images. *Artificial Intelligence*, **17**: 285-348
- [10] Burrough PA (1986) Principles of geographical information system for land resour-ces assessment. Monographs on Soil and Resources Survey 12. Clarendon Press
- [11] Bunke H (1985) Modellgesteuerte Bildanalyse. Stuttgart: Teubner
- [12] Cohen FS, Cooper DB (1987) Simple parallel hierarchical and relaxation algo-rithms for segmenting noncausal markovian random fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **9**: 195-219
- [13] Davis WA, Lee DL (1986) Fast search algorithms for associative memories. *IEEE Transactions on Computers*, C-35: 456-461
- [14] Derin H, Elliott H (1987) Modelling and segmentation of noisy and textured ima-ges using Gibbs random fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **9**: 39-55
- [15] Dunham JG (1986) Optimum uniform piecewise linear approximation of planar curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8**: 67-75

- [16] Füger H, Lütjen K, Jurkiewicz K (1990) Kontextsensitive Bildanalyse in Luftbildern. In: Großkopf RE (ed) Mustererkennung 1990, 12. DAGM-Symposium. Berlin: Springer, 585-592
- [17] Füger H, Lütjen K, Michaelsen E, Schwan G (1990) Strukturorientierte 3D-Szenenanalyse in Bildfolgen. In: Großkopf RE (ed) Mustererkennung 1990, 12. DAGM-Symposium. Berlin: Springer, 659-666
- [18] Füger 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
- [19] Füger 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
- [20] Haralick RM, Shapiro LG (1985) Survey, image segmentation techniques. *Computer Vision Graphics Image Process.* **29**: 100-132
- [21] Harbeck R (1994) Das Geoinformationssystem ATKIS und seine Nutzung in Wirtschaft und Verwaltung. Bonn-Bad Godesberg: Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen
- [22] Herman M, Kanade T (1986) Incremental reconstruction of 3D scenes from multiple, complex images. *Artificial Intelligence*, **30**: 289-341
- [23] Huertas A (1983) Using shadows in the interpretation of aerial images. University of Southern California: Report USC-ISG 104
- [24] Huertas A, Nevatia R (1988) Detecting buildings in aerial images. *Computer Vision, Graphic and Image Processing*, **41**: 131-152
- [25] 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
- [26] Köhler M (1993) Entwicklung einer Steuerung zur kartengestützten Luftbildanalyse Karlsruhe: Universität, Fakultät für Elektrotechnik, Dipl.-Arbeit
- [27] Korn A (1988) Toward a symbolic representation of intensity changes in images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **10**: 610-625
- [28] Kummert F, Niemann H, Prectel R, Sagerer G (1993) Control and explanation in a signal understanding environment. *Signal Processing*, **3**: 111-145
- [29] Landes S (1995) Entwicklung eines Flächenwachstumsverfahrens zur Segmentierung von Luftbildern. Karlsruhe: Universität, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Diplomarbeit

- [30] Ledermann W, Vajda S (1985) Combinatorics and geometry. Chichester: Wiley
- [31] 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
- [32] Liu J, Yang YH (1994) Multiresolution color image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16**: 689–700
- [33] Lütjen K (1986) Ein Blackboard-basiertes Produktionssystem für die automatische Bildauswertung. In: Hartmann G (ed) Mustererkennung 1986, 8. DAGM-Symposium. Berlin: Springer, 164-168
- [34] 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
- [35] Matsuyama T, Hwang V (1990) SIGMA: A knowledge-based aerial image understanding system. New York: Plenum Press
- [36] McKeown DM, Harvey WA, McDermott (1985) Rule-based interpretation of aerial imagery. , **7**: 570-585
- [37] 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
- [38] McKeown DM, Denlinger JL (1988) Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. Proceedings: Computer Vision and Pattern Recognition, Ann Arbor, Michigan, 662-672
- [39] 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
- [40] 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
- [41] Michaelsen E (1995) 3D-Szenenanalyse in Bildfolgen. Ettlingen: FIM/FGAN, FIM-Bericht, Nr. 235
- [42] Minsky M (1975) A framework for representing knowledge. In: Winston PH (ed) The Psychology of Computer Vision. 211-277, New York: Mac Graw Hill
- [43] Mohan R, Nevatia R (1989) Using perceptual organization to extract 3-D structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**: 1121-1139.
- [44] Mylopoulos J, Shibara T, Tsotsos JK (1983) Building knowledge based systems: The PSN experience. *IEEE Computer Magazine* 83-89

- [45] Nagao M, Matsuyama T (1980) A structural analysis of complex aerial Photographs. New York: Plenum
- [46] 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
- [47] 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
- [48] Niemann H, Bunke H (1987) Künstliche Intelligenz in Bild- und Sprachanalyse. Stuttgart: Teubner
- [49] Niemann H (1990) Pattern analysis and understanding. Berlin: Springer
- [50] 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
- [51] Nilsson NJ (1980) Principles of artificial intelligence. Palo Alto: Tioga
- [52] Nevatia R, Babu KR (1980) Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, **13**: 257-269
- [53] 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
- [54] Nilsson NJ (1980) Principles of artificial intelligence. Palo Alto: Tioga Publ. Co.
- [55] Nii HP (1986) Blackboard systems. *AI Magazine*, 7: 38-53, 82-106
- [56] Pal NR, Pal SK (1993) A review on image segmentation techniques. *Pattern Recognition*, **26**: 1277-1294
- [57] Pavlidis T (1977) Structural pattern recognition. Berlin: Springer
- [58] Pavlidis T (1982) Algorithms for graphics and image processing. Berlin: Springer
- [59] Post E (1943) Formal reductions of the general combinatorial problem. *American Journal of Mathematics*, **65**: 197-268
- [60] Prechtel R (1989) Entwurf und Realisierung einer aufgabenunabhängigen, interaktiven, graphischen Erklärungskomponente für eine semantische Netzstruktur. Erlangen-Nürnberg: Universität, Lehrstuhl für Informatik 5, Interner Bericht
- [61] Quam LH (1978) Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, Palo Alto, CA 51-55
- [62] Quillian MR (1968) Semantic memory. In: Minsky M (ed) Semantic information processing Cambridge, MA: MIT Press

- [63] Quint F (1994) Bildsegmentierung mit einem Bayesschen Ansatz. Technischer Bericht, Karlsruhe: Universität, IPF
- [64] Ramer U (1972) An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Computer Graphics and Image Processing*, **1**: 244-256
- [65] Regazzoni CS, Arduini F, Vernazza G (1993) Multilevel GMRF-based approach to image segmentation and restoration. *Signal Processing*, **34**: 43-67
- [66] Riseman EM, Arbib MA (1977) Computational techniques in visual segmentation of static scenes. *Computer Graphics and Image Processing*, **6**: 221-276
- [67] Sagerer G (1990) Automatisches Verstehen gesprochener Sprache. Mannheim: BI Wissenschaftsverlag
- [68] Salomaa AK (1973) Formal languages. New York: Academic Press
- [69] Sandakly F, Giraudon G (1994) Multispecialist system for 3D scene analysis. In: Cohn A (ed) 11th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI 94, 771-775, John Wiley & Sons, Ltd
- [70] Schmolze JG, Israel D (1983) Semantics and classification. In: Sidner CL, Bates M, Bobrow B (eds) Research in knowledge representation for natural language understanding. Cambridge, MA: Bolt, Beranek and Newman
- [71] Schwidersky K, Ackermann F (1976) Photogrammetrie: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen. Stuttgart: Teubner
- [72] Shirazi M, Noda H (1993) Deterministic iterative algorithm for HMRF-textured image segmentation. Proceedings of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, Nagoya, Japan: IEEE
- [73] Sties M, Stilla U, Zheng Y (1992) Analyse von Luft- und Satellitenbildern zur automatischen Ermittlung der Bodenversiegelung städtischer Siedlungsbereiche. Ettlingen: FIM/FGAN und IPF, FIM-Bericht Nr. 241
- [74] Stilla U, Jurkiewicz K (1991) Objektklassifikation mit einem blackboardorientierten Inferenzmechanismus. Ettlingen: FIM/FGAN, FIM Bericht 230
- [75] Stilla U (1993) Vergleich zur automatischen Erkennung in Metall geschlagener Zeichen. Karlsruhe: Universität, Fakultät für Elektrotechnik, Diss.
- [76] 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
- [77] Stilla U, Michaelsen E, Lütjen K (1995) Structural 3D-analysis of aerial images with a blackboard-based production system. In: Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images. Ascona workshop 1995. (In Vorbereitung)

- [78] Velthuijsen H (1992) The nature and applicability of the blackboard architecture. Leidschendam: PTT Research
- [79] Winston PH (1984) Artificial intelligence. Reading: Adison-Wesley