

Ein modellbasiertes Konzept zur städteplanerischen Kartierung durch digitale Bildanalyse

André Fischer und Volker Steinhage

Institut für Informatik I der Universität Bonn
D-53117 Bonn, Römerstraße 164

1 Motivation

Die räumliche Erfassung von urbanen Szenen zu 3D-Stadtmodellen verzeichnet einen stark anwachsenden Bedarf in der Städteplanung, dem Umweltschutz, der Architektur sowie in zahlreichen Projekten von Versorgungs-, Transport- und Kommunikationsunternehmen.

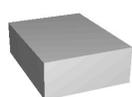
Die Bildvorlagen zeigen einerseits für die Aufgabenstellung irrelevante Information wie Vegetation und Straßenverkehr. Andererseits fehlt Information über Gebäudeobjekte aufgrund von Verdeckungen, Verschattungen, schwachen Kontrasten oder ungünstigen Perspektiven. Verfahren der digitalen Photogrammetrie sind zwar etabliert, weisen aber wegen des großen Datenvolumens i. a. nicht die erforderliche Effizienz auf. Daher müssen verstärkt Methoden des Bildverstehens und der Künstlichen Intelligenz eingesetzt werden, wobei der expliziten Modellierung der zu erfassenden Gebäudestrukturen in Form eines 3D-Objektmodells und eines daraus durch ein adäquates Projektionsmodell abgeleiteten 2D-Bildmodells eine Schlüsselrolle zukommt.

Ziel ist die 3D-Gebäuderekonstruktion durch Mehrbildanalyse auf der Basis einer eng gekoppelten Objekt- und Bildmodellierung. Sowohl Objekt- als auch Bildmodell weisen eine komponentenbasierte Repräsentation auf und erlauben somit eine robuste Gebäudeerkennung und -rekonstruktion nach der Strategie der komponentenorientierten Objekterkennung (cf. BIEDERMAN 1987).

2 3D-Objektmodellierung

Zur Erzeugung und Bearbeitung von räumlichen Gebäudemodellen dient ein *generischer* Modellierungsansatz, der die rechnerinterne Darstellung räumlicher Objekte durch deren Oberflächenbeschreibung (*Boundary Representation*, B-Rep) mit den operationellen Möglichkeiten der konstruktiven Festkörpergeometrie (*Constructive Solid Geometry*, CSG) kombiniert (s. FISCHER UND STEINHAGE 1997).

Die Grundlage der Gebäudemodellierung bilden prototypische Gebäudegrundformen, die in ihrer Formbeschreibung einerseits dem Abstraktionsgrad städteplanerischer Modelle entsprechen und andererseits aufgrund der zum großen Teil als Luftbildaufnahmen vorliegenden Bilddaten nach ihren Dachformen unterschieden sind (s. Abb. 1 und vgl. STEINHAGE 1995).



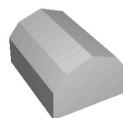
Flachdach



Pultdach



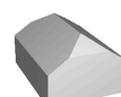
Satteldach



Mansarddach



Walmdach



Krüppelwalm

Abbildung 1: Sechs der modellierten Gebäudegrundformen.

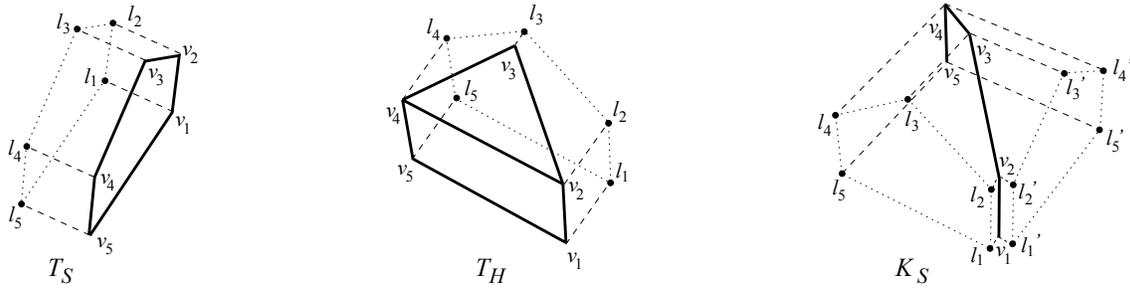
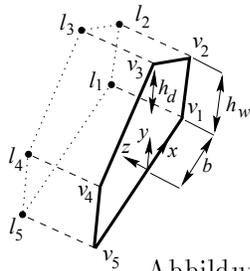


Abbildung 2: Sattel- und Walmdachterminale T_S bzw. T_H , L-förmiger Satteldachkonnektor K_S .

Zur Spezifikation von komplexen Gebäudeformen, aber auch von Gebäudevarianten ist die Modellierung von Gebäudekomponenten notwendig. Wir unterscheiden zwei Klassen von Gebäudekomponenten: *Terminale* modellieren Endstücke der Gebäudegrundformen (s. Abb. 1). *Konnektoren* modellieren Verbindungsformen von Gebäudestrukturen. Abbildung 2 zeigt zwei Beispiele für Terminale und ein Beispiel eines Konnektors. Jedes Modell eines Gebäudeteils weist neben Lageparametern p_l der Position und der Orientierung einen charakteristischen Satz von Formparametern p_f auf. Abbildung 3 zeigt die parametrische Beschreibung R_i der Ecken (*Vertices*) $v_i = (x_i, y_i, z_i)^t$ des Satteldachterminals T_S durch die Formparameter p_f der Breite b , der Wandhöhe h_w und der Dachhöhe h_d . Neben den Vertices weist jede Gebäudekomponente Verbindungsknoten, sog. *Links* $l_i = (x_i, y_i, z_i)^t$ auf. Links dienen zur Verbindung verschiedener Gebäudekomponenten und bilden Verbindungsflächen, sog. Linkflächen. Offensichtlich besitzen Terminale genau eine Linkfläche, während Konnektoren mindestens zwei Linkflächen aufweisen.



$$v_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = R_i(p_f) = \begin{pmatrix} R_i(x) \\ R_i(y) \\ R_i(z) \end{pmatrix} p_f$$

v_i	$R_i(x)$	$R_i(y)$	$R_i(z)$
v_1	$+b$	0	0
v_2	$+b$	$+h_w$	0
v_3	0	$+h_w + h_d$	0
v_4	$-b$	$+h_w$	0
v_5	$-b$	0	0

Abbildung 3: Die Parameterbeschreibung des Satteldachterminals T_S .

Die Modellierung von einfachen Gebäudegrundformen sowie von Gebäudevarianten und komplexen Gebäudeformen basiert nun auf der Kombination von Terminalen und Konnektoren. Jede Gebäudegrundform wird durch zwei gleichartige Terminale beschrieben. Die Kombination von zwei unterschiedlichen Terminalen führt zu Varianten der Gebäudegrundformen. Durch den Einsatz der Konnektoren sind beliebig komplexe Gebäudestrukturen konstruierbar (s. Abb. 4). Voraussetzung zur Kombination von Gebäudekomponenten sind zueinander konsistente Lage- und Formparameter der Komponenten.

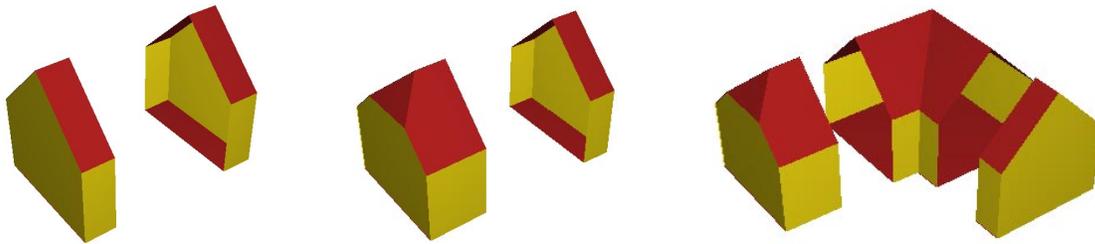


Abbildung 4: Gebäudekomponenten als Primitive zur Gebäudemodellierung.

Die Erweiterung der geometrischen Modellierung zu einer Gebäudemodellierung erfolgt durch gebäudespezifische Attribute und Relationen auf bzw. zwischen den sie konstituierenden geometrischen Elementen, nämlich den Flächen, Kanten und Ecken der Gebäudemodelle. So werden z. Z. alle Flächen als Wand- bzw. Dachflächen klassifiziert, die Kanten werden entsprechend ihrer Orientierung und der benachbarten Gebäudeflächen klassifiziert, die Ecken werden gemäß der Anzahl und Arten der zusammentreffenden Kanten klassifiziert.

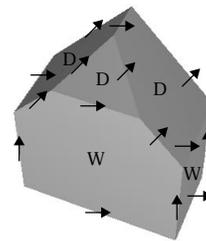


Abb. 5: Attributierte Gebäudekomponente.

3 2D-Bildmodellierung

Die beschriebene Objektmodellierung stellt Gebäudeobjekte in ihren *dreidimensionalen* Ausprägungen dar — man spricht von einem *objektzentrierten* Repräsentationsschema. Die digitalen Bildvorlagen zeigen hingegen die *zweidimensionale* Projektionen der aufgenommenen Gebäude. Daher bieten sich *betrachterzentrierte* Repräsentationschemata an, welche die beobachtbaren Projektionen räumlicher Objekte im Sinne eines Bildmodells präzisieren. Das Bildmodell ergibt sich somit als Produkt der räumlichen Objektmodelle einerseits und des Projektionsmodells andererseits. Das Projektionsmodell modelliert den tatsächlichen Projektionsvorgang hinsichtlich der Kameraparameter (äußere und innere Orientierung) und der Beleuchtung.

Das Bildmodell setzt zur Beschreibung der in den Bildvorlagen zu suchenden Gebäudeprojektionen Aspektgraphen nach KOENDERINK UND VAN DOORN 1976 ein: Isomorphe Ansichten, die dieselben Flächen, Kanten und Ecken eines abgebildeten Objekts in derselben Nachbarschaftsstruktur zeigen, werden zu einer Äquivalenzklasse, einem sog. *Aspekt*, zusammengefaßt und durch eine einzige repräsentative Objektansicht vertreten. Die Anordnung aller zu einem Objekt gehörenden Aspekte gemäß der Nachbarschaftsstruktur führt zu *Aspektgraphen*. Die Zusammenfassung symmetrischer Aspekte und der Ausschluß anwendungsirrelevanter Aspekte (z.B. untere Ansichten und Seitenansichten von Gebäuden bei der Luftbildanalyse) reduziert die Komplexität von Aspektgraphen. Die Erzeugung solcher Aspektgraphen für die Objektmodelle aus Abschnitt 2 beschreiben FISCHER UND STEINHAGE 1996.

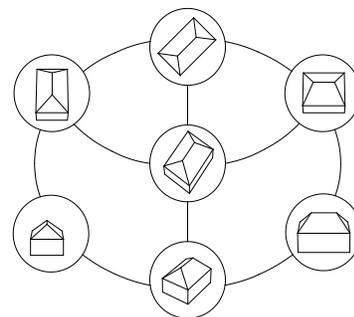


Abb. 6: Der Aspektgraph eines Walmdachhauses.

Die in den Aspektgraphen organisierten repräsentativen Objektansichten erben die Attribute und Relationen der Gebäudekomponenten, deren Projektion sie beschreiben. Die Vererbung dieses 3D-Wissens ist für eine aspektbasierte Gebäudeerkennung wichtig: die Diskontinuitätslinien weisen z. B. in Abhängigkeit von den benachbarten Bildregionen unterschiedliche Stärken auf; aus den räumlichen Orientierungen der Gebäudekanten lassen sich die Fluchtpunkte der entsprechenden Bildlinien herleiten usw. (s. KORT *et al.* 1996).

Es kann nicht erwartet werden, daß die modellierten Gebäudeprojektionen vollständig aus den Bildvorlagen extrahierbar sind. Aufgrund von Verdeckungen und Verschattungen ist dann i. a. eine Erkennung nur über einzelne Komponenten der Gebäudemodelle möglich (s. BIEDERMAN 1987). Daher ist beim Bildmodell die Modellierung der Projektionen von *Gebäudeteilstrukturen*, also einzelnen Gebäudeflächen sowie Gruppen von Gebäudekanten und Gebäudeecken im Rahmen einer gebäudespezifischen Aspekthierarchie (s. Abb. 7) erforderlich.

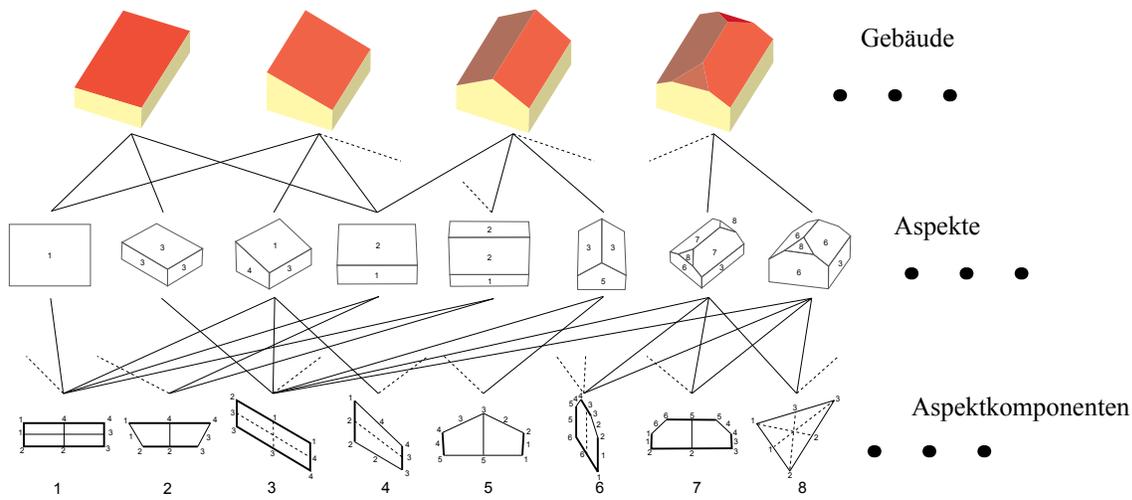


Abbildung 7: Die gebäudespezifische Aspekthierarchie.

4 Erkennung und Rekonstruktion

Die Erkennung und Rekonstruktion von Gebäuden aus digitalen Luftbildern basiert auf einer Strategie der komponentenorientierten Objekterkennung (s. BIEDERMAN 1987) und folgt dem Paradigma des Generierens und Verifizierens von Hypothesen. Ausgangspunkt sind digitale Luftbildfolgen, deren Einzelbilder derart überlappen, daß jedes zu erfassende Gebäude in mehreren Einzelbildern (i. a. zwei bis vier Bildern) abgebildet ist. Zu jedem Einzelbild sind die Kameraparameter (innere und äußere Orientierung) sowie der Aufnahmezeitpunkt bekannt. Der Prozeß der Gebäudeerfassung durchläuft die folgenden Verarbeitungsschritte (s. auch Abb. 8):

- (1) *Extraktion von Bildmerkmalen*: Prozesse der Bildverarbeitung extrahieren aus den zugrundeliegenden Luftbildern Linien und deren Verbindungsknoten sowie homogene Bildregionen. Diese Bildmerkmale werden zu relationalen Merkmalsgraphen gruppiert (s. FUCHS UND FÖRSTNER 1995).
- (2) *3D-Rekonstruktion von Vertex-Aggregaten*: Durch Mehrbildstereoanalyse über den relationalen Merkmalsgraphen werden dreidimensionale *Vertex-Aggregate* abgeleitet (s. LANG UND FÖRSTNER 1996). Jedes Vertex-Aggregat besteht aus einem 3D-Vertexknoten sowie den im Vertex zusammentreffenden räumlichen Kanten und Flächensegmenten.
- (3) *Indexing von Gebäudekomponenten*: Die Topologie und Geometrie der Vertex-Aggregate führt zu deren Interpretation durch Vertices der Gebäudekomponentenmodelle und damit zur Generierung von Gebäudekomponentenhypothesen. Alle Vertices, die durch eine Gebäudekomponente interpretiert werden, instanzieren Form- und Lageparameter dieser Komponente (s. Abb. 3).
- (4) *Aggregation von Gebäudekomponenten zu Gebäudehypothesen*: Durch die Aggregation von Gebäudekomponenten mit zueinander passenden instanziierten Form- und Lageparametern werden Hypothesen von vollständigen Gebäudeobjekten abgeleitet. Man beachte, daß aufgrund der i. a. mehrdeutigen Interpretation der Vertex-Aggregate durch unterschiedliche Gebäudevertices sowohl das Indexing als auch die Aggregation von Gebäudekomponenten zu unterschiedlichen, konkurrierenden Gebäudehypothesen führt.
- (5) *Generierung von Aspekthierarchien für die Gebäudehypothesen*: Für jede Gebäudehypothese wird die Rückprojektion in die zugrundeliegenden Luftbilder berechnet. Die Rückprojektionen werden als Aspekthierarchien kodiert. Im Gegensatz zum Ansatz von DICKINSON *et al.* 1992 ist hier zwar die genaue Projektionsrichtung auf die Gebäudehypothesen bekannt, aber die noch freien Form- und Lageparameter einer Gebäudehypothese können dennoch zu unterschiedlichen Aspekten führen.

- (6) *Verifikation der Gebäudehypothese:* Die in den Aspekthierarchien der Gebäudehypothesen kodierten Bildstrukturen werden nun mit den extrahierten relationalen Merkmalsgraphen der Luftbilder aus Schritt 1 verglichen. Für diesen Zuordnungsprozeß werden Methoden der logischen Constraint-Programmierung eingesetzt (s. KOLBE *et al.* 1996). Einen nach dem Prinzip der Linienverfolgung arbeitenden Backtracking-Ansatz stellen KORT *et al.* 1996 vor. Die Bewertung der konkurrierenden Gebäudehypothesen ergibt sich aus den Zuordnungsergebnissen von deren Aspekthierarchien zu den Bildmerkmalen der Luftbilder.

5 Ergebnisse und Zusammenfassung

Abbildung 8 skizziert den Ablauf der 3D-Gebäudextraktion aus einem Stereobildpaar. Durch Stereoanalyse werden aus den extrahierten Bildmerkmalen u. a. drei Vertex-Aggregate abgeleitet. Zwei Vertex-Aggregate werden u. a. durch ein Satteldachterminal interpretiert, wobei — aufgrund der bekannten Terrainhöhe — alle Form- und Lageparameter dieses Terminals instanziiert werden. Das dritte Vertex-Aggregat wird ebenfalls u. a. durch ein Satteldachterminal interpretiert, für dieses Terminal wird dadurch jedoch nur die Gesamthöhe $h_w + h_d$ festgelegt. Beide Satteldachterminale lassen sich aufgrund ihrer Form- und Lageparameter zu der Hypothese eines Satteldachhauses mit rechteckigem Grundriß kombinieren. Diese Hypothese wird in das Stereobildpaar zurückprojiziert, zeigt neben anderen Gebäudehypothesen die beste Interpretation durch die extrahierten Bildmerkmale und wird somit verifiziert.

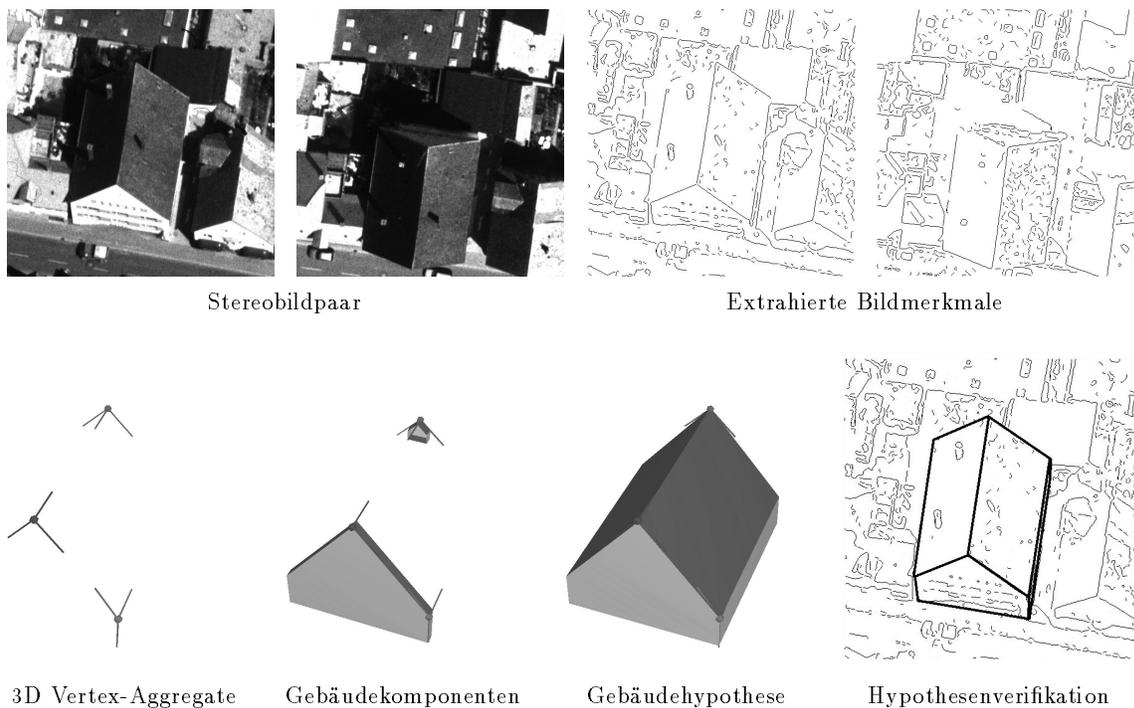


Abbildung 8: Schritte der 3D-Gebäudeerfassung aus einem Stereobildpaar: Ergebnisse der Merkmalsextraktion, drei rekonstruierte Vertex-Aggregate, von den Vertex-Aggregaten ausgewählte Gebäudekomponenten, die resultierende Hypothese eines Satteldachhauses und deren Verifikation durch Rückprojektion in die Stereobilder (hier nur für ein Bild dargestellt).

Zur Zeit arbeiten wir auf verschiedenen internationalen Testdatensätzen von Luftbildern. Abbildung 9 zeigt das Rekonstruktionsergebnis eines vierfach abgebildeten Gebäudeobjekts, das eine komplexere Struktur aufweist. Als nächsten Teilschritt werden wir die Integration von Beleuchtung und Schatten in das Bildmodell bearbeiten.

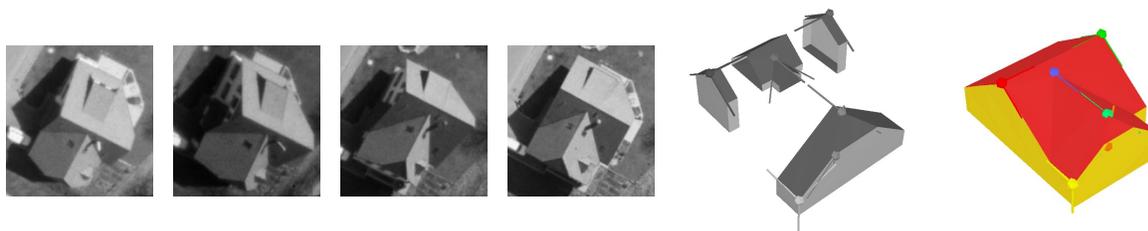


Abbildung 9: Aus vierfach überdeckter Gebäudeabbildung abgeleitete Gebäudekomponenten und daraus generierte Gebäudehypothese.

Danksagung: Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projekts “Semantische Modellierung und Extraktion räumlicher Objekte aus Bildern und Karten”, insbes. im Teilprojekt “Gebäudextraktion” in Kooperation mit dem Institut für Photogrammetrie und dem Institut für Informatik III der Universität Bonn und wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

- BIEDERMAN, I. (1987): Recognition-by-Components: A Theory of Human Image Understanding. *Psychological Review*, 94:115–147, 1987.
- DICKINSON, S.; PENTLAND, A.; ROSENFELD, A. (1992): 3-D Shape Recovery Using Distributed Aspect Matching. *IEEE T-PAMI*, 14(2), 1992.
- FISCHER, A.; STEINHAGE, V. (1996): *On the Computation of Visual Events in Aspect Graph Generation*. 1996. Submitted Paper.
- FISCHER, A.; STEINHAGE, V. (1997): Solid Modeling for Building Extraction from Aerial Images. In: SKALA, V. (Hrsg.), *5th Int. Conf. in Central Europe on Computer Graphics and Visualization 97, WSCG'97*, 1997.
- FUCHS, C.; FÖRSTNER, W. (1995): Polymorphic Grouping for Image Segmentation. In: *5th Int. Conf. on Computer Vision, ICCV 1995, Boston*, Seiten 175–182, 1995.
- KOENDERINK, J. J.; VAN DOORN, A. J. (1976): Visual Perception of Rigidity of Solid Shape. *Journal of math. Biology*, 3:79–85, 1976.
- KOLBE, TH. H.; PLÜMER, L.; CREMERS, A. B. (1996): Using Constraints for the Identification of Buildings in Aerial Images. In: *Practical Applications of Constraint Technology, PACT'96*, Seiten 143–154, 1996.
- KORT, A.; POGODA, A.; STEINHAGE, V. (1996): Employing Aspect Hierarchies for Building Detection in Digital Images. In: *Mustererkennung 1996, 18. DAGM-Symposium, Heidelberg*, Informatik aktuell, Seiten 217–224. Springer, 1996.
- LANG, F.; FÖRSTNER, W. (1996): Surface Reconstruction of Man-Made Objects using Polymorphic Mid-Level Features and Generic Scene Knowledge. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 6:193–201, 1996.
- STEINHAGE, V. (1995): Generische CSG-Modellierung und Aspekthierarchien zur Gebäudeerkennung in digitalen Luftbildern. In: *15. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Hannover, 4.-6. Okt. 1995, Band 4 der Publikationen der DGPF*, 1995.