

Digitale Bildanalyse in der Architekturphotogrammetrie

VOLKER RODEHORST

1. Einführung

1.1 Architekturphotogrammetrie

Die Architekturphotogrammetrie gehört zu den ältesten Anwendungen in der Photogrammetrie. Ihr Einsatz in Bauaufnahme und Denkmalpflege hat aber gerade in letzter Zeit durch die Erfassung, Dokumentation und Restaurierung von Kulturgütern an Bedeutung gewonnen.

Architekturphotogrammetrische Auswertungen verlangen einerseits hohe Interpretationsleistungen, viel Vorwissen und spezifische Erfahrungen, z.B. bei der Identifizierung von Baustilen und Erfassung von charakteristischen Formlinien. Andererseits fallen bei der meßtechnischen Erfassung in sehr großem Umfang verhältnismäßig einfache Routinearbeiten an, wie z.B. die fugenweise Kartierung von Mauerwerk oder die Erfassung von Fenstersprossen.

1.2 Digitale Bildanalyse

In der Architekturphotogrammetrie existieren räumlich stark gegliederte, unstetige Oberflächenstrukturen, die einer automatischen Behandlung im Prinzip gut zugänglich sind (ALBERTZ 1985). Durch den Einsatz Digitaler Bildverarbeitung lassen sich Teile der Auswertevorgänge automatisieren und es werden der Architekturphotogrammetrie grundsätzlich neue methodische Möglichkeiten eröffnet (ALBERTZ 1986).

Mit wissensbasierter Mustererkennung kann der Beobachter von eintöniger Routinearbeit befreit werden und er kann sich mehr auf diejenigen Meß- und Interpretationsaufgaben konzentrieren, die seine Intelligenz und Erfahrung verlangen. Die Verwendung von Kantenextraktions-Algorithmen und die Entwicklung von Interpretationsmodellen für diesen Aufgabenbereich befinden sich allerdings noch in der Entwicklungsphase. Die geübte Hand des Photogrammeters wird durch diese Technologien nicht ersetzt werden können. Der Einsatz kann allerdings dazu beitragen, daß die Arbeit des Auswerters beschleunigt und vereinfacht werden kann.

1.3 Aufgabe und Zielstellung

Im Rahmen des Forschungsprojektes »Digitale Bildanalyse in der Architekturphotogrammetrie« sollen die Auswertemethoden in der Architekturphotogrammetrie durch den Einsatz Digitaler Bildverarbeitung weiterentwickelt werden. Der Schwerpunkt liegt in der Entwicklung einer rechnergestützten Kartierung von Fassaden und der Realisierung von Methoden zur automatischen Analyse und Interpretation von Architekturbildern.

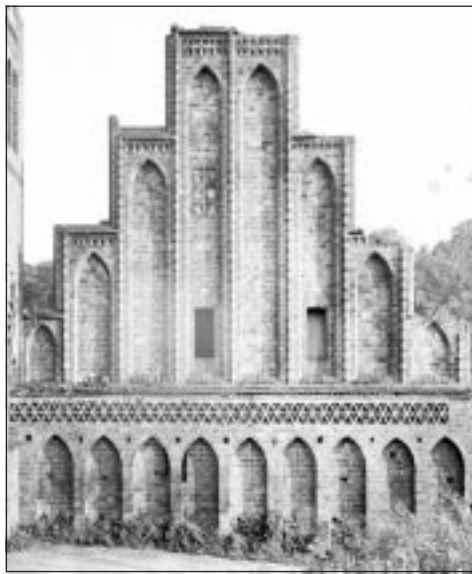


Abb. 1a: Photographisches Bild der Nordfassade des Brauhauses im Kloster Chorin

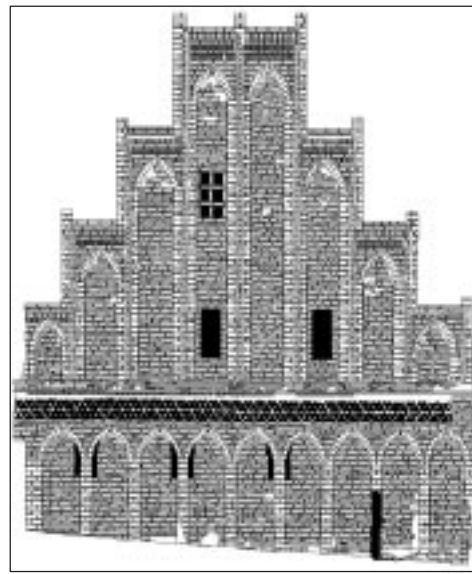


Abb. 1b: Durch stereophotogrammetrische Auswertung gewonnener Fassadenplan

Die wesentlichen Aufgaben liegen in der Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in Algorithmen der Digitalen Bildverarbeitung und praktische Untersuchungen mit Kantenextraktion, Segmentierung und Analyse der gefundenen Merkmale zur teilautomatischen Erstellung eines Fassadenplans (vgl. Abb. 1a und b).

1.4 Experimentelle Ergebnisse

Eine Segmentierung erfordert ein spezialisiertes, stark zielgerichtetes Verfahren zur Lösung eines konkreten Problems. Da es kein optimales und universell einsetzbares Verfahren für beliebig komplexe Objekte gibt, beschränkt sich die folgende Auswertung vorerst auf Teile einer Fassade, wie z.B. die Kartierung von Mauerwerk.

Für die Darstellung der experimentellen Ergebnisse wurden zwei charakteristische Beispielbilder ausgewählt. Die Abbildung 2a zeigt den Ausschnitt einer Natursteinfassade von der Nikolaikirche in Jüterbog.



Abb. 2a: Digitalisierter Ausschnitt aus einer Natursteinfassade (Turm der Nikolaikirche in Jüterbog)



Abb. 2b: Ausgewählter Bereich einer Klinkerfassade (Südfassade des Brauhauses im Kloster Chorin)

Die zu kartierenden Steine sind unterschiedlich groß, sie haben im Prinzip runde aber unregelmäßige Formen und sind relativ willkürlich im Bild verteilt. Die überwiegend dunklen Steine heben sich allerdings als Objekte deutlich von dem hellen Hintergrund der breiten Fugen ab.

Der Bildausschnitt in Abbildung 2b zeigt eine stark strukturierte Klinkerfassade vom Brauhaus des Klosters in Chorin. Hier ist keine klare Trennung der Objekte von einem Hintergrund gegeben und Beleuchtungsunterschiede und Verwitterungserscheinungen erschweren die Analyse. Vorteilhaft wirkt sich hier jedoch die z.T. einfache Form, die Regelmäßigkeit und Symmetrie der Strukturen aus.

2. Bildsegmentierung

2.1 Definition

Bildsegmentierung soll eine sinnvolle Zuordnung von Bildpunkten zu Objekten durchführen (*Klassifikation* von Bildpunkten) oder verschiedene Bildpunkte zu sinnvollen Objekten zusammenfassen (*Partitionierung* des Bildes). Dabei reicht es nicht aus, Bereiche mit gleichen photometrischen Eigenschaften, beispielsweise dem Grauwert, zu suchen. Vielmehr müssen semantische Einheiten, wie z.B. Steine und Fugen, erkannt werden.

2.2 Verfahren

Für eine Bildsegmentierung gibt es zwei grundlegende Herangehensweisen. Bei der *Segmentierung aufgrund von Diskontinuitäten* werden Bildbereiche gesucht, in denen sich die Intensität der Grauwerte lokal stark ändert. Bei einer *Segmentierung nach Homogenitätskriterien* werden Pixel gemäß eines Homogenitätsprädikats zu maximal großen Regionen zusammengefügt. Die mit beiden Verfahren erzielten Ergebnisse sind äquivalent und können ineinander überführt werden.

- *Punktorientiert*

Ein einfaches Verfahren zur Bildsegmentierung ist die Anwendung eines *Schwellwertverfahrens*. Dabei existieren unterschiedliche Methoden einen Schwellwert zu bestimmen, der die Objekte optimal voneinander trennt. Eine ganze Reihe von Verfahren wird u.a. von WAHL (1984) ausführlich diskutiert. Eine weitere Möglichkeit zur punktbasierten Segmentierung ist der Einsatz von *Klassifikatoren*.

Ein Klassifikator versucht in einer Menge von Merkmalsvektoren Gruppen zu bilden, so daß ein geeignetes Zielkriterium erfüllt wird. Das bisher verwendete z.T. historische Bildmaterial enthält jedoch keine Farbinformation, so daß als Merkmal nur der Grauwert verwendet werden kann. Somit ist der Einsatz punktbezogener Segmentierung nur eingeschränkt möglich.

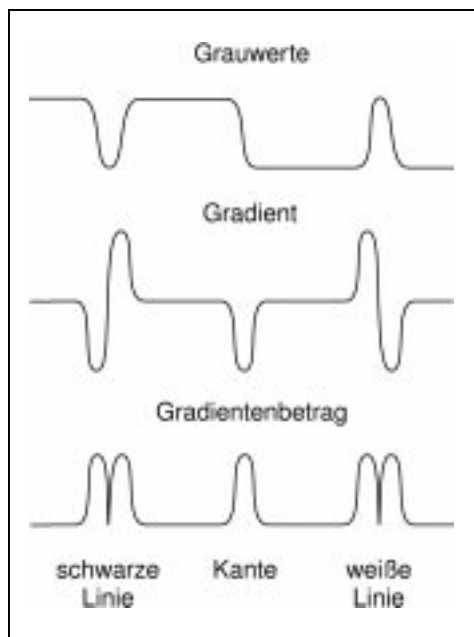


Abb. 3a: Grauwertprofil und Betrag der ersten Ableitung für verschiedene Grauwert-Diskontinuitäten

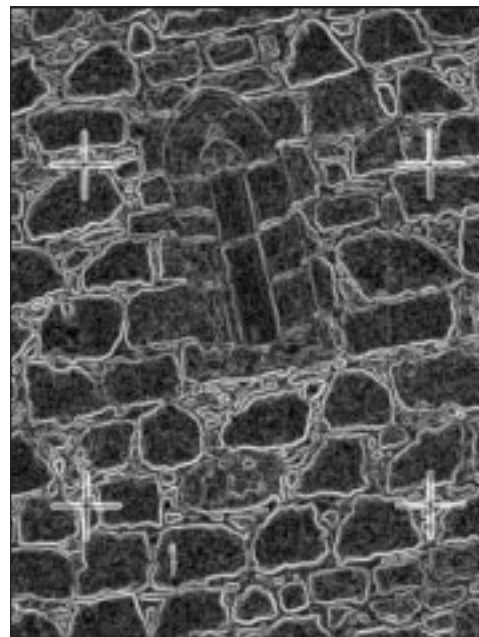


Abb. 3b: Darstellung des Gradientenbetrages der Abb. 2a

- *Kanten- /Linienbasiert*

Bei den *kantenbasierten* Segmentierungsverfahren wird versucht, die Grenzen zwischen den Objekten zu finden. Dabei wird davon ausgegangen, daß zwischen zwei Objekten im Bild eine abrupte Grauwertänderung (*Optische Kante*) existiert. Ein Maß für die Änderung der Grauwerte findet man durch die erste partielle Ableitung des Bildes (Abb. 3a). Viele Kantenoperatoren berechnen daher die Kanten mit Hilfe des *Gradienten*. Ein Gradienten-Vektor zeigt immer in die Richtung des stärksten Grauwertanstieges und der Gradientenbetrag liefert ein gutes Maß für die Stärke der Kante (Abb. 3b). Kantenfilter besitzen unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Genauigkeit der Lokalisation, der Amplitude und der Bestimmung ihrer Richtung.

Die resultierenden Konturen variieren in ihrer Geschlossenheit, Breite und Geradheit. Zu den wichtigen Qualitätskriterien zählen auch die Behandlung von Konturkreuzungen sowie das Rauschverhalten der Kantenfilter. Nähere Informationen zur Kantendetektion sind z.B. bei MARR-HILDRETH (1980), CANNY (1986), DERICHE (1987) und SHEN(1992) zu finden.

Probleme treten bei diesen Verfahren meist dadurch auf, daß die extrahierten Merkmale nicht unbedingt geschlossene Konturen bilden. *Konturfolgeverfahren*, die anhand der Gradientenrichtung und des Gradientenbetrages das Schließen von unterbrochenen Kantenstücken erlauben, können jedoch nur bei der Überbrückung kleiner Lücken erfolgreich eingesetzt werden (vgl. Abb. 4a).

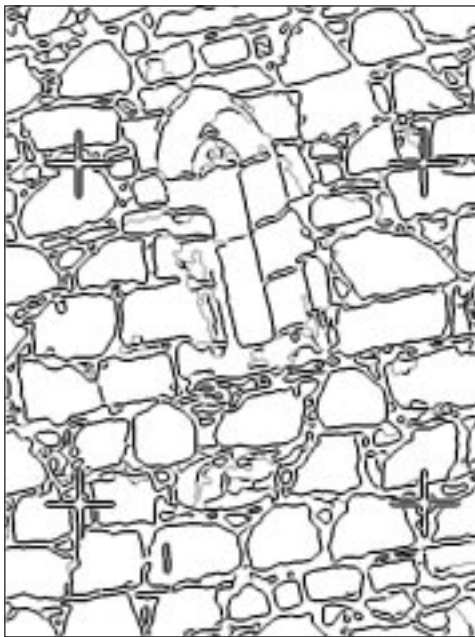


Abb. 4a: Ergebnis einer Kantenextraktion (schwarz) mit anschließender Lückenschließung durch Konturverfolgung (grau)



Abb. 4b: Ergebnis einer Extraktion von Linienstrukturen

Bei der Detektion von linienhaften Strukturen müssen benachbarte Kanten mit entgegengesetzter Richtung gesucht werden. Die Ausrichtung der Kantenpaare entscheidet, ob helle oder dunkle Linien extrahiert werden sollen. Ein solches Verfahren, welches auf Anpassungen von 2D-Funktionen basiert, wird z.B. von BUSCH (1994) beschrieben. Das Ergebnis einer Linien-Extraktion ist in Abbildung 4b dargestellt.

- *Flächenorientiert*

Flächenwachstums-Verfahren benutzen Ähnlichkeiten zwischen benachbarten Bildpunkten um ein zusammenhängendes Gebiet zu finden. Von einem Startpunkt ausgehend werden Merkmale mit den Nachbarn verglichen um Punkte mit ähnlichen Eigenschaften zu finden. Untersuchungen zur wissensbasierten Bildanalyse für Gebäudefassaden mit *Hierarchischer Regionaggregation*, *Bereichswachstums-* und *Quadtree-Verfahren* sind u.a. bei XU (1994) beschrieben.

Der Vorteil dieser Verfahren ist, daß die Kanten, die durch die Segmentgrenzen definiert sind, immer geschlossene Konturen bilden. Problematisch ist allerdings die automatische Bestimmung der Segmentgrößen. So verschmelzen häufig wichtige Details in einem Segment während andere homogene Bereiche noch stark zerstückelt sind.

- *Morphologisch*

Ein wesentlicher Ansatz ist es, Objekte über ihre Form zu finden. Voraussetzung ist, daß die Form des gesuchten Objektes bekannt ist. Beim *Matching* führt man eine Maske mit der gesuchten Form über das gesamte Bild und vergleicht die Übereinstimmung mit den darunterliegenden Bildpunkten. Eine Anwendung für das Matchen von Klinkersteinen ist z.B. von TRAUTHAN(1993) untersucht worden.

3. Vorverarbeitung

Bei den klassischen Verfahren zur flächenorientierten Segmentierung ist eine Abhängigkeit von den absoluten Grauwerten gegeben. Leichte Beleuchtungsunterschiede auf der Fassade oder Verwitterungserscheinungen, wie z.B. Wasserflecken, können daher sehr leicht zu Problemen führen (Abb. 5a). Aus diesem Grund ist eine geeignete Vorverarbeitung der Bilder notwendig (Abb. 5b). Im folgenden sollen zwei Verfahren vorgestellt werden, die sich im praktischen Einsatz bewährt haben.

3.1 Butterworth-Filter

Um die Funktionsweise des Butterworth-Filters zu veranschaulichen, muß man sich das zu verarbeitende Bild als eine Funktion vorstellen. Die Änderungen im Grauwertverlauf entsprechen dabei unterschiedlich starken Schwingungen mit verschiedenen Wellenlängen. Eine effiziente Zerlegung des Bildes in seine Schwingungsanteile kann man z.B. mit dem FFT-Algorithmus (*Fast-Fourier-Transformation*) erreichen.



Abb. 5a: Probleme bei einer Segmentierung ohne Vorverarbeitung



Abb. 5b: Ergebnis der Segmentierung nach geeigneter Vorverarbeitung

Die Abbildung 6a zeigt das zugehörige zentrierte *Amplitudenspektrum* $H(u, v)$ mit den tiefen Frequenzen in der Mitte und den hochfrequenten Anteilen am Rand. Leichte Beleuchtungsunterschiede zeichnen sich insbesondere durch langsame Schwingungsanteile aus und relevante Bildstrukturen mit starken Grauwertänderungen sind durch hochfrequente Schwingungen gekennzeichnet.

Die grundlegende Idee eines *Hochpaßfilters* ist die Beseitigung von störenden tiefen Frequenzen unter Beibehaltung der wichtigen hohen Bildfrequenzen. Ein idealer Filter repräsentiert allerdings nicht die physikalischen Gegebenheiten. An der *Grenzfrequenz* D_0 sollten nicht alle Teile vollständig abgeschnitten sondern eher mit exponentiellem Abfall gedämpft werden.

In diesem Zusammenhang ist die Übertragungsfunktion des Butterworth-Filters von besonderer Bedeutung (Abb. 6b). Das Ergebnis einer solchen Hochpaß-Filterung mit dem Butterworth-Filter ist in Abbildung 6c dargestellt.

3.2 Histogramm-Egalisierung

Damit einzelne Gebiete gut unterscheidbar werden, ist ein optimaler lokaler Kontrast erforderlich. Um dies zu erreichen ist eine Veränderung der Grauwertverteilung durch Modifikation des Grauwert-Histogramms geeignet. Ein *Histogramm* ist eine Häufigkeitstabelle, in der jeweils die Anzahl N der im Bild vorkommenden Grauwerte $G_0 \dots G_{MAX}$ eingetragen ist.

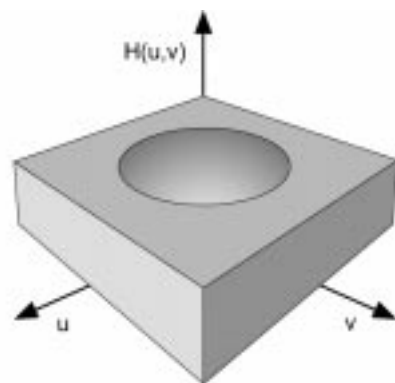
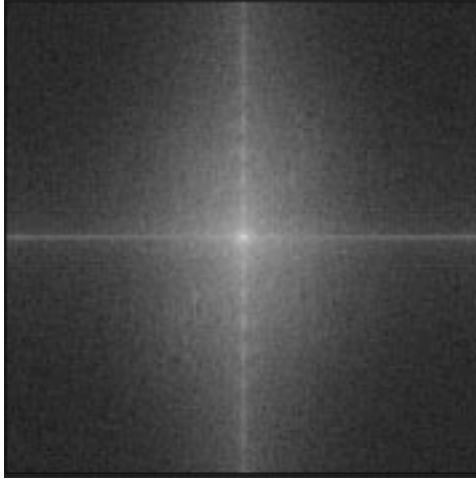


Abb. 6c (oben): Ergebnis der Hochpaß-Filterung mit dem Butterworth-Filter

Abb. 6a (links oben): Darstellung des Amplitudenspektrums der Fourier-Transformation

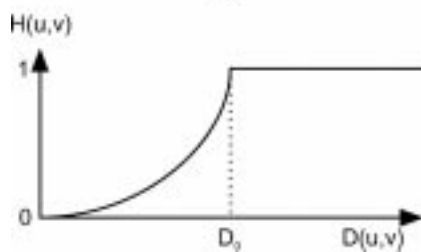


Abb. 6b (links): Übertragungsfunktion für den Butterworth-Filter

Bei der sogenannten *Histogramm-Egalisierung* (WAHL 1994) werden die Intensitätswerte gleichmäßig auf den gesamten zur Verfügung stehenden Grauwertbereich verteilt (Abb. 7a). Um den negativen Einfluß dominanter Grauwertbereiche auszuschließen, wird das Bild in mehrere Felder eingeteilt und jeweils lokale Histogramme erstellt. Der Grauwert eines Bildpunktes dient als Index zur Transformation in den benachbarten Histogrammen.

Um an den einzelnen Feldgrenzen einen gleitenden Grauwertübergang zu erreichen, wird der eigentliche Grauwert anhand des Abstandes (a, b) zu den resultieren-

den Grauwerten in den Feldmittelpunkten bilinear interpoliert (vgl. Abb. 7b). Durch dieses Verfahren wird je nach gewählter *Fenstergröße* ein optimaler lokaler Kontrast erzielt. Das Ergebnis einer solchen dynamischen Histogramm-Egalisierung ist in Abbildung 7c dargestellt.

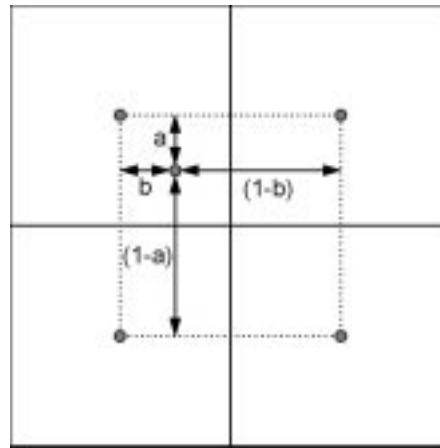
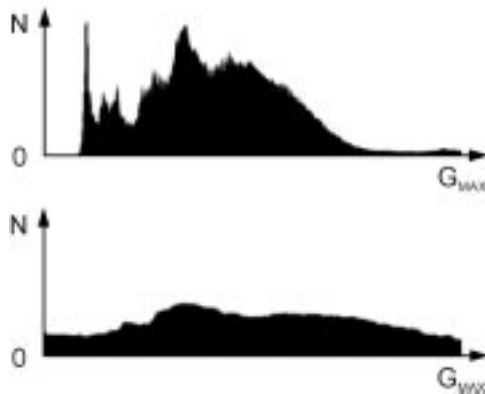


Abb. 7a (oben): Darstellung der Grauwertverteilung in einem Histogramm vor und nach der Egalisierung

Abb. 7b (rechts oben): Berechnung der Grauwerte abhängig vom Abstand zum Feldmittelpunkt



Abb. 7c (rechts): Ergebnis der dynamischen Histogramm-Egalisierung

4. Wasserscheiden-Transformation

Bei den Untersuchungen mit Architekturbildern hat sich ein Segmentierungsverfahren als besonders geeignet herausgestellt. Bei der sogenannten *Wasserscheiden-Transformation* handelt es sich um ein Verfahren, welches das Bild nach Diskontinuitätskriterien einteilt. Eine ausführliche Beschreibung ist z.B. bei HARMS (1996) zu finden.

Die Begriffe Wasserscheide und Staubecken kommen eigentlich aus dem Bereich Geowissenschaften und sollen hier nur der Veranschaulichung dienen. Die Wasserscheiden-Transformation wird im Gegensatz zu den meisten flächenbasierten Segmentationsverfahren nicht auf dem Originalbild, sondern auf dem Gradientenbild ausgeführt. Nimmt man den Betrag des Gradienten als Höhenwert, so muß man es sich das Gradientenbild als dreidimensionales *Relief* vorstellen. Zunächst wird in jedes der lokalen Minima ein Loch gebohrt und das gesamte Relief mit konstanter Geschwindigkeit in ein Wasserbecken eingetaucht. Die Eintauchgeschwindigkeit ist so langsam, daß stets von einem konstanten Wasserstand ausgegangen werden kann.

Um zu vermeiden, daß das ansteigende Wasser über den Rand eines Staubeckens fließt und sich mit dem benachbarten Staubecken vermischt, wird ein Damm an der Stelle des möglichen Zusammenflusses errichtet. Diese Dämme markieren die *Wasserscheiden* zwischen benachbarten Staubecken. Anhand einer *Schwellwertfunktion* können signifikante Dämme erkannt werden (vgl. Abb. 8). Falls zwei Staubecken nicht durch einen Grat, sondern durch eine Hochebene voneinander getrennt sind, sorgt die *Viskosität* des Wassers für eine korrekte Markierung der Wasserscheide.

Dies wird dadurch erreicht, daß die Hochebene durch mehrere Staubecken von verschiedenen Seiten her geflutet wird und das Wasser sich mit konstanter Geschwindigkeit auf der Hochebene ausbreitet.

Zur Durchführung der Wasserscheiden-Transformation wurde ein von VINCENT (1991) vorgeschlagenes Verfahren verwendet. Es basiert nicht auf der Analogie des Untertauchens, sondern es werden aus Effizienzgründen die Intensitätswerte des Gradientenbildes sortiert und in einer Tabelle abgespeichert. Dadurch kann auf das eigentliche Gradientenbild verzichtet und die Wasserscheiden-Transformation mittels Tabelle und Nachbarschaftsbeziehung durchgeführt werden.

4.1 Übersegmentierung

Das Ergebnis der Wasserscheiden-Transformation ist in Abbildung 9a dargestellt. Auffällig ist die sehr geringe Ausdehnung der Segmente und die starke Zerstückelung homogener Gebiete. Der Grund für diese Übersegmentierung ist die hohe Rauschanfälligkeit des Gradienten.

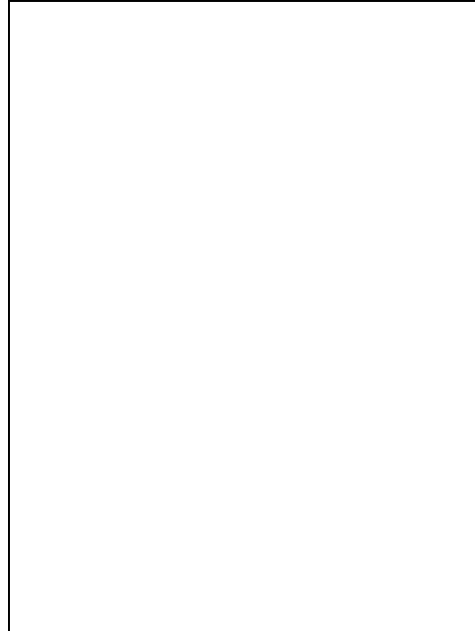


Abb. 8: Schematische Darstellung des Wasserscheiden-Verfahrens



Abb. 9a: Übersegmentiertes Ergebnis der Wasserscheiden-Transformation

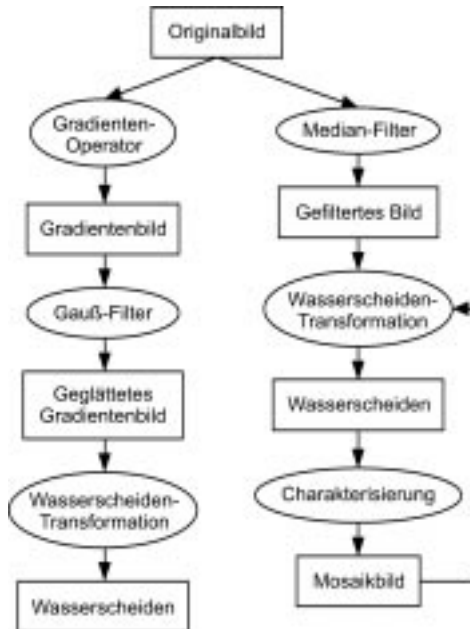


Abb. 9b: Verhindern der Übersegmentierung durch Glätten des Reliefs bzw. Verschmelzen von Wasserbecken

Im folgenden sollen zwei unterschiedliche Lösungsansätze vorgestellt werden, die diesem Problem entgegenwirken (vergleiche Abb. 9b). Das eine Verfahren beruht auf der Unterdrückung des Rauschens durch Glättung des Reliefs und der zweite Ansatz verfolgt das Zusammenfassen kleiner Segmente anhand unterschiedlicher Charakteristika.

4.2 Wasserscheiden-Glättung

Ein naheliegender Ansatz ist die Glättung des Gradientenbildes, beispielsweise mit Hilfe eines Gauß-Filters. Dadurch wird das Rauschen reduziert und die Segmente werden bei der Wasserscheiden-Transformation je nach Stärke der Filterung größer. Bei übermäßiger Glättung werden jedoch neben dem Rauschen auch wichtige Strukturen eliminiert und es kommt zu einer Verschmelzung von Objekten wie in Abbildung 10a.

Bei geeigneter Wahl der Standardabweichung für die Gauß-Glättung erhält man eine gute Segmentierung der Fassade, bei der die relevanten Objekte gut voneinander getrennt werden (Abb. 10b). Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß durch die Glättung des Gradienten die Position der Objektkonturen verschoben werden. Je nach Stärke der Glättung werden die Segmentkonturen abgerundet und entfernen sich weiter von der Originalposition.

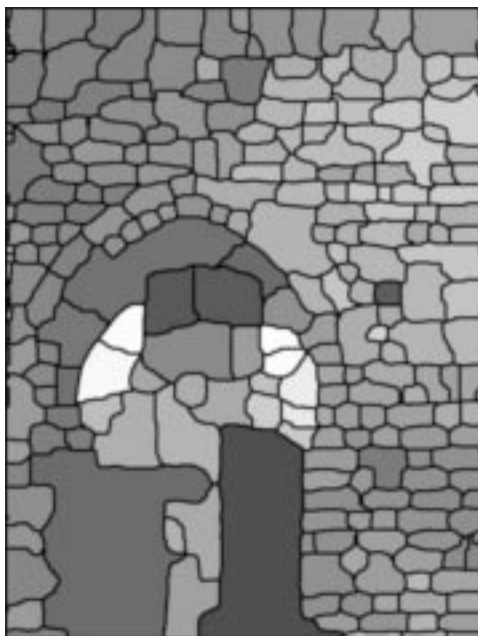


Abb. 10a: Segmentverschmelzung durch zu starke Glättung



Abb. 10b: Ergebnis der Wasserscheiden-Transformation mit Glättung

4.3 Geometrische Auswertung

Für die Weiterverarbeitung der durch Glättung verschobenen Segmente sollen im folgenden zwei Beispiele gegeben werden (s. Abb. 11). Bei stark strukturierten Objekten, wie z.B. einer Klinkerfassade, bietet sich eine einfache Beschreibung der Segmente durch *geometrische Primitiven* an. Die Extraktion von Rechtecken kann z.B. wie folgt durchgeführt werden. Für jedes einzelne Segment wird für bestimmte Winkel zwischen 0 und 90 Grad durch Minimum- und Maximumsuche ein *umschreibendes Rechteck* bestimmt.

Aus dieser Menge wird das Rechteck mit dem kleinsten Flächeninhalt ausgewählt. Dadurch werden alle Segmente möglichst gut durch ein Rechteck approximiert. Da jedoch nicht jedes Segment

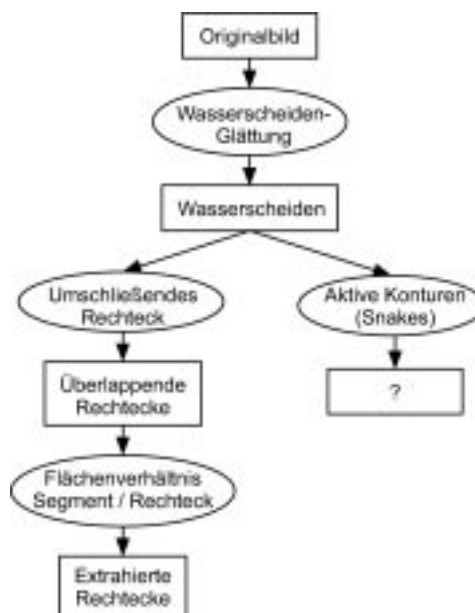


Abb. 11: Algorithmus der Wasserscheiden-Transformation mit Glättung

exakt die Gestalt eines Rechtecks besitzt, kommt es bei den Primitiven zu unterschiedlich starken Überlappungen.

Abhilfe schafft die Bestimmung eines Formfaktors. Liegt das *Flächenverhältnis* dicht bei einem Wert von eins, so entspricht die Form ungefähr einem Rechteck. Das Ergebnis der Extraktion von geometrischen Primitiven einer Klinkerfassade ist in Abbildung 12a dargestellt.



Abb. 12a: Einfache geometrische Segmentbeschreibung durch Rechtecke

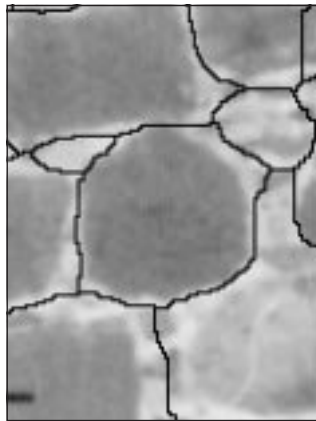


Abb. 12b: Verschobene Kontur der Wasserscheiden-Transformation mit Glättung

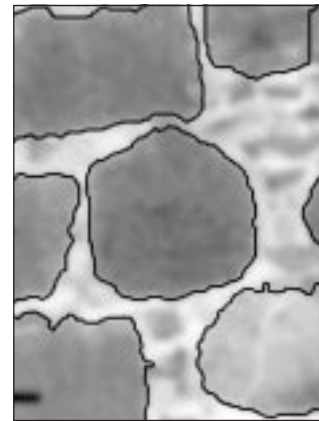


Abb. 12c: Ergebnis der Optimierung durch aktive Konturen

Eine andere Möglichkeit die verschobenen Segmentkonturen weiterzuverarbeiten besteht in dem Versuch die Originalposition der Konturen zu rekonstruieren. *Aktive Konturen* (oder auch *Snakes* genannt) besitzen die Eigenschaft, sich verschiedenen Konturen im Bild anzupassen. Das Verfahren basiert auf einer Optimierung von innerer und äußerer Konturenenergie.

Die innere Energie ist für die Flexibilität der Kontur verantwortlich und definiert somit die mögliche Krümmung und Stabilität. Die äußere Energie beeinflusst die Anziehung der Kontur an die Grauwert-Diskontinuitäten im Bild. Durch eine Minimierung der Energie kann sich die Kontur wie ein Gummiband um das Objekt zusammenziehen unter Beibehaltung der Wasserscheiden-Viskosität.

Von großer Bedeutung bei den Snakes ist die Definition einer initialen Kontur, die eine grobe Approximation der gesuchten Originalkontur beschreiben muß (s. Abb. 12b). Dies erfordert im allgemeinen ein gutes a-priori Wissen über die Lage und Form, jedoch produziert die Wasserscheiden-Transformation mit Glättung solche geschlossene Konturen, die sich gut als Startwert für das Optimierungsverfahren eignen. Das Ergebnis einer rekonstruierten Kontur mit Snakes ist in Abbildung 12c dargestellt.

4.4 Wasserscheiden-Verschmelzung

Ein anderer Ansatz die beschriebene Übersegmentierung zu verhindern beruht auf dem Zusammenfassen der kleinen Segmente anhand von unterschiedlichen Cha-

rakteristika. Durch eine leichte *Median-Filterung* kann das Grundrauschen des Gradienten eliminiert werden ohne daß sich die Kontur signifikant verschiebt. Nach der Wasserscheiden-Transformation entstehen viele kleine Segmente, wovon einige Wasserscheiden durch eine Kontur im Originalbild entstanden sind. Die meisten ande-

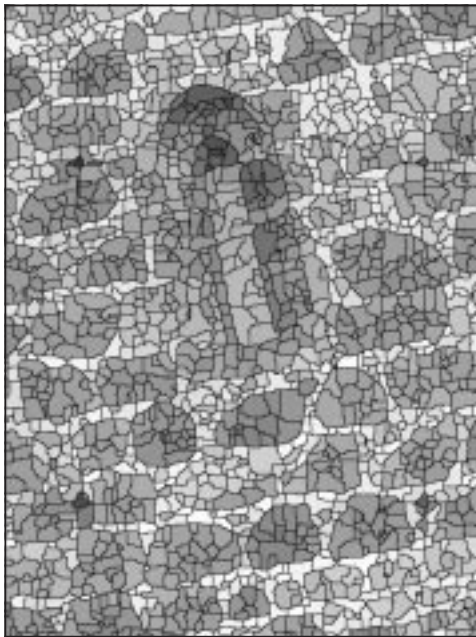


Abb. 13a (oben): Übersegmentiertes Ergebnis der Wasserscheiden-Transformation

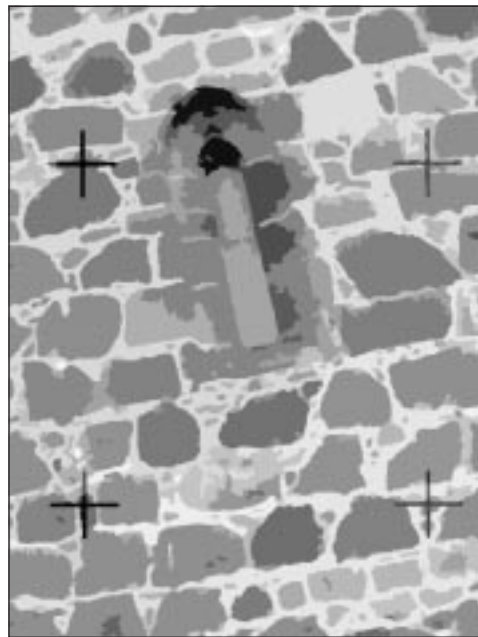


Abb. 13b (rechts oben): Verschmolzene Segmente anhand des mittleren Grauwertes



Abb. 13c (rechts): Binarisiertes Ergebnis der Wasserscheiden-Verschmelzung

ren Wasserscheiden sind allerdings durch das Rauschen hervorgerufen worden (s. Abb. 13a).

Durch das Verschmelzen von benachbarten Segmenten sollen diese fehlerhaft detektierten Wasserscheiden beseitigt werden. Als Kriterium für die Verschmelzung sind eine ganze Reihe von Merkmalen denkbar, wie beispielsweise der mittlere Grauwert oder einfache statistische Merkmale (Varianz, Entropie bzw. Homogenität). Die Beschreibung der Segmente durch solche Merkmale bezeichnet man als *Charakterisierung*.

Füllt man den Bereich von jedem Segment mit einer Grauwert-Repräsentation von diesem Merkmal, so entsteht ein sogenanntes Mosaikbild, auf dem wiederum iterativ die Wasserscheiden-Transformation ausgeführt werden kann, um entsprechend größere Segmente zu erhalten (vgl. Abb. 13b). Das Ergebnis der Wasserscheiden-Verschmelzung unter Verwendung des mittleren Grauwertes als Merkmal ist in Abbildung 13b dargestellt.

Um die Konturen der Segmente zu erhalten, muß z.B. durch eine *Binarisierung* des Mosaikbildes eine Trennung der Objekte vom Hintergrund erreicht werden. Die Abbildung 13c zeigt das Resultat mit den verschmolzenen Segmenten. Hier ist zu erkennen, daß die Steine jeweils als Ganzes zusammengefaßt werden konnten. In Bereichen, wo benachbarte Steine dicht beieinander liegen und der trennende Hintergrund nicht sehr stark ausgeprägt ist, werden fälschlicherweise unterschiedliche Steine zu einem gemeinsamen Objekt zusammengefaßt.

Eine Ursache dafür ist sicherlich die Wahl des Fusionsmerkmals, das bei den vorgestellten Kriterien, wie z.B. dem mittleren Grauwert, eine Abhängigkeit von den absoluten Grauwerten erzeugt. Wesentlich besser eignen würde sich eine Charakterisierung mit höheren Texturmerkmalen, die relative Grauwertänderungen oder lokale Eigenschaften und Strukturen beschreiben.

5. Kombination der Wasserscheiden-Verfahren

Es wurden zwei Lösungsansätze mit unterschiedlichen Eigenschaften vorgestellt, die das Problem der Übersegmentierung auf verschiedene Art und Weise beseitigen. Durch die Wasserscheiden-Glättung werden die meisten Steine korrekt voneinander getrennt, allerdings mit verschobenen Konturen (Abb. 15a). Das binarisierte Mosaikbild der Wasserscheiden-Verschmelzung enthält zwar korrekte Konturen, jedoch sind einige Objekte fälschlicherweise zusammengefaßt (Abb. 13c).

Im folgenden soll nun eine Kombination der Verfahren vorgeschlagen werden, die es erlaubt, Objekte gut von einem Hintergrund zu trennen (Abb. 14). Zunächst müssen beiden Verfahren getrennt auf das Originalbild angewendet werden. Durch eine logische Verknüpfung der Ergebnisse können die fehlerhaft zusammengefaßten Segmente der Wasserscheiden-Verschmelzung mit dem Resultat der Wasserscheiden-Glättung aufgetrennt werden.

In Abbildung 15b ist eine Überlagerung der verschmolzenen Segmente mit den verschobenen Wasserscheiden dargestellt. Nach der Separation der einzelnen Steine ist eine Nachverarbeitung sinnvoll.

Die Beseitigung übriggebliebener kleiner Restsegmente kann z.B. mit der Minkowski-Addition und Subtraktion erfolgen. Durch das sukzessive Abtragen der Ränder wird der Umfang der Segmente reduziert (Erosion) und durch anschließendes Wachsen (Dilatation) wieder auf die Ausgangsgröße gebracht.

Je nach Anzahl der Schritte werden dabei unterschiedlich große Segmentreste eliminiert. Alle Segmente, deren Radius kleiner als die Schrittzahl ist, erreichen eine Segmentgröße von 0 und unterliegen dann nicht mehr dem anschließenden Wachstumsprozeß.

Abschließend müssen noch die Ränder der Segmente bestimmt werden, um die geschlossenen Konturen der Steine zu erhalten. Das Ergebnis des kombinierten Wasserscheiden-Verfahrens nach der Anwendung auf die Natursteinfassade ist in Abbildung 15c dargestellt.

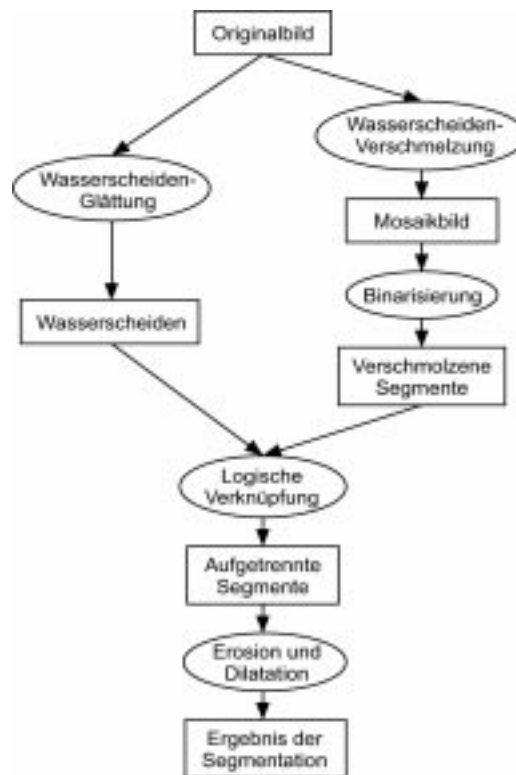


Abb. 14: Kombinerter Wasserscheiden-Algorithmus

6. Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Verfahren präsentiert, um die Erstellung eines Fassadenplans anhand der Digitalen Bildanalyse zu unterstützen. Der vorgestellte Ansatz der Wasserscheiden-Transformation eignet sich besonders gut zur Segmentierung von Fassaden. Die Unabhängigkeit von den absoluten Grauwerten durch Verwendung des Gradientenbildes und die Viskosität bei der Ausbreitung von Segmenten sind wesentliche Vorteile.

Für das typische Problem der Übersegmentierung wurden zwei verschiedene Lösungsansätze vorgestellt. Durch die Glättung des Gradientenbildes erhält man nach der Wasserscheiden-Transformation eine gute Trennung von relevanten Objektstrukturen. Die verschobenen Segmentränder müssen aber anschließend für eine exakte Bestimmung der Kontur noch korrigiert werden. Bei der Verschmelzung kleiner Segmente bleiben zwar die Originalkonturen erhalten, jedoch schafft man je nach Wahl des Fusionsmerkmals wieder eine Abhängigkeit von den absoluten Grauwerten.

Dies führt trotz geeigneter Vorverarbeitung zu fehlerhaften Ergebnissen. Die eingesetzte Charakterisierung bei der Verschmelzung von Segmenten muß daher noch

etwas verfeinert werden. Die vorgestellte Kombination der beiden Wasserscheiden-Verfahren trennt Objekte gut vom Hintergrund und eignet sich somit besonders für die Segmentierung von unregelmäßigen Natursteinfassaden.

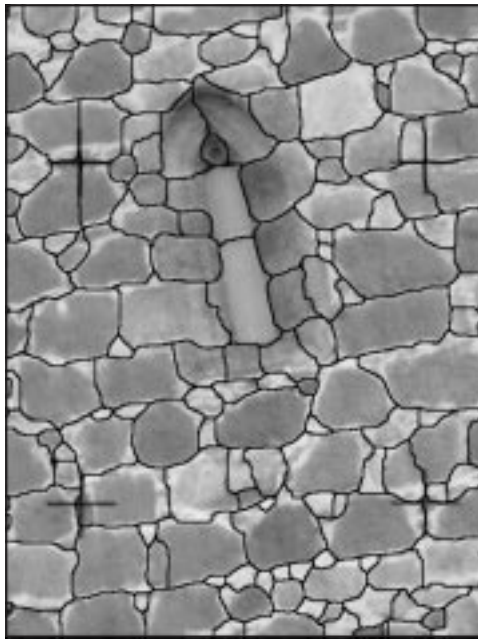


Abb. 15a (oben): Separation der Steine durch Wasserscheiden

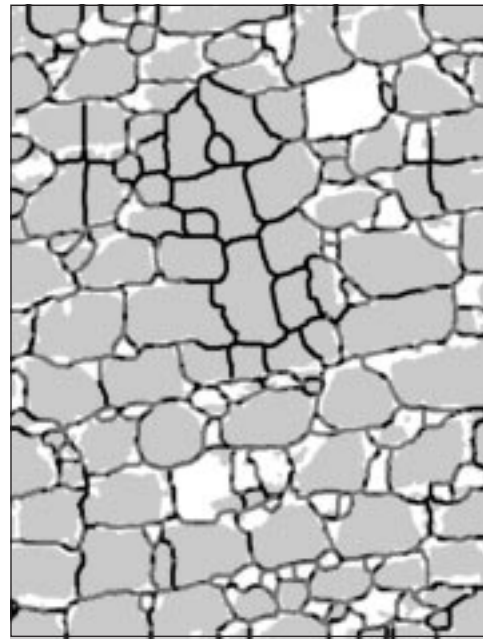


Abb. 15b (rechts oben): Überlagerung verschmolzener Segmente mit Wasserscheiden



Abb. 15c (rechts): Ergebnis der Segmentierung von Natursteinen

7. Ausblick

Bei der Wasserscheiden-Transformation ist die automatische Bestimmung der Segmentgröße problematisch. Es verschmelzen häufig wichtige Details in einem Segment während andere homogene Bereiche noch stark zerstückelt sind. Im Segmentierungsprozeß müßten fertig segmentierte Objekte markiert werden können und vor einem weiteren Verschmelzen geschützt werden.

Von HARMS (1996) wird z.B. eine Lösung für den medizinischen Bereich vorgeschlagen, in der ein Auswerter für jedes einzelne Objekt interaktiv das Ende der Segmentierung festlegen muß. Aufgrund der wesentlich größeren Objektanzahl in der Architekturphotogrammetrie ist diese Herangehensweise jedoch nicht praktikabel. Im Gegensatz zu den Objekten in der Medizin sind Fassaden allerdings stark strukturiert und können daher auch leichter automatisch erkannt werden. Durch eine wissensbasierte Selektion von bereits fertig segmentierten Objekten könnten diese gekennzeichnet und aus dem weiteren Segmentierungsprozeß herausgenommen werden.

Für die Verschmelzung von Objekten wurden bisher nur einfache statistische Merkmale, wie z.B. mittlerer Grauwert, Varianz, Entropie oder Homogenität der Segmente verwendet. Die Charakterisierung bei der Wasserscheiden-Verschmelzung kann möglicherweise durch den Einsatz höherer Texturmerkmale, wie sie z.B. Gabor Energie Filter oder Markov Random Fields erzeugen, verbessert werden.

Nicht zuletzt sollte eine Fassade als Ganzes betrachtet werden und vorhandene Muster und Symmetrien ausgenutzt werden. Nach der Extraktion von graphischen Primitiven kann durch Vorwissen die Lage, Position oder Größe im Kontext verifiziert und korrigiert werden. So werden z.B. im Normalfall aus statischen Gründen zwei vertikale Fugen so konstruiert, daß sie nicht direkt übereinander liegen, sondern durch eine Verzahnung bessere Stabilität gewährleisten.

8. Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J.: Invarianten und ihre Bedeutung für Photogrammetrie und Fernerkundung, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 83 (1985) S. 295-299.
- ALBERTZ, J.: Digitale Bildverarbeitung in der Nahphotogrammetrie – Neue Möglichkeiten und Aufgaben. Bildmessung und Luftbildwesen 54 (1986) S. 34-45.
- BUSCH, A.: Fast Recognition of Lines in Digital Images Without User-Supplied Parameters. Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 30, Part 3/1, S. 91-97, 1994.
- CANNY, J.: A Computational Approach to Edge Detection, Pattern Analysis and Machine Intelligence 8, Nr. 6, S. 679-698, 1986.
- DERICHE, R.: Using Canny's Criteria to Derive a Recursively Implemented Optimal Edge Detector, Int. Journal of Computer Vision 1, Nr. 2, S. 167-187, 1987.
- HARALICK, R.M. & SHAPIRO, L.G.: Computer and Robot Vision 1. Addison-Wesley, 1992.
- HARMS, T.: Multiresolution Bildsegmentierung mit der Wasserscheidentransformation. Diplomarbeit, TU Berlin, Technische Informatik, Computer Vision, 1996.
- KASS, M., WITKIN, A. & TERZOPOULOS, D.: Snakes: Active contour models. Int. Journal of Computer Vision, Band 1, Nr. 4, S. 321-331, 1988.

- MARR, D. & HILDRETH, E.C.: Theory of Edge Detection. Proc. of the Royal Society of London B207, S. 187-217, 1980.
- SHEN, J., & CASTAN, S.: An Optimal Linear Operator for Step Edge Detection. Computer Vision, Graphics and Image Processing 54, S. 112-133, 1992.
- TRAUTHAN, F.: Versuche zur automatischen Erfassung von Steinen einer Hausfassade. Publikation zur 13. DGPF Jahrestagung: Geoinformation durch Fernerkundung, Hrsg.: F.K. List, Band 2, Augsburg, S. 221-228, 1993.
- VINCENT, L. & SOILLE, P.: Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulation. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence 13, Nr. 6, S. 583-598, 1991.
- WAHL, F.M.: Digitale Bildsignalverarbeitung. Springer, 1984.
- XU, YONGLONG: Untersuchung der Bildsegmentation zwecks der nachfolgenden wissenschaftlichen Bildanalyse. Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 30, Part 3/1, S. 931-938, 1994.

Das Projekt »*Digitale Bildanalyse in der Architekturphotogrammetrie*« wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.