

Interpretation von Schatten- und Intensitätskanten in integrierten Grauwert- und Tiefenbildern

Roland Robmann

Institut für Informatik und angewandte Mathematik

Universität Bern

e-mail: robmann@iam.unibe.ch

18. August 1994

Zusammenfassung

Aufgrund ihrer expliziten dreidimensionalen Informationen finden Tiefenbilder in der Bildverarbeitung eine immer grössere Verbreitung. Eine bekannte Methode zur Generierung von Tiefenbildern basiert auf dem kodierten Lichtansatz. Ein Vorteil dieser Methode besteht in der gleichzeitigen Aufnahme eines Grauwertbildes, das mit dem Tiefenbild bildpunktweise übereinstimmt. Dadurch lassen sich Informationen aus dem Grauwert- und dem Tiefenbild einfacher kombinieren. Andererseits treten beim kodierten Lichtansatz immer auch Schattenregionen auf, die nicht lokalisiert werden können. In diesem Bericht wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der die Begrenzungen von Schattenregionen in Tiefenbildern interpretiert. Eine Szene besteht aus komplexen Polyedern mit Schatten und Verdeckungen. Als Eingabe werden Kanten verwendet, die aus Grauwert- und Tiefenbildern extrahiert und integriert wurden. Diese Kanten gehören entweder zu einem Objekt in der Szene oder wurden durch Schatten erzeugt. Erstere werden in verschiedene Kantentypen klassifiziert, während letztere gelöscht werden. Ebenso werden Kanten innerhalb von Schattenregionen, die im Grauwertbild detektiert wurden, klassifiziert. Diese Klassifizierung von physikalischen Kanten zusammen mit dem Löschen von Schattenkanten erhöht potentiell nachfolgende Objekterkennungsschritte.

CR Categories and Subject Descriptors: I.4.6 [Image Processing]: Segmentation; I.4.8 [Image Processing]: Scene Analysis.

General Terms: Algorithms.

Additional Key Words: Range data, sensor fusion, edge and feature detection, interpretation, line drawings.

**Interpretation of Shadow and Intensity Edges in Integrated
Grey Level and Range Images**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Problemstellung	3
1.2	Verwandte Arbeiten	3
1.3	Lösungsansatz	7
1.4	Aufbau der Arbeit	8
1.5	Datenstruktur	8
2	Generierung eines attributierten Bildgraphen	11
2.1	Generierung des Bildgraphen	11
2.2	Attributierung des Bildgraphen	14
3	Generierung des Raumgraphen	18
3.1	Lokalisierung der Objektecken und Kantenendpunkte im Raum	18
3.2	Generierung von abstandkonsistenten Graphknoten	22
3.3	Verarbeitung von I -Knoten	26
4	Interpretation von Schatten- und Intensitätskanten	27
4.1	Verifizierung von Schattenprojektionen	27
4.2	Iteratives Interpretationsverfahren	29
4.3	Lokalisierung der Intensitätskanten	36
5	Nachverarbeitung des Raumgraphen	37
5.1	Verarbeitung der Objekte	38
5.2	Beschreibung der Szene durch Kanten und Flächen	40
6	Resultate	44
6.1	Bilder und Resultate	44
6.2	Vergleich des Aufwandes bei der Erkennung	49
7	Zusammenfassung und Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	52

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die *Erkennung* und *Lokalisierung* von Objekten in Bildern gehört zu den Hauptaufgaben eines Computer-Sichtsystems. Wurden bisher vor allem *Grauwertbilder* (*intensity, greylevel images*) verarbeitet, nimmt der Einsatz von *Tiefenbildern* (*range images*) aufgrund der darin enthaltenen Abstandsinformationen ständig zu. Eine bekannte Methode, Tiefenbilder zu gewinnen, bildet der *kodierte Lichtansatz*. Dabei wird eine Folge von Binärstreifenmustern auf die Szene projiziert und von einer Kamera aufgenommen. Die Tiefenwerte in jedem Bildpunkt werden anschließend durch Triangulation berechnet und als Tiefenbild abgespeichert. Ein Vorteil dieser Methode besteht dabei in der Möglichkeit ein Grauwertbild der Szene aufzunehmen, das mit dem Tiefenbild korrespondiert, d.h. bildpunktweise übereinstimmt. Die Kombination der Kanteninformationen aus dem Grauwert- und Tiefenbild ermöglicht eine zuverlässigere Kantendetektion. Ausserdem können die Kanten mit Hilfe der Tiefendaten klassifiziert werden. Ein Nachteil des kodierten Lichtansatzes besteht darin, dass aufgrund des für die Triangulation notwendigen Abstandes zwischen Projektor und Kamera immer auch *Schattengebiete* (*missing parts*) auftreten. In diesen Schattengebieten können keine Tiefendaten berechnet werden. Kanten innerhalb von Schattengebieten (*Intensitätskanten*), die in Grauwertbildern detektiert wurden, können deshalb nicht klassifiziert werden. Zusätzlich werden die Ränder dieser Schattengebiete als Kanten (*Schattenkanten*) detektiert. Schattenkanten sind entweder *geometrische* oder *nicht-geometrische Kanten*. Eine geometrische Schattenkante entspricht einer Objektkante, die an ein Schattengebiet grenzt. Eine nicht-geometrische Schattenkante hingegen rührt von der Schattenprojektion einer Objektkante her. Schattengebiete bzw. nicht-geometrische Schattenkanten liefern zusätzliche Daten, die den Aufwand bei der Objekterkennung erhöhen.

In diesem Bericht wird ein System vorgestellt, das Schattenkanten als geometrisch bzw. nicht-geometrisch interpretiert. Intensitätskanten und geometrische Schattenkanten werden ausserdem klassifiziert und nicht-geometrische Schattenkanten eliminiert. Als Eingabe dienen Kanten, die aus dem Grauwert- und dem Tiefenbild extrahiert und anschliessend integriert wurden.

1.2 Verwandte Arbeiten

Das Problem, räumliche Objekte in zweidimensionalen Ebenen zu beschreiben, wird in der Geometrie seit langem studiert. Mit dem umgekehrten Problem, planare Projektionen einem dreidimensionalen Objekt zuzuordnen, beschäftigte man sich erstmals in den späten sechziger Jahren, als Bilddaten von digitalen Computern verarbeitet werden konnten. Eine bekannte Methode besteht darin, *Linienzeichnungen* (*line drawings*) zu interpretieren, d.h. die Kanten des zugrundeliegenden Szenengraphen zu klassifizieren.

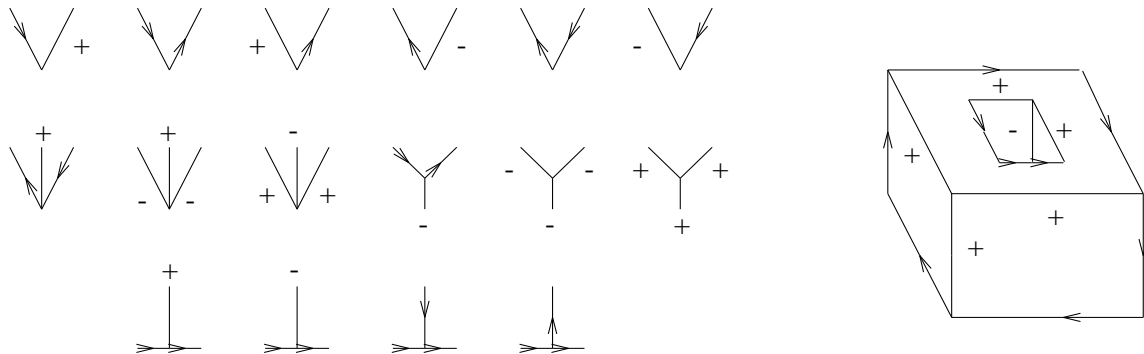


Abbildung 1: Markierungsschema nach *Huffman* und *Clowes*. Links: erlaubte Knotenkonfigurationen. Rechts: konsistente Szenenmarkierung.

Die Prototyp-freie Interpretation von Linienzeichnungen aus einer einzigen Blickrichtung wurde erstmals von Guzman [Guz68] behandelt, als er versuchte, systematisch Linienzeichnungen eines Stapels von Objekten in Regionen zu zerlegen. In seiner Methode wurden die Konfigurationen der Linien in ihren Knotenpunkten (*junctions*) verwendet, um die Zugehörigkeit zu Regionen zu bestimmen. Obwohl seine Methode lediglich aus *ad hoc* zusammengestellten Regeln bestand, die nicht auf einer logischen Begründung beruhten, war sie trotzdem ein Meilenstein, zeigte sie doch, dass eine Prototyp-freie Interpretation ohne Wissen über menschliche Erfahrungen durch einen relativ einfachen Mechanismus erreicht werden konnte.

Die Konfigurationen von Linien in ihren Knotenpunkten wurden von Huffman [Huf71] und Clowes [Clo71] auf mehr theoretische Weise erweitert. Sie studierten dabei das Problem, Kanten und Ecken so zu beschreiben, dass die Entscheidung, ob eine Linienzeichnung ein Objekt darstellt, algorithmisch bestimmt werden kann (*Huffman-Clowes-Markierungs-Schema* [Nev82]). Unter der Voraussetzung, dass der Beobachter sich in einer *allgemeinen Position* befindet — d.h. eine kleine Änderung der Blickrichtung verursacht kein Verschwinden oder Hinzukommen von Kanten oder Ecken — entspricht jede Gerade im Bild einer Objektkante, die durch den Schnitt von zwei Flächen verursacht wird. Die Kante muss entweder *konvex* (+), *konkav* (-) oder *verdeckend* (\uparrow) sein, wobei im letzten Falle die Kante so gerichtet ist, dass die verdeckende Fläche rechts von der Kante zu liegen kommt. Die Knotenpunkte ihrerseits entsprechen einem der Typen *arrow*, *fork*, *L* oder *T*. Der entscheidende Punkt liegt nun darin, dass die physikalisch möglichen Kombinationen von Kanten- und Eckentypen eine sehr kleine Untermenge aller denkbaren Kombinationen bilden (siehe Abbildung 1 links). Eine notwendige Bedingung an eine Linienzeichnung, ein mögliches Objekt darzustellen, besteht darin, alle Kanten *konsistent* zu markieren, so dass die Knotenkonfigurationen in der Liste der möglichen Konfigurationen enthalten ist und jede Kante in ihren beiden Endpunkten die gleiche Kantenmarkierung aufweist (siehe Abbildung 1 rechts).

Wie bereits erwähnt, basiert das Markierungsschema von Huffman-Clowes auf ei-

ner *notwendigen*, nicht aber *hinreichenden* Bedingung an die Linienzeichnung, wirklich ein Polyeder darzustellen. Zwei Methoden, die Korrektheit von klassifizierten Linienzeichnungen zu prüfen, sollen hier kurz vorgestellt werden: Für jede Linienzeichnung, die ein Polyeder darstellt, kann eine *reziproke Figur* definiert werden, die *dual* ist im Sinne, dass die Ecken, Kanten und Flächen in der reziproken Figur den Flächen, Kanten und Ecken in der Linienzeichnung entsprechen. Die bemerkenswerte Eigenschaft der reziproken Figur besteht nun darin, dass bei geeigneter Überlagerung alle ihre Kanten senkrecht auf den Kanten der Linienzeichnung liegen [Mac73]. Ein anderer Ansatz verwendet die Tatsache, dass ein Polyeder, das durch eine Linienzeichnung dargestellt wird, gewisse *lineare Gleichungen* erfüllen muss. Sugihara [Sug84] gelang es, eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Darstellung eines Polyeders durch Linienzeichnungen herzuleiten. Es ist nicht nur möglich, zwischen "korrekten" und "unkorrekten", sondern sogar zwischen "korrigierbaren" (im Sinne von falschen Ecken) und "unkorrigierbaren" Linienzeichnungen zu unterscheiden [Sug86].

Eine Erweiterung der Kantentypen auf *Schattenkanten* und *Risse* in den Objektflächen (*cracks*) wurde von Waltz [Wal75] eingeführt. Er verwendete zusätzliche Informationen über die Beleuchtung der Regionen: Eine Region wird entweder beleuchtet, wird verdeckt durch den Schatten einer anderen Fläche oder ist von der Beleuchtungsquelle abgewandt. Dadurch stieg die Anzahl Kantentypen auf 59. Waltz numerierte mehrere Tausend physikalisch mögliche Konfigurationen für verschiedene Eckentypen einschliesslich irrtümlicher Zuordnungen. Dadurch können gewisse Eckentypen Hunderte von möglichen Kombinationen erhalten. Dennoch wird das Finden von konsistenten Zuordnungen durch die Methode der *Relaxation* stark vereinfacht:

1. *Enumeration of labelings*: Weise jedem Eckpunkt die Menge seiner möglichen Konfigurationen zu.
2. *Constraint filtering*: Für jede Kante werden diejenigen Kantentypen entfernt, welche folgende Bedingung nicht erfüllen:
"Jede Kante muss in beiden Endpunkten den gleichen Kantentyp besitzen."
3. *Relaxation*: Wiederhole Schritt 2. bis alle Kanten die Bedingung erfüllen.

Sugihara [Sug79] untersuchte erstmals Kanten- und Eckentypen von Linienzeichnungen, die aus Tiefendaten gewonnen wurden. Er ergänzte dabei die Kantentypen *konvex*, *konkav* und *überdeckend* mit dem Typ *überdeckt*, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Klassifizierung der Kanten erfolgt ohne das Wissen über die Knotentypen. Dieses Wissen wird für die Vorhersage von fehlenden Kanten verwendet. Die Knoten können vom Typ *T*, *Y* oder *arrow* sein. Die Knoten bei überdeckten Kanten werden nicht klassifiziert, ausser es handle sich um *schattenerzeugende Knoten*. Der Grund für den Ausschluss dieser Knoten liegt nach Sugihara in der Vieldeutigkeit der inzidenten Kanten. Nur die schattenerzeugenden Knoten liefern nützliche

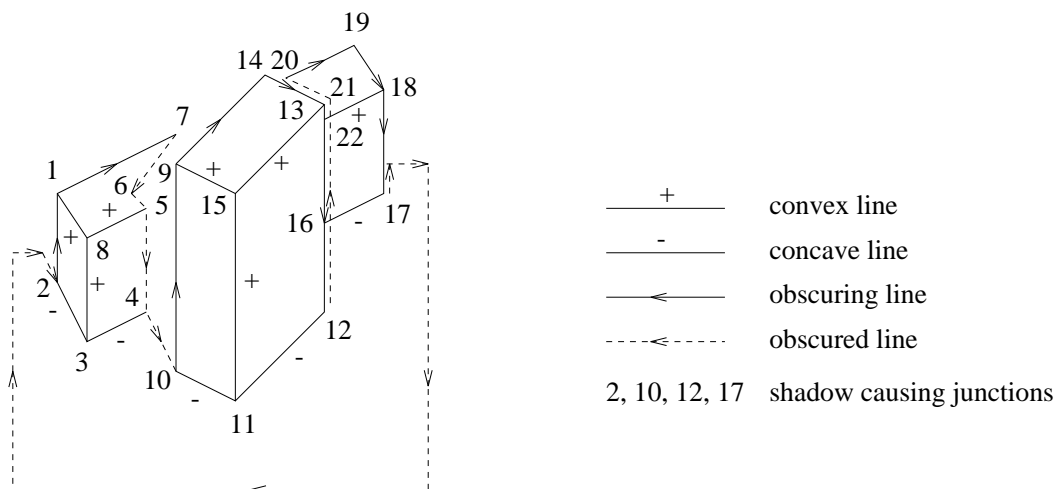


Abbildung 2: Markierte Linienzeichnung nach Sugihara.

Informationen über die Vorhersage von fehlenden Kanten. Das von Sugihara angelegte Verzeichnis enthält die möglichen Knotenkonfigurationen sowie diejenigen unmöglichen Konfigurationen, die durch Hinzufügen einer Kante möglich gemacht werden können. Findet man nun den detektierten Knotentyp im Verzeichnis, kann für *mögliche* Knotentypen abgeleitet werden, welcher Kantentyp in welchem Bildbereich hinzugefügt werden *kann*; für *unmögliche* Knotentypen kann bestimmt werden, ob einer, und falls, welcher Kantentyp in welchem Bildbereich hinzugefügt werden *muss*. Das implementierte System kann fehlende Kanten extrahieren und die Szene in einfache Objekte zerlegen. Es kann auf Szenen mit gekrümmten Oberflächen erweitert werden, lässt aber nur trihedrale Objekte zu.

Neuere Arbeiten über Linienzeichnungen versuchen, die menschliche Interpretation von zweidimensionalen Linienzeichnungen als dreidimensionale Drahtmodelle zu duplizieren [Mar91, FL92]. Das Vorgehen, Minimierung einer einfachen Zielfunktion — definiert durch die Standardabweichung aller Winkel zwischen inzidenten Kanten — ist dabei psychologisch fundiert. Weitere Themen sind, die Entscheidbarkeit der Markierung von Linienzeichnungen — beispielsweise durch das Schema von Huffman–Clowes — effizienter zu realisieren [Kir90] sowie Linienzeichnungen aus Aufnahmen in geschlossenen Räumen (*indoor scenes*) zu erzeugen und zu interpretieren [SCCT92].

Andere Arbeiten beschäftigen sich ausschliesslich mit Tiefenbildern und versuchen, die darin enthaltenen Objekte zu beschreiben. Herman [Her85] stellt Techniken zur Extraktion von vollständigen Polyederbeschreibungen aus Lichtstreifen-Tiefenbildern vor. Die Beschreibungen liegen in Form von 3D-Flächen, Kanten und Ecken sowie ihrer Topologie und Geometrie vor. Die extrahierten Kantenpunkte werden mittels Hough-Transformation durch Geradensegmente approximiert, anschließend verbunden und im Raum analytisch lokalisiert. Aus den Kanten schliesslich

werden die Objektoberflächen generiert.

Gupta und Zhu [GZ91, GZ92] entwickelten einen hybriden Ansatz zur Extraktion von Flächenmodellen (*boundary representations*) aus Polyedern in Tiefenbildern. Ihr Ansatz kombiniert die kanten- mit der regionenbasierten Segmentation, um robustere und zuverlässigere analytische Beschreibungen von Flächen, Kanten und Ecken zu erhalten als bei rein kantenbasierten Ansätzen.

1.3 Lösungsansatz

In diesem Bericht wird ein Verfahren vorgestellt, das auftretende Schattenregionen eliminiert, indem die Schattenkanten interpretiert bzw. klassifiziert werden. Intensitätskanten innerhalb von Schattenregionen werden klassifiziert und gegebenenfalls lokalisiert. Die in der Szene enthaltenen Objekte können anschliessend durch ihre Flächen bzw. Kanten im Raum beschrieben werden. Durch das Eliminieren von nicht-geometrischen Schattenkanten wird die Datenmenge reduziert, was die Effizienz eines anschliessenden Erkennungsschrittes potentiell erhöht. Die klassifizierten Intensitäts- und geometrischen Schattenkanten liefern zusätzliche Informationen über Form und Grösse der sichtbaren Objektflächen.

Das beschriebene Verfahren verwendet als Eingabe Kanten, die in Grauwert- und Tiefenbildern extrahiert und anschliessend integriert wurden. Für die Bestimmung von nicht-geometrischen Schattenkanten wird einerseits die räumliche Position aller Eckpunkte verwendet. Andererseits erfolgt die Interpretation aufgrund von Regeln, die gemäss der Lage der inzidenten Kanten auf die Eckpunkte angewendet werden. In einem ersten Schritt wird ein *attributierter Bildgraph* der Szene erstellt, wobei Kanten- und Knotentypen als Attribute verwendet werden. Durch den Zugriff auf die Abstandswerte wird der Bildgraph im Raum lokalisiert. Die Zerlegung der Graphknoten in *abstandkonsistente Knoten* bewirkt, dass nunmehr alle inzidenten Kanten eines Knotens zur gleichen Objektecke gehören. Die Interpretation der Schatten- und Intensitätskanten erfolgt mithilfe des Raumgraphen in zwei Schritten: (i) Die *Verifizierung von Projektionsstrahlen* erkennt Ecken von Schattenregionen als Schattenprojektionen von Objektecken. (ii) Das *iterative Interpretationsverfahren* interpretiert Schatten- und Intensitätskanten, indem eine kleine Menge von Interpretationsregeln auf die Knoten angewendet wird. Nach dem Löschen der nicht-geometrischen Kanten versucht die *Nachverarbeitung* fehlende Kanten und Ecken zu detektieren, bevor die Darstellung der Objekte durch Flächen bzw. Kanten erfolgt.

Wir beschränken uns auf Polyederszenen, wobei die Szene aus einem oder mehreren komplexen Polyedern besteht sowie Schatten und Verdeckungen auftreten können. Es werden keine besonderen Objektmodelle vorausgesetzt, insbesondere beschränken wir uns nicht auf trihedrale Objekte. *Pathologische Fälle* von Eckenbildung sind erlaubt, eine *allgemeine Position* des Beobachters ist nicht erforderlich. Dies bedeutet, der Beobachter darf koplanar zu einer beliebigen Fläche oder zu einem beliebigen Paar von nichtkollinearen Kanten sein. Die einzige Einschränkung besteht darin, dass sich der Projektor rechts von der Kamera befindet. Beim kodier-

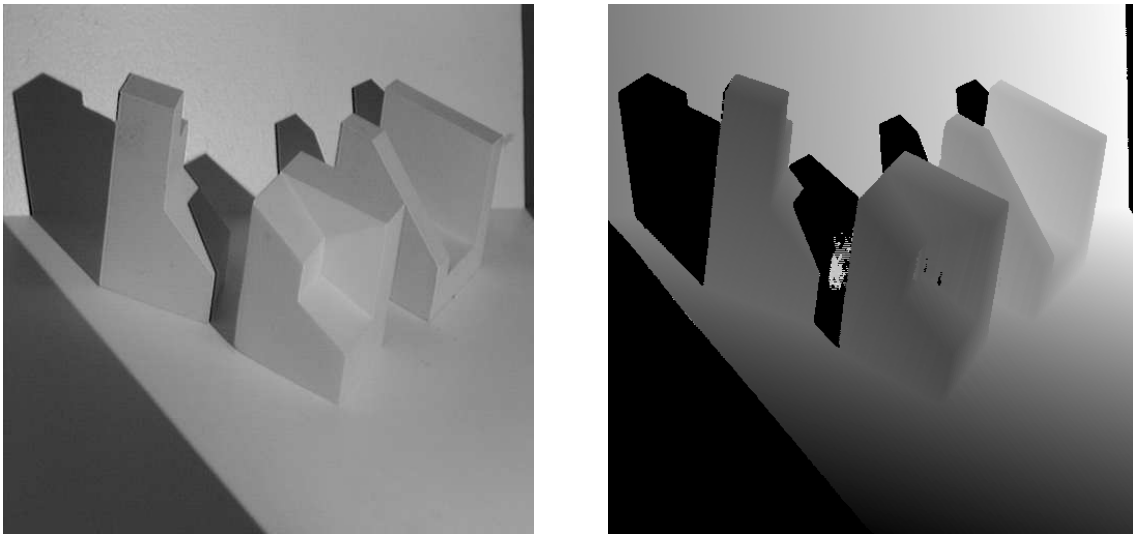


Abbildung 3: Grauwert- und Tiefenbild einer Szene mit drei Polyedern.

ten Lichtverfahren ist die Position von Projektor und Kamera nach der Kalibrierung allerdings stets bekannt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im anschliessenden Abschnitt 1.5 wird die verwendete Datenstruktur vorgestellt. In Kapitel 2 wird die Generierung eines attributierten Bildgraphen der Szene aus den integrierten Kantenzügen beschrieben und in Kapitel 3 die Transformation des Bildgraphen in den Raum. In Kapitel 4 wird die Interpretation der Schatten- und Intensitätskanten behandelt und in Kapitel 5 die Nachverarbeitung der resultierenden Objektgraphen und die Darstellung der Objekte durch Flächen und Kanten beschrieben. Das Verfahren wird an einigen Szenen getestet und die Resultate in Kapitel 6 vorgestellt und besprochen. Kapitel 7 schliesslich beinhaltet eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf weitere Forschungen.

Die einzelnen Schritte der vorliegenden Arbeit werden anhand der gleichen Szene, dargestellt in Abbildung 3, illustriert. Die Szene enthält drei Objekte, die sich teilweise verdecken sowie mehrere Schattengebiete erzeugen.

1.5 Datenstruktur

Die Szene, bzw. die darin enthaltenen Objekte, werden als lineare Liste *EdgeList* vom Integrationsschritt [Rob93] übernommen. Jeder Listeneintrag entspricht einer Kante, die wiederum aus einer Liste von Kantenpunkten besteht. Als Informationen enthalten die Kantenpunkte ihre jeweiligen Bildkoordinaten. *EdgeList* enthält also die gesamte Kantenpunktinformation der Szene.

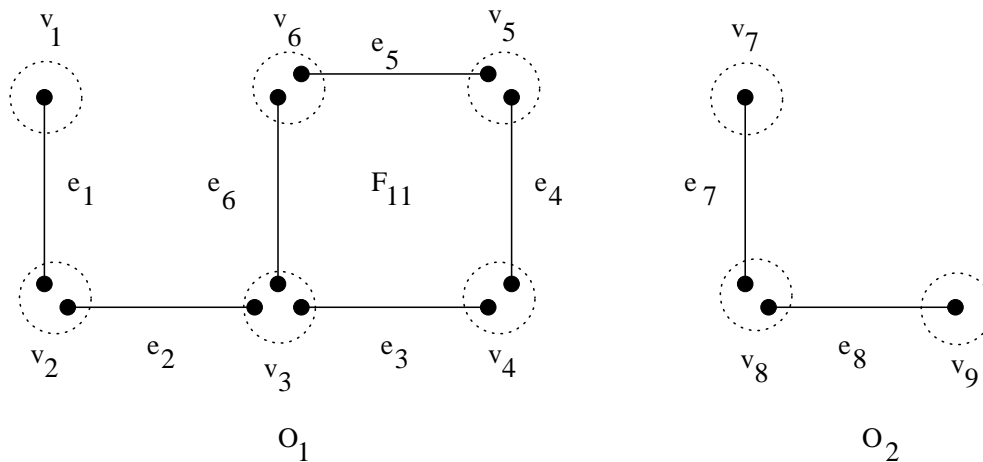


Abbildung 4: Szenenbeschreibung durch einen Bildgraphen.

Um die Objekte als Ecken–Kanten–Graphen darzustellen, müssen einerseits aus den vorhandenen Kanten die Eckpunkte extrahiert, andererseits die Ecken mit den Kanten geeignet verknüpft werden. Soll ausserdem der Graph, aus planaren Linienzeichnungen erzeugt, in den Raum transformiert werden, müssen die räumlichen Informationen in geeigneten Elementen abgespeichert werden. Zu diesem Zweck wurde die Graphstruktur *EdgeVertexGraph* implementiert, die jeweils eine Objekt–, Kanten– sowie Eckenliste enthält, die miteinander verknüpft sind. Jede *Kante* des Graphen besitzt genau zwei Endpunkte und jeder *Eckpunkt* (*Knoten*) besteht aus einem oder mehreren Endpunkten. Jeder Knoten hat deshalb mindestens eine inzidente Kante. Ein *Objekt* besteht in einem zusammenhängenden Graphen aus Flächen (geschlossener Kantenzug) und/oder aus Kantenzügen. Der Szenengraph in Abbildung 4 besteht aus den Objekten O_1 und O_2 , die wiederum aus der Fläche $F_{11} = \text{Kanten } e_3, e_4, e_5, e_6$ und dem Kantenzug e_1, e_2 bzw. dem Kantenzug e_7, e_8 bestehen.

Abbildung 5 illustriert die detaillierte Beschreibung der Datenstruktur des Bildgraphen *EdgeVertexGraph*:

- Jede *Kante* entspricht einem Eintrag in der Kantenliste *GraphEdgeList*. Der Kanteneintrag besteht wiederum aus einer Liste mit genau zwei Elementen, nämlich dem Kantenanfangs– und Kantenendpunkt, welche auf die entsprechenden Elemente in *EdgeList* zeigen. Ausserdem besteht ein Verweis auf den zugehörigen Knoten in jedem Kantenendpunkt. Grösse und Reihenfolge von *GraphEdgeList* entspricht derjenigen von *EdgeList*, weshalb erstere direkt aus der zweiten initialisiert werden kann.
- Jeder *Knoten* entspricht einem Eintrag in der Knotenliste *GraphNodeList*. Jeder Eintrag enthält eine Liste, deren Elemente auf Kante und Endpunkt der inzidenten Kanten verweisen. Die Knotenliste wird erst bei der Generierung des Bildgraphen der Szene erzeugt.

- Die *Szene* besteht aus der Objektliste *GraphObjectList* aller extrahierten Objekte. Jeder Objekteintrag enthält eine Liste aller *Objektflächen* bzw. *Objektkantenzügen*, die wiederum durch eine Liste ihrer begrenzenden Kanten dargestellt werden. Jedes Element in der Liste der begrenzenden Kanten verweist somit auf die entsprechende Kante bzw. den Kantenendpunkt in *GraphEdgeList*.

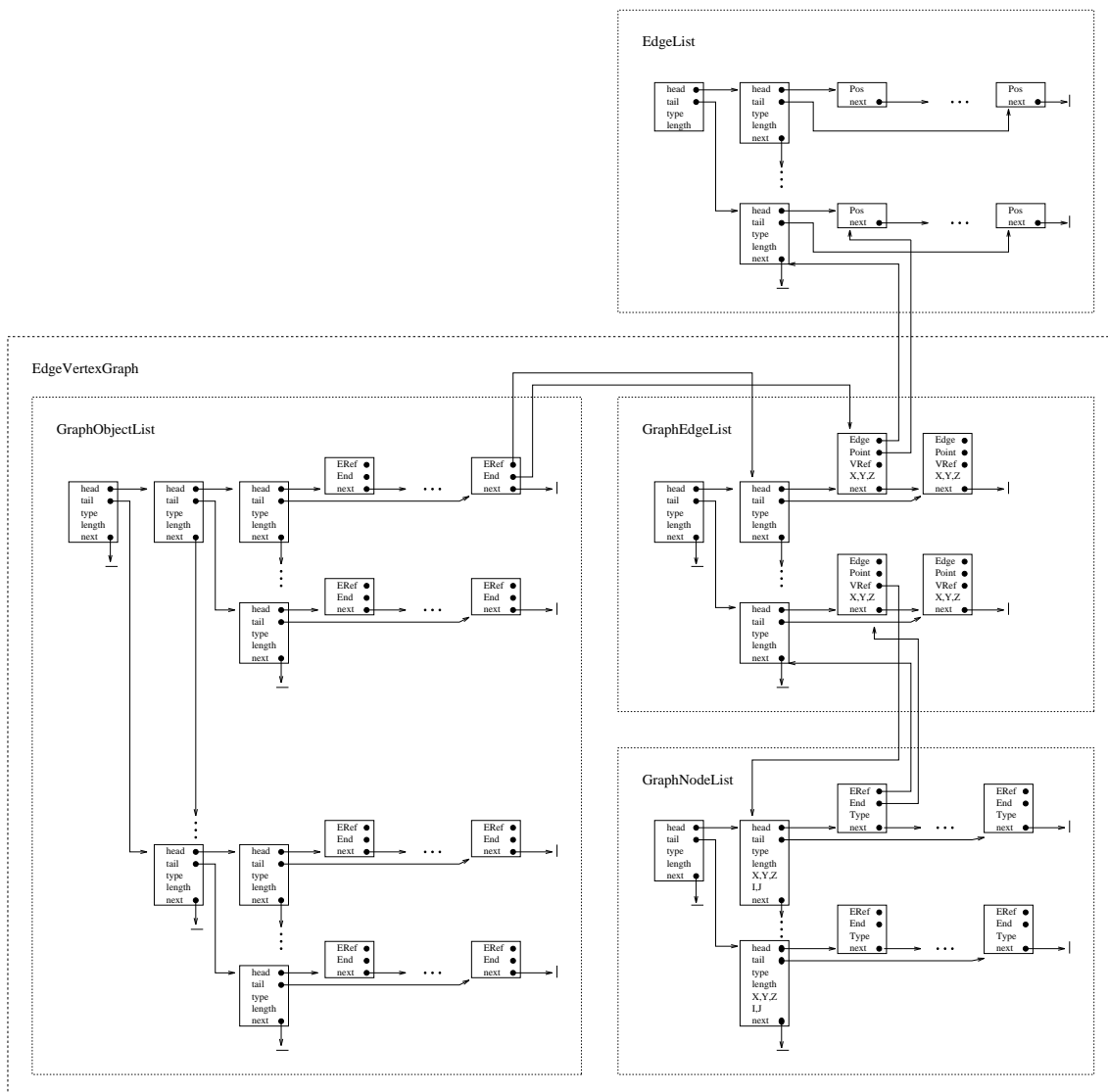


Abbildung 5: Datenstruktur des Bildgraphen *EdgeVertexGraph*.

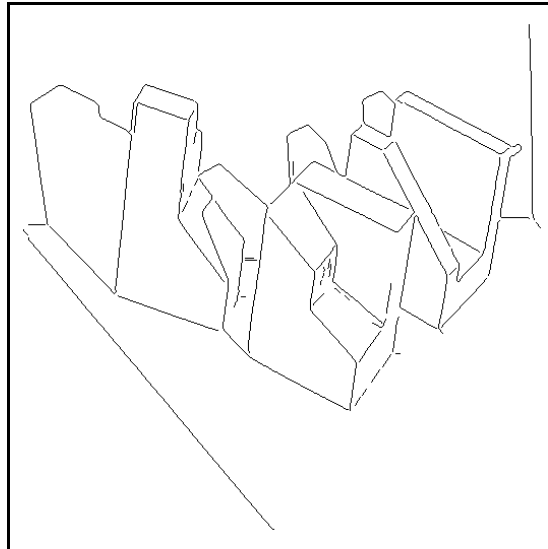


Abbildung 6: Extrahierte und integrierte Kanten.

2 Generierung eines attributierten Bildgraphen

In diesem Kapitel wird ein Verfahren beschrieben, das aus Kantenzügen einen Bildgraphen, wie er in Abschnitt 1.5 beschrieben worden ist, erzeugt. In Abschnitt 2.1 erfolgt die Graphgenerierung durch Eckenextraktion und Kantenverkettung. In Abschnitt 2.2 wird die Attributierung des Bildgraphen durch Knoten- und Kanten-typen vorgestellt.

2.1 Generierung des Bildgraphen

Aus Kantenzügen, wie in Abbildung 6 dargestellt, soll ein Ecken-Kanten-Graph erzeugt werden. Zu diesem Zwecke werden die Eckpunkte in den Linienzeichnungen extrahiert und mit den inzidenten Kanten verkettet. Der ganze Ablauf erfolgt in der Bildebene und besteht aus folgenden vier Schritten, die anhand von Abbildung 7 illustriert werden:

1. Die Kantenzüge der Linienzeichnungen werden durch Geradenapproximation in den Kantenenden verlängert. Vergleiche dazu Abbildung 7(a).
2. Die Kanten bzw. Verlängerungen werden geschnitten, indem jeder Verlängerungspunkt in einer Umgebung auf die Existenz eines Kanten- bzw. Verlängerungspunktes einer anderen Kante hin untersucht wird, wie Abbildung 7(b) illustriert. Wird ein Schnittpunkt gefunden, werden die Kantenummer n und die Kantenposition p der schneidenden sowie der geschnittenen Kante in die Knotenliste aufgenommen. Die Position des Schnittpunktes ist entweder

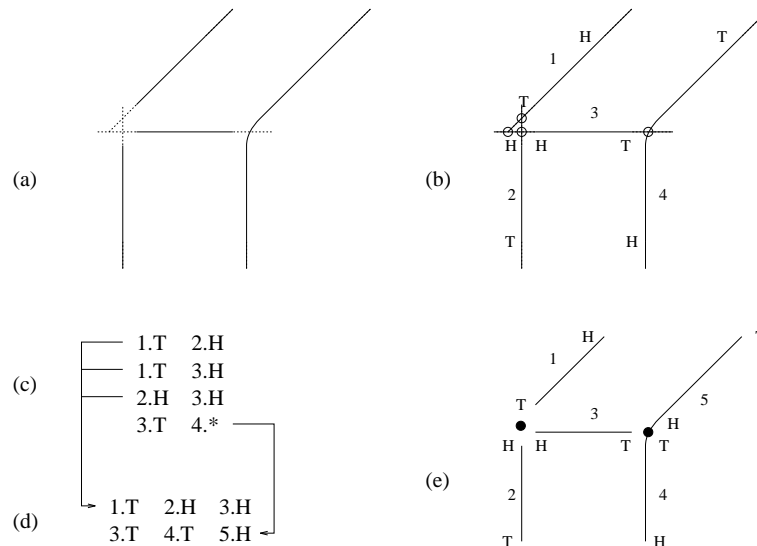


Abbildung 7: Verarbeitungsschritte zur Generierung des Bildgraphen aus Linienzeichnungen.

der Kantenanfang (H), das Kantenende (T) oder das Kanteninnere ($*$). Der Schnittpunkt befindet sich dabei am Kantenende bzw. Kantenanfang, falls er innerhalb einer Toleranz vom Kantenendpunkt entfernt ist, ansonsten liegt er im Kanteninneren. Jeder Listeneintrag $n_1.p_1, n_2.p_2$, wie in Abbildung 7(c) dargestellt, entspricht somit dem Schnittpunkt der Kanten n_1 und n_2 bzw. deren Verlängerungen.

3. Nach dem Aufbau der Knotenliste wird diese so abgeändert, dass alle Schnittpunkte, die dem gleichen Kanteneckpunkt entsprechen, zusammengefasst werden:
 - Der Abstand von je zwei Schnittpunkten wird getestet, indem der Abstand der Endpunkte der inzidenten Kantenendpunkte berechnet wird. Sind zwei Schnittpunkte genügend nahe, werden sie verschmolzen, wie die ersten drei Listeneinträge in Abbildung 7(c).
 - In jedem Schnittpunkt der Form $n.p$ und $n.*$ mit $p \in \{H, T\}$ wird der Eintrag $n.*$ gelöscht.
 - In jedem Schnittpunkt werden die Einträge der Form $n.H$ und $n.T$ gelöscht, da in diesen Fällen sowohl der Anfangs- als auch der Endpunkt der Kante n zum Schnittpunkt gehören.

Anschliessend wird die Kantenliste folgendermassen bereinigt:

- Kanten, die im Innern geschnitten werden, werden in zwei Kanten zerlegt, wie der letzte Listeneintrag in Abbildung 7(c) zeigt. Dabei muss natürlich die Knotenliste entsprechend angepasst werden.

Nun entspricht jeder Listeneintrag $n_1.p_1 \cdots n_N.p_N$ einem Eckpunkt und verweist auf die Position p_i der inzidenten Kante n_i . Die Position des Eckpunktes im Bild wird aus dem Schwerpunkt der inzidenten Kantenendpunkte berechnet, wie Abbildung 7(e) darstellt.

4. Durch die Extraktion der Eckpunkte können Kanten aufgespalten werden, wodurch sich deren Längenverhältnisse ändern. Zusätzliche Eckpunkte werden nun durch Zerlegung der Kanten mittels einem SPLIT-Verfahren, dem *iterative end point curve fitting* [DH73], extrahiert. Die Prozedur wurde aus [Rob93] übernommen, wo sie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben wurde.

Die Schritte 1 – 3 werden zweimal durchgeführt, wobei im ersten Durchgang alle Kanten in beiden Endpunkten verlängert werden. Im zweiten Durchgang werden die Kanten nur in denjenigen Endpunkten verlängert, welche noch keinen Schnittpunkt mit einer anderen Kante gebildet haben.

Abbildung 8 stellt das Resultat der Bildgraphgenerierung aus den Kantenzügen von Abbildung 6 dar. Die extrahierten Eckpunkte wurden durch Kreise markiert. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Kleine Lücken in den extrahierten Kanten werden durch die Methode der Kantenexpansion geschlossen.
- Trotz Aufspalten von geschnittenen Kanten und SPLIT-Verfahren können Eckpunkte nichtdetektiert bleiben. Im Falle der fehlenden Ecken im linken Schattengebiet in Abbildung 8 sind diese Eckpunkte aber geometrisch nicht von Bedeutung.

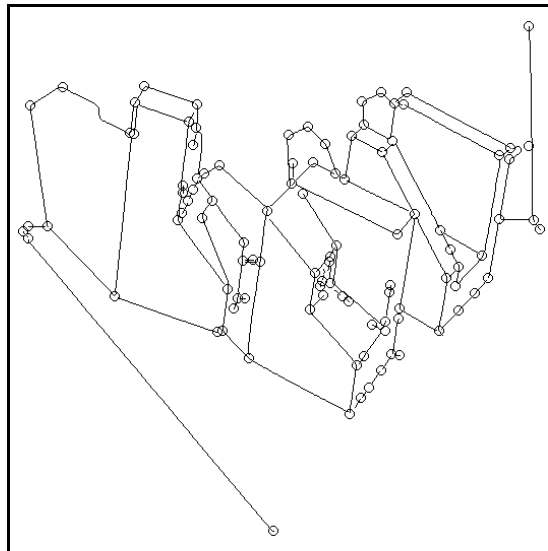


Abbildung 8: Eckenextraktion aus integrierten Kantenzügen.

2.2 Attributierung des Bildgraphen

Der Bildgraph, der aus den Linienzeichnungen gemäss Abschnitt 2.1 erzeugt wurde, wird nun durch seine Kanten- und Knotentypen attribuiert.

2.2.1 Klassifizierung der Kanten

Die Klassifizierung von Kanten, die aus Grauwert- und Tiefenbildern extrahiert und integriert wurden, kann direkt aus den Abstandswerten des Tiefenbildes erfolgen. In Bildern, die durch das kodierte Lichtverfahren erzeugt wurden, lassen sich die Kanten in *geometrisch* und *nicht-geometrisch* unterteilen. Geometrische Kanten bilden den Übergang von einer Objektfläche zur benachbarten. Wir unterscheiden fünf Typen von geometrischen Kanten: *Sprungkanten* (*jump*, "j") treten beim Übergang von einer Objektfläche zu einer dahinterliegenden auf, die Tiefenwerte erfahren beim Übergang eine grosse Änderung. Schneiden sich zwei Objektflächen in einer gemeinsamen Kante, spricht man von einer *Schnittkante* (*roof*). Je nach Zwischenwinkel der adjazenten Oberflächennormalen handelt es sich um eine *konvexe* (*convex*, "x") oder *konkave* (*concave*, "v") Schnittkante. Objektkanten, die ein Schattengebiet begrenzen, werden *geometrische Schattenkanten* (*shadow*, "s") genannt. *Intensitätskanten* (*intensity*, "i") können nur in Grauwertbildern detektiert werden, da sie innerhalb von Schattenregionen liegen und daher keine Klassifizierung möglich ist.

Nicht-geometrische Kanten sind entweder *nicht-geometrische Schattenkanten* (*shadow*, "s"), die durch die Schattenprojektion von Objektkanten gebildet werden oder *Falschkanten* (*noedge*, "n"), welche aufgrund von Störungen, Rissen oder Textur entstehen. Für die Klassifizierung wird das von [Rob93] in Abschnitt 3.2.5 beschriebene Verfahren übernommen, das Punkte auf der Kantenmittelnormalen im Raum analysiert.

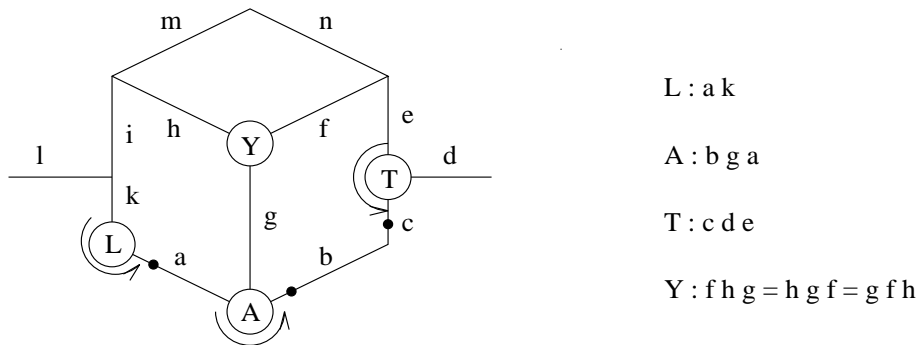


Abbildung 9: Knotenklassifizierung und Kantenreihenfolge.

2.2.2 Klassifizierung der Knoten

Jeder Knoten im Bildgraphen wird aufgrund seines *Grades* (Anzahl inzidenter Kanten) sowie des *maximalen Zwischenwinkels* klassifiziert. Tabelle 1 stellt die zehn Knotentypen vor, wobei lediglich Knoten bis zum Grad vier definiert wurden. Diese Klassifizierung genügt, da bei der Generierung von abstandskonsistenten Graphknoten in Abschnitt 3.2 die Knoten so aufgespalten werden, dass alle inzidenten Kanten zum gleichen Objektpunkt gehören.

Das Verfahren zur Knotenklassifizierung approximiert in den Knoten die Endpunkte der inzidenten Kanten durch Geraden und berechnet deren Zwischenwinkel in der Bildebene. Der maximale Zwischenwinkel φ_{max} wird bis auf eine Toleranz in *größer*, *kleiner* oder *gleich* 180° eingeteilt. Die inzidenten Kanten in jedem Knoten werden im *positiven Drehsinn*, d.h. im Gegenuhrzeigersinn, in der Datenstruktur sortiert. Dadurch lassen sich bei Graphtraversierungen leicht die Nachfolgekanten bestimmen. Die Knoten vom Typ *L*, *A*, *T*, *F* und *K* erhalten durch den eindeutig bestimmten maximalen Zwischenwinkel $\varphi_{max} \geq 180^\circ$ ein ausgezeichnetes Element: Die erste Kante in positiver Richtung nach φ_{max} bildet auf natürliche Weise das erste Element in der Datenstruktur. Abbildung 9 illustriert Knoten vom Typ *L*, *A*, *T* sowie *Y* und die Reihenfolge der inzidenten Kanten an einem einfachen Beispiel. Die maximalen Zwischenwinkel φ_{max} sind dabei beim *L*-, *A*- und *T*-Knoten durch einen gerichteten Bogen markiert.










Knotentyp		Knotengrad	max. Zwischenwinkel
I		1	
L		2	$> 180^\circ$
M		2	$= 180^\circ$
A		3	$> 180^\circ$
T		3	$= 180^\circ$
Y		3	$< 180^\circ$
F		4	$> 180^\circ$
K		4	$= 180^\circ$
X		4	$< 180^\circ$
*		> 4	

Tabelle 1: Knotentypen.

2.2.3 Nachverarbeitung des Graphen

Nach der Attributierung des Bildgraphen lassen sich einige offensichtlich überflüssigen Ecken und Kanten eliminieren:

- Ecken mit genau zwei inzidenten Kanten, deren Zwischenwinkel 180° beträgt (*M-Knoten*), werden gelöscht¹.
- Parallele Kanten, d.h. inzidente Kanten mit einem sehr kleinen Zwischenwinkel, werden zu einer Kante zusammengefasst, falls
 - beide Kanten in den gleichen Knoten starten und enden und der Abstand zwischen den Kanten kleiner als eine Schranke ist oder
 - beide Kanten im gleichen Knoten starten und mindestens ein Kantenendpunkt vom Grad eins (*I-Knoten*) ist.

Das Zusammenfassen der parallelen Kanten erfolgt dabei durch Löschen einer Kante, auf die zuerst eines der folgenden Kriterien zutrifft:

- Die Kante ist vom Typ *noedge*.
- Die Kante ist kürzer als die verbleibende.

Abbildung 10 stellt den nachverarbeiteten Graphen aus Abbildung 8 mit klassifizierten Knoten dar.

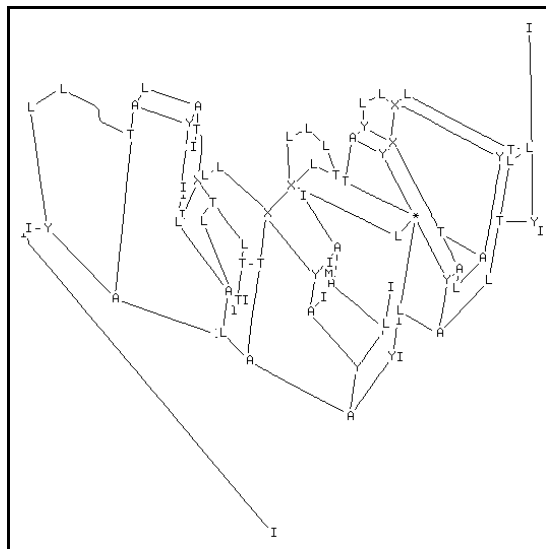


Abbildung 10: Nachverarbeiteter Graph mit klassifizierten Knoten.

¹Jedes Löschen bzw. Einfügen eines Knoten in die Knotenliste erfordert natürlich entsprechende Anpassungen in der Kantenliste.

3 Generierung des Raumgraphen

Die Lage der Graphknoten liegt bisher nur in der Bildebene vor. Dieses Kapitel beinhaltet die Lokalisierung des Bildgraphen im Raum, die Generierung des Raumgraphen. Die Transformation von der Bildebene in den Raum erfolgt mit Hilfe der Abstandsdaten aus dem Tiefenbild.

In Abschnitt 3.1 wird die *Lokalisierung* der Objektecken und der Kantenendpunkte im Raum beschrieben, während in Abschnitt 3.2 die *Zerlegung in abstandskonsistente Knoten* — die Trennung von verdeckenden und verdeckten Objektteilen — durchgeführt wird. Abschliessend dokumentiert Abschnitt 3.3 die *Korrektur von Knoten vom Grad eins*.

3.1 Lokalisierung der Objektecken und Kantenendpunkte im Raum

In einem Tiefenbild kann jeder Bildpunkt (x_b, y_b, z_b) , der nicht im Schattengebiet liegt, mit den nachfolgenden Formeln direkt in die Weltkoordinaten (x_0, y_0, z_0) umgerechnet werden:

$$x_0 = \frac{(x_b - HB)(offset + \frac{z_b}{scal})}{|f_k|} \quad (1)$$

$$y_0 = \frac{(HH - y_b)(offset + \frac{z_b}{scal})}{|f_k| \cdot c} \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{MTW - z_b}{scal} \quad (3)$$

Die Werte *offset*, *scal*, *c* und f_k stammen aus der Kalibrierungsdatei des Tiefensensors [ABWa, ABWb], die halbe Bildbreite *HB*, die halbe Bildhöhe *HH* und der maximale Tiefenwert *MTW* betragen in unserem Falle jeweils 255. In unserem Weltkoordinatensystem wurde die *z*-Achse von der hinteren Arbeitsbereichsbegrenzung in Richtung zur Kamera festgelegt. Das heisst, der grösste Tiefenwert entspricht dem kleinsten Abstand von der Kamera.

Da eine Kante der Trennlinie zwischen Objekt- bzw. Hintergrundflächen entspricht, muss festgelegt werden, zu welcher Fläche die Kantenpunkte gehören, d.h. von welcher Fläche die Tiefenwerte übernommen werden. Die Lokalisierung der Kantenpunkte wurde so definiert, dass der Tiefenwert z_0^* dem Abstand der näher der Kamera liegenden Fläche entspricht. Aufgrund unterschiedlicher Kantendetektionsverfahren, Ungenauigkeiten in der Berechnung der Knotenpunkte sowie Störungen in den Tiefendaten sollte der Tiefenwert z_0^* nicht direkt aus dem Tiefenbild gelesen, sondern aus einer Umgebung berechnet werden. Die Weltkoordinaten (x_0^*, y_0^*, z_0^*) an der Bildposition (x_b, y_b) lassen sich mit dem approximierten Tiefenwert z_0^* folgendermassen interpolieren:

$$x_0^* = \frac{(x_b - HB)(offset + \frac{MTW}{scal} - z_0^*)}{|f_k|} \quad (4)$$

$$y_0^* = \frac{(HH - y_b)(offset + \frac{MTW}{scal} - z_0^*)}{|f_k| \cdot c} \quad (5)$$

Die Weltkoordinaten (x_0^*, y_0^*, z_0^*) eines Kantenpunktes mit den Bildkoordinaten (x_b, y_b) werden mit Hilfe der Interpolation wie folgt bestimmt.

1. In einer Umgebung U um (x_b, y_b) wird im Tiefenbild der beste zugehörige Tiefenwert z_0^* approximiert. Beispielsweise kann z_0^* aus dem Maximum aller z_0 , die an der Stelle $(x_b, y_b, z_b) \in U$ mittels (3) berechnet wurden, bestimmt werden.
2. Die übrigen Weltkoordinatenkomponenten (x_0^*, y_0^*) werden an der Bildposition (x_b, y_b) mit dem Tiefenwert z_0^* mittels (4) und (5) interpoliert.

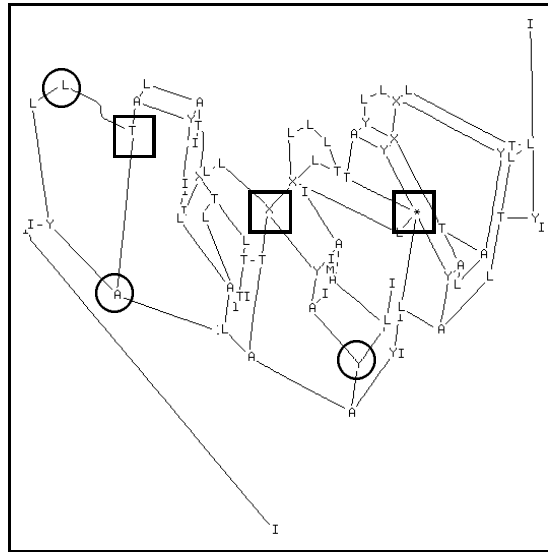


Abbildung 11: Zugehörigkeit von Kantenendpunkten zu Objektecken.

Betrachten wir Abbildung 11, so lassen sich zwei Arten von Knoten unterscheiden:

- Alle inzidenten Kanten münden in den gleichen Objekteckpunkt. Die zugehörigen Kantenendpunkte besitzen folglich identische Weltkoordinaten.
- Nur ein Teil der inzidenten Kanten gehört zum gleichen Objekteckpunkt und besitzt identische Weltkoordinaten in den Eckpunkten. Die restlichen Kanten liegen auf dahinterliegenden Flächen mit anderen Weltkoordinaten in den Kantenendpunkten.

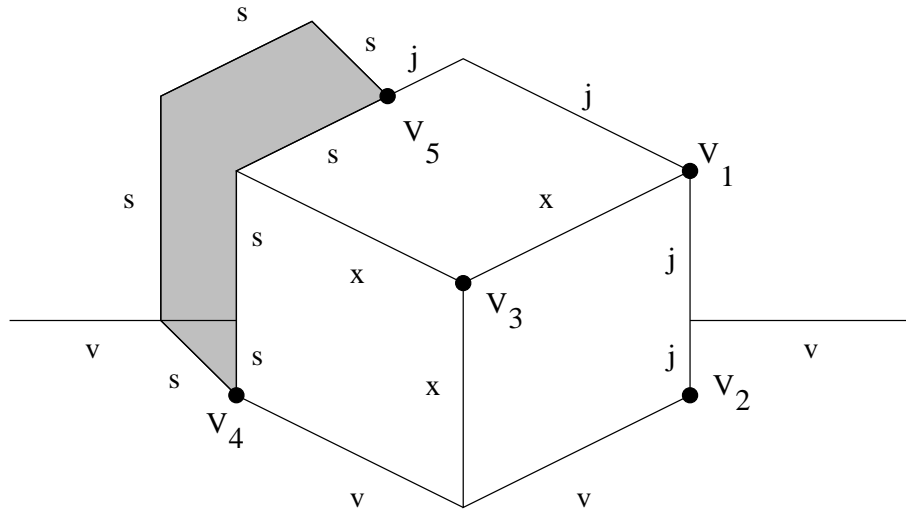


Abbildung 12: Zugehörigkeit von Kantenendpunkten zu Vorder- und Hintergrund.

A priori ist unbekannt, von welcher Art die Knoten sind. Obwohl T-Knoten oft auf Verdeckungen hinweisen, können diese auch zum Typ \bigcirc gehören, da keine *allgemeine Position* des Beobachters gefordert ist. Gemäss den Voraussetzungen in Abschnitt 1.3 sind auch *pathologische Fälle* von Knotenbildung erlaubt, die sich durch einen höheren Knotengrad auszeichnen. Allerdings besitzen auch nichttrihedrale Objekte Knoten vom Typ \bigcirc mit Grad > 3 .

In den Bildgraphen müssen also einerseits die Kantenendpunkte lokalisiert werden, deuten sie doch auf ihre Flächenzugehörigkeit hin. Andererseits wird die Objektecke durch den maximalen Tiefenwert der inzidenten Kantenendpunkte lokalisiert. Die Lokalisierung der Kantenendpunkte kann auf folgende Arten erfolgen:

- Kantenpunkte, die genügend weit vom Kantenende entfernt sind, werden lokalisiert und daraus die Kantenendpunkte interpoliert. Diese Methode hat sich bei der Implementierung als zu ungenau erwiesen, da die Punkte im Raum lokalisiert werden und inzidente Kantenendpunkte zu grosse Abweichungen in der Objektecke aufwiesen.
- Aufgrund der Anzahl inzidenter Kanten vom Typ *shadow* und *jump* in einem Knoten lässt sich die Anzahl Vorder- und Hintergrundebenen ableiten. Besitzt jede Vorder- bzw. Hintergrundfläche in einer Umgebung um den Knoten etwa konstante Tiefenwerte, so können die Tiefenwerte der einzelnen Flächen durch Zusammenfassen (*Clustering*) bestimmt werden.

Im folgenden wird kurz die zweite Methode vorgestellt. Die erwartete Anzahl Cluster *NumCluster* wird aus der Anzahl der inzidenten Kanten vom Typ *shadow* und *jump* abgeleitet. Abbildung 12 illustriert eine einfache Szene. Die abgeleitete Anzahl Cluster dieses Beispiels ist in Tabelle 2 dargestellt. Ergänzt man nun die Tabelle

NumCluster		# jump			
		0	1	2	3
# shadow	0	1	1	2	
	1				
	2	1	2		
	3				

Tabelle 2: Anzahl Cluster aus Abbildung.

NumCluster		# jump			
		0	1	2	3
# shadow	0	1	2	3	4
	1	1	2		
	2	2	2		
	3	2			

Tabelle 3: Bestimmung der Anzahl Cluster.

mit den restlichen denkbaren Fällen und erhöht die Anzahl Cluster in der Tabelle wo nichtdetektierte Kanten im Kantenbild zu einem zu kleinen *NumCluster* führen würde, erhält man die Werte in Tabelle 3. Wie wir sehen werden, korrigiert sich ein zu hoher Wert für *NumCluster* durch den iterativen Clustering-Algorithmus von selbst. Die Lokalisierung jeder Objektecke P sowie die Endpunkte der inzidenten Kanten gestaltet sich folgendermassen:

Die erwartete Anzahl Cluster *NumCluster* im Knoten P wird aufgrund der Schatten- und Sprungkanten gemäss Tabelle 3 hergeleitet.

- Ist *NumCluster* = 1, der Knoten also vom Typ \bigcirc , wird der Tiefenwert z_0^* durch *Mittelung* approximiert:
 1. Innerhalb einer Umgebung U um P werden die Nichtschatten-Tiefenwerte gemittelt z_0 und die übrigen Weltkoordinatenwerte (x_0^*, y_0^*) gemäss (4) und (5) interpoliert.
 2. Diese Weltkoordinaten werden sowohl der Objektecke als auch den Kantenendpunkten aller inzidenten Kanten in P zugewiesen, die keine Intensitätskanten sind.
- Ist *NumCluster* > 1, der Knoten also vom Typ \square , wird der Tiefenwert durch *Clustering* approximiert:
 1. Innerhalb einer Umgebung U um P werden die Nichtschatten-Tiefenwerte nach der *complete linkage*² Clustering-Methode in *NumCluster* Gruppen zerlegt.
 2. Falls die Durchschnitte der Clusterwerte zu wenig stark voneinander abweichen, wird mit einem dekrementierten *NumCluster* iterativ geclustert, bis die Abweichungen genug gross sind.

²Die *complete linkage* oder *furthest neighbour* Clustering-Methode [Eve93] fasst iterativ die sich am nächsten befindlichen Gruppen (Cluster) zusammen, bis die minimale Anzahl Gruppen oder ein maximaler Abstand erreicht wurde. Als Abstand zwischen zwei Gruppen wird die *grösste* Distanz aller Paare von Elementen aus je einer dieser beiden Gruppen definiert.

3. Ist nun $NumCluster = 1$, der Knoten also vom Typ \bigcirc , wird der Tiefenwert durch *Mittelung* — wie oben beschrieben — approximiert.
4. Ist nun $NumCluster > 1$, der Knoten also vom Typ \square , entspricht jeder Cluster einer anderen Oberflächenebene innerhalb der Umgebung um P :
 - (a) Die Weltkoordinaten der Objektecke berechnen sich aus dem maximalen Clusterdurchschnitt als approximiertem Tiefenwert z_0^* sowie Interpolation der übrigen Weltkoordinatenwerte (x_0^*, y_0^*) gemäss (4) und (5).
 - (b) Die Weltkoordinaten aller Kantenendpunkte berechnen sich aus den Tiefenwerten, indem auf jeder Kante (ausser den Intensitätskanten) lokal der maximale Tiefenwert bestimmt und mit den Clusterdurchschnitten C_i verglichen wird. Der Tiefenwert z_0^* wird durch C_i mit der geringsten Abweichung approximiert, die übrigen Weltkoordinatenwerte (x_0^*, y_0^*) werden wiederum gemäss (4) und (5) interpoliert.

3.2 Generierung von abstandskonsistenten Graphknoten

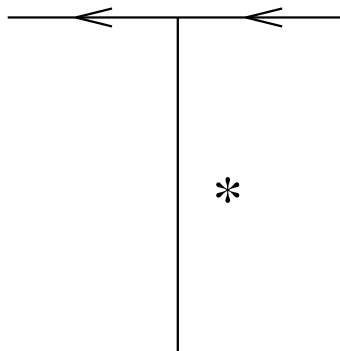


Abbildung 13: Mögliche Klassifizierung eines Knotens vom Typ T .

Wie bereits bei der Analyse von Grauwertbildern festgestellt wurde, entsprechen Knoten vom Typ T bei *trihedralen Objekten in allgemeiner Position* nicht einer dreidimensionalen Objektecke, sondern entstehen nur, wenn eine Kante eine andere teilweise verdeckt. Dabei gehören die beiden kollinearen Linien zur *verdeckenden* Kante und die dritte Linie zur *verdeckten*. Bei der Interpretation von Linienzeichnungen wird ein T -Knoten gemäss Sugihara [Sug86] wie in Abbildung 13 klassifiziert, wobei die verdeckenden Kanten vom Typ *jump* sind und der Stern (*) eine beliebige Kantenklassifizierung bedeutet.

In unseren Szenen, die nicht ausschliesslich trihedrale Objekte enthalten, können auch *pathologische* Fälle auftreten, d.h. Objektecken schneiden dahinterliegende Objekt- oder Schattenkanten und erzeugen einen neuen Knotentyp. Ausserdem können nichtdetektierte Kanten ebenfalls zu einer falschen Knotenklassifizierung

führen. Da keine *allgemeine Position* gefordert wird, erscheinen trihedrale Ecken, die eine Oberfläche koplanar zum Beobachter besitzen, ebenfalls als T -Knoten. In diesem Falle darf der Knoten jedoch nicht zerlegt werden. Durch den Vergleich des Tiefenwertes einer Objektecke mit den Tiefenwerten der Endpunkte der inzidenten Kanten kann die Zugehörigkeit zu Vorder- bzw. Hintergrundebenen festgestellt werden. Aufgrund der Tiefenwerte ist es deshalb möglich, *abstandskonsistente Kantenendpunkte* zu Knoten zusammenzufassen, die geometrischen Objektecken entsprechen. Von der Zerlegung in abstandskonsistente Knoten werden einzig *Intensitätskanten* ausgenommen. Da sie keine Tiefeninformationen enthalten, lassen sie sich nicht in Vordergrund und Hintergrund einteilen. Ihre Inzidenz zum Knoten bleibt in diesem Schritt bestehen und wird auf der Interpretationsstufe verwendet.

Anschliessend an die Zerlegung in abstandskonsistente Knoten wird der zerlegte Knoten neu klassifiziert. Handelt es sich dabei neu um einen M -Knoten mit inzidenten Kanten vom gleichen Typ, wird der Knoten gelöscht, d.h. die inzidenten Kanten verschmolzen. Das implementierte Verfahren zur Generierung von abstandskonsistenten Graphknoten besteht aus folgenden Schritten:

GENERIERUNG VON ABSTANDKONSISTENTEN GRAPHKNOTEN
<ol style="list-style-type: none"> 1. Verarbeite den Knoten V aus der Knotenliste: <ol style="list-style-type: none"> (a) Fasse alle Kantenendpunkte, deren Tiefenwerte mehr als eine Toleranz T vom Tiefenwert der Objektecke abweichen, als neuen Knoten W zusammen. (b) Bestimme den Knotentyp von W und definiere die Weltkoordinaten des Kantenendpunktes mit dem maximalen Tiefenwert als die Weltkoordinaten der Objektecke. Füge W an den Schluss der Knotenliste. (c) Bestimme den neuen Knotentyp von V. Ist V ein M-Knoten und sind die inzidenten Kanten vom gleichen Typ, wird V gelöscht. 2. Bestimme den nächsten Knoten V in der Knotenliste und verarbeite ihn gemäss Schritt 1.

Kanten, die auf dahinterliegenden Oberflächen liegen, werden im Schritt (a) vom Knoten V abgespalten und als neuer Knoten W an die Knotenliste angefügt. Da die Knotenliste sequentiell verarbeitet wird, erfolgt die Behandlung von Knoten W am Schluss. Ein Knoten kann also mehrmals zerlegt werden, bis alle inzidenten Kanten abstandskonsistent sind.

Abbildung 14 (oben) illustriert die Kanten und Knotentypen der Referenzszenen vor der Konsistenzprüfung. Abbildung 14 (unten) stellt die Objekthecken nach der Zerlegung in abstandskonsistente Knoten dar. Dabei werden die berechneten Weltkoordinaten der Objekthecken von MAPLE im Raum dargestellt und die Kanten durch Verbinden der Objekthecken approximiert. Zur besseren Darstellung wurde die Szene ausserdem leicht gekippt. Folgende Fälle von Knotenbildung wurden in der Abbildung markiert:

- T -Knoten bei Verdeckung.
- Pathologischer Fall von Knotenbildung.
- △ Fehlende Kante in T -Knoten.

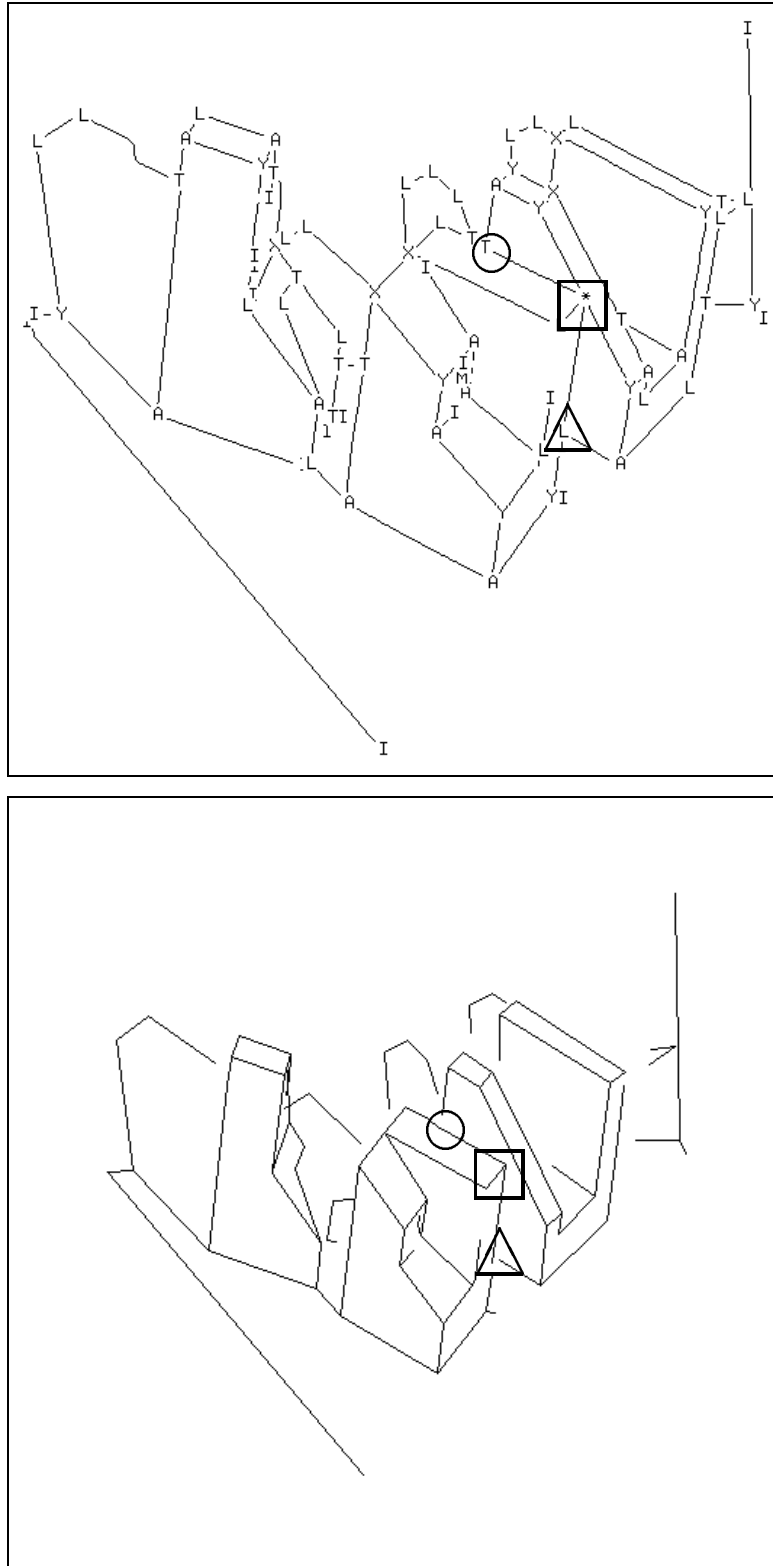


Abbildung 14: Zerlegung der Graphknoten in abstandskonsistente Knoten.

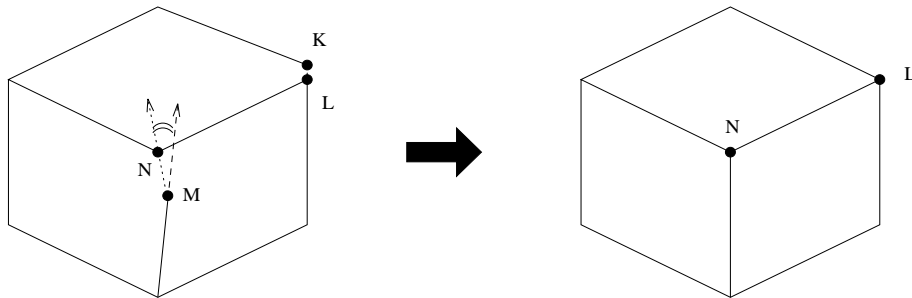


Abbildung 15: Korrektur von Kanten mit I -Knoten.

3.3 Verarbeitung von I -Knoten

Abstandskonsistente Knoten vom Grad eins können auftreten, wenn eine Kante *nicht vollständig detektiert* oder *teilweise verdeckt* wird oder es sich um eine *Störung* handelt. Eine umfassendere Nachverarbeitung der Kanten soll in Abschnitt 5.1 beschrieben werden. In diesem Abschnitt wird lediglich die Verarbeitung *nicht vollständig detektierter Kanten mit kurzen Lücken* soweit beschrieben, dass die korrigierten Knotentypen zuverlässiger interpretiert werden können. Es werden dabei folgende zwei Fälle behandelt und in Abbildung 15 illustriert:

1. Jeder I -Knoten K , der weniger als eine 3D-Distanz T_{Dist1} von einer Objektecke L entfernt ist, gehört zu L . Dieser Fall wird nur untersucht, wenn beide Knoten K und L im Raum lokalisiert sind.
2. Jeder I -Knoten M , der weniger als eine Distanz T_{Dist2} von einer Objektecke oder einem I -Knoten N entfernt ist und dessen Richtungsabweichung von der approximierten Verlängerung weniger als ein Winkel T_{phi} beträgt, wird mit N verschmolzen. Sind beide Knoten M und N im Raum lokalisiert, erfolgt der Vergleich mit einer 3D-Distanz T_{Dist2} im Raum, ansonsten mit einer 2D-Distanz T_{Dist2} in der Bildebene.

4 Interpretation von Schatten- und Intensitätskanten

In diesem Kapitel wird ein Verfahren vorgestellt, das in einem attribuierten Raumgraphen einer Szene die Schatten- und Intensitätskanten interpretiert und klassifiziert. Der Raumgraph wurde aus Linienzeichnungen gemäss den Kapiteln 2 und 3 erzeugt und besitzt abstandskonsistente Knoten. Als Attribute werden sowohl die Kanten- als auch die Knotentypen verwendet. Die *Interpretation* besteht aus zwei Schritten, die unabhängig voneinander ausgeführt werden können: In Abschnitt 4.1 wird die *Verifizierung von Schattenprojektionen*, in Abschnitt 4.2 das *iterative Interpretationsverfahren* beschrieben. Abschnitt 4.3 schliesslich behandelt die *Lokalisierung* der interpretierten Intensitätskanten.

4.1 Verifizierung von Schattenprojektionen

Wird ein Objekt von einer Lichtquelle beleuchtet, erzeugt das Objekt eine Schattenregion. Eine Objektecke mit inzidenten schattenerzeugenden Objektkanten projiziert dabei einen *Schattenknoten* mit genau zwei inzidenten nicht-geometrischen Schattenkanten. Da die Linienzeichnungen der Szene als Raumgraph vorliegen, sind die Knoten mit inzidenten Schattenkanten im Raum lokalisiert. Ist die Position des Projektors bekannt, lässt sich der Projektionsstrahl *Schattenknoten*←*Objektecke*←*Projektor* berechnen. Bilden andererseits die Verbindungen *Objektecke*←*Projektor* und *Schattenknoten*←*Objektecke* eine Gerade, kann der Schattenknoten als Schattenprojektion interpretiert werden. Die zum Schattenknoten inzidenten Schattenkanten werden in diesem Falle als *nicht-geometrische Kanten* interpretiert und entsprechend markiert.

4.1.1 Position des Projektors

Projektor und Kamera werden beim *kodierten Lichtverfahren* so kalibriert, dass die vom Projektor gesendeten und von der Kamera empfangenen Lichtstreifenmuster parallel zur *y*-Achse — also senkrecht — ausgerichtet sind. Die Kalibrierungsdatei liefert für jede Kalibrierung die *x*- und *z*-Koordinaten des Projektorbrennpunktes bezüglich dem Kamerakoordinatensystem [ABWb]. Da wir die Tiefenwerte *z* jeweils so umrechnen, dass sie den Abstand *z'* von der hinteren Arbeitsbereichsgrenze angeben, muss auch die *z*-Koordinate des Projektors transformiert werden:

$$z'_P = \frac{255}{scal} - z_P + offset. \quad (6)$$

Da der Projektor senkrechte Lichtstreifen sendet und der Abstand zwischen Projektor und Arbeitsbereich viel grösser ist als der Arbeitsbereich, wird für die Verifizierung eine horizontale Beleuchtung angenommen. Aufgrund dieser vereinfachenden Annahme lassen sich folgende Bedingungen für einen Projektionsstrahl formulieren:

1. Die Objektecke und der projizierte Schattenknoten müssen *identische* vertikale Komponenten sowohl in *Bild-* als auch in *Weltkoordinaten* besitzen. Das heisst, $V_i = W_i$ und $V_y = W_y$.
2. Die Objektecke befindet sich *auf* dem Projektionsstrahl und *zwischen* Projektor und Schattenknoten. Der Projektionsstrahl wird durch x - und z -Koordinaten definiert, als Mass für seine Kollinearität wird der Zwischenwinkel ϕ zwischen den Geraden *Objektecke—Schattenknoten* und *Objektecke—Projektor* definiert.

4.1.2 Verfahren zur Verifizierung von Schattenprojektionen

Mit der Projektorposition und den beiden erwähnten Bedingungen wurde das Verfahren zur Verifizierung von Schattenprojektionen folgendermassen implementiert:

VERIFIZIERUNG VON SCHATTENPROJEKTIONEN
<ol style="list-style-type: none"> 1. Betrachte Knoten V aus der Knotenliste als Objektecke <ol style="list-style-type: none"> (a) Betrachte jeden L-Knoten $W \neq V$ aus der Knotenliste als Schattenknoten <p style="margin-left: 20px;">IF (Bildkoordinatendifferenz $V_i - W_i < T_i$) \wedge (Weltkoordinatendifferenz $V_y - W_y < T_y$) \wedge (Zwischenwinkel $\phi < T_{phi}$)</p> <p style="margin-left: 20px;">THEN Speichere W und ϕ als mögliche Projektion von V</p> (b) Suche Knoten W^* mit minimalem Zwischenwinkel ϕ (c) W^* ist Projektion von V: Interpretiere die inzidenten Kanten als <i>nicht-geometrisch</i> 2. Bestimme den nächsten Knoten V in der Knotenliste und verarbeite ihn gemäss Schritt 1.

Abbildung 16 stellt das Resultat der Verifizierung der Schattenprojektionen dar. Die verifizierten Projektionslinien zwischen Objektecken und Schattenknoten sowie die inzidenten, als *nicht-geometrisch* interpretierten Kanten sind grau eingefärbt worden. Durch dieses Verfahren kann bereits ein grosser Teil der nicht-geometrischen Schattenkanten interpretiert und markiert werden.

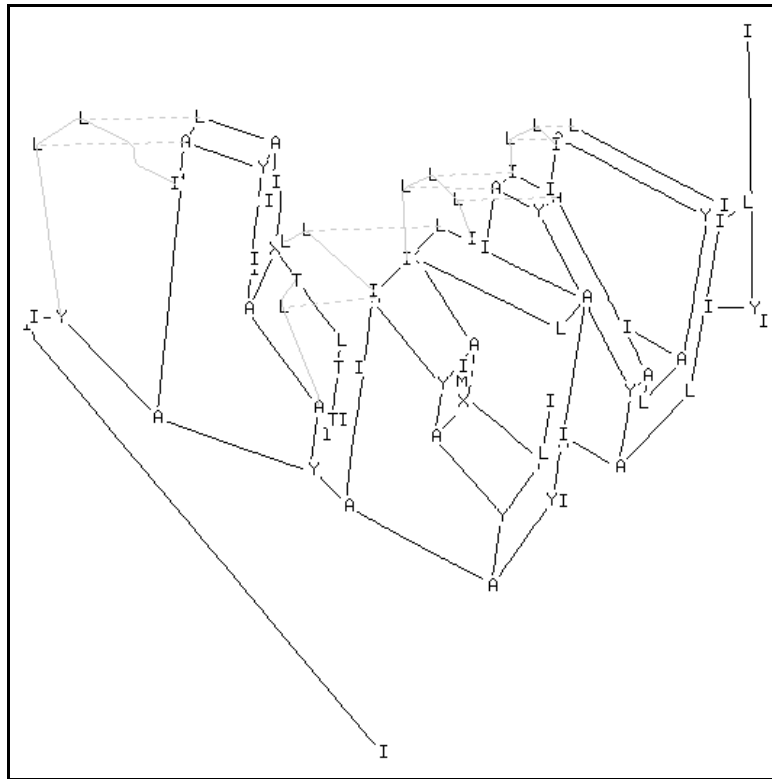


Abbildung 16: Verifizierte Projektionslinien und *nichtgeometrische* Kanten.

4.2 Iteratives Interpretationsverfahren

In diesem Abschnitt wird ein neues Verfahren beschrieben, das die Knotenkonfigurationen im Raumgraphen durch eine kleinen Menge von Regeln interpretiert. In Abschnitt 4.2.1 werden die *Knotenkonfigurationen* definiert. In Abschnitt 4.2.2 werden die Interpretationsregeln hergeleitet, während in Abschnitt 4.2.3 der Ablauf des Interpretationsverfahrens beschrieben wird.

4.2.1 Knotenkonfigurationen

Bisher wurden in Abschnitt 2.2 die Kanten- und Knotentypen als Attribute des Graphen definiert. Eine *Knotenkonfiguration* (*junction*) $(v : e_1 \cdots e_N)$ ist ein Knoten vom Typ v mit inzidenten Kanten vom Typ e_i . Da die Reihenfolge der inzidenten Kanten gegeben ist, lassen sich die Konfigurationen mit Knoten, die eine vordefinierte Anfangskante besitzen (Knoten vom Typ I, L, A, T, F, K), direkt miteinander vergleichen. Die Konfigurationen mit Knoten ohne vordefinierte Anfangskante (Knoten vom Typ M, Y, X) sind bis auf zyklische Vertauschung in der Kantenreihenfolge eindeutig. In Abbildung 17 sind Beispiele von Knotenkonfigurationen mit bzw. ohne vordefinierter Kantenreihenfolge dargestellt. Die Abkürzungen der Kanten typen wurden in Abschnitt 2.2.1 eingeführt.

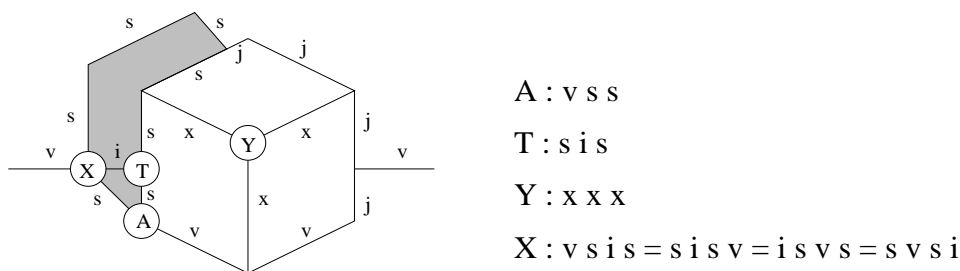


Abbildung 17: Beispiele von Knotenkonfigurationen.

Zwei Knotenkonfigurationen $(v_1 : e_{11} \cdots e_{1N})$ und $(v_2 : e_{21} \cdots e_{2N})$ werden als identisch betrachtet, falls (i) die Knoten vom gleichen Typ $v_1 = v_2$ sind, und (ii) die Kanten, im gleichen Umlaufsinn angeordnet, paarweise den gleichen Typ $e_{1i} = e_{2i}$ besitzen. Da wir an der Interpretation von Schattenregionen interessiert sind, betrachten wir nur Knotenkonfigurationen mit inzidenten Schatten- oder Intensitätskanten.

4.2.2 Interpretationsregeln

Die Interpretationsregeln haben die Form $v : e_1 \cdots e_N \rightarrow e'_1 \cdots e'_N$ und werden auf die Knotenkonfigurationen im Raumgraphen angewendet. Der Kantentyp e_i der i -ten Kante wird dabei durch e'_i ersetzt, wobei es sich bei den zu interpretierenden Kanten immer um Schatten- oder Intensitätskanten handelt, die als Sprung-, Schnitt- oder nicht-geometrische Kanten interpretiert werden. Die Interpretationsregeln werden durch folgende Schritte hergeleitet und in Tabelle 4 dargestellt. Dabei bezeichnet der Kantentyp "–" nicht-geometrische Kanten.

1. Abbildung 19 stellt ein Polyeder in mehreren Positionen dar, das aus verschiedenen Richtungen von rechts beleuchtet wird. Wir betrachten alle abstandskonsistenten Knotenkonfigurationen mit inzidenten Schatten- oder Intensitätskanten sowie deren Interpretationen. Die unterschiedlich interpretierten Knotentypen sind markiert und numeriert.
2. Schattenwürfe auf konvexe und konkave Schnittkanten mit *detektierten* oder *fehlenden* Intensitätskanten, wie in Abbildung 20 dargestellt, werden ebenfalls berücksichtigt. Da bei X -Knoten keine Kollinearität von mindestens zwei inzidenten Kanten gefordert wird, muss folgender Fall speziell behandelt werden: Wurde bei einer Knotenkonfiguration $A.10$ (siehe Abbildung 19) in der Schattenregion eine Intensitätskante detektiert, die ebenfalls in den Knoten mündet, liegt die gleiche Konfiguration wie bei $X.2$ vor. Dieser Fall verlangt jedoch eine andere Interpretation, weshalb die Regel $X.3 : i s x s \rightarrow i j x j$ eingeführt wird.
3. M -Knoten existieren zwar nicht in realen Polyedern, können jedoch in unseren Szenengraphen auftreten, wenn beispielsweise in einem T -Knoten die

<i>L-Knoten:</i>		<i>A-Knoten:</i>	
L.1	$s s \longrightarrow - -$	A.1	$v s s \longrightarrow v j -$
L.2	$s s \longrightarrow j j$	A.2	$s s x \longrightarrow j - x$
<i>M-Knoten:</i>		A.3	$v s s \longrightarrow v x v$
M.1	$s * \longrightarrow * *$	A.4	$s i s \longrightarrow j x j$
M.2	$i * \longrightarrow * *$	A.5	$i s s \longrightarrow j x j$
<i>T-Knoten:</i>		A.6	$i i i \longrightarrow j x j$
T.1	$s i s \longrightarrow v j -$	A.7	$s s j \longrightarrow j x j$
T.2	$s s i \longrightarrow j - j$	A.8	$s s x \longrightarrow x v x$
T.3	$s i s \longrightarrow j i j$	A.9	$x s s \longrightarrow x v x$
T.4	$i s s \longrightarrow j - j$	A.10	$s x s \longrightarrow j x j$
T.5	$s \& s \longrightarrow j \& j$	A.11	$x s s \longrightarrow x - j$
<i>Y-Knoten:</i>		A.12	$i s s \longrightarrow i - j$
Y.1	$s s x \longrightarrow x x x$	A.13	$s s i \longrightarrow j - j$
Y.2	$s s v \longrightarrow j j v$	A.14	$s v s \longrightarrow - v -$
Y.3	$s s x \longrightarrow - - x$	A.15	$s x s \longrightarrow - x -$
Y.4	$s s v \longrightarrow - - v$	<i>F-Knoten:</i>	
Y.5	$s s j \longrightarrow v j j$	F.1	$v s i s \longrightarrow v x v -$
Y.6	$s s i \longrightarrow j v j$	F.2	$s i s x \longrightarrow x v - x$
Y.7	$s s v \longrightarrow v v v$	F.3	$x s i s \longrightarrow x - v x$
Y.8	$i i i \longrightarrow v v v$	<i>X-Knoten:</i>	
Y.9	$i i i \longrightarrow v j j$	X.1	$v s i s \longrightarrow v - v -$
		X.2	$x s i s \longrightarrow x - x -$
		X.3	$i s x s \longrightarrow i j x j$

Tabelle 4: Interpretationsregeln.

teilweise verdeckte Kante abgespalten wurde oder wenn eine inzidente nicht-geometrische Kante interpretiert und aus den Linienzeichnungen gelöscht werden konnte. Da *M-Knoten* auf einer geometrischen Kante liegen, wird bei einer Interpretation ein bereits klassifizierter Kantenteil gemäss den Regeln *M.1* : $s * \rightarrow * *$ und *M.2* : $i * \rightarrow * *$ abgeleitet. Der Stern (*) ersetzt dabei einen Kantentyp j, x, v oder $-$.

- Ist die Blickrichtung des Beobachters koplunar zu einer Objektfläche, können trihedrale Objektecken dort einen *T-Knoten* bilden. Grenzen dabei die beiden kollinearen Kanten in diesem Knoten an eine Schattenregion, werden diese durch die Regel *T.5* : $s \& s \rightarrow j \& j$ als Sprungkante interpretiert. Das $\&$ -Zeichen steht für einen der geometrischen Kantentypen j, x oder v .

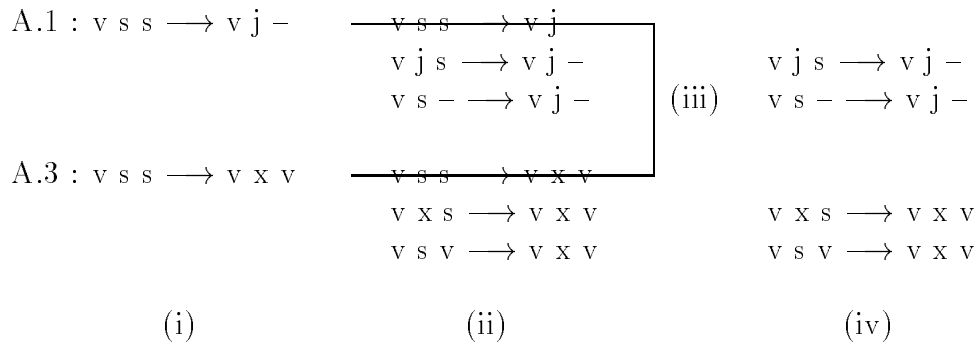


Abbildung 18: Beispiel für die Herleitung der Interpretationsregeln.

5. Da das Interpretationsverfahren, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, die Knotenkonfigurationen iterativ interpretiert, können in einem Iterationsschritt bereits einzelne Kanten interpretiert und klassifiziert worden sein. Deshalb werden die Interpretationsregeln durch ihre Teilinterpretationen ergänzt, wie ein Beispiel in Abbildung 18 illustriert: (i) Die Regeln *A.1* und *A.3* stammen aus Tabelle 4. (ii) Diese werden durch alle Kombinationen von Regeln ergänzt, bei denen auf der linken Seite Schatten- oder Intensitätskanten interpretiert wurden. (iii) Alle inkonsistenten Regeln, d.h. Konfigurationen mit widersprüchlichen Interpretationen, werden gelöscht. (iv) Nur die konsistenten Regeln werden verwendet.

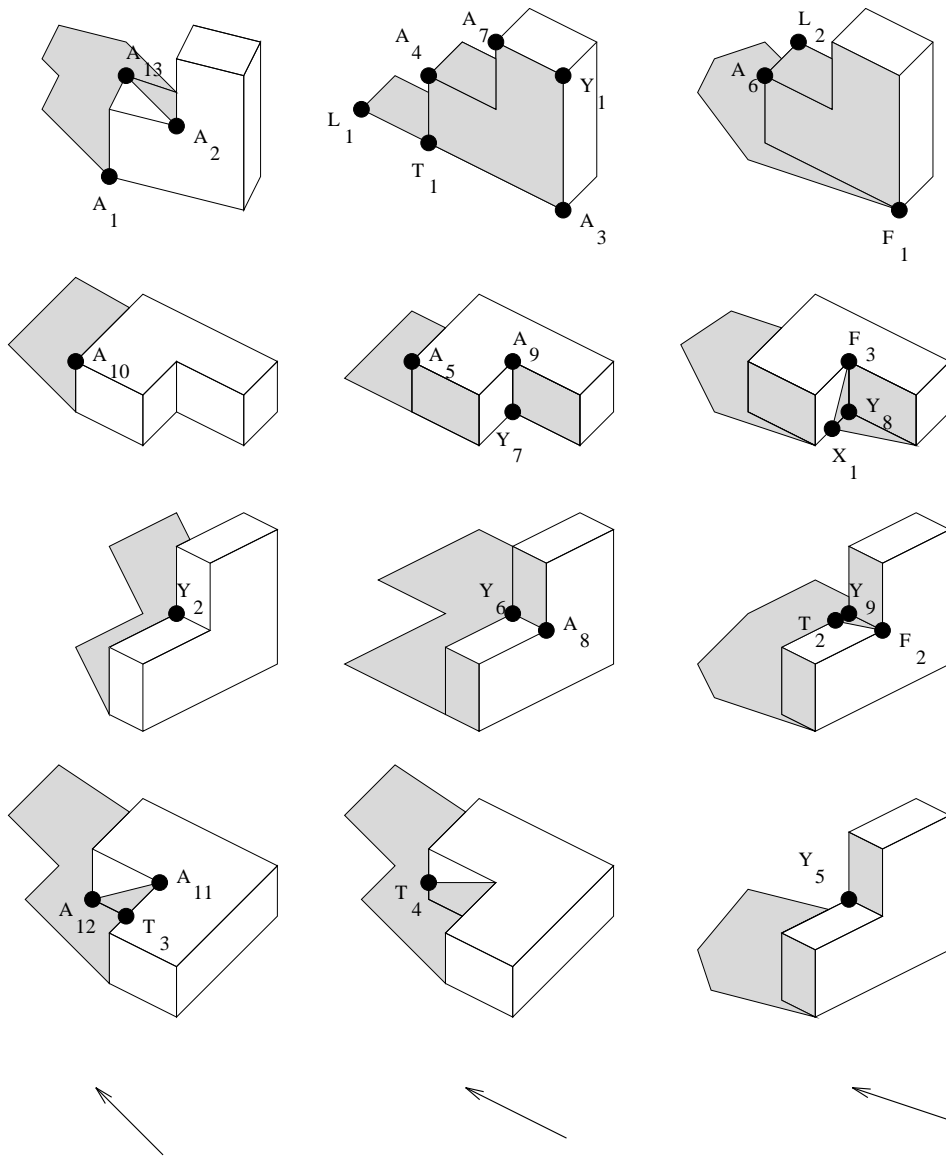


Abbildung 19: Polyederansichten mit verschiedenen Beleuchtungsrichtungen.

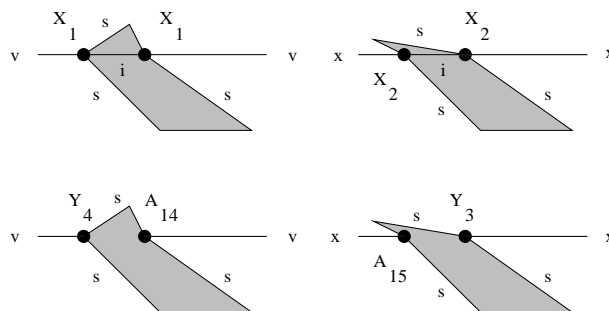


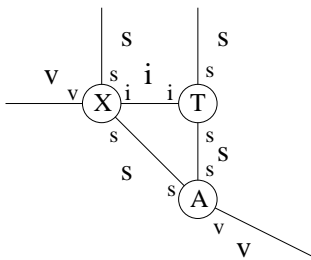
Abbildung 20: Schattenwurf auf Schnittkante mit *detektierter* bzw. *nichtdetektierter* Intensitätskante.

4.2.3 Interpretationsverfahren

Das Interpretationsverfahren besteht aus zwei verschachtelten Iterationen und wendet die beschriebenen Interpretationsregeln folgendermassen an:

1. Die *Interpretationsregeln* werden auf alle Graphknoten gemäss ihrer Konfiguration angewendet. Der Kantentyp ist sowohl in der Kantenliste, als auch in den Kantenendpunkten abgelegt (vergleiche Abschnitt 1.5 Datenstruktur). Diese Werte sind für jede Kante vor der Interpretation identisch, in diesem Schritt werden die interpretierten Typen den Kantenendpunkten zugewiesen.
2. Die *Konsistenzprüfung und Typenzuweisung* vergleicht den Typ jeder Kante in der Kantenliste und in den Kantenendpunkten. Die Interpretation einer Schatten- oder Intensitätskante ist konsistent, falls die Kante (i) in nur einem Endpunkt interpretiert wird, oder (ii) in beiden Endpunkten mit dem gleichen Kantentyp interpretiert wird. Bei Konsistenz erfolgt die Typenzuweisung, indem der Kantentyp in der Kantenliste sowie in den Kantenendpunkten durch den interpretierten Kantentyp übernommen wird. Wird eine Kante in beiden Endpunkten durch verschiedene Kantentypen interpretiert, liegt eine *Inkonsistenz*, ein Konflikt in der Interpretation, vor. In diesem Falle bleibt die Typenzuweisung aus, der Typ *Schatten-* oder *Intensitätskante* bleibt bestehen.
3. Die Schritte 1 und 2 werden solange wiederholt, bis keine weitere Typenzuweisung einer Kante mehr erfolgt. Diese Iteration terminiert immer, da *Schatten-* und *Intensitätskanten* höchstens einmal, und zwar als *Sprungkante* oder *konvexe* oder *konkave* Schnittkante interpretiert werden. Im Falle einer Inkonsistenz bleibt eine Typenzuweisung aus.
4. Als nicht-geometrisch interpretierte Kanten werden gelöscht und die Knoten neu klassifiziert.
5. Die Schritte 1 – 4 werden solange wiederholt, bis keine weitere Typenzuweisung einer Kante mehr erfolgt. Diese Iteration terminiert aus den gleichen Gründen wie in Schritt 3.

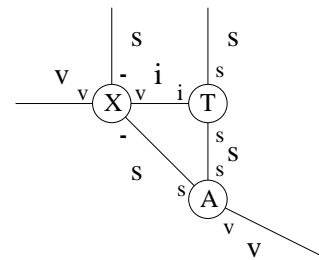
Die Abbildung 21 enthält ein Beispiel für den Ablauf des Interpretationsverfahrens. Die Szene stellt einen Ausschnitt aus Abbildung 17 dar und folgende Interpretationsregeln werden verwendet: $A.1: v s s \rightarrow v j -$, $T.5: s v s \rightarrow j v j$ und $X.1: v s i s \rightarrow v - v -$. Im klassifizierten Szenengraphen (i) lassen sich die Interpretationsregeln (ii) nur auf den X -Knoten anwenden (iii). Die Interpretation wird auf Konsistenz geprüft und die Kanten definitiv klassifiziert (iv). Nun lassen sich die Interpretationsregeln (v) sowohl auf den A - als auch auf den T -Knoten anwenden (vi). Nach der Konsistenzprüfung und Kantenzuweisung (vii) terminiert das Verfahren, die nicht-geometrischen Kanten werden gelöscht und die Knoten neu klassifiziert (viii).



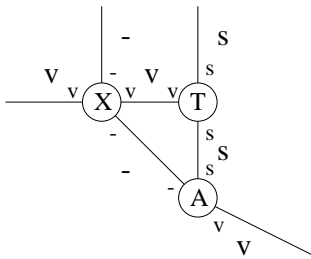
(i)

A: v s s
 T: s i s
 X: v s i s \rightarrow v - v -

(ii)



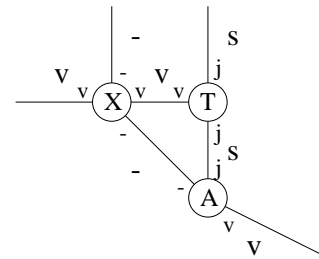
(iii)



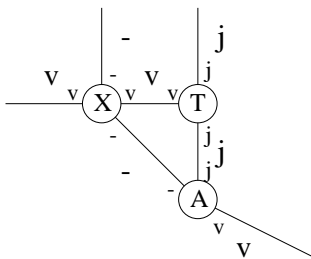
(iv)

A: v s - \rightarrow v j -
 T: s v s \rightarrow j v j
 X: v - v -

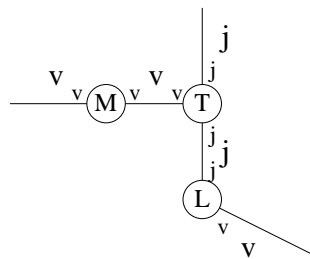
(v)



(vi)



(vii)



(viii)

Abbildung 21: Beispiel für den Ablauf des Interpretationsverfahren.

4.3 Lokalisierung der Intensitätskanten

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt wurde, ist eine Lokalisierung der Endpunkte von Intensitätskanten wegen den fehlenden Tiefenwerten nicht möglich. Besitzt ein Knoten ausschliesslich inzidente Intensitätskanten, ist ausserdem diese Objektecke im Raum nicht lokalisierbar. Intensitätskanten wurden in diesem Kapitel bisher folgendermassen verarbeitet:

1. Aufgrund der fehlenden räumlichen Informationen wurden die Intensitätskanten von der Zerlegung in *abstandkonsistente Knoten* (Abschnitt 3.2) ausgenommen.
2. Im *iterativen Interpretationsverfahren* (Abschnitt 4.2) wurden die Intensitätskanten lediglich klassifiziert, nicht aber lokalisiert.

In diesem Abschnitt wird die *Lokalisierung* der Intensitätskanten³ sowie eine erneute Zerlegung in *abstandkonsistente Knoten* durchgeführt. Der Ablauf gliedert sich in die folgenden drei Schritte:

3. Aufgrund der *Knotenkonfigurationen* werden Intensitätskanten gegebenenfalls von den Knoten abgespalten:
 - Bei Knoten vom Typ L, M, A und Y übernimmt der Endpunkt der Intensitätskante die 3D-Koordinaten der Objektecke.
 - Bei Knoten vom Typ T und K bilden die beiden kollinearen Linien eine geometrische Kante. Sind sie Intensitätskanten, lassen sich deren Endpunkte durch die Objektecke lokalisieren. Die mittlere(n) Intensitätskante(n) stammen von Verdeckungen und werden daher zu einem neuen Knoten zusammengefasst und abgespalten.
 - Bei den restlichen Knoten vom Typ F, X und $*$ werden alle Intensitätskanten zu einem neuen Knoten zusammengefasst und abgespalten.
4. Knoten vom Typ M werden gelöscht, d.h. die inzidenten Kanten verschmolzen. Ist ein zum M -Knoten adjazenter Kantenendpunkt im Raum nicht lokalisiert, kann dieser durch die räumlichen Informationen der inzidenten Kante *interpoliert* werden.
5. Die *Zerlegung in abstandkonsistente Knoten* erfolgt analog zu dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahren, ausser dass nun bei der Abspaltung auch die Intensitätskanten berücksichtigt werden.

³Nach dem iterativen Interpretationsverfahren können Intensitätskanten zwar klassifiziert sein, durch ihre fehlenden 3D-Koordinaten in den Kantenendpunkten werden sie dennoch als ursprüngliche Intensitätskanten identifiziert.

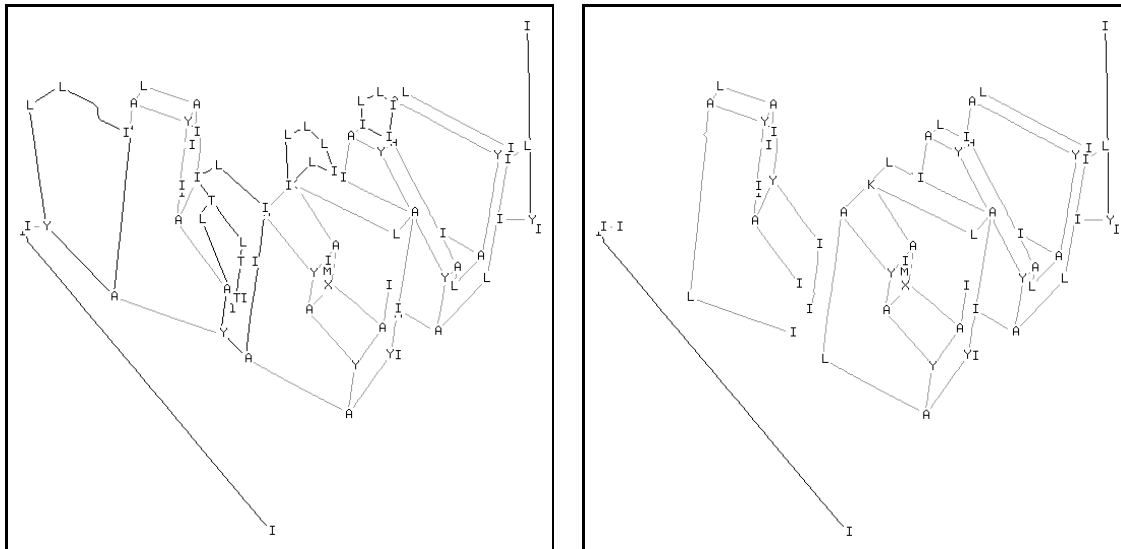


Abbildung 22: Attributierter Raumgraph vor und nach der Interpretation der Schatten- und Intensitätskanten.

Abbildung 22 zeigt die Referenzszene links vor und rechts nach der Interpretation der Schattenregionen durch die Verifizierung der Schattenprojektionen und das iterative Interpretationsverfahren. In der rechten Abbildung wurden die als nicht-geometrisch interpretierten Kanten bereits gelöscht. Zur besseren Illustration wurden in beiden Abbildungen die Kantentypen so dargestellt, dass nur die Schatten- und Intensitätskanten schwarz sind, die restlichen Kanten sind grau eingezeichnet.

5 Nachverarbeitung des Raumgraphen

Nach der Interpretation der Schatten- und Intensitätskanten besteht die Szene nunmehr aus einem Raumgraphen mit *abstandskonsistenten Knoten* und *geometrischen* bzw. als *geometrisch interpretierten Kanten*. Räumlich getrennte Objekte, d.h. sich nicht berührende Objekte, sind auch im Raumgraphen getrennt. Fasst man die über Kanten miteinander verbundenen Knoten zusammen, kann der Raumgraph in zusammenhängende Graphen (Cluster) zerlegt werden, die jeweils einem Objekt entsprechen. Durch die Grösse eines Clusters, beispielsweise definiert durch die Anzahl Knoten, können Objekte bzw. Objektteile von Hintergrund und Störungen unterschieden werden. Im Szenengraphen aus Abbildung 22 wurden alle Cluster mit einer minimalen Grösse von sieben Knoten extrahiert.

Wird die Nachverarbeitung auf die einzelnen Objekte angewendet, können diese ohne Einflüsse von anderen Objekten behandelt werden. In Abschnitt 5.1 werden Kanten, die in einem *I*-Knoten enden, verarbeitet, indem die räumliche Lage der Kanten verwendet wird. Abschnitt 5.2 beschreibt die Darstellung der Szene. Jedes Objekt wird durch seine Flächen bzw. Kanten im Raum beschrieben. Diese

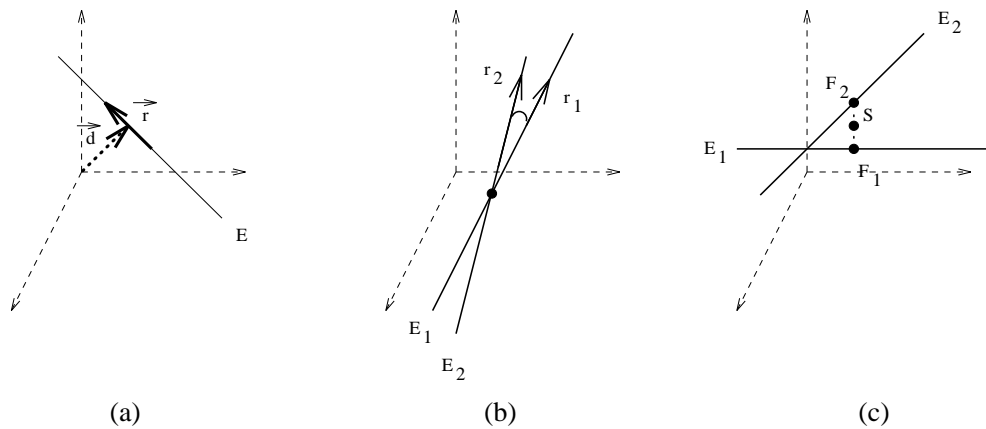


Abbildung 23: Bestimmung der gegenseitigen Lage von Geraden im Raum.

Beschreibung kann von einem nachfolgenden Erkennungsschritt übernommen und verarbeitet werden.

5.1 Verarbeitung der Objekte

Wenn Kanten mit I -Knoten in Polyederszenen auftreten, handelt es sich dabei entweder um *nur teilweise detektierte* oder *teilweise verdeckte* Kanten oder um *Störungen*. Um nur teilweise detektierte Kanten zu vervollständigen oder um teilweise verdeckte Kanten zu verlängern, untersuchen wir die Kanten im Raum. Geraden im Raum sind entweder *kollinear*, *parallel*, *koplanar* oder *windschief* zueinander. Um Kanten der Objekte zu vergleichen, wird von jeder Kante der *normierte Richtungsvektor* \vec{r} sowie der *Abstandsvektor* \vec{d} der Kante vom Weltkoordinaten-Ursprung gemäss Abbildung 23 (a) berechnet und gespeichert. Die gegenseitige Lage zweier Kanten $E_1 = (\vec{r}_1, \vec{d}_1)$ und $E_2 = (\vec{r}_2, \vec{d}_2)$ lässt sich daraus folgendermassen bestimmen:

- Die Richtungsvektoren \vec{r}_1 und \vec{r}_2 sind parallel:
 - Die Abstandsvektoren \vec{d}_1 und \vec{d}_2 sind identisch:
 $\implies E_1$ und E_2 sind **kollinear**
 - Die Abstandsvektoren \vec{d}_1 und \vec{d}_2 sind nicht identisch:
 $\implies E_1$ und E_2 sind **parallel**
- Die Richtungsvektoren \vec{r}_1 und \vec{r}_2 sind nicht parallel:
 - Es existiert ein Schnittpunkt S :
 $\implies E_1$ und E_2 sind **koplanar**
 - Es existiert kein Schnittpunkt S :
 $\implies E_1$ und E_2 sind **windschief**

Die Parallelität der Richtungs- und Abstandsvektoren wird durch ihren Zwischenwinkel bzw. ihre Abweichung von 180° definiert, wie Abbildung 23 (b) illustriert. Ein Schnittpunkt S existiert, falls der Abstand zwischen E_1 und E_2 genügend klein ist. Abbildung 23 (c) veranschaulicht die Bestimmung der Position des Schnittpunktes S durch das Mittel der Normalenfusspunkte F_1 und F_2 .

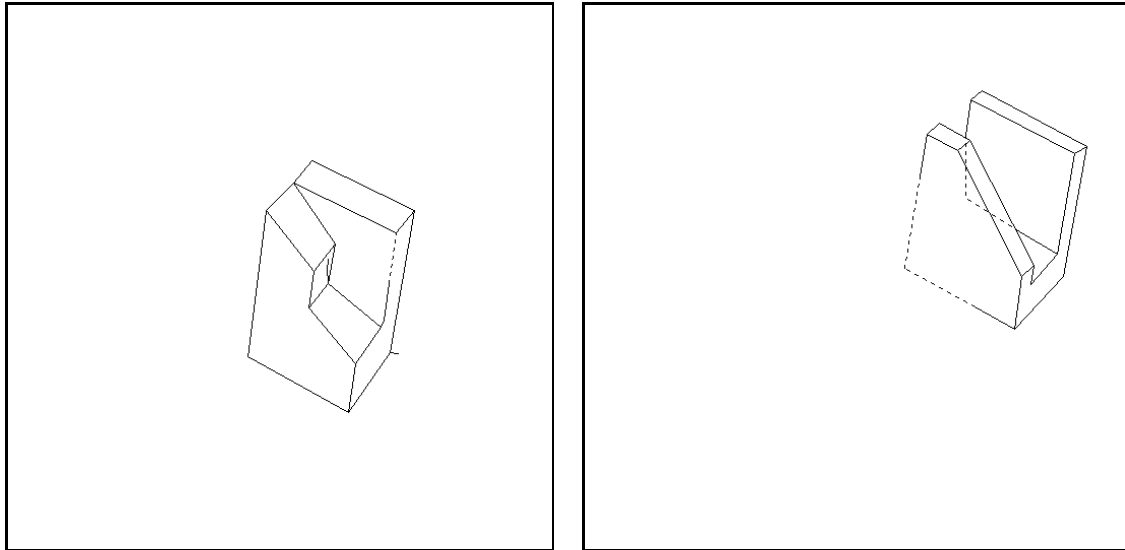


Abbildung 24: Nachverarbeitungsschritte *Kantenverlängerung* und *Detektion von verdeckten Ecken*.

Es wurden folgende Nachverarbeitungsschritte implementiert:

- Um *nur teilweise detektierte* Kanten zu korrigieren, werden analog dem Verfahren in Abschnitt 3.3 Kanten mit *I*-Knoten bis zur nächsten Objektecke verlängert, falls Distanz und Ablenkung innerhalb einer Toleranz liegen. Abbildung 24 links stellt eine Kantenverlängerung im ersten Cluster der Referenzszenen gestrichelt dar.
- Sind zwei Kanten *koplanar* und entstanden ihre *I*-Knoten aufgrund von Verdeckung durch eine andere Kante⁴, werden sie bis zum analytisch berechneten Schnittpunkt verlängert. Abbildung 24 rechts stellt die verdeckten Ecken und Kanten im dritten Cluster gestrichelt dar.

⁴Bei der teilweisen Verdeckung von Kanten durch andere Kanten, werden bei der Generierung von abstandskonsistenten Graphknoten, beschrieben in Abschnitt 3.2, die verdeckten Kanten vom Graphknoten abgespalten. Dabei wird der abgespaltene neue Graphknoten als *verdeckt* markiert.

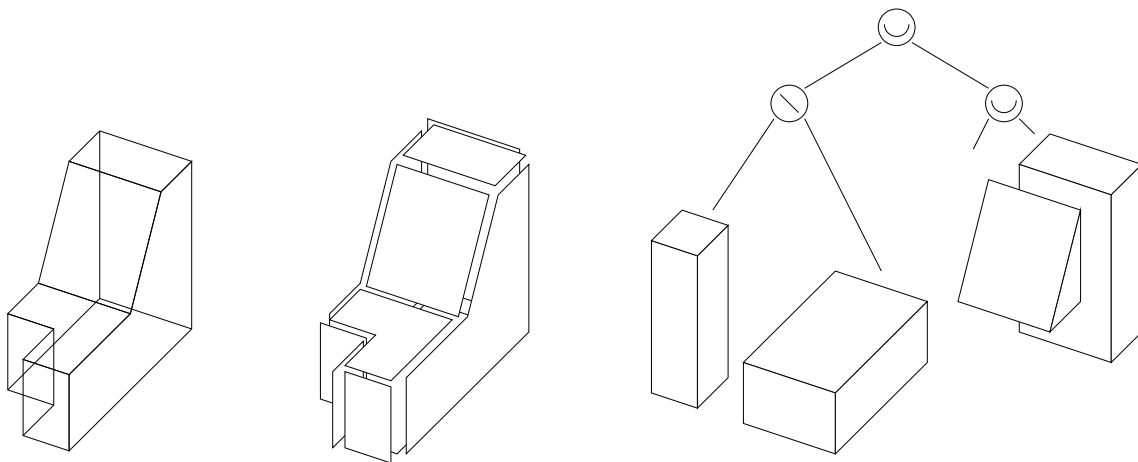


Abbildung 25: Modellansätze zur Beschreibung von räumlichen Objekten.

5.2 Beschreibung der Szene durch Kanten und Flächen

Die Objekte der Szene liegen in Form eines attributierten Raumgraphen vor und sollen nun geeignet beschrieben und dargestellt werden. Abschnitt 5.2.1 gibt eine Übersicht über die gebräuchlichsten Methoden des *geometrischen Modellierens*. In Abschnitt 5.2.2 wird die Methode beschrieben, um die Objekte durch ihre sichtbaren Oberflächen darzustellen.

5.2.1 Geometrisches Modellieren

Der Begriff *Geometrisches Modellieren* entstand in den frühen siebziger Jahren mit der raschen Entwicklung der Computergraphik, dem rechnergestützten Konstruieren (*computer aided design, CAD*) und der rechnergestützten Fertigung (*computer aided manufacturing, CAM*). Er beinhaltet Methoden, um die Form und andere geometrische Eigenschaften eines Objektes zu definieren, und umfasst die Beschreibung und Speicherung geometrischer, vorwiegend räumlicher Objekte [Mei86, Mor85]. Die räumliche Darstellung von Objekten dient dabei einem der folgenden Ziele [BT88]:

- In 2D-, $2^{1/2}$ D- und 3D-Informationen, die aus Bildern gewonnen wurden, sollen 3D-Strukturen erkannt werden.
- Modellerte Objekte sollen graphisch dargestellt werden, unter Berücksichtigung aller Probleme wie Sichtbarkeit etc.
- In CAD-Systemen sollen physikalische Eigenschaften von Körpern wie Masse, Trägheit etc. schnell aus den Modellen herleitbar sein.

Die wichtigsten Modellansätze werden hier kurz vorgestellt und anhand von Abbildung 25 illustriert:

- Das *Drahtmodell* (*wire frame*) stellt die Kanten eines Objektes dar und besteht aus Punkten, Linien und Kurven (Abbildung 25 links). Es enthält keine Informationen über Flächen oder Volumen, und die Darstellung von Objekten kann mehrdeutig sein.
- Das *Flächenmodell* (*boundary representation, b-rep*) definiert Objekte durch analytische oder approximierte Flächen (Abbildung 25 Mitte). Flächen- und Volumeninhalte sind dadurch definiert.
- Das *Volumenmodell* (*constructive solid geometry, CSG*) beschreibt Objekte durch mengentheoretische Kombinationen von Standardprimitiven oder Halbräumen, wobei *Vereinigung*, *Durchschnitt* und *Differenz* die booleschen Operationen bilden (Abbildung 25 rechts).

Daneben existieren noch weitere Methoden wie die *Verallgemeinerten Zylinder* (*generalised cones*), die *Octree-Darstellung* oder die *Skelett-Darstellung* (*skeleton representation*).

5.2.2 Extraktion der Flächen und Kanten

Für jeden Anwendungsbereich werden andere Modellierverfahren verwendet. Gewöhnlich kombinieren CAD-Systeme unterschiedliche Ansätze. Für Erkennungs- und Matchingaufgaben eignet sich die *Flächendarstellung*. In dieser Arbeit sollen die Objekte durch ihre Flächen und Kanten dargestellt werden. Um aus dem Graphen das *Flächenmodell* herzuleiten, wird der Graph traversiert und geschlossene Kantenzüge werden als Objektflächen zusammengefasst. Kanten, die keinen geschlossenen Kantenzug bilden, werden ebenfalls zur Objektdarstellung verwendet. Die Traversierung des Objektgraphen erfolgt in zwei Schritten, wie Abbildung 26 illustriert.

1. Von jedem *I*-Knoten aus wird der inzidente Kantenzug verfolgt, bis er an einen Knoten vom Grad $\neq 2$ grenzt (Abbildung 26 oben links):
 - Ist der Endknoten vom Grad eins, besteht der gesamte Clustergraph aus Kantenzügen, die nicht geschlossen sind.
 - Trifft der verfolgte Kantenzug auf einen Knoten vom Grad > 2 (Verzweigung), wird der Kantenzug aus dem Graphen gelöst und der modifizierte Verzweigungsknoten neu klassifiziert (Abbildung 26 oben rechts).
2. Von einem beliebigen Startknoten aus werden alle *geschlossenen Kantenzüge* extrahiert, wobei in jedem besuchten Knoten der Nachfolger der eintreffenden Kante in positivem Drehsinn weiterverfolgt wird. Dabei wird jede Kante genau zweimal traversiert, nämlich in jede Richtung einmal. Auf diese Weise werden alle geschlossenen Kantenzüge einmal traversiert: Die Objektflächen im Uhrzeigersinn, der alles umschliessende Kantenzug im Gegenuhrzeigersinn (Abbildung 26 unten rechts). Es ist *a priori* nicht möglich, aufgrund des Knotentyps

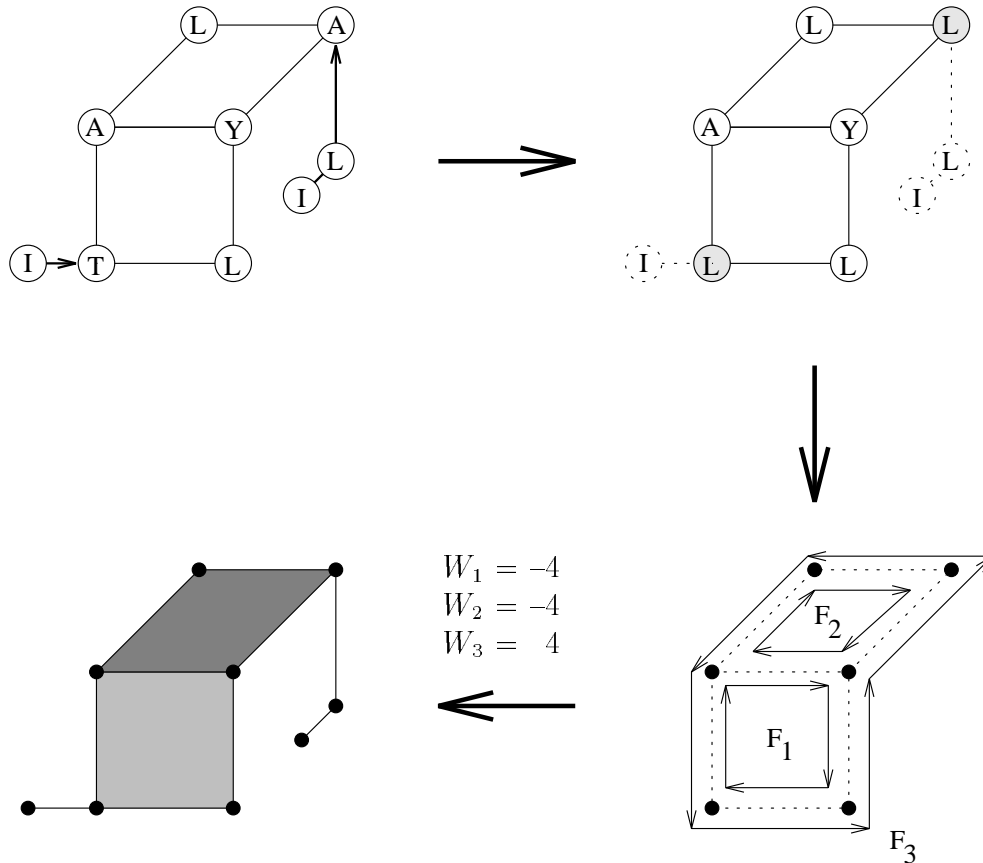


Abbildung 26: Traversierung eines Graphen zur Bestimmung der Flächen und Kanten.

des Startknotens die Traversierung auf dem umschliessenden Kantenzug auszuschliessen. Betrachtet man die Winkel der geschlossenen Kantenzüge in den Eckpunkten, können die Objektflächen, bzw. der umschliessende Kantenzug, aufgrund ihrer Winkelsumme als Innen- bzw. Aussenwinkel eines Polygons unterschieden werden. Die Summe $\sum \varphi_I$ der Innenwinkel bzw. die Summe $\sum \varphi_A$ der Aussenwinkel in einem n -Eck betragen:

$$\sum \varphi_I = n \cdot 180^\circ - 360^\circ \quad \text{bzw.} \quad \sum \varphi_A = n \cdot 180^\circ + 360^\circ$$

Um nicht in jedem Knoten den Zwischenwinkel zu berechnen, wird folgende Vereinfachung angenommen: Der umschliessende Kantenzug besteht mehrheitlich aus Winkeln $> 180^\circ$. Da aufgrund des Knotentyps die Information über jeden Zwischenwinkel, ob *grösser*, *kleiner* oder *gleich* 180° , bekannt ist, wird bei der Traversierung eines Kantenzuges in jedem Knoten die Winkel-

summe W folgendermassen verändert:

$$W = \sum_i \omega_i, \quad \text{wobei } \omega_i = \begin{cases} 1 & : \text{Zwischenwinkel im Knoten } i > 180^\circ \\ 0 & : \text{Zwischenwinkel im Knoten } i = 180^\circ \\ -1 & : \text{Zwischenwinkel im Knoten } i < 180^\circ \end{cases}$$

Nach der Traversierung des Objektgraphen enthält jeder geschlossene Kantenzug E_i die Summe W_i ihrer Zwischenwinkel. Der umschliessende Kantenzug weist einen Wert > 0 auf und kann dadurch detektiert und eliminiert werden (Abbildung 26 unten links).

Jeder Eintrag eines Objektes in der Objektliste *GraphObjectList* besteht aus einer Liste von *Kantenzügen*, die in einem Knoten vom Grad eins enden, und einer Liste von *Polyederflächen* (geschlossenen Kantenzüge).

Abbildung 27 stellt das zweite und dritte Objekt der Referenzszene mit eingefärbten Polyederflächen nach der Graphtraversierung dar.

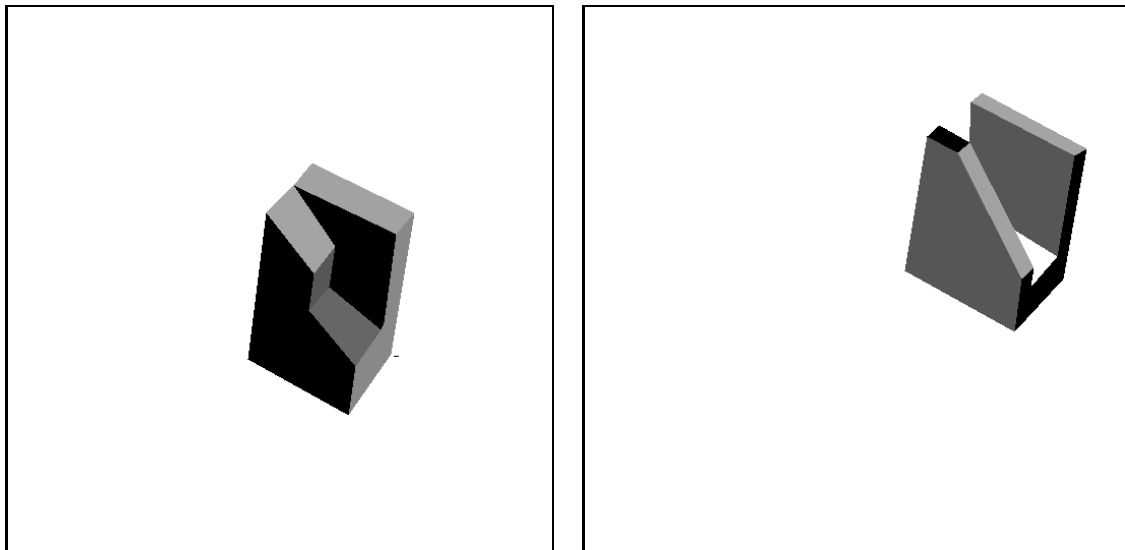


Abbildung 27: Zwei Objekte der Referenzszene mit eingefärbten Polyederflächen.

6 Resultate

Das beschriebene Verfahren zur Interpretation von Schattenregionen wurde an unserer Tiefenbild-Sammlung getestet. In Abschnitt 6.1 werden einige Resultate vorgestellt und diskutiert. Die beiden Szenen *iam0800000A* und *iam1000000B* enthalten jeweils nur ein Objekt mit wenig Schatten und Verdeckungen. Die Szenen *iam05091000A* und *iam05070810D* enthalten drei bzw. vier Objekte mit viel Schatten und Verdeckungen. In Abschnitt 6.2 wird der Einfluss der Interpretation von Schattenregionen auf den Aufwand eines nachfolgenden Erkennungsschrittes untersucht.

6.1 Bilder und Resultate

Die vier Szenen werden nun verarbeitet und die Resultate besprochen. Die dargestellten Abbildungen haben dabei folgende Reihenfolge. Die obere Reihe enthält jeweils links das Grauwertbild der Szene und rechts die extrahierten sowie integrierten Kanten. Die untere Reihe enthält links die klassifizierten Knoten und die interpretierten und klassifizierten Kanten, dabei wurden die nicht-geometrischen Kanten bereits gelöscht. Rechts werden die extrahierten und nachverarbeiteten Objekte dargestellt, wobei nur die im Raum lokalisierten Objektecken eingezeichnet sind und die Kanten durch Verbindungsgeraden approximiert wurden. Die Kanten-typen in der zweiten und dritten Abbildung sind jeweils so dargestellt, dass nur die zu interpretierenden Schatten- und Intensitätskanten schwarz eingezeichnet sind, die restlichen Kanten erscheinen grau.

6.1.1 Szene iam08000000A

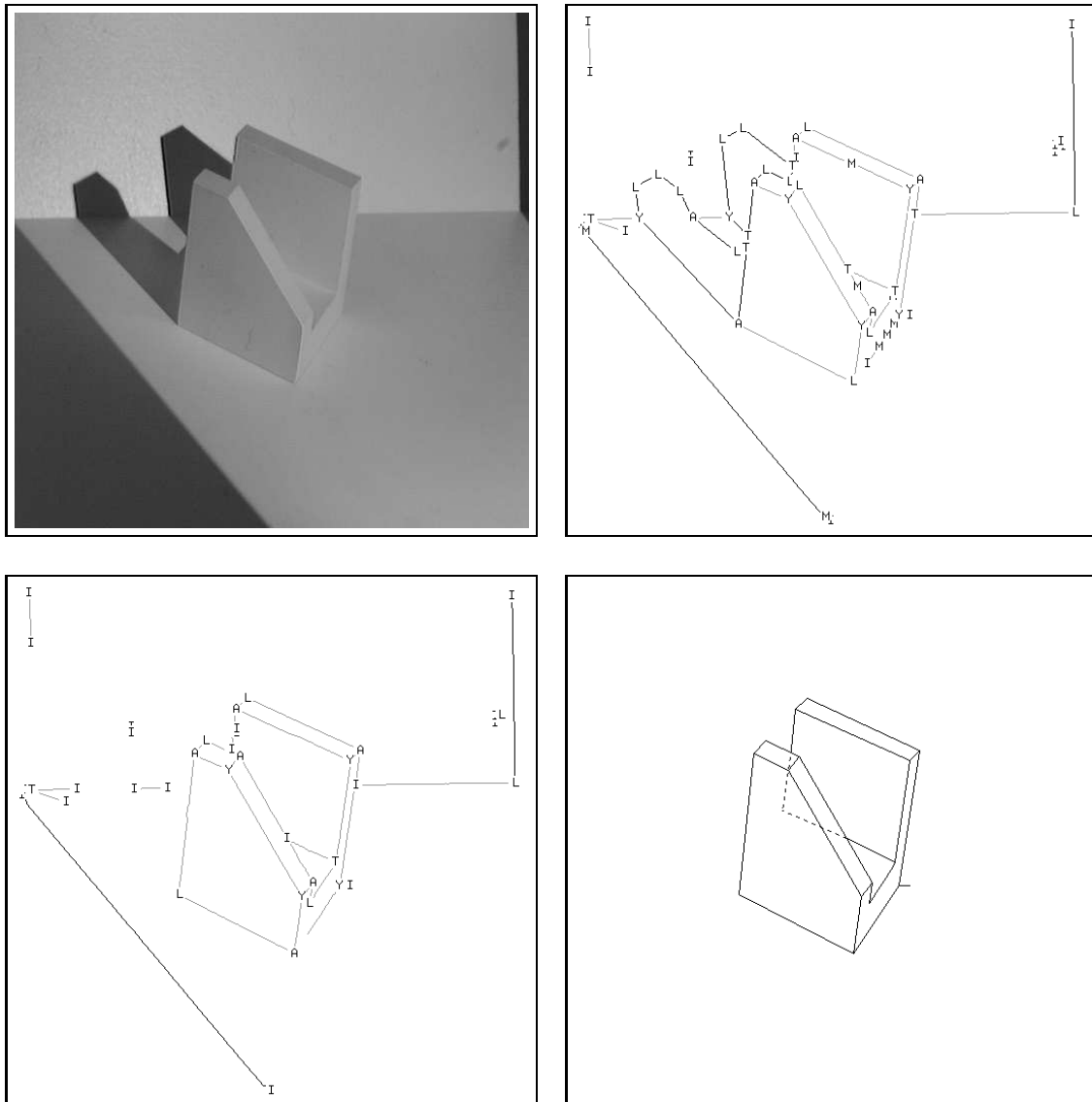


Abbildung 28: Resultate von Szene iam08000000A.

Das Objekt in dieser einfachen Szene wirft nur zwei Schattenregionen auf die Boden- und Hintergrundsflächen. Die Kanten wurden korrekt interpretiert, d.h. die nicht-geometrischen Schattenkanten eliminiert und die geometrischen als Sprungkanten klassifiziert. Ausserdem konnte eine teilweise verdeckte Objektfläche analytisch rekonstruiert werden.

6.1.2 Szene iam10000000B

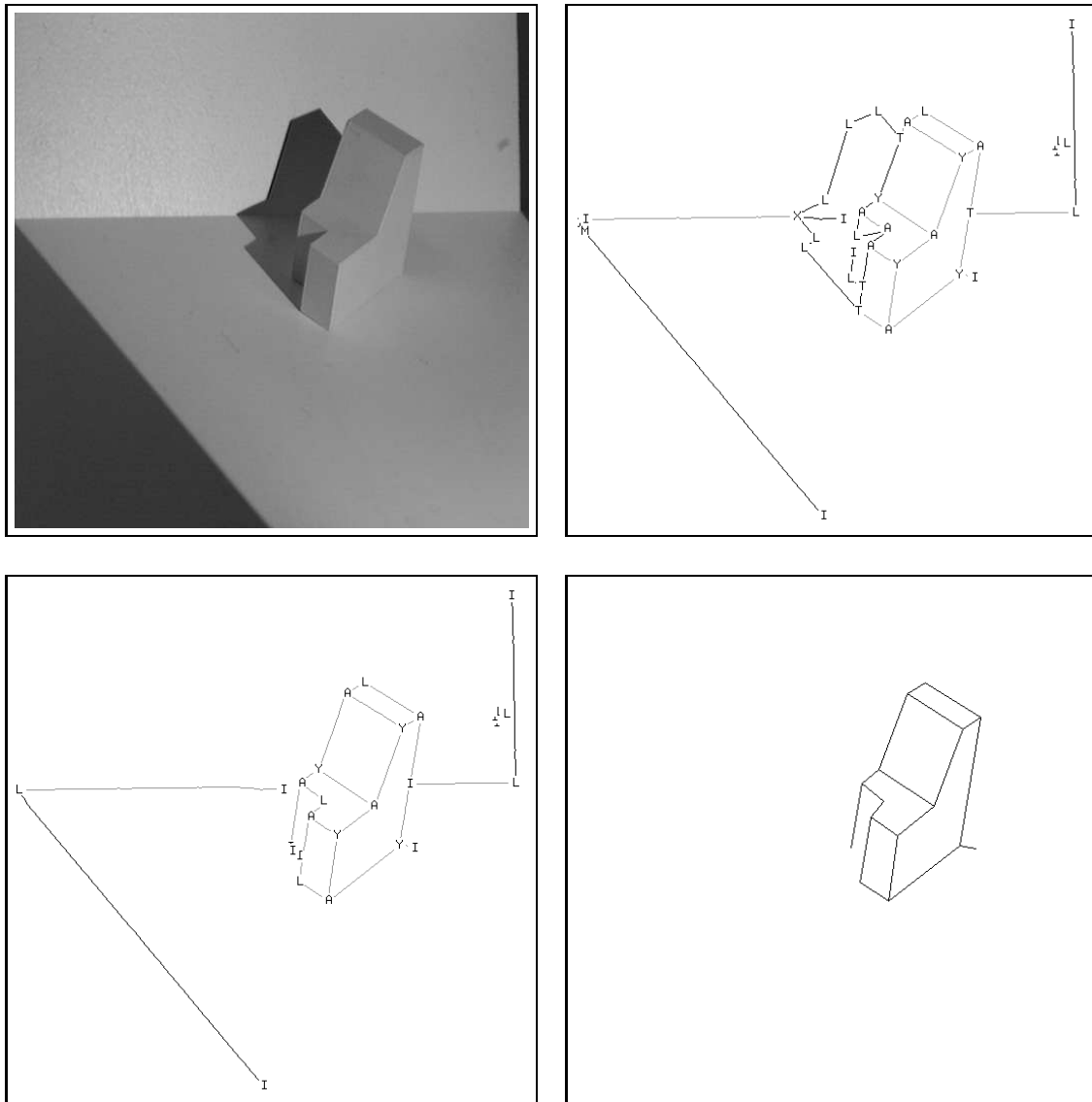


Abbildung 29: Resultate von Szene iam10000000B.

In dieser Szene wird das Objekt durch Eigenschatten teilweise verdeckt, wobei die Begrenzung der Verdeckung als Intensitätskante detektiert wurde. Durch den Interpretationsschritt kann die Schattenregion eliminiert und eine Intensitätskante klassifiziert und durch Geradenapproximation sogar lokalisiert werden.

6.1.3 Szene iam05091000A

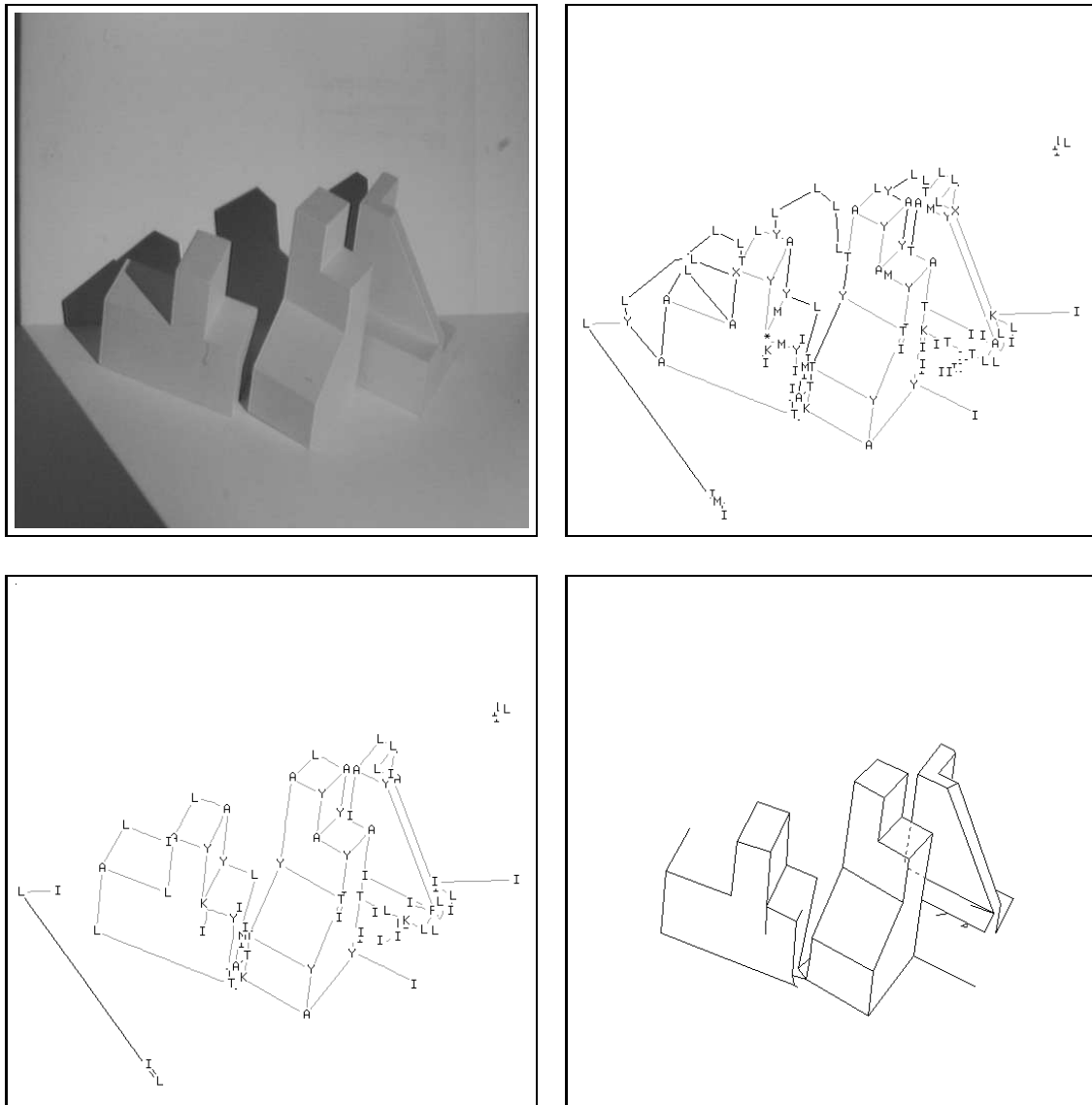


Abbildung 30: Resultate von Szene iam05091000A.

Die abgebildete Szene enthält drei Objekte, die sich teilweise verdecken und vier Schattenregionen auf Objekt- und Hintergründflächen werfen. Die Interpretation verlief erfolgreich, wobei die Intensitätskante im Objekt links zwar klassifiziert, aufgrund der vollständigen Verdeckung aber nicht lokalisiert werden konnte. Der Raumgraph der Szene wurde nicht in seine Objekte zerlegt, da das linke und mittlere Objekt durch falsche Kanten, verursacht durch Störungen im Tiefenbild, verbunden blieben. Das mittlere und rechte Objekt berühren sich, weshalb keine räumliche Trennung möglich war.

6.1.4 Szene iam05070810D

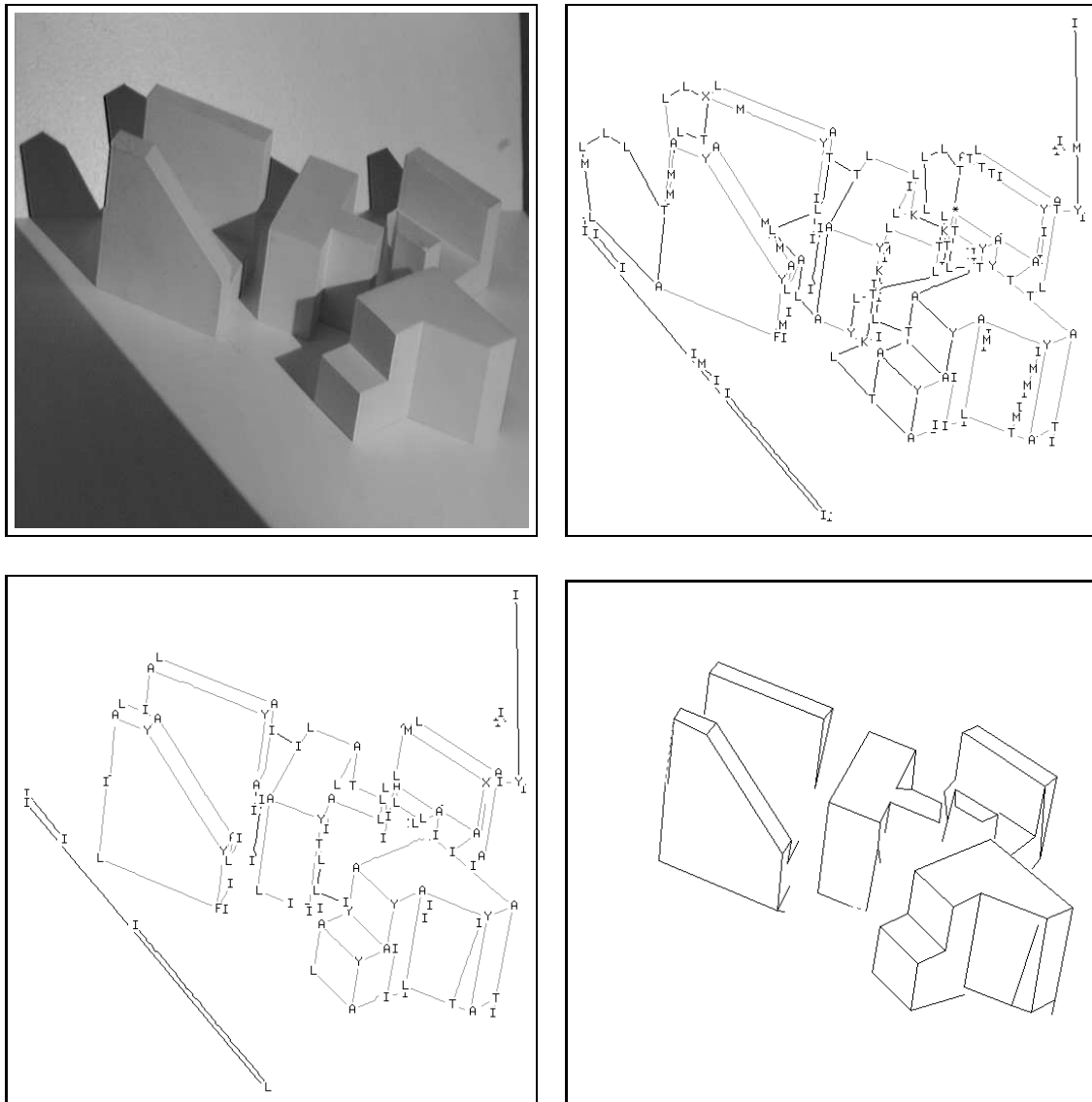


Abbildung 31: Resultate von Szene iam05070810D.

Diese komplexe Szene mit vier Objekten weist ebenfalls viel Verdeckungen und Schatten auf. Das Objekt vorne rechts liegt ausserdem so, dass zwei Objektflächen koplanar zur Projektionsrichtung stehen, d.h. keine *allgemeine Position* einnehmen. Dadurch werden viel Schatten- und Intensitätskanten gebildet, die aber alle interpretiert und korrekt klassifiziert bzw. lokalisiert werden können, wie die Abbildung mit dem ersten Cluster illustriert.

6.2 Vergleich des Aufwandes bei der Erkennung

Um den Aufwand eines Erkennungsverfahrens zu vergleichen, verwenden wir (i) einerseits die Kantenbeschreibung der Szene nach der Generierung des Raumgraphen und (ii) andererseits die Kantenbeschreibung nach der Interpretation und Nachverarbeitung der Objekte. Dabei enthält erstere alle Kanten sowie die Begrenzungen der Schattenregionen, während letztere nur die als geometrisch interpretierten Objektkanten ohne Hintergrund und Störungen beinhaltet.

Als Erkennungsschritt verwenden wir das *Erkennungsverfahren aufgrund von räumlichen Kantensegmenten* [JMB94]. Dabei werden Korrespondenzen zwischen Paaren von detektierten Kantenfragmenten aus der Szene und Paaren von Modellkanten in einem Hough-Raum akkumuliert, um daraus die Koordinatentransformation des Modelles in das Objekt zu erhalten.

Aus den Resultaten der Erkennung vergleichen wir (i) die Anzahl der gebildeten Kantenpaare aus der Szene sowie (ii) die Gesamtzeit⁵, um die Kantenpaare in der Szene zu bilden und die Lokalisierung im Hough-Raum vorzunehmen.

Szene	Kantenpaare		Laufzeit [s]	
iam08000000A	143	41	3	1
iam10000000B	67	30	2	1
iam08101100A	421	181	11	5
iam05091000A	480	242	14	5
iam05070810D	772	372	32	14

Tabelle 5: Aufwandvergleich des Erkennungsschrittes.

Tabelle 5 stellt für jede Szene die Anzahl Kantenpaare sowie die Laufzeit dar. Jede Spalte enthält dabei links das Resultat der Verarbeitung mit Kanten *vor* der Interpretation und rechts mit Kanten *nach* der Interpretation. Diese Werte dokumentieren den Einfluss der verwendeten Kanten auf die Laufzeit. Ohne Interpretationsschritt werden mehr Kanten, die aber zum Teil keine Informationen über die Objekte enthalten, verarbeitet. Dadurch ist die Anzahl Kantenpaare wie auch die gesamte Laufzeit höher als bei der Erkennung nach der Interpretation. Bei diesem Erkennungsverfahren werden allerdings die Kantentypen, d.h. die Klassifizierung der Schatten- und Intensitätskanten, nicht berücksichtigt und fließen deshalb nicht in die Resultate ein.

⁵Die Zeiten wurden auf einer SUN SPARC station IPC gemessen, wobei die Gesamtzeit nur als ganzzahliger Wert in Sekunden ausgegeben wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das *kodierte Lichtverfahren* zur Generierung von Tiefenbildern arbeitet nach dem Prinzip der Triangulation. Da Projektor und Kamera in einer wählbaren Entfernung (*displacement*) positioniert sein müssen, treten in den Tiefenbildern wie auch in den korrespondierenden Grauwertbildern stets Schatten (*missing parts*) auf. Bei komplexen Szenen mit mehreren Objekten können ausserdem Verdeckungen sowie Schattenwürfe auf dahinterliegende Objekte auftreten. Kanten können mit Hilfe des Tiefenbildes klassifiziert werden. Schattenbegrenzungen werden dabei als *Schattenkanten*, innerhalb von Schattenregionen detektierte Kanten als *Intensitätskanten* klassifiziert.

Das in diesem Bericht beschriebene Verfahren erlaubt es nun, eine Unterscheidung der Schattenkanten in *geometrische* und *nicht-geometrische* Kanten vorzunehmen, sowie bei geometrischen Kanten eine Klassifizierung durchzuführen. Ausserdem werden die Intensitätskanten, über die wegen der fehlenden Abstandswerte im Tiefenbild keine räumlichen Informationen vorliegen, klassifiziert und gegebenenfalls lokalisiert. Angestrebt wird eine zuverlässige räumliche Beschreibung der Szene durch geometrische Kanten. Als Eingabedaten wurden die extrahierten und integrierten Kanten aus [Rob93] sowie das Tiefenbild verwendet.

Im ersten Teil der Arbeit wird aus integrierten Kanten ein *attributierter Bildgraph* der Szene erstellt. Durch Verlängern und Schneiden der Kanten werden zuerst die Eckpunkte der Linienzeichnungen extrahiert und zusammen mit den inzidenten Kanten zu einem Graphen verkettet. Die Attributierung des Bildgraphen besteht aus der Klassifizierung der Eckpunkte und der inzidenten Kanten. Die Knotentypen werden durch den *Knotengrad*, d.h. der Anzahl der inzidenten Kanten, sowie dem *maximalen Zwischenwinkel* definiert. Die Qualität der Eckenextraktion bzw. Eckenklassifikation hängt dabei stark von den detektierten Kanten ab. Insbesondere Objektflächen die fast koplanar zur Kamera liegen liefern im allgemeinen schlechte Kanten und deshalb zum Teil falsche Eckentypen. Durch die Angabe eines Vertrauensmasses aufgrund der lokalen Abstandsverteilung lässt sich eine robustere Eckenklassifizierung vorstellen.

Der Bildgraph, der in der Bildebene erzeugt wurde, wird im nächsten Schritt in einen *Raumgraphen* transformiert, d.h. die Objektecken und Kantenendpunkte des Graphen werden im Raum lokalisiert. Die Lokalisierung der Kantenpunkte gestaltet sich vor allem auf Sprung- und Schattenkanten aufgrund von Ungenauigkeiten schwierig. Durch die verwendete Clustering-Methode konnten die Tiefenwerte jedoch meist zuverlässig ermittelt werden. Durch die Generierung von *abstandskonsistenten Graphknoten* können pathologische Fälle von Knotenbildung aufgespalten und der Raumgraph in seine Objekte zerlegt werden. Die Zerlegung in Objekte versagt einzig, falls sich die Objekte berühren oder falls sie durch Kanten, aufgrund von Störungen im Tiefenbild, verbunden sind.

Im dritten Teil erfolgt die *Interpretation* der Schatten- und Intensitätskanten durch folgende Schritte. Zuerst werden Projektionen von Objektecken durch die

Verifizierung der Projektionsstrahlen erkannt und als nicht-geometrische Schattenkanten klassifiziert. Anschliessend werden Interpretationsregeln iterativ auf Knotenkonfigurationen angewendet. Zuletzt wird die Lokalisierung von Intensitätskanten durchgeführt, die bei kollinearen Kanten durch Interpolation erfolgt. Die Erweiterung der Lokalisierung könnte durch die Einführung von Heuristiken, beispielsweise über die Parallelität von Kanten, erfolgen. Die Schritte *Verifizierung von Schattenprojektionen* und das *iterative Interpretationsverfahren* werden dabei ergänzend angewendet, d.h. jeder Schritt liefert seine Resultate unabhängig vom anderen. Während der Erstgenannte fast alle nicht-geometrischen Kanten eliminiert, klassifiziert der zweite Schritt vor allem die geometrischen Schattenkanten und eliminiert nicht-geometrische Kanten, die von schattenerzeugenden Knoten ausgehen. Inkonsistenzen werden vom iterativen Interpretationsverfahren nur erkannt, wenn einer Kante aufgrund der Knotenkonfigurationen in ihren beiden Endpunkten im gleichen Iterationsschritt verschiedene Kantentypen zugewiesen werden sollen. Eine Erweiterung des Verfahrens wäre ein Ansatz mit Rückverfolgung (*back tracking*). Allerdings tritt dann das Problem der Konvergenz bzw. Terminierung auf.

Im letzten Teil der Arbeit werden einige *Nachverarbeitungsschritte* des Raumgraphen und die Darstellung der Objekte durch Flächen und Kanten beschrieben. Aufgrund ihrer räumlichen Lage werden Kanten bis zu Objektecken verlängert oder verdeckte Eckpunkte berechnet.

Das System wurde an Szenen mit einem oder mehreren komplexen Polyedern getestet. Da keine Einschränkungen bezüglich der Lage der Objekte gemacht wurden, traten neben Schattenregionen auch Verdeckungen sowie pathologische Fälle von Eckenbildungen auf. Durch die Klassifizierung von geometrischen Schattenkanten können zuverlässigere Angaben über die Ausdehnung von überdeckten bzw. überdeckenden Objektflächen gemacht werden. Durch das Entfernen von nicht-geometrischen Schattenkanten wird die Anzahl Kanten in einer Szene vermindert, was die Effizienz eines nachfolgenden Erkennungsschrittes erhöht.

Literaturverzeichnis

- [ABWa] ABW Automatisierung und Bildverarbeitung Dr. Wolf. *Betriebsanleitung zum Linienprojektor LCD 320*.
- [ABWb] ABW Automatisierung und Bildverarbeitung Dr. Wolf. *PCCLA — Benutzerhandbuch für die PC-basierte Implementierung des codierten Lichtansatzes*.
- [BT88] R.D. Boyle and R.C. Thomas. *Computer Vision: A First Course*. Blackwell Scientific Publications, 1988.
- [Clo71] M.B. Clowes. On seeing things. *Artificial Intelligence*, 2:79–116, 1971.
- [DH73] R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley-Inter-science, New York, 1973.
- [Eve93] B.S. Everitt. *Cluster Analysis*. Edward Arnold, third edition, 1993.
- [FL92] M.A. Fischler and Y.G. Leclerc. Recovering 3-D wire frames from line drawings. In *DARPA Image Understanding Workshop*, pages 635–653, 1992.
- [Guz68] A. Guzman. Decomposition of a visual scene into three-dimensional bodies. *AFIPS Proceedings of Fall Joint Computer Conference*, 33:291–304, 1968.
- [GZ91] K.M. Gupta and X.M. Zhu. Extracting polyhedral models from a range image: A hybrid approach. Technical Report CSS-IS-TR 91-10, Center for Systems Science. Simon Fraser University, 1991.
- [GZ92] K.K. Gupta and X.M. Zhu. Extracting b-rep models of visible surfaces from a range image: A hybrid approach. In *2nd International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision*, volume 1, pages CV 6.8.1–6.8.5, September 1992.
- [Her85] M. Herman. Generating detailed scene descriptions from range images. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 426–431, 1985.
- [Huf71] D.A. Huffman. Impossible objects as nonsense sentences. In *Machine Vision*, volume 6, pages 295–323. Edinburgh University Press, 1971.
- [JMB94] X.Y. Jiang, U. Meier, and H. Bunke. Scale-invariant polyhedral object recognition using fragmentary edge segments. In *12th ICPR, Jerusalem*, pages 850–854, 1994.