

Ein kantenorientierter Ansatz zur Integration von Grauwert- und Tiefenbildern

Roland Robmann

Institut für Informatik und angewandte Mathematik

Universität Bern

e-mail: robmann@iam.unibe.ch

13. September 1993

Zusammenfassung

In diesem Bericht wird ein kantenorientiertes Verfahren beschrieben, das Grauwert- und Tiefenbilder von komplexen Polyederszenen integriert, um die Merkmalextraktion zu verbessern. Ein Tiefensensor, der nach dem Prinzip des *kodierten Lichtansatzes* arbeitet, erzeugt von einer Szene jeweils ein Grauwert- sowie ein Tiefenbild, die sich in den Bildpunkten entsprechen (*korrespondieren*). Aus diesen beiden Bildern werden unabhängig voneinander Kanten detektiert, zerlegt und klassifiziert. In einem zweistufigen Integrationsverfahren werden die Kanten aus dem Grauwertbild durch die Kanten aus dem Tiefenbild ergänzt (*ergänzende Fusion*). An einer Sammlung von rund zwanzig Szenen wird die Robustheit dieses Verfahrens getestet.

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.

**An Edge Oriented Approach to Grey Level and Range Image
Integration**

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 1.1 | Problemstellung | 4 |
| 1.2 | Modelle zur Integration von Grauwert- und Tiefenbildern | 4 |
| 1.3 | Integrationsansatz | 6 |
| 2 | Tiefenbildgenerierung | 7 |
| 2.1 | Übersicht | 7 |
| 2.2 | Messprinzip des kodierten Lichtverfahrens | 7 |
| 2.3 | Tiefensensor und Verarbeitungssoftware | 8 |
| 2.4 | Koordinatentransformation | 9 |
| 2.5 | Bildmaterial | 10 |
| 2.6 | Geometrische Randbedingungen | 12 |
| 2.7 | Glättung von Tiefenbildern | 13 |
| 3 | Kantenorientierte Integration | 14 |
| 3.1 | Kantentypen | 17 |
| 3.2 | Merkmalextraktion | 19 |
| 3.2.1 | Kantendetektion in Grauwertbildern | 19 |
| 3.2.2 | Sprungkantendetektion in Tiefenbildern | 22 |
| 3.2.3 | Schnittkantendetektion in Tiefenbildern | 25 |
| 3.2.4 | Konturverfolgung und Kantenerlegung | 29 |
| 3.2.5 | Kantenklassifizierung | 32 |
| 3.3 | Merkmalintegration | 35 |
| 4 | Resultate | 40 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick | 44 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 44 |
| 5.2 | Ausblick | 45 |
| A | Bilder und Resultate | 47 |
| | Literaturverzeichnis | 90 |

1 Einleitung

Zu den Aufgaben eines Sichtsystems, z.B. für den Einsatz in der Robotik, gehört die *Erkennung* und *Lokalisierung* von Objekten. Als Eingabedaten werden oft digitalisierte Grauwertbilder benutzt, die von einer Videokamera aufgenommen und anschliessend quantisiert wurden. Da die zu erkennenden Objekte im allgemeinen eine dreidimensionale Form haben, müssen diese Informationen aus den Grauwertbildern extrahiert werden. Die Interpretation eines einzigen Szenenbildes stellt oft eine Aufgabe mit zuwenig Einschränkungen (*highly underconstrained*) dar. Durch den Einsatz und die Verknüpfung von mehreren Bildern kann jedoch eine Informationszunahme erzielt werden. Eine Reihe von Verfahren wurde entwickelt, um dieses Problem durch den Einsatz von mehreren Grauwertbildern zu lösen. Sie lassen sich unter dem Begriff *shape from X* zusammenfassen, wobei *X stereo, motion, shading, texture*, usw. bedeuten kann. Die Entwicklung von leistungsfähigen und erschwinglichen Sensoren, welche andere physikalische Grössen messen als die Intensität des reflektierten Lichtes, ermöglicht deren Einsatz in Erkennungsaufgaben.

Einzelsensorsysteme lassen sich in folgende Kategorien unterteilen [Rac91]: *optische, entfernungsmessende* und *taktile* Systeme. Die erfassten Messgrössen unterscheiden sich im allgemeinen sowohl durch Messbereich, Auflösung und Messfrequenz als auch durch die erzeugten Datenformate. Ein *Multisensorsystem* besteht aus dem Zusammenwirken von Einzelsensorsystemen, entworfen für einen konzipierten Zweck. Arbeiten zum Thema Multisensorik wurden einerseits theoretisch für allgemeine Systeme gemacht, andererseits konzeptuell für konkrete Systeme mit bestimmten Anwendungsgebieten erarbeitet und implementiert. So wurden *Fusionsmodelle* entwickelt, welche die Integration der verschiedensten Sensortypen beinhalten: die Integration von visueller und taktile Wahrnehmung [AB85, All88, Sta88], die Integration von thermischer und sichtbarer Wahrnehmung [Agg90, ANA90] sowie die Integration von Tiefen- und Grauwertbildern [GMA83, MBCA85, Wei89, WL90].

Der Ausdruck *Sensorfusion* wird in der Literatur vieldeutig verwendet. Krotkov [Kro89] unterscheidet zwischen *Fusion* (Zusammenfassung von Sensordaten der gleichen physikalischen Einheit zu einem einzigen Wert, z.B. die Temperaturen eines Thermometers und eines Infrarotbildes zu einer einzigen Temperatur zusammenfassen), *Integration* (ein bestimmtes Verfahren, um Messwerte zu kombinieren, z.B. den Durchschnitt aus gemessenen Temperaturen bilden) und *Kooperation* (eine aktive Verbindungs-Operation von verschiedenen physikalischen Massen, z.B. einen taktile Sensor aufgrund von extrahierten Merkmalen aus Grauwertbildern steuern). In dieser Arbeit sollen die Begriffe *Fusion* und *Integration* äquivalent verwendet werden. Sie bezeichnen einen Vorgang, der Bilder — möglicherweise von verschiedenen Sensoren generiert — oder daraus extrahierte Merkmale kombiniert. Ausserdem werden die Begriffe Tiefenbild (für Abstandsbild, *range image*) sowie Grauwertbild (für Intensitätsbild, *grey level image, intensity image*) einheitlich verwendet.

1.1 Problemstellung

Durch den Einsatz eines Tiefensensors lassen sich Szenen räumlich vermessen. Überdies können dreidimensionale Informationen aus Tiefenbildern "direkt" extrahiert werden, was deren Einsatz für die Objekterkennung rechtfertigt. Da aber (i) Störungen in Tiefenbildern nicht zu vermeiden sind, und (ii) gewisse Merkmale in Grauwertbildern unter bestimmten Umständen besser zu detektieren sind, ist eine Integration beider Bilder sinnvoll.

Der verwendete Tiefensensor, der nach dem kodierten Lichtverfahren (Kapitel 2.2) arbeitet, liefert für jede Szene ein korrespondierendes Grauwert- und Tiefenbild. Die Integration von Grauwert- und Tiefenbildern soll zu einer Verbesserung der Merkmalextraktion in Bildern führen, die komplexe Szenen mit mehreren Polyedern darstellen, wie dies in industriellen Abläufen der Fall sein kann.

1.2 Modelle zur Integration von Grauwert- und Tiefenbildern

Da gewisse Generierungstechniken von Tiefenbildern sehr langsam sind und zudem unabhängig von der schnellen Gewinnung von Grauwertbildern ablaufen, wurden Verfahren zur *sukzessiven* oder *geleiteten* Erfassung von Szenen entwickelt [MBCA85, LYC92]: Aufgrund des Grauwertbildes bzw. der daraus extrahierten Merkmale wird nur eine kleine Anzahl Tiefenwerte berechnet und verarbeitet.

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Generierungstechnik (Kapitel 2) erzeugt simultan ein ganzes Grauwert- und Tiefenbild, es steht also die gesamte Grauwert- und Tiefeninformation über die Szene zur Verfügung. Nachfolgend werden deshalb nur diejenigen Fusionsmodelle beschrieben, die diesem Sachverhalt Rechnung tragen. Bestehende Modelle zur Fusion von Grauwert- und Tiefenbildern lassen sich grob in zwei Klassen unterteilen: Einerseits können auf der *Bildebene* die extrahierten Merkmale (z.B. Kantenpunkte) in jedem Bildpunkt integriert werden, andererseits können auf der *Symbolebene* die extrahierten Merkmale (z.B. Kantenstücke) klassifiziert, interpretiert und dann wissensbasiert weiterverarbeitet werden.

Modelle der *Fusion auf der Bildebene* verwenden als extrahierte Merkmale *Kanten* oder *Regionen*. Gil, Mitiche und Aggarwal [GMA83] binarisieren die detektierten Kantenpunkte aus beiden Bildern und integrieren diese durch eine logische Verknüpfung (lokales oder globales AND). Das Mass für die erwartete Zuverlässigkeit eines Kantenpunktes fließt dabei in die Binärisierungsschranke ein, die für jedes Bild verschieden sein kann, innerhalb des Bildes aber konstant ist. Bei Chu, Nandhakumar und Aggarwal [CNA90] erhalten die Kantenpunkte vom Kantenoperator ein Qualitätsmass, das innerhalb des Bildes die Zugehörigkeit zu einer Kante darstellt. Die Integration erfolgt durch Gewichtung der Bildtypen und Linearkombination der korrespondierenden Kantenpunkte. Während die Quantisierung des Kantenoperators durch Operatoren- und Parameterwahl beeinflusst werden kann, erfolgt die Bestimmung der Gewichte für die Bildtypen heuristisch. Ein anderes Modell

[CNA90] verwendet segmentierte Bilder. Die markierten Regionen werden mittels Durchschnittsbildung integriert, wobei jede Kombination der Marken als neue Region betrachtet wird. Bei dieser Methode wird die erwartete Qualität (Vertrauen) der Segmentierung nicht berücksichtigt, die Bilder werden gleichgewichtet. Asar *et al.* [ANA90] verwenden die *Pyramidentchnik*, um Grauwertbilder und thermische Bilder zu integrieren.

Bei der *Fusion auf der Symbolebene* werden die extrahierten und gegebenenfalls bereits fusionierten Merkmale in *Regionen* (Oberflächen), *Kanten* und eventuell *Eckpunkte* unterteilt und weiter klassifiziert bzw. symbolisch dargestellt. Nach der Segmentierung des Bildes können aus den Regionen Deskriptoren wie Oberflächennormalen, Parameter der approximierten Oberflächenfunktion, Oberflächenkrümmungen, usw. hergeleitet werden. Die Oberflächenform kann aus Tiefenbildern direkt extrahiert werden, aus Grauwertbildern ist dies nur mit komplexen Verfahren, wie beispielsweise dem *shape from shading* [Hor77], möglich. Für eine Fusion wird angestrebt, die Forminformationen aus beiden Bildern zu erhalten und zu vergleichen. Wei [Wei89, WL90] untersucht die segmentierten Regionen durch eine "globale" Krümmungsschätzung auf Inkonsistenz: Unstetigkeiten in der Krümmung auf einem Netz von Prüfpunkten deuten auf eine nichtdetektierte Kante. Sind ausserdem Kantentyp und Kantenverlauf des Randes eines Bereichs bekannt, kann die Bereichskrümmung einfacher aus Hypothesen aufgrund der Kontur in den Bereichsecken hergeleitet, bzw. können Inkonsistenzen detektiert werden. Die Integration der Bildtypen kann bereits bei der *Kantenverfolgung* (*edge following*) erfolgen: Kantenpunkte auf Geraden oder Kurven werden verfolgt, um kleine Lücken in Kanten zu füllen oder um kleine Kantenzüge zu löschen [Shi87, Wei89]. Kantenstücke können durch bekannte *Primitive* (z.B. Gerade, Kreis) mittels der Methode der kleinsten Quadrate oder Hough-Transformation approximiert und interpretiert werden, um dadurch in einer Struktur dargestellt zu werden [MBCA85]. Eine wirkungsvolle Interpretationsmethode ist das *Linienzeichnen* (*line drawing*): Huffman [Huf71] und Clowes [Clo71] teilten die Kanten von trihedralen Polyederszenen in *überdeckend*, *konkav* oder *konvex* ein, um physikalische Eigenschaften von Kanten darzustellen. Dabei ist die Anzahl der möglichen Konfigurationen von Eckpunkten (Zusammentreffen von Kanten oder Knick im Kantenverlauf) sehr klein. Wurde eine Liste der möglichen Eckpunkte (*junction dictionary*) erstellt, besteht das Zeichnen von möglichen Linien im Finden von konsistenten Zuweisungen von Labels (z.B. durch *Relaxation*), d.h. alle resultierenden Eckpunkte kommen in dieser Liste vor. Eine Erweiterung auf Bilder mit Schatten und Rissen wurde von Waltz [Wal75] erstellt, eine Erweiterung auf gekrümmte Objektflächen von Malik [Mal87] mathematisch beschrieben. Wichtig für die Darstellung der Objekte durch Graphen sind Eckpunkte, definiert als Zusammentreffen mehrerer Kanten oder Unstetigkeit ("Knick") im Kantenzug: Kasvand [Kas88] berechnet die Eckpunkte analytisch aus den Schnittpunkten von Kanten, welche wiederum durch den Schnitt von Flächen bestimmt wurden. Die Qualität (Genauigkeit) der Eckpunkte kann man in diesem Fall durch den Winkel definieren, unter welchem sich die Kanten schneiden. Die Eckendetektion auf

Kantenzügen erfolgt durch Krümmungsapproximation und Detektion von Unstetigkeiten. In Grauwertbildern beschränkt sich die Analyse auf 2D-Projektionen: Teh und Chin [TC89] beschreiben Methoden zur Bestimmung der Krümmung von Kurvenstücken und zur Detektion von dominanten Punkten. In Tiefenbildern können Krümmungsunstetigkeiten auf 3D-Kurven detektiert werden: Godin und Levine [GL89] approximieren Kurvenstücke beidseits eines Kantenpunktes durch Geraden, der Zwischenwinkel der Geraden wird als Kriterium für die Existenz eines Eckpunktes angenommen.

1.3 Integrationsansatz

Der entwickelte kantenorientierte Integrationsansatz verwendet Kanten, die unabhängig voneinander im Grauwert- und Tiefenbild detektiert und klassifiziert wurden, um sie auf der Symbolebene zu fusionieren. Aufgrund der *Korrespondenz* der beiden Bildtypen lassen sich entsprechende Bildpunkte direkt miteinander vergleichen. Die Integration erfolgt durch Überlagerung der Kantenbilder, wobei das Problem von sich entsprechenden Kanten durch Löschen der Kante aus dem sekundären Kantenbild gelöst wird. Die Einteilung in *primäre* (zuverlässigere) und *sekundäre* (weniger zuverlässige) Kantenbilder erfolgt aufgrund der erwarteten und beobachteten Eigenschaften der Kantentypen in den jeweiligen Bildtypen. Durch die Klassifizierung der Kanten mit Hilfe des Tiefenbildes — was im Falle der Kanten aus dem Grauwertbild bereits einer *ergänzenden Fusion* entspricht — können *geometrische* und *nichtgeometrische Kanten* (siehe Kapitel 3.1) erkannt und ausgeschieden werden, was eine nachfolgende Kanten- und Eckeninterpretation vereinfacht.

2 Tiefenbildgenerierung

2.1 Übersicht

Systeme zur flächendeckenden Berechnung der Abstandswerte einer Szene lassen sich gemäss ihrer Arbeitsweise in folgende Kategorien einteilen:

- Die *passive* Generierung von Tiefenbildern beruht auf der Analyse von Grauwertbildern: Die *Stereoskopie* verwendet Bilder einer Szene, die aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen wurde, wobei die Distanz durch Triangulation von korrespondierenden Szenenpunkten berechnet werden kann. Hierbei stellt sich jedoch das Korrespondenzproblem: (i) Nicht alle Teile der Szene müssen immer aus beiden Blickwinkeln sichtbar sein, und (ii) das Matching von korrespondierenden Punkten ist nicht immer möglich.
- Die *aktive* Generierung verwendet mindestens eine aktive Komponente zur direkten Abstandsmessung. Die kommerziell erhältlichen Systeme arbeiten im wesentlichen nach einem der folgenden beiden Prinzipien [BNA88]:
 - Systeme, welche mittels *time of flight* arbeiten, senden ein Signal (Laser, Ultraschall) aus, das reflektiert und vom Empfänger, der sich sehr nahe beim Sender befindet, empfangen und verarbeitet wird. Aus der Zeit zwischen Senden und Empfangen des Impulses oder der Phasenverschiebung des Signals lässt sich der zurückgelegte Weg berechnen.
 - Beim Prinzip der *Triangulation* beleuchtet ein Projektor die ganze Szene, während eine Kamera in einem bekannten Abstand zum Projektor die Szene aufnimmt. Aus der Beleuchtung der Szenenpunkte lassen sich die Bildpunkte identifizieren und der Abstand durch Triangulation berechnen. Eine effiziente Triangulationstechnik stellt das *kodierte Lichtverfahren* dar. Dabei wird die ganze Szene durch wenige Lichtmuster kodiert und identifiziert.

2.2 Messprinzip des kodierten Lichtverfahrens

Das wesentliche Merkmal des kodierten Lichtverfahrens gegenüber anderen Triangulationstechniken ist die Kodierung der ganzen Szene durch wenige Lichtmuster (Abbildung 1): Eine zeitlich aufeinanderfolgende Projektion von N *Gray-kodierten* Streifenmustern in die Szene ermöglicht die Identifikation von 2^N unterschiedlichen Projektionsrichtungen [Wah86]. Zur dreidimensionalen Vermessung der Szene werden die Muster mit einer abseits vom Projektor aufgestellten Kamera beobachtet. Die so gewonnenen Grauwertbilder werden binärisiert und aus dem N -stelligen Kode in jedem Bildpunkt wird die Beleuchtungsrichtung des Projektors zu diesem Szenenpunkt eindeutig beschrieben. Bei bekannter Position von Kamera und Projektor lassen sich die 3D-Koordinaten der beobachteten Szenenpunkte durch Triangulation

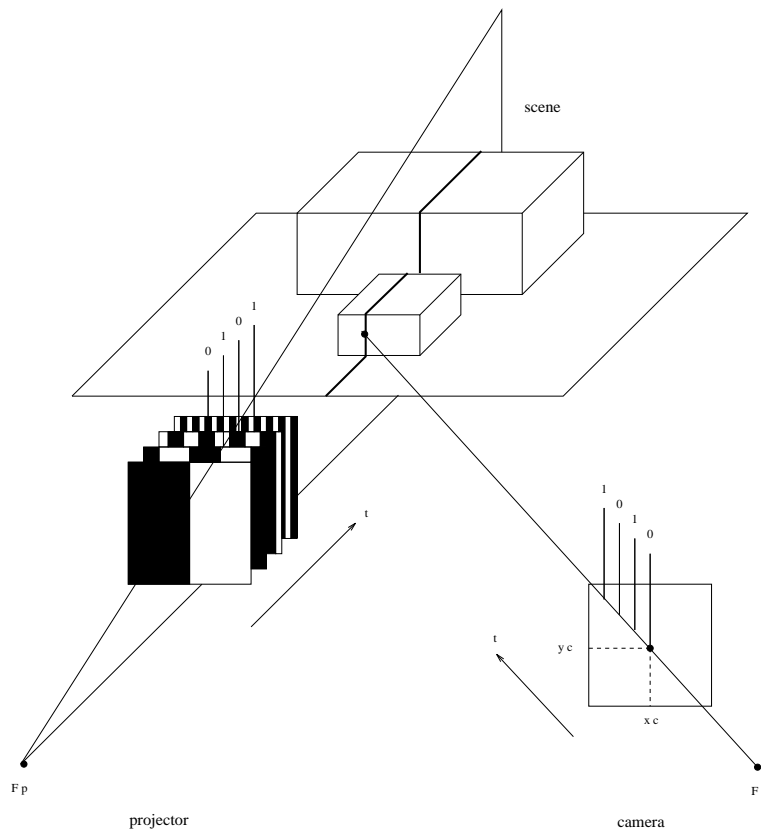


Abbildung 1: Prinzip des kodierten Lichtverfahrens

berechnen. Der Vorteil dieses Systems liegt in der schnellen und robusten Gewinnung von Tiefenbildern, der Nachteil — wie bei fast allen optischen Verfahren — in der Beschränkung auf nichtspiegelnde, nichttransparente und helle Objekte.

2.3 Tiefensensor und Verarbeitungssoftware

Der Tiefensensorsensor LCD320 von ABW [ABWa], der für das Projekt verwendet wurde, arbeitet nach dem Prinzip des kodierten Lichtverfahrens, wobei 320 Lichtstreifen — durch 9 Lichtstreifenmuster kodiert — angesprochen werden können. Zusammen mit dem Softwarepaket PCCLA [ABWb] zur 3D-Vermessung von Szenen liefert dieses System je ein Paar korrespondierender Grauwert- und Tiefenbilder mit einer Auflösung von 512×512 Bildpunkten. Die Korrespondenz ist eine sehr wichtige und nützliche Eigenschaft, lassen sich doch dadurch entsprechende Szenenpunkte aus dem Grauwert- und dem Tiefenbild direkt miteinander vergleichen. Die Daten werden als 8-Bit Werte gespeichert, eine Kalibrierungsdatei ermöglicht jedoch die Transformation der Tiefendaten in das Weltkoordinatensystem (Kapitel 2.4).

Als Weltkoordinatensystem kann das Kamera- oder ein Referenzkoordinatensystem gewählt werden, wobei für die eigenen Aufnahmen jeweils das Kamerakoordinatensystem verwendet wurde.

2.4 Koordinatentransformation

Das extrahierte Tiefenbild wird als 8-Bit-Matrix der Grösse 512×512 abgespeichert. Die Umrechnung der Bildkoordinaten in die Weltkoordinaten des Kamerakoordinatensystems (Nullpunkt im Brennpunkt der Kamera) erfolgt mit Hilfe der Kalibrierungsdatei. Verwendet werden daraus die virtuelle Brennweite f_k , die Verschiebung zum Arbeitsbereich *offset* sowie der Skalierungsfaktor *scal*. Der Skalierungsfaktor $c = 1.4508$, das Verhältnis von Höhe zu Breite eines Bildpunktes, wurde aus dem Handbuch übernommen und deckt sich mit eigenen Messungen. Für die Koordinatentransformation muss zuerst das *Bild-Koordinatensystem* (x_b, y_b, z_b) in das *virtuelle Kamerakoordinatensystem* (x_k, y_k, z_k) , anschliessend in das *Szenen-Koordinatensystem* (x_0, y_0, z_0) transformiert werden. Da es sich bei Letzterem nicht um ein rechtshändiges Koordinatensystem handelt, werden die Tiefenwerte zusätzlich so umgerechnet, dass sie die Distanz von der hinteren Arbeitsbereichsgrenze aus angeben (x_0, y_0, z'_0) . Die Darstellung der Tiefenwerte bezüglich dem Kamerakoordinatensystem ist aus der Abbildung 2 ersichtlich.

Bei der Umrechnung der *Bild-Koordinaten* (x_b, y_b, z_b) (Ursprung in der Bildecke oben links, x-Achse nach rechts, y-Achse nach unten) in die *virtuellen Kamerakoordinaten* (x_k, y_k, z_k) (Ursprung in der Bildmitte, x-Achse nach rechts, y-Achse nach oben) wird lediglich das Koordinatensystem neu definiert, wobei die Umrechnung von der Bildgrösse abhängt.

Umrechnung des Bildpunktes $P_b = (x_b, y_b, z_b)$ in den Kamerapunkt $P_k = (x_k, y_k, z_k)$:

$$\begin{aligned} x_k &= x_b - 255 && 255: \text{ halbe Bildbreite} \\ y_k &= \frac{255 - y_b}{c} && 255: \text{ halbe Bildhöhe} \\ z_k &= |f_k| \end{aligned}$$

Umrechnung des Kamerapunktes $P_k = (x_k, y_k, z_k)$ in den Szenenpunkt $P_0 = (x_0, y_0, z'_0)$:

$$\begin{aligned} z_t &= \frac{z_b}{scal} \\ z'_0 &= \frac{255 - z_b}{scal} && 255: \text{ max. Tiefenwert} \\ z_0 &= z_t + \text{offset} \\ x_0 &= \frac{x_k z_0}{|f_k|} \\ y_0 &= \frac{y_k z_0}{|f_k|} \end{aligned}$$

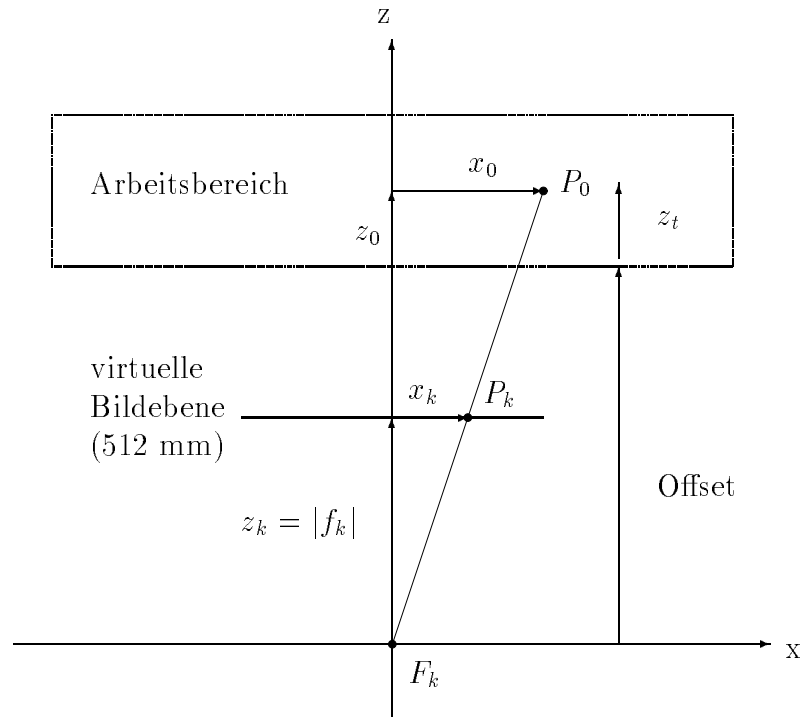


Abbildung 2: Darstellung der Tiefenwerte bezüglich dem Kamerakoordinatensystem

2.5 Bildmaterial

Für dieses Projekt wurde eine Sammlung von rund zwanzig Polyederszenen angelegt, wobei die Szenen bis zu sechs Objekte enthalten. Die Objekte wurden aufgrund von CAD-Modellen konstruiert. Abbildung 3 stellt das Grauwert¹ sowie das Tiefenbild von *iam05070800A* dar, einer typischen Szene mit drei Objekten. Sämtliche Szenen sowie die Resultate der Kantenextraktionen und der Integration sind im Anhang aufgeführt.

¹Um eine bessere Darstellung zu erhalten, wurde das Grauwertbild einer Kontrastverstärkung unterzogen. Für die Verarbeitung des Grauwertbildes wurde das unbehandelte Grauwertbild verwendet.

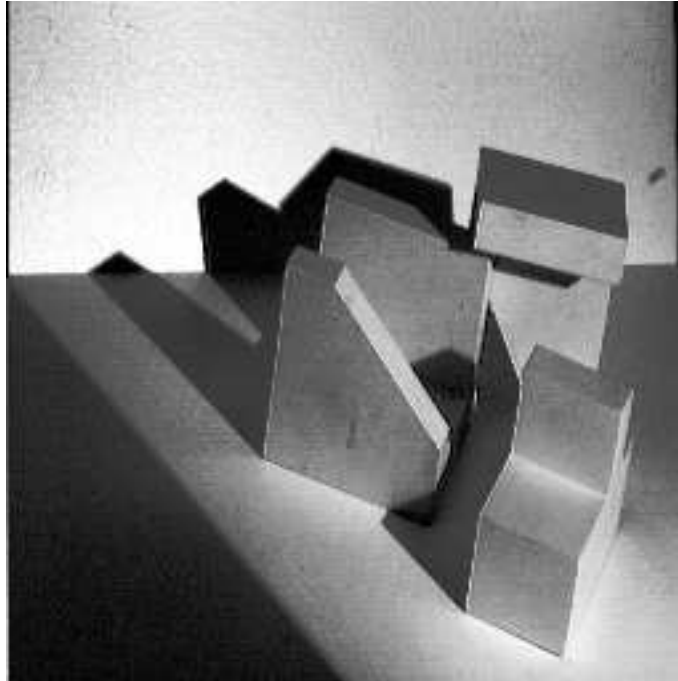


Abbildung 3: Grauwert- (oben) und Tiefenbild (unten) einer Polyederszene mit drei Objekten

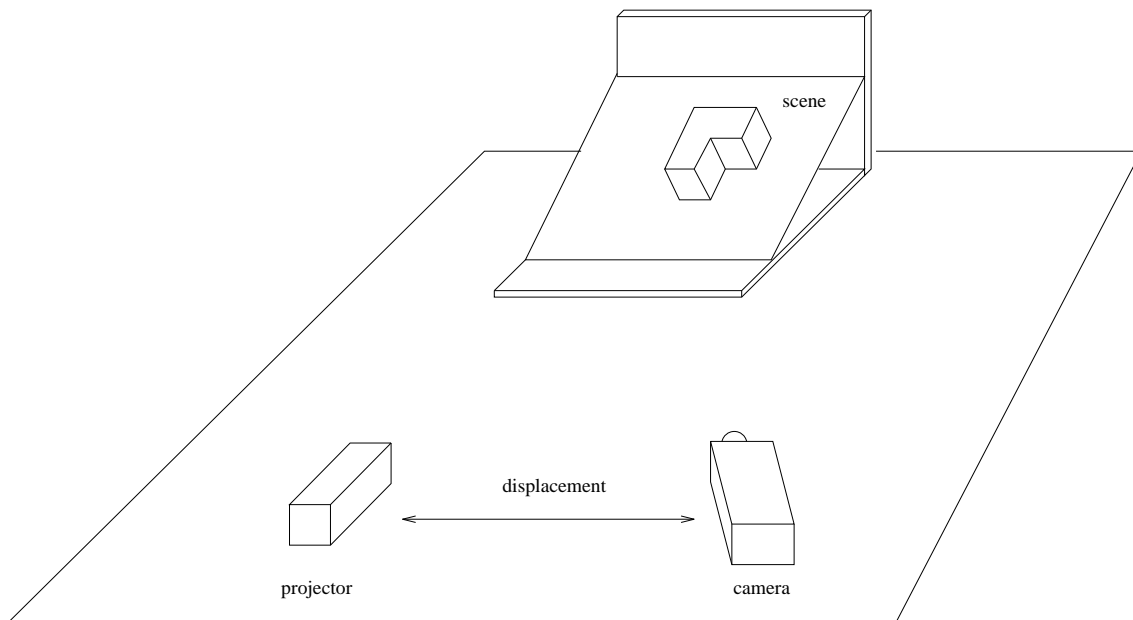


Abbildung 4: Messaufbau

2.6 Geometrische Randbedingungen

Gewünscht sind Aufnahmen von Szenen aus einem *beliebigen Blickwinkel*. Da sich die Kalibrierung von Kamera und Projektor in beliebiger Lage als sehr schwierig gestaltete, wurde eine einfache (horizontale) Anordnung von Kamera und Projektor gewählt, eine *schräge Platte* diente dabei als Boden für die Szene. Abbildung 4 stellt schematisch den verwendeten Messaufbau dar.

Aufgrund des für die Triangulation erforderlichen Abstandes zwischen Projektor und Kamera (*displacement*) treten in den Bildern immer auch Schattenwürfe auf, die im Tiefenbild als nichtdetektierte Gebiete (*missing parts*) markiert werden (vergleiche Abbildung 3). Ein grosser Abstand hat dabei viel Verdeckung, aber auch eine grössere Genauigkeit zur Folge.

Folgende Bedingungen sollten für eine optimale Generierung von Tiefenbildern erfüllt sein:

1. Die Objekt Oberfläche soll möglichst senkrecht zur Achse des Projektors liegen, damit sie optimal beleuchtet wird.
2. Die Objekt Oberfläche soll möglichst senkrecht zur Achse der Kamera liegen, damit sie optimal erfasst werden kann.
3. Diese Punkte sollen für möglichst viele Oberflächen erfüllt sein.

Es ist offensichtlich, dass nie alle Forderungen erfüllt werden können, und dass der Bereich möglicher Positionierungen für gute Tiefenbilder stark eingeschränkt ist.

Da es sich um ein aktives, optisches Verfahren handelt, kann bei mehreren nahe beieinanderliegenden Objekten ausserdem das Problem der Reflexion auftreten: gut beleuchtete Flächen reflektieren ihre Lichtmuster auf benachbarte Flächen und können so den Lokalisierungskode und dadurch den berechneten Abstand verfälschen.

2.7 Glättung von Tiefenbildern

Tiefenbilder enthalten aufgrund von Quantisierungs- und Messfehlern immer Störungen. Durch Glättung sollen diese Störungen eliminiert werden, gleichzeitig aber die Kanteneigenschaften in den Bildern erhalten bleiben. Bei herkömmlichen Filtermethoden wirken sich *Glättungsvermögen* und *Kantenerhaltung* gegenläufig auf die Qualität der bearbeiteten Bilder aus [HAM89]. Neuere Verfahren kombinieren verschiedene Methoden [LN93], um bessere Resultate zu erzielen, verursachen dadurch jedoch einen grösseren Berechnungsaufwand.

Sämtliche in der vorliegenden Arbeit erzeugten Tiefenbilder wurden mit einem 3×3 -Medianfilter geglättet.

3 Kantenorientierte Integration

Die Integration von Grauwert- und Tiefenbildern beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf die Integration von daraus extrahierten Merkmalen. Als mögliche Merkmale kommen Objektflächen, Kanten oder Ecken in Frage, wobei Kanten am günstigsten erscheinen, da (i) die Kantendetektion in Grauwertbildern schon weit erforscht ist und (ii) Kanten aus Tiefenbildern entweder direkt (Sprungkanten) oder über die regionenorientierte Segmentierung² (Schnittkanten) extrahiert werden können. Die Integration von Kanten wiederum kann zwischen Kantenpunkten [GMA83] oder — wie in diesem Ansatz realisiert — bezüglich Kantenstücken, die durch Geraden approximiert wurden, erfolgen. Der implementierte Integrationsansatz gliedert sich wie folgt (Abbildung 5):

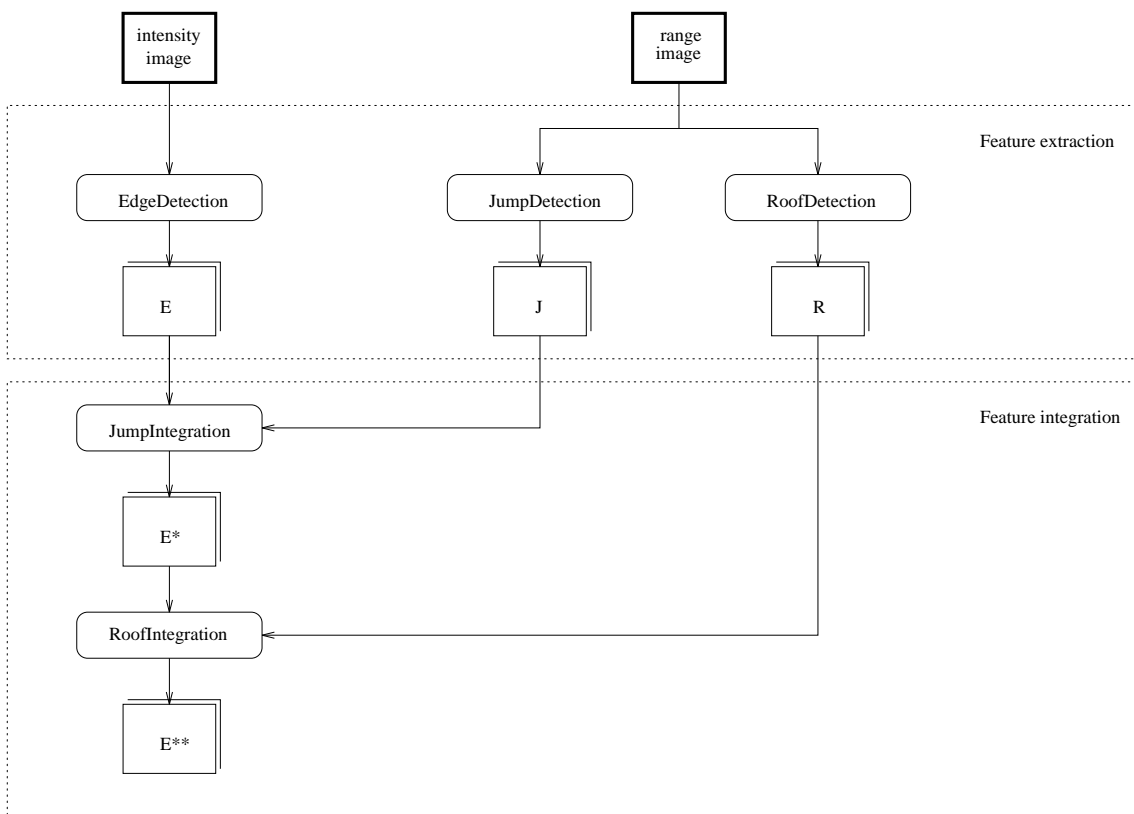


Abbildung 5: Ablaufdiagramm des kantenorientierten Integrationsansatzes

²Da Regionen und Kanten *dual* sind, können Kanten aus der Begrenzung von Regionen gewonnen werden.

1. Im Modul Merkmalsextraktion (*feature extraction*) werden aus dem Grauwert- und Tiefenbild durch geeignete Verfahren Kanten extrahiert und klassifiziert. Die Algorithmen zur Detektion der Kanten sind voneinander unabhängig und können durch andere ersetzt werden, einzig das Format für die Übergabe an das Integrationsmodul muss natürlich übereinstimmen. Dieses Modul wird in Kapitel 3.2 vorgestellt.
2. Im Modul Merkmalintegration (*feature integration*) werden die extrahierten Kantenbilder fusioniert: Dem *primären* (zuverlässigeren) Kantenbild werden diejenigen Kanten aus dem *sekundären* (weniger zuverlässigen) Kantenbild überlagert, deren Kantenpunkte nicht mit dem primären korrespondieren. Durch zweimalige Anwendung dieses Schrittes kann ein Kantenbild erzeugt werden, das durch *ergänzende Fusion* aus den drei Kantenbildern resultiert. Die Beschreibung der Merkmalintegration erfolgt in Kapitel 3.3.

Bevor die Module Merkmalsextraktion und Merkmalintegration genauer beschrieben werden, erfolgt in Kapitel 3.1 eine Vorstellung der Kantentypen.

Zur Beurteilung der Kantendetektions- bzw. Kantenintegrationsverfahren drängt sich eine *quantitative Beschreibung* der Resultate auf. Der einfachste Ansatz bildet eine *Modelldarstellung* der in Kanten zerlegten Szene. Nach jedem Verarbeitungsschritt kann eine *Analyse* der extrahierten Kanten sowie ein Vergleich mit der Modelldarstellung erfolgen. Die *Beschreibung* der Modelldarstellung enthält die Anzahl der Kanten, aufgeschlüsselt nach Kantentypen (zu Kantentypen und Notation siehe Kapitel 3.2.5). Abbildung 6 zeigt eine *Modelldarstellung* der Szene aus Abbildung 3, wobei die drei Objekte *Ushape*, *Tshape* und *Delta* für spätere Hinweise gekennzeichnet wurden. Die *Beschreibung* der Modelldarstellung ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

Die Modelldarstellung und die Modellbeschreibung enthalten nur die für die Verarbeitung sowie für eine allfällige Erkennung relevanten Kanten, d.h. es fehlen die beiden Kanten am Rand des Bildes zwischen Schatten und Boden bzw. Hintergrund.

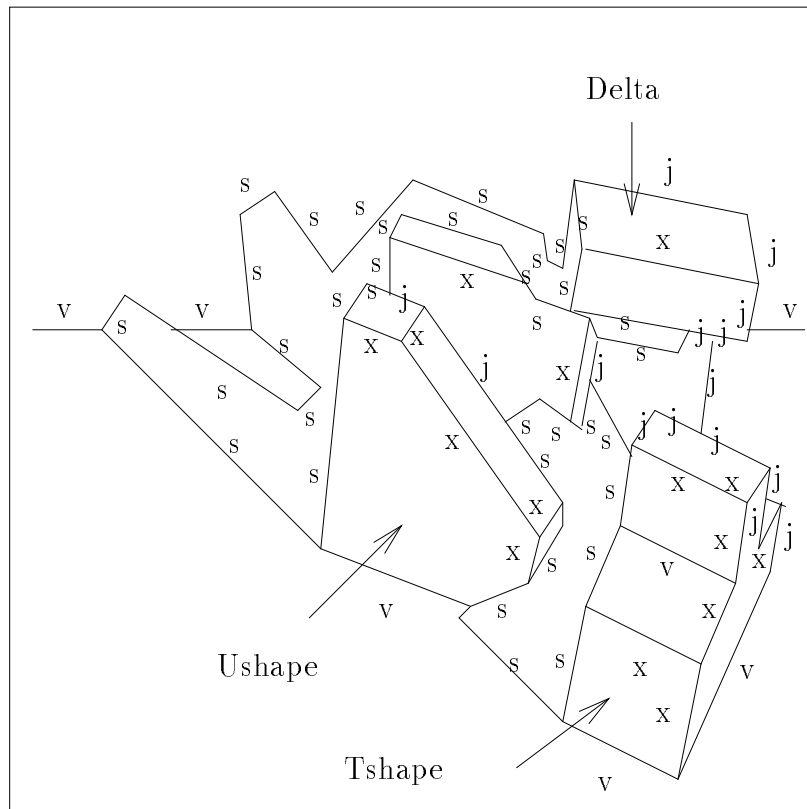


Abbildung 6: Modelldarstellung der Szene

| Kantentyp | Anzahl Kanten |
|-----------------------|---------------|
| Sprungkanten | 15 |
| Schattenkanten | 35 |
| konvexe Schnittkanten | 15 |
| konkave Schnittkanten | 7 |

Tabelle 1: Beschreibung der Modelldarstellung

3.1 Kantentypen

Aufgrund des Messaufbaus beim kodierten Lichtverfahren erzeugt die Beleuchtung der Szene im Grauwert– ebenso wie im Tiefenbild Schatten. Aus beiden Bildern lassen sich durch geeignete Verfahren Kanten extrahieren. Für die Klassifizierung der Kanten sind allerdings noch Informationen über die räumliche Beziehung der Umgebungen der Kanten notwendig. Diese Informationen sind im Tiefenbild enthalten. Die Klassifizierung von Kanten aus dem Grauwert– sowie aus dem Tiefenbild erfolgt deshalb mithilfe des korrespondierenden Tiefenbildes. Die extrahierten Kanten lassen sich in folgende Typen einteilen (Abbildung 7):

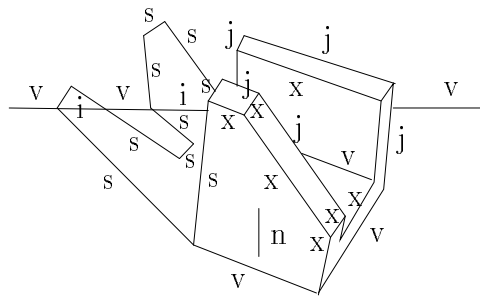


Abbildung 7: Kantentypen

Geometrische Kanten entstehen durch Veränderungen in der Geometrie von Objektoberflächen (*Schnittkanten*) oder beim Übergang von einem Objekt zum Hintergrund bzw. zu einem anderen Objekt (*Sprungkanten*). Geometrische Kanten gliedern sich in folgende Untertypen:

- **Schnittkanten** (*roof edges*, "s") sind Unstetigkeiten in den Oberflächennormalen benachbarter Bildpunkte und lassen sich in **konvexe** (*convex*, "x") und **konkave** (*concave*, "v") Schnittkanten unterteilen.
- **Sprungkanten** (*jump edges*, "j") sind Unstetigkeiten in den Abstandswerten benachbarter Bildpunkte.
- **Intensitätskanten** (*intensity edges*, "i") werden diejenigen Kanten genannt, die in nichtdetektierten Gebieten liegen, aber im Grauwertbild detektiert werden konnten. Es handelt sich dabei um Sprung– oder Schnittkanten, die aber aufgrund der fehlenden Abstandsdaten nicht klassifiziert werden können.
- **Schattenkanten** (*shadow edges*, "s") werden die Begrenzungen der nichtdetektierten Gebiete (*missing parts*), die aufgrund des Abstandes zwischen

Projektor und Kamera entstehen, genannt. Diese Gebiete werden bei der Tiefenbildgenerierung speziell markiert und können deshalb in der Weiterverarbeitung leicht erkannt werden. Falls ein Objekt einen Schatten auf den Hintergrund bzw. auf ein weiteres Objekt wirft, entspricht die Schattenkante zwischen Objektfläche und Hintergrund einer Sprungkante — also einer geometrischen Kante. In Abbildung 8 wurden die geometrischen Schattenkanten mit s_1 markiert.

Nicht-geometrische Kanten können im Grauwertbild durch Veränderung der Reflexionseigenschaften von Objektflächen (Schmutz, Kratzer, Schatten) oder im Tiefenbild durch Messfehler entstehen. Wir unterscheiden zwei Typen solcher Kanten:

- **Falschkanten** (*noedges*, "n") werden diejenigen Kanten genannt, die zwar detektiert oder berechnet wurden, bei der Klassifizierung aber nicht zugeordnet werden konnten (Bsp. Kratzer oder Textur auf Objektfläche).
- **Schattenkanten** (*shadow edges*, "s"): Falls der Hintergrund bzw. eine Objektfläche vom Schatten eines davor liegenden Objektes verdeckt wird, entspricht die Schattenkante zwischen verdeckter Fläche und Schatten einer künstlichen, d.h. nichtgeometrischen Kante. In Abbildung 8 wurden die nicht-geometrischen Schattenkanten mit s_2 markiert.

Bei den Schattenkanten kann es sich also sowohl um geometrische als auch um nicht-geometrische Kanten handeln. Eine Unterscheidung ist *a priori* nicht möglich, durch die Interpretation der Eckentypen aufgrund der zusammenlaufenden Kanten bzw. deren Typen aber ableitbar (Kapitel 5).

Alle Kantentypen, mit Ausnahme der Intensitätskanten, können im Grauwert- und im Tiefenbild auftreten. Die Klassifizierung erfolgt allerdings, wie erwähnt, im Tiefenbild.

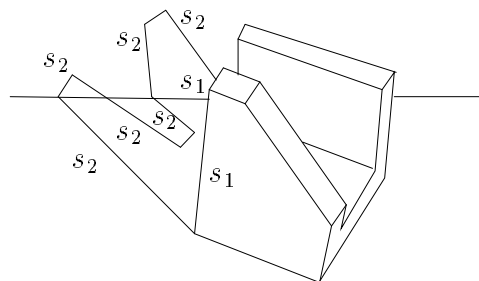


Abbildung 8: Schattenkanten

3.2 Merkmalsextraktion

Wie bereits erwähnt, werden im *Integrationsschritt* Kanten miteinander verbunden. Zu diesem Zweck müssen diese in einer geeigneten Form zur Verfügung stehen: Die extrahierten Kanten sollen, in Geraden zerlegt, übergeben werden. Zusätzliche Schritte in der Extraktion wie die Elimination von *Störungen* und *falschen Kantentypen* soll die Zuverlässigkeit der Kantenextraktion erhöhen. Folgende Verfahren werden nun genauer vorgestellt:

1. Methoden zur Extraktion von Kanten bzw. Kantenpunkten aus Grauwert- und Tiefenbildern werden in den Kapiteln 3.2.1 – 3.2.3 beschrieben.
2. Die Nachverarbeitungsschritte *Konturverfolgung*, *Kantenzerlegung* und *Kantenklassifizierung*, die in den Kapiteln 3.2.1 – 3.2.3 Verwendung finden, werden in den Kapiteln 3.2.4 und 3.2.5 vorgestellt.

3.2.1 Kantendetektion in Grauwertbildern

Kanten in Grauwertbildern sind Kurven, auf welchen sich die Grauwerte oder deren Ableitungen stark ändern. Sichtbare Kanten sind dabei Trennlinien zwischen Objektoberflächen, die unterschiedlich beleuchtet wurden bzw. reflektieren. Nach dem Lambertschen Reflexionsmodell ist der Grauwert proportional zum Skalarprodukt aus Oberflächennormale und Beleuchtungsrichtung. Deshalb kann bei einer "ungünstigen" Lage zweier benachbarter Flächen eine Kante unsichtbar werden oder durch Schattenwurf eine Schattenkante entstehen. Die Kantenextraktion erfolgt normalerweise durch die diskrete Approximation der ersten oder zweiten Ableitung, wobei dann im gefalteten Bild lokale Extrema oder Nulldurchgänge gefunden werden müssen.

Kantenpunktdetektion:

Zur *Detektion von Kantenpunkten* in Grauwertbildern wurde ein Verfahren verwendet, das D. Möri am Institut entwickelt hat [Mö91]: Durch die Kombination von mehrkanaligen Kantenpunktbildern, die durch Canny-Operatoren [Can83] mit verschiedenen Standardabweichungen sowie durch den Gauss-Laplace-Operator [MH80] mit Phantomkantenunterdrückung erzeugt wurden, können Störungen unterdrückt und die Lokalisierung der Ecken verbessert werden. Abbildung 9 zeigt die detektierten Kanten aus dem Grauwertbild von Abbildung 3, detektiert durch eine Kombination von zwei Canny-Operatoren mit $\sigma=1.2$ und 1.7 .

Nachverarbeitung:

1. Die Kantenpunkte werden *verfolgt* und an den Verzweigungspunkten zerlegt.
2. Durch *Geradenapproximation* werden die Kanten in Geraden zerlegt.
3. Kanten kürzer als $T_{EdgeLengthMin}$ werden als *Störungen* interpretiert und gelöscht.

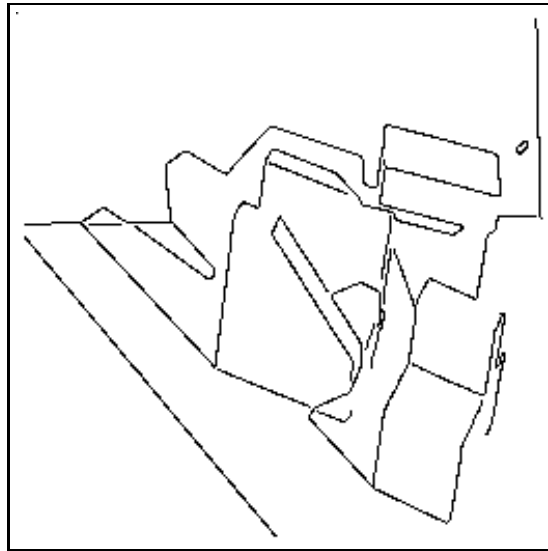


Abbildung 9: Grauwertkanten, extrahiert durch *Canny* mit $\sigma=1.2$ und 1.7

4. Die restlichen Kanten können optional (z.B. zu Kontrollzwecken) in Kantentypen *klassifiziert* werden.

Abbildung 10 zeigt die Kanten aus Abbildung 9 nach der Nachverarbeitung (Zerlegung, Löschen von kurzen Kanten mit $T_{EdgeLengthMin} = 5$).

Beurteilung: *Wie die Analyse der extrahierten Kanten aus dem Grauwertbild (Tabelle 2) bestätigt, liefern das Verfahren von Möri sowie die Nachverarbeitung gute Resultate. Allerdings konnten aufgrund der starken Beleuchtung einige Sprung- und Schnittkanten nicht detektiert werden, weil dort die Grauwertunterschiede zu gering waren. Vor allem diese fehlenden Kanten gilt es im Tiefenbild zu detektieren und anschliessend zu integrieren. Ausserdem traten Klassifizierungsfehler bei konvexen Schnittkanten im hinteren rechten Teil von Ushape sowie in der rechten Seitenfläche von Tshape (vgl. Abbildung 6) aufgrund des geringen Neigungswinkels der betreffenden Seitenflächen zur Blickrichtung der Kamera auf. Intensitätskanten wurden zwischen Hintergrund und Boden im Schattenwurf des vorderen Teils von Ushape sowie an der rechten Seitenfläche von Ushape im Schattenwurf von Tshape detektiert. Eine Störung — vermutlich aufgrund einer Verunreinigung der Linse — tritt im Hintergrund rechts auf. Ein Teil davon konnte als Falschkante klassifiziert werden, der andere Teil wurde fälschlicherweise als konkave Schnittkante klassifiziert.*

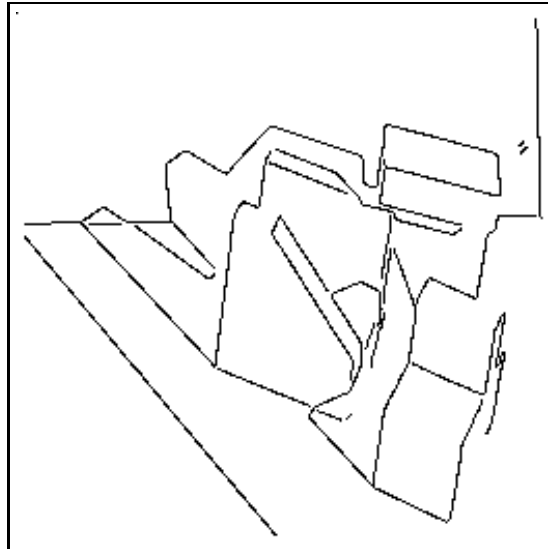


Abbildung 10: Grauwertkanten nach Extraktion und Nachverarbeitung

| Kantentyp | Anzahl Kanten | |
|-----------------------|-------------------|----------------|
| | Modelldarstellung | Grauwertkanten |
| Sprungkanten | 15 | 9 |
| Schattenkanten | 35 | 34 |
| konvexe Schnittkanten | 15 | 11 |
| konkave Schnittkanten | 7 | 6 |

Tabelle 2: Vergleich der extrahierten Grauwertkanten mit der Beschreibung der Modelldarstellung

3.2.2 Sprungkantendetektion in Tiefenbildern

Sprungkantenpunkte lassen sich als Unstetigkeiten in den Tiefenwerten benachbarter Bildpunkte definieren. Berücksichtigt man dabei das Vorzeichen der Tiefenwertdifferenz, kann ausserdem unterschieden werden, ob sich eine Kante auf dem der Kamera näher liegenden Objekt (*überdeckend*) oder dem entfernteren Hintergrund (*überdeckt*) befindet. Aufgrund der speziellen Markierung von *nichtdetektierten Regionen* im Tiefenbild können ausserdem die *Schattenkanten* leicht detektiert werden.

Sprungkantenpunktdetektion:

Gebräuchliche Operatoren [GL89] berechnen in einer Umgebung U um den Bildpunkt p das *lokale Maximum* der Tiefenwertdifferenzen. Überschreitet dieses eine Schranke T_{Jump} , wird der Bildpunkt als Sprungkantenpunkt markiert:

$$\max_{q \in U(p)} (z_p - z_q) \geq T_{Jump} \quad (1)$$

Dieses Verfahren reagiert jedoch leicht auf Störungen in den Tiefenwerten und auf stark geneigte Oberflächen. Abbildung 11 links zeigt die mit dieser Methode detektierten Sprung- und Schattenkanten aus dem Tiefenbild von Abbildung 3 innerhalb 3×3 -Umgebungen und einer Schranke $T_{Jump} = 5$ mm.

Wird statt dem lokalen Maximum der *Durchschnitt* der Tiefenwertdifferenzen (unter Berücksichtigung der Vorzeichen) auf eine Schranke $T_{JumpAvg}$ getestet,

$$\frac{1}{|U(p)|} \sum_{q \in U(p)} (z_p - z_q) \geq T_{JumpAvg}, \quad (2)$$

lassen sich folgende Verbesserungen erwarten:

- *Aussreisser* fallen mit der Durchschnittsbildung weniger ins Gewicht.
- Bei *stark geneigten Oberflächen* heben sich die Tiefenwertdifferenzen etwa auf, wodurch dieser Operator auf schräge Flächen weniger ansprechen sollte.

Abbildung 11 rechts zeigt die mit der verbesserten Methode detektierten Sprung- und Schattenkanten aus dem Tiefenbild von Abbildung 3 innerhalb 3×3 -Umgebungen und einer Schranke $T_{JumpAvg} = 2.5$ mm.

Die Methode des lokalen Maximums reagiert also trotz einer höheren Schranke empfindlicher auf Störungen als die Durchschnittsmethode. (Eine tiefere Schranke bewirkt, dass Sprungkanten länger detektiert werden können.) Ausserdem werden steile Oberflächen — Flächen mit einer Oberflächennormalen fast normal zur Blickrichtung der Kamera — stärker detektiert.

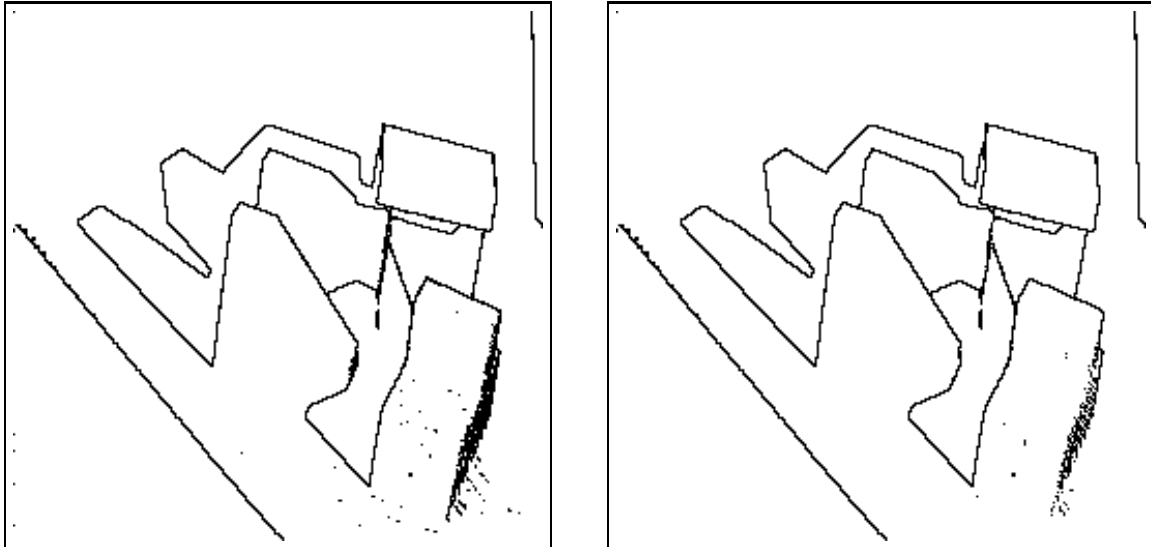


Abbildung 11: Sprung- und Schattenkanten durch die Methoden des *lokalen Maximums* und des *Durchschnitts* der Tiefenwertdifferenzen

Nachverarbeitung:

1. Das Kantenbild wird *verdünnt*, die Kantenpunkte *verfolgt* und an den Verzweigungspunkten zerlegt.
2. Durch *Geradenapproximation* werden die Kanten in Geraden zerlegt.
3. Aufgrund von Mess- und Quantisierungsfehlern können im Tiefenbild Störungen auftreten. Kanten mit einer Länge $< T_{JumpLengthMin}$ werden als *Störungen* interpretiert und gelöscht.
4. Da die oben beschriebenen Schritte lediglich Sprung- und Schattenkanten detektieren sollen, bildet die *Kantenklassifizierung* eine weitere Möglichkeit, falsch detektierte Kanten zu eliminieren, indem Kanten von einem anderen Typ als Sprung- und Schattenkanten gelöscht werden. Das Verfahren zur Klassifizierung der detektierten Kanten wird in Kapitel 3.2.5 beschrieben.

Abbildung 12 stellt die Kanten aus Abbildung 11 rechts nach der Nachverarbeitung — Zerlegung, Löschen von kurzen Kanten ($T_{JumpLengthMin} = 5$) und Elimination der Kanten, die einen anderen Typ als Sprung- oder Schattenkanten aufweisen — dar.

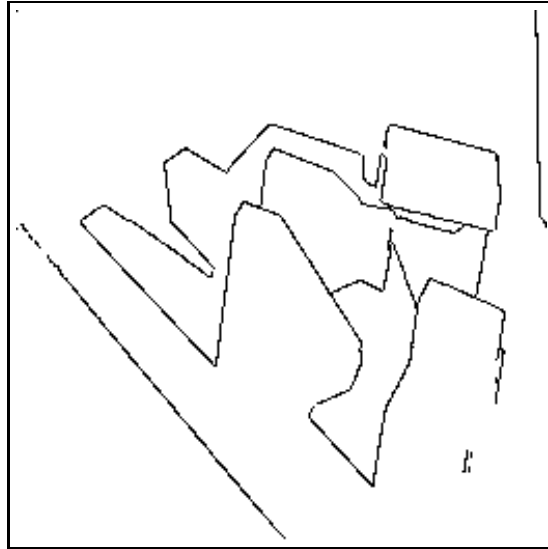


Abbildung 12: Sprung- und Schattenkanten nach Detektion und Nachverarbeitung

Beurteilung: *Das resultierende Kantenbild enthält alle wichtigen Sprung- und Schattenkanten (Tabelle 3). Die extrahierten Sprungkanten konnten dank der Nachverarbeitung grösstenteils von Störungen und Fehlern wegen zu steilen Flächen befreit werden (ausser in der rechten Seitenfläche von Tshape). Die Schattenkante links am Rand der Bodenplatte weist Lücken auf. Die Ursache dafür liegt in der Zerlegung in zu kleine Kantenstücke und deren Elimination.*

| Kantentyp | Anzahl Kanten | |
|-----------------------|-------------------|--------------|
| | Modelldarstellung | Sprungkanten |
| Sprungkanten | 15 | 15 |
| Schattenkanten | 35 | 34 |
| konvexe Schnittkanten | 15 | — |
| konkave Schnittkanten | 7 | — |

Tabelle 3: Vergleich der extrahierten Sprung- und Schattenkanten mit der Beschreibung der Modelldarstellung

3.2.3 Schnittkantendetektion in Tiefenbildern

Da sich die Tiefenwerte bei Schnittkanten nicht sprunghaft ändern müssen, gestaltet sich deren Detektion schwieriger als bei Sprungkanten. Aufgrund der Definition von Schnittkanten als Unstetigkeiten in den Oberflächennormalen führen einige Verfahren eine lokale Ebenenapproximation und Normalenbestimmung durch [YL88, GL89]. Andere Methoden approximieren lokal die Oberflächenkrümmung und untersuchen diese auf Unstetigkeiten [GMA83, Shi87, Sug87]. Erweiterungen des Konzeptes des *scale space filtering* [Wit83] falten das Tiefenbild mit verschiedenen Varianzen und untersuchen die detektierten Unstetigkeiten entlang dieser Parameter [PB87, FMN86, PM87]. Neuere Ansätze befassen sich mit Erweiterung von morphologischen Kantendetektoren auf Tiefenbilder [CD92] sowie mit Kantendetektion und -markierung durch Energieminimierungsansätze [NJ92].

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit ausschliesslich um Polyederszenen handelt und am Institut ausserdem Arbeiten zur Segmentierung von Tiefenbildern geleistet wurden, erfolgt in unserem Falle die Schnittkantendetektion durch Schneiden von adjazenten Ebenen [GZ92], die aus dem segmentierten Tiefenbild stammen.

Segmentierung von Tiefenbildern:

Aufgrund der impliziten 3D-Information lassen sich Tiefenbilder durch *Oberflächen-Approximation* [BJ88, CB88] oder *Split&Merge* [PM86, TSR89, SC91] in ebene Regionen segmentieren. Im Gegensatz zu Kanten, die empfindlicher auf Störungen reagieren, kann eine initiale Region robuster approximiert und ausgedehnt werden.

Für diese Arbeit wurde die am Institut entwickelte Implementierung SEGMENT [Rob91], basierend auf der *iterativen Approximation durch Oberflächen variabler Ordnung* [BJ88, Bes89], verwendet. Ausserdem steht eine Erweiterung, die *schnelle Segmentierung in planare Regionen* nach Jiang und Bunke [JB92], zur Verfügung. Abbildung 13 links zeigt das mit SEGMENT, rechts das nach Jiang und Bunke zerlegte Tiefenbild aus Abbildung 3.

Das mit SEGMENT segmentierte Tiefenbild stellt eine korrekte Zerlegung dar, einzig in der rechten Seitenfläche des Objektes *Tshape* konnten zwei Gebiete keiner approximierenden Fläche zugeordnet werden, wurden deshalb als nichtdetektiert markiert und erscheinen in der Abbildung wie die Schattengebiete schwarz. Das nach Jiang und Bunke segmentierte Tiefenbild enthält einerseits eine sehr genaue Approximation der eben erwähnten rechten Seitenfläche des Objektes *Tshape*, andererseits Übersegmentierungen von grossen Flächen, z.B. dem Boden und dem Hintergrund. Die Verfahren zur Segmentierung lassen sich austauschen. Für die nachfolgende Detektion von Schnittkanten wurde die Segmentierung mittels SEGMENT verwendet.

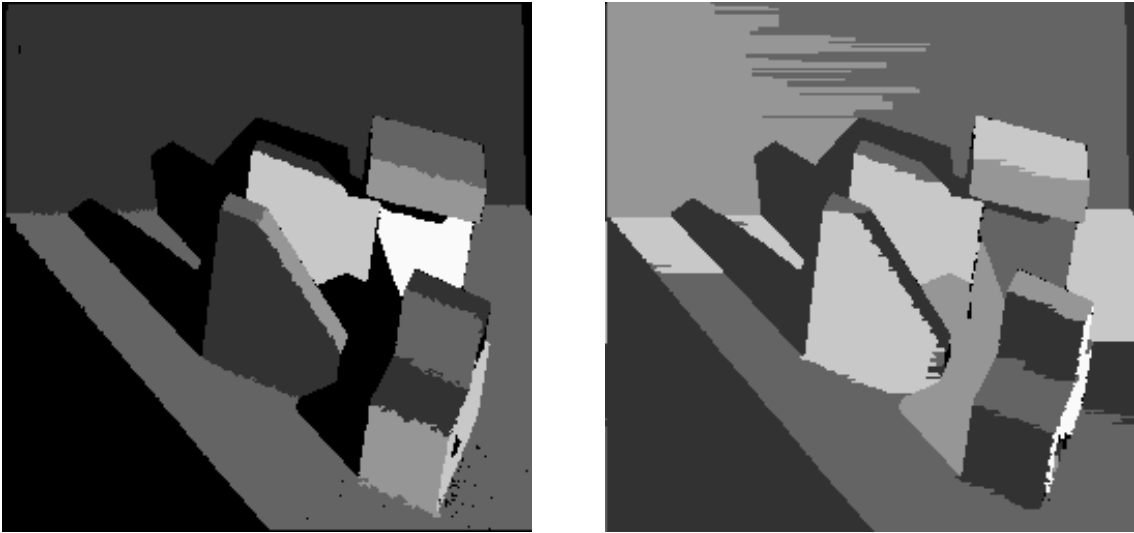


Abbildung 13: Tiefenbild mit SEGMENT und mit *schneller Segmentierung in planare Regionen* segmentiert



Abbildung 14: Konturanalyse des segmentierten Tiefenbildes

Analytische Schnittkantenberechnung:

Aus dem Tiefenbild, dem segmentierten Tiefenbild sowie der zugehörigen Regionenbeschreibung (Parameter der approximierten Oberflächenfunktionen) werden die Schnittkanten folgendermassen berechnet:

1. Die *Konturen* jeder Region werden bestimmt.
2. Die *Konturanalyse* verfolgt die Kontur jeder Region. Für jeden Konturpunkt einer Region werden dabei der *Index* der adjazenten Region sowie der *Kantentyp* (Sprung- oder Schnittkante) durch Vergleich der maximalen lokalen Tiefenwertdifferenz bestimmt. Bei jeder Änderung des Index der adjazenten Region oder Kantentyp bzw. beim Erreichen eines Schattengebietes oder des Bildrandes wird eine neue Kante generiert bzw. die aktuelle Kante abgeschlossen. Abbildung 14 zeigt die Konturpunkte vom Typ *Schnittkante* aus dem segmentierten Tiefenbild (Abbildung 13 links) nach der Konturanalyse.
3. Durch den *Schnitt adjazenter Regionen* werden anschliessend die Schnittgeraden berechnet. Die Begrenzungen der Schnittgeraden werden durch Projektion der Konturendpunkte bestimmt. Allerdings wird diese Schnittberechnung nur durchgeführt, falls der Zwischenwinkel der Oberflächennormalen die Schranke T_{Phi} übersteigt, andernfalls wird eine Übersegmentierung angenommen und diese Kante ignoriert.
4. Kanten mit einer Länge $< T_{RoofLengthMin}$ werden als falschdetektierte Kanten interpretiert und *gelöscht*.
5. Nach der *Klassifizierung* werden Kanten von einem anderen Typ als konvexe oder konkave Schnittkanten eliminiert.

Abbildung 15 zeigt die berechneten Schnittkanten ($T_{RoofLengthMin} = 5$) aus dem segmentierten Tiefenbild von Abbildung 13.

Voraussetzung für dieses Verfahren zur Bestimmung von Schnittkanten ist ein segmentiertes Tiefenbild, wobei allfällige Übersegmentierungen durch den Test auf die Zwischenwinkel der Oberflächennormalen sowie durch die Kantenklassifizierung erkannt und eliminiert werden können. Untersegmentierungen bzw. das Nichtsegmentieren von "kritischen" Flächen (z.B. steilen Oberflächen) führt zu einem Nichtdetektieren der in diesen Regionen liegenden Schnittkanten.

Die Schnittkanten liegen im Prinzip bereits nach der Konturanalyse vor, da aber die regionenorientierte Segmentierung in der Nähe von Schnittkanten nicht sehr genau ist, bildet die Berechnung der Schnittkanten aus den robusteren Approximationsfunktionen eine zuverlässigere Methode.

Aufgrund des segmentierten Tiefenbildes wäre es ausserdem denkbar, auch Sprungkanten zu extrahieren und der Sprungkantendetektion (Kapitel 3.2.2) zuzuführen. Diese Möglichkeit wurde aus folgenden Gründen nicht realisiert: (i) Die verwendete Methode zur Detektion von Schnittkanten aus Tiefenbildern lieferte gute Resultate,

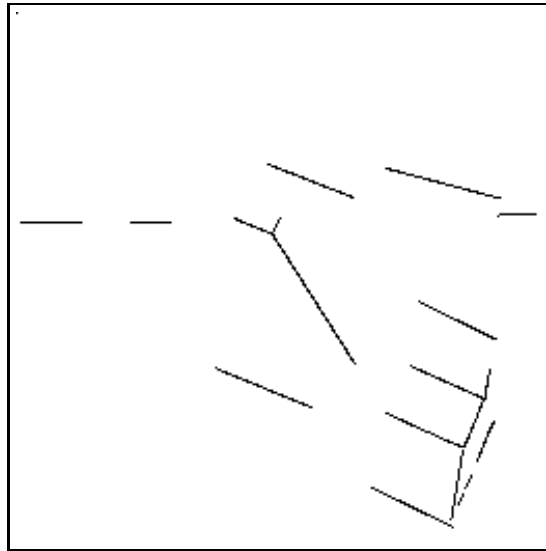


Abbildung 15: Schnittkanten durch analytische Berechnung

soll aber prinzipiell austauschbar sein durch andere Verfahren, die aber eventuell keine Sprungkanten liefern. (ii) Die Verfahren zur Detektion der verschiedenen Kanten aus Grauwert- und Tiefenbildern sollen streng modular sein, d.h. es soll kein Austausch von Informationen stattfinden, und die Resultate werden erst im anschließenden Integrationsschritt verschmolzen.

Die Klassifizierung der Schnittkanten könnte auch aufgrund der Zwischenwinkel der Oberflächennormalen erfolgen. Aus Konsistenzgründen wurde an dieser Stelle ebenfalls die Klassifizierungsmethode aus Kapitel 3.2.5 verwendet.

Beurteilung: *Wie eine Analyse der extrahierten Schnittkanten aus dem Tiefenbild (Tabelle 4) zeigt, konnten alle wichtigen Schnittkanten extrahiert werden, die im Grauwertbild nicht detektiert wurden. Einzig die konvexen Schnittkanten in den rechten Seitenflächen von Ushape und Tshape wurden nicht extrahiert, weil dort die Segmentierung aufgrund der zu kleinen und heiklen Details versagte. Aufgrund der relativ vielen nichtsegmentierten Bildpunkte wurde die konkave Schnittkante zwischen der rechten Seitenfläche von Tshape und dem Boden in mehrere Kanten zerlegt.*

| Kantentyp | Anzahl Kanten | |
|-----------------------|-------------------|---------------|
| | Modelldarstellung | Schnittkanten |
| Sprungkanten | 15 | — |
| Schattenkanten | 35 | — |
| konvexe Schnittkanten | 15 | 10 |
| konkave Schnittkanten | 7 | 7 |

Tabelle 4: Vergleich der extrahierten Schnittkanten mit der Beschreibung der Modelldarstellung

3.2.4 Konturverfolgung und Kantenzerlegung

Die einzelnen Verfahren zur Kantendetektion bestehen, wie in den vorherigen Kapiteln erläutert, aus folgenden Schritten:

- Kantendetektion in Grauwertbildern
 - Canny-Operatoren
 - *Konturverfolgung*
 - *Kantenzerlegung*
 - *Kantenklassifizierung*
- Sprungkantendetektion in Tiefenbildern
 - Durchschnitts-Sprungkanten-Operator
 - *Konturverfolgung*
 - *Kantenzerlegung*
 - *Kantenklassifizierung*
- Schnittkantendetektion in Tiefenbildern
 - Segmentierung
 - Analytische Schnittkantenberechnung
 - *Kantenklassifizierung*

In diesem Kapitel werden die Verfahren zur *Konturverfolgung* und *Kantenzerlegung* vorgestellt, die *Kantenklassifizierung* wird in Kapitel 3.2.5 beschrieben.

Konturverfolgung

Liegt ein Bild mit extrahierten Kantenpunkten vor (z.B. Grauwertkanten oder Sprungkanten aus Tiefenbildern), sollen die Kantenpunkte verkettet und in Kanten ohne Verzweigungen zerlegt werden:

1. Das binäre Kantenbild wird zuerst auf 8-er Nachbarschaft *verdünnt*.
2. Anschliessend wird der *Grad* jedes Kantenpunktes bestimmt. (Der Grad eines Kantenpunktes ist die Anzahl adjazenter Kantenpunkte [Pav82].)
3. Nun werden im ganzen Bild *Kantenendpunkte* (Grad = 1) gesucht und die adjazenten Kantenpunkte rekursiv verfolgt.
4. Auf dieser Stufe existieren nur noch *geschlossene Kanten* (Grad ≥ 2). Diese werden gesucht und ebenfalls rekursiv verfolgt.

Bei der Verfolgung einer Kante werden die Kantenpunkte in einer Liste gespeichert und rekursiv weiterverfolgt, bis ein Kantenpunkt mit Grad $\neq 2$ erreicht wird:

- Grad = 1: Das *Kantenende* wurde erreicht.
- Grad ≥ 3 : Der *Verzweigungspunkt* wird als Kantenendpunkt betrachtet. Alle Verzweigungsrichtungen werden rekursiv weiterverfolgt, wobei jeweils der erste Kantenpunkt nach der Verzweigung als Anfangspunkt einer neuen Kante abgespeichert wird.

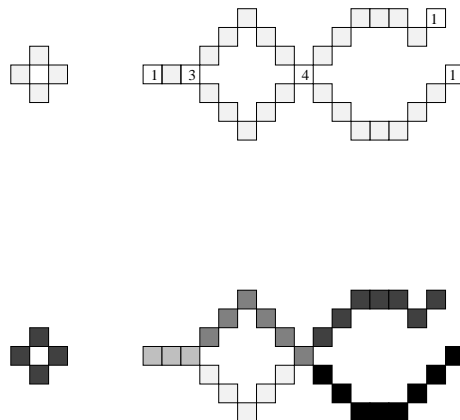


Abbildung 16: Konturverfolgung und -Zerlegung

Abbildung 16 oben stellt eine geschlossene und eine offene Kante dar, wobei jeweils die Kantenpunkte mit Grad $\neq 2$ mit dem Grad markiert wurden. Abbildung 16 unten zeigt die gleichen Kanten nach der Zerlegung, wobei jede Färbung eine neue Kante darstellt.

Kantenzerlegung

Nach der Extraktion und Verfolgung soll jede Kante in Geraden zerlegt werden. Der *iterative end point curve fitting* Algorithmus [DH73] approximiert eine Kurve durch Geraden, indem die Kante bei dem am weitesten von der Verbindungsgeraden der Kantenendpunkte entfernt liegenden Kantenpunkt zerlegt wird, falls dieser Abstand eine Schranke übersteigt (Abbildung 17).

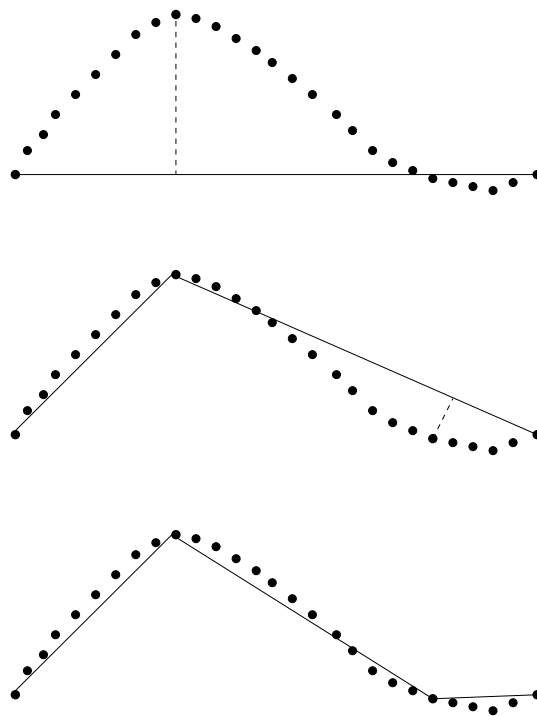


Abbildung 17: Zerlegung einer Kurve durch Geraden mithilfe des *Split*-Verfahrens

Dieses Prinzip wurde verwendet, um Kantenbilder zu zerlegen. Da bei Sprung- bzw. Schattenkanten aus den Grauwertbildern nicht garantiert werden kann, dass der Kantenzug immer auf der sich der Kamera näher bzw. entfernter liegenden Fläche verläuft, wurde die Zerlegung bezüglich der Bildebene, also zweidimensional, implementiert.

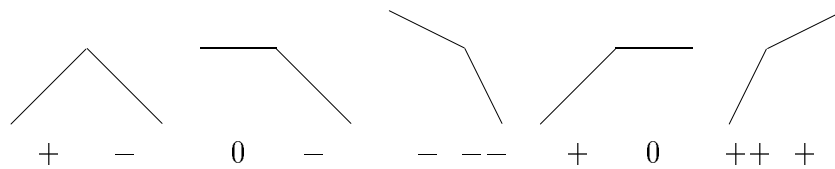
3.2.5 Kantenklassifizierung

Die Klassifizierung der detektierten und zerlegten Kanten in einen der in Kapitel 3.1 beschriebenen Kantentypen erfolgt mittels Tiefenbild, wobei die Tatsache ausgenutzt wird, dass die Grauwert- und Tiefenbilder korrespondieren.

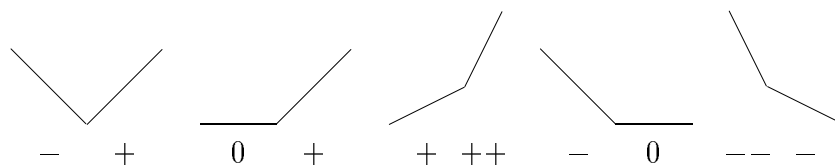
Die einfachste Methode zur Klassifizierung besteht sicher darin, die Tiefenwerte jedes Kantenpunktes lokal (z.B. innerhalb einer 3×3 -Umgebung) zu untersuchen. Ähnlich wie der einfache Sprungkantenoperator kann die maximale Tiefenwertdifferenz mit der Schranke T_{Jump} verglichen werden. Schatten- und Intensitätskanten werden auf den Tiefenwert für nichtdetektierte Gebiete getestet. Dieser Ansatz weist allerdings folgende Schwachpunkte auf: (i) Die Kantenpunkte müssen genau lokalisiert bzw. deren Tiefenwerte vom Sensor genau berechnet worden sein. Überdies (ii) versagt die Unterscheidung zwischen konvexer und konkaver Schnittkante.

Statt die einzelnen Kantenpunkte zu untersuchen, konstruiert das implementierte Klassifizierungsverfahren für jede Kante die Mittelnormale und klassifiziert die Kanten aufgrund der dreidimensionalen Lage der Punkte der Mittelnormalen:

- Sprungkante: Sprung in den Tiefenwerten
- Schattenkante: eine Seite der Kante liegt im nichtdetektierten Gebiet
- konvexe Schnittkante: Steigung 1 > Steigung 2



- konkave Schnittkante: Steigung 1 < Steigung 2



- Intensitätskante: beide Seiten der Kante liegen im nichtdetektierten Gebiet
- Falschkante: keine Zuordnung möglich

Da jede Kante als verkettete Liste von Kantenpunkten abgespeichert ist, gestaltet sich die Konstruktion der Kantenmittelnormalen leicht aus folgenden Schritten (vgl. Abbildung 18):

1. Der mittlere Punkt (Median) M der Kante wird bestimmt.
2. Die Kantenpunkte K_1 und K_2 , je d_1 Bildpunkte von M entfernt, werden bestimmt. Die Kantenpunkte zwischen K_1 und K_2 werden durch die Gerade g in der Bildebene approximiert.
3. Aus der Geradengleichung von g lässt sich die Normale n berechnen, die durch M gelegt wird und auf welcher, je d_2 Bildpunkte von M entfernt, die Normalenendpunkte P_1 und P_2 markiert werden.
4. Das Verhalten der Tiefenwerte in den Bildpunkten M , P_1 und P_2 wird nun untersucht.

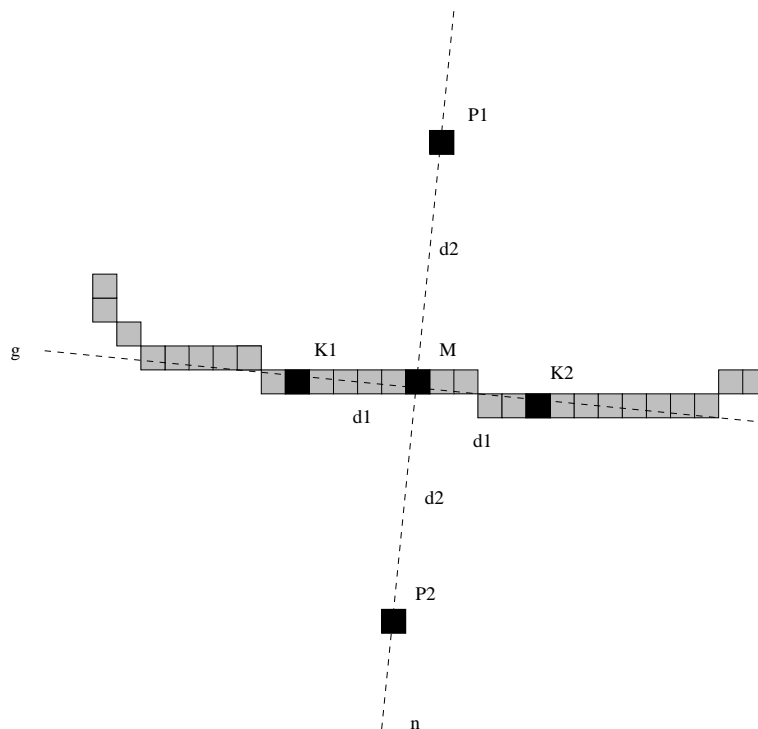


Abbildung 18: Konstruktion der Kantenmittelnormalen

Die Klassifizierung der Kante aufgrund des Verhaltens der Mittelnormalen n erfolgt gemäss folgendem Algorithmus:

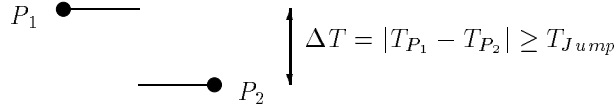
IF (mind. eine Seite von n (P_1 oder P_2) liegt im *missing part*)

THEN IF (beide Seiten von n (P_1 und P_2) liegen im *missing part*)

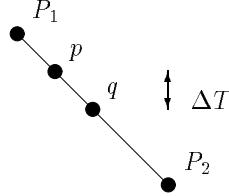
THEN \implies INTENSITÄTSKANTE

ELSE \implies SCHATTENKANTE

ELSE IF (Sprung in den Tiefenwerten von P_1 und P_2)



THEN IF (für alle benachbarten Punkte p, q auf der Mittelnormalen N liegt die Tiefenwertdifferenz $\Delta T = |T_p - T_q|$ unterhalb einer Schranke T_{Roof1})



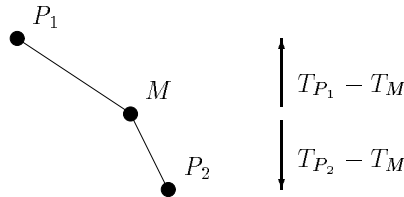
THEN *Schnittkante bei steiler Fläche*
 \implies SCHNITTKANTE bei steiler Fläche:

ELSE *Es gibt entlang der Mittelnormalen n ein $\Delta T > T_{Roof1}$:*
 \implies SPRUNGKANTE

IF (Kante wurde nicht als SPRUNGKANTE klassifiziert)

THEN *Verifikation, ob es sich um eine Kante handelt:*

IF (Summe der Tiefenwertdifferenzen zwischen M und P_i überschreitet eine Schranke T_{Roof2})



$$|T_{P_1} + T_{P_2} - 2T_M| \geq T_{Roof2}$$

THEN *Test auf Konvexität:*

$$\text{Steigungen } s_i = \frac{T_M - T_{P_i}}{\sqrt{(x_M - x_{P_i})^2 + (y_M - y_{P_i})^2}}$$

IF ($s_1 \geq s_2$)

THEN \implies KONVEXE SCHNITTKANTE

ELSE \implies KONKAVE SCHNITTKANTE

ELSE \implies FALSCHKANTE

3.3 Merkmalintegration

Als Eingabe für die Merkmalintegration stehen drei Kantenbilder mit klassifizierten Kanten zur Verfügung, welche unabhängig voneinander mit verschiedenen Verfahren aus zwei Bildquellen extrahiert wurden (Abbildung 5). Das Ziel der Integration besteht einerseits darin, fehlende Kanten zu ergänzen, andererseits im Falle einer Mehrfachdetektion einer Kante die "beste" Kante auszuwählen bzw. die Kanten zu einer "besten" Kante zu verschmelzen.

Um festzustellen, ob es sich bei zwei Kanten E und E^* aus den Bildern I bzw. I^* um entsprechende Kanten handelt, können diese auf *Übereinstimmung (Korrespondenz)* untersucht werden. Zu diesem Zweck sind folgende Verfahren möglich:

- *Kantenpunktweise* Methode: Kantenpunkte auf E und E^* korrespondieren, falls sie die gleiche Position haben bzw. sich innerhalb einer gewissen Umgebung befinden.
- *Kantenweise* Methode: Ganze Kanten bzw. deren Merkmale (Kantenrichtung, Kantenlänge, Mittelpunkt, *Bounding box*, usw.) werden miteinander verglichen.

Zu beachten ist (Abbildung 19), dass sich nicht nur ganze Kanten entsprechen müssen (a), sondern auch Teilausschnitte (b), Verlängerungen (c), Überlappungen (d) sowie Kombinationen davon.

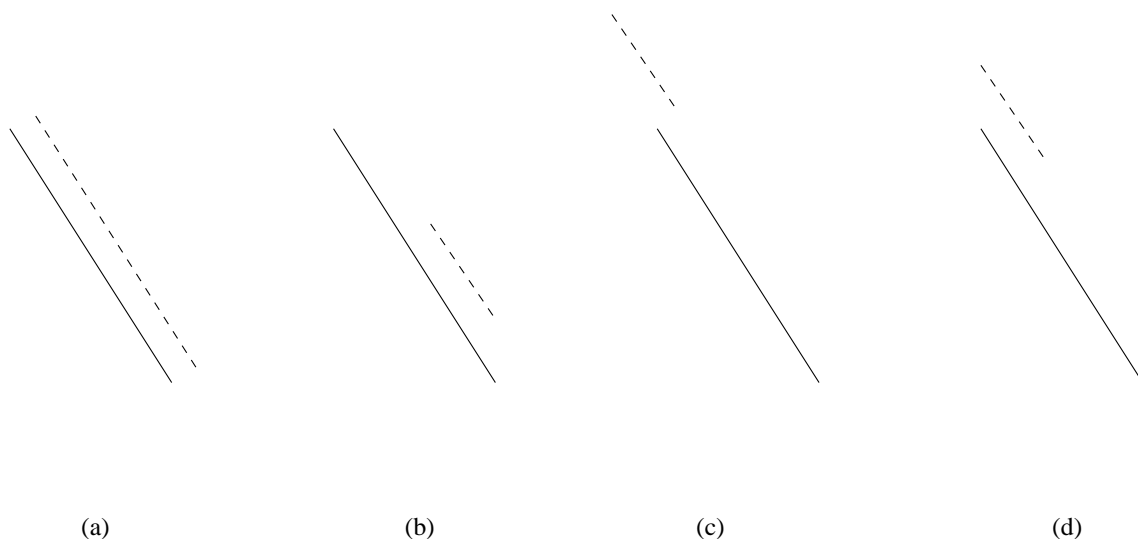


Abbildung 19: Varianten von korrespondierenden Kanten

Um aus Kanten, die sich entsprechen, eine einzige zu erhalten, bieten sich zwei Vorgehen an:

- Werden beide Kanten als *gleich zuverlässig* angenommen, kann eine resultierende Kante durch Approximation der beiden Kanten berechnet oder durch Überlagerung der Kantenpunkte mit Nachverarbeitung extrahiert werden.
- Aufgrund einer Heuristik oder eines Qualitätsmasses wird eine *primäre* (zuverlässigere) Kante definiert. Durch die Elimination der korrespondierenden *sekundären* (weniger zuverlässigen) Kante bzw. Kantenpunkte erhält man eine einzige Kante, indem die *primäre* und der Rest der *sekundären* Kante zusammengefasst werden.

Integrationsansatz:

Wie die Erfahrungen gezeigt haben, konnten die Kanten aus den Grauwertbildern mit dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Verfahren gut und genau extrahiert werden. Die Kanten aus den Tiefenbildern sollen einzig dazu dienen, fehlende Kanten zu ergänzen. Zu diesem Zweck werden die Kanten E_{GWB} aus dem Grauwertbild als *primäre* (zuverlässigere) Kanten definiert. Die *sekundären* (weniger zuverlässigen) Sprung- und Schnittkanten E_{TB} aus dem Tiefenbild werden folgendermassen *kantenpunktweise* integriert:

1. Jede Kante E_{TB} aus dem Tiefenbild wird mit jeder Kante E_{GWB} aus dem Grauwertbild auf Korrespondenz getestet:
 - (a) Jeder Kantenpunkt P_{TB} auf der Kante E_{TB} wird mit jeder Kante E_{GWB} auf Korrespondenz getestet. Als Korrespondenzmass wird der *minimale Abstand* d von P_{TB} zu P_{GWB} auf E_{GWB} verwendet. Unterschreitet d eine Schranke T_{Int} , korrespondiert P_{TB} mit P_{GWB} und wird folglich gelöscht (Abbildung 20). Je nach Kantentyp (Sprung- oder Schnittkanten) wird der *minimale Abstand* im zwei- bzw. dreidimensionalen Raum berechnet.
 - (b) Da jede Kante als verkettete Liste gespeichert ist, entstehen durch das Löschen der korrespondierenden Kantenpunkte P_{TB} aus einer Kantenliste mehrere kürzere Kantenlisten.
2. Nach diesem Schritt liegen die Kanten E_{TB} als Listen von nichtkorrespondierenden Kantenpunkten vor. Folgende Fälle können dabei unterschieden werden.
 - Es korrespondiert kein Kantenpunkt aus E_{TB} mit einer Kante im Grauwertbild, d.h. die Kante E_{TB} wurde im Grauwertbild nicht detektiert, sie soll also ergänzend fusioniert werden.

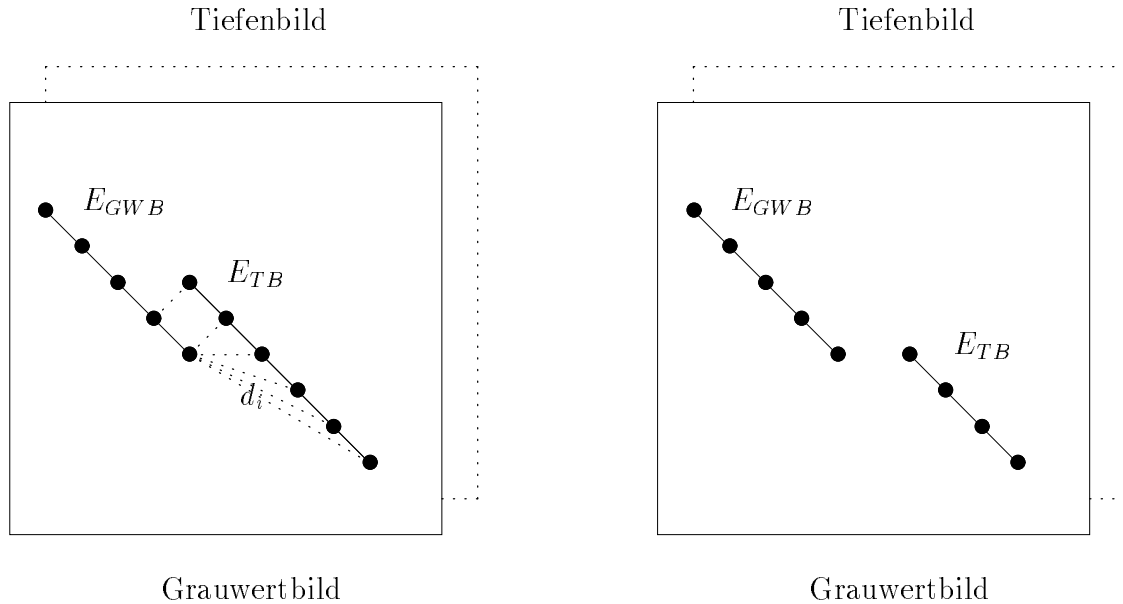


Abbildung 20: Elimination korrespondierender Kantenpunkte

- Mehrere (viele) Kantenpunkte P_{TB} auf der Kante E_{TB} korrespondieren mit Kantenpunkten der Kante E_{GWB} und werden deshalb gelöscht. Die gleiche Kante wurde also (eventuell nur teilweise) in beiden Bildern detektiert, die Kante E_{TB} wird gelöscht oder in mehrere Teilstücke zerlegt.
3. Eine kurze Kante E_{TB} deutet auf die Lage nahe einer existierenden Kante E_{GWB} hin, und wird infolgedessen gelöscht. Überschreitet die Kante E_{TB} hingegen eine Schranke $T_{IntLength}$, wird sie als nichtkorrespondierend interpretiert und soll ergänzend fusioniert werden.
 4. Die Kanten E_{TB} werden erneut gemäss Kapitel 3.2.5 *klassifiziert*, da sie zum Teil verkürzt wurden. Da die Sprung- bzw. Schnittkanten aus dem Tiefenbild getrennt behandelt werden, ist es möglich, Kanten vom "falschen" Typ zu löschen (wurden z.B. nur die Sprungkanten integriert, erhalten aber einige Kanten bei der Klassifizierung den Typ *Schnittkante* zugewiesen, werden diese als Störungen interpretiert und gelöscht).
 5. Die *ergänzende Fusion* erfolgt nun einfach, indem die verbleibenden Kantenlisten E_{TB} in E_{GWB} aufgenommen werden.

Jeder Kantenpunkt P_{TB} auf *jeder* Kante E_{TB} muss mit jedem Kantenpunkt P_{GWB} auf *jeder* Kante E_{GWB} auf Korrespondenz getestet werden. Um diesen Aufwand zu

reduzieren, werden nur diejenigen Kanten miteinander verglichen, deren umschliessende Rechtecke (*bounding box*) sich schneiden bzw. im anderen enthalten sind.

Implementierter Ansatz:

Da die Kanten aus dem Tiefenbild in *Sprung-* und *Schnittkanten* aufgeteilt vorliegen, wird obiger Integrationsansatz gemäss Abbildung 5 *zweistufig* durchgeführt:

1. Bei der *Integration der Sprungkanten (JumpIntegration)* werden die Sprungkanten aus dem Tiefenbild mit den Kanten aus dem Grauwertbild integriert. Da bei der Kantendetektion im Grauwertbild nicht gewährleistet werden kann, dass sich die Sprungkantenpunkte immer auf der *überdeckenden* bzw. *überdeckten* Sprungkante befinden (zu *überdeckende/überdeckte* Sprungkanten siehe Kapitel 3.2.2), wurde als Abstandmass zur Bestimmung der Korrespondenz der *euklidische Abstand zwischen den Bildkoordinaten*, d.h. der zweidimensionale Bereich, gewählt. Die Schranke $T_{IntJump}$ versteht sich also immer in den Einheiten *Bildpunkte*. Nach dem Löschen der nichtkorrespondierenden Kanten mit einer Länge $< T_{IntJumpLength}$ und der Klassifizierung werden nur Sprung- und Schattenkanten integriert.
2. Die *Integration der Schnittkanten (RoofIntegration)* übernimmt das Resultat aus Schritt 1 und integriert die extrahierten Schnittkanten aus dem Tiefenbild. Aufgrund der Eigenschaften von Schnittkanten wird in diesem Schritt der (*dreidimensionale*) *Abstand zwischen den Weltkoordinaten der Kantenpunkte* definiert, die Schranke $T_{IntRoof}$ also in den Einheiten *Millimeter* angegeben. Nach dem Löschen der nichtkorrespondierenden Kanten mit einer Länge $< T_{IntRoofLength}$ und der Klassifizierung werden nur konvexe und konkave Schnittkanten integriert.

Abbildung 21 (d) zeigt das Resultat der Integration der Kanten aus dem Grauwertbild (a) mit den Sprungkanten (b) sowie den Schnittkanten (c) aus dem Tiefenbild.

Beurteilung: *Wie aus Abbildung 21 und Tabelle 5 zu entnehmen ist, brachte die Integration (d) der Kanten aus dem Tiefenbild verglichen mit den detektierten Kanten aus dem Grauwertbild (a) tatsächlich die gewünschten Verbesserungen: Die fehlenden Sprung- und Schnittkanten konnten ergänzt werden, einzig die konvexen Schnittkanten im vorderen rechten Teil von Ushape sowie in der rechten Seitenfläche von Tshape konnten nicht detektiert werden (die kritischen Gebiete wurden in Abbildung 21 (d) durch Rechtecke markiert). Die Sprung- sowie die konvexe Schnittkante im hinteren rechten Teil von Ushape wurden zerlegt und zum Teil nur als eine Kante detektiert. Die Störungen und Fehler aufgrund zu steiler Flächen, welche bereits in EdgeDetection und JumpDetection aufgetreten waren, bleiben erhalten. Deren Erkennung und Elimination soll in einem späteren Schritt vorgenommen werden.*

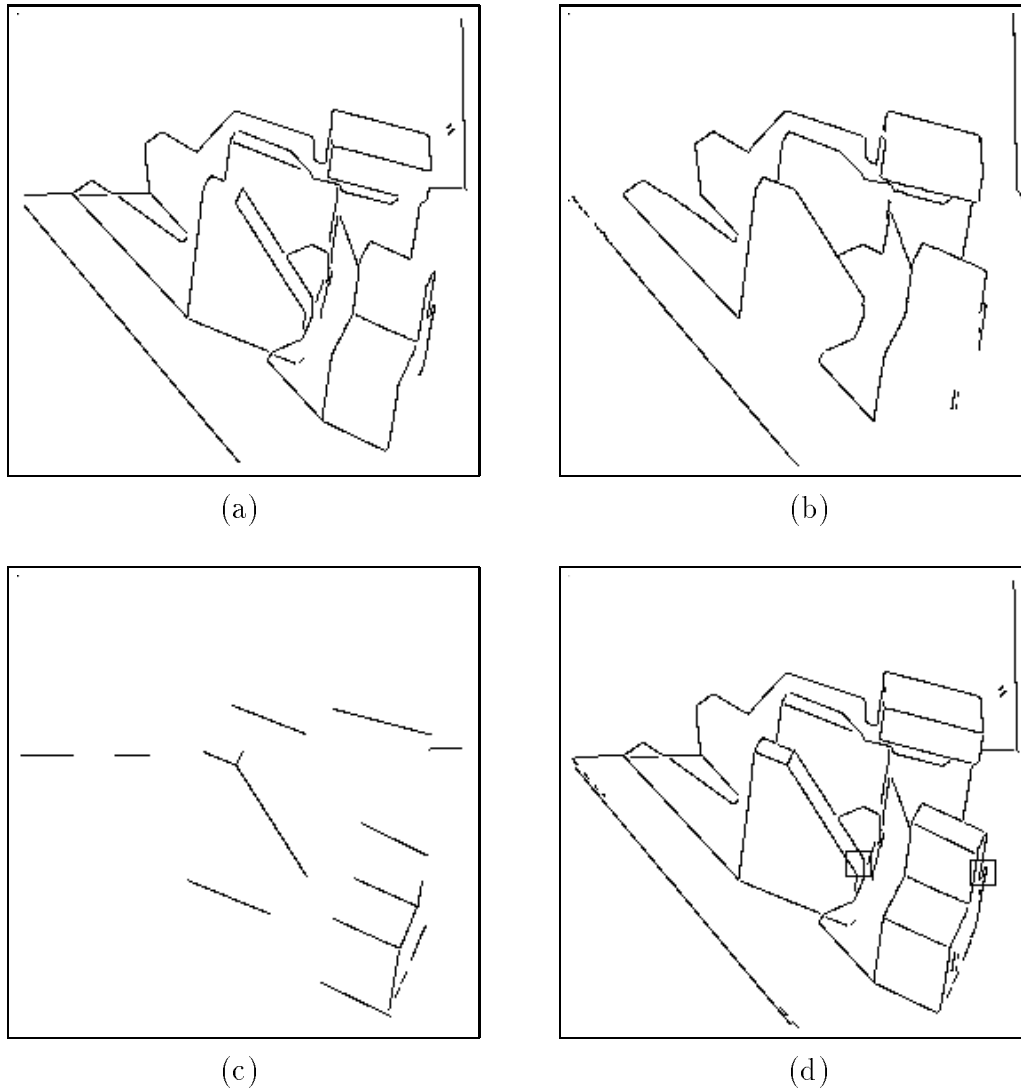


Abbildung 21: Integration der extrahierten Kantenbilder

| Kantentyp | Anzahl Kanten | | | |
|-----------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 15 | 9 | 15 | 15 |
| Schattenkanten | 35 | 34 | 34 | 34 |
| konvexe Schnittkanten | 15 | 11 | 10 | 13 |
| konkave Schnittkanten | 7 | 6 | 7 | 7 |

Tabelle 5: Übersicht über die extrahierten und integrierten Kanten

4 Resultate

Im Anhang wird die Sammlung der Szenen vorgestellt, auf die das beschriebene Verfahren zur Integration von Grauwert- und Tiefenbildern angewendet wurde. Zusätzlich werden die Resultate der Kantenextraktion und -integration abgebildet. Der Aufbau der einzelnen Szenenkapitel gliedert sich folgendermassen: Auf der ersten Seite werden jeweils das Grauwert-³ sowie das Tiefenbild der Szene gezeigt. Die zweite Seite enthält — von links nach rechts und von oben nach unten — (i) die extrahierten Kanten aus dem Grauwertbild, die extrahierten (ii) Sprung- und (iii) Schnittkanten aus dem Tiefenbild sowie (iv) das Resultat der Integration. Überdies folgt eine kurze Beurteilung der Extraktions- und Integrationschritte.

Die Reihenfolge der vorgestellten Szenen entspricht der zunehmenden Komplexität der Szene, die sich in der Anzahl der dargestellten Objekte ausdrückt. Die Szenennamen bestehen aus 12 Zeichen und lassen sich nach folgendem Schema ableiten:

- Der Name beginnt mit der Bezeichnung *iam*.
- Anschliessend folgen vier zweistellige Ziffern, welche die dargestellten Objekte (in aufsteigender Ordnung) kodieren. Bei weniger als vier Objekten in der Szene werden die restlichen Ziffern mit Nullen gefüllt. Enthält die Szene mehr als vier Objekte, so werden nur die ersten vier Objekte kodiert. Der Kode der Objekte lautet:

| Kode | Objektname |
|------|------------|
| 05 | Tshape |
| 06 | Pillars |
| 07 | Delta |
| 08 | Ushape |
| 09 | Corner |
| 10 | Tower |
| 11 | Terrace |
| 64 | Cube |

- Das letzte Zeichen im Szenennamen numeriert alphabetisch identische Objektkodierungen, um diese zu unterscheiden. Identische Objektkodierungen treten auf, wenn mehrere Aufnahmen einer Szene mit den gleichen Objekten gemacht werden, oder wenn in einer bestehenden Szene mit vier Objekten ein oder mehrere Objekte hinzugefügt werden.

³Um eine bessere Darstellung zu erhalten, wurden die Grauwertbilder einer Kontrastverstärkung unterzogen. Für die Verarbeitung der Grauwertbilder wurden die unbehandelten Grauwertbilder verwendet.

Die nachfolgende Tabelle verschafft einen Überblick über die abgebildeten Szenen und deren Komplexität (Anzahl der dargestellten Objekte):

| Szene | # Objekte | Objekte |
|--------------|-----------|---|
| iam05000000A | 1 | Tshape |
| iam06000000A | 1 | Pillars |
| iam07000000A | 1 | Delta |
| iam08000000A | 1 | Ushape |
| iam09000000A | 1 | Corner |
| iam10000000A | 1 | Tower |
| iam10000000B | 1 | Tower |
| iam11000000A | 1 | Terrace |
| iam64000000A | 1 | Cube |
| iam06070000A | 2 | Pillars, Delta |
| iam07080000A | 2 | Delta, Ushape |
| iam09100000A | 2 | Corner, Tower |
| iam05070800A | 3 | Tshape, Delta, Ushape |
| iam05091000A | 3 | Tshape, Corner, Tower |
| iam06096400A | 3 | Pillars, Corner, Cube |
| iam08091000A | 3 | Ushape, Corner, Tower |
| iam08101100A | 3 | Ushape, Tower, Terrace |
| iam05070810A | 4 | Tshape, Delta, Ushape, Tower |
| iam05070810D | 4 | Tshape, Delta, Ushape, Tower |
| iam05070810B | 5 | Tshape, Delta, Ushape, Tower, Pillars |
| iam05070810C | 6 | Tshape, Delta, Ushape, Tower, Pillars, Corner |

Nachfolgend wird für jede Szene, die genau ein Objekt enthält, eine Tabelle analog zu Tabelle 5 mit der Beschreibung des Modelles sowie der extrahierten und integrierten Kanten erstellt (Tabellen 6 und 7). Ausserdem sollen in einer letzten Tabelle (Tabelle 8) diese Informationen aufsummiert werden, um einen globalen Eindruck über die Zuverlässigkeit des Integrationsverfahrens zu vermitteln.

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich ist, konnten durch die Integration der Kanten aus dem Tiefenbild nahezu alle fehlenden Kanten aus dem Grauwertbild gefunden und ergänzt werden.

| Szene iam05000000A | Anzahl Kanten | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 8 | 7 | 8 | 7 |
| Schattenkanten | 11 | 11 | 10 | 11 |
| konvexe Schnittkanten | 3 | 3 | 3 | 3 |
| konkave Schnittkanten | 5 | 2 | 5 | 4 |

| Szene iam06000000A | Anzahl Kanten | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 11 | 8 | 11 | 11 |
| Schattenkanten | 16 | 16 | 15 | 16 |
| konvexe Schnittkanten | 6 | 5 | 6 | 6 |
| konkave Schnittkanten | 7 | 4 | 7 | 7 |

| Szene iam07000000A | Anzahl Kanten | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 8 | 7 | 8 | 8 |
| Schattenkanten | 13 | 13 | 13 | 13 |
| konvexe Schnittkanten | 9 | 9 | 9 | 9 |
| konkave Schnittkanten | 7 | 4 | 7 | 7 |

| Szene iam08000000A | Anzahl Kanten | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 9 | 8 | 9 | 8 |
| Schattenkanten | 16 | 16 | 16 | 16 |
| konvexe Schnittkanten | 9 | 8 | 9 | 9 |
| konkave Schnittkanten | 6 | 5 | 6 | 6 |

| Szene iam09000000A | Anzahl Kanten | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 11 | 10 | 11 | 11 |
| Schattenkanten | 11 | 11 | 11 | 11 |
| konvexe Schnittkanten | 9 | 7 | 8 | 8 |
| konkave Schnittkanten | 6 | 5 | 6 | 6 |

Tabelle 6: Übersicht über die extrahierten und integrierten Kanten aus den Szenen *iam05000000A* — *iam09000000A*

| Szene iam1000000A | Anzahl Kanten | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Schattenkanten | 11 | 11 | 11 | 11 |
| konvexe Schnittkanten | 9 | 7 | 8 | 9 |
| konkave Schnittkanten | 6 | 5 | 6 | 6 |

| Szene iam1000000B | Anzahl Kanten | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Schattenkanten | 13 | 13 | 13 | 13 |
| konvexe Schnittkanten | 7 | 7 | 7 | 7 |
| konkave Schnittkanten | 5 | 3 | 5 | 5 |

| Szene iam1100000A | Anzahl Kanten | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Schattenkanten | 6 | 6 | 6 | 6 |
| konvexe Schnittkanten | 10 | 8 | 10 | 10 |
| konkave Schnittkanten | 8 | 7 | 8 | 8 |

| Szene iam6400000A | Anzahl Kanten | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Schattenkanten | 11 | 11 | 11 | 11 |
| konvexe Schnittkanten | 9 | 8 | 8 | 9 |
| konkave Schnittkanten | 8 | 6 | 7 | 8 |

Tabelle 7: Übersicht über die extrahierten und integrierten Kanten aus den Szenen *iam1000000A* — *iam6400000A*

| Summe der Szenen | Anzahl Kanten | | | |
|-------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| Kantentyp | Modell | Grauwertbild | Tiefenbild | Integration |
| Sprungkanten | 69 | 62 | 69 | 67 |
| Schattenkanten | 108 | 108 | 106 | 108 |
| konvexe Schnittkanten | 71 | 62 | 68 | 70 |
| konkave Schnittkanten | 58 | 43 | 57 | 57 |

Tabelle 8: Summe der extrahierten und integrierten Kanten aus den Szenen *iam0500000A* — *iam6400000A*

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den in Kapitel 2.3 vorgestellten Tiefensensorsystemen lassen sich korrespondierende Grauwert- und Tiefenbilder von komplexen Polyederszenen erzeugen. Eine Integration von Grauwert- und Tiefenbildern führt dabei im Vergleich zur Verarbeitung von nur einer Bildquelle zu folgenden Verbesserungen in der Merkmalsextraktion: (i) Die problematische Kantendetektion im Tiefenbild wird durch das korrespondierende Grauwertbild zuverlässiger gemacht. (ii) Kanten, die im Grauwertbild nicht detektiert werden konnten, können z.T. im korrespondierenden Tiefenbild extrahiert und integriert werden. Ausserdem ermöglichen die räumlichen Informationen im Tiefenbild eine Klassifizierung der detektierten Kanten sowie die Lokalisierung der Kantenpunkte in 3D-Weltkoordinaten.

5.1 Zusammenfassung

In diesem Bericht wird ein System vorgestellt, das aus Grauwert- und Tiefenbildern — unabhängig voneinander — Kanten extrahiert und diese integriert. Im Grauwertbild werden die Kanten durch die Kombination von mehrkanaligen Kantenpunkt Bildern aus Canny-Operatoren mit verschiedenen Standardabweichungen detektiert. Im Tiefenbild werden die Sprungkanten durch Bestimmung des lokalen Durchschnittes der Tiefenwertdifferenzen detektiert, die Schnittkanten durch den Schnitt von adjazenten Objektflächen, die aus dem segmentierten Tiefenbild stammen, berechnet.

Die durch Geradenapproximation zerlegten und klassifizierten Kanten werden anschliessend durch ein *zweistufiges Verfahren* integriert. Dabei werden die Kanten aus dem Grauwertbild durch diejenigen Kantenteile aus dem Tiefenbild ergänzt, welche mit den Kanten aus dem Grauwertbild räumlich nicht übereinstimmen: In einem ersten Schritt werden die Kanten aus dem Grauwertbild durch nichtkorrespondierende Sprungkanten aus dem Tiefenbild, in einem zweiten Schritt durch nichtkorrespondierende Schnittkanten aus dem Tiefenbild ergänzt. Das beschriebene Verfahren beruht also auf der Annahme, dass die Kanten im Grauwertbild genügend gut — bzw. besser als im Tiefenbild — detektiert werden können. Die Kanten aus dem Tiefenbild dienen einzig dazu, die extrahierten Kanten zu vervollständigen. Die räumlichen Informationen im Tiefenbild ermöglichen eine Klassifizierung der extrahierten Kanten ohne *a priori*-Wissen über die Szene sowie die Lokalisierung der Kantenpunkte in 3D-Weltkoordinaten.

Die Kantendetektionsmethoden und das Integrationsverfahren wurden an einer Sammlung von 21 Szenen auf Robustheit getestet. Wie die Resultate bestätigen, konnten die meisten Kanten bereits im Grauwertbild detektiert werden. Ausserdem haben sowohl die Anzahl als auch die Qualität der extrahierten Kanten durch die Integration zugenommen. Somit haben sich die Heuristik über die Zuverlässigkeit der Kanten sowie die Methode, Kanten zu zerlegen und punktweise zu integrieren, als erfolgreich erwiesen.

5.2 Ausblick

Die weiteren Arbeiten an diesem Projekt werden sich mit der Weiterverarbeitung und Interpretation der integrierten Kanten befassen:

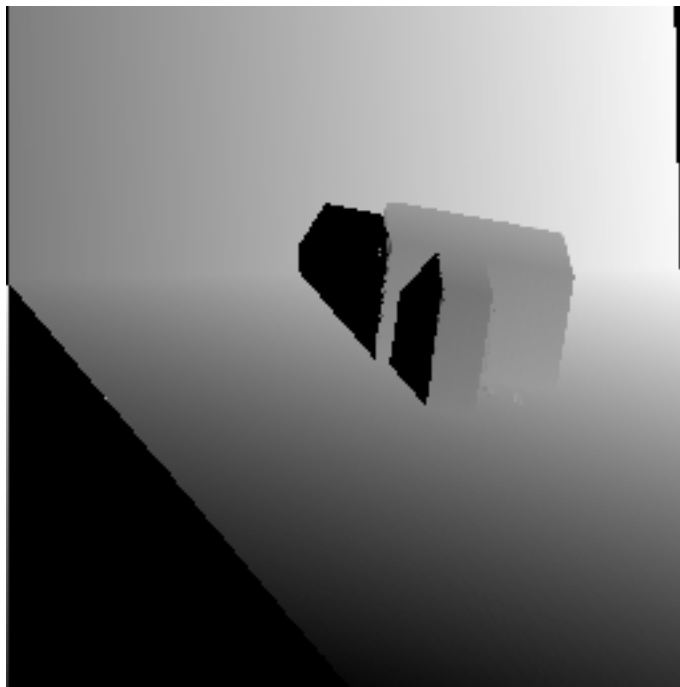
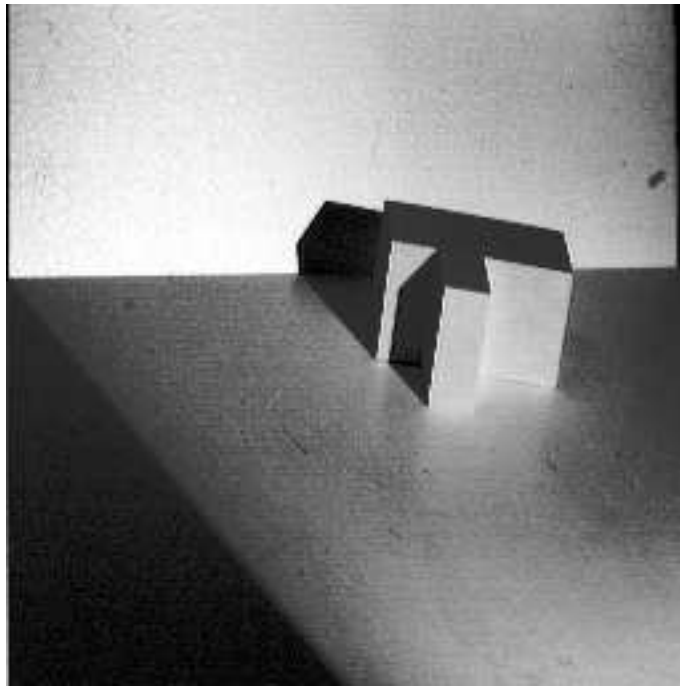
- Aus den extrahierten Kanten sollen durch Verlängerung gerader Liniensegmente die *Ecken* detektiert werden. Aufgrund der klassifizierten Kanten ist eine Klassifizierung der Ecken möglich. Das Ziel ist, möglichst vollständige und konsistente Ecken–Kanten–Modelle der Objekte in der Szene zu erhalten.
- Durch den Einsatz des *kodierten Lichtansatzes* treten immer auch Schatten (*missing parts*) auf, die Objektteile überdecken können. Aufgrund der Kantentypen in den Ecken soll, um eine möglichst vollständige Beschreibung der Objekte zu erhalten, eine Unterscheidung der Schattenkanten in *geometrische* und *nichtgeometrische Kanten* vorgenommen werden. Angestrebt wird die Interpretation der Schattengebiete, die zuverlässigere Angaben über die Ausdehnung von überdeckten bzw. überdeckenden Objektflächen, welche an ein Schattengebiet grenzen, erlaubt.

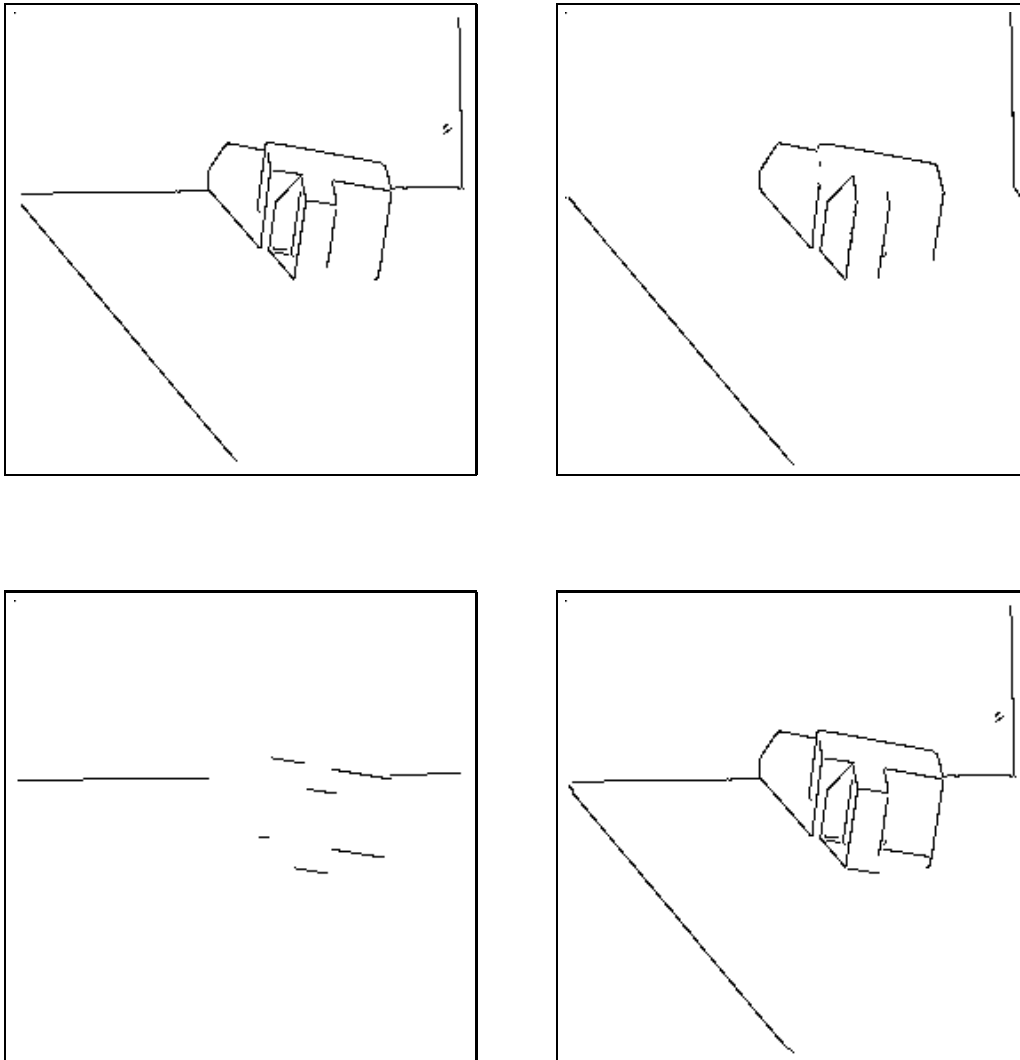
A Bilder und Resultate

In diesem Anhang wird die Sammlung der Szenen vorgestellt, auf die das beschriebene Integrationsverfahren angewendet wurde. Die Reihenfolge der Szenen entspricht der zunehmenden Komplexität der Szene, die sich in der Anzahl der dargestellten Objekte ausdrückt. Die nachfolgende Tabelle verschafft einen Überblick über die Reihenfolge der abgebildeten Szenen sowie die Anzahl und Art der dargestellten Objekte:

| Szene | # Objekte | Objekte |
|--------------|-----------|---|
| iam05000000A | 1 | Tshape |
| iam06000000A | 1 | Pillars |
| iam07000000A | 1 | Delta |
| iam08000000A | 1 | Ushape |
| iam09000000A | 1 | Corner |
| iam10000000A | 1 | Tower |
| iam10000000B | 1 | Tower |
| iam11000000A | 1 | Terrace |
| iam64000000A | 1 | Cube |
| iam06070000A | 2 | Pillars, Delta |
| iam07080000A | 2 | Delta, Ushape |
| iam09100000A | 2 | Corner, Tower |
| iam05070800A | 3 | Tshape, Delta, Ushape |
| iam05091000A | 3 | Tshape, Corner, Tower |
| iam06096400A | 3 | Pillars, Corner, Cube |
| iam08091000A | 3 | Ushape, Corner, Tower |
| iam08101100A | 3 | Ushape, Tower, Terrace |
| iam05070810A | 4 | Tshape, Delta, Ushape, Tower |
| iam05070810D | 4 | Tshape, Delta, Ushape, Tower |
| iam05070810B | 5 | Tshape, Delta, Ushape, Tower, Pillars |
| iam05070810C | 6 | Tshape, Delta, Ushape, Tower, Pillars, Corner |

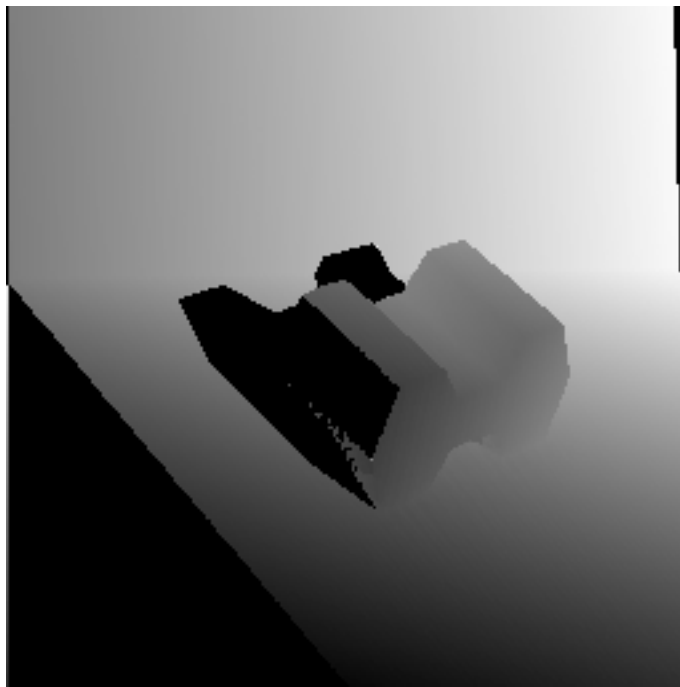
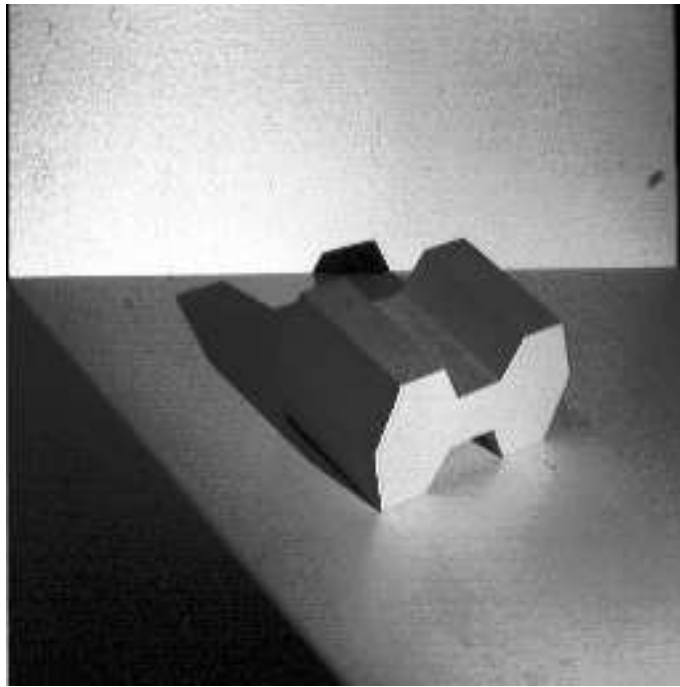
A.1 Szene iam05000000A

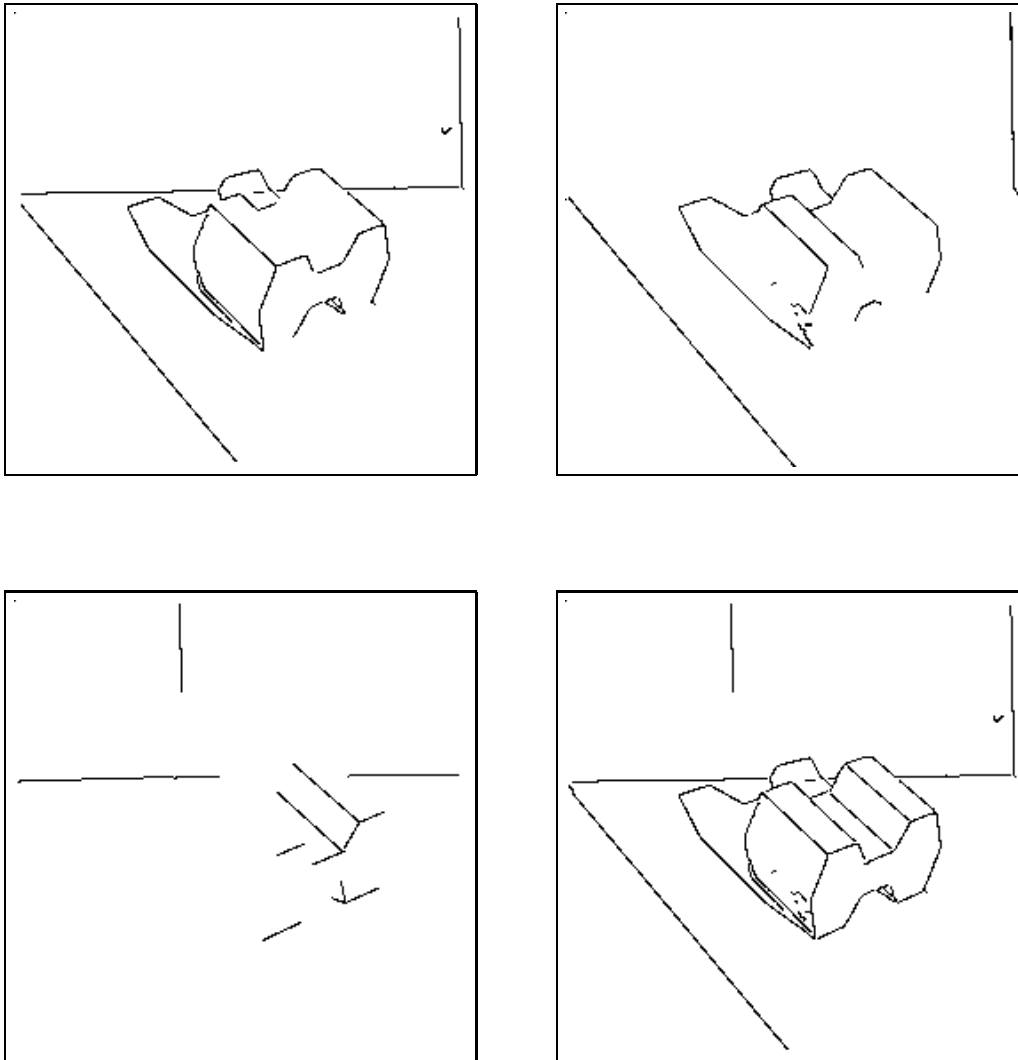




Beurteilung: Diese einfache Szene mit dem Objekt Tshape wurde von allen drei Kantendetektionsmethoden zufriedenstellend verarbeitet. Einzig im Grauwertbild konnten die drei vorderen konkaven Schnittkanten am Boden nicht detektiert werden. Überdies fehlt das untere Stück der vordersten Sprungkante. Diese wurde im Tiefenbild zwar korrekt detektiert, bei der Integration wegen zu geringer Länge aber als Störung interpretiert und deshalb gelöscht. Der gleiche Fall ist bei der fehlenden kurzen Schnittkante ganz links eingetreten: Aus dem Tiefenbild korrekt extrahiert, wurde sie wegen ihrer zu geringen Länge im Integrationsschritt ausgeschlossen. Die fehlende Tiefenbild-Schattenkante in der oberen Objektfläche links rührt von den schlechten Tiefendaten in dieser Region her. Auffallend ist ausserdem, dass im Grauwertbild relativ viele Intensitätskanten detektiert werden konnten.

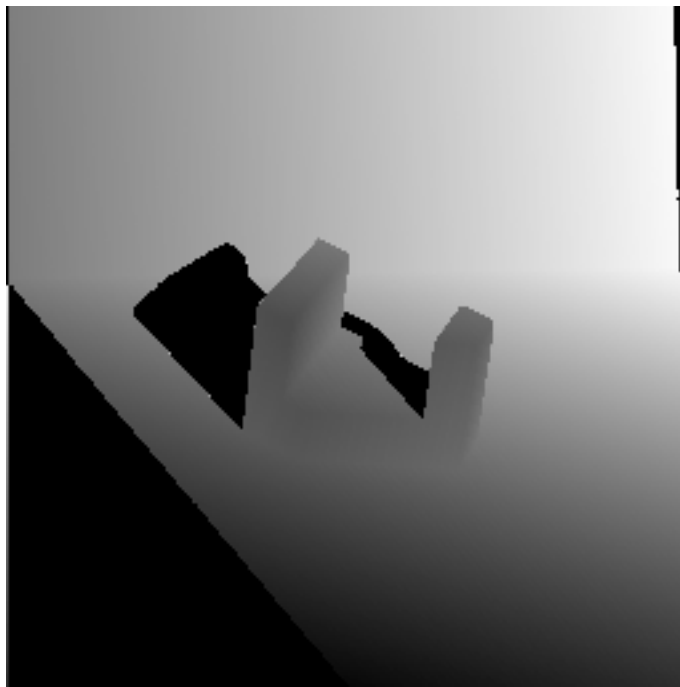
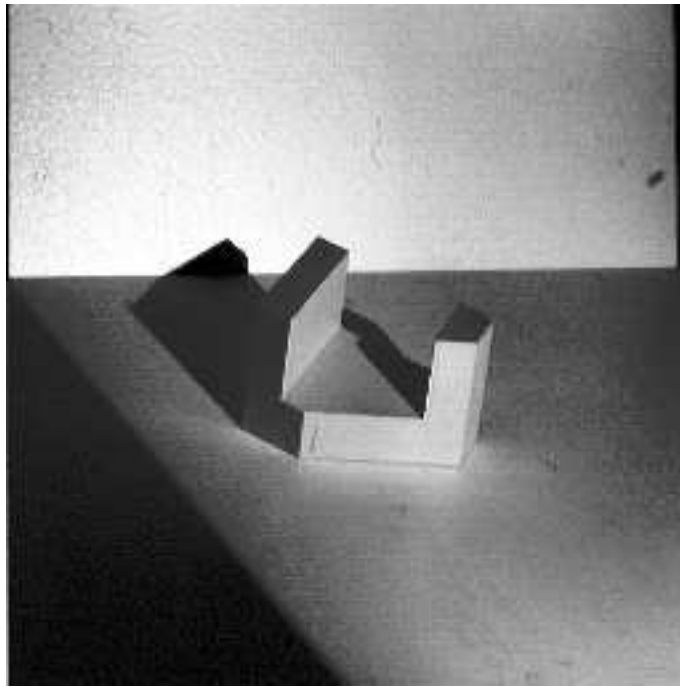
A.2 Szene iam06000000A

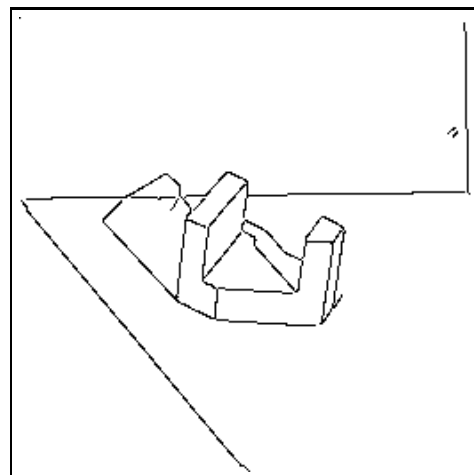
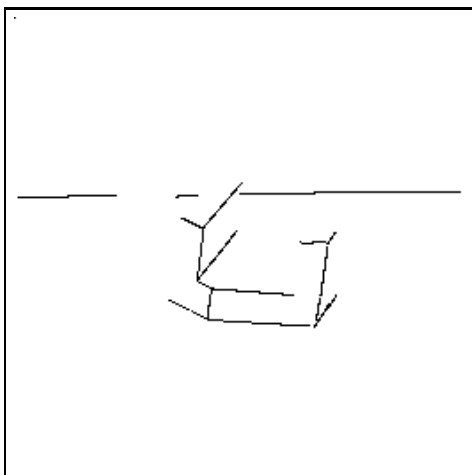
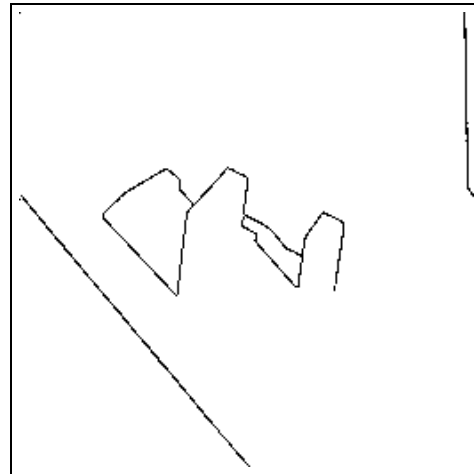
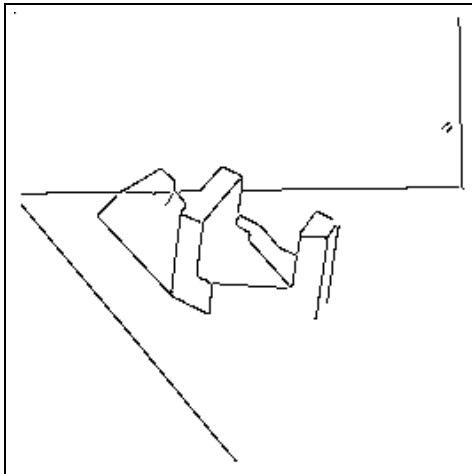




Beurteilung: Im Tiefenbild der Szene mit dem Objekt Pillars fallen die falschen Tiefenwerte im Schattengebiet in der linken unteren Fläche auf. Tatsächlich wurden dort falsche Schattenkanten detektiert, die auch vom Integrations-schritt übernommen wurden. Ausserdem wurde infolge Übersegmentierung eine Schnittkante im Hintergrund detektiert, die jedoch isoliert vom Objekt auftritt und leicht ausgeschlossen werden kann. Im Grauwertbild konnten praktisch die ganze linke hintere Sprung- sowie Schnittkante als Intensitätskanten detektiert werden. Die fehlenden drei Sprungkanten(stücke), eine konvexe sowie drei konkave Schnittkanten konnten erfolgreich integriert und klassifiziert werden.

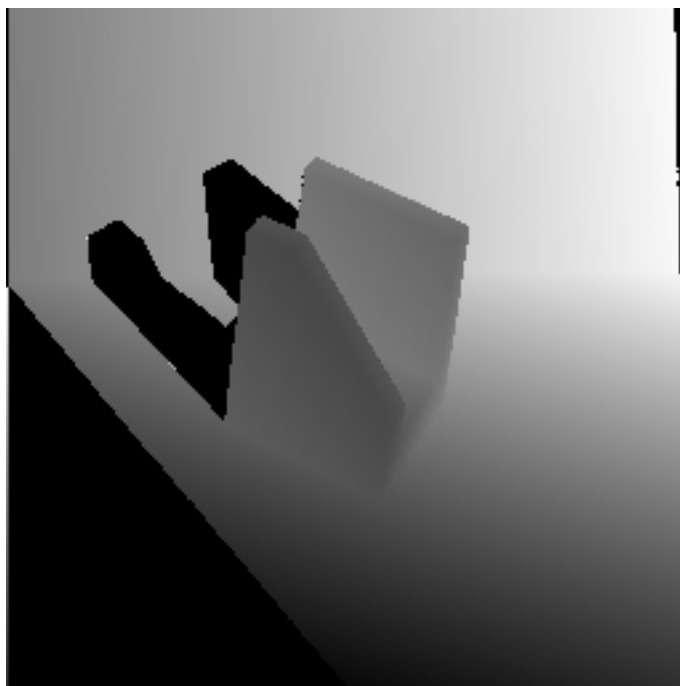
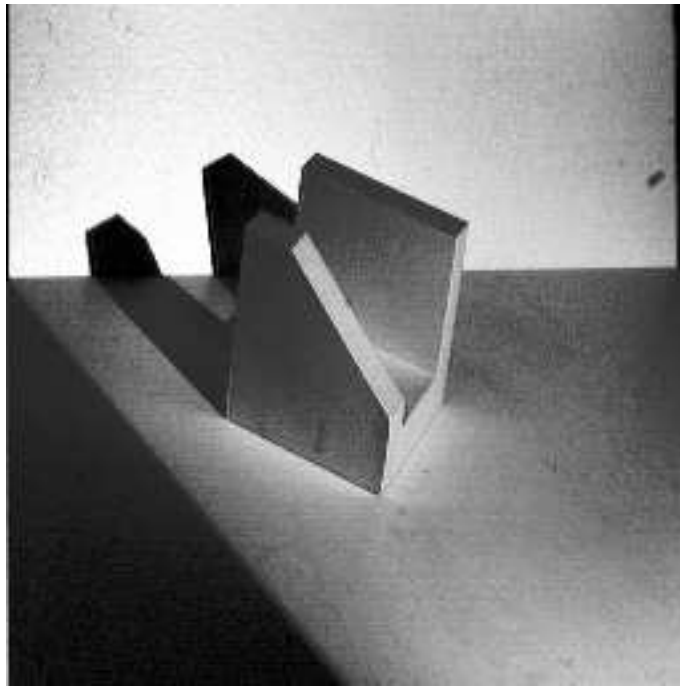
A.3 Szene iam07000000A

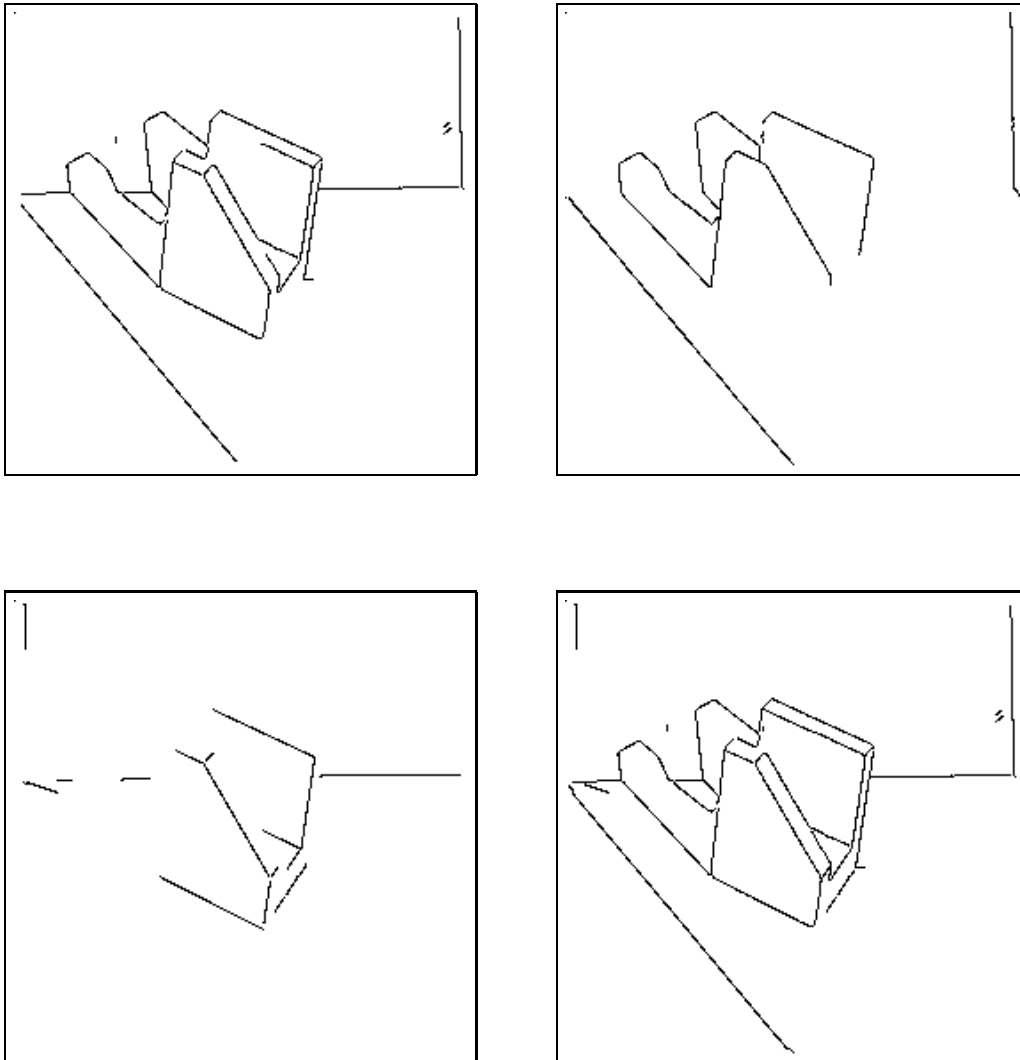




Beurteilung: *Diese Szene stellt eine nahezu ideale Integration dar. Konnten schon im Grauwertbild fast alle Kanten detektiert werden, wurden im Tiefenbild alle Kanten detektiert und die fehlenden korrekt integriert.*

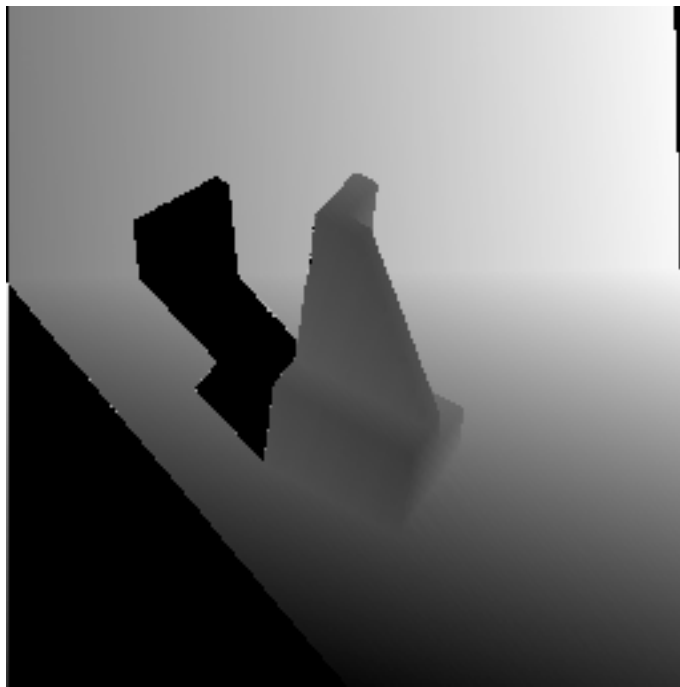
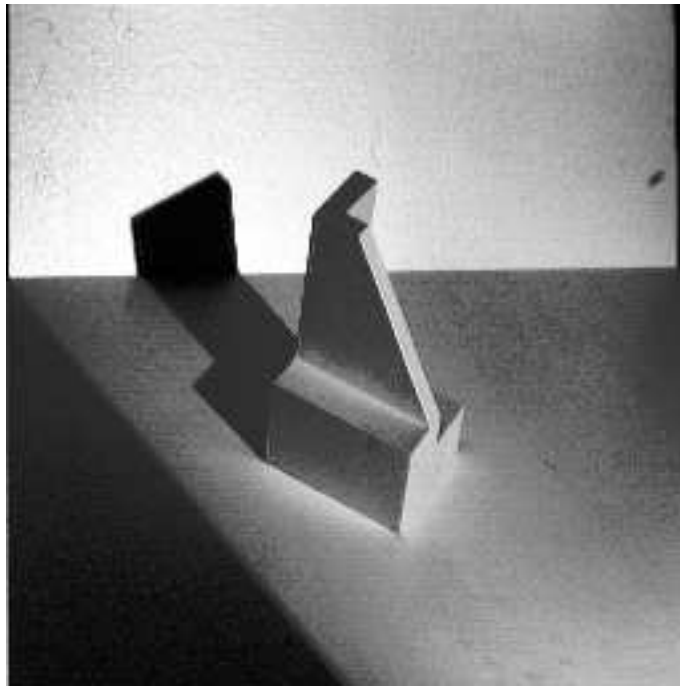
A.4 Szene iam08000000A

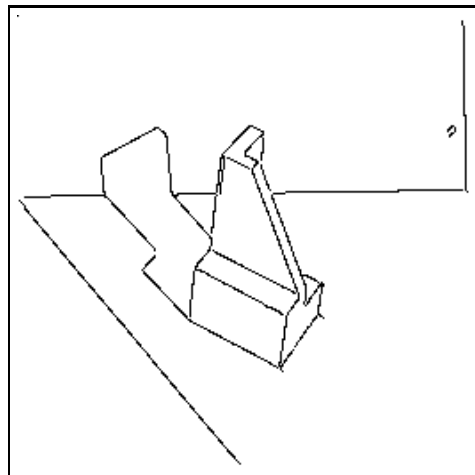
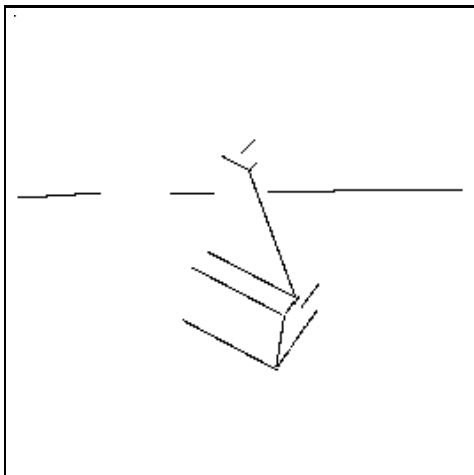
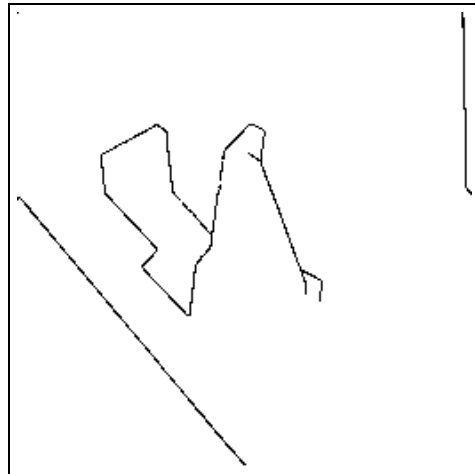
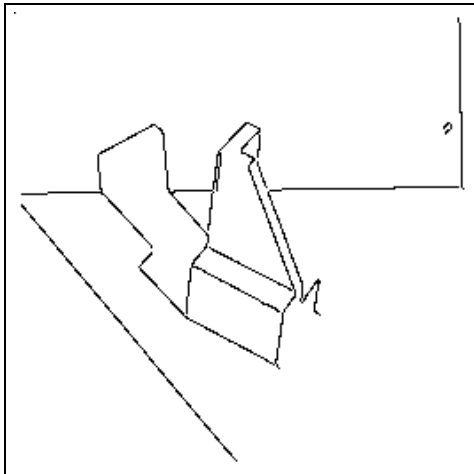




Beurteilung: Im Grauwertbild dieser Szene konnten bis auf wenige Ausnahmen alle Kanten detektiert werden. Die Schnittkanten aus dem Tiefenbild enthalten aufgrund von Übersegmentierungen im linken Teil des Hintergrundes einige falsche Elemente. Die Integration verlief bis auf die Sprungkante im vorderen Teil von Ushape erfolgreich. Der Grund für das Nichtintegrieren dieses Kantenstückes liegt in der zu geringen Länge des nichtkorrespondierenden Teiles und der daraus folgenden Interpretation als Störung. Die Integration der stumpfen konvexen Schnittkante im vorderen unteren Teil von Ushape verlief hingegen erfolgreich.

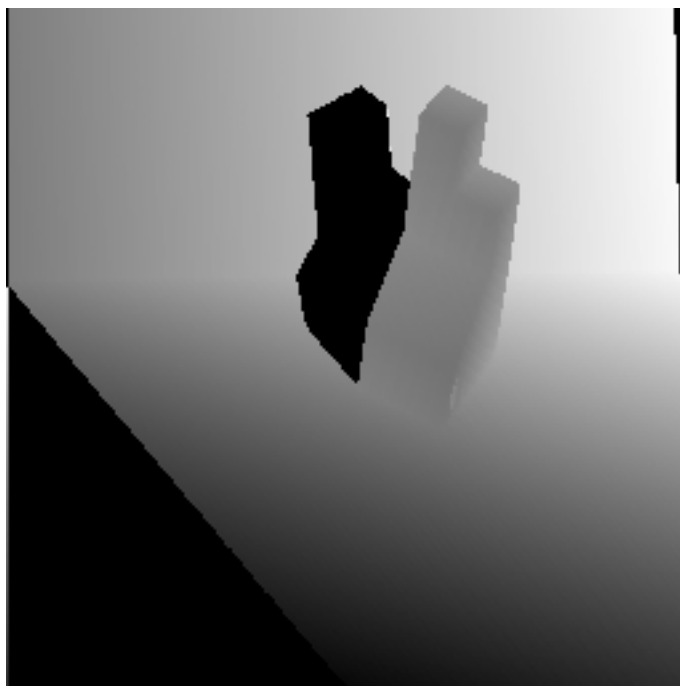
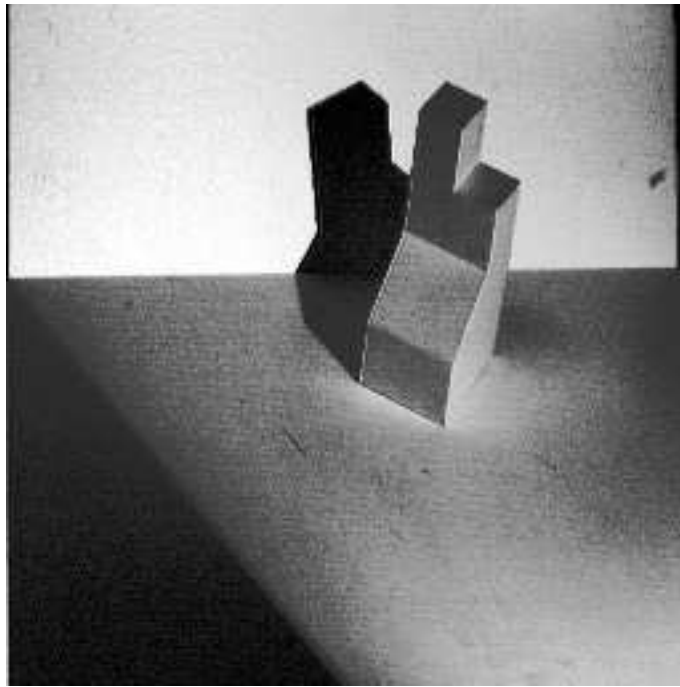
A.5 Szene iam09000000A

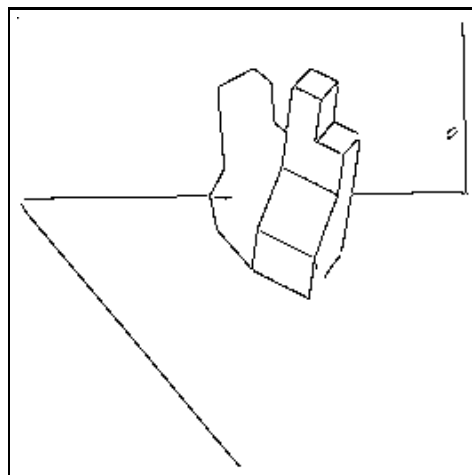
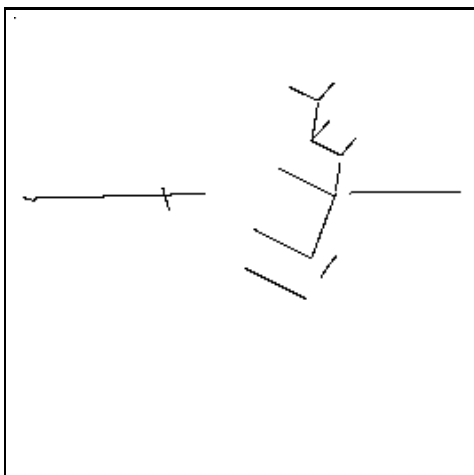
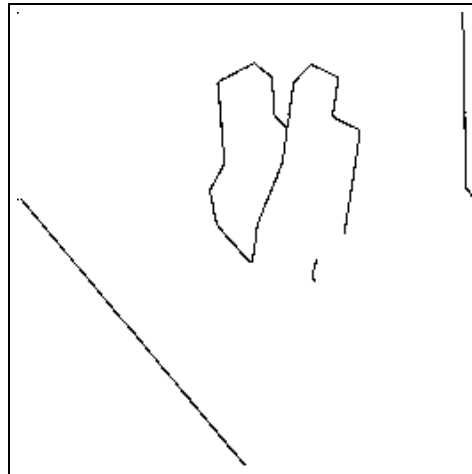
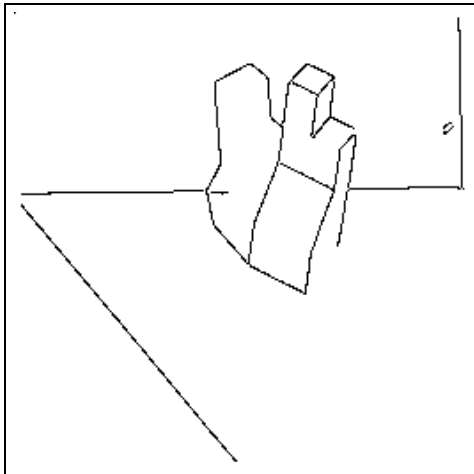




Beurteilung: Das Objekt Corner zeichnet sich durch verwinkelte Flächen und teilweise geringe Ausdehnungen aus. Trotzdem konnten alle fehlenden Kanten erfolgreich detektiert und integriert werden, mit Ausnahme der konvexen Schnittkante zwischen der L-förmigen Grundfläche und dem Aufsatz. Ausserdem störte die Reflexion an der Sprungkante oben links die Detektion im Grauwert- sowie im Tiefenbild.

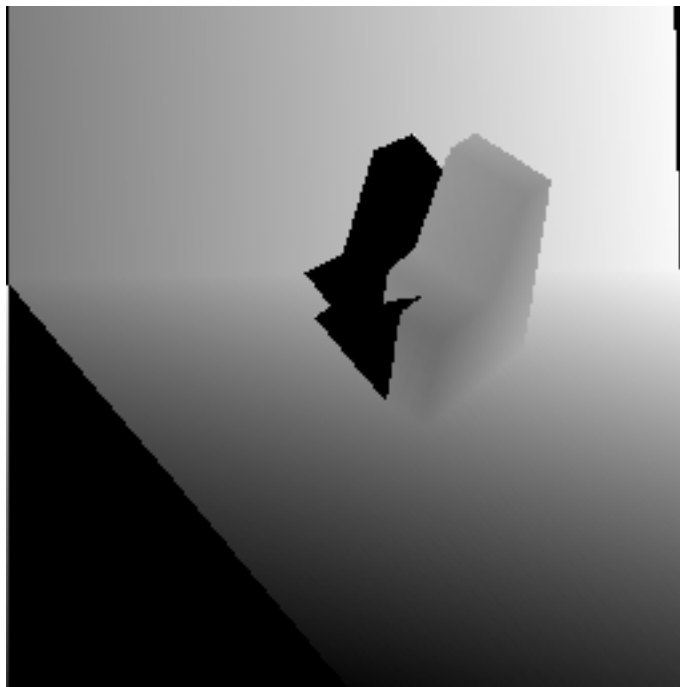
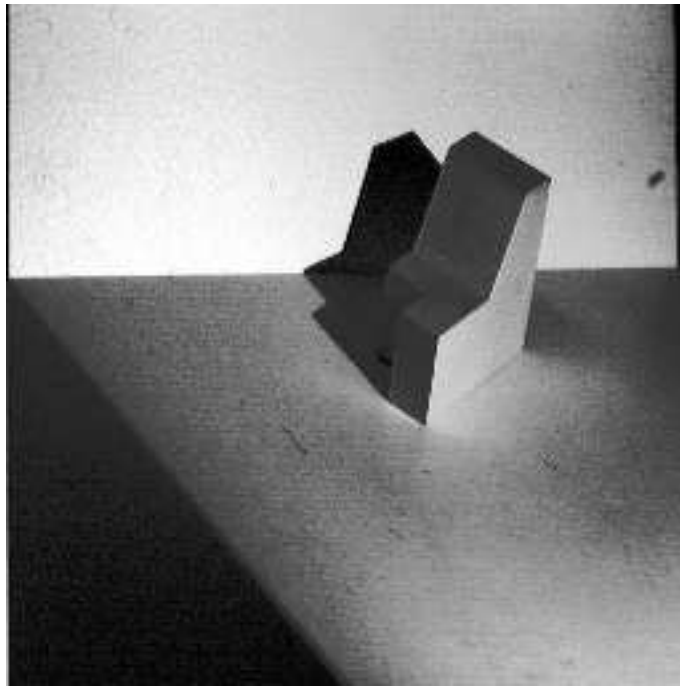
A.6 Szene iam1000000A

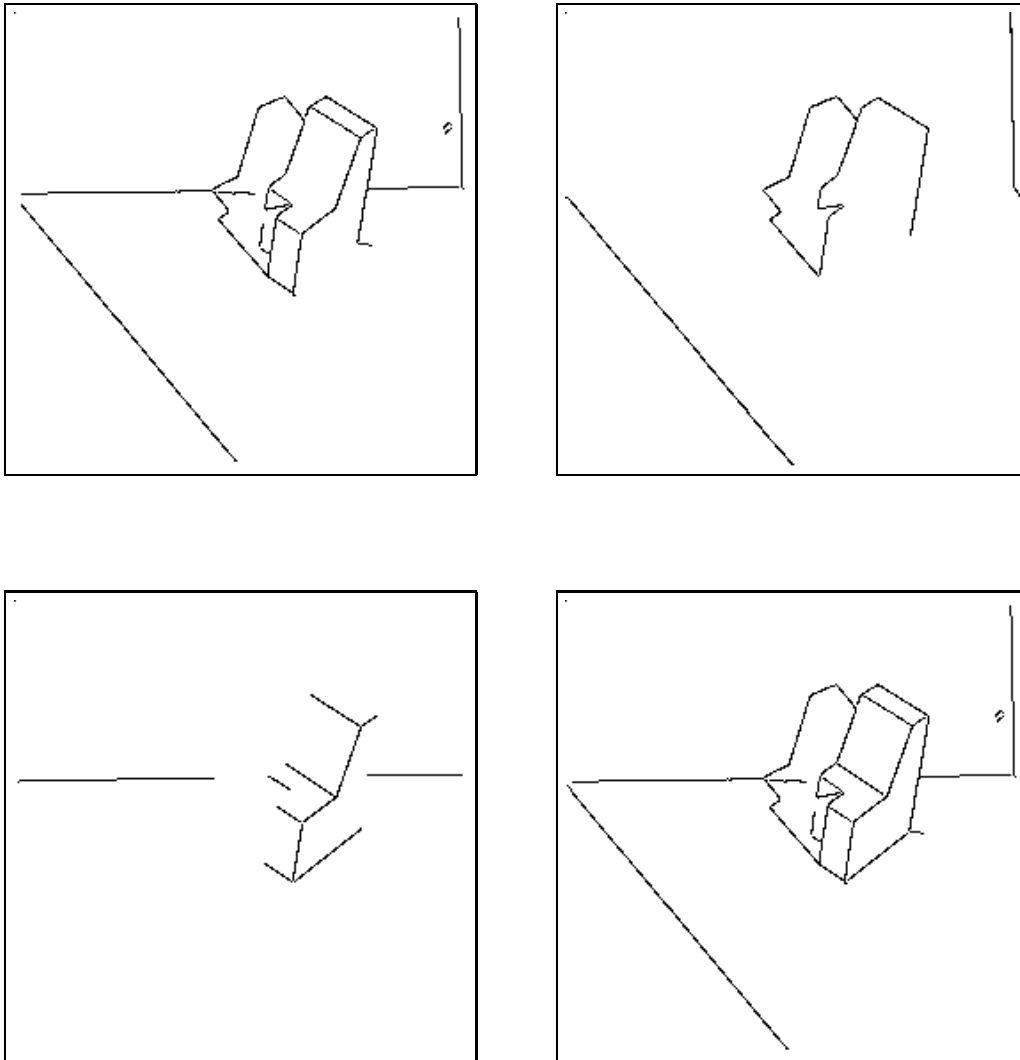




Beurteilung: Auch diese Szene mit dem Objekt Tower konnte befriedigend verarbeitet werden. Wichtige im Grauwertbild nicht detektierte Kanten — wie etwa die konvexen Schnittkanten im vorderen Teil des Objektes oder die konkave Schnittkante zwischen Boden und rechter Objektfläche — wurden korrekt integriert. Einzig die rechte Objektfläche, deren Normalenvektor steil zur Kamerarichtung steht, führte im Tiefenbild zu einer falschen Sprungkante und bei der Schnittkantenberechnung zu einer verkürzten konkaven Schnittkante. Allerdings konnten sowohl die falsche Sprungkante als auch die falsche Schnittkante (quer zur Schnittkante zwischen Boden und Hintergrund) im Integrationsschritt erfolgreich eliminiert werden.

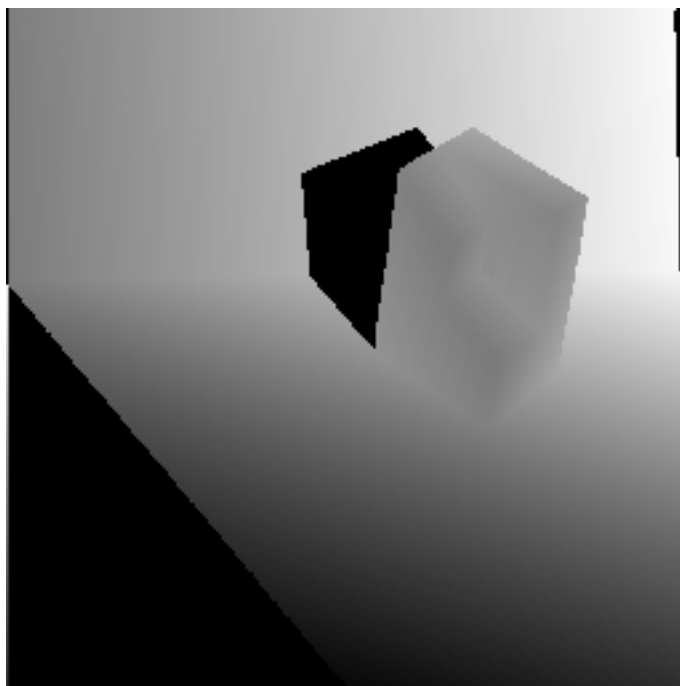
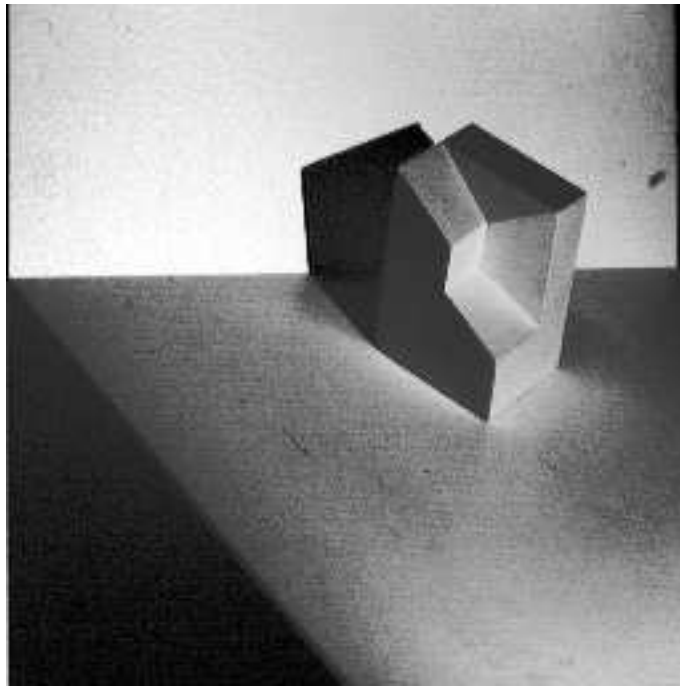
A.7 Szene iam1000000B

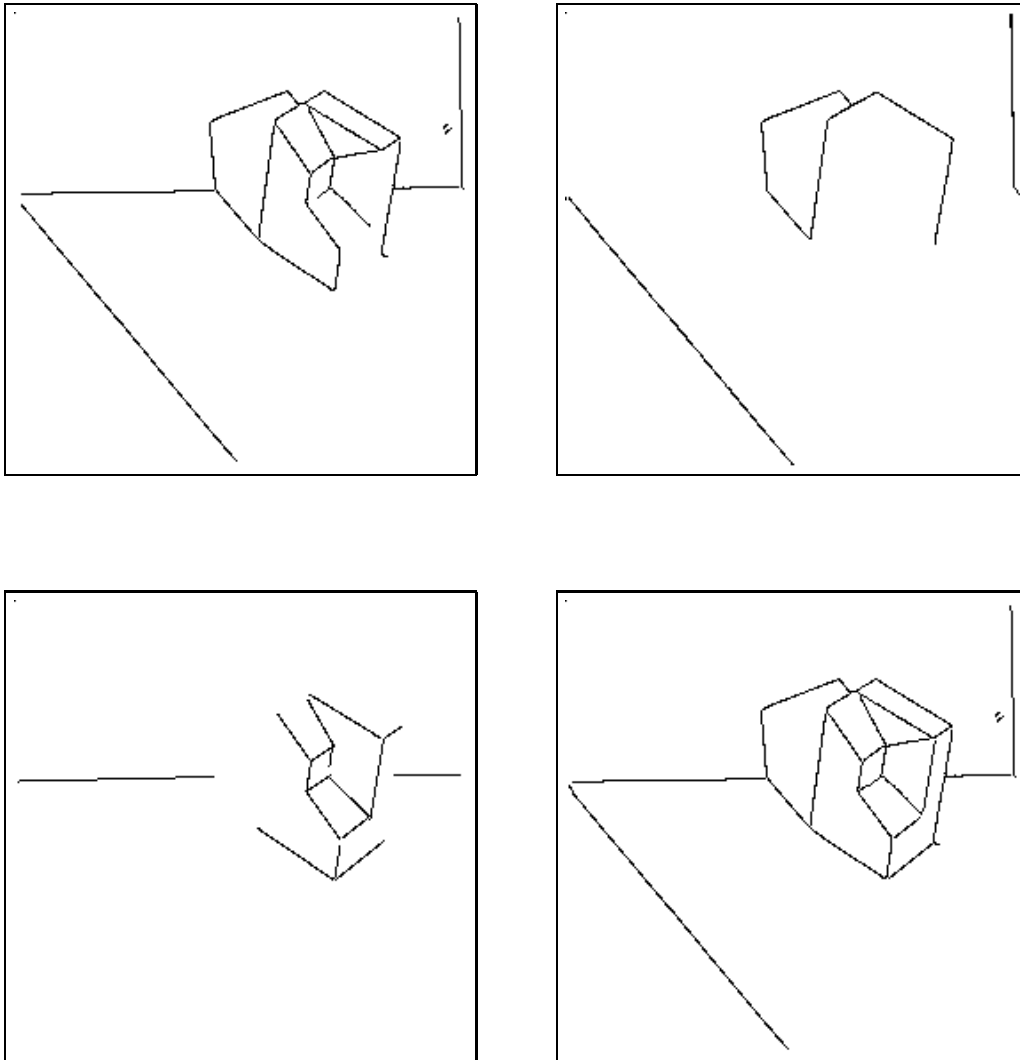




Beurteilung: Die zweite Szene mit dem Objekt Tower konnte geradezu ideal detektiert und integriert werden: Die beiden im Grauwertbild nicht detektierten konkaven Schnittkanten konnten mithilfe des Tiefenbildes erfolgreich integriert werden. Ausserdem wurden im Grauwertbild zwei Intensitätskanten detektiert.

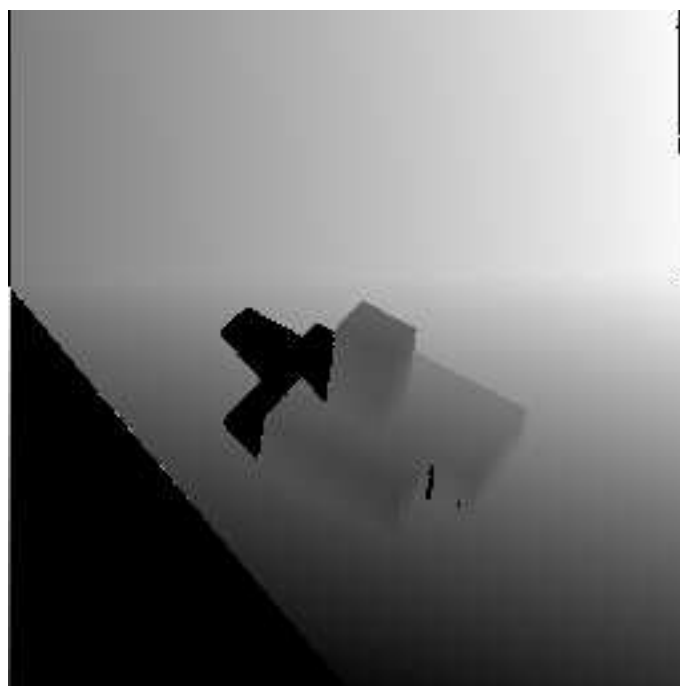
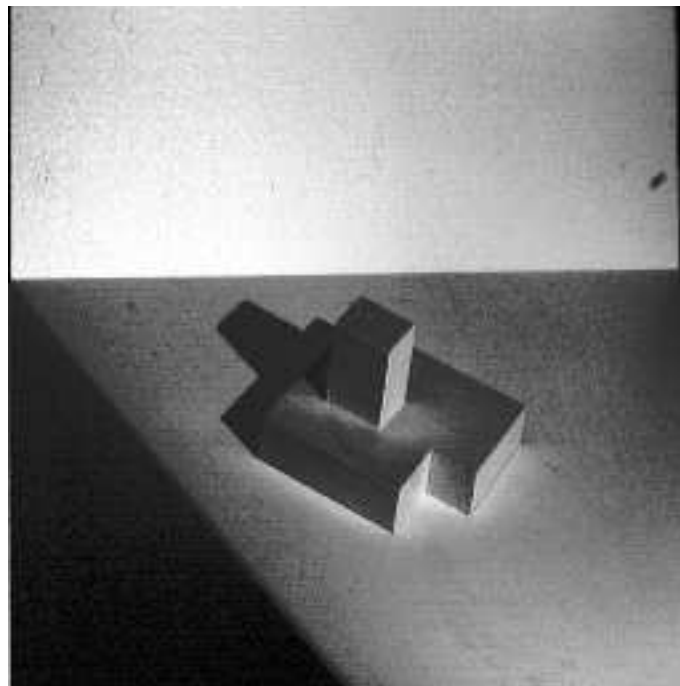
A.8 Szene iam1100000A

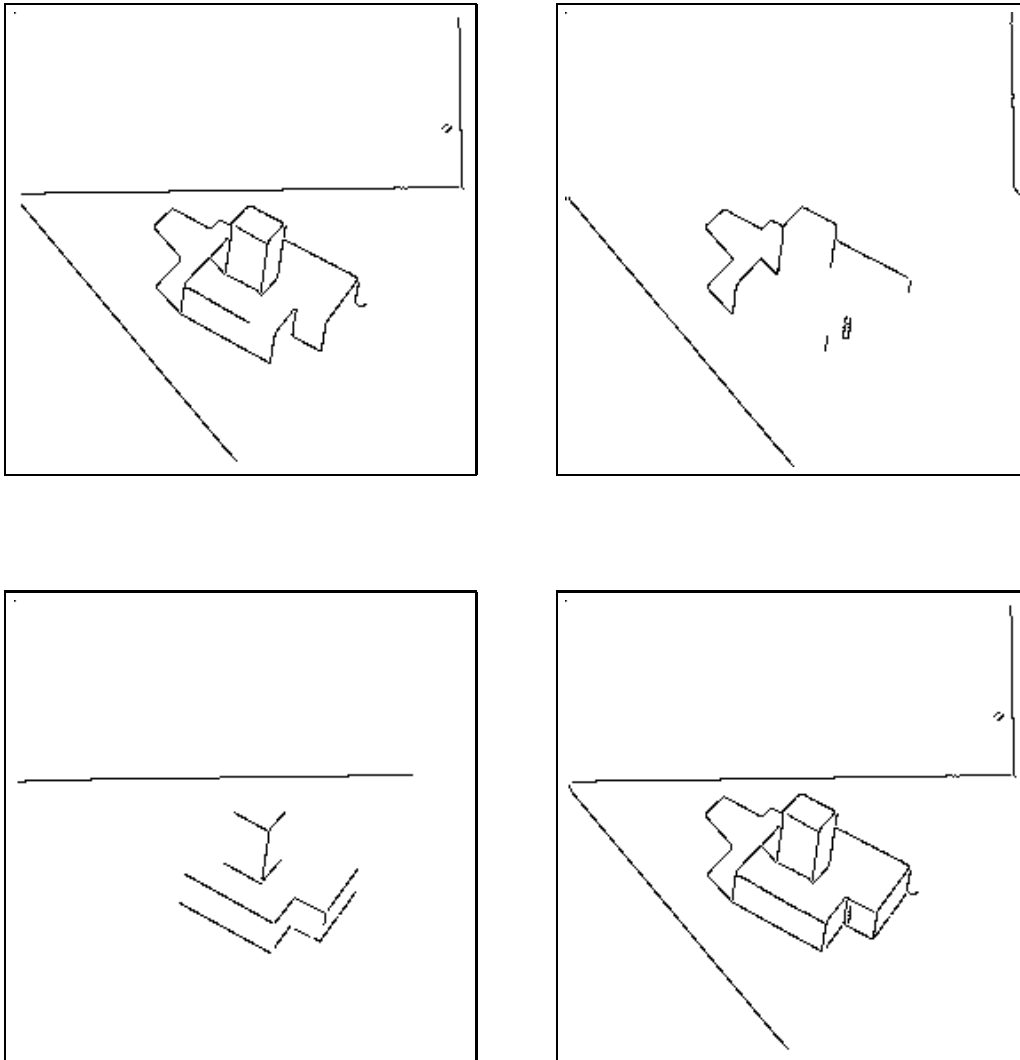




Beurteilung: Das Objekt Terrace zeichnet sich durch viele Flächen mit stumpfen Winkeln aus. In Anbetracht der ungünstigen Geometrie des Objektes, verlief die Verarbeitung erfolgreich. Drei Schnittkanten in der L-förmigen Seitenfläche rechts am Objekt konnten im Grauwertbild nicht detektiert, jedoch korrekt integriert werden. Einzig die Klassifizierung der sehr stumpfen konvexen Schnittkante hatte den unkorrekten Kantentyp Falschkante zur Folge.

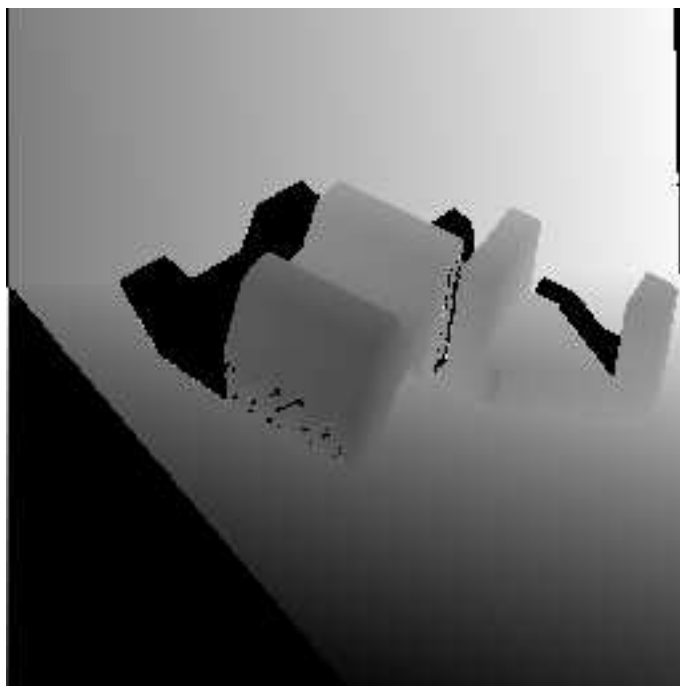
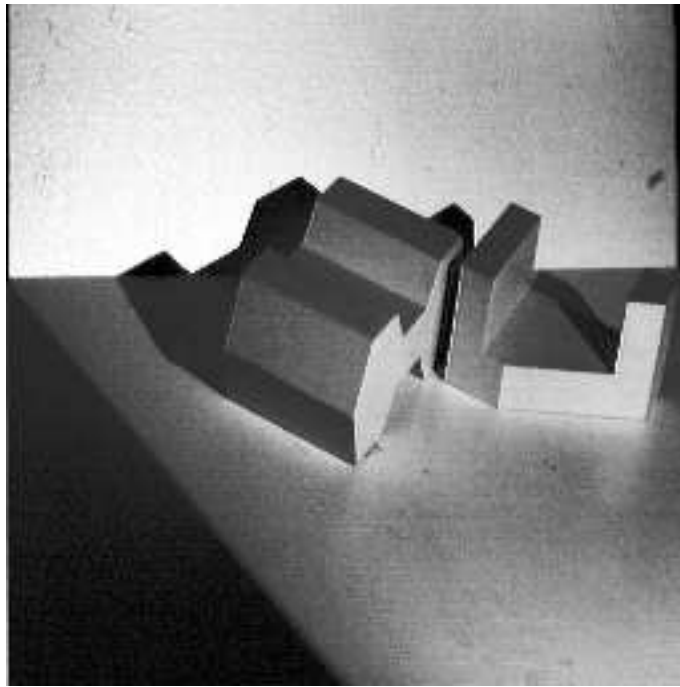
A.9 Szene iam6400000A

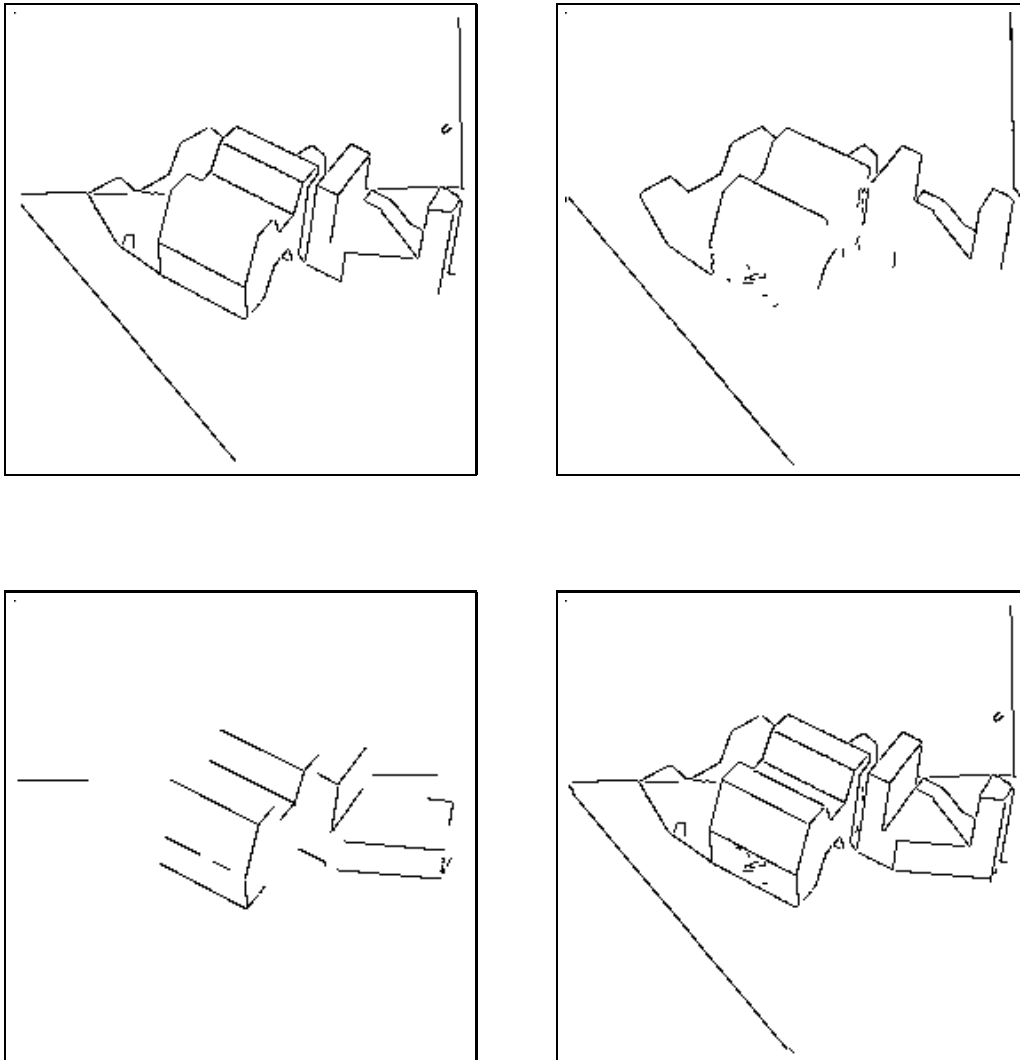




Beurteilung: Das Tiefenbild dieser Szene enthält in der Umgebung der senkrechten konkaven Schnittkante im vorderen, unteren Teil des Objektes Bildpunkte, deren Abstand nicht berechnet werden konnte und die falsche Sprungkanten zur Folge hatten. Im Grauwertbild konnten lediglich vier Schnittkanten nicht detektiert werden, die aber mit dem Tiefenbild erfolgreich integriert wurden. Die vom Schatten verdeckte Sprungkante wurde im Grauwertbild als Intensitätskante detektiert und klassifiziert.

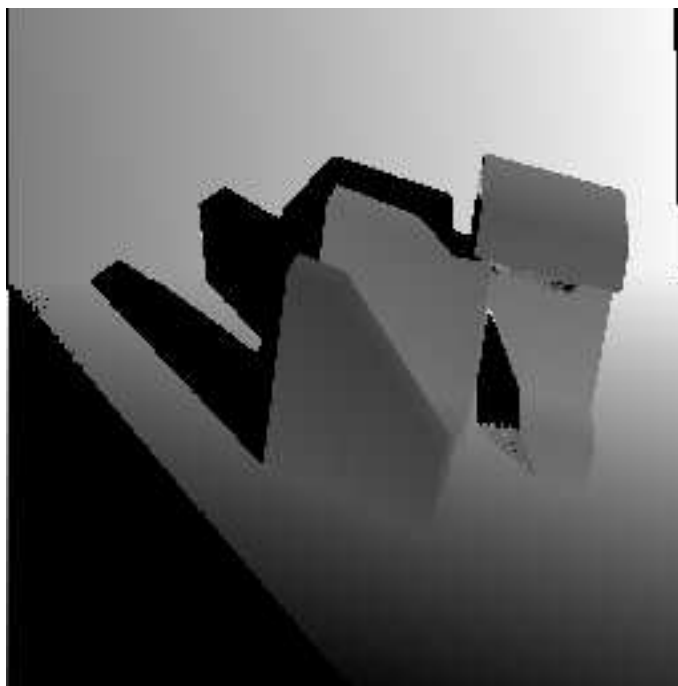
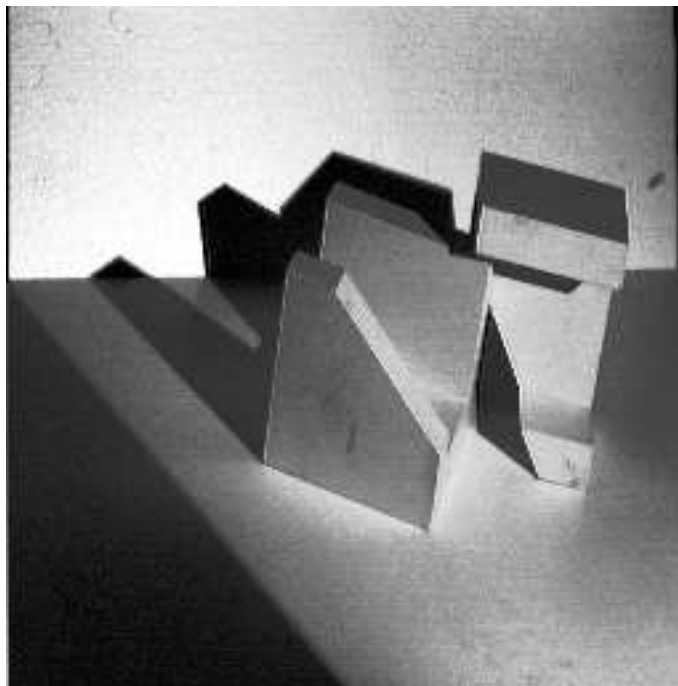
A.10 Szene iam06070000A

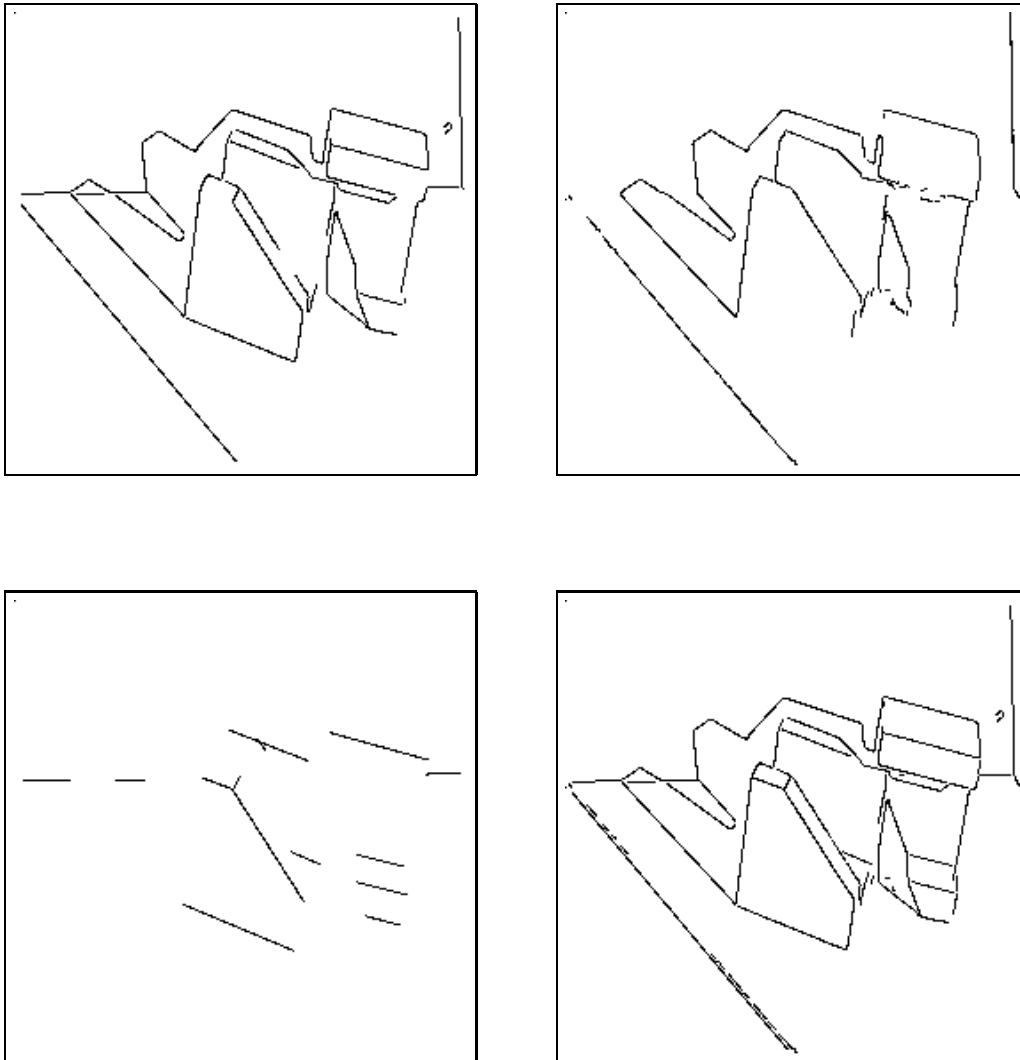




Beurteilung: Diese Szene enthält zwei Objekte — Pillars und Delta — in sehr geringem Abstand zueinander. Wegen schlechten Tiefendaten im Schattengebiet zwischen den beiden Objekten sowie in der linken unteren Fläche von Pillars wurden im Tiefenbild einige falsche Sprungkanten extrahiert. Im Grauwertbild wurden Intensitätskanten detektiert, die einerseits von der konkaven Schnittkante zwischen Hintergrund und Boden, andererseits von einer (trapezförmigen) Markierung auf dem Boden herrühren. Alle im Grauwertbild nicht detektierten Kanten konnten aus dem Tiefenbild integriert werden, einzig die konvexe Schnittkante zwischen der linken L-förmigen Front- und der Grundfläche von Delta blieb undetektiert. Die konvexe Schnittkante zwischen der rechten L-förmigen Front- und der Grundfläche von Delta wurde aufgrund einer Übersegmentierung im Tiefenbild als zu lang extrahiert. Im Integrations-schritt wurde der nichtkorrespondierende Teil hingegen korrekt als Falschkante klassifiziert und eliminiert.

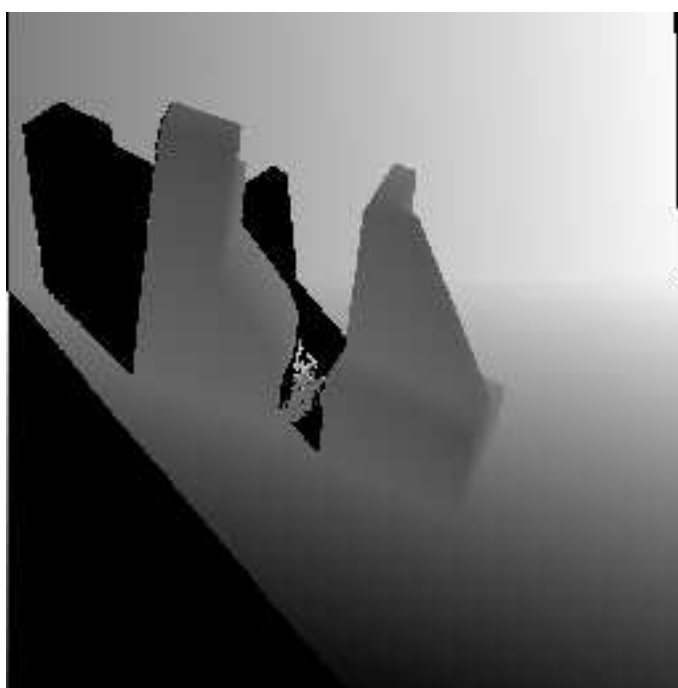
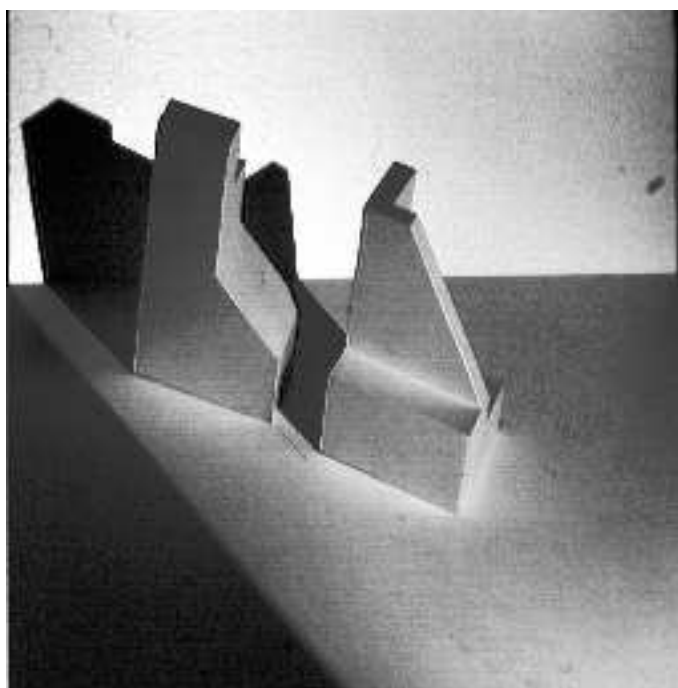
A.11 Szene iam07080000A

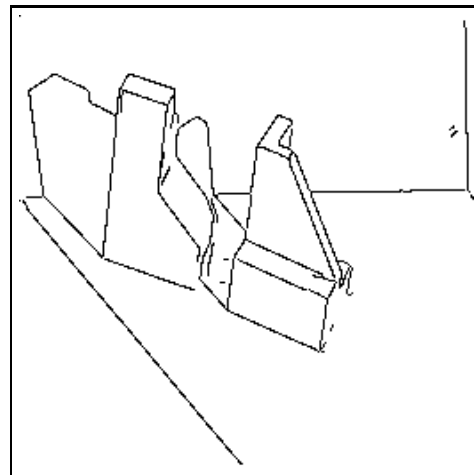
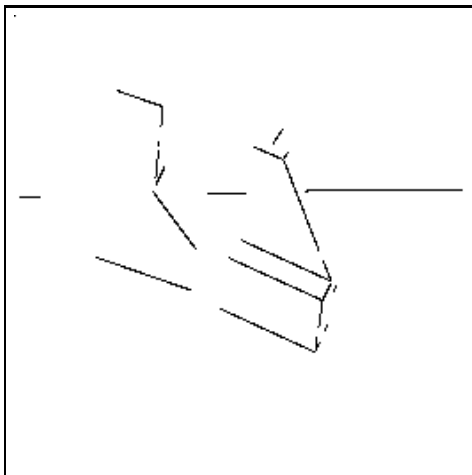
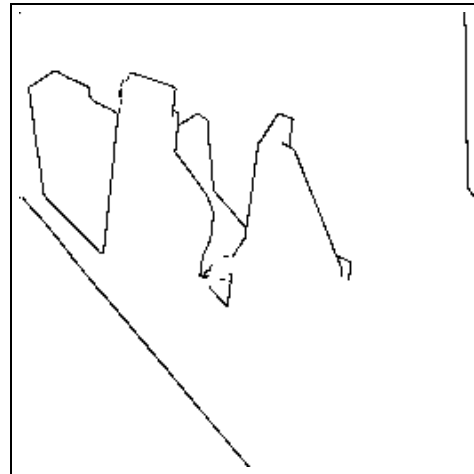
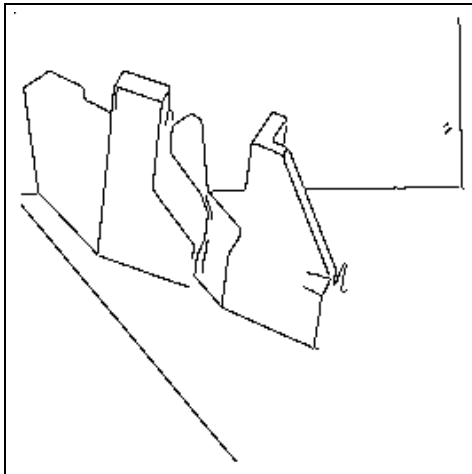




Beurteilung: Aufgrund von Reflexionen enthält das Tiefenbild im Schattenwurf von Delta schlechte Daten. Tatsächlich ist die Sprungkantendetektion im Tiefenbild in diesen Regionen fehlerhaft. Alle im Grauwertbild nicht detektierten Kanten konnten aus dem Tiefenbild integriert werden. Einzig die Kanten bei der U-förmigen rechten Seitenfläche von Ushape konnten nicht detektiert werden, da diese zu steil gegen die Kamerarichtung geneigt ist.

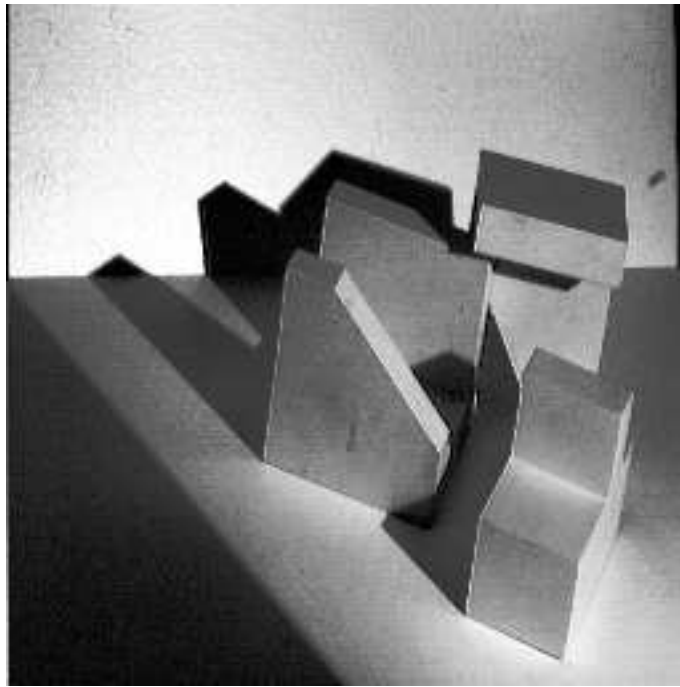
A.12 Szene iam09100000A

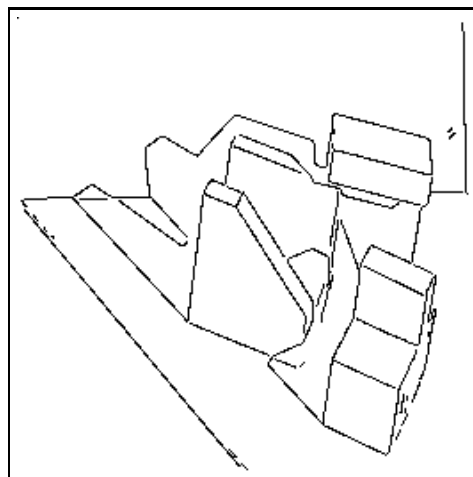
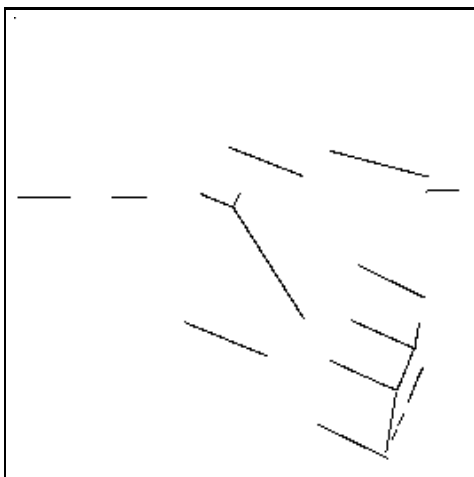
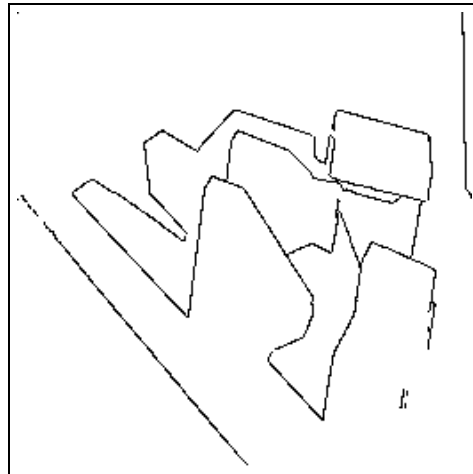
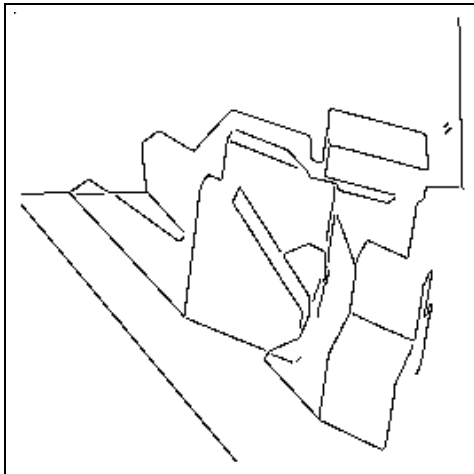




Beurteilung: Das Tiefenbild enthält aufgrund von Reflexionen im Schattenwurf von Corner auf den Boden falsche Daten. Diese führen wiederum in der Sprungkantendetektion im Tiefenbild zu kleinen Störungen. Die Reflexion an der oberen linken Sprungkante von Tower führt sowohl im Grauwert- als auch im Tiefenbild zu Störungen. Die Segmentierung des Tiefenbildes ergab am Boden in der Nähe zur rechten Seitenfläche von Corner viele undetektierete Bildpunkte, was zu einer schlechten Extraktion dieser konkaven Schnittkante führte. Ansonsten verlief die Integration erfolgreich.

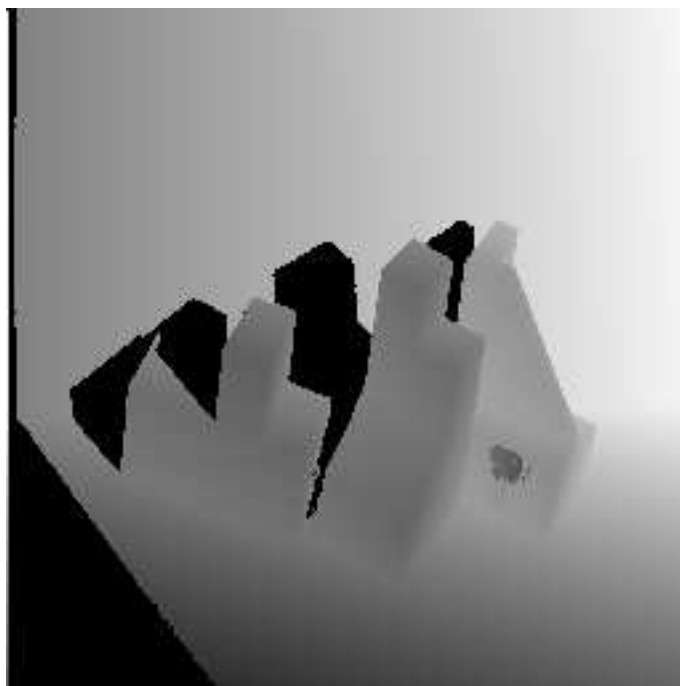
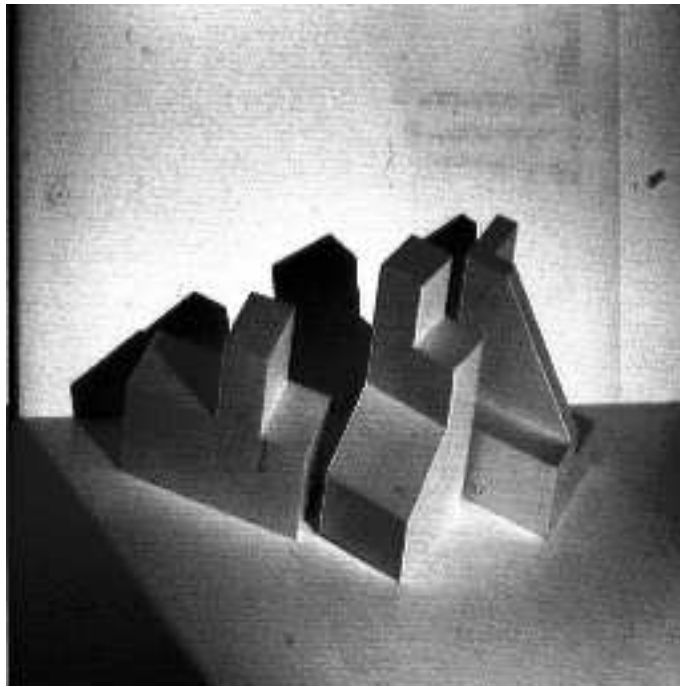
A.13 Szene iam05070800A

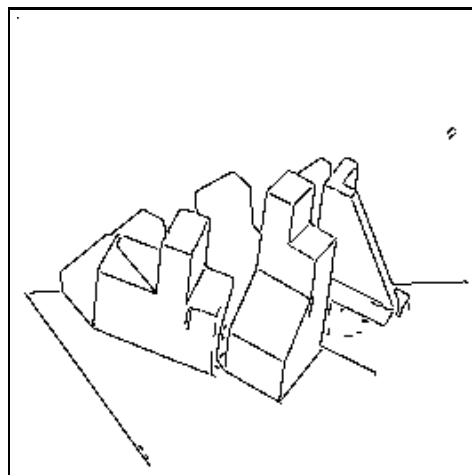
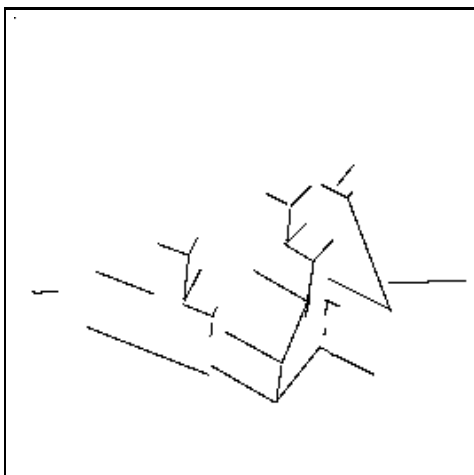
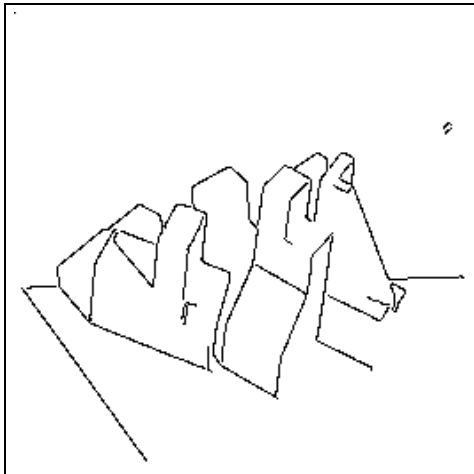




Beurteilung: *Die Resultate dieser Szene wurden bereits auf Seite 38 beurteilt.*

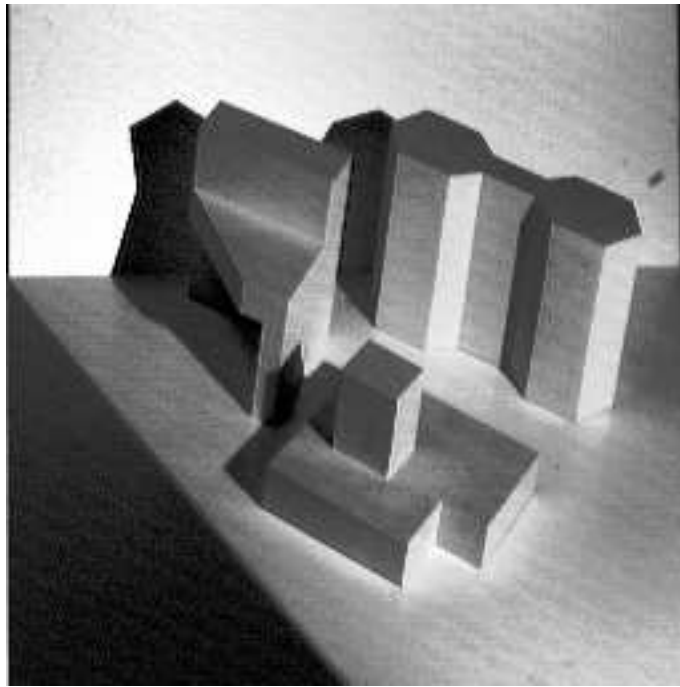
A.14 Szene iam05091000A

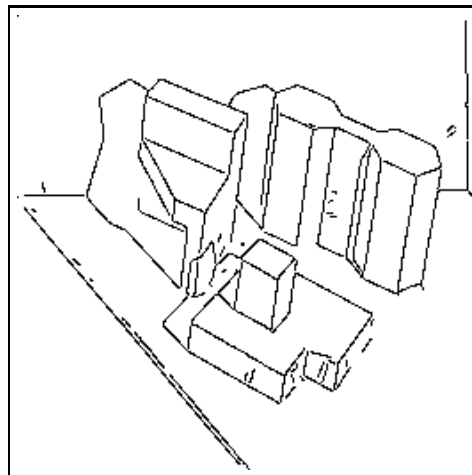
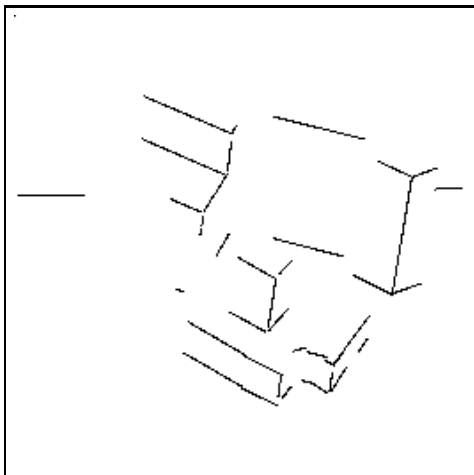
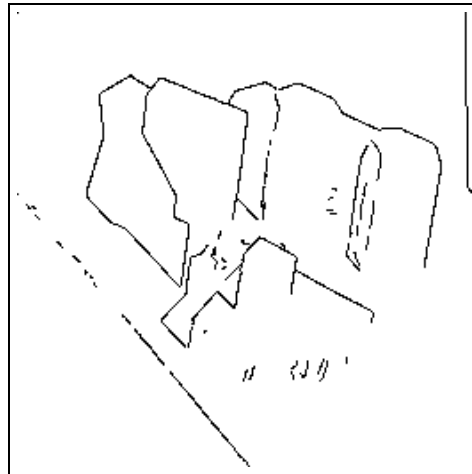
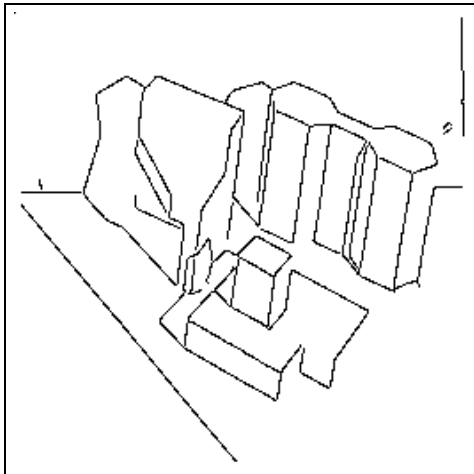




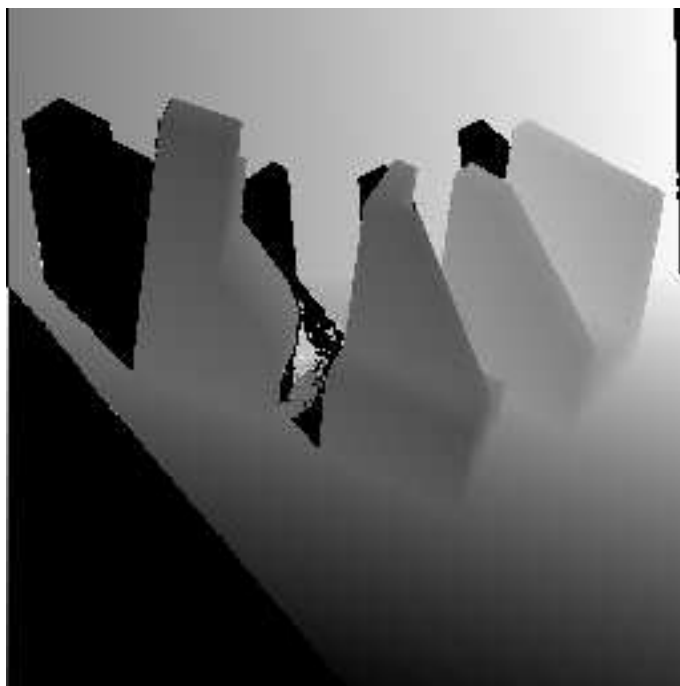
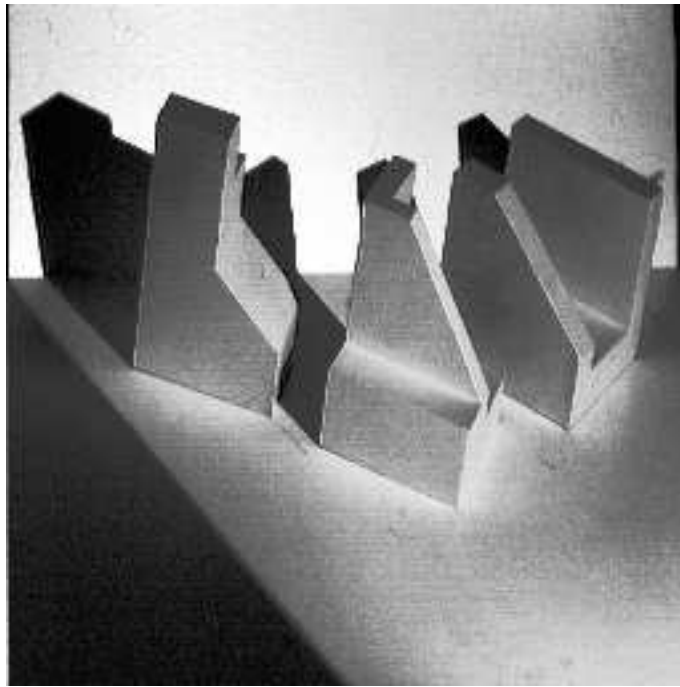
Beurteilung: Das Tiefenbild dieser Szene mit den Objekten Tshape, Tower und Corner enthält im Bereich der vordersten Fläche von Corner schlechte Daten, was zu einer fehlerhaften Sprungkantendetektion und Tiefenbildsegmentierung — und deshalb auch zu mangelhafter Schnittkantendetektion — führte. Das Grauwertbild enthält in der vorderen Frontfläche von Tshape eine Verunreinigung, welche die Detektion von zwei Kanten bewirkte. Deren Klassifizierung ergab ausserdem die fehlerhafte Zuweisung als konvexe und konkave Schnittkante. Im Grauwertbild wurden verschiedene wichtige Kanten nicht detektiert, die durch die Integration des Tiefenbildes jedoch gefunden werden konnten. Einzig die Schnittkanten an der rechten Seitenfläche von Corner konnten aufgrund der unvollständigen Segmentierung nicht detektiert werden.

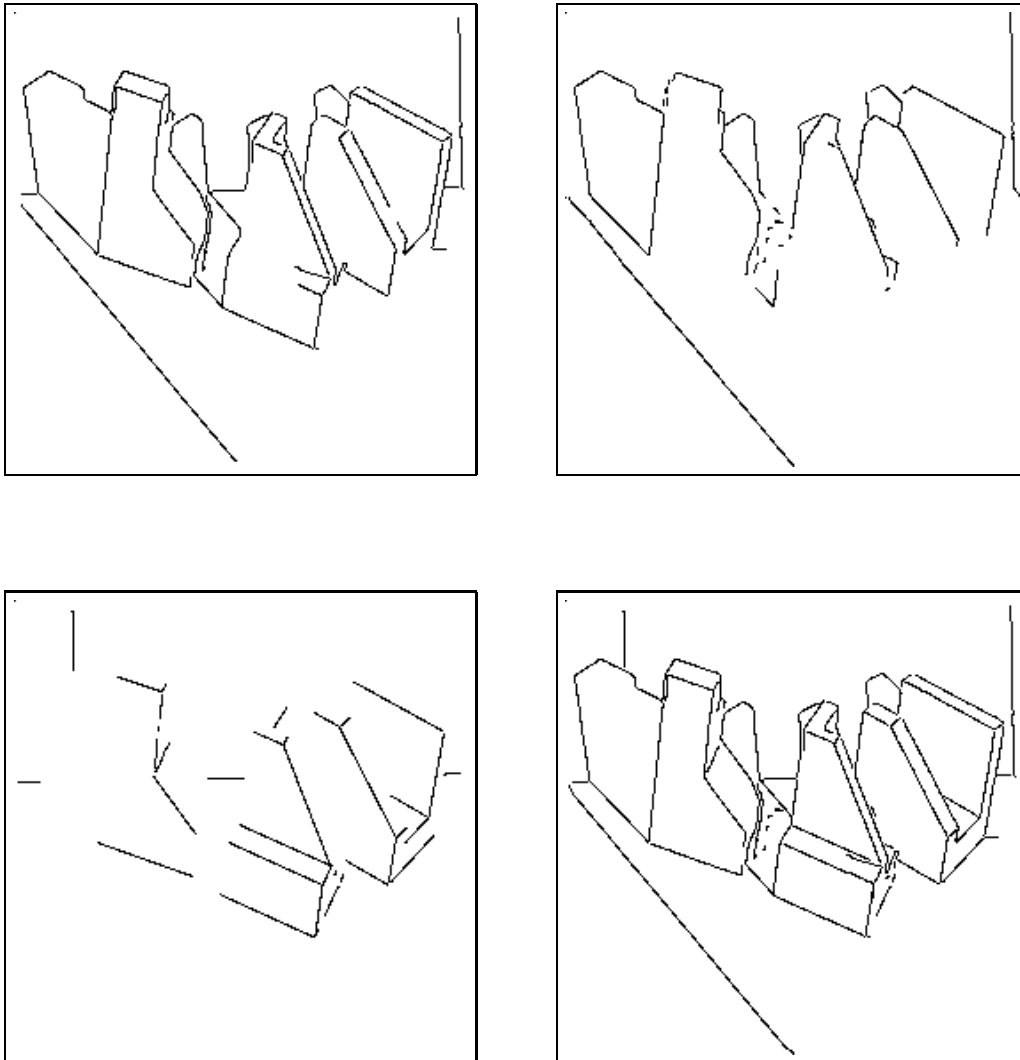
A.15 Szene iam06096400A





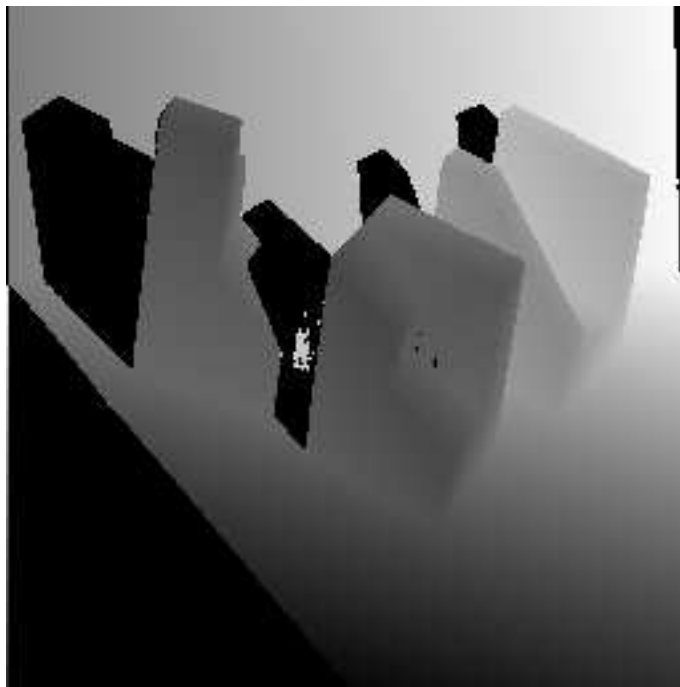
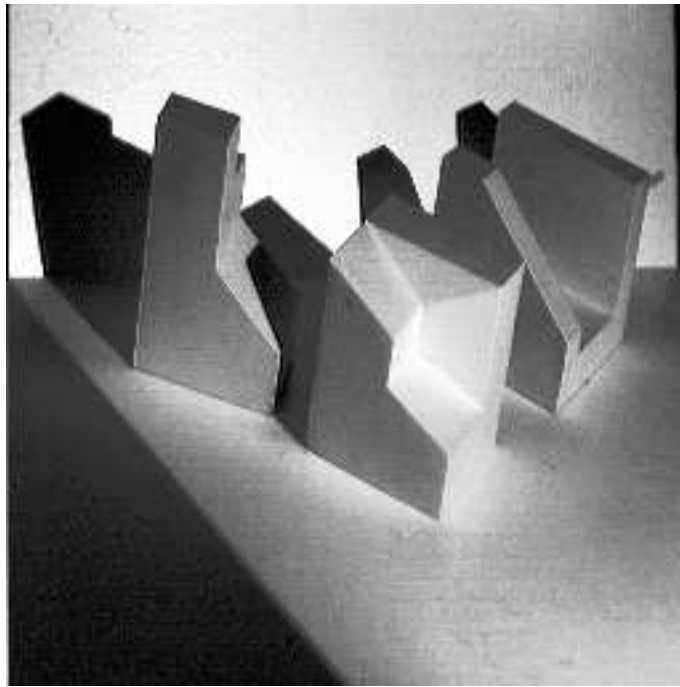
Beurteilung: Das Tiefenbild dieser Szene enthält mehrere Regionen nicht oder falsch berechneter Tiefendaten, die falsche Sprungkanten zur Folge hatten. Aufgrund einer Untersegmentierung des Tiefenbildes wurden die obere und untere Kante von Pillars als jeweils nur eine Schnittkante berechnet, aus denen aber im Integrationsschritt zu kleine nichtkorrespondierende Kantenteile resultierten, die nicht berücksichtigt wurden. Sämtliche Kanten des gekippten Corner wurden korrekt integriert, einige vom Schatten verdeckte Kanten konnten ausserdem als Intensitätskanten detektiert und klassifiziert werden.

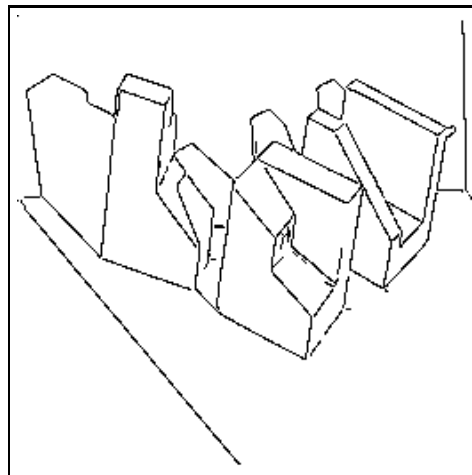
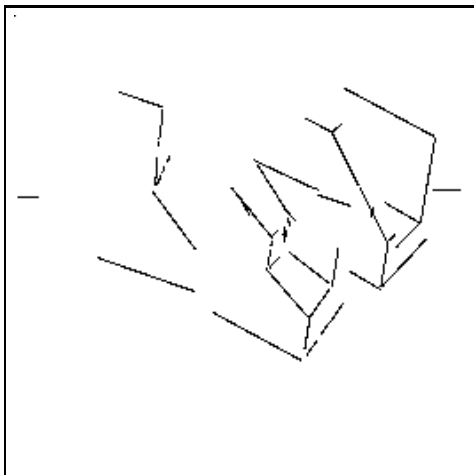
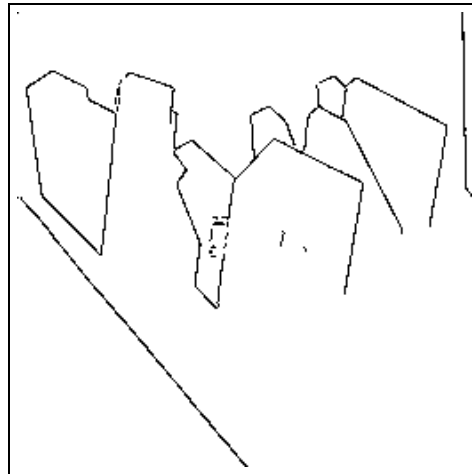
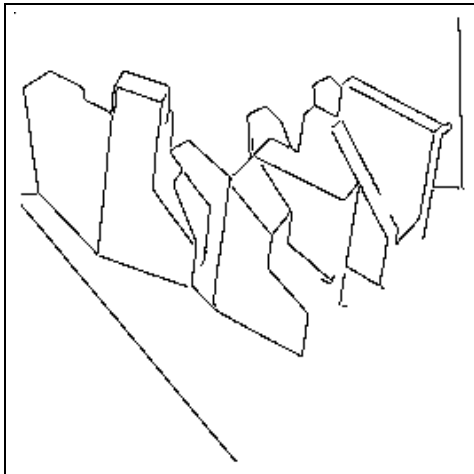
A.16 Szene iam08091000A



Beurteilung: Dieses Tiefenbild enthält im Schattenwurf von Corner auf den Boden Tiefendaten, die stark gestört sind. Dies führte bei der Detektion von Sprungkanten im Tiefenbild zu einigen falschen Kanten. Ansonsten verlief die Integration erfolgreich, konnten doch alle im Grauwertbild nichtdetektierten Kanten im Tiefenbild detektiert und integriert werden. Die falsche konkave Schnittkante im Hintergrund rührt von einer Übersegmentierung des Tiefenbildes her, doch kann diese in einem späteren Schritt wegen ihrer speziellen Lage leicht eliminiert werden.

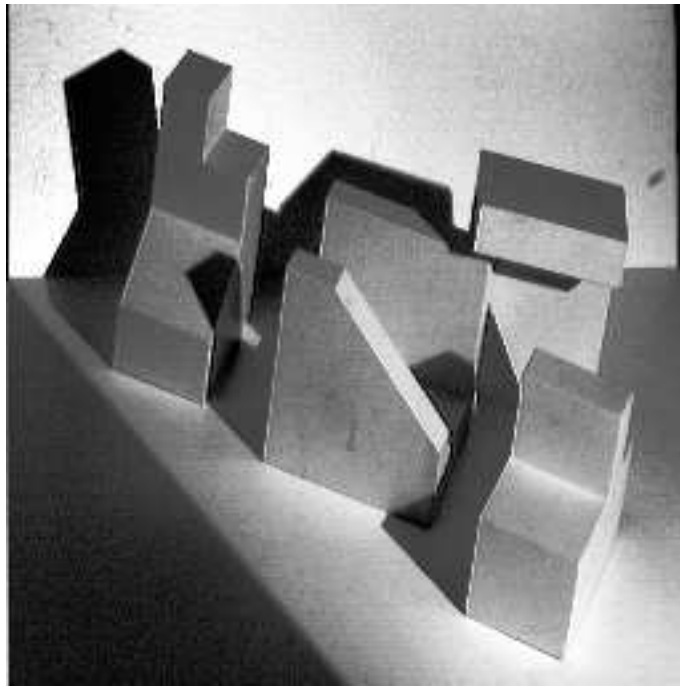
A.17 Szene iam08101100A

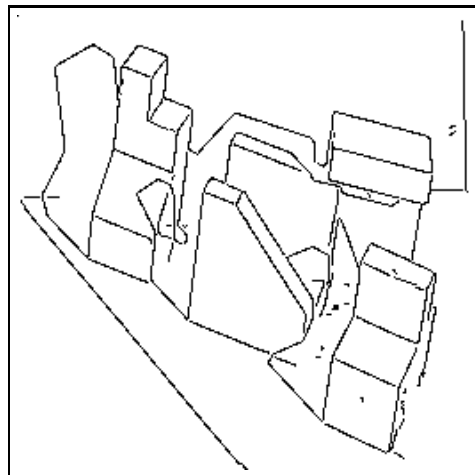
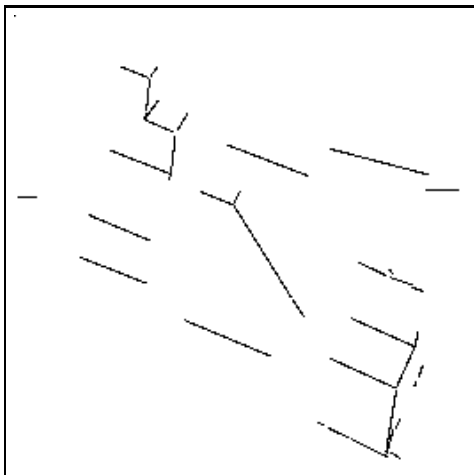
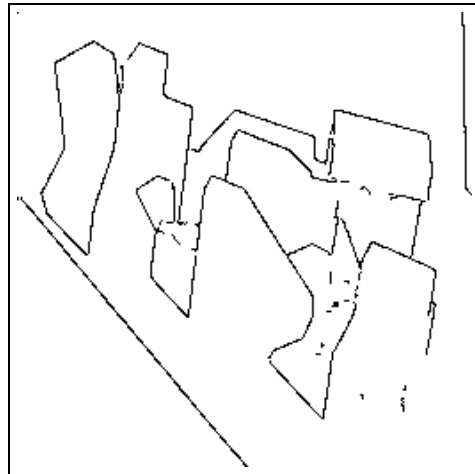
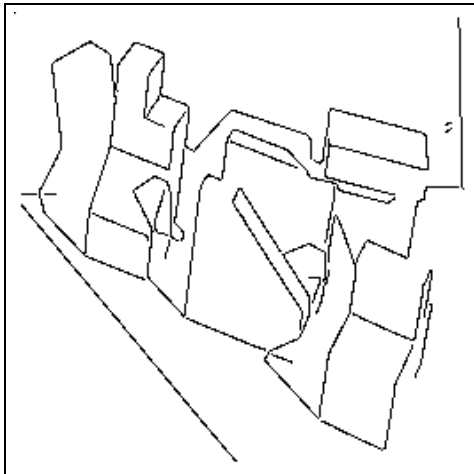




Beurteilung: Auch das Tiefenbild dieser Szene mit den Objekten Tower, Terrace und Ushape enthält fehlerhafte Tiefenwerte im Schattenwurf von Terrace auf den Boden. Ausserdem versagte die Tiefenberechnung in einigen Punkten im Innern von Terrace. Die Integration verlief wiederum erfolgreich, einzig eine Schnittkante der rechten L-förmigen Seitenfläche von Terrace sowie die sehr stumpfe Schnittkante desselben Objektes (vgl. Szene iam11000000A) konnten nicht detektiert werden.

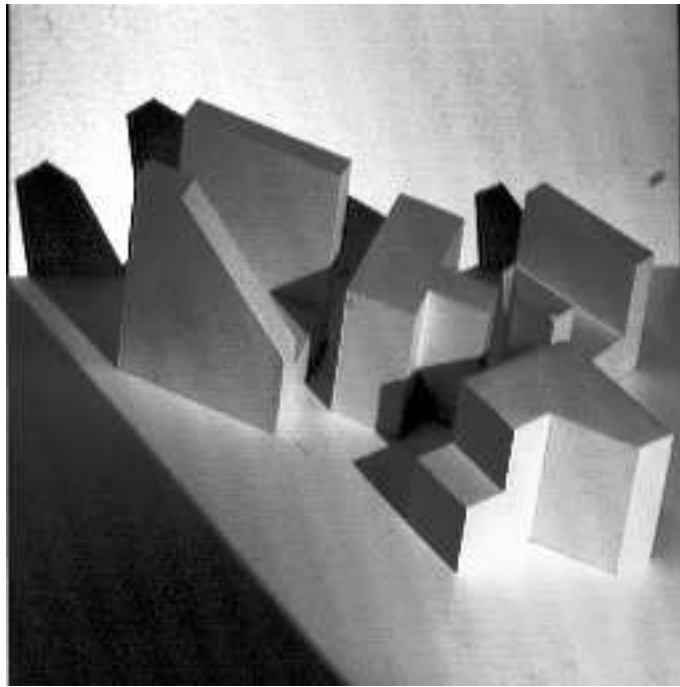
A.18 Szene iam05070810A

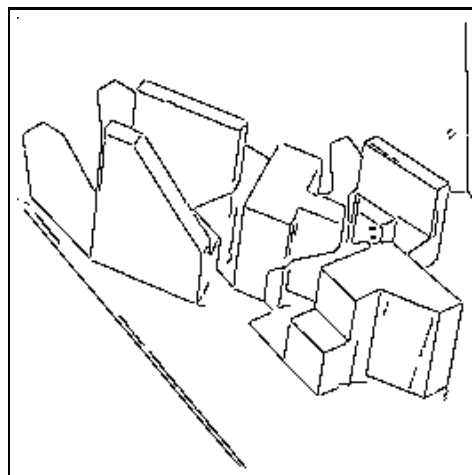
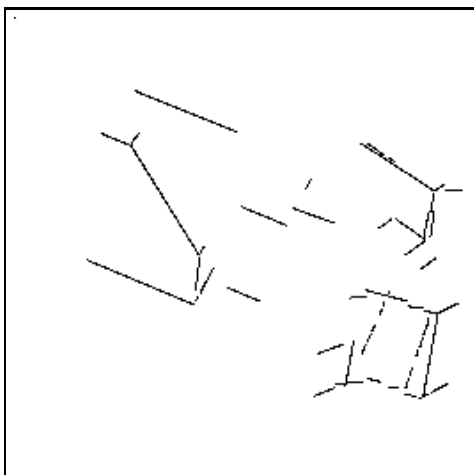
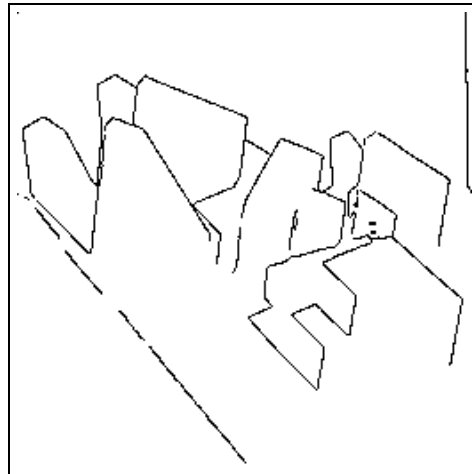
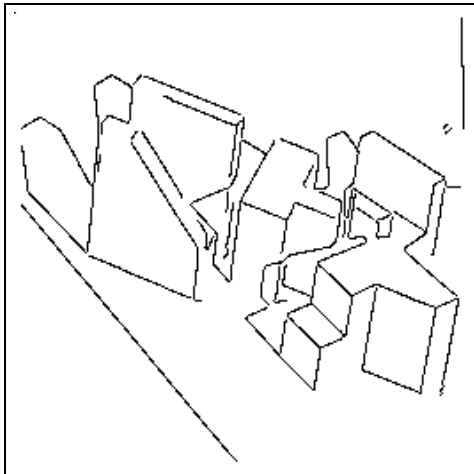




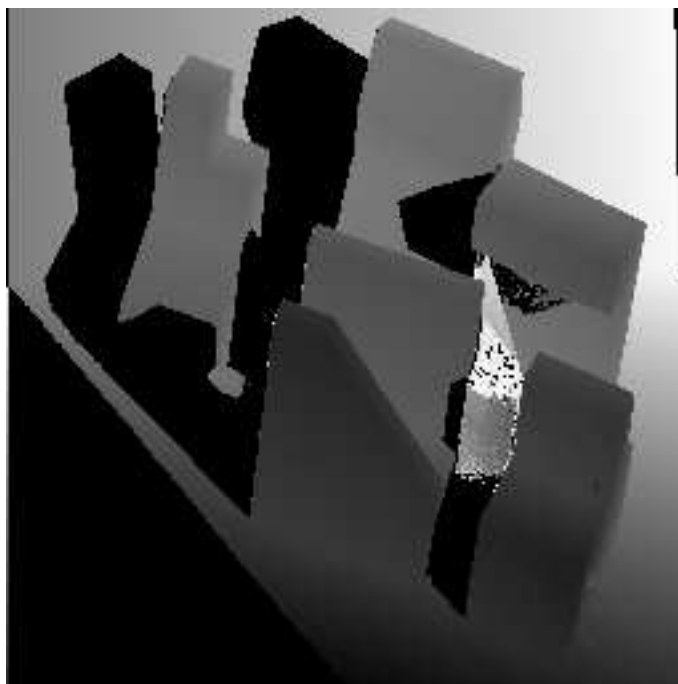
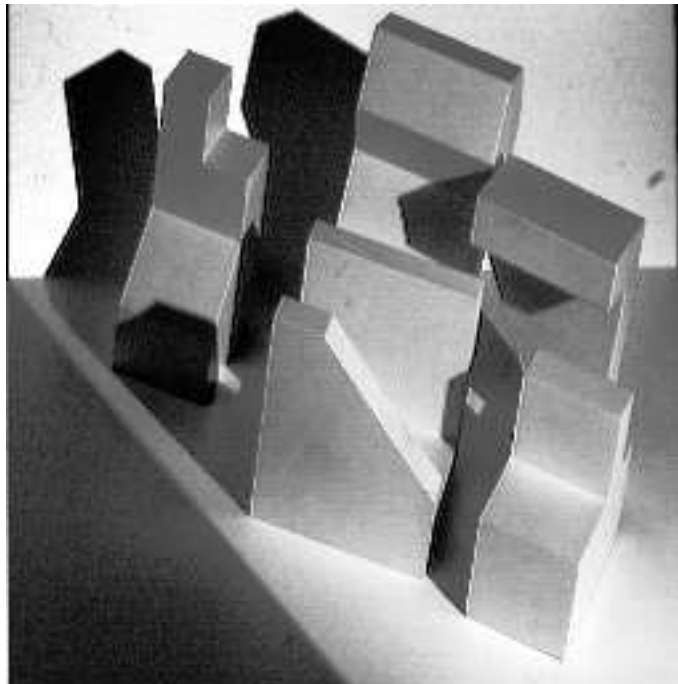
Beurteilung: Diese Szene, eine Erweiterung der Szene iam05070800A um das Objekt Tower, enthält im Schattenwurf von Tshape und Ushape grosse Mengen falscher Tiefendaten mit damit verbundenen Störungen in den Sprungkanten. Alle im Grauwertbild nicht detektierten Kanten wurden erfolgreich integriert, einzig die konkave Schnittkante zwischen der rechten Seitenfläche von Tshape und dem Boden blieb wegen der fehlerhaften Segmentierung des Tiefenbildes undetektiert.

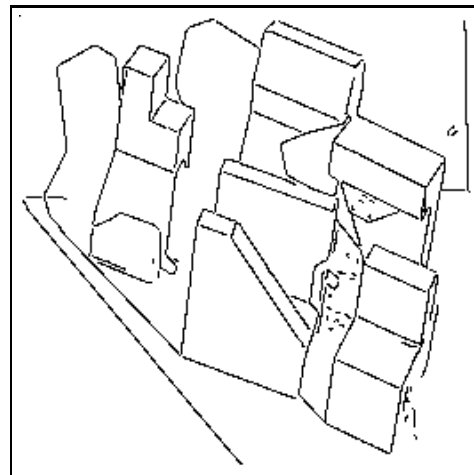
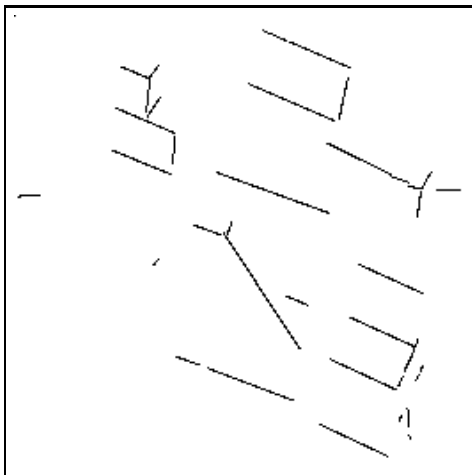
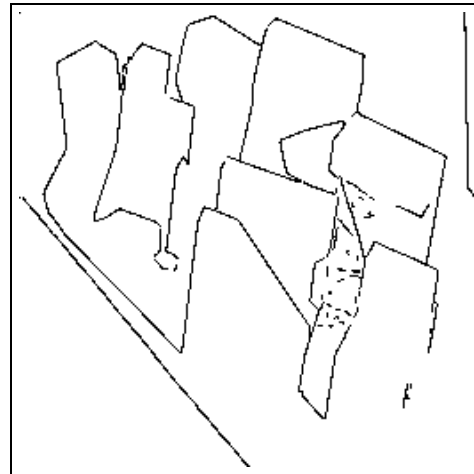
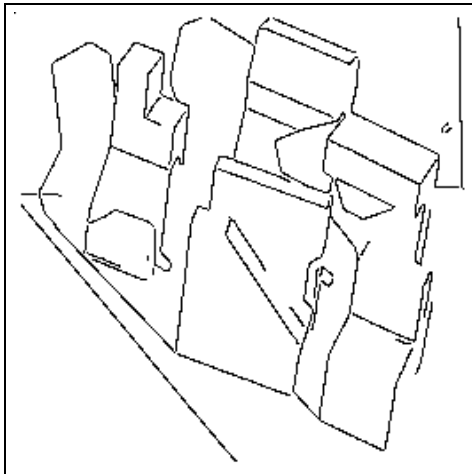
A.19 Szene iam05070810D





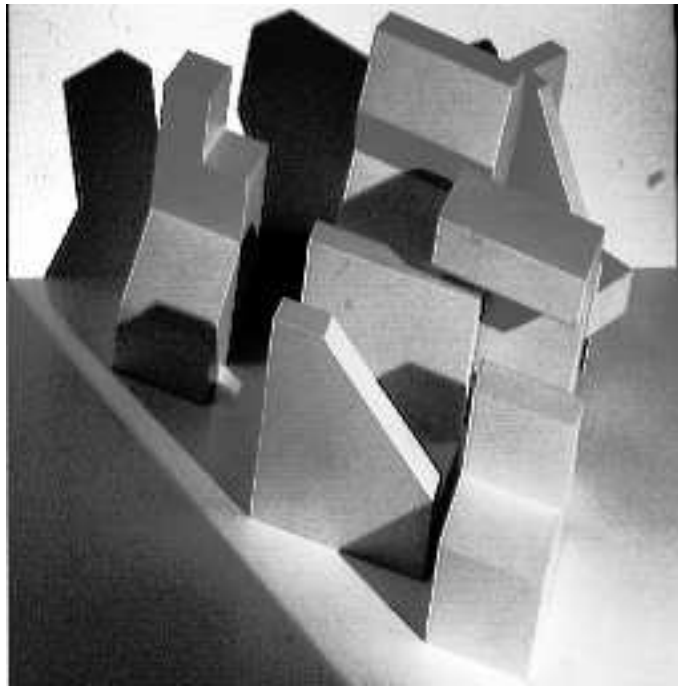
Beurteilung: Das Tiefenbild dieser Szene weist in den vorderen Flächen des Objektes Tower nichtberechnete Bildpunkte auf. Da in dieser Umgebung ausserdem die Segmentierung — aus eben diesem Grunde — nicht korrekt verlief, konnten auch die Schnittkanten nicht korrekt berechnet werden. Abgesehen davon erfolgte die Integration erfolgreich, alle fehlenden Kanten wurden detektiert und integriert. Auffallend ist überdies die grosse Zahl an Intensitätskanten, die vor allem die vom Schatten verdeckten Kanten von Tshape und Tower bilden.

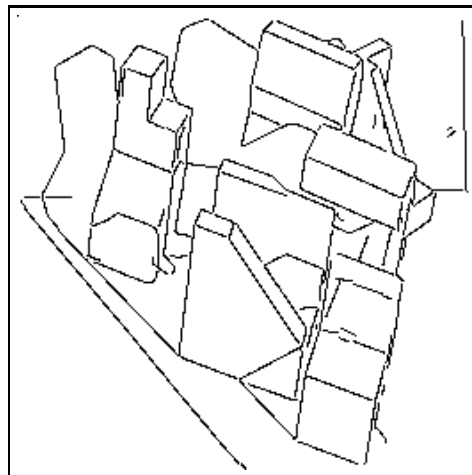
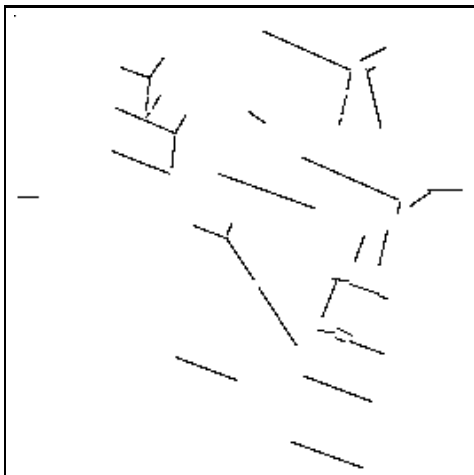
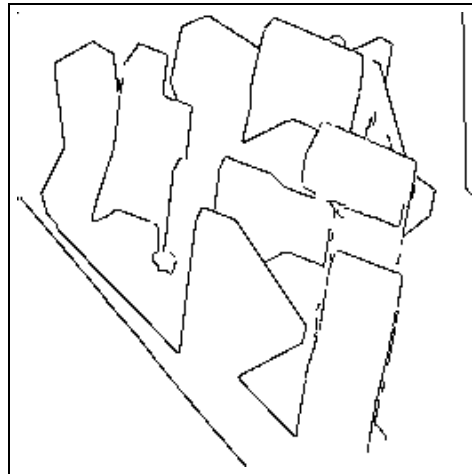
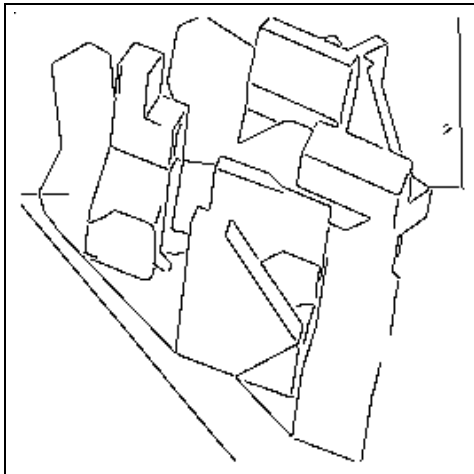
A.20 Szene iam05070810B



Beurteilung: Diese Szene, eine Erweiterung der Szene iam05070810A um das Objekt Pillars, enthält im Schattenwurf von Tshape grosse Mengen falscher Tiefendaten mit damit verbundenen Störungen in den Sprungkanten. Das Resultat entspricht demjenigen von iam05070810A: Die Integration verlief erfolgreich, bis auf die konkave Schnittkante zwischen der rechten Seitenfläche von Tshape und dem Boden. Ausserdem wurden zwei Kanten im unteren Teil von Tower, die im Schattengebiet liegen, als Intensitätskanten erkannt.

A.21 Szene iam05070810C





Beurteilung: Diese Szene mit sechs Objekten enthält ein hohes Mass an Verdeckungen und Schattenwürfen. Die zur Kamerarichtung fast normalen Flächen der drei Objekte Tshape, Delta und Corner (rechts im Bild) enthalten aufgrund ihrer Lage schlechte Tiefendaten, was sich sowohl bei der Detektion der Sprungkanten als auch der Schnittkanten (wegen Übersegmentierung) bemerkbar machte. Die Kantendetektion im Grauwertbild erzeugte mehrere wichtige Intensitätskanten. Andererseits fehlen einige Sprung- und Schnittkanten (vor allem im Objekt Tshape), die durch die Integration weitgehend ergänzt werden konnten. Man beachte auch die — infolge Übersegmentierung — zu lange konvexe Schnittkante im oberen Teil von Tower. Im Integrationsschritt wurden die beiden nichtkorrespondierenden Teile korrekt in Falsch- bzw. konvexe Schnittkante klassifiziert und entsprechend gelöscht bzw. integriert.

Literaturverzeichnis

- [AB85] P.K. Allen and R. Bajcsy. Two sensors are better than one: Example of integration of vision and touch. Technical Report MS-CIS-85-29, University of Pennsylvania, 1985.
- [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*.
- [Agg90] J.K. Aggarwal. Segmentation and analysis of multi-sensor fusion. In H. Freeman, editor, *Machine Vision for Three-Dimensional Scenes*, pages 267–299. Academic Press, 1990.
- [All88] P.K. Allen. Integrating vision and touch for object recognition tasks. *International Journal of Robotics Research*, 7(6):15–33, 1988.
- [ANA90] H. Asar, N. Nandhakumar, and J.K. Aggarwal. Pyramid-based image segmentation using multisensory data. *Pattern Recognition*, 23(6):583–593, 1990.
- [Bes89] P.J. Besl. *Surface in Range Image Understanding*. Springer-Verlag, 1989.
- [BJ88] P.J. Besl and R.C. Jain. Segmentation through variable-order surface fitting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(2):167–192, 1988.
- [BNA88] J.P. Brady, N. Nandhakumar, and J.K. Aggarwal. Recent progress in the recognition of objects from range data. *International Conference on Pattern Recognition*, 1:85–91, 1988.
- [Can83] J.F. Canny. Finding edges and lines in images. Technical Report 72, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1983.
- [CB88] C.C. Chu and A.C. Bovik. Visual surface reconstruction using minimax approximation. *Pattern Recognition*, 12(4):303–312, 1988.
- [CD92] J.C. Cheng and H.S. Don. Roof edge detection: A morphological skeleton approach. In C. Archibald and E. Petriu, editors, *Advances in Machine Vision: Strategies and Applications*, pages 171–191. World Scientific Publishing, 1992.
- [Clo71] M.B. Clowes. On seeing things. *Artificial Intelligence*, 2:79–116, 1971.

- [CNA90] C.C. Chu, N. Nandhakumar, and J.K. Aggarwal. Image segmentation using laser radar data. *Pattern Recognition*, 23(6):569–581, 1990.
- [DH73] R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley-Inter-science, New York, 1973.
- [FMN86] T.J. Fan, G. Medioni, and R. Nevatia. Description of surfaces from range data using curvature properties. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 86–91, 1986.
- [GL89] G.D. Godin and M.D. Levine. Structured edge map of curved objects in a range image. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 276–281, 1989.
- [GMA83] B. Gil, A. Mitiche, and J.K. Aggarwal. Experiments in combining intensity and range edge maps. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 21:395–411, 1983.
- [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.
- [HAM89] A. Härkönen, H. Ailisto, and I. Moring. Noise analysis and filtering of range images produced by a scanning laser range finder. *6th Scandinavian Conference on Image Analysis*, pages 608–620, 1989.
- [Hor77] B.K.P. Horn. Understanding image intensities. *Artificial Intelligence*, 8:201–231, 1977.
- [Huf71] D.A. Huffman. Impossible objects as nonsense sentences. In *Machine Vision*, volume 6, pages 295–323. Edinburgh University Press, 1971.
- [JB92] X.Y. Jiang and H. Bunke. Eine Methode zur schnellen Segmentierung von Tiefenbildern in planare Regionen. In S. Fuchs and R. Hoffmann, editors, *Mustererkennung 1992*, pages 141–149. Springer Verlag, 1992.
- [Kas88] T. Kasvand. Extraction of edges in 3D range images to subpixel accuracy. *International Conference on Pattern Recognition*, pages 92–98, 1988.
- [Kro89] E.P. Krotkov. *Active Computer Vision by Cooperative Focus and Stereo*. Springer Verlag, 1989.
- [LN93] H. Liu and H. Niemann. Surface based segmentation of range images. In N. Pavesic, H. Niemann, and D. Paulus, editors, *Image Processing and*

- Stereo Analysis*, volume 26 of *Arbeitsberichte des Instituts für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung (Informatik)*, pages 99–117, February 1993.
- [LYC92] W.N. Lie, C.W. Yu, and Y.C. Chen. Integrating intensity and range sensing to construct 3-D polyhedra representations. In L. Shapiro and A. Rosenfeld, editors, *Computer Vision and Image Processing*, pages 517–536. Academic Press, 1992.
- [Mal87] J. Malik. Interpreting line drawings of curved objects. *International Journal of Computer Vision*, 1(1):73–103, 1987.
- [MBCA85] M.J. Magee, B.A. Boyter, C.H. Chien, and J.K. Aggarwal. Experiments in intensity guided range sensing recognition of three-dimensional objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(6):629–637, 1985.
- [MH80] D. Marr and E. Hildreth. Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London*, (B207):187–217, 1980.
- [Mö91] D. Möri. Kantendetektion in Grauwertbildern. Master's thesis, Universität Bern, Institut für Informatik und angewandte Mathematik, February 1991.
- [NJ92] S.G. Nadabar and A.K. Jain. Edge detection and labeling by fusion of intensity and range images. *SPIE Vol. 1708: Applications of Artificial Intelligence X*, pages 108–119, 1992.
- [Pav82] T. Pavlidis. *Algorithms for Graphics and Image Processing*. Springer, 1982.
- [PB87] J. Ponce and M. Brady. Toward a surface primal sketch. In T. Kanade, editor, *Three-Dimensional Machine Vision*, pages 195–240. Kluwer Academic Press, 1987.
- [PM86] B. Parvin and G. Medioni. Segmentation of range images into planar surfaces by split and merge. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 415–417, 1986.
- [PM87] B. Parvin and G. Medioni. Adaptive multiscale feature extraction from range data. *Proceedings of the IEEE Computer Society, Workshop on Computer Vision*, pages 23–27, 1987.
- [Rac91] J. Raczkowski. *Multisensordatenverarbeitung in der Robotik*. Informatik-Fachberichte. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1991.

- [Rob91] R. Robmann. Segmentierung von Tiefenbildern. Master's thesis, Universität Bern, Institut für Informatik und angewandte Mathematik, May 1991.
- [SC91] F. Schmitt and X. Chen. Fast segmentation of range images into planar regions. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 710–711, 1991.
- [Shi87] Y. Shirai. *Three-dimensional Computer Vision*. Springer Verlag, 1987.
- [Sta88] S.A. Stansfield. A robotic perceptual system utilizing passive vision and active touch. *International Journal of Robotics Research*, 7(6):138–161, 1988.
- [Sug87] K. Sugihara. Use of vertex-type knowledge for range data analysis. In T. Kanade, editor, *Three-Dimensional Machine Vision*, pages 267–300. Kluwer Academic Press, 1987.
- [TC89] C.H. Teh and R.T. Chin. On the detection of dominant points on digital curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(8):859–872, 1989.
- [TSR89] R.W. Taylor, M. Savini, and A.P. Reeves. Fast segmentation of range imagery into planar regions. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 45:42–60, 1989.
- [Wah86] F.M. Wahl. A coded light approach for depth map acquisition. In G. Hartmann, editor, *Mustererkennung 1986*. Springer-Verlag, 1986.
- [Wal75] D. Waltz. Understanding line drawings of scenes with shadows. In P.H. Winston, editor, *The Psychology of Computer Vision*, pages 19–91. McGraw-Hill, 1975.
- [Wei89] J. Wei. *Modellgesteuerte Szenen-Interpretation durch Fusion von Intensitäts- und Abstandsbildern*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik, December 1989.
- [Wit83] A. Witkin. Scale-space filtering. *Proceedings of Seventh IJCAI*, pages 1019–1022, 1983.
- [WL90] J. Wei and P. Levi. Entwicklung dreidimensionaler Fusionstechniken für Abstands- und Intensitätsbilder auf der Basis eines doppelt synchronisierten Laser-Scanners. *Mustererkennung 1990 (R.E. Grosskopf Eds.), 12. DAGM-Symposium*, pages 316–323, 1990.
- [YL88] N. Yokoya and M.D. Levine. A hybrid approach to range image segmentation. *International Conference on Pattern Recognition*, 1:1–5, 1988.