

Diplomarbeit

„Image Based Modeling“

Vergleich klassischer Techniken mit aktuellen sensorbasierten Methoden
am Beispiel Laserscanning

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades **Dipl.-Ing.
(FH) für Telekommunikation und Medien** am Fachhochschul-
Diplomstudiengang Telekommunikation und Medien

unter der Leitung von
Mag. Franz Schubert
Zweitbegutachtung: Mag. Edith Huber

ausgeführt von
Eva Seidl
tm0110038106

St. Pölten, am 1. Juni 2005

Unterschrift:

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit überein.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Zusammenfassung

Diese Arbeit hat das Thema Image Based Modeling zum Inhalt. Der Begriff bezeichnet alle Methoden, um 3D-Geometrie aus Bildvorlagen zu generieren. Dabei geht es darum, eine möglichst fotorealistische Darstellung zu erreichen und gleichzeitig die Limitierungen, denen das Foto als statische Momentaufnahme unterworfen ist, zu überwinden. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den unterschiedlichen Techniken in diesem Bereich. Nach Klärung der Begriffsdefinitionen und der Forschungsmethoden in der Einleitung werden in mehreren Kapiteln unterschiedliche Methoden des Image Based Modeling vorgestellt. Dabei handelt es sich zum ersten um die Photogrammetrie, die sich aus der Stereofotografie entwickelt hat und bereits seit Jahrzehnten zur Erstellung von digitalen Geländemodellen im Einsatz ist.

Vor allem im Nahbereich konnte sich die Technik etablieren, 3D-Modelle aus Objektsilhouetten zu generieren. Diese Methode wird ebenfalls in einem Kapitel ausführlich behandelt.

Laserscanning ist als sensorbasierte Methode nicht zu den klassischen Image-Based-Modeling-Techniken zu zählen. Als Ersatz oder Ergänzung zur Photogrammetrie konnte es sich jedoch ebenfalls im Bereich der Erstellung von 3D-Modellen etablieren. Es soll in diesem Zusammenhang auch ein Vergleich der klassischen Techniken mit dem Laserscanning erfolgen.

Im anschließenden Kapitel werden einige aktuelle Softwarepakete vorgestellt, die dem Bereich des Image Based Modeling zugeordnet werden.

Eine Diskussion über die Vorteile und die zu erwartenden Entwicklungen der unterschiedlichen Techniken rundet die Arbeit ab.

Abstract

This paper deals with Image Based Modeling i.e. all methods of generating 3D geometry from photographs. Furthermore, it deals with achieving photorealistic pictures and at the same time transcending the limitations that come with the pictures as static photo. The paper focuses on the different technologies in this area.

The paper follows this format: In the introduction, a short overview the definition of terms and methods of research is given. Secondly, different methods of Image Based Modeling are introduced. The first technique discussed is photogrammetry, which has derived from stereo photography and has been used for producing digital surface models for several centuries.

Generating volumes from object silhouettes has established mainly in close-up range. This method is also discussed in detail in a separate chapter.

Laserscanning is a sensor-based method and does therefore not count as a classic Image Based Modeling technique. Laserscanning could be a substitute or supplement for photogrammetry in the field of generation of 3D models.

The next chapter introduces various software packages are introduced which can be assigned to the area of Image Based Modeling.

Finally, there is a discussion about the advantages and the developments that can be expected.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Überblick über Anwendungsgebiete.....	1
1.3	Forschungsleitende Fragestellung.....	4
1.4	Methodenbenennung.....	7
1.4.1	Lösungsansätze zum Thema Image Based Modeling - Inhaltsanalyse.....	7
1.4.2	CyberCityModeler – Umsetzung in die Praxis – Case Study.....	7
1.5	Begriffsdefinitionen.....	7
1.5.1	Image Based Modeling.....	8
1.5.2	3D-Modelle.....	8
1.5.3	GIS - Geographic Information System.....	10
1.5.4	GPS - Global Positioning System.....	12
1.5.5	IMU - Inertial Measurement Unit.....	13
1.5.6	CAD - Computer Aided Design.....	14
1.5.7	VRML - Virtual Reality Modeling Language.....	16
1.6	Formatierungshinweise.....	17
2	Techniken zur Geometrieerstellung.....	18
2.1	Photogrammetrie.....	18
2.1.1	Grundlagen.....	18
2.1.1.1	Definition.....	18
2.1.1.2	Stereoskopie.....	19
2.1.1.3	Zentralprojektion.....	20
2.1.1.4	Arten von Photogrammetriekameras.....	22
2.1.1.5	Kalibrierung der Kamera.....	23
2.1.1.6	Projektablauf.....	24
2.1.2	Luftbildaufnahmen.....	25
2.1.2.1	Flugplanung.....	26
2.1.2.2	Kameras für Flugphotogrammetrieaufnahmen.....	27
2.1.3	Terrestrische Photogrammetrie.....	28
2.1.3.1	Planung terrestrischer Aufnahmen.....	29
2.1.3.2	Kameras für die terrestrische Photogrammetrie.....	31
2.1.4	Auswertung von Photogrammetrieaufnahmen.....	33
2.1.4.1	Korrelationsalgorithmen.....	34
2.1.4.2	Automatische relative Orientierung.....	34
2.1.4.3	Bündelblockausgleichung.....	35
2.1.5	Resümee.....	37
2.2	Volumes from Silhouettes.....	38
2.2.1	Grundlagen.....	38
2.2.1.1	Definition.....	38
2.2.1.2	Visual Hull Konzept.....	39
2.2.1.3	Projektablauf.....	42
2.2.2	Chevette – Rekonstruktion und Animation.....	45
2.2.3	Octree Representantion.....	46
2.2.4	Surface Curves from Profiles.....	47
2.2.5	Resümee.....	50
2.3	Laserscanning.....	51
2.3.1	Grundlagen.....	51
2.3.1.1	Definition.....	51

2.3.1.2 Funktionsprinzip.....	52
2.3.1.3 Exkurs: Tachymetrie.....	54
2.3.2 Flugzeuggetragenes Laserscanning	54
2.3.2.1 Grundlagen	55
2.3.2.2 Kalibrierung.....	56
2.3.2.3 Aufnahme	58
2.3.3 Terrestrisches Laserscanning	61
2.3.4 Auswertung der Laserscanneraufnahmen	63
2.3.4.1 Gewichtung der Punktwolke	64
2.3.4.2 Segmentierung	64
2.3.4.3 Registrierung	65
2.3.4.4 Erstellung eines Vektormodells.....	65
2.3.4.5 Visualisierung.....	66
2.3.5 Resümee	66
3 Case Study – CyberCity Modeler	68
3.1 Grundlagen.....	68
3.2 Projektablauf.....	71
3.3 Visualisierung von 3D-Modellen mittels TerrainView.....	73
3.4 Resümee.....	75
4 Kurzvorstellung anderer Programmpakete	77
4.1 Adobe Atmosphere.....	77
4.2 SCOP++.....	78
4.3 Realviz	79
4.4 Resümee.....	80
5 Resümee	81
Anhang A: Glossar.....	II
Anhang B: Literaturverzeichnis.....	X
Anhang C: Abbildungsverzeichnis	XV
Anhang D: Tabellenverzeichnis	XIX
Anhang E: Stichwortverzeichnis	XX

1 Einleitung

1.1 Motivation

In stark zunehmendem Umfang verlangen Disziplinen wie Stadt- und Regionalplanung, Telekommunikation, Umweltwissenschaften, Versicherungswesen, Tourismus, Architektur, Denkmalschutz etc. nach 3D-Daten städtischer und ländlicher Bereiche in digitaler und strukturierter Form. Auch in der Filmindustrie stellt die fotorealistische Darstellung weiterhin ein interessantes Forschungsfeld dar.

In vielen dieser Bereiche leistet Image Based Modeling einen wichtigen Beitrag zum Gesamtergebnis. Etwa digitale Geländemodelle können nur durch flugzeuggetragene Stereophotogrammetrie oder Laserscanning erstellt werden. Diese digitalen Modelle stellen einen wesentlichen Beitrag zur *Kartographie* dar und sind mit dafür verantwortlich, dass digitale Landkarten sowie Navigationssysteme im Consumerbereich in den letzten Jahren einen bemerkenswerten Aufschwung nehmen konnten.

Die unterschiedlichen Technologien im Bereich des Image Based Modeling haben sich kontinuierlich weiter entwickelt, auch neue Forschungsansätze wurden erprobt und konnten teilweise erfolgreich eingesetzt werden. Bei älteren Ansätzen wie der Photogrammetrie wird hauptsächlich versucht, den Grad der Automatisierung zu erhöhen. Auch hier konnten in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte erzielt werden.

In dieser Arbeit sollen die verschiedenen Technologien untersucht, beschrieben und einander gegenüber gestellt werden. Mit Beispielen konkreter Projekte sollen die Nutzungsmöglichkeiten illustriert und die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Methoden erörtert werden.

1.2 Überblick über Anwendungsgebiete

Nachfolgend werden einige Einsatzgebiete des Image Based Modeling kurz beschrieben und illustriert; tatsächlich ergeben sich mit der Entwicklung neuer Technologien auch neue Nutzungsmöglichkeiten.

- a) Bauaufnahme: Zur Dokumentation von Kulturdenkmälern werden oft 3D-Modelle erstellt, die auch für die Denkmalpflege genutzt werden können. Mit Hilfe der 3D-Modelle können auch Statikdaten erhoben werden oder Informationen über die

Materialen gewonnen werden. Auch für Aufgaben der kunstgeschichtlichen Analyse und für Bauwerkserhaltung und Restaurierung werden die 3D-Modelle herangezogen.

- b) Bauwerksüberwachung: Für Brücken, Türme und ähnliche Objekte werden ebenfalls 3D-Modelle zur Dokumentation und Überwachung erstellt, da sie helfen, Ungenauigkeiten bei Planung und Bau zu vermeiden.
- c) *Facility Management* (Gebäudemanagement): Bei der Planung von Wohnhäusern, Großraumbüros, Einkaufszentren und ähnlichen Gebäuden können 3D-Modelle zusätzlich zu den klassischen zweidimensionalen Architekturplänen von Vorteil sein.
- d) Einsatz zur Volumenermittlung: Auch zum Ermitteln von Rauminhalt und Fassungsvermögen können 3D-Modelle eingesetzt werden. Diese Methode wird unter anderem bei Öltanks oder Schiffen eingesetzt.
- e) Einsatz bei der Qualitätssicherung: Manche Produktionsfehler können am besten durch genaue 3D-Modelle entdeckt werden. Fehler können schneller erkannt und die Korrektur vereinfacht werden.
- f) Visualisierung, *Virtual Reality*: Beim Architektur-Modeling für Filme können durch Image Based Modeling Kosten eingespart und Arbeitsabläufe vereinfacht werden.
- g) Planung von komplexen Produktionsanlagen: Bei der Planung von Kraftwerks- und Chemieanlagen können Image-Based-Modeling-Techniken gute Dienste leisten, eine 3D-Visualisierung stellt eine sinnvolle Ergänzung zur klassischen Planung dar.
- h) Gebäudeinformationssysteme: Bei großen Gebäuden ist eine sinnvolle Planung unter Berücksichtigung aller Aspekte oft schwierig. Vor allem für die Einsatzplanung von Rettungsdiensten, für den Objektschutz sowie für Speditionen können 3D-Modelle gute Dienste leisten.

- i) 3D-Stadtpläne für den Tourismus: Virtuelle Stadtrundgänge und 3D-Stadtpläne setzen sich mit fortschreitender Entwicklung der dazugehörigen Internettechnologien immer mehr durch. In Kapitel 3 werden einige digitale Stadtrundgänge vorgestellt.
- j) Standort- und Werksplanung: Wie bereits bei der Gebäudeplanung erwähnt, können 3D-Modelle eine gute Ergänzung zu zweidimensionalen Plänen sein, dies trifft auch in besonderem Maße auf die Werksplanung von Industrieanlagen zu.
- k) Mikroklimastudien: Bei Wettersimulationen kommen oft digitale Geländemodelle zum Einsatz, vor allem Regen- und Unwettersimulationen für die Katastrophenplanung sind ein wichtiges Einsatzgebiet. Auch Risikoanalysen in hochwassergefährdeten Gebieten können auf diesem Wege durchgeführt werden.

vgl. [LUHMANN 2002], S. 22ff

Abb. 1.1: Beispiele für die Nutzung von 3D-Modellen



Abb. 1.1 (a): Architekturanalyse, [DEBEVEC 1996]

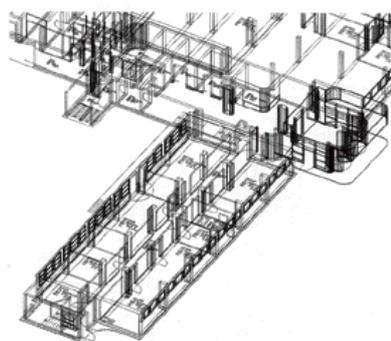


Abb. 1.1 (c): Gebäudemanagement, [LUHMANN 2002]



Abb. 1.1 (f): Virtual Reality, [DEBEVEC 1996]

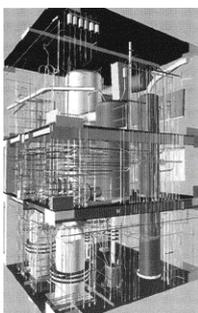


Abb. 1.1 (g): Planung von Produktionsanlagen, [LUHMANN 2002]

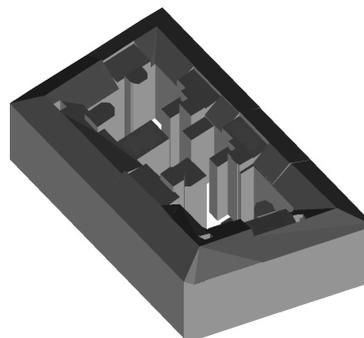


Abb. 1.1 (h): Gebäudeinformationssysteme, [JANSA 2003]



Abb. 1.1 (i): 3D-Stadtpläne, [CYBERCITY 2005]

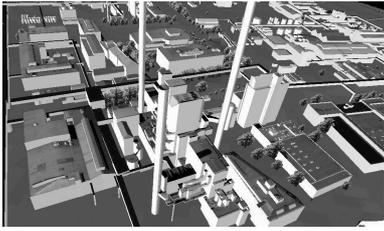


Abb. 1.1 (j): Standort- und Werksplanung, [LUHMANN 2002]

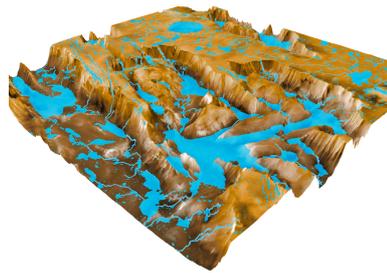


Abb. 1.1 (k): Regensimulation, [KRAUS 2004a]

1.3 Forschungsleitende Fragestellung

Diese Arbeit hat verschiedene Lösungsansätze im Bereich des Image Based Modeling zum Thema. Es soll geklärt werden, welche Techniken für welche Projekte am besten geeignet sind. Sensorbasierte Auswertungsmethoden wie Laserscanning sind nicht dem klassischen Bereich des Image Based Modeling zuzuordnen, werden aber vermehrt für ähnliche Aufgaben eingesetzt. Deshalb sollen in dieser Arbeit die bildbasierten Techniken mit dem Laserscanning verglichen werden. Im Rahmen einer Inhaltsanalyse und einer Case Study sollen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden geklärt werden.

Eine vollständige Aufzeichnung aller Technologien im Bereich des Image Based Modeling würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, daher sollen hier nur vier wichtige Punkte besprochen werden.

Die Photogrammetrie stellt eine „alte“ Technologie dar, die ständig weiter entwickelt werden konnte und noch immer einen großen Teil des Materials in diesem Bereich zur Verfügung stellt. Laserscanning wurde erst später entwickelt, konnte sich in den letzten Jahren aber stark durchsetzen. Die Shape-from-Silhouettes-Methode gehört ebenfalls zu den älteren Techniken und findet vor allem im Bereich der Archäologie-Dokumentation weiterhin Verwendung. Bei der Surface-Curves-from-Profiles-Methode handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Shape-from-Silhouettes-Methode. Dabei werden aus einer Sequenz von Bildkonturen direkt 3D-Oberflächen und Kurven generiert.

vgl. [SZELISKI 1997], S. 3

Vor allem im Bereich der Automatisierung von Image-Based-Modeling-Auswertungen wird noch intensiv geforscht, da die Erstellung von 3D-Daten noch immer mit relativ hohen Kosten verbunden ist. Der Bedarf in den oben genannten Gebieten sowie in neu erschlossenen Anwendungsbereichen steigt ständig, jedoch fehlt es zur Zeit noch an Möglichkeiten zur effizienten und billigen Umsetzung der Projekte.

Die Entscheidung für die am besten geeignete Methode ist nicht einfach zu treffen. In die Entscheidungsfindung sollten verschiedene Kriterien mit einbezogen werden (siehe Tabelle 1). Die Aufgabe selbst stellt im Allgemeinen bereits klar, ob es sich um eine Nahbereichs- oder eine Luftmethode handeln wird. In jedem Fall sollten vor Beginn der Projektplanung Entscheidungen über die unten genannten Faktoren getroffen werden.

Umgebungsbedingungen	Objektanforderungen	Aufgabenstellung	Auswertung
Verweildauer	Größe	Genauigkeit	Interpretation
Erreichbarkeit	Komplexität	Generalisierung	Objektbildung
Sicherheit	Informationsdichte		Zusatzinformationen

Tabelle 1: Entscheidungskriterien bei der Projektplanung im Bereich Image Based Modeling, vgl. [LUHMANN 2002], S. 166

Eine einzige Art der Erzeugung von Ursprungsdaten weist stets irgendwelche Nachteile auf, deshalb konzentriert sich die Forschung zur Zeit auch auf die Kombination von mehreren Methoden. Dadurch können die Ergebnisse meist dramatisch verbessert werden, vor allem die Kombination von Photogrammetrie und Laserscanning stellt eine sehr viel versprechende Alternative dar. Auch die Einbeziehung von 2D-Grundrissdaten kann bei Geländemodellen im städtischen Bereich die Genauigkeit erheblich erhöhen. vgl. [ROTTENSTEINER 2001], S. 2

An die verarbeitende Software werden hohe Anforderungen gestellt. Abhängig vom erwünschten Ergebnis und der geplanten Weiterverarbeitung sind unterschiedliche Funktionalitäten in den verschiedensten Bereichen notwendig.

Gemeinsame Funktionalität mit Bildverarbeitungssystemen:

- Management von großen Bilddatenmengen
- Mehrbildverarbeitungswerkzeuge
- Management von Zusatzdaten wie z. B. Orientierungsparameter der involvierten Sensoren
- Display Management: Die gleichzeitige Anzeige von mehreren Bildern in verschiedenen, anpassungsfähigen Größen ist notwendig, Zwischenresultate und extrahierte Objekte sollen den Bildern zugeordnet werden. 3D-Visualisierung ist hilfreich zur Datenanalyse

Gemeinsame Funktionalität mit GIS-Systemen (GIS siehe Kapitel 1.5.3):

- Management von Datenstrukturen: Eine Verbindung zu Standard GIS- oder CAD-Systemen (CAD siehe Kapitel 1.5.6) muss verfügbar sein
- Interaktive Werkzeuge für Datenakquisition werden für die Digitalisierung von komplizierten Objekten benötigt, die nicht automatisch erkannt werden können.
- CAD-Werkzeuge für interaktives Bearbeiten (z. B. Objektdestruktion, Verbindungen zu bestehenden Objekten)

Detailfunktionalität (Specific Functionality):

- Werkzeuge zur automatisierten Objekterkennung mit annähernder Real-Time-Performance werden angestrebt
- Einfache Benutzbarkeit und Wechsel zwischen den automatischen und interaktiven Modi
- Eine Funktion zum Rückgängig-Machen von automatischen Vorgängen, falls diese nicht die gewünschten Resultate erbringen
- Möglichkeit der Verwendung von Bildern mit unterschiedlichen Auflösungen

- Selbstdiagnosemodule der automatischen Werkzeuge sollten den Benutzer über kritische Zonen informieren.

vgl. [ROTTENSTEINER 2001], S. 11f, zitiert nach [GÜLCH 2000]

1.4 Methodenbenennung

1.4.1 Lösungsansätze zum Thema Image Based Modeling - Inhaltsanalyse

Die Möglichkeiten zur Generierung von 3D-Modellen aus zweidimensionalen Bildvorlagen sind vielfältig in Theorie und Umsetzung und bringen unterschiedliche Resultate bezüglich Qualität und Effizienz. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine möglichst detaillierte Auflistung und Analyse unterschiedlicher Theorien und Ansätze erfolgen, die dem Leser einen aufschlussreichen Überblick über dieses sich weiterhin entwickelnde Forschungsfeld bieten soll. Ein Vergleich mit der sensorbasierten Technologie Laserscanning soll die unterschiedlichen Kriterien der Techniken verdeutlichen und darstellen, welche Methoden für welche Aufgaben am besten geeignet sind.

1.4.2 CyberCityModeler – Umsetzung in die Praxis – Case Study

Nachdem in Kapitel 2 einige dokumentierte Methoden theoretisch erläutert wurden, soll anhand von Projekten der CyberCity AG ein Überblick über den tatsächlichen Arbeitsauflauf und die erzielten Ergebnisse bieten. Die CyberCity AG ist führend auf dem Gebiet der Stadtmodellierung, zahlreiche Publikationen (vgl. [GRUEN 2000], [GRUEN 2002], [STEIDLER 2003]) belegen den hohen Forschungserfolg dieser Entwicklungsfirma.

1.5 Begriffsdefinitionen

Vor der Vorstellung und Erläuterung der unterschiedlichen Techniken des Image Based Modeling sollen einige Begriffe geklärt werden, die in diesem Forschungsumfeld von Bedeutung sind. Zu Beginn muss selbstverständlich der Begriff Image Based Modeling selbst definiert werden.

1.5.1 Image Based Modeling

Der Überbegriff Image Based Modeling bezeichnet alle Techniken zur Generierung von 3D-Geometrie aus Bildern. Entstanden sind alle diese Methoden aus dem Wunsch heraus, Fotorealismus zu erreichen. Bei vielen Modeling-Aufgaben können klassische Modeling-Techniken keine zufrieden stellenden Ergebnisse liefern, oft entspricht der Aufwand in keiner Weise dem Ergebnis.

Fotos sind die einzige Möglichkeit, ein Objekt z. B. ein Gebäude tatsächlich fotorealistisch abzubilden. Gleichzeitig bleibt ein Foto als Momentaufnahme immer statisch. Man kann das Objekt nur aus dem Blickwinkel betrachten, aus dem das Foto aufgenommen wurde. Man kann nicht das ganze Objekt sehen, man kann sich nicht durch die Szene bewegen.

„Image-based modeling and rendering is about leveraging the ease with which photographs can be taken, the speed at which they can be displayed, and their amazing power to communicate, while at the same time transcending their limitations.“

[DEBEVEC 1999], S. 1

Image Based Modeling versucht demnach, die Vorteile der Fotos für die Generierung von 3D-Modellen zu nutzen, mit denen die Limitierungen, denen Fotos unterworfen sind, überwunden werden können.

1.5.2 3D-Modelle

3D-Modelle lassen sich nach Ihrem Entwicklungsstadium in unterschiedliche Gruppen einteilen. Die meisten 3D-Modellierungsprogramme sind imstande, die Modelle in den verschiedenen Darstellungsstufen anzuzeigen.

- Wireframe: Mit perspektivischen Linien wird ein dreidimensionaler Eindruck geschaffen.

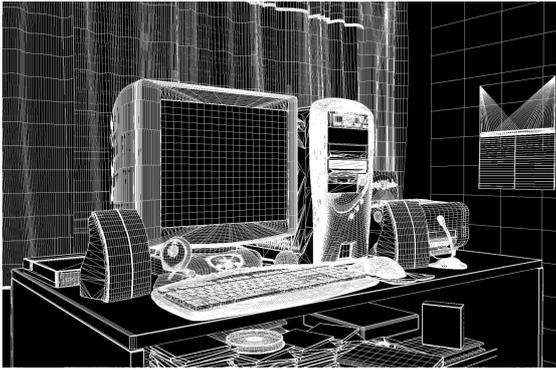


Abb. 1.2: Beispiel einer Wireframe-Darstellung, [ROBODESIGN 2005]

- Hidden Surface Removal: Die in einer „echten“ dreidimensionalen Darstellung nicht sichtbaren Linien werden ausgeblendet.

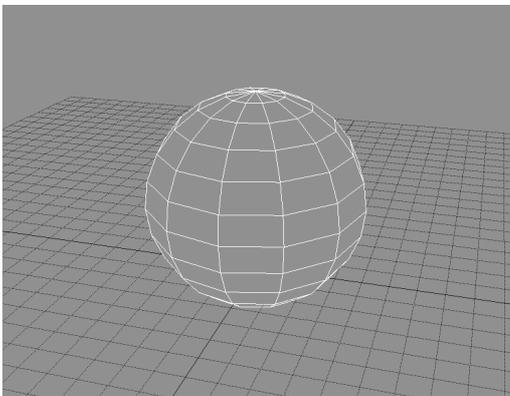


Abb. 1.3: Beispiel einer Darstellung im Modus Hidden Line Removal, [Eigene Darstellung]

- Shaded: Flächen werden Farbschattierungen zugeordnet, zusätzlich wird auch der natürliche Lichteinfall simuliert.



Abb. 1.4: Beispiel einer Darstellung im Shaded-Modus, [Eigene Darstellung]

Durch unterschiedliche Licht- und Schattenberechnungsalgorithmen wird der dreidimensionale Eindruck der Modelle verstärkt:

- Raytracing: Jeder Lichtstrahl wird in den Raum hinein verfolgt, dadurch reproduziert der Schatten die Objektgeometrie exakt, die Folge sind harte Schattenkanten.
- Shadow Depth Maps: Für weiche Schatten wird nur die Lage der Objekte im Raum aus der Sicht der Lichtquelle berechnet.
- Raycasting: Diese Technik wird auch als Scan-Line-Methode bezeichnet. Für jedes Pixel des Bildausschnitts werden Strahlen von der Kamera aus nach ihrer Z-Position im Raum sortiert. So wird für jeden Objektpunkt entschieden, ob er sichtbar ist, erst dann kommt es zum Shading.
- Global Illumination: Bei dieser Technik wird indirektes Licht dargestellt, das Licht wird ohne Lichtquelle aus den Texturen der Objekte erzeugt. Beim Radiosity-Prinzip wird die Szene auf zwei verschiedene Arten unterteilt. Die Polygone werden unterteilt in Licht abgebende, Licht empfangende und Licht blockierende Polygone. Der Raum wird außerdem nach der Abstrahlungsintensität unterteilt.

Die Ergebnisse lassen sich in zwei Arten von Modellen einteilen. Fotorealistische Modelle sind computergrafisch erzeugt und versuchen durch Texturen so realistisch wie möglich auszusehen. Ein Photomodell hingegen ist reale Geometrie, die digitalisiert und mit Phototexturen ausgestattet wurde.

1.5.3 GIS - Geographic Information System

Geografische Informationssysteme werden heutzutage in vielen Bereichen eingesetzt, am gebräuchlichsten sind momentan Navigationssysteme für Kraftfahrzeuge sowie Routenplaner als Software oder aktuell im Internet.

„Ein Geoinformationssystem ist ein Informationssystem, mit dem nach Bill (1994) ‘raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden.’ Es vereint eine Datenbank und die zur Bearbeitung und Darstellung dieser Daten nützlichen Methoden.“
[WIKIPEDIA 2005]

Geoinformationssysteme kommen in unterschiedlichen Ausprägungen zur Anwendung:

- LIS: Landesinformationssystem, meist von Vermessungsbehörden aufgebaut, stellen Geobasisdaten zu Liegenschaften und Topographie zur Verfügung
- KIS: Kommunales Informationssystem, z. B. Grünflächenkataster, Baumkataster, Spielplatzkataster, etc.
- UIS: Umweltinformationssystem, stellt Umweltinformationen bereit, unterschiedliche Aufgaben wie z. B. Kontrolle der Umweltmedien Luft, Wasser und Boden
- BIS: Bodeninformationssystem, meist Bestandteil eines UIS
- NIS: Netzinformationssystem, Instrument zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von Betriebsmitteldaten, auch als „Facility Management System“ bezeichnet
- FIS: Fachinformationssystem, Spezialanwendungen, die von den übrigen Gruppen nicht abgedeckt werden z. B. in den Bereichen Hydrologie oder Verkehrsplanung

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 25. 4. 2005

Das grundlegende GIS-Datenmodell unterscheidet sich kaum von herkömmlichen Datenstrukturen wie CAD (siehe unten) und ähnlichen Programmen. Das Modell verwaltet raumbezogene Daten in Form von Punkten, Linien und Flächen, der Unterschied zu den CAD-Daten besteht in den zusätzlich gespeicherten geographischen Daten. Diese werden in einem Datenbanksystem verwaltet, das durch eine Schnittstelle mit den Grafikobjekten verbunden ist.

Grundsätzlich kann man ein GIS als eine Art „digitale Landkarte“ betrachten. Jedoch sind die Nutzungsmöglichkeiten wesentlich größer als bei klassischen Landkarten auf Papier.

Folgende Funktionen können integriert werden:

- Abfragen von Eigenschaften
- Visualisierungen
- Verschneidungen: Feststellung, welche Eigenschaften verschiedener Themen in einem vorgegebenen Gebiet aufeinander treffen.
- visuelle Überlagerung geometrischer Daten verschiedener Quellen
- Automatisierung von wiederkehrenden Aufgaben: Datenimport, periodische Auswertungen, Prüfvorgänge zur Datenkonsistenz, etc.

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 25. 4. 2005



Abb. 1.5: GIS-Darstellung des Wassersystems im Großstadtgebiet, [ATLANTICTECH 2005]

1.5.4 GPS - Global Positioning System

Hierbei handelt es sich um ein satellitengestütztes Navigationssystem zur weltweiten Positionsbestimmung. Es wird betrieben vom Verteidigungsministerium der USA. Seit 1995 in Betrieb war GPS ursprünglich als Navigationsinstrument im militärischen Bereich implementiert worden. Heute wird es auch im zivilen Bereich zur Positionsbestimmung genutzt, bekanntestes Beispiel sind wohl die aktuellen Auto-Navigationssysteme.



Abb. 1.6: GPS-Satellit, [HARTRAO 2005]

GPS-Satelliten strahlen ständig Signale aus, die von GPS-Empfängern registriert werden. Diese Empfänger können aus der Signallaufzeit ihre Position sowie ihre Geschwindigkeit (durch die relative Bewegung des Empfängers zum Satelliten) bestimmen. Für die Signale werden zwei Frequenzen verwendet, die von allen 24 GPS-Satelliten genutzt werden. Das Signal ist eine pseudozufällige, 1023 Bit-Kette aus Einsen und Nullen, die für jeden Satelliten einzigartig ist. Dies wird als *Pseudo Random Noise (PRN)* bezeichnet und ist wenig anfällig gegenüber Interferenzen, dies garantiert auch, dass alle Satelliten auf derselben Frequenz senden können.

Die elektromagnetische Strahlung breitet sich in den verwendeten Frequenzbereichen ähnlich wie sichtbares Licht aus, somit ist für den besten Empfang eine direkte Sichtverbindung erforderlich. Durch das Wetter wird der GPS-Empfang hingegen nicht beeinflusst.

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 25. 4. 2005

1.5.5 IMU - Inertial Measurement Unit

Bei IMU handelt es sich um ein Navigationssystem für Flugobjekte. Eine IMU-Einheit besteht aus zwei Hauptsensoren: ein Beschleunigungsmesser und ein Kreisel. Für ein dreidimensionales Ergebnis müssen drei orthogonale Beschleunigungsmesser und drei orthogonale Kreisel miteinander kombiniert werden.



Abb. 1.7: gängiges IMU-Gerät [CMT 2005]

Durch die zeitliche Integration der gemessenen Beschleunigungen und der gemessenen Drehraten können die aktuelle Position und Lage berechnet werden. Dies funktioniert über die daraus resultierende Winkelgeschwindigkeit. Eine hohe Genauigkeit lässt sich jedoch nur mit zusätzlichen Sensoren erreichen, die z. B. Absolutgeschwindigkeit, Entfernung vom Boden oder Luftdruck messen. Eine Gewichtung der unterschiedlichen Faktoren zueinander ist unerlässlich.

vgl. [ZARM 2005], 25. 4. 2005

1.5.6 CAD - Computer Aided Design

CAD stellt den Überbegriff für alle Instrumente dar, die der digitalen Konstruktion dienen. Anfänglich wurden 2D-Zeichnungen digital erstellt, heute ist ein Großteil der CAD-Software auch in der Lage, Volumenmodelle zu erstellen bzw. zu verarbeiten. Dadurch finden CAD-Programme in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung, dazu gehören unter anderem Architektur, Vermessungswesen, Raumplanung, Anlagenbau, Produktdesign und Maschinenbau.

vgl. [AUTODESK 2005], 25. 4. 2005

Dateiformate:

- DXF: Drawing Interchange Format (auch Drawing Exchange Format), ursprünglich für das Programm AutoCAD entwickelt, um den Transfer von Grafikdateien zwi-

schen unterschiedlichen Anwendungen zu erleichtern.

vgl. [COMPUTER-LEXIKON 2002]

- VDAFS: Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle, reines 3D-Datenformat, Speicherung von Zeichnungsinformationen nicht möglich, hauptsächlich als Konvertierungsformat zwischen unterschiedlichen Systemen eingesetzt.

vgl. [COMPUTERBASE 2005], 25. 4. 2005

- IGES: Initial Graphics Exchange Specification, Standardformat für Computergrafik, das von ANSI (American National Standards Institute) unterstützt wird und besonders für die Beschreibung von Modellen in CAD-Programmen geeignet ist. vgl. [COMPUTER-LEXIKON 2002]

- STEP: Standard for the Exchange of Product Data, Standard zur Beschreibung von Produktdaten, umfasst die physischen und funktionalen Aspekte eines Produkts.

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 25. 4. 2005

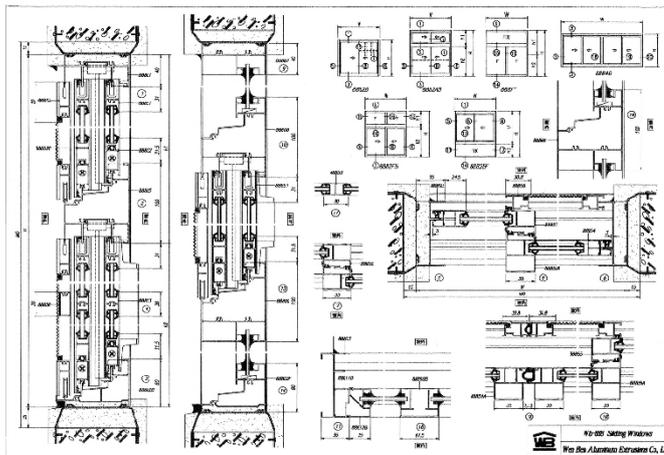


Abb. 1.8: Beispiel eines CAD-Plans, [WB 2005]

An dieser Stelle sollen noch die 3D-CAD-Modelle im Detail behandelt werden, da diese das Hauptthema dieser Arbeit darstellen. Moderne CAD-Programme bieten drei unterschiedliche Modellierungsverfahren an, die alle für die Weiterverarbeitung von automatisch erstellten 3D-Modellen verwendet werden können:

- Kantenmodell: Durch eine mathematische Beschreibung werden die Körperkanten abgebildet, eine genaue Beschreibung der zwischen den Kanten liegenden Flächen ist nur bei planaren Flächen gegeben.
- Flächenmodell: Es werden die mathematischen Daten der Flächen, die den Körper begrenzen, abgespeichert. Zusätzlich kann auch die Topologie der Flächen zueinander mitgespeichert werden.
- Konstruktionshistorie: Aus geometrischen Grundfiguren (Quader, Zylinder, Kegel) wird durch bool'sche Operationen (UNION, MERGE, etc.) ein neues Objekt erzeugt. Durch das Aufzeichnen der Historie ist eine hohe Flexibilität gegeben, jeder Konstruktionsschritt kann nachträglich verändert werden.

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 25. 4. 2005

1.5.7 VRML - Virtual Reality Modeling Language

Es handelt sich um eine Beschreibungssprache für virtuelle Szenen, enthalten sind darin Geometrie, Ausleuchtung, Animation und Interaktion. Die meisten 3D-Programme ermöglichen den Import und Export von VRML-Dateien, diese können auch in einem Internet-Browser angezeigt werden.

VRML eignet sich zur 3D-Visualisierung im Internet. Vom Browser wird die Darstellung in Echtzeit generiert, somit kann auf die Interaktionen des Betrachters reagiert werden. Rechenintensive Darstellungen sind aus diesem Grund zur Zeit nicht möglich. Zur Steuerung steht auch eine *JAVA*-Schnittstelle zur Verfügung.

Beispielcode VRML:

```
#VRML V1.0 ascii

Separator {
  DEF Floor Cube {
    width 20
    height 1
    depth 20
  }
}
```

Bei der ersten Zeile handelt es sich um die VRML-Deklaration, diese zeichnet die folgenden Zeilen als VRML-Code aus. Die Raute(#) zeigt an, dass es sich bei dieser Zeile um einen Kommentar handelt, diese Zeile wird als Deklarationskommentar bezeichnet und muss in jeder VRML-1.0-Datei genau wie oben vorhanden sein. Die nächste Zeile ist ein Separator, dieser gruppiert die Knoten innerhalb der geschwungenen Klammern. Bei diesem Separator ist der Zweck das Gruppieren von Formen und deren Eigenschaften. Die Zeile DEF Floor Cube definiert einen Würfel und gruppiert anschließend dessen Eigenschaften (Länge, Breite, Höhe) innerhalb der folgenden geschwungenen Klammern. vgl. [VRMLSEITE 2005], 25. 4. 2005

1.6 Formatierungshinweise

Alle Berufsbezeichnungen, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind geschlechtsneutral zu verstehen.

Zu Worten, die *kursiv* dargestellt werden, sind im Glossar (Anhang A, ab Seite I) nähere Erläuterungen zu finden.

2 Techniken zur Geometrieerstellung

2.1 Photogrammetrie

2.1.1 Grundlagen

2.1.1.1 Definition

„Fotogrammetrie: Bildmessung, d. h. Auswertung fotografischer Aufnahmen zwecks Feststellung von Entfernungen und Abständen an Bauwerken oder im Gelände (Kartenvermessung).“ [KUPFER 1964], S. 149

Obiges Zitat stammt aus einem Fotografie-Lexikon aus dem Jahre 1964, auf dieser Basis kann man die Photogrammetrie wohl als die älteste Technologie im Bereich des Image Based Modeling bezeichnen. Aufgrund des steigenden Bedarfs an 3D-Daten und der (noch) relativ hohen Kosten wird intensiv an einer Verbesserung der Automation der Arbeitsschritte geforscht. Momentan fehlt es an Möglichkeiten zur effizienten und billigen Umsetzung.

Man unterscheidet vier Stufen der Automation bei photogrammetrischen Projekten:

- interaktiv: keine Automation, der gesamte Ablauf wird vom Benutzer gesteuert.
- semi-automatisch: Für die Interpretation der Bildverbände und Eingabe von Schätzwerten für automatische Module ist der Benutzer verantwortlich.
- automatisch: Die Interaktion mit dem Benutzer beschränkt sich auf den Projekt-aufbau und nachträgliche Inspektion und Korrektur der Ergebnisse.
- voll-automatisch: keine Benutzerinteraktion, somit ein Black-Box-Ablauf, heute noch nicht vorhanden.

Die digitale Photogrammetrie bietet im Vergleich zu ihrem analogen Vorläufer einige Vorteile:

- Die großen analogen Plotting-Stationen werden unnötig, digitale Bilder können mit Standard-PCs bearbeitet werden.
- Der Datentransfer wird vereinfacht, bei der voll-digitalen Photogrammetrie fällt auch die Digitalisierung der Bilder weg.
- Digitale Nachbearbeitung kann die Bilder verbessern.
- Automation der photogrammetrischen Messvorgänge durch digitale Bildbearbeitung möglich.

vgl. [ROTTENSTEINER 2001], S. 2

2.1.1.2 Stereoskopie

Die Photogrammetrie beruht ursprünglich auf der Technik der Stereoskopie. Bei der Stereoskopie versucht man, den natürlichen Effekt, mit dem unsere Augen das dreidimensionale Sehen ermöglichen, auf Bilder anzuwenden, um so raumgetreue Abbildungen zu ermöglichen.

Die Augen des Menschen liegen durchschnittlich etwa 6,2 cm auseinander (Pupillenabstand, vgl. [WIKIPEDIA 2005], 15. 2. 2005). Dadurch unterscheiden sich die wahrgenommenen Bilder geringfügig in der Perspektive, dieser Unterschied wird *Parallaxe* genannt. Werden nun zwei Bilder aufgenommen oder künstlich erzeugt, die eine ähnliche *Parallaxe* aufweisen, können diese mit geeigneten Hilfsmitteln (z. B. *Stereoskop*) oder der richtigen Sehtechnik (z. B. *Kreuzblick*, *Parallelblick*) räumlich wahrgenommen werden.

Das stereoskopische Prinzip war schon vor der Photographie bekannt, konnte aber erst mit der Erfindung der *Daguerrotypie* in größerem Rahmen angewendet werden. Etwa um die Mitte des 20. Jahrhunderts entstanden die ersten Betrachtungsgeräte, sowie Aufnahmegeräte mit zwei Objektiven.

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 15. 2. 2005

Während die Technik der Stereoskopie über die Jahre an Bedeutung verloren hat und von neuen Methoden verdrängt wurde, konnte sich die Photogrammetrie weiter entwickeln und in neuen Anwendungsgebieten Fuß fassen. Ursprünglich wurden bei der analogen Photogrammetrie optisch-mechanisch erzeugte Fotos auch optisch ausgewertet. Bei der weiter entwickelten analytischen Photogrammetrie wurden die Fotos bereits rechnergestützt verarbeitet. Bei der aktuellen digitalen Photogrammetrie werden auch die Fotos bereits digital aufgezeichnet. Mit der Entwicklung der Photogrammetrie konnte auch der Grad der Automation erhöht werden, wie es auch anhand der in Kapitel 3 zu findenden Case Study über den CyberCityModeler abzulesen ist.

2.1.1.3 Zentralprojektion

Photographische Abbildungen unterliegen dem Gesetz der Zentralprojektion. Dabei werden alle Punkte eines räumlichen Objektes mit geraden Linien (Sehstrahlen) mit dem Projektionszentrum verbunden. Dieses sollte üblicherweise außerhalb des Objekts liegen. Man errichtet eine Ebene zwischen dem Projektionszentrum und dem Objekt (unter Verlängerung der Projektionslinien auch hinter dem Projektionszentrum oder dem Objekt möglich). Auf dieser Projektionsfläche werden alle Punkte des Objekts dort abgebildet, wo die von ihnen kommenden Linien die Fläche schneiden.

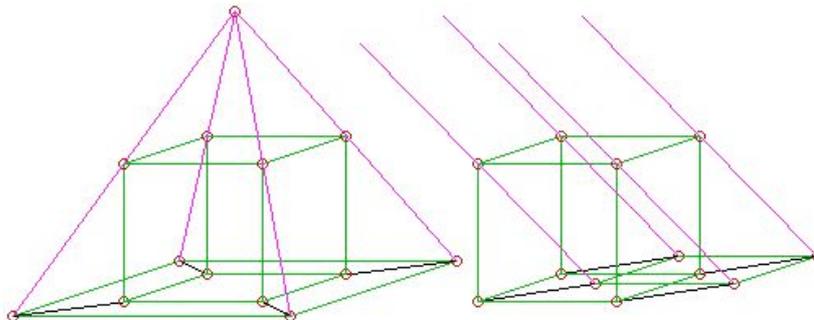


Abb. 2.1: Zentralprojektion, Parallelprojektion [WIKIPEDIA 2005]

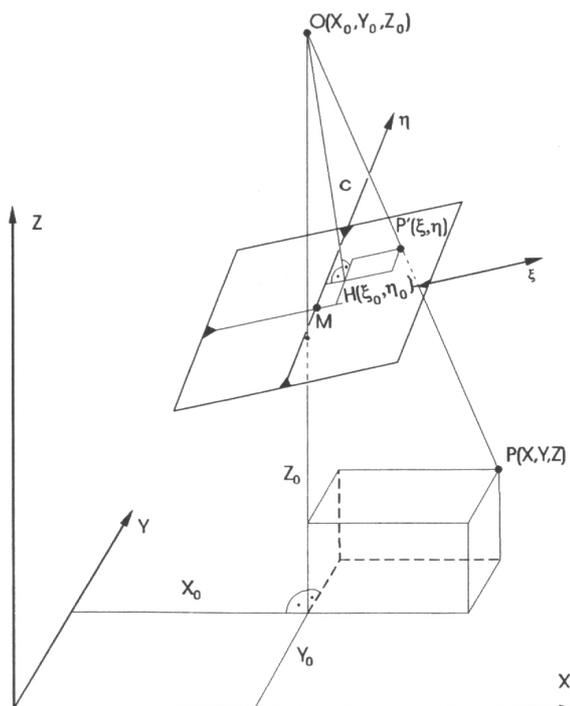
Durch die Zentralprojektion bzw. Zentralperspektive wird das räumliche Erkennen aus zwei Bildern erst möglich. Im Gegensatz zur Zentralprojektion fallen die Lichtstrahlen (Sehstrahlen) bei der Parallelprojektion parallel ein, dies geschieht, wenn die Lichtquelle (z. B. die Sonne) unendlich weit entfernt ist.

vgl. [WIKIPEDIA 2005], 15. 2. 2005

Aus diesem geometrischen Abbildungsgesetz ergeben sich für die Auswertung von Bildern folgende unabhängige Parameter (Orientierungselemente):

- innere Orientierung: Die Parameter der inneren Orientierung legen das Projektionszentrum des räumlichen Strahlenbündels in Bezug zur Bildebene fest. Es handelt sich hier um kameraspezifische Größen, diese sind im Allgemeinen vom Hersteller im Labor bestimmt und somit gegeben. Der Bildhauptpunkt und der Bildmittelpunkt sollten möglichst gut zusammenfallen ($\xi_0 = \eta_0 = 0$)
- äußere Orientierung: Diese Parameter legen das räumliche Strahlenbündel mit Hilfe des Projektionszentrums und der Stellung des Bildes im Objektkoordinatensystem fest. Bei Flugaufnahmen können diese Parameter mit GPS oder IMU (Inertial Measurement Unit) festgestellt werden oder indirekt durch so genannte Passpunkte, von denen man die Bild- und Objektkoordinaten kennt.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 17ff



ξ_0, η_0 = Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes H

c = Kamerakonstante

X_0, Y_0, Z_0 = Objektkoordinaten des Aufnahmeortes

3 Drehungen des Bildes

Abb. 2.2: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten, [KRAUS 2004b], S. 18

2.1.1.4 Arten von Photogrammetriekameras

Aufgrund der langen Geschichte der Photogrammetrie konnten sich unterschiedliche Arten von Kameras entwickeln. An dieser Stelle soll eine kurze Klassifizierung der verschiedenen Arten von Photogrammetriekameras vorgenommen werden.

Aus methodischer Sicht:

- Messkameras (Metric Cameras): speziell für Photogrammetrie entwickelt
- Teilmesskameras (Partial-Metric Cameras): weisen nicht alle Elemente der inneren Orientierung in optimaler Weise stabil und genau auf, weil sie aus ursprünglich nicht für die Photogrammetrie bestimmten Kameras entwickelt wurden
- Nicht-Messkameras (Non Metric Cameras): nur bei sehr geringen Genauigkeitsansprüchen und mit großem Auswerteaufwand verwendbar

Nach den Passelementen zur Wiederherstellung der inneren Orientierung:

- Rahmenmarkenkameras: speziell für Photogrammetrie, mit vier, acht oder mehr Rahmenmarken. Die Sollkoordinaten der Rahmenmarken sind im Kalibrierungsprotokoll der Kamera festgehalten, der Schnittpunkt der Rahmenmarkenverbindungslien definiert den Bildmittelpunkt. Die Rahmenmarken sind auf den Aufnahmen sichtbar und dienen so zur Orientierung der Aufnahmen.
- Réseaukameras: Glasplatte mit einem regelmäßigen Raster von Kreuzen vor der Bildebene, vor allem zur Erfassung der Deformationen des Films.
- Rahmenkameras: scharf abbildende Ränder anstatt Rahmenmarken. Die indirekt bestimmten Bildeckpunkte, die rechnerisch durch Linienschnittpunkte entstehen, ersetzen die Rahmenmarken.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 189f

2.1.1.5 Kalibrierung der Kamera

Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Kamera oder Veränderungen, die bei längerem Gebrauch der Kamera entstehen, treten auch bei genauer innerer Orientierung Verzeichnungen auf. Wenn diese bekannt sind, stellen sie kein Problem dar, Veränderungen der Verzeichnungswerte durch Umfokussierungen oder Erschütterungen sind jedoch nicht so leicht zu berücksichtigen.

Laut [KRAUS 2004b], S. 56ff müssen die folgenden Punkte bei der *Kalibrierung* unbedingt beachtet werden:

- Korrektur der Objektivverzeichnung: mittels Polynom für die radial-symmetrische Verzeichnung. Folgendes Polynom hat sich in der Vergangenheit bewährt:

$$\Delta\rho = g_{13} \rho (\rho^2 - \rho_0^2) + g_{14} \rho (\rho^4 - \rho_0^4)$$

g = (bekannte) Koeffizienten des Polynoms

ρ = Radialabstand des Bildpunktes vom Symmetriehauptpunkt HS

ρ_0 = (bekannter) Radialabstand, an dem die Verzeichnung $\Delta\rho$ Null wird

- Tiefenschärfe/*Schärfentiefe*: beruht auf dem strahlenoptischen Grundgesetz. Dadurch wird bestimmt, inwieweit ein Gegenstand in der Tiefe korrekt abgebildet werden kann, dies ist besonders wichtig in der Nahbereichsphotogrammetrie. Es gibt verschiedene Möglichkeiten um die Schärfenanforderungen mit der inneren Orientierung zu vereinbaren. Bei Fixfokuskameras sind Gegenstandsweite und Bildweite fest. Mit mehreren kalibrierten Zwischenringen ist der Kamerakonstanzenschlag für jeden Ring bekannt (und der Kameradokumentation zu entnehmen), sodass sich die übrigen Elemente der inneren Orientierung nicht verändern. Bei einem verschiebbaren Objektiv sind bestimmte Bildweiten kalibriert und durch einen Indexstrich markiert.
- Beugungsunschärfe: Durch die Beugung des Lichts (aufgrund des Wellencharakters) an einer kreisförmigen Blende verteilt sich der Objektpunkt in der Bildebene auf das zentrale Beugungsscheibchen. Aus dem Beugungsphänomen folgt, dass kein im optischen System abgebildeter Punkt kleiner sein kann als die verwendete Blendenzahl in Mikrometer. Somit wird das Auflösungsvermögen eingeschränkt durch den Minimalabstand zweier gerade noch als zwei Punkte unterscheidbarer Beugungsscheibchen, die wiederum von der Beugungsunschärfe und von der Mindestenergiedifferenz, die vom Sensor gerade noch unterscheidbar ist, abhängt.

- optisches Auflösungsvermögen: gibt an, wie viele dunkle Balken man pro Millimeter von ihren gleich großen hellen Zwischenräumen gerade noch unterscheiden kann, wird in Linien pro Millimeter (L/mm) oder Linienpaaren pro Millimeter (Lp/mm) angegeben und mittels Testtafeln gemessen.

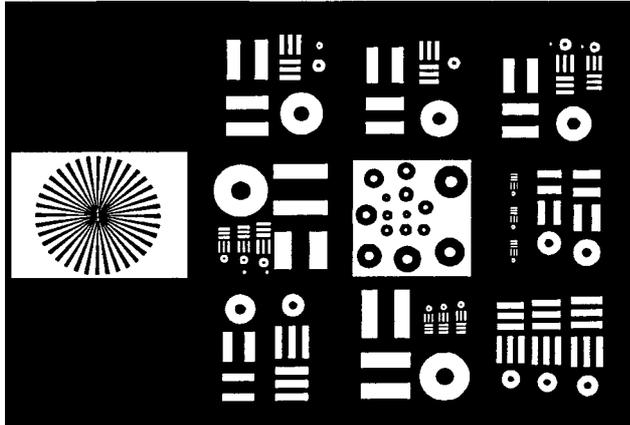


Abb. 2.3: Testtafel für die Prüfung des Auflösungsvermögens, [KRAUS 2004b], S. 67

- Lichtabfall von der Bildmitte zum Bildrand: kann durch mehrlinsige Objektive verringert werden, diese verstärken wiederum die Vignettierung (Abschattung von Strahlen mit großen Bildwinkeln durch die Fassung der Objektive). Eine Kompensation ist auch mit *Verlaufsfilttern* möglich, dabei handelt es sich um Graufilter, deren Dichte zum Filmrand hin abnimmt.

2.1.1.6 Projektablauf

Bei einem Photogrammetrieprojekt ist eine genaue Planung besonders wichtig, dabei sollten alle Arbeitsschritte im Detail fest gehalten werden. Folgende Punkte sind (lt. [LUHMANN 2002], S. 42ff) wichtig für den Ablauf des Projekts:

- **Projektplanung:** Eine genaue Planung des Projekts ist essentiell für einen geordneten Projektablauf und auch für die Qualität der Ergebnisse.
- **Aufnahmeplanung für die digitale Kamera:** Dabei ist vor allem eine genaue Planung des Bildverbands wichtig.
- **Objektaufnahme mit der digitalen Kamera:** Durch genaue Planung kann die Aufnahmezeit minimiert und die Ergebnisse optimiert werden.

- Passpunktbestimmung (3D-Netzausgleichung): Bei der Passpunktbestimmung wird die Orientierung der Aufnahmen vorbereitet, es werden korrespondierende Punkte in den Bildern gesucht, auf Basis dieser Punkte kann die Orientierung der Aufnahmen stattfinden. Bei Flugaufnahmen kann die Orientierung mittels IMU und GPS automatisch erfolgen, es ist dann keine Passpunktbestimmung notwendig.
- Orientierung der Aufnahmen und Kamerakalibrierung: Nach den im vorherigen Schritt bestimmten Passpunkten können nun mithilfe der bekannten Kameradaten die Aufnahmen zueinander orientiert werden.
- Photogrammetrische 3D-Datenerfassung/Auswertung: Nach erfolgter Orientierung können die 3D-Daten erfasst und in weiterer Folge mittels Bündelblockausgleichung (siehe Kapitel 2.1.4.3) ausgewertet werden.
- CAD-Bearbeitung der erfassten Daten: Mittels eines CAD-Programms (siehe Kapitel 1.5.6) können die photogrammetrisch erfassten Daten nachträglich bearbeitet werden und somit auch Fehler in der Erfassung vom Benutzer ausgeglichen werden.
- Abschließende Datenvisualisierung: Mittels eines geeigneten Visualisierungsprogramm (z. B. TerrainView, siehe Kapitel 3.3) können die Daten anschaulich visualisiert werden.

Durch eine genaue Planung im Vorfeld von Photogrammetrieprojekten kann die anschließende Aufnahme und Auswertung der Daten vereinfacht werden, durch die schnellere Durchführung der Aufnahmen können Kosten eingespart werden. Je genauer und detaillierter die Planung und Erstellung der Aufnahmen ausfällt, desto genauer werden auch die Ergebnisse ausfallen.

2.1.2 Luftbildaufnahmen

Vor allem für digitale Geländemodelle wurden bereits seit Jahrzehnten Photogrammetrieaufnahmen erstellt. In den folgenden Kapiteln sollen kurz die Techniken der Flugplanung und die verwendeten Kameras erläutert werden.

2.1.2.1 Flugplanung

Für die Geländerekonstruktion aus Photogrammetrieprojekten muss laut den bereits erläuterten Gesetzen der Zentralprojektion jeder Punkt der Erdoberfläche auf mindestens zwei Bildern abgebildet sein. Dies wird durch eine 50-prozentige Überlappung der Streifen erreicht. Bei der Planung muss man unter anderem bedenken, dass es sich bei den endgültigen Aufnahmen nur um genäherte Senkrechtaufnahmen handeln kann.

Folgende Punkte verursachen Abweichungen von der idealen Senkrechtaufnahme:

- Drehungen um die Längsachse des Flugzeugs (Rollwinkel)
- Drehungen um die Achse der beiden Hauptflügel (Nickwinkel)
- Abweichungen vom vorgegebenen Kurswinkel (heading)
- Variation in der Flughöhe ($\pm 2\%$)
- Versetzungen zur geplanten Flugbahn (etwa $\pm 200\text{ m}$)

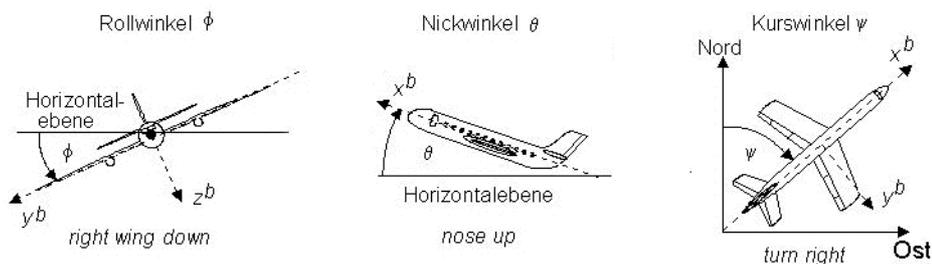


Abb. 2.4: Abweichungen von der idealen Senkrechtaufnahme [FH BOCHUM 2005]

Somit muss für korrekte Aufnahmen eine größere Überdeckung der Aufnahmen geplant werden. Meist wird mit einer Längsüberdeckung von 60 % und einer Querüberdeckung von 25 bis 30 % geplant. Bei großen Höhenunterschieden im Gelände muss man die gewünschte Überdeckung für die höchsten Geländebereiche planen, dadurch ergibt sich für die niedrigeren Bereiche eine höhere Überdeckung. Die zu wählende Flughöhe richtet sich nach der gewünschten Auflösung und Genauigkeit der Aufnahmen.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 147

2.1.2.2 Kameras für Flugphotogrammetrieaufnahmen

Großformatige Filmmesskameras werden auch Reihemesskameras (RMK) genannt. Der Sucher ist kombiniert mit dem Überdeckungsregler und der Vorrichtung für die Abdriftkorrektur.

Im Sucher werden außerdem folgende Daten angezeigt:

- Bildfeldrahmen für den gewählten Objektstutzen
- Basisendpunkte
- Querüberdeckung
- Kontrolle der Horizontierung
- Vorlaufzeitmarke für gezielte Aufnahmen

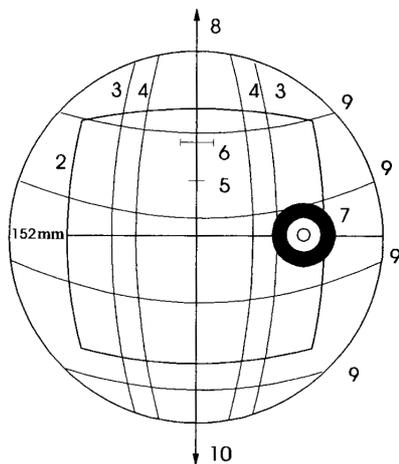


Abb. 2.5: Kamerasucher, [KRAUS 2004b], S. 152

- | | |
|----|---|
| 1 | Kamerakonstante zur Kontrolle des richtigen Bildfeldrahmens |
| 2 | Bildfeldrahmen |
| 3 | Querüberdeckung 20 % |
| 4 | Querüberdeckung 30 % |
| 5 | Vorlaufzeitmarkierung für gezielte Aufnahmen |
| 6 | Längsüberdeckung 60 % (Basisanfang) |
| 7 | Dosenlibelle und Kontrolllicht für Aufnahme |
| 8 | Flugrichtung |
| 9 | Wanderlinien des Überdeckungsreglers |
| 10 | Bewegungsrichtung der Wanderlinien |

Für eine möglichst exakte Zentralprojektion ist eine kurze Belichtungszeit und ein Zentralverschluss notwendig. (vgl. [KRAUS 2004b], S. 154) Im Gegensatz zum Schlitzverschluss, der das Licht Streifen für Streifen durchlässt, öffnet sich der Zentralverschluss von der Mitte und ist mit der Blende in einer Einheit zusammengefasst. Er sitzt zwischen

den einzelnen Linsengruppen des Objektivs, dort wo das Lichtbündel den kleinsten Durchmesser hat und damit bestens durch die enge Öffnung von Verschluss und Blende hindurch passt, ohne dass *Vignettierung* auftritt.

vgl. [KAMERA GESCHICHTE 2005], 22. 5. 2005

Der Aufnahmezyklus einer Photogrammetriekamera dauert 1,6 bis 2 Sekunden, dabei werden die folgenden Schritte durchgeführt:

- Belichtung
- Bildebene wird verschoben = Bildwanderungskompensation
- Abheben der Anpressplatte und Abblasen des Films
- Filmtransport und Weiterstellen des Bildnummernzählwerks
- Ansaugen des Filmes = pneumatische Verebnung
- Anpressen an den Anlegerahmen

Digitale CCD-Kameras (Flächensensoren) sind erst als Prototyp vorhanden, für die Luftbildphotogrammetrie benötigt man eine hohe Anzahl an Detektoren für eine hohe Auflösung und die Auslesezeit muss innerhalb der Aufnahmezeit von ein bis zwei Sekunden liegen, damit die Aufnahmen nicht zu weit auseinander liegen. Diese Anforderungen können heute noch nicht erfüllt werden, in diesem Bereich wird intensiv geforscht.

Digitale Dreizeilenkameras (HRSC-A = High Resolution Stereo Camera-Airborne) wurden entwickelt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Bei diesem Kamertyp ist eine Verknüpfung mit GPS und IMU nicht unbedingt notwendig, für die Bewegungskompensation wird hier die TDI-Technologie (Time Delay und Integration) eingesetzt. Dabei wird das Auslesen der Ladungszustände innerhalb einer Belichtung getaktet.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 160f

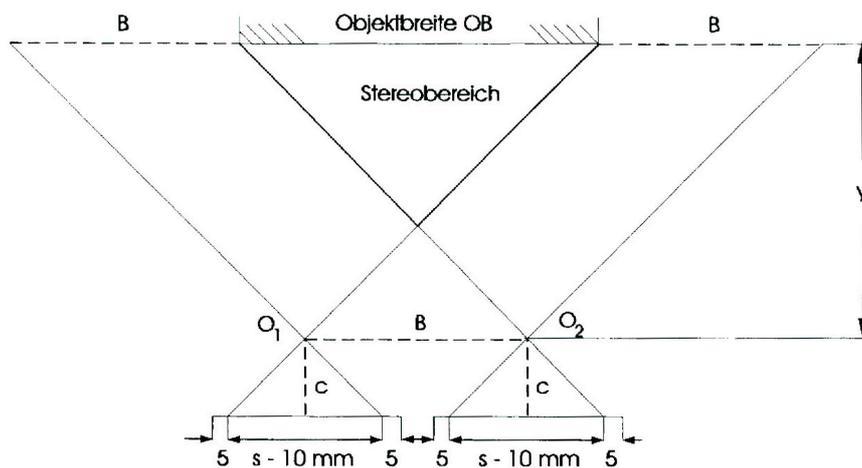
2.1.3 Terrestrische Photogrammetrie

Bei der terrestrischen Photogrammetrie ist eine genaue Planung besonders wichtig, da eine automatische Orientierung der Aufnahmen aufgrund der voneinander unabhängigen Kamerastandorte meist nicht möglich ist. Weiters sollte bereits bei der Planung der Genauigkeitsanspruch geklärt werden, wie im nächsten Punkt detailliert erläutert wird.

2.1.3.1 Planung terrestrischer Aufnahmen

Aus der geforderten Genauigkeit kann man die Richtwerte für die maximal mögliche Aufnahmeentfernung bzw. den kleinstmöglichen Bildmaßstab und die kleinstmögliche Basis, die wichtig für die Tiefengenauigkeit ist, erhalten.

Weiters muss untersucht werden, von welchen Standpunkten das Objekt am besten aufgenommen werden kann bzw. welche Sichthindernisse umgangen werden müssen, daraus ergibt sich der Bildwinkel (*Brennweite* und Bildformat). Große Aufnahmeentfernungen verlangen lange Brennweiten, auch die *Schärfentiefe* muss berücksichtigt werden, der erfasste Objektbereich ist ebenfalls einzubeziehen.
vgl. [KRAUS 2004b], S 194f



B = Basis
 y = Aufnahmeentfernung
 OB = Objektbreite
 c = *Kamerakonstante*
 s = nutzbare Bildbreite
 5 mm Sicherheitsabstand zum Rand

Abb. 2.6: Planung des horizontalen Normalfalls, [KRAUS 2004b], S. 195

$$\frac{s - 10 \text{ mm}}{c} = \frac{B + OB}{y}$$

Der kritische Planungsparameter ist die optimale Basislänge, hierfür sind folgende Parameter maßgebend:

- Tiefenmessgenauigkeit
- Einsicht in Objekteinschnitte
- Erfassung des Objekts mit möglichst wenigen Bildern

Die Genauigkeit steigt proportional mit dem Basis/Entfernungsverhältnis (B/y).

Vorteile von Einzelmesskameras (bei einer Orientierung mittels Passpunkten):

- Die Aufnahmearbeiten werden beschleunigt, da die Orientierung erst später erfolgt.
- Systematische Fehlereinflüsse bei Aufnahme und Auswertung werden großteils von den Passpunkten abgefangen.
- Auch instabile Aufnahmeplattformen können bei den Aufnahmen zum Einsatz kommen, wesentlich ist oft nur das Erzielen genauer Strahlenschnitte am Objekt.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 196

Soll ein Objekt aus allen Richtungen dreidimensional aufgenommen werden (im Gegensatz zu einer Fassade) ist ein Rundum-Bildverband notwendig, grundsätzlich reichen vier Aufnahmen, wenn sie auf die Objektecken ausgerichtet werden. Dann ist jede Seite auf zwei Aufnahmen sichtbar, Vorteile bietet jedoch schon ein Bildverband aus acht Bildern:

- Diagonale Aufnahmen ergeben einen stabilen Rundum-Bildverband.
- Jeder Objektpunkt ist auf mindestens drei Bildern sichtbar, das garantiert hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit.
- Die Frontalaufnahmen sind wenig verzerrt und eignen sich somit gut für die Erstellung von *Orthophotos*.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 198

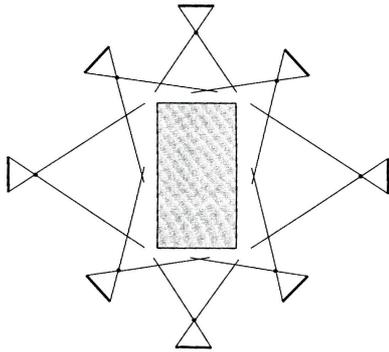


Abb. 2.7: Rundum-Bildverband aus acht Bildern, [KRAUS 2004b], S. 198

2.1.3.2 Kameras für die terrestrische Photogrammetrie

Eine Stereomesskamera ist ein Kamerasystem, das simultan zwei Aufnahmen erstellt. Es handelt sich dabei meist um zwei Kameras, die auf einer Schiene montiert sind, diese wird Basisschiene genannt. Die Basis ist dabei meist unveränderlich (üblich sind 120 cm). Bei diesen so genannten Festbasiskameras sind alle Parameter der äußeren Orientierung bekannt. Dies ist ein großer Vorteil, somit sind keine Passpunkte notwendig. Durch die feste Basislänge wächst der mittlere Fehler in Aufnahmerichtung mit dem Quadrat der Entfernung. Deshalb haben Festbasiskameras eine geringe Praxisbedeutung, üblicher sind Stereomesskameras mit einer individuell einstellbaren Basisschiene. vgl. [KRAUS 2004b], S. 183f

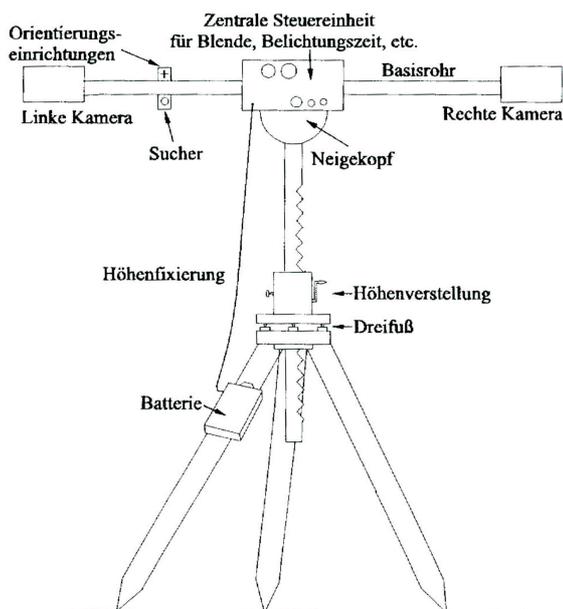


Abb. 2.8: Funktionsprinzip einer Stereomesskamera, [KRAUS 2004b], S. 184

Einzelmesskameras sind für Photogrammetrieaufnahmen besser zu gebrauchen. Wenn mit Vergrößerung der Aufnahmeentfernung auch die Basis vergrößert werden kann, ergibt sich dadurch optimale Genauigkeit. Hier können die Elemente der äußeren Orientierung mit *Libellen*, Horizontal- und Vertikal-Winkeleinstellungen bestimmt werden, durch einen versetzten Bildhauptpunkt kann eine zusätzliche Anpassungsfähigkeit an die jeweilige Aufnahmesituation erreicht werden.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 185f

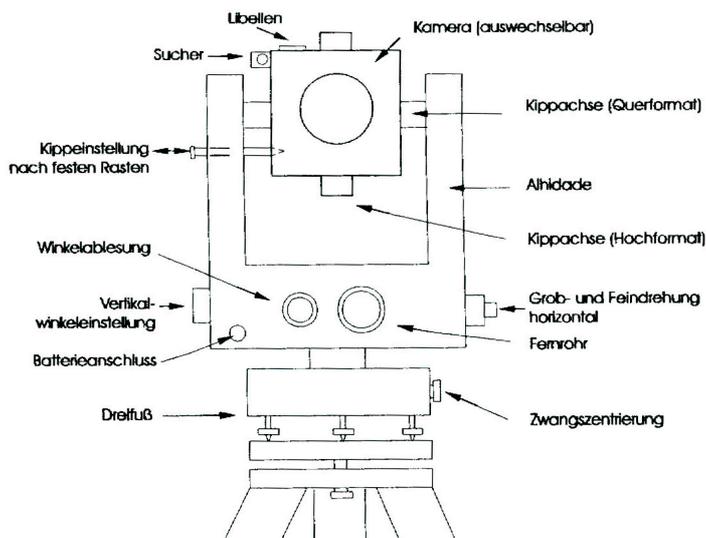


Abb. 2.9: Funktionsprinzip einer Einzelmesskamera, [KRAUS 2004b], S. 185

Eine weitere Möglichkeit sind Teilmesskameras oder auch Réseaukameras (franz. pas d'un réseau = Gitterabstand). Das Réseau besteht aus einer (stabilen) Glasplatte, auf der ein Raster von kreuzförmigen Punkten in einem Rasterabstand von mehreren Millimetern aufgebracht ist. Dieses Réseau wird auf jedes Bild belichtet, von den Rasterpunkten sind Sollkoordinaten bekannt, diese werden vor dem Einbau in die Kamera bestimmt. Die Ist-Koordinaten werden in den aufgenommenen Bildern gemessen, die daraus resultierende Transformation eliminiert Verzug und Unebenheit des Films.

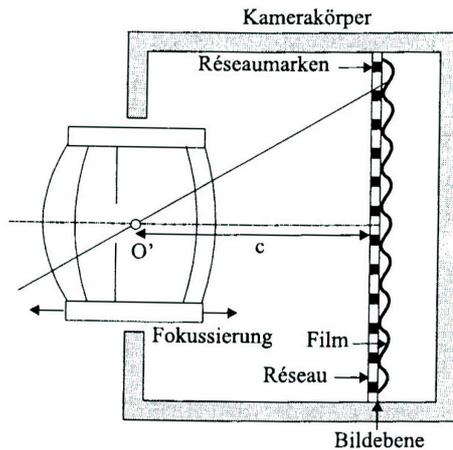


Abb. 2.10: Funktionsprinzip einer Résaukamera, [KRAUS 2004b], S. 186

Unterschiede zu Messkameras:

- Die optische Verzeichnung ist im Vergleich zu Messkameras durch das unterschiedliche Aufnahmeverfahren wesentlich größer. Für hohe Genauigkeitsansprüche ist eine rechnerische Korrektur der optischen Verzeichnung erforderlich.
- Reséaukameras sind beliebig fokussierbar, die Position des Projektionszentrums ist nur näherungsweise bekannt. (Es gibt Standard-Fokus-Einstellungen für die Kalibrierungsdaten bekannt sind, bei anderen Fokussierungen muss das Projektzentrum bestimmt werden.
- Eine *Kalibrierung* mittels Testfeldern ist notwendig, für höhere Genauigkeit muss eine projektbegleitende *Kalibrierung* durchgeführt werden.

2.1.4 Auswertung von Photogrammetrieaufnahmen

Bei der Auswertung von Photogrammetrieaufnahmen kommen unterschiedliche Algorithmen zur Anwendung. Mittels Korrelationsalgorithmen werden korrespondierende Bildstellen in den Aufnahmen gesucht, diese können zur Orientierung des Bildverbands verwendet werden. Bei Flugaufnahmen kann eine automatische relative Orientierung der Bildstreifen mit verschiedenen Lösungsstrategien erfolgen. Eine Verknüpfung des Bildverbands kann auch mittels Bündelblockausgleichung durchgeführt werden. Diese Techniken werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

2.1.4.1 Korrelationsalgorithmen

Mittels *Korrelation* werden korrespondierende Bildstellen in zwei Bildern (Bildstellen mit maximaler Ähnlichkeit) gesucht, dies entspricht der Technik der Mustererkennung bei geometrischen Figuren. Man definiert eine Punktgruppe im ersten Bild, dieses Muster wird als so genanntes Referenzbild bezeichnet. Im zweiten Bild, das Suchbild genannt wird, muss dieses Muster ebenfalls vorhanden sein. Nach einer bestimmten *Matrix* wird nun das Suchbild überprüft, wobei Bildrauschen und Mischpixel an den Kanten die Suche erschweren. Üblich bei Photogrammetrieaufnahmen sind Korrelationen im Subpixel-Bereich, die mittels einer *Kleinste-Quadrate-Ausgleichung* gelöst werden.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 361f

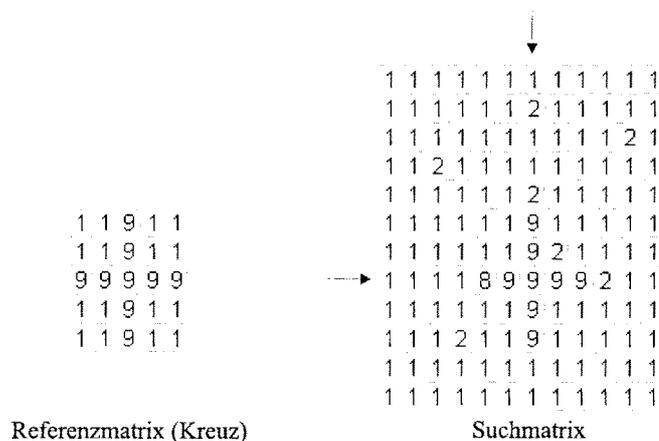


Abb. 2.11: Beispiele für Such- und Referenzmatrix, [KRAUS 2004b], S. 362

2.1.4.2 Automatische relative Orientierung

Für die automatische Orientierung wurden bereits verschiedene Techniken entwickelt. Da die Orientierung des Bildverbands ein arbeitsaufwändiger Schritt ist, wurden in diesem Bereich schon früh Möglichkeiten zur Automatisierung gesucht.

Die hierbei gebräuchlichen Lösungsstrategien hängen vor allem von der Aufnahmeanordnung und der Form des Objektes ab:

- Geländeaufnahmen mit geringen Höhenunterschieden (mit 60 % Überlappung der Bildstreifen): Es werden im ersten Bild Referenzmatrizen ausgewählt und im zweiten Bild Suchbereiche definiert. Für eine höhere Zuverlässigkeit werden größere Referenzmatrizen gewählt. Das System wählt nach den so genannten *Gruber-Punkten*; die Auswahl erfolgt im größten Pyramidenniveau. Für die relative Ori-

entierung ist es ausreichend, etwa drei bis vier Pyramidenniveaus zu durchlaufen. Diese Methode liefert eine hohe Anzahl an Orientierungspunkten, die Genauigkeit ist deshalb vergleichsweise hoch.

- Geländeaufnahmen mit großen Höhenunterschieden (mit 60 % Überlappung der Bildstreifen): Wegen der großen Maßstabsunterschiede müssen die Suchbereiche im zweiten Bild größer gewählt werden, außerdem wird man wegen der großen Höhenunterschiede meist auf eine merkmalsbasierte Korrelation übergehen. In jedem Bild werden mit einem Interest-Operator, der die wichtigen Bildpunkte erkennt, Merkmalspunkte extrahiert und anschließend korrespondierende Bildpunkte gesucht. Eine Grob-Fehler-Analyse ist notwendig, da sich beim Durchlaufen des Pyramidenniveaus verhältnismäßig viele Fehlzuordnungen ergeben.
- Beliebige angeordnete terrestrische Aufnahmen: Auch hier werden im ersten Schritt Merkmalspunkte extrahiert. Für die Zuordnung korrespondierender Punkte wird die Technik der *Kernstrahlgeometrie* eingesetzt. Dazu sind jedoch Näherungswerte der Orientierungselemente notwendig, die manuell identifiziert werden müssen.
- Kantenbasierte relative Orientierung: Dabei werden in beiden Bildern unabhängig voneinander Objektkanten herausgefiltert, die Kanten werden anschließend analysiert und Ähnlichkeiten in den Kanten gesucht. Wenn Kanten gefunden sind, können einerseits markante Punkte gesucht werden oder andererseits Formeln für verknüpfende Linien eingesetzt werden.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 375ff

2.1.4.3 Bündelblockausgleichung

Bei der Bündelblockausgleichung wird eine höhere Anzahl von zusammenhängenden Bildern (ein Bildverband – in diesem Zusammenhang Block genannt) miteinander verknüpft. Der Begriff Bündel bezeichnet das Zusammenfallen von allen Bildpunkten im Projektionszentrum, da jede Bildkoordinate einen Strahl durch das Projektionszentrum (Kameraobjektiv) definiert.

Zur Verknüpfung der Bilder wird das Verfahren der Aerotriangulation angewendet, dabei werden identische Punkte in den sich überlappenden Bildern lokalisiert. Die Auswahl

der Punkte wird meist mittels der bereits besprochenen Mustererkennungsalgorithmen durchgeführt.

Bei der Affintransformation handelt es sich um ein Verfahren zur Transformation von Karten. Es wird auch zur Transformation zwischen unterschiedlichen Koordinatensystemen eingesetzt. Dabei werden Translationen, Rotationen und separate Skalierungen für X- und Y-Werte sowie Winkeländerungen verwendet.

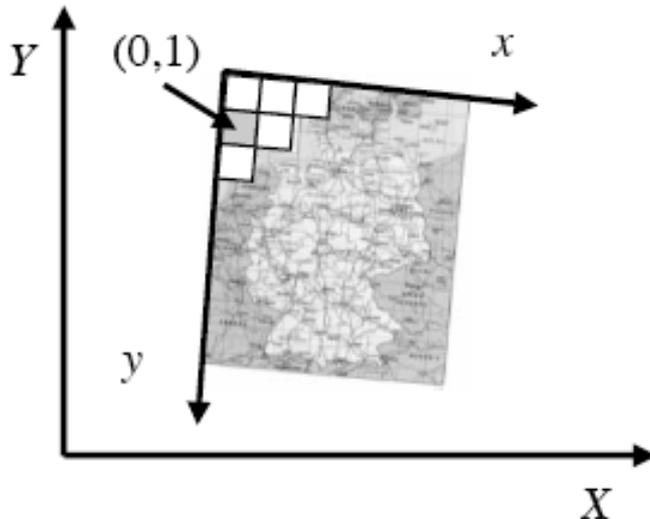


Abb. 2.12: Beziehung zwischen zwei Koordinatensystemen [UNI STUTTGART 2005]

Die Affintransformation beschreibt die mathematische Beziehung nach den Gesetzen der Zentralprojektion zwischen den Koordinatensystemen der beiden Bilder wie folgt:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned}$$

Die Parameter $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ sind unbekannt und müssen in einer so genannten Transformationsanalyse bestimmt werden. Die Parameter a_0 und b_0 bestimmen die Verschiebung des Koordinatensystems in X- und Y-Richtung und eine Scherung. Zum Bestimmen der Parameter braucht man mindestens drei Punkte, die in beiden Koordinatensystemen bekannt sind, durch Einsetzen dieser Koordinaten in die obige Gleichung können aus den entstehenden linearen Gleichungssystemen die Parameter bestimmt werden:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 & Y &= b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 \\ X &= a_0 + a_1x_2 + a_2y_2 & Y &= b_0 + b_1x_2 + b_2y_2 \\ X &= a_0 + a_1x_3 + a_2y_3 & Y &= b_0 + b_1x_3 + b_2y_3 \end{aligned}$$

Bei Verwendung von nur drei Punkten sind die Parameter somit nicht kontrolliert, falsche oder ungenaue Messungen der drei bestimmenden Punkte führen zu ungenauen oder falschen Ergebnissen. Durch Verwenden mehrerer Punkte kann das Ergebnis verbessert werden, es muss dann eine Ausgleichung der gemessenen Rasterkoordinaten durchgeführt werden, da das Gleichungssystem überbestimmt ist.

vgl. [UNI STUTTGART 2005], 15. 2. 2005

2.1.5 Resümee

Die Photogrammetrie konnte sich über einen langen Zeitraum hinweg entwickeln und ihre Position innerhalb der unterschiedlichen Image-Based-Modeling-Techniken festigen. Die Vorteile dieser Technik wie die hohe Lagegenauigkeit bei Flugaufnahmen, die Eignung der Daten zur Erstellung von Orthophotos und die hoch entwickelten Verarbeitungsmethoden sind bekannt und bewährt.

Photogrammetrie ist in hohem Maße abhängig vom Operateur und in diesem Sinne auch von der Planung der Aufnahmestandpunkte. Der menschliche Faktor in der Digitalisierung und Auswertung der Daten stellt oft einen Problemfaktor dar. Bei Flugaufnahmen ist auch die mangelhafte Höhengenaugigkeit als Nachteil festzuhalten.

Als älteste und somit etablierteste hier besprochene Technik konnte die Photogrammetrie ihren Platz halten und sichern. Mittels Ergänzung weiterer Datenmaterialien wie z. B. Grundrissdaten aus 2D-Plänen oder gleichzeitig aufgenommenen Laserscanneraufnahmen können die Photogrammetrieergebnisse noch ergänzt und verbessert werden. Die Zukunft liegt hier eindeutig in der Kombination mehrerer Techniken.

2.2 Volumes from Silhouettes

Die Technik, aus Silhouetten eines Objekts ein 3D-Modell zu erstellen, ist eine der ältesten Methoden des Image Based Modeling und wird manchmal auch als Shape-from-Silhouettes bezeichnet, da aus den Silhouetten die Form des Objekts rekonstruiert wird.

2.2.1 Grundlagen

2.2.1.1 Definition

Da sich auf diesem Wege relativ wenig Details herausbilden lassen, konnte sich diese Methode nicht im selben Maße wie Photogrammetrie und Laserscanning weiter entwickeln. Weiters eignet sich diese Technik nur für den Nahbereich, da das Objekt von allen Seiten einsehbar sein muss.

„The word *silhouette* indicates the region of a 2D image of an object O which contains the projections of the visible points of O .“ [LAURENTINI 1995], S.1

Alle Punkte eines Objekts, die in einem Bild sichtbar sind, ergeben demnach die Silhouette eines Objektes. Die Form des Objektes lässt sich aus Rückprojektion der Punkte der Silhouette aus dem entsprechenden Blickwinkel rekonstruieren.

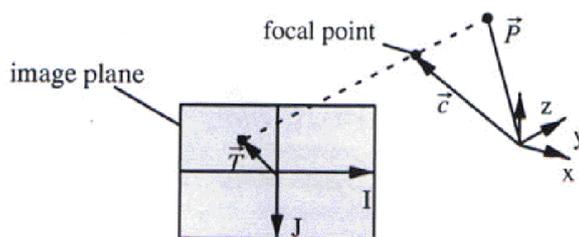


Abb. 2.13: Projektion eines Objektpunkts P in einen Bildpunkt $T = (I, J)$, [NIEM 1994], S. 3

$$\begin{aligned} c &= (c_x, c_y, c_z)^T \\ a &= (a_x, a_y, a_z)^T \\ h &= (h_x, h_y, h_z)^T \\ v &= (v_x, v_y, v_z)^T \\ f & \end{aligned}$$

Vektor zum Fokuszentrums
 Vektor in der Richtung der optischen Achse
 Vektor parallel zur horizontalen Achse der Bildebene
 Vektor parallel zur vertikalen Achse der Bildebene
 Brennweite der Kamera

$$I = \frac{(\vec{P} - \vec{c}) \cdot \vec{h}}{(\vec{P} - \vec{c}) \cdot \vec{a}} \cdot f \quad ; \quad J = \frac{(\vec{P} - \vec{c}) \cdot \vec{v}}{(\vec{P} - \vec{c}) \cdot \vec{a}} \cdot f$$

Beim Abbilden eines realen Objekts auf einem Bild wird jeder einzelne Objektpunkt in einen Bildpunkt transformiert. Dies wird in Abbildung 2.12 und durch die obenstehenden Formeln verdeutlicht. Durch Umkehrung dieser Formeln kann die Transformation der Bildpunkte in Objektpunkte erreicht werden.

vgl. [NIEM 1994], S.2

Zum Erzielen guter Resultate ist die Annahme von Vorteil, dass in jedem Punkt der Oberfläche die Oberflächennormale der Kameraaufnahmerichtung entspricht.

(vgl. [DEBEVEC 1996], S. 13) Tatsächlich kann dies nur bei Objekten, die in der jeweiligen Aufnahmerichtung flach sind, der Fall sein. Somit stellt beinahe jede Aufnahme einen Kompromiss dar, was ebenfalls die Genauigkeit der späteren 3D-Modelle beeinträchtigt, wie in Kapitel 2.2.3 genauer erläutert wird.

2.2.1.2 Visual Hull Konzept

Silhouetten sind eine wichtige Quelle zur Informationsgewinnung über die Form des aufgezeichneten Objekts. Die Visual Hull definiert die so genannte Hülle des Objekts (siehe Abbildung 2.14).

$$R_n = \bigcap_{i=1}^n C_i$$

O = Objekt
 S_i = Silhouette
 C_i = Feste Region im Raum (Solid Region of Space)
 V_i = Blickwinkel (Viewpoint)
 R_n = Volumen, das das Objekt umschließt

Wichtig ist hier vor allem die Frage: Was kann man aus der Visual Hull über das zugrunde liegende Objekt erfahren? Alle fünf untenstehenden Objekte teilen sich die zwölf Kanten des Würfels. Die restliche Oberfläche kann unterschiedliche Formen annehmen, solange keine Linie die Außenkanten des Würfels verlässt.

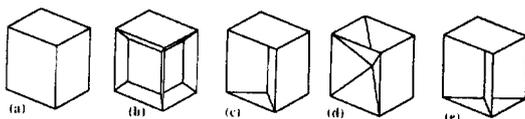


Abb. 2.14: Verschiedene geometrische Objekte, die alle dieselbe würfelförmige Visual Hull erzeugen, [LAURENTINI 1995], S. 2

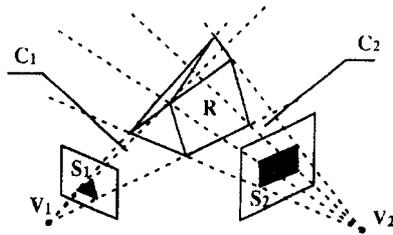


Abb. 2.15: Volume Intersection, [LAURENTINI 1995], S. 2

Die so genannten Solid Regions C_i in Abbildung 2.15 sind bei perspektivischer Projektion Kegel, bei paralleler Projektion handelt es sich um Zylinder.

Die beschriebene Methode nennt man meist Volume Intersection (VI), als Repräsentationsform wird meist die in Kapitel 2.3.3 beschriebene Octree-Methode gewählt, da sie wenig Speicherplatz braucht und schlussendlich schnell und einfach zu berechnen ist. Der große Vorteil der Volume-from-Silhouettes-Methode besteht in der Tatsache, dass es nicht notwendig ist, gemeinsame Punkte in den verschiedenen Bildern zu finden (wie bei den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Methoden).

vgl. [LAURENTINI 1995], S. 2

Das Objekt wird wie oben beschrieben durch Rückprojektion der Silhouetten aus dem entsprechenden Blickwinkel konstruiert. Dabei können die Punkte der Objektoberfläche in zwei verschiedene Kategorien unterteilt werden:

- Hard Points: Diese Punkte gehören zu jedem Objekt, das möglicherweise der Ursprung der Silhouette ist.
- Soft Points: Bei diesen Punkten ist die Zugehörigkeit zum ursprünglichen Objekt nicht eindeutig ersichtlich.

vgl. [LAURENTINI 1995], S. 2

Für die Visual Hull gelten per Definition (vgl. [LAURENTINI 1995], S. 2) die folgenden Bedingungen:

Hypothese 1: Die Visual Hull $VH(O)$ ist die genaueste Annäherung des Objekts O , die durch Volume-Intersection-Technik mit den Blickrichtungen $V \in \mathbf{V}$ erhalten werden kann. Laurentini definiert drei unterschiedliche Versionen der Visual Hull, diese unter-

scheiden sich durch die Blickrichtungen (Viewpoints), die zur Erstellung der Visual Hull mit einbezogen werden.

- Convex Hull: Die Convex Hull umschließt das gesamte Objekt ohne Einschnitte nach innen (konvex).
- External Visual Hull $VH(O)$: Diese wird auch einfach als Visual Hull bezeichnet, hier werden alle Blickrichtungen verwendet, die das Objekt O komplett einschließen, aber nicht in die Convex Hull eindringen.
- Internal Visual Hull $IVH(O)$: Durch Verwendung der Blickrichtungen einschließlich derer relativ zu $V = E^3 - O$ erhält man die so genannte Internal Visual Hull.

Hypothese 2: $O \leq IVH(O) \leq VH(O) \leq CH(O)$

Hypothese 2 beschreibt die Beziehung zwischen dem Objekt und den drei Visual-Hull-Modellen. Dementsprechend ist das Objekt die kleinste Einheit, sie wird umschlossen von der Internal Visual Hull. Diese ist wiederum kleiner oder gleich groß als die External Visual Hull, welche wiederum von der Convex Hull umschlossen wird. Im einfachsten Fall können demnach auch alle vier Objekte vollkommen gleich groß sein.

Hypothese 3: *„A point P belongs to $VH(O)$ if and only if any line passing through P shares at least a point with O .“* [LAURENTINI 1995], S. 2

Dementsprechend gehören nur die Punkte zur Visual Hull eines Objekts, wenn jede Linie, die durch diesen Punkt geht zumindest einen Punkt mit dem Objekt O gemeinsam hat. Zusammen mit der folgenden Hypothese ergibt sich dadurch die Bedingung für einen Punkt, der zu $VH(O)$ gehört.

Hypothese 4: *„A necessary and sufficient condition for a point P belonging to the surface of a visual hull $VH(O)$ to be hard is that at least one line L passes through P without intersecting $VH(O)$ at any other point.“* [LAURENTINI 1995], S. 3

Die in [LAURENTINI 1995] aufgestellten Hypothesen definieren einerseits das Verhältnis des Objekts O zu seiner Visual Hull und andererseits die Bedingungen für einen Punkt, der zur Visual Hull gehört. Demnach muss ein Punkt P , den die Linie L (Tangente der Visual Hull wie in untenstehender Grafik zu sehen) als einzigen Punkt mit der Visual

Hull teilt, auch der Punkt P sein, den die Linie L mit dem Objekt O teilt, weil O von der Visuell Hull eingeschlossen wird.

Weiters teilt eine Linie L, die obige Bedingung nicht erfüllt, mit der Visual Hull $VH(O)$ mindestens einen anderen Punkt Q_L . Somit gehört Q_L für jede Linie zu O. Unter dieser Annahme erfüllt P die Hypothese 3 und gehört damit zu $VH(O)$, egal ob P zu O gehört oder nicht.

vgl. [LAURENTINI 1995], S. 3



Abb. 2.16: Tangente von $VH(O)$ im Punkt P, [LAURENTINI 1995], S. 3

2.2.1.3 Projektablauf

Der Prozess der Volumenrekonstruktion lässt sich in drei Stufen unterteilen: Im ersten Schritt wird das Volumen (Bounding Volume) aus den Objektsilhouetten und den bekannten Kamerapositionen rekonstruiert, in einem zweiten Schritt werden aus allen Bildern zusätzliche Tiefeninformationen extrahiert und fusioniert. Mit diesen *Depth Maps*, die Tiefeninformationen des Bildes in Grauwerten darstellen, kann das Volumen in einem dritten Schritt weiter verfeinert werden. (vgl. [NIEM 1994], S. 3) Diese Vorgehensweise wird in der untenstehenden Grafik übersichtlich illustriert.

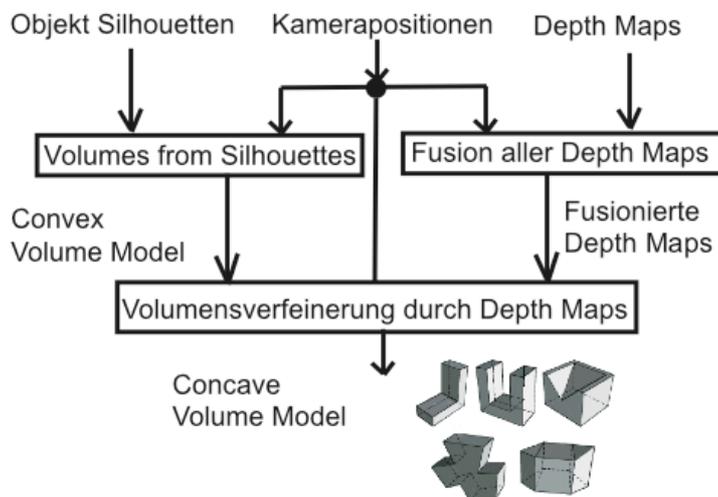


Abb. 2.17: Beispiel für einen Projektablauf, [NIEM 1994], S. 3

Eine weitere Möglichkeit neben der in Kapitel 2.2.1.2 beschriebenen Methode besteht darin, das Volumen in Linienblöcke (Pillars) zu unterteilen, die wiederum in Würfel mit größtmöglicher Auflösung (Voxels) unterteilt werden. Jeder der Linienblöcke kann komplett durch die Mittelpunkte der Würfel am oberen und unteren Ende beschrieben werden. Dadurch ist die Komplexität des Modells direkt proportional zur Objektoberfläche. vgl. [NIEM 1994], S. 4

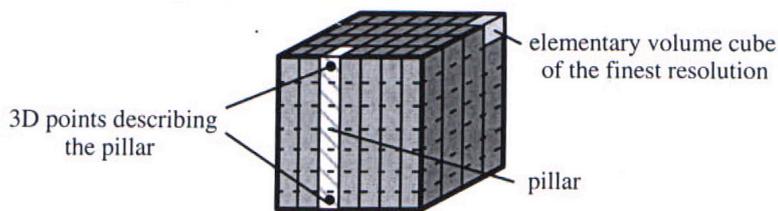


Abb. 2.18: Pillar Representation, [NIEM 1994], S. 4

Die Extrahierung des Modells mittels dieser Methode gliedert sich in mehrere Schritte. Im ersten Schritt wird ein Volumenwürfel definiert, der das Objekt sicher enthält. Weiters wird das Bild segmentiert mit anschließender Extrahierung der Objektsilhouette. Anschließend werden die 3D-Punkte, die den Linienblock definieren, auf die Bildebene mit der Silhouette projiziert (a). Die daraus resultierenden Bildpunkte werden mit einer 2D-Linie verbunden (b). Durch Eliminierung der Pixel, die außerhalb der Silhouette liegen wird die Linie in neue Liniensegmente unterteilt und reduziert (c). Mittels der Pixel der neuen Liniensegmente wird der Linienblock unterteilt und reduziert (d). Diese Schritte werden kontinuierlich auf jeden Linienblock angewandt. So wird in jedem Schritt das Modell erneut definiert und mit jeder bearbeiteten Silhouette verbessert. In Abbildung 2.19 wird diese Vorgehensweise zusätzlich verdeutlicht. vgl. [NIEM 1994], S. 4

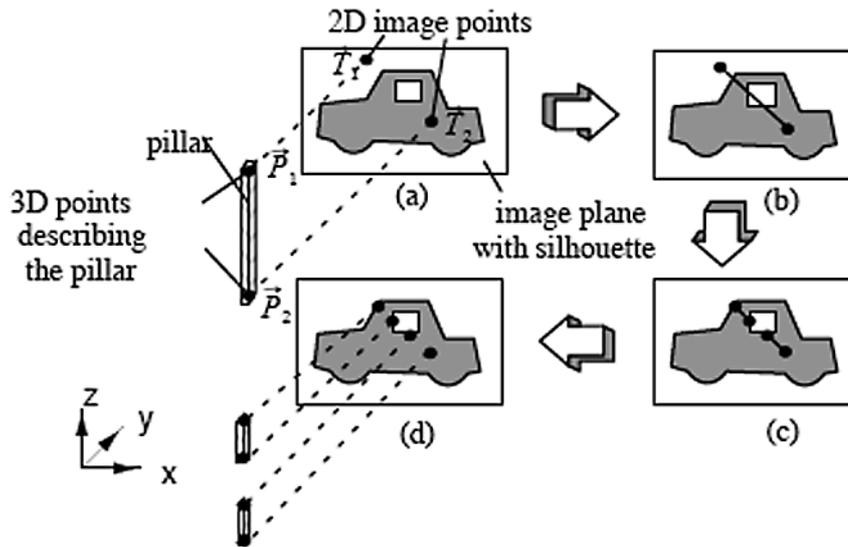


Abb. 2.19: Volumenrekonstruktion mittels Pillar-Repäsentation, [NIEM 1994], S. 5

Mit einer entsprechenden Texturierung, für die die Fotos weitere Verwendung finden, können auf diesem Wege relativ gute 3D-Modelle entstehen, wie die untenstehenden Bilder zeigen.

vgl. [NIEM 1994], S. 11

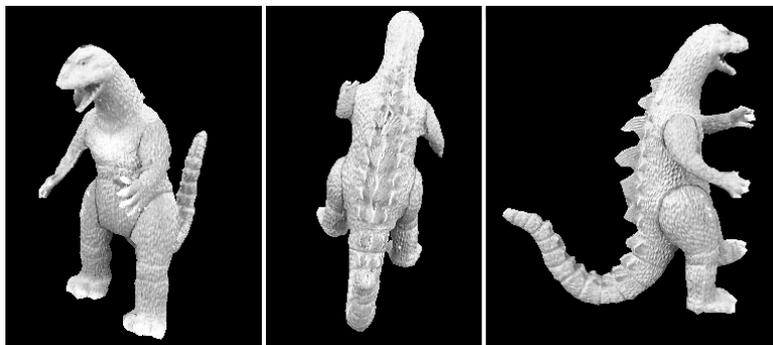
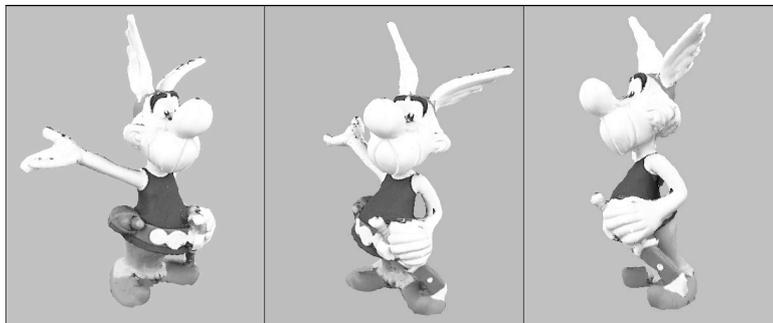


Abb. 2.20: Beispiele für die Ergebnisse, [NIEM 1994], S. 11

In den folgenden zwei Abschnitten sollen Technik und Projektablauf an zwei konkreten Beispielprojekten detailliert erläutert werden.

2.2.2 Chevette – Rekonstruktion und Animation

Paul Debevec kann als einer der Pioniere des Image Based Modeling bezeichnet werden. Während seines Studiums (Mathematik und Informatik) an der Universität Michigan startete er sein erstes Image-Based-Modeling-Projekt: ein 3D-Modell seiner Chevette. Zu seinen weiteren Projekten zählen unter anderem 3D-Modelle der Kathedrale Rouen in der Normandie und des Universitätscampus von Berkeley. Auch im Bereich Image Based Rendering und Lighting konnte er in den vergangenen Jahren erstaunliche Erfolge erzielen.

vgl. [DEBEVEC 2005], 5. 6. 2005

Für das 3D-Modell seiner Chevette fotografierte Debevec das Objekt von allen Seiten. Nach dem Digitalisieren der Fotos erarbeitete er händisch mit einem Bildbearbeitungsprogramm die Silhouetten aus den Fotos. Weiters schrieb er ein Programm, das aus den Silhouetten ein 3D-Modell errechnete. Die Fotos dienten ihm in weiterer Folge als Textur für das fertige Modell. Daraus konnte er eine Animation mit dem fertigen Modell errechnen, wie in Abbildung 2.21 zu sehen ist.

vgl. [DEBEVEC 1996], S. 28

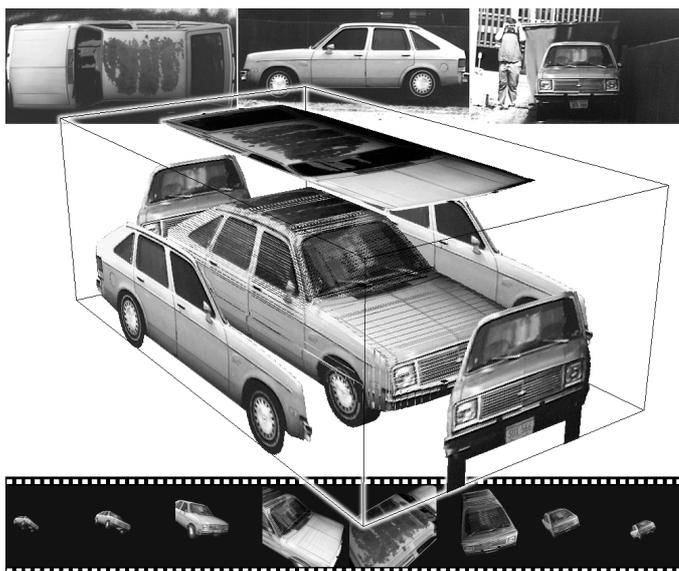


Abb. 2.21: Paul Debevec's Chevette Projekt, [DEBEVEC 1996], S. 28

2.2.3 Octree Representation

Laut Richard Szeliski (vgl. [SZELISKI 1997], S. 1) ist bei kleinen Objekten die einfachste Möglichkeit zur Erstellung eines 3D-Modells die Aufnahme des Objekts auf einer kontrollierten, bewegten Plattform mit einer Videokamera, die an einen Frame Grabber angeschlossen ist. Der Frame Grabber zeichnet die Einzelbilder der Videokamera auf, die dann in weiterer Folge verarbeitet werden. Die relative Position der Videokamera und der Plattform, ebenso die *Kalibrierung* der Kamera sind essentiell zum Erstellen des 3D-Modells.

Die Silhouetten lassen sich aus den aufgenommen Bildern aus verschiedenen Blickwinkeln extrahieren, indem man eine Pixeldifferenzoperation mit einem Vergleichsbild der leeren Plattform durchführt. Dabei werden die Differenzen der R(ot)-G(rün)-B(lau)-Farbwerte berechnet, somit unterscheiden sich die Pixel des Objekts von denen des Hintergrunds. Daraus definiert sich die Silhouette.



Abb. 2.22: Verschiedene Stadien beim Volumes-from-Silhouettes-Projekt, [SZELISKI 1997], S. 2

Jede Silhouette definiert zusammen mit dem Blickwinkel, aus dem das Bild aufgenommen wurde, einen Kegel, innerhalb dessen das Objekt liegt. Wenn man alle diese Kegel miteinander verschneidet, erhält man ein vergleichsweise gutes Modell des Objekts. Für die Darstellung dieses Modells gibt es verschiedene Möglichkeiten, eine davon ist die Darstellung als Octree. Ein Octree ist eine Volumensrepräsentation in Baumstruktur, die durch rekursives Unterteilen einzelner Würfel in acht kleinere Würfel entsteht. Knoten in diesem Baum sind entweder Schwarz (besetzt) oder Weiß (frei), während Knoten innerhalb des Objekts grau dargestellt werden. Der Vorteil dieser Darstellung liegt darin, dass

die Gesamtanzahl der Knoten proportional zur Objektoberfläche anstatt zum Objektvolumen ist. Dadurch wird die Dateigröße entscheidend reduziert.
vgl. [SZELISKI 1997], S. 2

Zur Konstruktion des Umgebungsvolumens (Bounding Volume) aus einer Sequenz von Silhouetten wird eine Serie von Vorwärtsschnitten auf die 2D-Ebene mittels der Daten des Kameramodells durchgeführt. Aus den unterschiedlichen virtuellen Blickwinkeln – da die Kamera fix montiert ist, verändert sich der Standpunkt eigentlich nicht – werden die Silhouetten auf die 2D-Ebene projiziert und bestimmen so das Objekt. Knoten, die direkt und eindeutig außerhalb des Objekts liegen, können sofort aus dem Modell gelöscht werden. Knoten, die teilweise innerhalb des Objekts liegen, können weiter unterteilt werden, um ein genaueres Objektmodell zu erstellen.

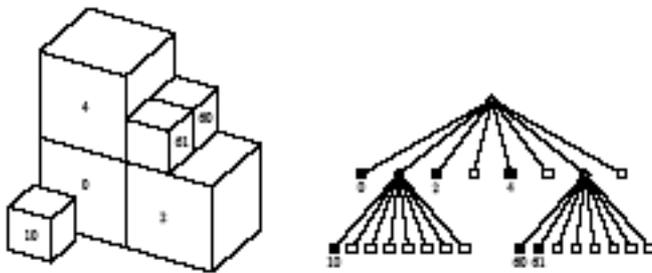


Abb. 2.23: Octree, [SZELISKI 1997], S. 2

Dieser Algorithmus basiert auf der so genannten Coarse-to-Fine-Methode. Die innere Schleife des Algorithmus verfeinert das Modell durch kontinuierliche Vergleiche mit den Silhouetten. Nach einem kompletten Durchlauf aller Silhouetten werden die Würfel, deren Objektzugehörigkeit unklar ist, erneut unterteilt. Da der Octree komplett mit einer Auflösung erstellt wird, bevor er verfeinert werden insgesamt weniger Berechnungen durchgeführt als bei einem nicht-hierarchischen Algorithmus.
vgl. [SZELISKI 1997], S. 2

2.2.4 Surface Curves from Profiles

Auch bei dieser von Richard Szeliski entwickelten Technik (vgl. [SZELISKI 1993]) dient als Grundlage für die Objektrekonstruktion eine Serie von Bildern, die mit bekannter Kamerabewegung aufgenommen wurden. Es wird in diesem Fall nicht nur ein Set von 3D-Kurven erstellt, sondern eine komplette Oberflächenbeschreibung, also ein Netzwerk von verlinkten 3D-Oberflächenpunkten. Diese Technik eignet sich vor allem für die Re-

konstruierung der Umgebung für mobile Roboter, die dadurch das Vermeiden von Hindernissen und Planungsaufgaben absolvieren können.

Richard Szeliski definiert Profile folgendermaßen:

„*The profile (also known as the extremal boundary or occluding contour) is defined as the image of the critical set of the projection map from the surface to the image plane.*“

[SZELISKI 1993], S. 1

Grundsätzlich sind Profile als Kurven in der Ebene ohne auszeichnende Punkte definiert, dementsprechend gibt es keine vorgegebene Beziehung zwischen den Kurven aus verschiedenen Blickwinkeln. Bei gegebener Kamerabewegung lässt sich jedoch eine Beziehung durch die *epipolare* Nebenbedingung darstellen.

„*The epipolar plane through a point is determined by the view direction at that point and the instantaneous camera translation direction.*“ [SZELISKI 1993], S. 5

Die *epipolare* Ebene durch einen Punkt ist demnach bestimmt durch die Blickrichtung und die Richtung der Kamerabewegung. Bei diesem Ansatz ist das Hauptziel, das Darstellen von weichen Formen zu vereinfachen. Das kritische Set an Bildern, das die Konturen definiert, ist bei rundlichen Formen für jeden Blickwinkel unterschiedlich. Dadurch kann die bei normalen Stereobildern verwendete *Triangulation* bei geschwungenen Formen nicht vollkommen korrekt verlaufen. Bei solchen weichen Formen kann deshalb die Verwendung von glättenden Algorithmen das Ergebnis entscheidend verbessern. vgl. [SZELISKI 1993], S. 6

Zum Aufspüren der Kanten wird von Szeliski ein externes Edge-Detection-Tool verwendet. Bei der Wahl desselben ist zu beachten, dass eine gute Auflösung bei möglichst niedrigem Rechenaufwand erreicht wird. Weiters sollte das Programm in der Lage sein, sowohl Stufenkanten, als auch Spitzenkanten zu erkennen. Die Kanten werden anschließend mittels Vergleich von Nähe und Kontinuität der Ausrichtung zu Konturen verbunden. In diesem Stadium wird kein Glätten der Kanten vorgenommen, da alle Informationen in die Oberflächenkonstruktion eingehen sollen.

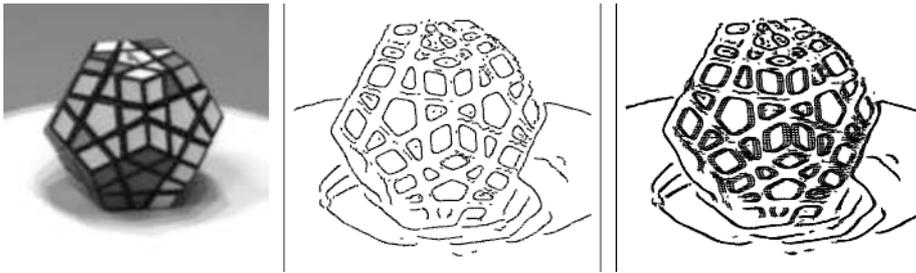


Abb. 2.24: Ausgangsbild – Kanten und Ausrichtung – verfolgte Kanten, [SZELISKI 1993], S. 4

Mittels der *epipolaren* Restriktion kann nun die bestpassende Kante im nächsten Frame (Bild) gefunden werden. Alle möglichen Kanten werden nach ihren Parametern in Ausrichtung, Kontrast und Intensität überprüft und die am besten passende ausgewählt. Aus den Kurven wird die zugrunde liegende Fläche mittels eines Kreises errechnet, der sich an die Kanten anschmiegt, die Kanten stellen demnach Tangenten des Kreises dar. Diesen Kreis nennt man *Osculating Circle* (Schmiegunskreis).

vgl. [SZELISKI 1993], S. 6

Das Verhältnis zwischen der Krümmung einer Kurve, in diesem Fall der *epipolaren* Kurve, und der Krümmung der Fläche wird bestimmt durch den Winkel zwischen der Normalen auf die Kurve und der Normalen auf die Oberfläche. Diese Beziehung wird beschrieben durch die folgende Gleichung:

$$\kappa_v = \kappa_{\text{epi}} \cos\phi$$

κ_v = Krümmung in der Tangentenrichtung v

κ_{epi} = Krümmung der epipolaren Kurve

ϕ = Winkel zwischen der epipolaren Ebene und der Ebene, die v und die Oberflächennormale enthält

Diese besagt außerdem, dass die normale Krümmung für alle Kurven auf der Oberfläche mit einer gegebenen Tangentenrichtung gleich ist. Da die Oberflächennormale aus dem Bild bestimmt werden kann, kann daraus die normale Krümmung aus der *epipolaren* Kurve errechnet werden. Anschließend wird das Linienset, das tangential zum Kreis verlaufen soll, in dieser Ebene berechnet. Wie im noch folgenden Kapitel 2.3.4.1 bei der Auswertung des Laserscanning erwähnt, wird auch hier durch eine *Kleinste-Quadrate-Ausgleichung* das Ergebnis verbessert.

vgl. [SZELISKI 1993], S. 6ff

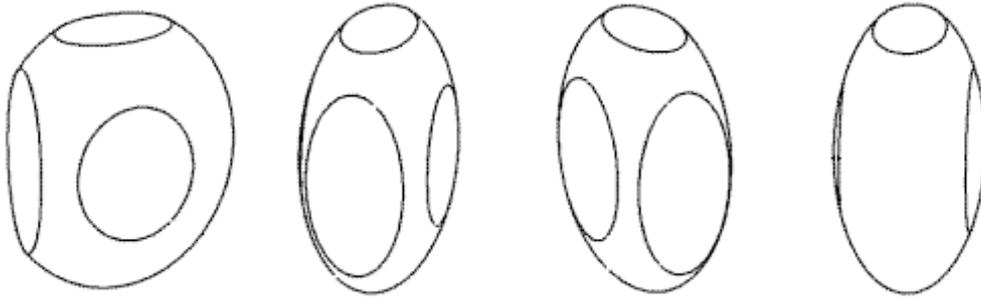


Abb. 2.25: Bilder aus einer synthetisch erzeugten Ellipsenanimation zu Testzwecken, [SZELISKI 1993], S. 16

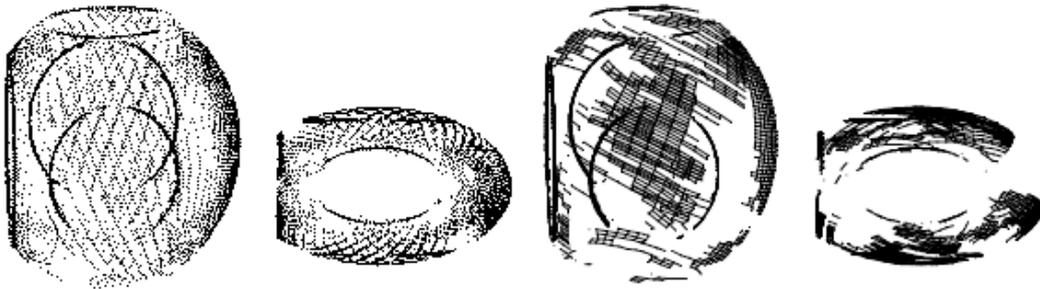


Abb. 2.26: Ergebnisse der Profilrekonstruktion aus der Ellipsenanimation, [SZELISKI 1993], S. 17

2.2.5 Resümee

Die Technik Volumes-from-Silhouettes wird bereits seit Jahrzehnten von Wissenschaftlern in unterschiedlichen Richtungen weiter entwickelt. Neben der Photogrammetrie, die ebenfalls bereits Jahrzehnte besteht und dem etwas jüngeren Laserscanning kann diese Technik jedoch aufgrund der räumlichen Beschränkungen keinen ähnlichen Stellenwert einnehmen. Hohe Genauigkeitsansprüche können aufgrund der Kamerakonstellationen und der rechenaufwendigen Extrahierungsalgorithmen momentan nicht erreicht werden. (siehe Beispiele oben)

Jedoch birgt diese Technik ein hohes Automatisierungspotential, da nach der Aufnahme einzig die Algorithmen der Berechnung der Objektdaten aus der Bildinformation eine Rolle spielen. Da die Leistungsfähigkeit moderner Computer ständig steigt und somit der Kostenfaktor Rechenleistung in den Hintergrund rückt, bergen Techniken im Volumes-from-Silhouettes-Bereich noch einiges Entwicklungspotential.

2.3 Laserscanning

Das Konzept des Laserscanning hat sich in den vergangenen Jahren zur aufstrebendsten Technologie im Bereich des Image Based Modeling entwickelt. Bei der Auswertung der Daten werden viele Ansätze der Photogrammetrie weiter entwickelt. Aktuelle Ergebnisse (vgl. [CYBERCITY 2005], 5. 2. 2005) zeigen, dass beide Technologien sich gut ergänzen.

2.3.1 Grundlagen

2.3.1.1 Definition

Verschiedenste Arten von Scannern sind uns aus dem Alltagsleben bekannt. Im Printbereich werden Scanner zum Digitalisieren von Fotos oder Dias verwendet, an Supermarktkassen kommen so genannte Strichcode-Scanner zum Einsatz. 3D-Scanner werden seit längerem in der Industrie zur Werkskontrolle verwendet, auch bei den Entwicklungen im Bereich 3-D-Animation/*Motion Capturing* spielen Scanner eine Rolle. In der Medizin kommen ebenfalls verschiedenste Scannertechnologien zum Einsatz.



Abb. 2.27



Abb. 2.28

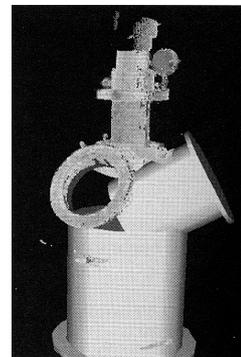


Abb. 2.29

Abb. 2.27: Aufsichtsscanner zum Digitalisieren von flachen Vorlagen, [TECFA 2005]

Abb. 2.28: Handscanner zum Abtasten von Strichcodes, [BOMAC 2005]

Abb. 2.29: Werkskontrolle in der Industrie mittels 3D-Scanner, [LUHMANN 2002], S. 26

„Unter Scannen versteht man einen automatischen Vorgang, der ein Realobjekt berührungslos und vollständig abtastet und dabei Informationen ermittelt, die mit dem Computer weiterverarbeitet werden können.“

vgl. [LUHMANN 2002], S. 15

Wenn man diese Definition mit Bezug auf Laserscanning im Speziellen betrachtet, kann man die relevanten Punkte wie folgt bestätigen:

- automatischer Vorgang: Jeder gängige Laserscanner muss vor dem Aufnahmevorgang kalibriert werden, die Aufnahme selbst erfolgt hingegen vollautomatisch.
- berührungslos: Sowohl beim flugzeuggetragenen Laserscanning (ALS = Airbourne Laser Scanning) als auch beim terrestrischen Laserscanning erfolgt die Aufnahme ohne Berührung des Objekts nur durch die Aufzeichnung von Lichtimpulsen.
- vollständig: Alles, was sich im Blickfeld des Laserscanners befindet, wird aufgezeichnet. Dadurch können selbstverständlich auch unerwünschte Objekte und Details in die Laserscanner-Aufnahme geraten.
- digitales Ergebnis: Das Ergebnis einer Aufnahme mit dem Laserscanner ist eine Punktwolke, die digital abgespeichert wird. Das Dateiformat hängt vom verwendeten Scanner und der dazu gehörigen Software ab.

vgl. [LUHMANN 2002], S. 15

2.3.1.2 Funktionsprinzip

Im Gegensatz zur Photogrammetrie ist beim Beispiel des Laserscanning zu beachten, dass hier die geometrische Rekonstruktion von Objekten im dreidimensionalen Raum mit nur einer Aufnahme statt findet. Der Objektpunkt muss somit nur von einer Richtung aus einsehbar sein, ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Photogrammetrie, bei der immer zwei Bilder benötigt werden.

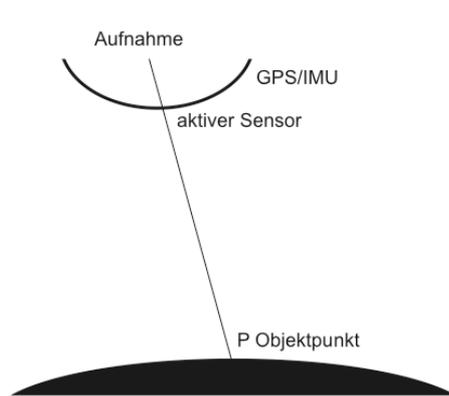


Abb. 2.30: Paradigma des Laserscanning,
[KRAUS 2004a], S. 2

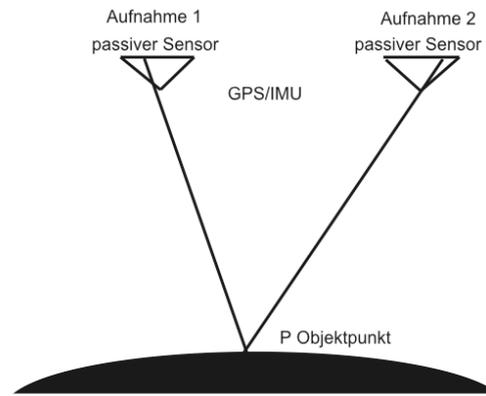


Abb. 2.31: Paradigma der Photogrammetrie,
[KRAUS 2004a], S. 2

Ein weiterer Unterschied besteht in der Anwendung eines aktiven Sensors. Die Kamera der Photogrammetrie zeichnet nur auf, während der Laserscanner seinerseits Lichtimpulse aussendet. Da beim Laserscanning das Ergebnis eine ungewichtete Punktwolke darstellt, ist das Verknüpfen von mehreren Aufnahmen nicht wie bei Photogrammetrieaufnahmen mit Punkten, sondern nur mit Flächenelementen möglich. vgl. [KRAUS 2004b], S. 466

Beim Laserscanning werden die aufgezeichneten Objektpunkte aus einem Feld von dreidimensionalen Vektoren bestimmt. Durch *Kalibrierung* des Scanners vor der Aufnahme werden die Standortdaten ebenfalls gespeichert. Die Entfernungen der Objektpunkte werden aus den Laufzeiten bzw. Phasenverschiebungen von Lichtimpulsen ermittelt, die vom aktiven Sensor des Scanners ausgesandt werden. Durch die Objektgeometrie und dessen Reflexionseigenschaften wird der Impuls abgelenkt, gestreut oder anderweitig verändert. Die reflektierten Lichtimpulse werden vom Scanner aufgezeichnet, in Kombination mit den Daten der *Kalibrierung* und (bei Flugaufnahmen) den Lokalisierungsdaten des GPS und IMU kann daraus die Punktwolke berechnet werden, die das Ergebnis des Laserscans darstellt.

Eine Voraussetzung für Laserscanning ist diffuse Reflexion an der Oberfläche. Bei sehr glatten und spiegelnden Flächen können daher Fehler entstehen. Bei der Photogrammetrie braucht man für die Zuordnung homologer Stellen in beiden Bildern eine ausgeprägte Textur, hier ist Laserscanning ebenfalls im Vorteil. vgl. [KRAUS 2004a], S. 2

In der Praxis teilt sich Laserscanning auf in die beiden Bereiche flugzeuggetragenes Laserscanning und terrestrisches Laserscanning. Da sich bei den beiden Methoden große Unterschiede in Technik, Durchführung und Auswertung der entsprechenden Projekte ergeben, sollen sie hier auch getrennt behandelt werden.

2.3.1.3 Exkurs: Tachymetrie

Die Tachymetrie (griech. tachys = schnell) ist eine Technik aus dem Vermessungswesen, bei der gezielt geometrisch relevante Punkte eingemessen werden, mit denen später eine Gelände- oder Objektoberfläche beschrieben werden kann. Gleichzeitig können Lage und Höhe vieler Punkte aufgenommen werden, die Lageaufnahme funktioniert nach dem Prinzip der Polarkoordinaten. Es werden Richtungen (Horizontalwinkel) und Distanzen gemessen, die Höhe wird trigonometrisch aus Distanz und Höhenwinkel bzw. Zenitwinkel bestimmt.

vgl. [ADLEXIKON 2005], 15. 4. 2005

Aus den Tachymetrieaufnahmen kann jedoch nur die geometrische Information erfasst werden, die für ein fotorealistisches Modell notwendigen Texturinformationen können auf diesem Wege nicht gespeichert werden.

vgl. [DORFFNER 2002], S. 7

Mit Bezug auf Laserscanning betrachtet ist die Tachymetrie vor allem als Kontrollelement zu gebrauchen. Beim Scannen von Gebäuden ist es von Vorteil, Grundrissdaten oder Ähnliches zur Kontrolle der Gebäudekanten zu nutzen. Hier können Tachymetrieaufnahmen, die man mit dem Laserscanning kombiniert, eine wesentliche Verbesserung der Ergebnisse ermöglichen.

2.3.2 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Beim flugzeuggetragenen Laserscanning (Airborne Laser Scanning = ALS) strebt man die Erstellung von digitalen Geländemodellen an. Diese Aufgabe wurde vor den Zeiten des Laserscanning durch digitale Stereophotogrammetrie bewältigt.

2.3.2.1 Grundlagen

Laserscanning kann hier jedoch vor allem in besiedelten und bewaldeten Gebieten wesentlich bessere Ergebnisse liefern, da jeder Objektpunkt nur von einer Richtung aus einsehbar sein muss. Heutzutage werden oft gleichzeitig während eines Fluges Laserscanner- und Photogrammetrieaufnahmen hergestellt. Laserscanning kann im Vergleich zur Photogrammetrie eine wesentlich bessere Höhengenaugigkeit aufweisen, jedoch entspricht die Auflösung bei weitem nicht den Maßstäben der Photogrammetrie. Um weder bei Lagegenauigkeit noch bei Höhengenaugigkeit Abstriche machen zu müssen, empfiehlt es sich, beide Methoden zu kombinieren. Ein weiterer Vorteil des Laserscanning ist die Unabhängigkeit vom Sonnenlicht. Da ein aktiver Sensor verwendet wird, wirken sich schlechte Lichtverhältnisse nicht auf das Ergebnis des Laserscanning aus.
vgl. [KRAUS 2004b], S. 449ff

Bei den Auswertungen des Laserscanning unterscheidet man nach dem Inhalt, den die Modelle einschließen:

- DTM (Digital Terrain Model, auch DGM = digitales Geländemodell): Ein DTM beschreibt nur die Erdoberfläche. Gebäude, Brücken, Vegetation und andere Objekte müssen aus den Laserscanneraufnahmen herausgefiltert werden, dies erfordert einen nicht unerheblichen Mehraufwand bei der Auswertung.
- DSM (Digital Surface Model, auch DOM = digitales Oberflächenmodell): Eine Laserscanneraufnahme per Flugzeug speichert alle Punkte des Geländes mit Gebäuden, Vegetation und anderen Bauwerken. Da jedoch nur die Punkte ohne Information gespeichert werden, ist bei dem letztendlich gespeicherten Modell nicht klar, ob die Punkte die Erdoberfläche oder ein Objekt darstellen.
- DEM (Digital Elevation Model): Das DEM wird hier nur der Vollständigkeit wegen erwähnt, es hat kaum Bedeutung in Verbindung mit der Technik des Laserscanning. Es handelt sich hier um ein so genanntes Grid-Based-Model, es enthält die Erhöhung von Punkten im Vergleich zu einer Referenzfläche, egal, um was für ein Objekt es sich handelt.

vgl. [ROTTENSTEINER 2001], S. 22

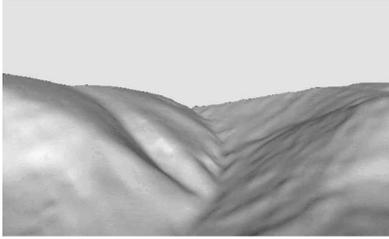


Abb. 2.32: DTM,
[KRAUS 2004a], S. 3

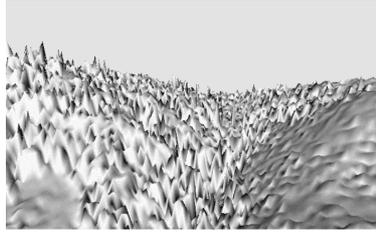


Abb. 2.33: DSM,
[KRAUS 2004a], S. 3



Abb. 2.34: DEM,
[USGS 2005]

Diese digitalen Höhenmodelle können unterschiedlich weiter verarbeitet bzw. genutzt werden. In ländlichen Gebieten werden sie vor allem für Wettersimulationen und Infrastrukturplanungen (Straßen, Brücken, Kreisverkehre) genutzt. In städtischen Gebieten werden die Modelle zur Planung von Gebäuden, für virtuelle Stadtrundgänge und ebenfalls Infrastrukturplanungen (Straßen, öffentliche Verkehrsmittel) genutzt.

2.3.2.2 Kalibrierung

Beim flugzeuggetragenen Laserscanning wird die Position dynamisch mittels GPS und IMU ermittelt. Vor der Flugmission muss die gegenseitige Versetzung der Sensoren gemessen und gespeichert werden. Für genaue Ergebnisse müssen GPS, IMU und Scanner im Mikrosekundenbereich synchronisiert werden.

Für die Ableitung von Geländekanten aus der Laserscannerpunktswolke ist Voraussetzung, dass es entlang von Profilen in ebenen Flächenelementen mindestens zwei Laserscannerpunkte geben muss. Vor dem Flug kann man die für die gewünschte Genauigkeit erforderliche Punktdichte berechnen. Eine hohe Punktzahl garantiert eine hohe *geomorphologische* Qualität, mit der Punktzahl steigt die Qualität des digitalen Modells, jedoch auch der Speicherplatzbedarf.

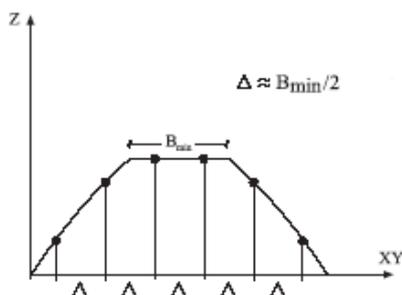


Abb. 2.35: Minimale Punktzahl zur Erfassung eines Dammes, [KRAUS 2004a], S. 4

Man definiert die gewünschte Genauigkeit, indem man die Breite des kleinsten Dammes definiert, der im Modell enthalten sein soll. Somit kann man mit dieser Formel im Voraus die Punktzahl bestimmen, die benötigt wird, um die Qualität des Modells zu garantieren.

vgl. [KRAUS 2004a], S. 4

Für die projektbezogene *Kalibrierung* der Laserscanner müssen Höhen einiger möglichst horizontaler Testflächen im Landeskoordinatensystem (in Österreich laut Vermessungsgesetz das *Gauß-Krüger-System* mit drei Meridianstreifen, vgl. [MGAT 2005], 20. 3. 2005) zur Verfügung stehen. Damit können die Orientierungsfunktionen kalibriert werden, für eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung sollte man einen Scanner mit einem integrierten Sensor zur automatischen Orientierung verwenden. Moderne High-End-Scanner beinhalten einen elektronischen Kompass für die Orientierung nach Norden. Diese Vororientierung erleichtert die spätere Registrierung und Auswertung.

vgl. [LUHMANN 2002], S. 15ff

Bei der *Kalibrierung* werden Pass- und Verknüpfungspunkte ähnlich denen, die bei Photogrammetrie-Aufnahmen mit Zeilenkameras verwendet werden, mit einbezogen. Als Höheneinpassselemente eignen sich, wie bereits erwähnt, möglichst horizontale Ebenen. Je geringer die Neigung der Passebene ist, desto genauer können die Koordinaten in die Sensororientierung einfließen. Wegen der relativ geringen Lagegenauigkeit der Laserscannerdaten (Punktabstände zwischen 0,5 und 3 m) müssen für die Lageeinpassung flächenhafte Passelemente zur Anwendung kommen. Für die Lageeinpassung sind stark geneigte Dachflächen mit unterschiedlicher Exposition am besten geeignet, da somit auch die Höhenunterschiede in die *Kalibrierung* eingehen können. Aus der Punktwolke werden die zu den Passebenen korrespondierenden planaren Regionen herausgefiltert.

Auch für die Verknüpfung der überlappenden Laserscannerstreifen können die Passebenen heran gezogen werden. Eine so genannte Verknüpfungsebene hat einen einzigen Satz von unbekanntem Parametern. Von jedem beteiligten Laserscannerstreifen werden die orthogonalen Abstände der XYZ-Koordinaten zur jeweiligen Verknüpfungsebene in der Quadratsumme minimiert.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 456f

2.3.2.3 Aufnahme

Vom aktiven Sensor des Scanners wird ein Laserstrahl ausgesandt, dessen Echo vom Objekt zurück geworfen wird. Die gemessenen Punkte unterscheiden sich je nachdem, ob das erste oder das letzte Echo der zurück geworfenen Strahlen aufgezeichnet wird. Die meisten aktuellen Laserscanner sind imstande, beide Entfernungen, geringfügig versetzt, aufzuzeichnen. Die besten Modelle können auch weitere Echos in gewissen Abständen aufzeichnen.

Durch die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der Objekte wird der Laserstrahl in typischer Weise verändert. Somit kann man aus der Ablenkung des Laserstrahls auch Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des aufgezeichneten Objekts ziehen. Mit einem Laserscanner, der auch diese Informationen aufzeichnet (siehe Beispiel unten), ist das Ergebnis keine vollständig ungewichtete Punktwolke mehr, jedoch ist auch hier eine manuelle Weiterverarbeitung dieser Daten notwendig.

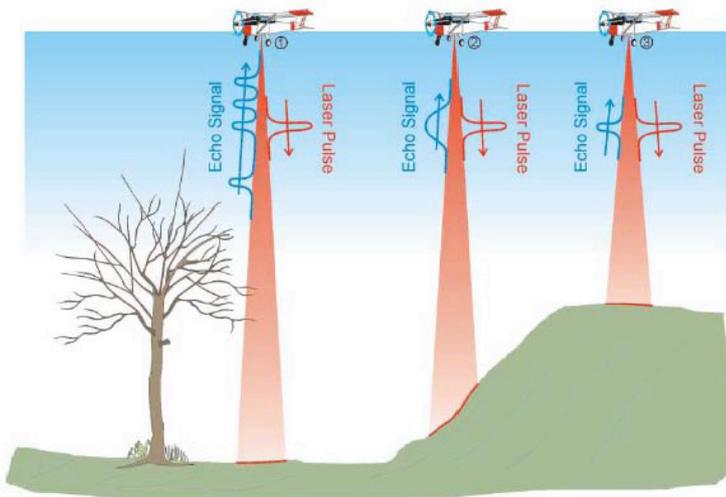


Abb. 2.36: Veränderungen des Laserstrahls je nach Geländeoberfläche, [RIEGL 2005], S. 2

Durch gerichtete Reflexion (Spiegelung) und dadurch Umleitung des Strahls können grobe Entfernungsfehler entstehen, wenn durch weitere Reflexion der Strahlen falsche Echos vom Laserscanner aufgezeichnet werden. Da es sich hier um sehr grobe Fehler handelt, können sie von den meisten Verarbeitungsprogrammen herausgefiltert werden. Durch Absorption können zum Beispiel an Wasserflächen Strahlen so schwach reflektiert werden, dass nicht genügend Strahlungsenergie für eine Entfernungsmessung zurück gestreut wird. Über Wasserflächen haben Laserscanneraufnahmen manchmal weniger

Laserpunkte in der Mitte als an den Streifenrändern, da die Absorption auch vom Einfallswinkel des Laserstrahles abhängt.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 450f

Das Reflexionsgesetz besagt, dass ein Lichtstrahl in der Ebene zurückgeworfen wird, die durch den einfallenden Strahl und die Lotrechte auf dem Punkt der reflektierenden Oberfläche, auf dem dieser Strahl auftrifft, aufgespannt wird. Es gilt, der Ausfallswinkel ist gleich dem Einfallswinkel des Strahls.

(siehe Abb. 2.37, vgl. [WIKIPEDIA 2005], 15. 2. 2005)

Beim Übergang von einem durchsichtigen Medium in ein anderes wird ein Teil des Lichtstrahls abgelenkt, ein weiterer Teil wird reflektiert. Dieses Phänomen wird durch das Brechungsgesetz nach Snellius beschrieben. Es trifft beim Übergang des Laserstrahls von der Luft ins Wasser zu, wie es beim Laserscanning bei Wasseroberflächen vorkommt. vgl. [SEILNACHT 2005], 15. 2. 2005

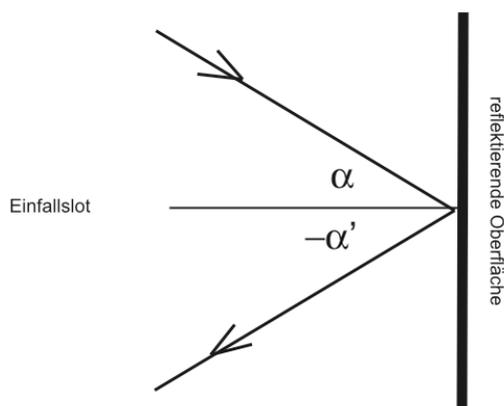


Abb. 2.37: Reflexionsgesetz, [WIKIPEDIA 2005]

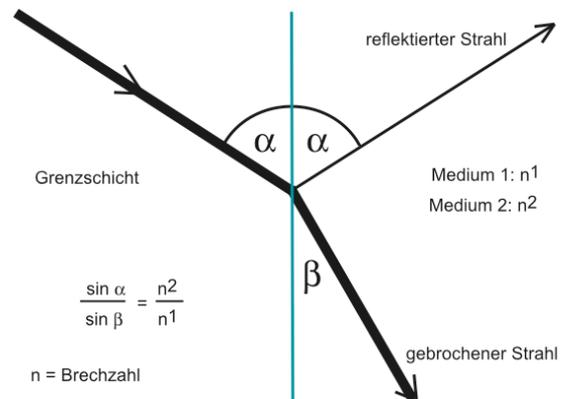


Abb. 2.38: Brechungsgesetz, [WIKIPEDIA 2005]

Als Beispiel für einen aktuellen Laserscanner sei an dieser Stelle der Riegl Airborne Laser Scanner LMS-Q560 genannt. Der Riegl LMS-Q560 ist einer der besten aktuellsten Flugzeuglaserscanner, unter anderem ist er imstande, nicht nur die Entfernung des Echos aufzuzeichnen, sondern auch Daten über die Beschaffenheit der Oberfläche. Während des Aufnahmevorgangs wird nur das Echo aufgezeichnet, die zusätzlichen Daten werden später durch eine Analyse der Wellenform des Echos gewonnen.

vgl. [RIEGL 2005], 5. 6. 2005

Reichweite, Performance	
Mess-Reichweite ⁽¹⁾	
Natürliche Ziele, 20 %	850 m
Natürliche Ziele, 80 %	1.500 m
Minimale Reichweite	30 m
Messgenauigkeit ⁽²⁾	typ. ± 20 mm
Laser Impuls Wiederholungsrate (PPR = Pulse Repetition Rate) ⁽³⁾	bis zu 100.000 Hz
effektive Messrate	bis zu 50 kHz bei 45 Grad Scan-Winkel bis zu 66 kHz bei 60 Grad Scan-Winkel
Laser Wellenlänge	Nähe Infrarot
Anzahl Ziele pro Impuls	unlimitiert für digitale Wellenform ⁽⁵⁾ , erster oder letzter Impuls im Online Modus
Scanner Performance	
Scanner Mechanismus	rotierender Polygon Spiegel
Scan Muster	parallele Scanlinien
Scan Winkel Reichweite ⁽⁶⁾	$\pm 22,5$ Grad = 45 Grad total
Scan Geschwindigkeit ⁽³⁾	5 – 160 Scans/sec
minimale Winkelschrittweite	0,02 Grad
Angle Readout Resolution	0,0025 Grad
Intensitätsmessung/Messungsintensität	
Für jedes Echosignal steht hoch auflösende 16-bit Intensitätsinformation zur Verfügung, diese kann für Zielidentifikation bzw. –klassifikation verwendet werden.	

(1) Folgende Bedingungen angenommen: Ziel größer als der Abtastfleck des Laserstrahls, Sichtweite 10 km, durchschnittliche Umgebungsbeleuchtung, Laser PPR < 40.000 Hz

(2) Standard Abweichung, plus entfernungsabhängigem Fehler ≤ 20 ppm

(3) Vom Benutzer wählbar

(4) 0,5 mrad entspricht einem 50 cm Strahlweite pro 1000 m Entfernung

(5) Praktisch nur limitiert durch die maximale Datenrate, die der RIEGL Data Recorder erlaubt

(6) Bis zu 60 Grad bei 90 % der maximalen Messreichweite



Abb. 2.39: Riegl Airborne Laser Scanner LMS-Q560, [RIEGL 2005], S. 1

Die Höhengenaugigkeit des Ergebnisses hängt vor allem von der Genauigkeit der Laser-Entfernungsmesseinrichtung und der Genauigkeit der GPS-Höhenpositionierung ab. Vollkommen unabhängig von der Flughöhe kann die Höhengenaugigkeit niemals sein, dies ist auf den längeren Weg durch die Atmosphäre und die Vergrößerung des Abtastflecks mit der Flughöhe zurück zu führen. Je größer der Abtastfleck, umso mehr laufen die registrierte Richtung der Polarkoordinaten und der Objektpunkt, auf den sich die Entfernung bezieht, auseinander.

Die Lagegenauigkeit ist vor allem abhängig von der Genauigkeit von GPS-Lagepositionierung, IMU-Orientierung und der Registrierung des Ablenkwinkels des La-

serstrahls. Da die GPS und IMU-Genauigkeit mit Erhöhung der Flughöhe stark abnimmt, ist auch die Lagegenauigkeit in hohem Maß von der Flughöhe abhängig.
vgl. [KRAUS 2004b], S. 454



Abb. 2.40: Profilsicht aller Laserpunkte im Bereich einer Lichtung, [TOPSCAN 2005]

2.3.3 Terrestrisches Laserscanning

Laserscanning gewinnt auch im Nahbereich zusehends an Bedeutung. Unter anderem gehören die folgenden Punkte zum wachsenden Portfolio des terrestrischen Laserscanning.

- Bauaufnahme: Dokumentation von Kulturdenkmälern für Denkmalpflege
- Bauwerksüberwachung: Dokumentation von Brücken, Türmen, etc.
- *Facility Management*
- Einsatz zur Volumenermittlung: z. B. Öltanks, Schiffe, etc.
- Einsatz bei der Qualitätssicherung
- Visualisierung, *Virtual Reality*

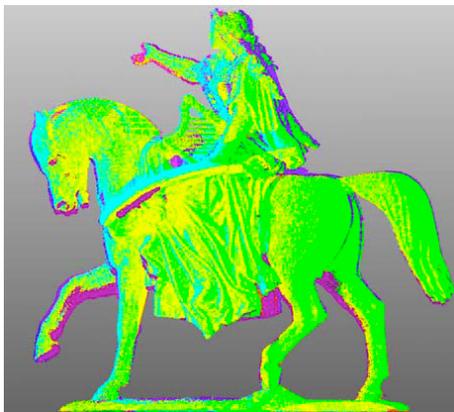


Abb. 2.41: Laserscans nach Registrierung,
[RESSL 2004], S. 7

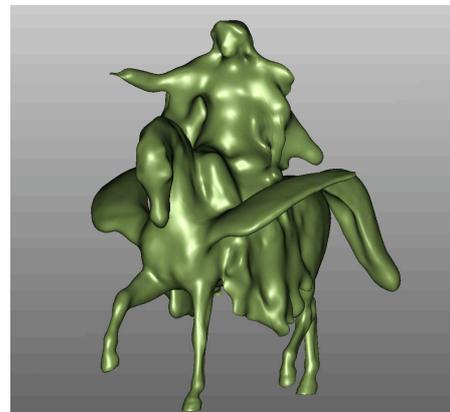
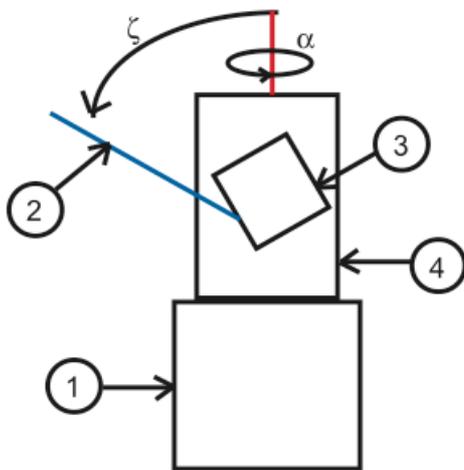


Abb. 2.42: Surface Modell aus Laserscans,
[RESSL 2004], S. 9

Der stationäre terrestrische Laserscanner benötigt Ablenkmechanismen in zwei Richtungen. Das Objekt wird von mehreren sich geringfügig überlappenden Standpunkten aus abgetastet. Von der Elektronikeinheit ausgehend trifft der Laserstrahl auf ein würfelförmiges optisches Element, das mit verhältnismäßig hoher Geschwindigkeit rotiert. Dadurch wird der Strahl aufgefächert, er überstreicht einen Winkel α . Nach der Erfassung dieses Profils dreht sich der obere Teil um einen Winkel ζ für die Abtastung des benachbarten Profils mit demselben Winkel bis der Vollkreis überstrichen ist.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 471ff



- 1) Elektronikeinheit
 - 2) Laserstrahl
 - 3) würfelförmiges optisches Element
 - 4) zylinderförmiger, oberer Teil des Laserscanners
- Abb. 2.43: Funktionsprinzip des terrestrischen Laserscanners, [KRAUS 2004b], S. 472

Der Konica Minolta VI910 liefert schnelle und genaue Aufzeichnung von 3D-Formen. Er ist besonders für Produktdesign und Produktion ausgerichtet, speziell für das Erstellen von CAD-Modellen aus physikalischen Modellen. Der VI910 wird weiters für Inspektion und CAT (Computer Aided Dimensional Testing) eingesetzt.

vgl. [KONICA 2005], 5. 6. 2005

Messmethode	Triangulation light block method
Scan Range (Depth of field)	0,6 bis 2,5 m
Optimale 3D Messreichweite	0,6 bis 1,2 m
Laser Klasse	Klasse 2 (IEC 60825-1), Klasse 1 (FDA)
Laser Scan Methode	Galvanometer-betriebener rotierender Spiegel
X Richtung Input Reichweite ⁽¹⁾	111-463 mm (TELE), 148-618 mm (MIDDLE), 110-750 mm (WIDE/FINE mode)
Y Richtung Input Reichweite ⁽¹⁾	83-347 mm (TELE), 148-618 mm (MIDDLE), 269-897 mm (WIDE)
Z Richtung Input Reichweite ⁽¹⁾	40-500 mm (TELE), 70-800 mm (MIDDLE), 110-750 mm (WIDE/FINE mode)

Genauigkeit	TELE: $X \pm 0,22$ mm, $Y \pm 0,16$ mm, $Z 0,10$ mm bezugnehmend zur Z Bezugsebene ⁽²⁾
Aufnahmezeit	0,3 sec (FAST mode), 2,5 sec (FINE mode), 0,5 sec (COLOR)
Umgebungslicht-Bedingungen	Büroumgebung, 500 Lx oder weniger

(1) entfernungsabhängig

(2) Konditionen: TELE/FINE mode



Abb. 2.44: Konica Minolta VI910 – long range terrestrial laser scanner, [KONICA 2005], S. 1

2.3.4 Auswertung der Laserscanneraufnahmen

Da das Ergebnis beider Varianten des Laserscanning eine ungewichtete Punktwolke darstellt, gibt es bei der Auswertung nur geringfügige Unterschiede. Erst bei der endgültigen Visualisierung des Projekts zeigen sich wieder die deutlichen Unterschiede der verschiedenen Methoden.

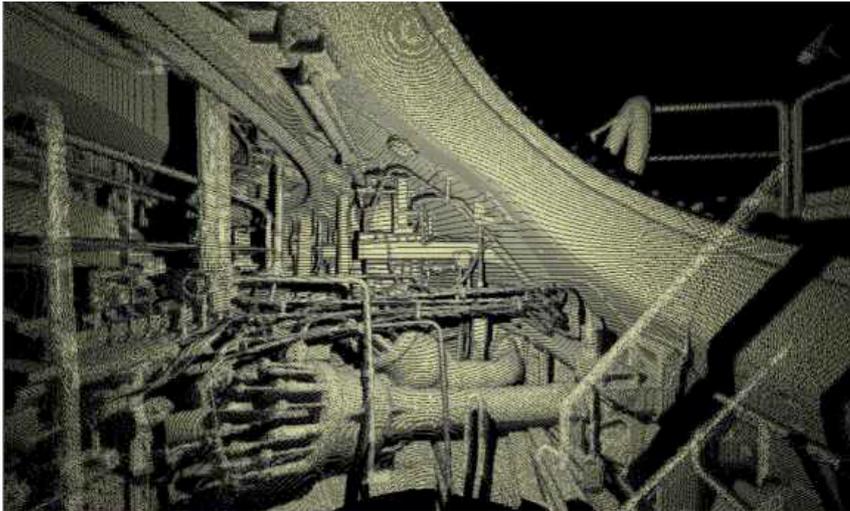


Abb. 2.45: Visualisierung der Punktwolke eines Einzelscans, [HOEFER 2005]

Die Auswertung einer Laserscanner-Punktwolke gliedert sich in mehrere Etappen:

2.3.4.1 Gewichtung der Punktwolke

Im ersten Schritt wird eine ausgleichende Fläche durch die Punktwolke gelegt, dadurch wird die folgende erste *Kleinste-Quadrate-Ausgleichung* vereinfacht. Danach werden die Laserpunkte auf Basis der *Kleinste-Quadrate-Ausgleichung* gewichtet, dieser Vorgang wird als robuste *Parameterschätzung* bezeichnet. Laserpunkte, die aus der *Kleinste-Quadrate-Ausgleichung* positive Verbesserungen erhalten haben, sind wahrscheinlich Bodenpunkte und bekommen ein höheres Gewicht als Punkte mit negativen Verbesserungen. Bei dieser Funktion wird außerdem eine *Nullpunktverschiebung* durchgeführt, da das tatsächliche DGM mit ziemlicher Sicherheit unter der Kurve der ersten Skizze liegt. Durch die *Nullpunktverschiebung* können auch Punkte mit geringen positiven Verbesserungen richtig behandelt werden. Im Allgemeinen sind mehrere Iterationen dieser Vorgangsweise erforderlich.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 458ff

2.3.4.2 Segmentierung

Der Begriff Segmentierung bezeichnet das Entfernen der Punkte, die nicht zum gewünschten Objekt gehören. Die meisten Verarbeitungsprogramme sind in der Lage, automatisch die groben Fehler aus der Punktwolke zu filtern. Bei Projekten, die eine hohe Detailgenauigkeit erfordern, ist manchmal auch eine manuelle Filterung notwendig.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 458ff

2.3.4.3 Registrierung

Bei der Registrierung werden die einzelnen Streifen des Laserscans miteinander verknüpft. Es handelt sich dabei um den Prozess der Zusammenführung in ein gemeinsames Koordinatensystem. Dafür kann wie bei der Photogrammetrie die Technik der Bündelblockausgleichung verwendet werden, die bereits in einem früheren Kapitel beschrieben wurde.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 458

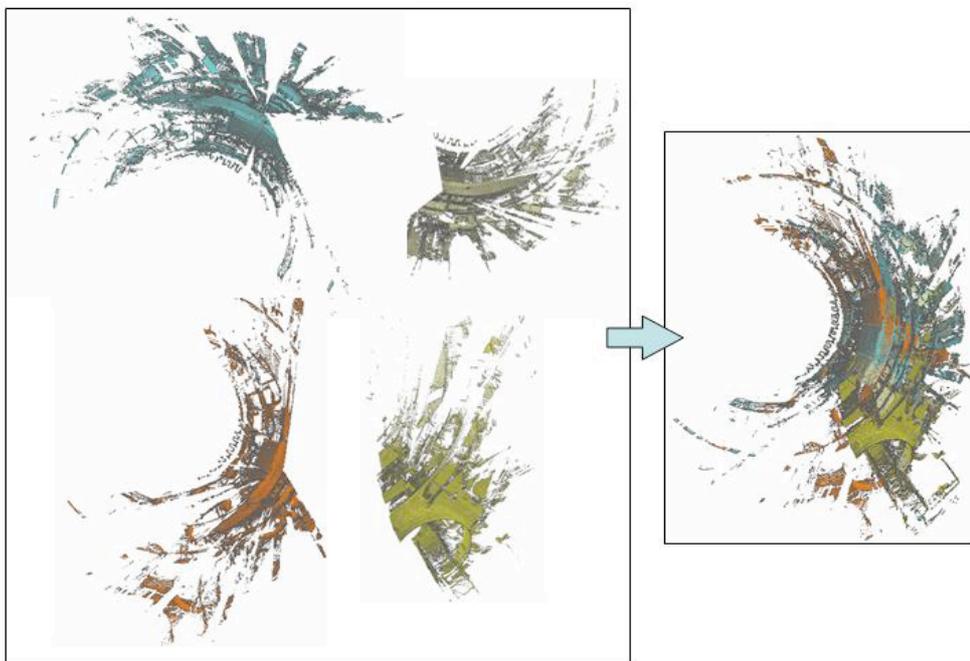


Abb. 2.46: Vereinigung von Einzelscans zu einer Gesamtpunktwolke, [HOEFER 2005]

2.3.4.4 Erstellen eines Vektormodells

Bevor ein Vektormodell (bestehend aus Linien, Kurven und Flächen, die durch Vektoren mathematisch beschrieben werden können, vgl. [WIKIPEDIA 2005], 15. 4. 2005) aus der Laserpunkte generiert werden kann, muss die Punktwolke ausgedünnt werden. Mittels *Triangulation* werden die Daten auf Polygone reduziert, dadurch entsteht ein Basismodell, das in weiterer Folge mit Texturen versehen werden kann.

vgl. [KRAUS 2004b], S. 458ff

2.3.4.5 Visualisierung

Die meisten aktuellen Laserscanner werden mit passender Software ausgeliefert, die auch die Visualisierung übernimmt. Die gewünschte Visualisierungsmethode ist in erster Linie vom Projekt abhängig. Mögliche Visualisierungsmethoden werden in der Case Study im Kapitel 3 erläutert.

2.3.5 Resümee

Laserscanning dient zur geometrischen Rekonstruktion der Objekte im dreidimensionalen Raum aus mindestens einer Aufnahme. Das Ergebnis ist ein Vektorfeld von Richtungen und Entfernungen. Dazu werden aktive Sensoren verwendet, Orientierungsmechanismen wie GPS und IMU sind essentiell. Das Verknüpfen von mehreren Aufnahmen ist nur über Flächenelemente möglich, nicht über Punkte.

Im Vergleich mit der Photogrammetrie bietet Laserscanning den entscheidenden Vorteil, dass jeder Punkt nur von einer Stelle aus einsehbar sein muss. Außerdem garantieren die aktiven Sensoren Unabhängigkeit vom Sonnenlicht. Der Nachteil gegenüber der Photogrammetrie besteht in der wesentlich schlechteren Auflösung und Lagegenauigkeit, ein Laserscan stellt nur ein Entfernungsbild dar. Bei der Photogrammetrie ist eine ausgeprägte Textur auf der Objektoberfläche notwendig, beim Laserscanning können Spiegelung und Reflexion Probleme machen. Die Genauigkeit und *geomorphologische* Qualität der aus Laserscans erstellten Modelle hängt von der Punktdichte ab und ist weitestgehend unabhängig von der Flughöhe.

	Photogrammetrie	Laserscanning
VT	<ul style="list-style-type: none"> - Photos sind einfach zu interpretieren, Photo ist ein anerkanntes Dokumentationsmedium - Erfassung in Echtzeit - Gemessen wird das vom Objekt reflektierte (Umgebungs-)Licht 	<ul style="list-style-type: none"> - 3D-Geometrie im Maßstab 1:1 - Schnelle und automatische Erfassung - Messergebnisse sind unabhängig vom Umgebungslicht, da durch den Laserstrahl das Objekt beleuchtet wird. Die ausgesandte Lichtmenge ist bekannt, dadurch ist eine Bestimmung des Reflexionsgrades möglich - teilautomatische Auswertung denkbar
NT	<ul style="list-style-type: none"> - Mind. zwei Fotos mit korrespondierendem Inhalt - ^{notwendig} Zweiphasiger Prozess: Aufnahme und Geometriebestimmung aus der Informationsbestimmung mehrerer Fotos 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Details über Farbe, Textur, Material (ist aber bei genauerer Aufzeichnung der Echos eingeschränkt möglich) - Schwierige, teilweise unmögliche Interpretation der Punktwolke

Tabelle 2: Photogrammetrie und Laserscanning im Vergleich, vgl. [LUHMANN 2002], S. 110

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass Laserscanning und Photogrammetrie nicht in Konkurrenz zueinander stehen, sondern dass beide Technologien sich hervorragend ergänzen und dass sich aus der Kombination interessante Potentiale ergeben.

3 Case Study – CyberCityModeler

3.1 Grundlagen

Die CyberCity AG (www.cybercity.tv) wurde im April 2000 in Zürich von born & partner AG, Prof. Dr. Armin Grün und Dr. Franz Steidler als Spinn-Off Firma der ETH Zürich gegründet. born & partner AG bietet seit 1994 Beratungs- und Dienstleistungen im Umfeld Geographischer Informationssysteme an und ist mit der born & partner GmbH in Deutschland verbunden. Die CyberCity AG bietet Dienstleistungen zur Generierung, Verwaltung, Bearbeitung und Visualisierung von 3D-Stadt- und Werksmodellen an. Die erste Version des firmeneigenen Programms CyberCityModeler wurde bereits 1999 fertig gestellt und in weiterer Folge kontinuierlich weiterentwickelt.



Abb. 3.1: Stadtmodell Zürich mit Gebäuden, Flüssen, Bäumen und DTM, vgl. [GRUEN 2000], S. 8

Mit dem CyberCityModeler hat die CyberCity AG ein System zur effizienten Entwicklung von 3D-Modellen aus Photogrammetrie- und Laserscannerdaten entwickelt. Dabei wird unter anderem mit einer digitalen Photogrammetriestation und einem analytischen *Plotter* gearbeitet (siehe Abb. 3.2). Nach Digitalisierung der Daten und Bearbeitung durch den

Operateur wird ein V3D-Modell erstellt. Dieses Modell kann in verschiedenen Formaten exportiert werden oder als DTM-Vektormodell mit Textur versehen und visualisiert werden.

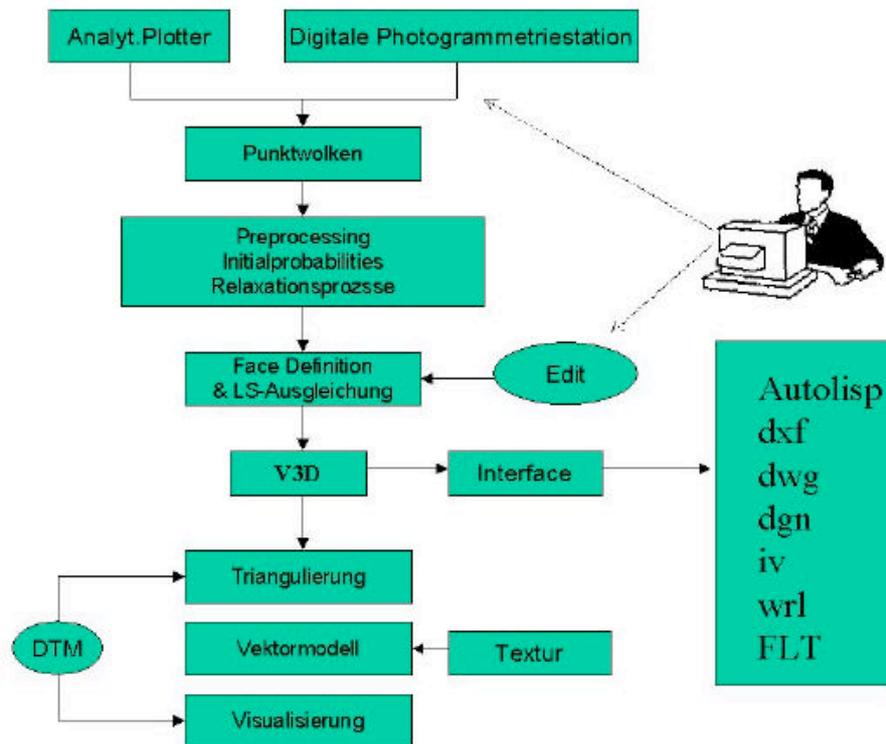


Abb. 3.2: Komponenten des CyberCityModelers, vgl. [GRUEN 2002], S. 3

Der CyberCityModeler ist speziell für die Bedürfnisse der Stadtrekonstruktion zugeschnitten. Zu den Kunden zählen unter anderem die folgenden Städte:



Abb. 3.3: München, [CYBERCITY 2005]



Abb. 3.4: Reutlingen, [CYBERCITY 2005]

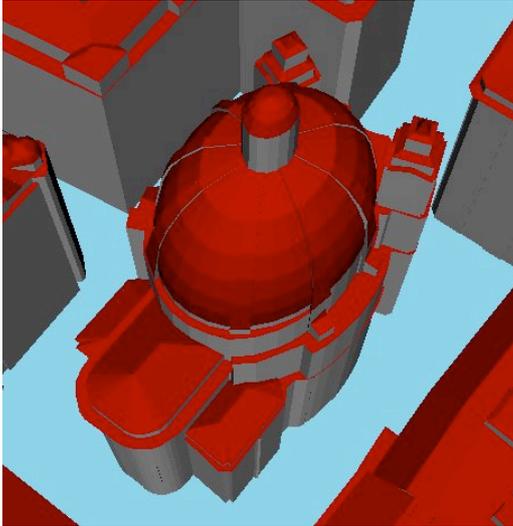


Abb. 3.5: Wien, [CYBERCITY 2005]



Abb. 3.6: Karlsruhe, [CYBERCITY 2005]

Weitere Beispiele sind unter <http://www.cybercity.tv/projects/> zu finden.

Das CyberCity-Software-Paket besteht aus verschiedenen Modulen, das alle notwendigen Funktionen zum Rekonstruieren der 3D-Modelle beinhaltet. Ziel ist, nach Möglichkeit den gesamten Prozess innerhalb eines Programms umzusetzen, um so Konvertierungsfehler oder –verluste von vornherein auszuschließen. Grob strukturiert besteht der Projekt- ablauf nur aus der Erstellung der Aufnahmen, der Bearbeitung mit CC-Modeler und der anschließenden Visualisierung.

Der CyberCity-Software-Paket beinhaltet die folgenden Module, die in Abb. 3.7 nochmals deutlich illustriert sind:

- CC-Modeler: Generierung der Topologie und Extrahierung realistischer Dach- und Geländestrukturen
- CC-Edit: Regulierung und Verbesserung der geometrischen Repräsentation
- CC-Mapping: Fassadentexturierung und geometrische Fassadenintegration
- CC-Digit: Datenübernahme aus Plänen

vgl. [GRUEN 2002], S. 2f

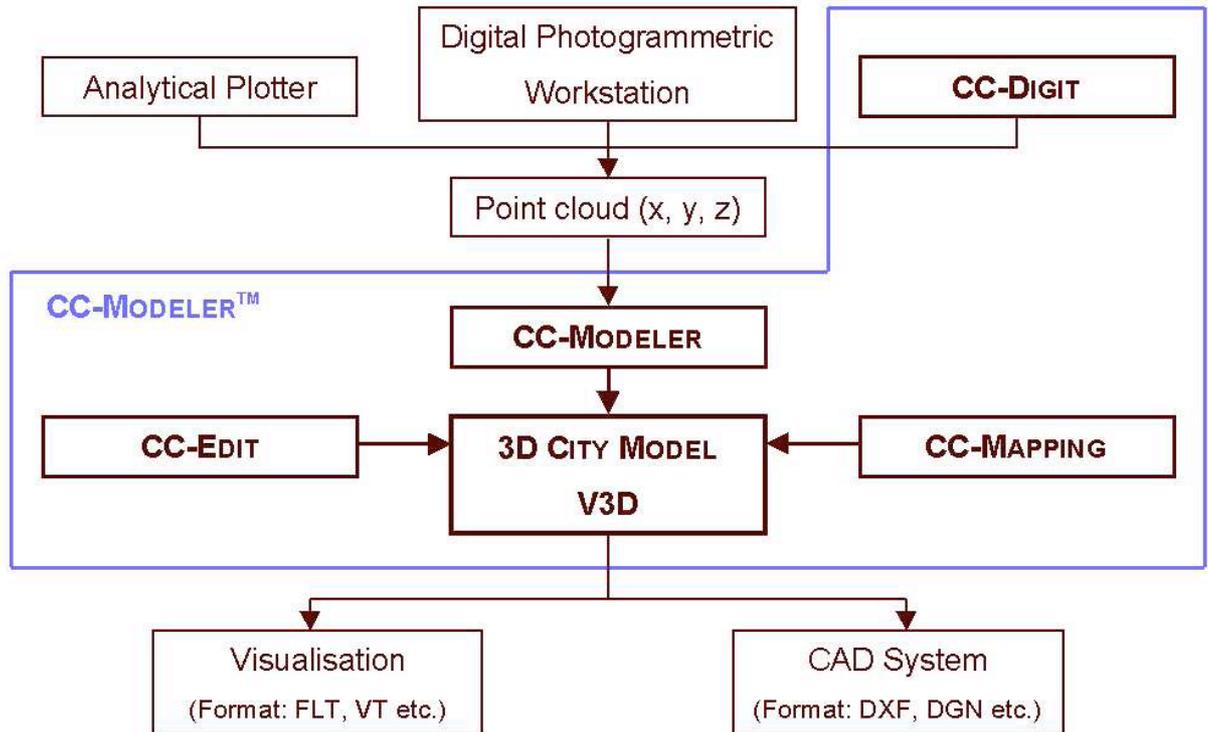


Abb. 3.7: Module des CC-Modelers, vgl. [ULM 2003], S. 2

3.2 Projektablauf

Zur Generierung der 3D-Modelle sind mehrere Arbeitsschritte notwendig:

- 1) Erfassen der Geometrie aus photogrammetrischen Stereomodellen: Die Einzelpunkte des Objekts werden nach ihrer Funktion und Struktur kodiert und unterteilt in Dachbegrenzungspunkte und innere Punkte. Der Detaillierungsgrad wird vom Operator bestimmt, die Punkte werden anschließend in Flächen umgewandelt und im internen V3D-Format gespeichert.
- 2) Kontrollieren und Editieren der erfassten 3D-Geometrie: Es stehen über 20 Möglichkeiten zum nachträglichen Editieren der Daten zur Verfügung wie zum Beispiel: Rechtwinkligkeit, Anhalten von gleichen Höhen der Traufen- und Firstlinien, Verschieben von sich überschneidenden Objekten und von Einzelobjekten, Einrechnen von Punkten in Linien, Kopieren von Gebäuden, Einrechnen von Kreisen, Idealisierung von Standardformen, etc.

- 3) Verschneiden der Trauflinien mit dem digitalen Geländemodell: Dabei bilden die senkrechten Flächen die Wände, das DTM muss jedoch als Raster vorliegen. Diese Option kann vom CC-Modeler automatisch durchgeführt werden.
- 4) Dachüberstände - Verschneiden von Grundrissen mit den Dächern: Wenn die Grundrissdaten zur Verfügung stehen, können daraus die Dachüberstände generiert werden.
- 5) Anbringen der Texturen der Dächer: Zum automatischen Anbringen der Dachtexturen werden die Dachumringungspolygone ins Luftbild projiziert und die darin liegenden Textpixel auf das 3D-Modell transformiert.
- 6) Anbringen der Texturen der Fassaden: Mittels des Moduls CC-Mapping können ebenfalls Fassadenbilder als Texturen angebracht werden.
- 7) Visualisierung mit TerrainView: Das Programm TerrainView der Firma Viewtec ist ein Tool zum Visualisieren von 3D-Modellen. Details dazu finden Sie weiter unten.

vgl. [STEIDLER 2003], S. 1ff

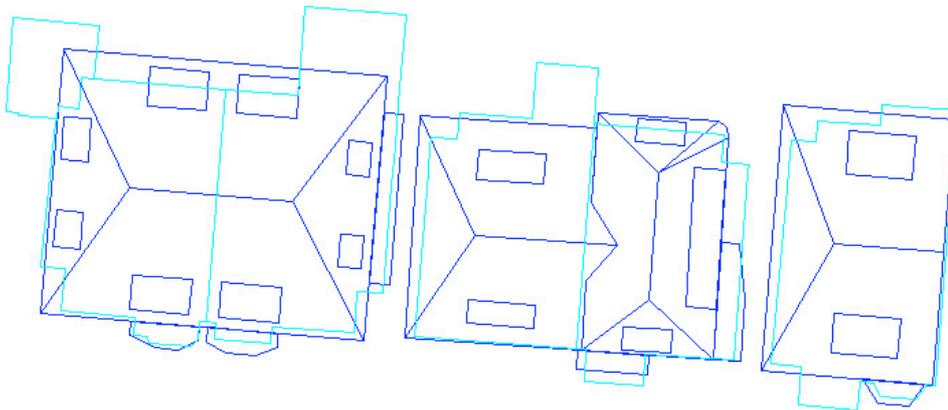


Abb. 3.8: Topologieadjustierung, vgl. [GRUEN 2002], S. 8

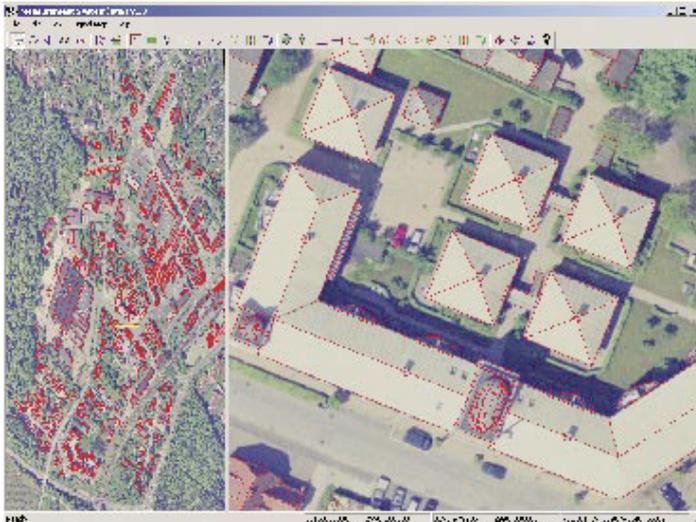


Abb. 3.9: Topologieadjustierung mit CC-Edit, vgl. [ULM 2004], S. 2

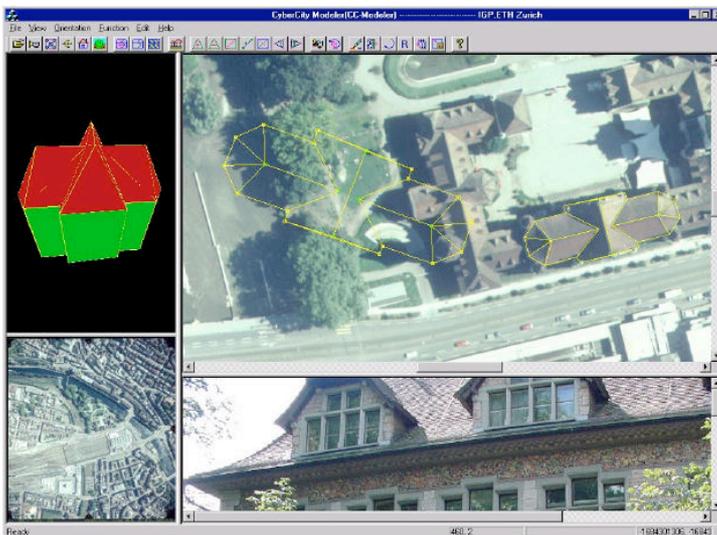


Abb. 3.10: Benutzeroberfläche CC-Modeler (1), vgl. [GRUEN 2000], S. 6

3.3 Visualisierung von 3D-Modellen mittels TerrainView

Für die Visualisierung verwendet die CyberCity GmbH das Programm TerrainView der Firma ViewTec. Die Firma ViewTec (www.viewtec.ch) wurde bereits 1998 gegründet, ebenfalls als Spin-Off der Universität in Zürich. Das Hauptgeschäftsfeld sind *Virtual Reality*, 3D-Grafiken und wissenschaftliche Visualisierung. Zu den entwickelten Programmen gehören interaktive *Virtual-Reality*-Umgebungen, Flugsimulatoren und medizinische Visualisierung.

Bei TerrainView handelt es sich um ein so genanntes VRGIS (Virtual Reality Geographical Information System). Es bietet eine interaktive Benutzerschnittstelle, GIS-Funktionalität durch eine 3D-Datenbank und eine dynamische Verwaltung des Terrains zur Laufzeit durch eine Aufteilung der Geländedatenbasis in Mosaikteile und deren verzögerungsfreies Nachladen zur Laufzeit. Die Modelle sollen möglichst wenig Polygone enthalten, das Bildmaterial sollte nicht zu viel Datenmenge beanspruchen. Dafür bietet TerrainView die individuelle LOD-Regelung (siehe Abb. 3.11). Die LOD (Level of Detail)-Steuerung bestimmt die Detailgenauigkeit der angezeigten Bilder. Je niedriger die LOD-Stufe, umso mehr Details werden angezeigt. Die zugehörigen Texturdaten werden *Wavelet*-komprimiert und zur Laufzeit der Visualisierung in verschiedenen Auflösungsstufen distanzabhängig geladen.

vgl. [STEIDLER 2003], S. 6



Abb. 3.11 (a): LOD3: Nur die Bounding Boxes werden dargestellt.

vgl. [GRUEN 2002], S. 11

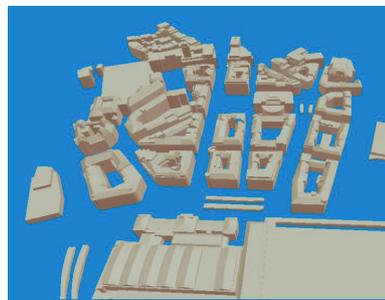


Abb. 3.11 (b): LOD2: Die Dachstrukturen werden zusätzlich geladen.

vgl. [GRUEN 2002], S. 11

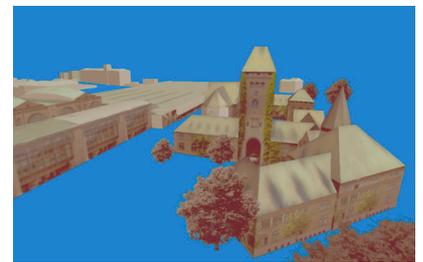


Abb. 3.11 (c): LOD1: Die Texturen werden appliziert und die Bäume werden dargestellt.

vgl. [GRUEN 2002], S. 11

In der nachfolgenden Aufzählung sollen nochmals kurz die Haupteigenschaften von TerrainView zusammengefasst werden:

- Geländeverfolgung in konstanter Höhe
- Integrierte Fluginstrumente
- Automatisches LOD-Switching
- Realistische Wetterdarstellung
- Integrierte 2D-Darstellung für einfache Navigation
- Erweiterbare Benutzerschnittstelle

vgl. [STEIDLER 2003], S. 6

Zur Visualisierung können verschiedene Software-Pakete verwendet werden, VRML-, IV- oder DXF-Formate sind möglich. An erster Stelle ist hier selbstverständlich AutoCAD (www.autodesk.com) zu nennen, weitere mögliche Programme sind die folgenden:

ArcView-3-D Analyst: <http://www.esri.com/software/arcview/extensions/3danalyst/>

Cosmo-Player: <http://www.karmanaut.com/cosmo/player/>

3D Studio VIZ: <http://www.cadinstitute.com/enrollVIZ.htm>

Microstation Pro 600:Intergraph, <http://www.regenord.com/africa/africare.html>

vgl. [GRUEN 2000], S. 7



Abb. 3.12: 3D-Stadtmodell von Los Angeles (USA), vgl. [ULM 2004], S. 1

3.4 Resümee

Für die Erstellung digitaler Stadt- und Geländemodelle hat sich das Cybercity-Softwarepaket als geeignetes Mittel erwiesen. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Software wurden bereits der Großteil der Probleme im System ausgemerzt, der Automatisierungsgrad kann jedoch noch erhöht werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Kombination aller Arbeitsschritte in einem Softwarepaket - Verknüpfen mehrerer Datengrundlagen (Laserscans, Photogrammetrieaufnahmen, Grundrisse) möglich - Unterschiedliche Visualisierungsstrategien möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Administration der Software nur durch ausgebildete Operateure möglich - Nachbearbeitung der digitalisierten Daten ist immer notwendig - für das Darstellen der VRML-Dateien sind eigene Softwarepakete notwendig

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des CyberCityModelers, [Eigene Darstellung]

Die CyberCity AG konnte sich durch die Spezialisierung auf eine bestimmte Marktnische (digitale Stadt- und Geländemodelle) eine erfolgreiche Position in diesem Marktsegment erarbeiten. Auch die Zusammenarbeit mit der Viewtec AG hat wesentlich zum Erfolg des CyberCity-Softwarepakets beigetragen. Durch die intensiven Kontakte mit der Forschungsabteilung der Universität in Zürich konnte die kontinuierliche Weiterentwicklung garantiert werden, dies ist in der heutigen technisch schnelllebigen Zeit ebenfalls ein wichtiges Kriterium für dauerhaften Erfolg.

4 Kurzvorstellung anderer Programmpakete

In diesem Kapitel sollen noch einige weitere Softwarepakete kurz vorgestellt werden, die im Bereich des Image Based Modeling im Moment in Verwendung sind. Es handelt sich dabei um kommerzielle Software, die sich jeweils mit speziellen Teilgebieten des Image Based Modeling befasst.

4.1 Adobe Atmosphere

Auch die großen Softwareproduzenten wie Adobe (www.adobe.com) planten Umsetzungen von *Virtual-Reality*-Modulen. Bereits 2003 wurde eine Tryout-Version des *Virtual-Reality*-Programms Atmosphere veröffentlicht. Dabei handelt es sich um eine Entwicklungsumgebung für virtuelle Umgebungen. Eingeschlossen ist ebenfalls ein Player, der als frei verfügbares Browser-Plugin realisiert wurde, sowie ein ebenfalls frei zugänglicher Community Server, der es den Benutzern der virtuellen Welten erlauben soll, miteinander zu kommunizieren.

vgl. [ATMOSPHERE 2003], S. 1f

Eine mittels Atmosphere erstellte interaktive Umgebung ist unter anderem auf der Homepage des Future-Movies „I, Robot“ zu sehen (<http://www.irobotmovie.com/english/atmosphere/index.html>). Der benötigte Atmosphere Player steht noch unter www.versiontracker.com zum Download bereit, Adobe hat alle Downloads bereits von der Firmenhomepage entfernt.

Leider wurde die Entwicklung des Atmosphere-Pakets mit Ende Dezember 2004 eingestellt. Die kürzlich bekannt gegebene Übernahme der Firma Macromedia (www.macromedia.com) durch Adobe hätte sich möglicherweise positiv auf die Entwicklung auswirken können, eine Kombination mit *Flash* und *SVG* wäre beispielsweise möglich. Der große Bekanntheitsgrad der Marke Adobe und die hohe Verbreitung der gängigen Adobe-Produkte (z. B. Photoshop oder Acrobat) hätte der Atmosphere-Technologie hinsichtlich Promotion und Verbreitung den Weg ebnen können. Da Atmosphere von Anfang an eindeutig als Webtechnologie positioniert wurde, könnte eine Umsetzung ähnlich *Flash* angestrebt werden und damit eventuell auch den Durchbruch der 3D-Umgebungen im Internet einläuten.

vgl. [ATMOSPHERE 2004], 15. 12. 2004

4.2 SCOP++

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien (www.ipf.tuwien.ac.at) wird ebenfalls weiterhin intensiv im Bereich des Image Based Modeling geforscht. Von den an diesem Institut tätigen Forschern wurde unter anderem das Programm SCOP++ entwickelt, dabei handelt es sich um ein Programm zur Interpolation, Management und Visualisierung von digitalen Geländedaten. Erstmals präsentiert wurde es bereits 1972 von Karl Kraus. In Kooperation mit der Universität Stuttgart konnte SCOP kontinuierlich weiterentwickelt werden und somit zu einem funktionellen Programm für das Management großer Datenmengen digitaler Geländemodelle werden.

Bei SCOP++ handelt es sich um ein objektorientiertes, integriertes Programmsystem mit einem funktionellen graphischen User Interface. SCOP++ ist lauffähig auf gängigen Desktop-PCs und ebenfalls als Client-Server-System auf *CORBA*-basierten Systemen erhältlich. Das Programm beinhaltet Module zur Verarbeitung der eingelesenen Daten, Oberflächeninterpolation und Algorithmen zur Berechnung von Konturen, Profilen, perspektivischen Ansichten, Visibility Maps, Volumen und weiteren Datenergebnissen.

Aktuelle Publikationen zu den unterschiedlichsten Bereichen des Image Based Modeling werden kontinuierlich veröffentlicht, auch VRML-Modelle unter anderem vom Gebäude der TU Wien sind auf der Homepage des Instituts zu finden.

vgl. [IPF 2005], 15. 5. 2005



Abb. 4.1: VRML-Modell des TU-Gebäudes, [IPF 2005]

4.3 Realviz

Ein weiteres Programmpaket zur Konstruierung digitaler 3D-Modelle ist der Image Modeler der Firma REALVIZ (www.realviz.com). REALVIZ wurde 1998 gegründet, auf Basis der Forschungen von INRIA (French National Institute for Research in Computer Science and Automation). Zur Produktpalette von REALVIZ gehören unterschiedliche Softwarelösungen im Bereich Bildbearbeitung und –erstellung, das Hauptgeschäftsfeld ist die Entwicklung von Software zur Produktion von 2D- und 3D-Bildern für die Bereiche Filmindustrie, audiovisuelle Produktion, Multimedia, CAD, Architektur und Videospiele.

Zum REALVIZ-Produktportfolio gehören unter anderem die folgenden Programmpakete:

- Stitcher: Erstellen professioneller Panoramas, einfache Benutzerführung, Kompatibilität mit gängigen Bildbearbeitungsprogrammen (z. B. Adobe Photoshop).
- Image Modeler: Extrahieren von 3D-Informationen aus 2D-Bildern, Ausmessen der Szene, Extrahieren von fotorealistischen Texturen, Exportfähigkeit in unterschiedliche Formate.
- Match Mover Pro: Extrahieren von Kamerapfaden und Bewegungen aus Videos, einfache automatische Extrahierung mit der Möglichkeit zur interaktiven Korrektur durch den Benutzer. Wurde von Discreet (www.discreet.com) in deren Programmpaket Inferno integriert.
- StoryViz: interaktive Szenenplanung für Grafiker im Filmbereich, Echtzeitplanung von Filmszenen mit Animationsmöglichkeiten für alle wichtigen Szenenelemente wie den Bildausschnitt der Kamera und die Kamerabewegung.
- ReTimer Pro: Errechnen von extremen Slow-Motion-Videos in professioneller Qualität, erhältlich als alleinstehendes Programm oder als Plug-In für gängige Videobearbeitungssoftware wie z. B. Adobe After Effects oder Final Cut Pro.

Die Rekonstruktion von 3D-Szenen mittels Image Modeler ist zeitintensiv, da der Benutzer die Szene selbst durch das Identifizieren korrespondierender Punkte in verschiedenen Bildern ausmessen muss. Daher ist eine hohe Genauigkeit des Benutzers Voraussetzung für die Genauigkeit des entstehenden Modells. Auch die Qualität des Grundmaterials und die Aufnahmestandorte beeinflussen entscheidend die Arbeit mit

dem Image Modeler, deshalb ist hier entscheidend auf eine genaue Vorplanung des Projekts zu achten.

vgl. [REALVIZ 2005], 15. 5. 2005

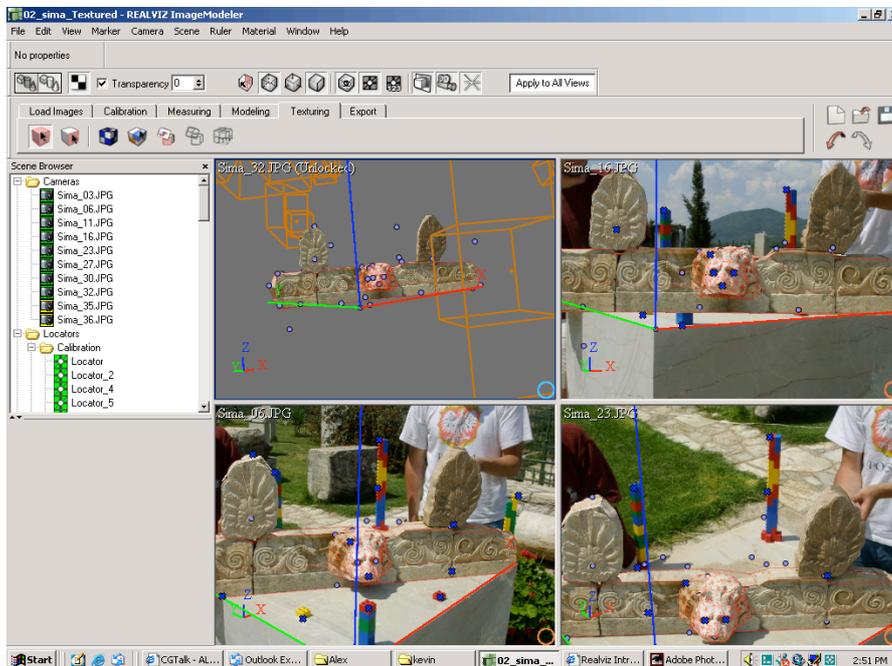


Abb. 4.2: Image Modeler Screenshot, [REALVIZ 2005], 15. 5. 2005

4.4 Resümee

Vor allem im Bereich der Automation sind auch bei den hier vorgestellten Softwarepaketen noch weitere Verbesserungen zu erwarten. Da die Hardwarekosten in der gesamten Computerindustrie beinahe täglich sinken, sind auch im Image Based Modeling die Personalkosten bei der Erstellung digitaler 3D-Modelle als wichtigster Kostenfaktor anzusetzen, der nur durch höheren Automatisierungsgrad vermindert werden kann. Deshalb wird besonders in diesem Feld wird weiterhin intensiv geforscht

5 Resümee

Die Bedeutung von digitalen 3D-Modellen ist in den vergangenen Jahren ständig angestiegen. Viele Großstädte bieten auf ihren Websites bereits digitale Stadtrundgänge an, auch für Museen oder ähnliche Institutionen sind interaktive Rundgänge ein wichtiges Kommunikationsmedium. Mit der fortschreitenden Weiterentwicklung der Kodierungssprachen wie VRML und der Programme zum Interpretieren dieser Daten erhöht sich die Akzeptanz und die Verbreitung unter den Internetbenutzern.

Vor allem im Internetbereich ist mit einer weiteren Steigerung der Nutzung von digitalen 3D-Modellen zu rechnen. Heute sind die vergleichsweise hohen Kosten oft ein Hindernis, durch einen höheren Automatisierungsgrad der Techniken können vor allem die hohen Personalkosten verringert werden.

vgl. [ROTTENSTEINER 2001], S. 8

Die Photogrammetrie ist die älteste der hier besprochenen Techniken und dementsprechend sind die Methoden und Algorithmen, die in diesem Bereich angewandt werden, meist hoch entwickelt und effizient. Ein wichtiger Vorteil der Photogrammetrie liegt in der Tatsache, dass Fotos als anerkanntes Dokumentationsmedium einen hohen Bekanntheits- und Verarbeitungsgrad inne haben und einfach zu interpretieren sind.

Der größte Nachteil der Stereofotos ergibt sich aus der Methode selbst: Es sind immer mindestens zwei Fotos mit korrespondierendem Inhalt notwendig, um Geometrie aus den Fotos zu rekonstruieren. Weiters sind die Aufnahmen immer abhängig von den herrschenden Lichtverhältnissen, da das vom Objekt reflektierte (Umgebungs-)Licht gemessen wird. Es handelt sich bei der Geometrierekonstruktion außerdem um einen zweiphasigen Prozess aus Aufnahme und Informationsbestimmung. Dabei können Konvertierungs- bzw. Digitalisierungsfehler auftreten.

vgl. [LUHMANN 2002], S. 110

Volumes from Silhouettes ist eine ebenfalls weit entwickelte Technik, auch Image-Based-Modeling-Pionier Paul Debevec startete seine Karriere in diesem Bereich 1991 mit dem in Kapitel 2.2.2 erwähnten Chevette-Projekt. Die Silhouette eines Objekts ergibt sich aus allen Punkten eines Objekts, die in einem Bild sichtbar sind. (vgl. [LAURENTINI 1995], S.1) Der besondere Vorteil gegenüber Photogrammetrie und auch Laserscanning liegt darin, dass es nicht notwendig ist, gemeinsame Punkte in den Bildern zu finden. Das Errechnen der Silhouetten aus allen aufgezeichneten Bildern ist als Pixeldifferenzoperation

eine eher einfache Aufgabe, das Problem bei dieser Technik besteht darin, dass sie nur im Nahbereich sinnvoll eingesetzt werden kann. Höheren Genauigkeitsansprüchen können die Modelle oft nicht genügen, dafür ist die Umsetzung mit relativ geringen Mitteln möglich.

Laserscanning ist aufgrund seiner Sensoreigenschaften nicht zu den klassischen Image-Based-Modeling-Techniken zu zählen, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit als wichtige Ergänzungsmethode zur Photogrammetrie ebenfalls in einem eigenen Kapitel besprochen. Vor allem bei Geländeaufnahmen aus dem Flugzeug konnte sich Laserscanning bewähren. Die Aufnahmen können gemeinsam mit den Photogrammetrieaufnahmen durchgeführt werden, es entsteht während des Aufnahmevorgangs kein zusätzlicher Aufwand.

Laserscanning liefert Geometrie im Maßstab 1:1, die Erfassung der Daten erfolgt schnell, automatisch und unabhängig vom Umgebungslicht. Eine Teilautomatisierung der Auswertung ist bei den Laserscanneraufnahmen eher denkbar, da die Strukturen von Algorithmen leichter bearbeitet werden können. Teilweise ist die Auswertung der Punktwolke jedoch mit groben Schwierigkeiten verbunden und kann im Extremfall auch komplett unmöglich sein. Weiters liefert diese Technologie keine Informationen über Farbe und Textur. Mit professionellen Laserscannern können zwar mehrere Echos des Strahls gemessen werden, dies gibt aber nur eingeschränkten Aufschluss über die Beschaffenheit der aufgezeichneten Oberfläche.

vgl. [LUHMANN 2002], S. 110

Im Zuge dieser Arbeit hat sich vor allem heraus gestellt, dass keine Methode eindeutig als die beste Lösung für alle Projekte benannt werden kann. Im Bereich der digitalen Geländemodelle (*Kartographie*) hat sich in den vergangenen Jahren eine Kombination von Photogrammetrie und Laserscanning als erfolgversprechendste Methode erwiesen. Bei Stadtmodellen kann die Integration von Grundrissdaten das Ergebnis entscheidend verbessern.

Bei Projekten in kleinerem Rahmen wie z. B. Denkmalrekonstruktionen weist Laserscanning deutliche Vorteile gegenüber der klassischen Photogrammetrie auf. Vor allem die Unabhängigkeit vom Sonnenlicht und die Flexibilität durch die unabhängige Platzierung des Laserscanners sind hier zu nennen.

Besonders wichtig bei allen Projekten, egal mit welcher Methode gearbeitet wird, bleibt weiterhin die exakte Planung des Projekts bereits vorab. Vor allem eine genaue *Kalibrie-*

zung der Aufnahmegerate und intensive Planung der Aufnahmestandorte bestimmen entscheidend die Qualität des schlussendlichen Ergebnisses. Hier ist ebenfalls ein großer Personaleinsatz notwendig, dieser wird wohl auch in den kommenden Jahrzehnten intensiver Forschung nicht verringert werden können.

Weiters ist festzustellen, dass die Genauigkeit bei Planung und Durchführung der Aufnahmen sich direkt auf die Genauigkeit des Ergebnisses auswirkt. So kann aus ungenauen Fotos oder Laserscans nie ein gutes 3D-Modell entstehen. Dementsprechend ist vor allem bei der Durchführung der Aufnahmen auf höchste Qualität zu achten. Was hier nicht genau gehandhabt wird, kann in späterer Folge beim Auswerten nicht mehr korrigiert werden.

Abschließend ist zu sagen, dass sich wohl auch in Zukunft mehrere Methoden des Image Based Modeling in Forschung und Anwendung befinden werden. Da die Kombination mehrerer Quellen und Methoden in der Vergangenheit stets bessere Resultate ergeben hat als eine einzige Methode, ist eher mit der Erforschung neuer Techniken und Algorithmen zu rechnen als mit dem Aussterben bestimmter Randgruppen. Dies garantiert eine weitere kontinuierliche spannende Entwicklung im Bereich des Image Based Modeling.

Anhang A: Glossar

A

Affintransformation

Mathematisches Verfahren zur Transformation von Koordinatensystemen.

ANSI

Abkürzung für American National Standards Institute. Unabhängiger Verband aus amerikanischen Unternehmensgruppen, gegründet zur Entwicklung von Handels- und Kommunikationsstandards. vgl. [COMPUTER-LEXIKON 2002]

B

Brennweite

In der Optik der Abstand eines Brennpunkts (auch Fokus genannt) von dem ihm zugeordneten Hauptpunkt auf der Linse oder dem Hohlspiegel, wird in der Einheit 1/Meter bzw. Dioptrie (dpt) gemessen.

C

CAT

Computer Aided Dimensional Testing, mit diesem Verfahren werden Produktmodelle getestet, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden.

CORBA

Common Object Request Broker Architecture, eine objektorientierte Middleware, die plattformübergreifende Protokolle und Dienste definiert und von der Object Management Group (OMG) entwickelt wird. CORBA ermöglicht das Erstellen verteilter Anwendungen in heterogenen Umgebungen. Bekannte CORBA-Implementierungen: Orbix, Mico, ORBit, VisiBroker, OmniORB, TAO, MiddCor, OpenORB.

D

Daguerrotypie

Fotografisches Positiv-Verfahren des 19. Jahrhunderts, das nach dem französischen Maler Louis Jacques Mandé Daguerre benannt wurde.

Depth Map

Schwarz-Weiß-Bild, das die Tiefeninformation eines Bildes in Grautönen darstellt.

E

Epipolar

epi (Vorsilbe), darauf, daneben, bei, darüber.

polar (griech.), am Pol befindlich, die Pole betreffend, entgegengesetzt wirkend.

F

Facility Management

Überbegriff für alle Aspekte der arbeits- und sozio-ökonomischen Planung, der alle Personal- und Sachressourcen sowie die internen Abläufe innerhalb eines Unternehmens (Workflow) integriert. Wird häufig mit dem Begriff Gebäudemanagement gleich gesetzt.

Flash

Macromedia Flash, eine proprietäre integrierte Entwicklungsumgebung zur Erzeugung von „Flash-Filmen“ im SWF-Format, einem auf Vektorgrafiken basierenden Grafik- und Animationsformat der amerikanischen Firma Macromedia.

G

Gauß-Krüger-System

Koordinatensystem, das es ermöglicht, jeden Punkt der Erde mit einer Gauß-Krüger-Koordinate (Rechts- und Hochwert) eindeutig zu verorten.

Geomorphologie

Griech. ge = Erde, morphé = Gestalt, Form, lógos = Wort, Lehre, Vernunft. Teilgebiet der Physischen Geographie, untersucht die Formen und formbildenden Prozesse der Oberfläche der Erde, aber auch des Mondes, des Mars und anderer Planeten.

Gruber-Punkte

Schemapunkte bei der relativen Orientierung genäherter Senkrechtaufnahmen in ebenem Gelände, entwickelt von Otto von Gruber, deutscher Geodät und Photogrammeter, * 9. 8. 1884 Salzburg, † 3. 5. 1942 Jena.

J

JAVA

Objektorientierte, plattformunabhängige Programmiersprache und als solche ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Sun Microsystems.

K

Kalibrierung

Messprozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes oder einer Maßverkörperung vom richtigen Wert, dargestellt durch ein Referenznormal.

Kamerakonstante

Früher: Kammerkonstante, der Abstand vom Bildhauptpunkt, senkrecht zur Bildebene, zum Aufnahmestrahл eines Bildpunktes.

Kartographie

Auch Kartografie, Wissenschaft, Kunst und Technik der Erstellung von Karten, Atlanten und Globen, die zur Darstellung der Erdoberfläche mit all ihren topografischen, siedlungsgeografischen, territorialen, infrastrukturellen, sozialen, wirtschaftlichen, politischen, administrativen, historischen, tektonischen, geomorphologischen, orthographischen und sonstigen Aspekten dienen.

Kernstrahlgeometrie

Mit Hilfe der so genannten Kernstrahlen kann die zweidimensionale Korrelation zum Auffinden von korrespondierenden Punkten in zwei – zumindest relativ orientierten Bildern auf eine eindimensionale Korrelation zurückgeführt werden. vgl. [KRAUS 2004b], S. 381

Kleinste-Quadrate-Ausgleichung

Auch Methode der kleinsten Quadrate (englisch: Least Squares Method), mathematisches Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung.

Korrelation

Beziehung zwischen zwei oder mehr statistischen Variablen.

Kreuzblick

Technik zum Betrachten von Stereobildern, bewusste Anwendung des Schielens, um aus zwei Teilbildern ein räumliches Bild sichtbar zu machen.

L

Libelle

In der Messtechnik ein mit einer Flüssigkeit und einer Gasblase gefüllter Glas- oder Kunststoffkörper. Die Libelle wird so an einem Werkzeug befestigt, dass die Gasblase sich genau dann innerhalb der Markierungen befindet, wenn die Bezugsfläche genau mit der Waagrechten oder die Bezugsachse mit der Lotrechten übereinstimmt.

M

Matrix

Plural = Matrizen, in der linearen Algebra eine Anordnung von Zahlenwerten (aber auch anderen Objekten wie Operatoren) in Tabellenform. Man spricht von den Spalten und Zeilen der Matrix, und bezeichnet selbige auch als Vektoren (d.h. Zeilenvektoren und Spaltenvektoren). Die Objekte, die in der Matrix angeordnet sind, nennt man Komponenten oder Elemente der Matrix.

Motion Capturing

Engl. für Bewegungserfassung, eine Technik, die es ermöglicht, menschliche Bewegungen in ein von Computern lesbares Format umzuwandeln. [WIKIPEDIA 2005]

Motion Tracking

Animationstechnik, bei der aus zumeist real gefilmtem Bildmaterial die Bewegung eines Objektes oder der Kamera ausgelesen wird. Man erhält für frei markierbare Bildpunkte die Bewegungskordinaten, die man dann für andere Funktionen nutzen kann, liefert automatisch Bewegungsdaten, die sonst mühsam mit der Hand animiert werden müssten.

N

Nullpunktverschiebung

Verschiebung des Koordinatenursprungs (Punkt in einem Koordinatensystem oder einer Karte, an welchem alle Koordinaten den Wert Null annehmen).

O

OOP

Objektorientierte Programmierung (OOP) ist ein Verfahren zur Strukturierung von Computerprogrammen, bei dem zusammengehörige Daten und die darauf arbeitende Programmlogik zu Einheiten zusammengefasst werden, den so genannten Objekten.

Orthophoto

Griech. Orthós = richtig, gerade, aufrecht, ein senkrecht zur Erdoberfläche aufgenommenes, perspektivisch entzerrtes und damit maßstabsgenaueres Luftbild.

P

Parallaxe

Griech. für Vertauschung, scheinbare Änderung der Position eines beobachteten Objektes durch eine Verschiebung der Position des Beobachters. Aufgrund der Parallaxe lassen sich Entfernungen abschätzen (Grundlage des räumlichen Sehens) oder mittels technischer Hilfsmittel berechnen. [WIKIPEDIA 2005]

Parallelblick

Technik zum Betrachten von Stereobildern, bezeichnet das entspannte Hindurchschauen, um das räumliche Bild zu produzieren.

Plotter

Engl. plot = zeichnen, ein Ausgabegerät, das Funktionsgraphen, technische Zeichnungen und andere Vektorgrafiken auf verschiedenen Medien darstellt. [WIKIPEDIA 2005]

Parameterschätzung

Auch Ausgleichsrechnung, Ausgleich(ung) oder Fit, Schätzung von unbekanntem Parametern eines mathematischen Modells.

PRN

Pseudo Random Noise, engl. für Pseudo-Zufallsrauschen, Bezeichnung für Datensignale, welche statistische Eigenschaften von zufälligem Rauschen haben. [WIKIPEDIA 2005]

S

Schärfentiefe

Auch als Abbildungstiefe, manchmal falsch als Tiefenschärfe bezeichnet, Ausdehnung des scharf abgebildeten Bereichs entlang der optischen Achse eines optischen Systems.

Stereoskop

Optische Apparatur, mit der man zwei stereoskopische Halbbilder so betrachten kann, dass eine räumliche Tiefenwirkung wahrnehmbar ist. Mittels Spiegeln oder Linsen werden die zwei ortsverschiedenen Halbbilder so ins Blickfeld gebracht, dass bei binokularer Betrachtung ein virtuelles Raumbild entsteht. [WIKIPEDIA 2005]

SVG

Scalable Vector Graphics (SVG), Sprache zur Beschreibung zweidimensionaler Vektorgrafiken in XML. Eine SVG-Datei besitzt die Dateiendung *.svg.

T

Topologie

Griech.: topos = Ort, Platz und logos = Lehre, Wissen, Wort, die Lehre von allgemeinen räumlichen Beziehungen und Eigenschaften des Raumes.

Triangulation

Lat. Triangulum, Dreieck, ein Verfahren der höheren Mathematik, um aus einer vorgegebenen Punktmenge ein Dreiecksnetz (Simplices) zu erstellen.

V

Vektormodell

Beschreibt ein Bild durch mathematische Funktionen in einem zwei- oder dreidimensionalen Koordinatensystem. Vektoren definieren Linien, Kurven oder Flächen, anders als eine Rastergrafik, die Bildpunkte speichert. Beispiele für Vektorgrafikformate sind Encapsulated Postscript (EPS), Portable Document Format (PDF), Scalable Vector Graphics (SVG).

Verlaufsfiter

Graufilter, dessen Dichte zum Bildrand hin abnimmt, wird verwendet zur Korrektur von Kontrasten.

Vignettierung

Unbeabsichtigte Abschattung eines Fotos zum Bildrand hin, verursacht durch zu weit geöffnete Blende (optische Vignettierung) oder durch Blockade des Strahlengangs durch falsch gewählte Gegenlichtblenden oder zu viele Vorsatzlinsen, deren Fassungen den Strahlengang beschneiden (mechanische Vignettierung).

Virtual Reality

Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten virtuellen Umgebung. [WIKIPEDIA 2005]

W

Wavelet

Form der Datenkompression speziell für Bildkompression (tlw. auch Videokompression), arbeitet mit Transform Coding, Quantisierung, Entropiekodierung oder Lauflängenkodierung.

Anhang B: Literaturverzeichnis

[ADLEXIKON 2005] Adlexikon: URL,

<http://tachymetrie.adlexikon.de/Tachymetrie.shtml>

[ATMOSPHERE 2004] Adobe Atmosphere FAQ, www.adobe.com

[ATLANTICTECH 2005] Atlantictech: URL,

http://www.atlantictech.com/Main%20Images/GIS%20Water%20Utilities_lrg.jpg

[AUTODESK 2005] Autodesk: URL, <http://www.autodesk.com>

[BOMAC 2005] BOMAC Solutions: URL,

<http://www.bomacsolutions.co.uk/Barcode%20CCD%20Scanner.gif>

[CMT 2005] CMT GmbH: URL, <http://www.cmt-gmbh.de/images/IMU400CCK.jpg>

[COMPUTERBASE 2005] Computerbase: URL,

<http://www.computerbase.de/lexikon/VDA-FS>.

[COMPUTER-LEXIKON 2002] Microsoft Press: Computer-Lexikon. ISBN 3-86063-827-0, Microsoft Press, Ausgabe 2002.

[CYBERCITY 2005] Cybercity AG: URL, <http://www.cybercity.tv>

[DEBEVEC 1996] Debevec, Paul; Taylor, Camillo; Malik, Jitendra: Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach. To appear in SIGGRAPH 96 conference proceedings, University of California at Berkeley, 1996.

[DEBEVEC 1999] Debevec, Paul: What is Image-Based Modeling and Rendering?, University of California at Berkeley, 1999.

[DEBEVEC 2005] Debevec, Paul: URL, <http://www.debevec.org>

[DORFFNER 2002] Dorffner, Lionel: Erzeugung von qualitativ hochwertigen 3D Photo-modellen für internetbasierte Anwendungen. Veröffentlicht vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung. ISBN 3-9500791-6-5, Wien, 2002.

[FH BOCHUM 2005] FH Bochum, URL: <http://www.fh-bochum.de/fb5/baeumker/bildrph.jpg>

[GRUEN 2000] Gruen, Armin; Steidler, Franz; Wang, Xinhua: CyberCity Modeler – ein System zur halbautomatischen Generierung von 3-D Stadtmodellen. Vermessungsingenieur 8-00, August 2000.

[GRUEN 2002] Gruen, Armin; Steidler, Franz; Wang, Xinhua: Generation and visualization of 3D-city and facility models using CyberCity Modeler. Chair for Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology, August 15, 2002.

[GÜLCH 2000] Gülch, E. (2000). Digital systems for automated cartographic feature extraction. In Proceedings of the XIXth ISPRS Congress, volume XXXIII-B2 of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pages 241-256, Amsterdam.

[HARTRAO 2005] Hartrao: URL, <http://www.hartrao.ac.za/geodesy/gps-block2f-jpo.gif>

[HOEFER 2005] Höfer-Bechtel: URL, <http://www.hoefer-bechtel.de/edv-systemhaus/callidus/Vom%20Einzelscan%20zum%20Modell.htm>

[ICSINGER 2005] Icsinger, URL: http://www.icsinger.de/flxmap_d.htm

[IPF 2005] Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien: URL, www.ipf.tuwien.ac.at

[JANSA 2003] J. Jansa, H. Stanek: Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen; Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4; 262 - 270.

[KAMERA GESCHICHTE 2005] Kamera Geschichte, URL: http://www.kamera-geschichte.de/files/verschluss1_d.htm

[KONICA 2005] Konica Minolta: URL, <http://www.konicaminolta-3d.com>

[KRAUS 2004a] K. Kraus, P. Dorninger: Das Laserscanning - Eine neue Datenquelle zur Erfassung der Topographie; Presentation: Festschrift für Ingrid Kretschmer zum 65. Geburtstag u. anlässlich ihres Übertritts in den Ruhestand, Wien (invited); 11-26-2004; in: „Aspekte der Kartographie im Wandel der Zeit“, Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band/16/Wien (2004), ISBN 3-900830-54-1; 312 - 318.

[KRAUS 2004b] Kraus, Karl: Photogrammetrie – Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Verlag de Gruyter, ISBN 3-11-017708-0, 516 S., 7. Auflage, Berlin, 2004.

[KUPFER 1964] Kupfer, Christian; Monse, Hanns Rolf; Neumann, Alfred (Herausgeber): Fotokino-Lexikon. Fotokinoverlag, Leipzig, 1964.

[LAURENTINI 1995] Laurentini, Aldo: How Far 3D Shapes Can Be Understood from 2D Silhouettes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, No. 2, Februar 1995.

[LUHMANN 2002] Luhmann, Thomas: Photogrammetrie und Laserscanning. Verlag Wichmann, 186 S., ISBN 3-87907-390-2, Heidelberg, 2002.

[MGAT 2005] Mein Grundstück: URL, <http://www.meingrundstueck.at/Lexikon/L-Landeskoordinatensystem/l-landeskoordinatensystem.html>

[NIEM 1994] Niem, Wolfgang, Buschmann, Ralf: Automatic Modelling of 3D Natural Objects from Multiple Views.

[PCGAMES 2005] PC Games: URL, http://www.pcgames.de/screenshots/medium/IMG_0423.jpg

[REALVIZ 2005] REALVIZ: URL, www.realviz.com

[RESSL 2004] C. Ressel: Vermessung der Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper mittels Photogrammetrie sowie terrestrischen und Nahbereichs-Laserscannings; Presentation: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Halle/Saale; 09-15-2004 - 09-17-2004; in: „Vorträge 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF - 'Instrumentarien zur nachhaltigen Entwicklung von Landschaften'“, E. Seyfert (ed.); Band 13 (2004), 349 - 358.

[RIEGL 2005] Riegl: URL, <http://www.riegl.com>

[ROBODESIGN 2005] Robodesign: URL,
http://www.robodesign.nayble.net/site/contents/digital_morning_wip/images/wireframe.jpg

[ROTTENSTEINER 2001] Rottensteiner, Franz: Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, ISBN 3-9500791-3-0, 189 S., 2001.

[SEILNACHT 2005] Seilnacht: URL, <http://www.seilnacht.com/Lexikon/Licht.htm>

[STEIDLER 2003] Steidler, Franz; Beck, Michael: 3D-Stadtmodelle mit dem CyberCity-Modeler – Generierung und Echtzeitbegehung. Veröffentlicht an der AGIT 2003 in Salzburg.

[SZELISKI 1993] Szeliski, Richard; Weiss, Richard: Robust Shape Recovery from Occluding Contours Using a Linear Smoother. Digital Equipment Corporation, Cambridge Research Lab, 1993.

[SZELISKI 1997] Szeliski, Richard: From images to models (and beyond): a personal retrospective. To appear in Vision Interface, May 21, 1997.

[TECFA 2005] Tecfa: URL, http://tecfa.unige.ch/themes/FAQ-FL/scanner_image/scanner_ouvert.jpg

[ULM 2003] Ulm, Kilian: Improved 3D City Modeling with Cybercity-Modeler (CC-Modeler) using Aerial-, Satellite Imagery and Laserscanner Data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/W10, 2003.

[ULM 2004] Ulm, Kilian: 3D-Stadtmodellierung mit dem Cybercity-Modeler. Veröffentlicht in Digital Production, Ausgabe 48:04:04, 2004.

[UNI STUTTGART 2005] Universität Stuttgart: URL, www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/GIS1/gis1_hue1_erlaeuterung.pdf

[USGS 2005] US Geological Survey: URL,
<http://edc.usgs.gov/geodata/images/susanville.gif>

[VRMLSEITE 2005] VRMLSEITE: URL, <http://www.vrmlsite.com/dec96/spot1.html>

[WB 2005] WB: URL, <http://www.wb.com.tw/cad/888cad.gif>

[WIKIPEDIA 2005] Wikipedia: URL, <http://de.wikipedia.org>.

[ZARM 2005] Universität Zarm: URL, http://www.zarm.uni-bremen.de/2forschung/raumfahrt/students/stud_da_imu_sim/index.htm.

Anhang C: Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Beispiele für die Nutzung von 3D-Modellen.....	3
Abb. 1.1 (a): Architekturanalyse, [DEBEVEC 1996].....	3
Abb. 1.1 (c): Gebäudemanagement, [LUHMANN 2002].....	3
Abb. 1.1 (f): Virtual Reality, [DEBEVEC 1996].....	3
Abb. 1.1 (g): Planung von Produktionsanlagen, [LUHMANN 2002].....	3
Abb. 1.1 (h): Gebäudeinformationssysteme, [JANSA 2003].....	3
Abb. 1.1 (i): 3D-Stadtpläne, [CYBERCITY 2005].....	3
Abb. 1.1 (j): Standort- und Werksplanung, [LUHMANN 2002].....	4
Abb. 1.1 (k): Regensimulation, [KRAUS 2004a].....	4
Abb. 1.2: Beispiel einer Wireframe-Darstellung, [ROBODESIGN 2005].....	9
Abb. 1.3: Beispiel einer Darstellung im Modus Hidden Line Removal, [Eigene Darstellung].....	9
Abb. 1.4: Beispiel einer Darstellung im Shaded-Modus, [Eigene Darstellung].....	9
Abb. 1.5: GIS-Darstellung des Wassersystems im Großstadtgebiet, [ATLANTICTECH 2005].....	12
Abb. 1.6: GPS-Satellit, [HARTRAO 2005].....	13
Abb. 1.7: gängiges IMU-Gerät [CMT 2005].....	14
Abb. 1.8: Beispiel eines CAD-Plans, [WB 2005].....	15
Abb. 2.1: Zentralprojektion, Parallelprojektion [WIKIPEDIA 2005].....	20
Abb. 2.2: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten, [KRAUS 2004b], S. 18	21
Abb. 2.3: Testtafel für die Prüfung des Auflösungsvermögens, [KRAUS 2004b], S. 67.....	24
Abb. 2.4: Abweichungen von der idealen Senkrechtaufnahme [FH BOCHUM 2005].....	26
Abb. 2.5: Kamerasucher, [KRAUS 2004b], S. 152.....	27
Abb. 2.6: Planung des horizontalen Normalfalls, [KRAUS 2004b], S. 195.....	29
Abb. 2.7: Rundum-Bildverband aus acht Bildern, [KRAUS 2004b], S. 198.....	31

Abb. 2.8: Funktionsprinzip einer Stereomesskamera, [KRAUS 2004b], S. 184	31
Abb. 2.9: Funktionsprinzip einer Einzelmesskamera, [KRAUS 2004b], S. 185	32
Abb. 2.10: Funktionsprinzip einer Résaukamera, [KRAUS 2004b], S. 186.....	33
Abb. 2.11: Beispiele für Such- und Referenzmatrix, [KRAUS 2004b], S. 362	34
Abb. 2.12: Beziehung zwischen zwei Koordinatensystemen [UNI STUTTGART 2005]....	36
Abb. 2.13: Projektion eines Objektpunkts P in einen Bildpunkt $T = (I, J)$, [NIEM 1994], S. 3	38
Abb. 2.14: Verschiedene geometrische Objekte, die alle dieselbe würfelförmige Visual Hull erzeugen, [LAURENTINI 1995], S. 2	39
Abb. 2.15: Volume Intersection, [LAURENTINI 1995], S. 2	40
Abb. 2.16: Tangente von $VH(O)$ im Punkt P, [LAURENTINI 1995], S. 3	42
Abb. 2.17: Beispiel für einen Projektablauf, [NIEM 1994], S. 3	42
Abb. 2.18: Pillar Representation, [NIEM 1994], S. 4	43
Abb. 2.19: Volumenrekonstruktion mittels Pillar-Represäntation, [NIEM 1994], S. 5	44
Abb. 2.20: Beispiele für die Ergebnisse, [NIEM 1994], S. 11	44
Abb. 2.21: Paul Debevec's Chevette Projekt, [DEBEVEC 1996], S. 28	45
Abb. 2.22: Verschiedene Stadien beim Volumes-from-Silhouettes-Projekt, [SZELISKI 1997], S. 2	46
Abb. 2.23: Octree, [SZELISKI 1997], S. 2	47
Abb. 2.24: Ausgangsbild – Kanten und Ausrichtung – verfolgte Kanten, [SZELISKI 1993], S. 4	49
Abb. 2.25: Bilder aus einer synthetisch erzeugten Ellipsenanimation zu Testzwecken, [SZELISKI 1993], S. 16	50
Abb. 2.26: Ergebnisse der Profilrekonstruktion aus der Ellipsenanimation, [SZELISKI 1993], S. 17	50
Abb. 2.27: Aufsichtscanner zum Digitalisieren von flachen Vorlagen, [TECFA 2005]	51
Abb. 2.28: Handscanner zum Abtasten von Strichcodes, [BOMAC 2005]	51
Abb. 2.29: Werkskontrolle in der Industrie mittels 3D-Scanner, [LUHMANN 2002], S. 26	51
Abb. 2.30: Paradigma des Laserscanning, [KRAUS 2004a], S. 2	53

Abb. 2.31: Paradigma der Photogrammetrie, [KRAUS 2004a], S. 2	53
Abb. 2.32: DTM, [KRAUS 2004a], S. 3	56
Abb. 2.33: DSM, [KRAUS 2004a], S. 3	56
Abb. 2.34: DEM, [USGS 2005]	56
Abb. 2.35: Minimale Punktzahl zur Erfassung eines Dammes, [KRAUS 2004a], S. 4	56
Abb. 2.36: Veränderungen des Laserstrahls je nach Geländeoberfläche, [RIEGL 2005], S. 2	58
Abb. 2.37: Reflexionsgesetz, [WIKIPEDIA 2005]	59
Abb. 2.38: Brechungsgesetz, [WIKIPEDIA 2005]	59
Abb. 2.39: Riegl Airborne Laser Scanner LMS-Q560, [RIEGL 2005], S. 1	60
Abb. 2.40: Profilansicht aller Laserpunkte im Bereich einer Lichtung, [TOPSCAN 2005]	61
Abb. 2.41: Laserscans nach Registrierung, [RESSL 2004], S. 7	61
Abb. 2.42: Surface Modell aus Laserscans, [RESSL 2004], S. 9	61
Abb. 2.44: Konica Minolta VI910 – long range terrestrial laser scanner, [KONICA 2005], S. 1	63
Abb. 2.45: Visualisierung der Punktwolke eines Einzelscans, [HOEFER 2005]	64
Abb. 2.46: Vereinigung von Einzelscans zu einer Gesamtpunktwolke, [HOEFER 2005] ...	65
Abb. 3.1: Stadtmodell Zürich mit Gebäuden, Flüssen, Bäumen und DTM, vgl. [GRUEN 2000], S. 8	68
Abb. 3.2: Komponenten des CyberCityModelers, vgl. [GRUEN 2002], S. 3	69
Abb. 3.3: München, [CYBERCITY 2005]	69
Abb. 3.4: Reutlingen, [CYBERCITY 2005]	69
Abb. 3.5: Wien, [CYBERCITY 2005]	70
Abb. 3.6: Karlsruhe, [CYBERCITY 2005]	70
Abb. 3.7: Module des CC-Modelers, vgl. [ULM 2003], S. 2	71
Abb. 3.8: Topologieadjustierung, vgl. [GRUEN 2002], S. 8	72
Abb. 3.9: Topologieadjustierung mit CC-Edit, vgl. [ULM 2004], S. 2	73

Abb. 3.10: Benutzeroberfläche CC-Modeler (1), vgl. [GRUEN 2000], S. 6	73
Abb. 3.11 (a): LOD3: Nur die Bounding Boxes werden dargestellt. vgl. [GRUEN 2002], S. 11	74
Abb. 3.11 (b): LOD2: Die Dachstrukturen werden zusätzlich geladen. vgl. [GRUEN 2002], S. 11	74
Abb. 3.11 (c): LOD1: Die Texturen werden appliziert und die Bäume werden dargestellt. vgl. [GRUEN 2002], S. 11	74
Abb. 3.12: 3D-Stadtmodell von Los Angeles (USA), vgl. [ULM 2004], S. 1	75
Abb. 4.1: VRML-Modell des TU-Gebäudes, [IPF 2005]	78
Abb. 4.2: Image Modeler Screenshot, [REALVIZ 2005]	80

Anhang D: Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entscheidungskriterien bei der Projektplanung im Bereich Image Based Modeling, vgl. [LUHMANN 2002], S. 166.....	5
Tabelle 2: Photogrammetrie und Laserscanning im Vergleich, vgl. [LUHMANN 2002], S. 110.....	67
Tabelle 3: Vor- und Nachteile des CybercityModelers, [Eigene Darstellung].....	76

Anhang E: Stichwortverzeichnis

Adobe	81, 83, X
Affintransformation	38
Architektur	15, 83
äußere Orientierung	22
Automatisierung.....	13
Beugungsunschärfe	24
Bildverband	32, 37
bounding volume	44
Bündelblockausgleichung.....	37, 68
CAD	6, 7, 12, 15, 16, 26, 83
coarse-to-fine	50
CORBA	82, II
Daguerreotypie	20
DEM	58, 59
Depth Maps	44
digitales Geländemodell	27
Digitalisierung.....	20, 72
Display Management.....	6
DSM	58, 59
DTM.....	58, 59, 71, 72, 75
DXF	15, 78
Facility Management.....	2, 12, 64, III
Filmindustrie	83
Flächenmodell	16
Flash	81, III
Frame Grabber	48
Funktionalität.....	77
Gauß-Krüger-System	60, III
GIS	6, 11, 12, 77, X
Global Illumination.....	10
GPS	13, 14, 22, 30, 56, 59, 64, 69
heading	27
Hidden Surface Removal	9
IGES	16
Image Based Modeling.....	1, 3, 4, 1, 4, 5, 7, 8, 19, 40, 54, 81, 82, 84, 87
IMU.....	14, 22, 30, 56, 59, 64, 69
innere Orientierung.....	22
JAVA.....	17, IV
Kantenmodell.....	16
Kartographie.....	IV, XII
Kleinste-Quadrate-Ausgleichung.....	36, 52, 67, V
Konstruktionshistorie	16
Korrelation	35, 37, V
Kreuzblick	20, V
Laserscanning.....	3, 4, 1, 5, 6, 40, 53, 54, 55, 56, 57, 59, 62, 64, 69, 70, 86, XII
LOD.....	77, 78
Motion Capturing.....	54, VI
Nickwinkel	27
Nullpunktverschiebung	67, VI
Objektgeometrie	56
Objektivverzeichnung	24
Octree	42, 48, 49, 50
Orthophoto.....	VI
Parallaxe	20, VI, VII
Parallelblick	20, VII
Passpunkte	22, 33
perspektivisch	82
Photogrammetrie	3, 4, 1, 5, 6, 19, 20, 21, 23, 30, 39, 40, 53, 54, 55, 56, 58, 60, 68, 69, 70, 71, 82, 86, XI, XII, XIII
Pillar	45, 46
Pixeldifferenzoperation	48
Plotting	20
Polygon.....	69, 77

Pseudo Random Noise	14
Punktwolke	55, 56, 61, 67, 68, 69, 70
Qualität	59, 60, 69, 83, 84, 87
Radiosity	10
Rahmenmarken	23
Raycasting	10
Raytracing	10
REALVIZ	83, 84, XIII
Registrierung	60, 64, 65, 68
Réseau	34
Rollwinkel	27
Scan-Line-Methode	10
Schlitzverschluss	29
Schmiegunskreis	51
SCOP++	82
Sensor	6, 15, 59, 69
Shaded	10
Shadow Depth Maps	10
solid regions	42
STEP	16
Stereoskopie	20
SVG	81, VIII
Tachymetrie	57, X
TDI	30
TerrainView	75, 77, 78
Tiefenschärfe	24, VII
Topographie	XII
Triangulation	51, 66, 69, VIII
V3D	72, 74
VDAFS	16
Vektormodell	69, 72, VIII
Verlaufsfiter	VIII
Vignettierung	25, 29, VIII
Virtual Reality	2, 3, 17, 64, 77, 81, IX
Visual Hull	41, 42, 44
Visualisierung	6, 17, 69, 71, 73, 75, 77, 78, 82
Volume Intersection	42
VRML	17, 78, 79, 82, 85
Wavelet	77, IX
Wireframe	9
Zentralprojektion	21, 27, 29, 38
Zentralverschluss	29