

## ERZEUGUNG VON QUALITATIV HOCHWERTIGEN 3D PHOTOMODELLEN FÜR INTERNETBASIERTE ANWENDUNGEN


mit besonderem Augenmerk auf Objekte der  
Nahbereichsphotogrammetrie

von  
Lionel Dorffner



Veröffentlichung des Institutes für  
Photogrammetrie und Fernerkundung

mit finanzieller Unterstützung der  
Stadtvermessung Wien - Magistratsabteilung 41

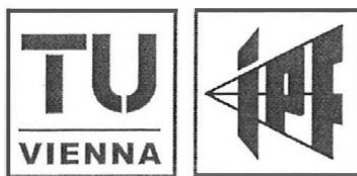
  
**stadtvermessung**

**Stadt  Wien**

## ERZEUGUNG VON QUALITATIV HOCHWERTIGEN 3D PHOTOMODELLEN FÜR INTERNETBASIERTE ANWENDUNGEN


mit besonderem Augenmerk auf Objekte der  
Nahbereichsphotogrammetrie

von  
Lionel Dorffner



Veröffentlichung des Institutes für  
Photogrammetrie und Fernerkundung

mit finanzieller Unterstützung der  
Stadtvermessung Wien - Magistratsabteilung 41

  
**stadtvermessung**

**StadtWien**

**Herausgeber und Verleger: o. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Kraus**  
Vorstand des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung  
der Technischen Universität Wien  
A-1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Die Kosten für den Druck wurden zur Hälfte aus eigenen Einnahmen des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien getragen. Die andere Hälfte wurde durch den Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 41 – Stadtvermessung finanziert. Informationen zu Produkten der Stadtvermessung finden sich auf der letzten Seite.

Diese Arbeit wurde an der Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik der Technischen Universität Wien (Karlsplatz 13, A-1040 Wien, Österreich) zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Begutachter:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Jansa  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien  
A-1040 Wien, Gusshausstraße 27-29 / 122, Österreich

o. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Purgathofer  
Institut für Computergraphik und Algorithmen der Technischen Universität Wien  
A-1040 Wien, Favoritenstraße 9-11 / 186, Österreich

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juni 2002

Druck: die kopie, A-1090 Wien  
Auflage: 250 Stück  
ISBN 3-9500791-6-5

## **Kurzfassung**

Die Wissenschaft der Photogrammetrie befasst sich unter anderem mit der geometrischen Auswertung von photographischen Bildern. Wendet man photogrammetrische Methoden auf Objekte an, die sich in "geringer" Entfernung zur Kamera befinden, so spricht man von Nahbereichsphotogrammetrie. Die klassische Zielsetzung liegt hier in der exakten Dokumentation einer Objektgeometrie. In den letzten Jahren ist im Bereich der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie ein neues Produkt entstanden, das 3D-Photomodell. Bei einem Photomodell handelt es sich um ein durch Vermessung entstandenes dreidimensionales Oberflächenmodell eines realen Objektes mit photographischer Textur. Ein solches Modell ist bestens geeignet, um einen übersichtlichen und detaillierten Eindruck einer bestehenden räumlichen Situation zu vermitteln.

Die Erstellung von Photomodellen erfolgt zur Zeit ausschließlich interaktiv und größtenteils punktbezogen, was bei komplexen Objekten zu langen Auswertzeiten und hohen Produktionskosten führt. Ein weiteres Problem bei der Erzeugung von Photomodellen entsteht durch die Verwendung verschiedener, zum Teil an unterschiedlichen Tagen aufgenommener Bilder. Dadurch kommt es oft zu störenden Helligkeits- und Farbunterschieden zwischen den einzelnen Aufnahmen. Der erste Schwerpunkt der Arbeit zeigt Wege auf, Photomodelle wirtschaftlich zu erstellen, ohne dabei sichtbare Qualitätseinbußen in geometrischer und radiometrischer Hinsicht in Kauf nehmen zu müssen.

Werden 3D-Photomodelle interaktiv visualisiert, zeigt sich der große Vorteil gegenüber statischen Bildern. Komplexe räumliche Sachverhalte können auch für unerfahrene Benutzer sehr anschaulich dargestellt werden. Für diese interaktive Visualisierung werden im Rahmen dieser Arbeit keine eigenen Algorithmen für das Rendering entwickelt, sondern ausschließlich Standardwerkzeuge aus dem Umfeld der Internet-Technologien eingesetzt, mit dem Ziel Photomodelle auf einfache Weise einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Ein solches Werkzeug ist zum Beispiel VRML (Virtual Reality Modeling Language), eine Beschreibungssprache für die interaktive Visualisierung von 3D-Daten im Internet. Mit der Darstellung im Format VRML eröffnet sich auch die Möglichkeit Links zu weiterführenden Sachinformationen im Photomodell zu verankern und so ein 3D Informationssystem im Internet zu schaffen.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Photomodell per Definition die maßstäbliche Nachbildung einer realen Umgebung sein soll. Dieser Umstand schließt - streng genommen - einige gängige Techniken zur Reduktion der Datenmenge aus. So werden etwa ähnliche Elemente des Modells nicht durch die Kopie eines Prototyps, sondern jeweils extra durch ihre eigene typische Geometrie und Phototextur dargestellt. Aus diesem Grund kann das Photomodell als vermessungstechnisches Produkt gesehen werden, dass sich für den Einsatz zur Dokumentation, Planung oder Simulation eignet. Die interaktive Visualisierung des Photomodells für dieses Anwendung bildet daher den zweiten Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit, wobei besonderes Augenmerk auf die Bewältigung großer Datenmengen gelegt wird.

## **Abstract**

Among other things the science of photogrammetry deals with the geometrical evaluation based on photographic images. If methods of photogrammetry are applied to objects close to the camera the technical term is close-range photogrammetry. The principal aim of close-range photogrammetry is the precise acquisition and documentation of object geometry. In the last years a new product has been developed in the field of close-range photogrammetry, the three-dimensional photo-model. The expression "photo-model" is used for a photo-realistic three-dimensional surface model of an existing object. The geometrical information is determined by surveying and the texture information is taken from photographs.

At present the generation of photo-models is done exclusively interactively and mostly based on points. This leads to long time of evaluation and high costs if complex objects are to be modeled. Concerning the generation of photo-models also another problem arises due to the fact, that a lot of different images are used. Disturbing brightness and hue errors between different photographs often occur. So, the first focal point of the presented thesis tries to show possibilities how to create photo-models in an efficient way, without accepting visible loss with respect to both geometrical and radiometrical quality.

The main advantage of three-dimensional photo-models comparing to static images is revealed if they are visualized interactively. Complex spatial situations can be presented in a very impressive way, also to inexperienced users. In addition, if internet technology is used, photo-models may be made available to a great public. No rendering algorithms have been developed to implement interactive visualization, only existing tools like VRML (Virtual Reality Modeling Language) are used. VRML is the standard data format on the internet for describing three-dimensional objects. Using VRML also hyperlinks to other related information can be fixed within a photo-model, providing a possibility to build up a three-dimensional information system based on existing objects.

The very task of the photo-model is to give a lifelike reconstruction of the real environment at a defined scale. Taking this definition strictly, some common techniques for data reduction cannot be applied. Similar elements, for example, may not be represented by copies of a prototype, but each individual element has to be visualized by its respective geometry and photo-texture. For that reason the photo-model can be regarded as a precise product obtained by surveying, which is optimally suited for applications in the field of documentation, design or simulation. So, the second focus of this thesis is on the interactive visualization of photo-models with special attention to handling large amounts of data.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation.....	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit und Anmerkungen des Autors .....	3
1.4	Das 3D-Photomodell.....	5
<b>2</b>	<b>GEOMETRIE.....</b>	<b>7</b>
2.1	Erfassungsmethoden .....	7
2.2	Photogrammetrische Datenerfassung.....	7
2.2.1	<i>Stereoskopische Auswertung.....</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>Bündelblockanordnung .....</i>	<i>9</i>
2.3	Bündelblockausgleichung .....	11
2.3.1	<i>Abbildungsfunktion.....</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Beobachtete Bildpunkte.....</i>	<i>13</i>
2.3.3	<i>Beobachtete Passpunkte.....</i>	<i>13</i>
2.3.4	<i>Gestaltbeobachtungen.....</i>	<i>14</i>
2.4	Verkürzung des Messprozesses .....	14
<b>3</b>	<b>TOPOLOGIE.....</b>	<b>18</b>
3.1	Modellierung von 3D Objekten .....	18
3.1.1	<i>Metaball Objekte .....</i>	<i>18</i>
3.1.2	<i>Sweep Modelle.....</i>	<i>18</i>
3.1.3	<i>CSG Modelle .....</i>	<i>19</i>
3.1.4	<i>B-Rep Modelle.....</i>	<i>20</i>
3.2	3D Datenstrukturen.....	20
3.2.1	<i>Punktwolken .....</i>	<i>21</i>
3.2.2	<i>Drahtmodelle.....</i>	<i>21</i>
3.2.3	<i>B-Rep Datenstruktur .....</i>	<i>22</i>

---

3.2.4	<i>Half-Edge-Datenstruktur</i> .....	24
3.3	Implementierung der Datenstruktur .....	27
3.3.1	<i>Punktnummern</i> .....	27
3.3.2	<i>Referenzpunkt</i> .....	28
3.3.3	<i>Koordinatenvergleich</i> .....	28
3.3.4	<i>Texturquelle</i> .....	28
3.3.5	<i>Innere Schleifen</i> .....	29
3.3.6	<i>Zusammenfassen</i> .....	30
3.4	Benutzeroberfläche von ORPHEUS .....	30
<b>4</b>	<b>TEXTURIERUNG</b> .....	<b>34</b>
4.1	Geometrische Rektifizierung .....	36
4.2	Grauwertzuordnung .....	37
4.3	Abspeicherung der Textur .....	38
4.4	Radiometrische Angleichung unterschiedlicher Aufnahmen .....	38
4.4.1	<i>Grauwertübertragungsfunktion</i> .....	40
4.4.2	<i>Histogrammanpassung</i> .....	40
4.4.3	<i>Ausgleichung von Summenhistogrammen</i> .....	41
4.4.4	<i>Besonderheiten bei Verwendung von terrestrischen Aufnahmen</i> .....	42
4.4.5	<i>Farbbilder</i> .....	44
<b>5</b>	<b>DARSTELLUNG IM INTERNET</b> .....	<b>47</b>
5.1	HTML (Hypertext Markup Language) .....	47
5.2	JavaScript .....	47
5.3	Java .....	48
5.4	VRML (Virtual Reality Modeling Language) .....	48
5.4.1	<i>Geschichte</i> .....	48
5.4.2	<i>VRML-Versionen</i> .....	49
5.4.3	<i>Aufbau und Struktur</i> .....	50

---

---

5.5	VRML-Knoten.....	52
5.5.1	<i>NavigationInfo</i> .....	52
5.5.2	<i>Anchor</i> .....	52
5.5.3	<i>Billboard</i> .....	53
5.5.4	<i>Shape</i> .....	53
5.6	Möglichkeiten der Interaktion mit VRML-Szenen.....	54
5.6.1	<i>HUD (Head Up Display)</i> .....	54
5.6.2	<i>Skripts</i> .....	55
5.6.3	<i>EAI (External Authoring Interface)</i> .....	56
5.6.4	<i>X3D (eXtensible 3D)</i> .....	58
5.7	Spezielle Problemlösungen im Zusammenhang mit Photomodellen.....	59
<b>6</b>	<b>GELÄNDEMDELLE</b> .....	<b>61</b>
6.1	Datenstruktur.....	61
6.1.1	<i>Rastermodell</i> .....	61
6.1.2	<i>Triangulierung</i> .....	61
6.1.3	<i>Hybrides Modell</i> .....	62
6.2	Visualisierung.....	62
6.2.1	<i>Geländeraster (ElevationGrid)</i> .....	62
6.2.2	<i>Verteilte Welten (Inline)</i> .....	63
6.2.3	<i>Level-of-Detail (LOD)</i> .....	63
6.2.4	<i>Kompression</i> .....	64
6.3	Implementierung.....	65
<b>7</b>	<b>BEISPIELE</b> .....	<b>68</b>
7.1	Hauptplatz Neunkirchen.....	68
7.2	Wohnhausanlage in Ottakring.....	70
7.3	Saarschleife.....	72
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>75</b>

---



**VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN ..... 77**  
**LITERATURVERZEICHNIS ..... 78**

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Wissenschaft der Photogrammetrie befasst sich unter anderem mit der geometrischen Auswertung von photographischen Bildern. Photogrammetrische Methoden zur Erkundung der Erdoberfläche mit Hilfe von Luftbildern (Luftbildphotogrammetrie) und Satellitenaufnahmen (Fernerkundung) sind weit verbreitet. Ihr Einsatzgebiet reicht von der klassischen Erstellung von Kartenmanuskripten über Geländemodelle und Orthophotos bis hin zu Klassifizierungen. Wendet man die gleichen photogrammetrischen Methoden auf Objekte an, die sich in "geringer" Entfernung zur Kamera befinden, so spricht man von Nahbereichsphotogrammetrie. Diese kommt unter anderem in der Industrievermessung oder zur Gebäudedokumentation (Architekturphotogrammetrie) zum Einsatz.

Die Erstellung von Geländemodellen und Orthophotos zählt in der Photogrammetrie zu den Standardverfahren. Diese Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Produkte (Höhenlinien, Neigungskarten, Landnutzungskartierungen, ...) dienen in der Regel als Arbeitsgrundlage für andere Fachgebiete, wie etwa für Raumplanung oder für Hydrologie. In der Nahbereichsphotogrammetrie liegt die klassische Zielsetzung in der exakten Dokumentation einer Objektgeometrie. Auch hier wird das Ergebnis zur weiteren Verwendung in anderen technische Disziplinen wie etwa Maschinenbau oder Architektur verwendet. Im Zusammenhang mit Gelände- und Gebäudedaten tauchen aber nicht nur technisch-konstruktive Fragestellungen auf. Menschen wollen sich in einer fremden Region oder einem fremden Gebäudekomplex orientieren, öffentliche Institutionen wollen ihre Amtsgebäude möglichst "bürgernah" präsentieren. Bei historisch besonders interessanten Objekten oder bei ganzen Fremdenverkehrsregionen ist eine touristische Vermarktung gefragt. Es gibt also eine Reihe von Informationen, die sich auf Regionen oder Gebäude beziehen und die für einen größeren Personenkreis attraktiv aufbereitet werden sollten.

Aufgrund der Entwicklungen in den letzten Jahren auf den Gebieten "digitale Photogrammetrie" und "virtuelle Welten" ergeben sich neue Lösungsmöglichkeiten für die oben genannten Aufgabenstellungen. Durch Umkehrung der photogrammetrischen Abbildungsgleichungen kann auf digitalem Wege vom photographierten Objekt ein dreidimensionales Oberflächenmodell mit photographischer Textur generiert werden. Das Ergebnis bezeichnet man daher auch als "Photomodell". Die Tatsache, dass 3D-Photomodelle berechnet werden können, wäre an sich noch nicht besonders interessant - sie müssen auch dargestellt werden. Bei rein statischer Betrachtung bringt das Photomodell noch keine wesentlichen Vorteile gegenüber einer herkömmlichen, direkt berechneten Perspektivdarstellung.

Die permanente Leistungssteigerung der Computer ermöglicht es nun, auch Photomodelle von komplexen Objekten interaktiv zu betrachten. Der Zeitpunkt, an den ein unbefangener Mensch an dieser Darstellungsform Gefallen findet, ist meist jener, an dem er "erlebt", dass er selbst das dargestellte Objekt mühelos und ruckfrei am Computerbildschirm bewegen kann. So kann er dann zum Beispiel virtuell durch ein Photomodell einer Stadtlandschaft entlang von frei wählbaren Wegen "spazieren". Die Möglichkeit und die Qualität der interaktiven Animation ist also ein entscheidender Punkt für die Akzeptanz eines Photomodells durch den Benutzer. Das stellt natürlich entsprechende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Computers, insbesondere an sein Graphiksystem. Neben der reinen Darstellung können auch Informationen wie Texte, Video- oder Audiosequenzen mit einem Photomodell verknüpft werden. Zusätzlich zum dreidimensionalen Erlebnis lassen sich auf diese Art also multimediale "Welten" generieren.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Bereits seit einigen Jahren existieren Programmsysteme mit deren Hilfe, auf Basis von digitalen terrestrischen photographischen Aufnahmen, Objektgeometrien modelliert und mit photographischer Textur versehen werden können (PhotoModeler™, ShapeCapture™, 3D-BuilderPro™, ...). Diese Programme wurden für einen breiten Markt entwickelt und sind daher relativ preiswert. Da keine Bildpyramiden verwendet werden, ist aber die Größe der Bilder, die im Programm bearbeitet werden können, beschränkt. Auf der anderen Seite existieren Systeme zur Bearbeitung von Luftbilddaten mit mehreren 100 MB pro Bild (InJect™, OP3D™, ...). Diese sind wiederum auf die bei Luftbildern spezielle Aufnahmesituation ausgelegt, so dass ihr Einsatz in der Nahbereichsphotogrammetrie oft nicht möglich ist. Hier besteht also Bedarf an Systemen, die eine gemeinsame Verarbeitung sowohl von Nahbereichs- als auch von Luftbilddaten ermöglichen. Ein solches ist zum Beispiel ORPHEUS, das in den letzten Jahren am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) entwickelt wurde. Jener Programmteil, der sich mit Gebäudemodellierung aus Luftbildern beschäftigt, ist ausführlich in [Rottensteiner, 2001] beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein weiteres Programmmodul zur Modellierung von Objekten im Nahbereich realisiert. Als Basis diente die Half-Edge-Datenstruktur [Mäntylä, 1988], die für den Einsatz in einem photogrammetrischen System adaptiert und erweitert wurde (Kapitel 3.3).

Die photogrammetrische Modellierung im Nahbereich erfolgt zur Zeit ausschließlich interaktiv und größtenteils punktbezogen. Bei komplexen Objekten sind dadurch sehr viele Aufnahmen notwendig, was zu langen Auswertzeiten und in Folge zu hohen Produktionskosten führt. In diesem Zusammenhang tauchen daher auch kritische Stimmen auf, die den wirtschaftlichen Einsatz von Photomodellen in der Praxis in Frage stellen. Ein entscheidender Faktor für eine allgemeine Akzeptanz solcher Modelle ist somit eine möglichst zeitsparende und damit kostengünstige Erzeugung trotz hoher geometrischer und radiometrischer Qualität. In Kapitel 2.4 wird eine Möglichkeit untersucht den Modellierungsprozess in zeitlicher Hinsicht zu optimieren, ohne visuell sichtbare Qualitätseinbußen am geometrischen Modell in Kauf nehmen zu müssen. Ein besonderes Problem stellt dabei die Modellierung nicht sichtbarer Objektteile dar, auf das besonders eingegangen wird.

Ein anderes, in allen oben genannten Programmen für die Nahbereichsphotogrammetrie, ungelöstes Problem ist die Texturangleichung verschiedener Aufnahmen. Wie oben erwähnt werden für Modellierung und Texturierung eines Photomodells unterschiedliche Aufnahmen eingesetzt. Dabei kommt es oft zu störenden Helligkeits- und Farbunterschieden zwischen den einzelnen Aufnahmen. Für die notwendigen radiometrischen Anpassungen werden in den bestehenden Systemen keine Lösungen angeboten. Die Erzeugung qualitativ hochwertiger Photomodelle ist daher mit hohem Aufwand verbunden, da in einem Bildverarbeitungssystem die Aufnahmen interaktiv radiometrisch manipuliert werden müssen. In Kapitel 4.4.3 wird daher ein Algorithmus vorgeschlagen, der im Nahbereich automatisiert verschiedene Aufnahmen radiometrisch aufeinander abstimmt.

Photomodelle müssen aber nicht nur erzeugt, sondern auch dargestellt werden. In dieser Arbeit werden dafür ausschließlich Standardwerkzeuge aus dem Umfeld der Internet-Technologien eingesetzt. Dazu zählt auch das Datenformat VRML (Virtual Reality Modeling Language), das zur Zeit als Standard für 3D-Visualisierung im Internet gilt. Mit Hilfe von VRML lassen sich 3D-Modelle eindrucksvoll interaktiv visualisieren, ohne dass für den Endbenutzer Kosten für ein teures Visualisierungssystem anfallen. Darüber hinaus ist es auch möglich verschiedene Einzelmodelle über große Entfernungen hinweg zu einer virtuellen Welt zu verbinden. Auch die Erzeugung von 3D Informationssystemen ist möglich [Landes, 1999].

Die zur Visualisierung im Internet eingesetzten Programme sind aber meist für die Verwendung relativ kleiner Datenmengen ausgelegt. In solchen Modellen ist daher die Geometrie oft so weit vereinfacht, dass der Benutzer ein bestimmtes Objekt (Haus) gerade noch als solches erkennt. Durch mehrmaliges Verwenden der gleichen Geometrie (alle Häuser haben die gleiche Form) wird die notwendige Datenbasis zusätzlich verringert. Wenn Objekte texturiert sind, dann mit kleinen künstlichen Bildmustern, die sich am Objekt mehrfach wiederholen. Bei der Visualisierung von Photomodellen sind diese Vereinfachungen nicht zulässig. Die geometrische Datenbasis stammt aus der Vermessung existierender Objekte. Eine Generalisierung wird wohl auch hier bei der Modellierung durchgeführt, aber die mehrmalige Verwendung ein und derselben Geometrie für verschiedene Objekte ist nicht mehr möglich. Auch die Verwendung photographischer Textur erlaubt keine Wiederholung kleiner Bildmuster. Die Texturinformation stammt aus realen Photos und kann daher auch nur genau einmal im gesamten Modell vorkommen. Wie in Kapitel 6.2 gezeigt wird, ist es trotzdem möglich auch große Photomodelle in VRML zu visualisieren.

Auch bei der interaktiven Visualisierung von Geländedaten fallen große Datenmengen an. Zur Zeit werden für solche Zwecke von Firmen, wie GEONOVA AG [GEONOVA, 2002] oder ViewTec AG [ViewTec, 2002] eigene Systeme entwickelt. Dabei werden für die Geländedaten eigene proprietäre Formate eingesetzt, die speziell auf das jeweilige Visualisierungssystem abgestimmt sind. Hier stellt sich die Frage, ob nicht auch dafür VRML eingesetzt werden kann, wodurch für den Endbenutzer keinerlei Kosten mehr anfallen. Zusätzlich ist es dann sehr einfach möglich Gebäude- und Geländemodellen gemeinsam zu visualisieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das Programm SCOP.ATM entwickelt, das, ausgehend von einem Geländemodell und Orthophotos, Dateien für eine interaktive Visualisierung auf Basis von VRML exportiert (Kapitel 6.3 und 7.3).

Da es sich bei einem Photomodell um ein Vermessungsprodukt handelt, ist es aus technischer Sicht auch wünschenswert, neben der Visualisierung auch geometrische Informationen aus dem dargestellten 3D-Modell erhalten zu können. In einer rein virtuellen Welt macht es meist keinen Sinn Koordinaten oder Abstände zu erfassen, da es sich nicht um reale Objekte handelt, und somit zu den "Messergebnissen" keine Qualitäts- oder Genauigkeitsangaben gemacht werden können. In anderen Arbeiten wird solchen Fragestellungen daher oft zurecht auch keine Bedeutung beigemessen. In dieser Arbeit aber steht das Photomodell im Vordergrund. In Kapitel 5.6 wird also gezeigt, wie solche "Messwerkzeuge" innerhalb von VRML realisiert werden können und welcher Nutzen sich für den Anwender aus dieser Möglichkeit des Messens im Photomodell ergibt.

### **1.3 Aufbau der Arbeit und Anmerkungen des Autors**

In Kapitel 2 wird die Erfassung der Geometrie für ein Photomodell beschrieben und Möglichkeiten zur Verkürzung des Messprozesses aufgezeigt. Dabei stehen jene Verfahren im Vordergrund, bei denen Geometrie und Textur aus den gleichen Ausgangsdaten gewonnen werden können.

Kapitel 3 beschäftigt sich zunächst mit unterschiedlichen Datenstrukturen zum Speichern und Verwalten von 3D Objekten und erläutert dann die realisierte Lösung zur Modellierung von Objekten im Nahbereich.

Kapitel 4 geht auf die Übertragung von Phototextur auf das Oberflächenmodell ein, sowie auf die radiometrischen Probleme, die sich aus der Verwendung unterschiedlicher Aufnahmen

ergeben. Zur Lösung wird ein Algorithmus vorgeschlagen, der automatisch verschiedene Aufnahmen radiometrisch aufeinander abstimmt.

In Kapitel 5 werden speziell Standards aus dem Umfeld des WWW (World Wide Web) untersucht, die für interaktive internetbasierte Visualisierung von 3D Photomodellen geeignet sind. Zur Erweiterung des Anwendungsbereiches von Photomodellen über die reine Visualisierung hinaus wird aufgezeigt, welche Möglichkeiten der Interaktion vorhanden sind und wie diese genutzt werden können.

Kapitel 6 behandelt die interaktive Darstellung von Geländemodellen und großen Datenmengen, im Besonderen die Unterschiede zu Photomodellen aus dem Nahbereich. Hier wird auch das für solche Zwecke entwickelte Softwarepaket SCOP.ATM vorgestellt.

Das Kapitel 7 schließlich zeigt unterschiedliche realisierte Anwendungsbeispiele.

Die ersten Schritte zu dieser Arbeit wurden bereits im Jahr 1996 getan [Dorffner, 1996]. Es war zunächst mehr ein spielerisches Herangehen an das neue Medium VRML. Damals entstanden, auf Basis von IDL<sup>TM</sup> (Interactive Data Language), erste Applikationen zur Erzeugung von Photomodellen (Abbildung 1-1). Diese basierten ausschließlich auf Dreiecken und erzeugten Dateien im Format VRML 1.0. In den letzten Jahren erfolgte eine völlige Neuimplementierung in C++ zur Eingliederung dieser Tools in die bestehenden Softwarepakete am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.).



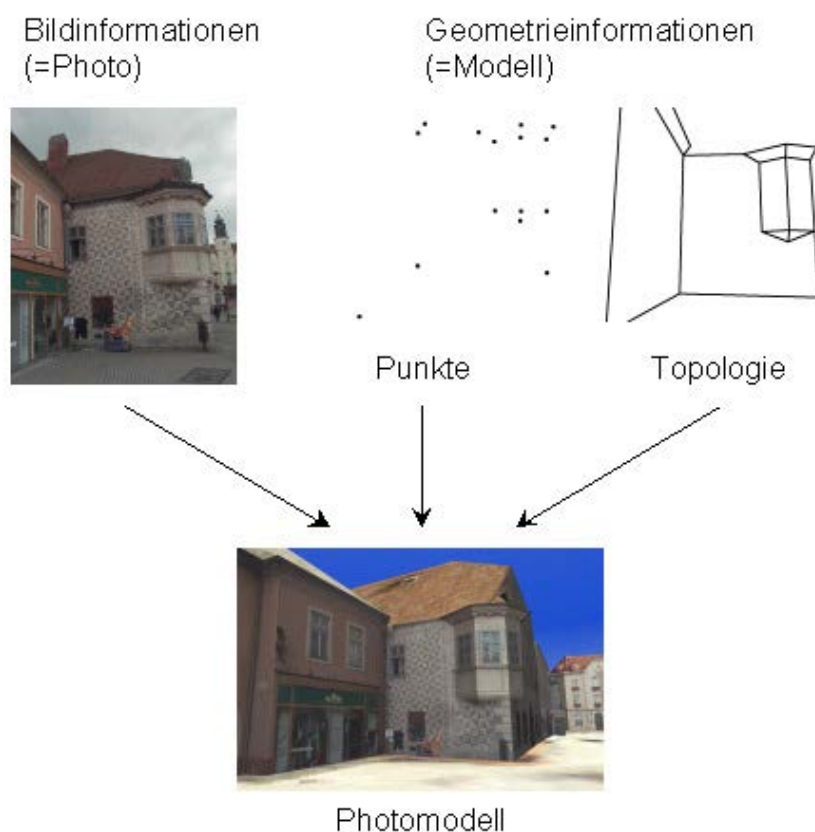
**Abbildung 1-1: 3D-Modell der Stadt Wien (MA19, MA41) vom Europaplatz. Vom Eckhaus Mariahilfer Straße – Neubaugürtel wurde 1997 am I.P.F. ein Photomodell erzeugt.**

Die Programme sind seit 1999 auch in der Lehre und kommerziell im Einsatz. Damit ist eine praktische Erprobung gewährleistet und es kommt zu einem qualifizierten Feedback, so dass eine ständige Verbesserung und Erweiterung möglich ist. Nicht unerwähnt bleiben soll, dass Fehlersuche und Support allerdings auch eine nicht unerhebliche Bremse in der methodischen Weiterentwicklung und Erprobung von Algorithmen bedeuten.

Jede Software-Applikation bedarf eines Menschen, der sie bedient. Sei es die Festlegung von Parametern für Funktionen mit Hilfe einer Tastatur, oder auch nur die Verwendung der Maus zur interaktiven Darstellung einer 3D-Szene. In diesem Zusammenhang sind unter dem, in dieser Arbeit verwendeten Begriff Benutzer, natürlich auch alle Benutzerinnen zu verstehen. Ich habe mich dazu entschlossen die Lesbarkeit nicht unnötig zu erschweren, indem ständig von der/dem BenutzerIn die Rede ist. Dies soll aber keinesfalls wertend oder diskriminierend verstanden sein.

## 1.4 Das 3D-Photomodell

Der oben mehrfach erwähnte Begriff "Photomodell" bedarf einer detaillierteren Erklärung. Ein 3D-Photomodell ist ein durch Vermessung entstandenes dreidimensionales Oberflächenmodell eines realen Objektes mit photographischer Textur. Formal besteht das Photomodell demnach aus Bild- ("Photo") und Geometrieinformationen ("Modell"), die gemeinsam abgespeichert werden (Abbildung 1-2).



**Abbildung 1-2: Prinzip der Erzeugung eines Photomodells im Nahbereich**

Mit Hilfe einer geeigneten Messmethode (Tachymetrie, Photogrammetrie, Laserscanning, ...) wird die Geometrie des Oberflächenmodells bestimmt. Diese umfasst neben der Metrik (Koordinaten von Objektpunkten, Formparameter, ...) auch die Topologie (Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Punkten, Linien und Flächen). Dadurch kann ein komplexes Objekt intern in einzelne Teilflächen zerlegt werden.

Auf die Teilflächen wird schließlich durch Transformation die Textur aus den Aufnahmen projiziert. Die dazu notwendigen Transformationsparameter ergeben sich aus den Orientierungen der Aufnahmen in bezug auf das geometrische Modell. Die Bestimmung von Bildorientierung und Objektgeometrie erfolgt simultan durch eine hybride Bündelblockausgleichung.

Hier liegt der entscheidende Unterschied zu photorealistischen Modellen, die in der Computergraphik eine weite Verbreitung finden. Dort verwendet man meist fiktive Objekte, die dann mit Hilfe von künstlicher Textur möglichst photorealistisch dargestellt werden sollen. Im Gegensatz dazu wird bei einem Photomodell die Geometrie aus realen Messdaten gewonnen, und die verwendete Textur stammt aus Photos, in denen die Realität mit den Photonen der physikalischen Aufnahme "eingefangen" wurde.

Obwohl also für die Geometrie oftmals die gleichen Datenstrukturen, für die Textur die gleichen Datenformate und für die Visualisierung die gleichen Algorithmen verwendet werden wie in der Computergraphik, gibt es aufgrund der realen Daten doch eine Reihe von Problemen, die eine Adaptierung oder Anpassung dort eingesetzter Methoden notwendig machen.

## 2 Geometrie

### 2.1 Erfassungsmethoden

Es gibt in der Geodäsie eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren und Methoden zur berührungslosen Erfassung von Objektgeometrie, von denen hier nur einige angeführt werden sollen:

- Die Tachymetrie wird vor allem in der Ingenieurgeodäsie eingesetzt. Damit werden gezielt geometrisch relevante Punkte gemessen, um später eine Gelände- oder Objektoberfläche zu beschreiben. Mittels Tachymetrie ist es allerdings nicht möglich, die für ein Photomodell notwendige Texturinformation zu erfassen. Im Folgenden wird daher auf dieses Verfahren nicht näher eingegangen.
- Die Photogrammetrie arbeitet im Grunde genommen ähnlich wie die Tachymetrie. Durch Messen von Bildkoordinaten in verschiedenen Aufnahmen und anschließendem räumlichen Vorwärtsschnitt können von einem Objekt punktweise dreidimensionale Koordinaten bestimmt werden. Dieselben Photos können in weiterer Folge auch zur Texturierung des gewonnenen Oberflächenmodells verwendet werden.
- In den letzten Jahren haben sich Laser-Scanner aufgrund ihrer stark automatisierten Aufnahme- und Auswerteverfahren in einigen Bereichen als kostengünstige Alternative zur Photogrammetrie etabliert. Flugzeuggetragene Laser-Scanner liefern mit einer hohen Punktdichte dreidimensionale Koordinaten und eignen sich daher zur Erfassung von Geländeoberflächen [Briese & Pfeifer, 2001]. Sowohl bei flugzeuggetragenen, wie auch bei terrestrischen Laser-Scannern existieren Systeme, die auch die Farbintensität des gemessenen Oberflächenpunktes registrieren [Dumfarth, 2001]. Die dabei erzielbare Auflösung der Textur ist aber zur Zeit noch zu grob, um damit qualitativ ansprechende Photomodelle erzeugen zu können.

Aus obiger Aufzählung wird deutlich, dass Photos die primäre Grundlage bei der Erstellung von Photomodellen darstellen, wobei verschiedene Quellen - sowohl terrestrische Aufnahmen als auch Luftbilder - kombiniert werden können. Im Folgenden soll daher noch genauer auf die photogrammetrische Datenerfassung eingegangen werden.

### 2.2 Photogrammetrische Datenerfassung

Bei der photogrammetrischen Punktbestimmung kann vor allem zwischen zwei Methoden unterschieden werden. Die einen Verfahren nutzen das räumliche Sehvermögen aus, indem sie dem Auswerter Stereobildpaare zur Verfügung stellen. Die anderen Verfahren basieren auf rein numerischer Rekonstruktion der räumlichen Situation und erwarten vom Auswerter nur monoskopische Messung.

- Das stereoskopische Auswerteverfahren wird bereits seit den Anfängen der Photogrammetrie eingesetzt. Es bedarf dabei einer schematischen Anordnung der Photos und eines geeigneten Auswertegerätes, das dem Betrachter einen räumlichen Eindruck vermittelt. Die Entwicklung solcher Auswertegeräte erstreckt sich vom Stereoautograph, dem ersten photogrammetrischen Analogauswertegerät, über analytische Auswertegeräte bis hin zu den heute im Einsatz befindlichen modernen digitalen Arbeitsstationen.
- Die Mehrbild-Komparatormessung mit anschließender Bündelblockausgleichung ist die zweite Methode, mit der eine photogrammetrische Objekterfassung durchgeführt werden



kann. Hier ist man bei der Auswertung nicht an spezielle Geräte gebunden, sondern kann die notwendigen Messungen - meist Bildbeobachtungen in Einzelbildern - auf jedem Computer durchführen. Auch die Aufnahmeanordnung ist sehr frei wählbar, allerdings kann die Punktidentifizierung durch den fehlenden räumlichen Eindruck schwieriger sein.

Jede Methode hat also ihre Vor- und Nachteile. Wichtig ist daher die Kenntnis, wann welches Verfahren gezielt anwenden kann. Deshalb sollen im folgenden beide Methoden kurz erläutert werden.

### 2.2.1 Stereoskopische Auswertung

Die stereoskopische Auswertung basiert auf demselben Prinzip wie das natürliche räumliche Sehen beim Menschen. In [Kraus, 1994] findet man dazu: "Beim Betrachten eines Punktes P und seiner Umgebung werden einerseits die Blickrichtungen der beiden Augen auf den Punkt P ausgerichtet (= Konvergenz) und andererseits die Brennweite der Augenlinsen so verändert (= Akkomodation), dass ein scharfes Bild auf der Netzhaut entsteht. In der Betrachtungsebene, die durch die Augenbasis B ( $\approx 65\text{mm}$ ) und den fixierten Objektpunkt aufgespannt wird, ergeben sich auf den Netzhäuten zwei verschiedene Abbildungen des Objektes. Für den Objektpunkt P und seinen Umgebungspunkt U ist die auf der Netzhaut entstehende Parallaxe  $p_A$  in Abbildung 2-1 eingetragen. Dabei wurde - zur Vereinfachung der Darstellung - die Blickrichtung des linken Auges in die Gerade  $\overline{PU}$  gelegt. Da bei aufrechter Kopfhaltung die Parallaxe  $p_A$  horizontal angeordnet ist, wird sie mit Horizontalparallaxe bezeichnet. Das Verschmelzen der beiden Netzhautbilder, die sich um Horizontalparallaxen unterscheiden, zu einem Raumbild bezeichnet man als räumliches Sehen bzw. Stereoskopie."

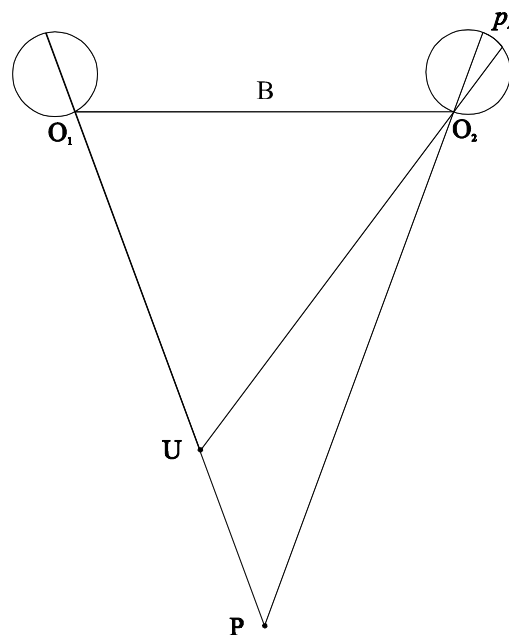


Abbildung 2-1: Prinzip des natürlichen räumlichen Sehens

Richtet man zwei Kameras, die in einem bestimmten Abstand (Basis B) voneinander stehen, so aus, dass ihre Aufnahmerichtungen zueinander parallel und normal auf die Basis sind und fotografiert dann damit ein räumliches Objekt, so hat man die Standardaufnahmedisposition der terrestrischen Photogrammetrie, den Normalfall (Abbildung 2-2). In solchen Bildern gibt es nur Parallaxen in Basisrichtung (Horizontalparallaxen). Beim Betrachten solcher Bilder mit einem geeigneten Auswertegerät entsteht für den menschlichen Betrachter ein räumliches Bild

des aufgenommenen Objektes (Stereomodell). Dieses kann von einem geübten Operator mit einer virtuellen Messmarke abgefahren und relativ einfach ausgewertet werden. Durch Positionieren der Messmarke erhält man dabei sofort die entsprechenden 3D-Koordinaten des Objektpunktes.

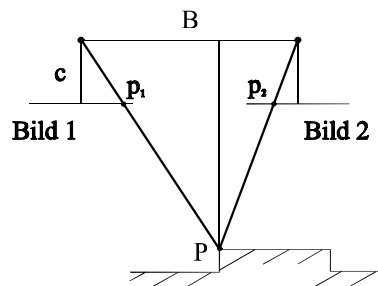


Abbildung 2-2: Normalfall der Zweibildauswertung

In der Luftbildphotogrammetrie wird diese Aufnahmeanordnung durchwegs eingehalten. Stereoauswerteverfahren eignen sich daher besonders gut für die Bestimmung von Geländeoberflächen oder Dachlandschaften. Die terrestrische Stereophotogrammetrie wird meist für die Auswertung von Objektdetails (Strukturen einer Fassade, Figuren, Verzierungen) eingesetzt, die in Form von Strichplänen ausgegeben werden.

Allerdings ist es im Nahbereich nicht immer möglich, die Aufnahmeanordnung gemäß einem genäherten Normalfall zu realisieren. Um etwa eine Fassade in einer engen Gasse auf diese Art auszuwerten, wären aufgrund der kurzen Distanz zum Objekt eine Vielzahl von Stereomodellen notwendig. Dies bedeutet einen erheblichen Zeitaufwand beim Photographieren als auch bei der Auswertung der einzelnen Modelle. In manchen Fällen kann es sogar gänzlich unmöglich sein, das gewünschte Objekt durch Stereomodelle abzudecken. Eine allgemeinere Aufnahmeanordnung bietet hier die Bündelblockanordnung.

### 2.2.2 Bündelblockanordnung

Bei der Bündelblockanordnung kann das Objekt von beliebigen Positionen photographiert werden, so lange darauf geachtet wird, dass jeder Teil auf mindestens zwei - besser drei oder mehr - Photos sichtbar ist und die Schnittwinkel der Bildstrahlen in den Objektpunkten günstig - im Idealfall  $90^\circ$  - ausfallen (Abbildung 2-3).

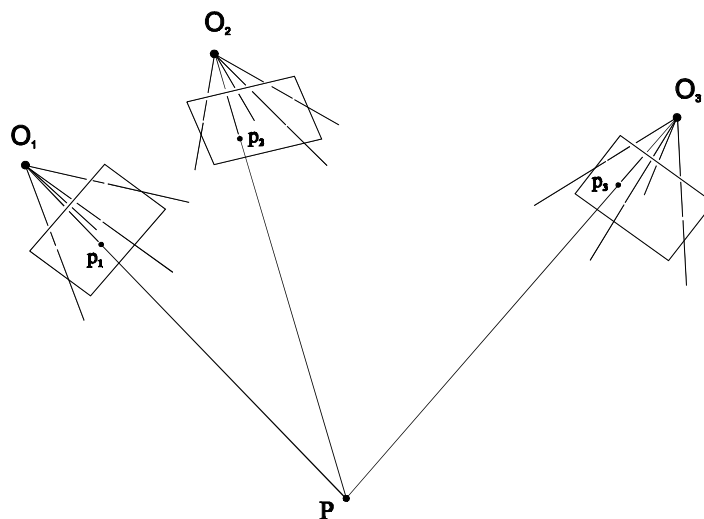


Abbildung 2-3: Punktbestimmung mittels Bündeltriangulation

Da nun, aufgrund der mitunter starken Konvergenz der Photos, eine Stereoauswertung nicht möglich ist, müssen in den einzelnen Photos Bildkoordinaten gemessen werden. Dieses Prinzip, Punkte monoskopisch in mehreren Photos zu messen, wird als Mehrbild-Monokomparator-Auswertung bezeichnet. Von einem Objektpunkt werden also in den Photos die homologen (räumlich identen) Bildpunkte identifiziert und gemessen. Diese dienen als Verknüpfung zwischen den einzelnen Aufnahmen. In vielen Fällen wird ein Objektpunkt in mehr als zwei Photos sichtbar sein. Jede zusätzliche Beobachtung (Bildkoordinatenmessung) erhöht sowohl Zuverlässigkeit als auch Genauigkeit der gesuchten Objektkoordinaten. Dieser Aspekt ist vor allem deswegen von Bedeutung, weil eine eindeutige Punktidentifizierung durch den fehlenden räumlichen Eindruck bei der Auswertung schwierig sein kann.

Durch jeden gemessenen Bildpunkt wird geometrisch, vom Projektionszentrum der Kamera aus, ein Abbildungsstrahl definiert. Zusammen mit der inneren Orientierung einer Kamera (Kamerakonstante, Bildhauptpunkt, Verzeichnung) [Kraus, 1994] entsteht so für jedes Photo ein Strahlenbündel. Mehrere Photos ergeben einen Block. Zur Berechnung der äußeren Orientierung (Position und Verdrehung der Kamera) sowie zur Bestimmung der unbekanntenen Objektkoordinaten werden die Strahlenbündel rechnerisch solange gegeneinander verschoben und verdreht, bis sie sich möglichst gut in den Objektpunkten schneiden. Dabei werden die im Bündelblock verbleibenden Restfehler durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate minimiert. Die Bestimmung von Bildorientierung, wobei auch die innere Orientierung mitberechnet werden kann, und Objektkoordinaten erfolgt also simultan mittels Bündelblockausgleichung. Da der Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten direkt hergestellt wird, entfällt auch der in der Zweibildauswertung notwendige Zwischenschritt der sogenannten relative Orientierung, durch die das Stereomodell gebildet wird.

Neben den Bildkoordinaten ist es auch möglich, andere Beobachtungen, wie Strecken oder Gestaltbedingungen in den Ausgleichungsprozess einzubeziehen. Sie zwingen Punkte in eine bestimmte Lage zueinander, die dem geometrischen Vorwissen über das Objekt entstammen. So kann man zum Beispiel annehmen, dass eine Fassade, im Rahmen der Baugenauigkeit, senkrecht steht, eine Traufe horizontal verläuft oder eine Hausecke rechtwinkelig ist.

Es gibt eine Reihe von Applikationen, mit denen man im Nahbereich photogrammetrisch eine Objektgeometrie ermitteln kann. Dazu zählen unter anderem Softwarepakete wie PhotoModeler™, ShapeCapture™ oder 3D-BuilderPro™. Diese Produkte wurden für einen breiten Markt entwickelt, sind preiswert, und bieten auch Nichtspezialisten die Möglichkeit, auf Basis von digitalen Bildern auf relativ einfache Weise eine 3D-Geometrie zu erzeugen. Aus vermessungstechnischer Sicht haben sie aber auch einige gravierende Schwächen. Für die Darstellung am Bildschirm werden keine Bildpyramiden verwendet, sondern in jedem Fall die gesamten Bilddateien in den Arbeitsspeicher geladen. Dadurch ist das Arbeiten mit mehreren Bildern von professionellen digitalen Kameras, wie der Kodak DCS460c (mehr als 6 Millionen Pixel mit 24 Bit Farbtiefe) [Forkert & Stanek, 1997] oder mit hoher Auflösung (15  $\mu\text{m}$ ) eingescannten Dias (ca. 4 Millionen Pixel) aufgrund des großen Speicherbedarfs und der langen Ladezeiten bereits ziemlich mühsam. Die Einbeziehung von Luftbildern (ca. 58 Millionen Pixel bei 30  $\mu\text{m}$  Auflösung) ist völlig unmöglich.

Auch die Ausgleichung ist in diesen Programmen benutzerfreundlich gestaltet und läuft als "Black Box" ab. Näherungswerte, wie sie für eine Ausgleichung notwendig sind, werden automatisch bestimmt und das Programm entscheidet selbst welche Auswertestrategie die "beste" ist. Die Benutzer müssen sich also nicht intensiv mit dieser Problematik beschäftigen. In den meisten Fällen, vor allem bei kleineren Projekten, ergibt sich dadurch auch ein beträchtlicher

Vorteil für die Anwender. Sollten allerdings Probleme auftreten und das automatische Verfahren zu keiner Lösung kommen, ist es sehr schwierig Fehler zu lokalisieren und zu beheben. Es stehen keine Werkzeuge wie "robuste Schätzung" oder "Data Snooping" [Kraus, 1996] für eine kontrollierte Fehlersuche zur Verfügung.

Neben den oben genannten Produkten gibt es auch photogrammetrische Expertensysteme, zum Beispiel ORPHEUS. Diese Software wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung in Wien entwickelt und stellt eine Erweiterung des universellen photogrammetrischen Programms ORIENT dar, das zur gemeinsamen Ausgleichung ingenieurgeodätischer, photogrammetrischer und fiktiver Beobachtungen dient. Ein erstes Konzept für ORIENT wurde bereits Mitte der 70er Jahre anlässlich des Kongresses der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung in Helsinki vorgelegt [Kager & Kraus, 1976]. Die endgültige Ausführung beruht auf einem vereinheitlichten Weg, wobei alle Transformationsformeln aus denen für die räumliche Ähnlichkeitstransformation abgeleitet worden sind. Seit dieser Zeit ist ORIENT beachtlich gewachsen und durch ORPHEUS zu einem leistungsfähigen und universellen Werkzeug zur digitalen photogrammetrischen Punktbestimmung weiterentwickelt worden. Durch die grafische Benutzeroberfläche und verschiedensten Bildverarbeitungsroutinen, wie etwa Punkt-Matching bietet ORPHEUS mehr als nur die Funktionalität eines digitalen Mehrbild-Monokomparators. Die Verwendung von Bildpyramiden ermöglicht es auch sehr große Bilddateien (gescannte Luftbilder mit 7.5 µm) rasch zu bearbeiten [Orient/Orpheus, 2002].

Im folgenden soll das mathematische Modell der Bündelblockausgleichung von ORIENT ausführlicher beschrieben werden, um anschließend (Kapitel 2.4) Möglichkeiten zur Optimierung des Messvorgangs aufzuzeigen.

## 2.3 Bündelblockausgleichung

Wie auch schon bei der Stereoauswertung werden die gesuchten Objektkoordinaten nicht direkt gemessen, sondern indirekt aus anderen Beobachtungen abgeleitet. Bei einer photogrammetrischen Punktbestimmung werden die gemessenen Bildkoordinaten die größte Gruppe von Beobachtungen bilden. Andere Beobachtungen können sein: gemessene Richtungen und Strecken, bekannte Koordinaten (Passpunkte), Parameter der inneren oder äußeren Orientierung oder sogenannte "Gestalten". Eine Gestalt wird in der Regel nicht direkt beobachtet, sondern besteht aus geometrischen Annahmen in Form von fiktiven Beobachtungen. Eine Gestaltbeobachtung besteht zum Beispiel in der Forderung, dass bestimmte Objektpunkte auf einer Kurve oder Fläche liegen sollen, oder dass bestimmte Ebenen zueinander parallel oder orthogonal sein sollen. Wie gut die Forderung einer Gestaltbeobachtung im Endergebnis tatsächlich erfüllt wird, hängt auch von den realen Beobachtungen, hier vor allem von den Bildmessungen, ab.

### 2.3.1 Abbildungsfunktion

Wie bereits oben erwähnt, sind die Grundlage aller Abbildungsfunktionen in ORIENT die Formeln der räumlichen Ähnlichkeitstransformation (Gleichung 2-1).

$$[\bar{\mathbf{p}} - \bar{\mathbf{p}}_0(adp)] = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\Theta) \cdot (\bar{\mathbf{P}} - \bar{\mathbf{P}}_0) \quad \text{Gleichung 2-1}$$

oder ausführlicher

$$\begin{pmatrix} x - x_0(adp) \\ y - y_0(adp) \\ z - z_0(adp) \end{pmatrix} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

Dabei gilt:

- $\bar{\mathbf{p}} = (x, y, z)^T$  ..... beobachteter Punkt
- $\bar{\mathbf{p}}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$  ..... innerer Referenzpunkt
- $adp$  ..... zusätzliche Parameter des inneren Referenzpunktes
- $\lambda$  ..... Maßstabsfaktor zwischen den Beobachtungen und dem Objektkoordinatensystem
- $\mathbf{R}(\Theta)$  ..... eine 3x3 Rotationsmatrix, die aus drei Drehwinkel  $\Theta$  aufgebaut ist.
- $\bar{\mathbf{P}} = (X, Y, Z)^T$  ..... Objektpunkt
- $\bar{\mathbf{P}}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$  ..... äußerer Referenzpunkt

Eine in der terrestrischen Photogrammetrie gebräuchliche Parametrisierung von  $\mathbf{R}$  verwendet die Winkel  $\alpha \zeta \kappa$ . Die Koeffizienten von  $\mathbf{R}$  ergeben sich durch Kombination von 3 Einzeldrehungen um die Winkel  $\alpha \zeta \kappa$  (Gleichung 2-3).

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \kappa - \sin \alpha \cdot \sin \zeta \cdot \sin \kappa & -\cos \alpha \cdot \sin \kappa - \sin \alpha \cdot \sin \zeta \cdot \cos \kappa & \sin \alpha \cdot \cos \zeta \\ \sin \alpha \cdot \cos \kappa - \cos \alpha \cdot \sin \zeta \cdot \sin \kappa & -\sin \alpha \cdot \sin \kappa + \cos \alpha \cdot \sin \zeta \cdot \cos \kappa & -\cos \alpha \cdot \cos \zeta \\ \cos \zeta \cdot \sin \kappa & \cos \zeta \cdot \cos \kappa & \sin \zeta \end{pmatrix}$$

Gleichung 2-3

Dieser Parametrisierung liegt folgende Überlegung zugrunde: Im allgemeinen beschreiben die X- und Y-Achse die Grundrissebene des Objektsystems, während entlang der Z-Achse die Höhen definiert werden. Dies gilt insbesondere für Objekte, die in einem Landessystem gegeben sind. Bei einem Photo liegen die x- bzw. y-Achse in der Bildebene während die positive z-Achse entgegengesetzt zur Aufnahme­richtung zeigt (Positivstellung). Der Winkel  $\kappa$  gibt nun die Drehung um die z-Achse an und beschreibt die Abweichung der x-Achse von der Horizontalen in Bezug auf die Grundrissebene XY. Das Vorzeichen der Drehung erfolgt gegen den Uhrzeigersinn, wenn man von der Spitze der Koordinatenachse zum Ursprung des Koordinatensystems blickt.

Der Winkel  $\zeta$  ist die Zenitdistanz der Aufnahme­richtung und gibt die Drehung um die - nach der Drehung um  $\kappa$  - horizontierte  $x_\kappa$ -Achse an. Er beschreibt die vertikale Verschwenkung der Aufnahme von der Senkrechten. Bei einer Horizontalaufnahme beträgt  $\zeta$  daher 100 gon. Der Winkel  $\alpha$  schließlich gibt die Drehung um die Z-Achse an, mit der die x- und y-Achse der Bildebene parallel zur X- und Y-Achse des Objektsystems ausgerichtet wird. Da Gleichung 2-1 den Übergang eines Punktes P vom Objektsystem in das beobachtete System (z.B.: Bildpunkt  $\mathbf{p}$ ) beschreibt, ist die Reihenfolge der Drehungen  $\alpha$ , dann  $\zeta$  und schließlich  $\kappa$ .

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\alpha \cdot \mathbf{R}_\zeta \cdot \mathbf{R}_\kappa \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Wie werden nun die Funktionen einzelner Beobachtungsarten (Bildpunkte, Passpunkte, Gestalten, ...) für eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten aus der räumlichen Ähnlichkeitstransformation abgeleitet?

### 2.3.2 Beobachtete Bildpunkte

Für einen beobachteten Bildpunkt beschreibt die perspektive Transformation den Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten. Der identische Referenzpunkt in beiden Koordinatensystemen ist objektseitig durch die Position des Aufnahmestandpunktes ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) festgelegt, bildseitig ist er durch die Lage des Projektionszentrum ( $x_0, y_0, c$ ) definiert. Da nun alle beobachteten Bildpunkte in der Bildebene liegen, ist ihre z-Koordinate gleich Null. Daher kann man in Gleichung 2-2 durch die dritte Zeile dividieren und erhält schließlich die Verbesserungsgleichungen der beobachteten Bildkoordinaten x und y.

$$\begin{aligned}\bar{x} = x + v_x &= x_0(adp) - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ \bar{y} = y + v_y &= y_0(adp) - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}\end{aligned}\quad \text{Gleichung 2-5}$$

Dabei gilt:

$\bar{x}, \bar{y}$  ..... ausgeglichene Bildkoordinaten  
 $v_x, v_y$  ..... Verbesserungen der gemessenen Bildkoordinaten

Man sieht, dass der Maßstabsfaktor  $\lambda$ , der bei der Zentralprojektion von Bildpunkt zu Bildpunkt variiert, aus Gleichung 2-1 eliminiert wird. Die zusätzlichen Parameter  $adp$  des inneren Referenzpunktes  $\vec{p}_0$  beschreiben - im Falle eines Photos - die Verzeichnung des Kamerasystems.

### 2.3.3 Beobachtete Passpunkte

Werden bei der Bündelblockausgleichung Passpunkte verwendet, so werden die Koordinaten ebenfalls als Beobachtungen in das Ausgleichungssystem eingeführt. Dies erreicht man, indem man für Gleichung 2-2 die idente Abbildung verwendet. Der Maßstabsfaktor  $\lambda$  wird in der Regel mit 1 angenommen und die Koordinaten von innerem und äußerem Referenzpunkt ( $\vec{p}_0$  und  $\vec{P}_0$ ) werden gleich gesetzt. Die Drehmatrix  $\mathbf{R}$  ist in diesem Fall die Einheitsmatrix. Dadurch vereinfacht sich Gleichung 2-2 ganz wesentlich und man erhält die Verbesserungsgleichungen von gegebenen Passpunktkoordinaten x, y, und z.

$$\begin{aligned}\bar{x} = x + v_x &= X \\ \bar{y} = y + v_y &= Y \\ \bar{z} = z + v_z &= Z\end{aligned}\quad \text{Gleichung 2-6}$$

Die Koordinaten der Referenzpunkte  $\vec{p}_0$  und  $\vec{P}_0$  können 0 gesetzt werden, doch ist es oft sinnvoller, Koordinatenwerte innerhalb des Interessensgebietes dafür zu verwenden. Dadurch erreicht man eine Reduktion der meist großen Landeskoordinaten, die im Berechnungsprozess numerisch ungünstig sind.

### 2.3.4 Gestaltbeobachtungen

Soll ein Objektpunkt nach der Ausgleichung auf einer bestimmten Kurve (Gerade, Kreis, Spline, ...) oder in einer Fläche (Ebene, Kugel, polynomiale Fläche, ...) liegen, kann dies durch die Verwendung von Gestalten erreicht werden. Im folgenden soll das Konzept von Gestaltbeobachtungen in ORIENT anhand einer Ebene veranschaulicht werden.

Die Forderung "der Punkt  $\vec{P}$  liegt in der Ebene  $\epsilon$ " kann durch die Beobachtung "der Normalabstand von  $\vec{P}$  zu  $\epsilon$  ist gleich 0" beschrieben werden. Dazu wird ein lokales System definiert, dessen xy-Ebene in  $\epsilon$  liegt. Der äußere Referenzpunkt  $\vec{P}_0$  kann willkürlich gewählt werden. Für den inneren Referenzpunkt  $\vec{p}_0$  gilt, dass er auf der z-Achse des lokalen Systems liegt,  $x_0$  und  $y_0$  daher 0 sind. Der frei wählbare Maßstabsfaktor  $\lambda$  wird auch hier meist 1 gesetzt. Die Drehmatrix  $\mathbf{R}$  ist bis auf die Drehung  $\kappa$  um die z-Achse definiert. Dieser Winkel ist ebenfalls frei wählbar, beispielsweise mit 0. Die Verbesserungsgleichung für die mit "0" beobachtete z-Koordinate lautet damit:

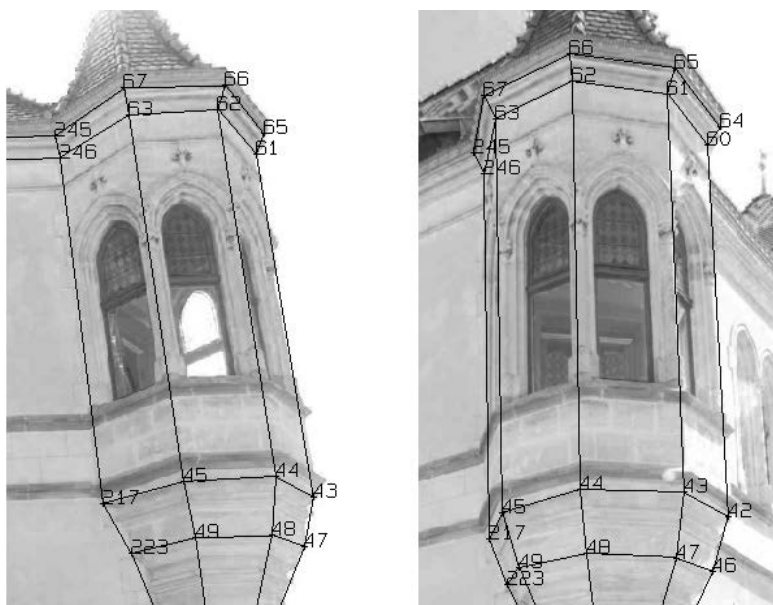
$$\bar{z} = 0 + v_z = z_0 + r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0) \quad \text{Gleichung 2-7}$$

In gleicher Weise kann eine xz- oder yz-Ebene definiert werden. Soll ein Objektpunkt auf einer Geraden liegen, so wird dieser fiktiv auf zwei zueinander orthogonal liegenden Ebenen beobachtet. Die ausgeglichene Gerade ergibt sich dann als Schnitt dieser beiden Ebenen. Auf ähnliche Art können allgemeine Kurven oder Flächen definiert und bei der Ausgleichung berücksichtigt werden. Für eine ausführliche Beschreibung sei auf [Kager, 1989] und [Kraus, 1996] verwiesen.

## 2.4 Verkürzung des Messprozesses

Wie oben erwähnt, stellen die gemessenen Bildkoordinaten homologer Punkte den Großteil der Beobachtungen dar. Die manuell durchgeführte Mehrbild-Monokomparator-Auswertung ist daher ein zeitaufwendiger und damit auch kostenintensiver Messprozess bei der Erstellung von photogrammetrischen Modellen. Während bei Luftbildauswertungen heute vielfach schon automatische "Matching"-Verfahren zur Bestimmung homologer Punkte zum Einsatz kommen, erfolgt bei terrestrischen Aufnahmen die Punktbestimmung nach wie vor meist interaktiv.

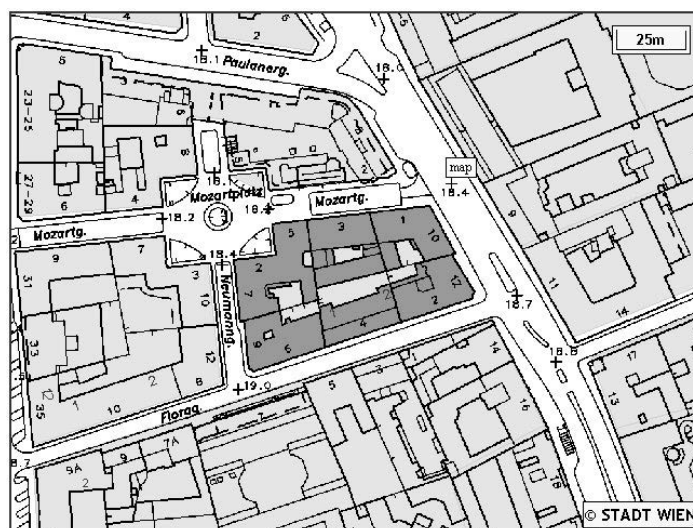
Ein Grund dafür ist, dass es im Fall der Luftbildauswertung "nur" um das Auffinden von markanten Punkten geht, die für eine Aerotriangulation oder zur Ableitung eines Geländemodells verwendet werden können. Im terrestrischen Fall dagegen ist man vor allem an einer interpretierenden Punktmessung interessiert (z.B. Traufenecke). Zwar lässt sich die Position solcher Punkte zum Teil auch in terrestrischen Aufnahmen automationsgestützt lokalisieren, doch ist eine automatische Zuordnung, aufgrund der mitunter stark konvergenten Aufnahmerichtungen bei Bündelblockanordnungen, nur in den seltensten Fällen möglich (Abbildung 2-4). Zudem weisen terrestrische Aufnahmen oftmals auch Schlagschatten auf.



**Abbildung 2-4: Unterschiedliche Ansichten desselben Erkers von stark konvergierenden Aufnahmerrichtungen.**

Um den Messprozess zu verkürzen und die Herstellung von Photomodellen kostengünstiger zu gestalten, muss also ein anderer Ansatz gewählt werden; folgende Überlegung spielen dabei eine Rolle: Im Allgemeinen kann die Form eines Gebäudes (oder eines künstlichen Objektes) durch Zusammensetzen von einfachen Flächenteilen, wie etwa Ebenen, Zylinder oder Kegel, gut angenähert werden. Zusätzlich können Annahmen über die Lage von bestimmten Teilflächen getroffen werden. Einige werden zueinander parallel oder orthogonal sein, andere werden horizontale oder vertikale Ausrichtung haben. Durch eine Objektrekonstruktion basierend auf solchen geometrischen Annahmen kann der photogrammetrische Messaufwand erheblich reduziert werden.

Das folgende praktische Beispiel zur Erläuterung wurde im Rahmen einer Diplomarbeit bearbeitet und im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit untersucht [Gaupmann, 1999]. Es handelt sich dabei um einen Gebäudeblock in der Nähe der Technischen Universität Wien. Er ist von der Favoritenstraße, Floragasse, Neumanngasse und der Mozartgasse umschlossen (Abbildung 2-5).



**Abbildung 2-5: Grundriss des Gebäudeblocks**



Zur Rekonstruktion wurden in einem Fall 36 Digitalaufnahmen herangezogen. In diesen wurden mehr als 1500 Bildpunkte gemessen und der gesamte Gebäudekomplex ohne Gestalten mit 512 Objektpunkten modelliert. Die gesamte Dauer der Bildmessung betrug dabei 33,5 Stunden. Im anderen Fall wurde überprüft, wie wenige Bildbeobachtungen bei Zuhilfenahme von fiktiven Gestaltbeobachtungen zur Berechnung notwendig sind, um eine rasche und kontrollierte Visualisierung zu erhalten. Dabei stellte sich heraus, dass nur mehr Bildmessungen in 32 Aufnahmen notwendig waren. Dadurch konnte die Anzahl der Beobachtungen auf 72 % und die Dauer der Bildmessungen sogar auf 55 % reduziert werden.

Ebenfalls untersucht wurde, ob die Annahme, dass bestimmte Objektpunkte in einer Fassadenebene liegen, gerechtfertigt ist. Dazu wurden unabhängige geodätische Kontrollmessungen durchgeführt und deren ausgleichende Ebene berechnet. Der Vergleich mit den ausgeglichenen Parametern der Gestalten ergab in allen Fällen eine Abweichung von einer Vertikalebene um weniger als 0,5 gon. Auch die Untersuchungen bezüglich Parallelität und Orthogonalität ergaben eine räumliche Punktverschiebung von maximal 6 cm. Für den untersuchten Gebäudeblock ergab sich also keine signifikante Deformation des Objekts aufgrund falsch getroffener Gestaltannahmen.

Der gezielte Einsatz von fiktiven Gestaltbeobachtungen führt aber nicht nur zu einer Zeitersparnis bei der Auswertung, in bestimmten Fällen ist es auch möglich, aufgrund einer solchen Messstrategie gänzlich auf einige Aufnahmen zu verzichten. (Abbildung 2-6) Objektpunkte in Einsprünge können nämlich als Schnitt von Ebenen mit Projektionsstrahlen aus einem einzigen Photo bestimmt werden. Damit wird sowohl im Außendienst, als auch bei der Auswertung zusätzlich Zeit eingespart.



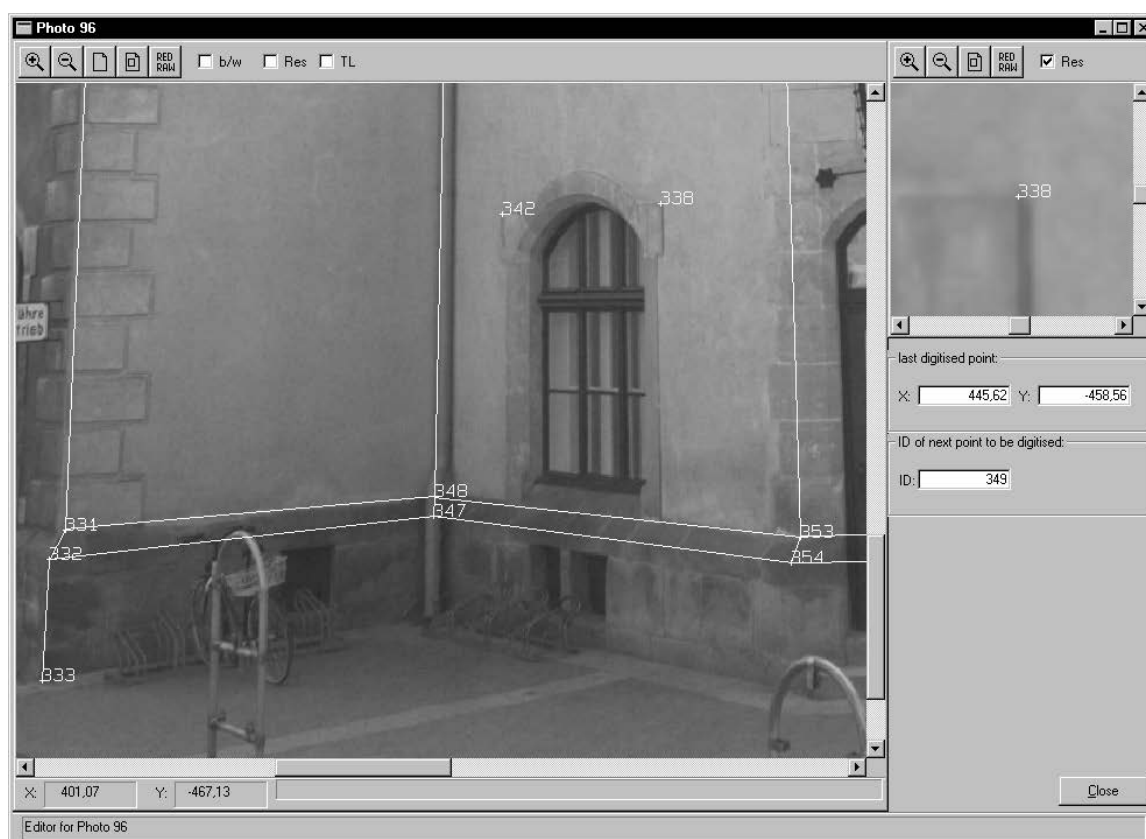
**Abbildung 2-6: Bei einem solchen Objekt (Kirche Wartberg im nördlichen Niederösterreich) sind für die Modellierung der vielen Einsprünge auf herkömmliche Art sehr viele Aufnahmen notwendig.**

Bei der Realisierung eines solchen Modellierungsansatzes muss man sich allerdings bewusst sein, dass Beobachtungen durch Annahmen ersetzt werden. In obigem Beispiel verringert sich die Redundanz von 1577 auf 812, also um fast 50 %. Das scheint im Widerspruch zur Photogrammetrie zu stehen, wo versucht wird, durch sehr viele Beobachtungen eine große Überbestimmung zu erreichen und damit die Zuverlässigkeit des Ergebnisses zu steigern.

Durch die Verwendung von Phototextur (siehe Kapitel 4) besteht jedoch die Möglichkeit einer Endkontrolle direkt am Photomodell. Sollten Orientierungs- oder Modellierungsfehler vorhanden

sein, wird die Textur aus den verwendeten Photos falsch auf die modellierten Teilflächen abgebildet. Eventuelle Fehler können also bei kritischer Betrachtung des Photomodells leicht geortet und korrigiert werden.

Man beachte außerdem, dass die Verwendung von Gestalten nicht nur den Messaufwand reduziert, sondern in einigen Situationen die sinnvolle Modellierung eines Objektes überhaupt erst ermöglicht [Dorffner & Forkert, 1998]. Ein Beispiel so einer Situation soll anhand der folgenden Abbildung (Abbildung 2-7) erläutert werden.



**Abbildung 2-7: Einsatz von Gestaltinformationen für die Modellierung einer einspringenden Hausecke**

Die Punkte 347 und 348 befinden sich hinter dem Fallrohr der Regenrinne und können daher im Bild nicht gemessen werden. Erst mit Hilfe von Gestalten wird ihre Bestimmung und damit die Modellierung dieser einspringenden Hausecke möglich.

Durch die in mehreren Bildern sichtbaren – und damit räumlich bestimmbaren – Punkte 338 und 342 kann eine vertikale Ebene für die rechte Mauer definiert werden. Zur Modellierung der rechten Sockelebene – parallel zur rechten Mauer und ebenfalls vertikal – genügt die Kenntnis eines einzigen räumlichen Punktes (354). Die Lage der linken Mauer und der linken Sockelebene – orthogonal auf die rechten – sind ebenfalls durch je einen Punkt (331 bzw. 333) definiert. Durch Verschneidung der linken und rechten Ebenen mit je einer horizontalen Ebene durch die bereits bekannten Punkte 331 und 354, können die nicht sichtbaren Punkte 347 und 348 berechnet werden.

### 3 Topologie

Zur Geometrie eines Objektes gehört neben der Metrik auch die Topologie. "Die Topologie beschreibt die Nachbarschaftsbeziehungen. Eine typische topologische Information ist die Angabe der Reihenfolge von Punkten innerhalb einer Linie, die in ihrer Metrik koordinatenmäßig festgelegt sind. Zur Topologie in diesem Zusammenhang gehört auch, ob es ein geschlossener Polygonzug (z.B. Gebäude) oder ein offenes Liniennetz (z.B. Flussnetz) ist." (aus [Kraus, 2000]) Das eigentliche 3D Modell entsteht also durch Definition von Verbindungsinformation zwischen den koordinatenmäßig erfassten Punkten. Bevor näher auf diesen Schritt eingegangen wird, soll zunächst ein Überblick über verschiedene andere Möglichkeiten von 3D Objektmodellierung gegeben werden.

#### 3.1 Modellierung von 3D Objekten

##### 3.1.1 Metaball Objekte

Metaball Objekte (oder Blobs) zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine fixe Gestalt haben. Sie werden unter anderem bei der Modellierung von molekularen Strukturen, Wassertropfen oder Schmelzvorgängen verwendet. Im Gegensatz zu den im folgenden genannten Methoden handelt es sich bei dieser Art der Modellierung um eine implizite Darstellung, bei der die Objektoberfläche als 2D Menge von Nullstellen definiert ist. Man erhält sie also als Isofläche der Form  $f(x, y, z) = 0 \mid (x, y, z) \in R^3$ .

Ein solches Objekt wird durch ein oder mehrere Stützpunkte  $k$  definiert. Jeder dieser koordinatenmäßig festgelegten Stützpunkte übt nun auf seine Umgebung einen Einfluss aus, der mit zunehmender Entfernung vom Stützpunkt abnimmt. Die Summe aller Einflüsse ergibt dann eine Dichtefunktion. Der Einflussbereich wird meist isotrop angenommen und durch eine Funktion beschrieben. Die bekannteste solche Funktion ist die Gauß'sche Glockenkurve, doch werden auch quadratische oder kubische Polynome verwendet, weil hier der Einflussbereich nicht bis ins Unendliche reicht.

Zur Ermittlung der Objektoberfläche wird dann ein Schwellwert  $T$  festgelegt und die entsprechende Isofläche ermittelt (Gleichung 3-1), zum Beispiel mit Hilfe des "marching cube" - Algorithmus [Lorensen & Cline, 1987].

$$f(x, y, z) = \sum_k b_k e^{-a_k r_k^2} - T = 0 \quad \text{Gleichung 3-1}$$

dabei gilt:  $r_k^2 = x_k^2 + y_k^2 + z_k^2$

##### 3.1.2 Sweep Modelle

Sweeps entstehen durch Bewegung einer 2D Grundform (Leitkurve) entlang eines 3D Erzeugungspfades (Abbildung 3-1). Die Beschreibung eines solchen Objektes setzt sich aus der Beschreibung der 2D Grundform und des Erzeugungspfades zusammen. Es wird also quasi die "Entstehungsgeschichte" abgespeichert. Sweeps eignen sich gut zur Beschreibung von Objekten mit symmetrischen Eigenschaften. Ein einfaches Beispiel dafür ist ein offener Zylinder. Hier wird ein Kreis als Grundform entlang einer Geraden verschoben (Translations-Sweep) und auf

diese Art der Zylindermantel beschrieben. Das gleiche Objekt kann man auch durch Drehung einer Erzeugenden um die Zylinderachse beschreiben (Rotations-Sweep).



**Abbildung 3-1: Erzeugung eines Translations- und Rotations-Sweep**

Sowohl Grundform als auch Erzeugungspfad können natürlich auch von komplexer Gestalt sein. Damit lassen sich gewisse komplizierte Objektformen einfach erzeugen, die sonst nur schwer zu modellieren sind. Lässt man nur translatorische Sweeps orthogonal zur Ebene der Leitkurve zu, so erhält man sogenannte Extrusionsmodelle, wie sie im CAD Bereich verwendet werden..

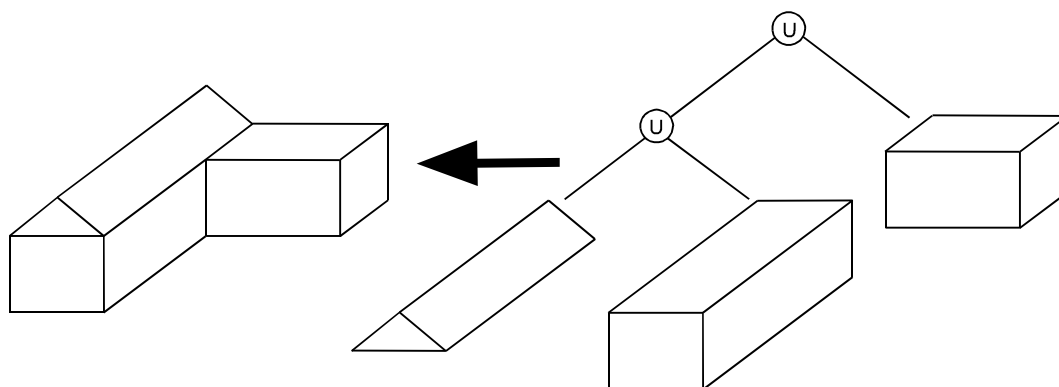
Es ist jedoch schwierig komplexe Sweeps ausschließlich mit Hilfe von Bildmessungen zu modellieren; das Rendern für die Visualisierung ist ebenfalls kompliziert. Auch für Internet Anwendungen sind sie kaum einsetzbar, da sie von meisten Viewern nicht unterstützt werden.

### 3.1.3 CSG Modelle

Die Bezeichnung CSG steht für "constructive solid geometry". Die Grundlage dieser Art der Objektmodellierung sind einfache geschlossene geometrische Grundkörper (Primitive), die in ihrer Form vorgegeben und durch Parameter beschrieben sind. Solche Primitive sind zum Beispiel Quader, Prisma, Tetraeder, Kegel, Zylinder oder Kugel. Durch Wahl geeigneter Parameter können "Instanzen" dieser Primitive erzeugt und im Raum "platziert" werden.

Komplexe Objekte entstehen dann durch Kombination der verschiedenen Instanzen der Primitive mit Hilfe von Mengen-Operationen wie sie aus der Booleschen Algebra bekannt sind. Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung von booleschen Operatoren ist eine eindeutige Unterscheidung zwischen "innen" und "außen" der beteiligten Objekte. Die zur Anwendung kommenden Operatoren sind Vereinigung ( $A \cup B$ ), Schnittmenge ( $A \cap B$ ), Differenz ( $A \setminus B$ ) und Komplement ( $\bar{A}$ ). Diese können mehrfach verkettet auf Objekte angewandt werden.

Der gesamte Konstruktionsvorgang zur Erzeugung eines komplexen Objektes kann daher in Einzelschritte zerlegt werden, an denen jeweils nur maximal zwei Teilobjekte beteiligt sind. Damit ist es möglich, das Objekt durch einem baumförmigen Graphen (CSG Baum) darzustellen (Abbildung 3-2). Dabei repräsentieren die Blätter des Baumes die geometrischen Primitive und die inneren Knoten entweder logische Operationen ( $\cup$ ,  $\cap$ , ...) oder geometrische Operationen (Verschiebung, Drehung, ...). Ähnlich wie bei Sweeps werden also komplexe Objekte ebenfalls durch Ihre "Entstehungsgeschichte" beschrieben.



**Abbildung 3-2:** aus [Rottensteiner, 2001]: **Darstellung eines Objektes durch einen CSG Baum**

CSG Modelle werden häufig in industriellen Anwendungen zur Konstruktion mechanischer Teile verwendet. Ihre Verwendung gewährleistet nämlich, dass nach jeder Operation das Ergebnisobjekt eine gültige Geometrie besitzt.

Auch zur Gebäudemodellierung sind CSG Bäume gut einsetzbar, vor allem für grobe 3D Stadtmodelle, wo eine starke Generalisierung der Einzelobjekte möglich ist. Für Detailauswertungen ist die Modellierung mittels CSG allerdings schwierig, da hier sehr viele Primitive verwendet werden müssen. Außerdem kann die im groben gültige Ähnlichkeit zwischen Gebäuden nicht mehr ausgenützt werden.

So einfach die Repräsentation von Objekten mit Hilfe von CSG Bäumen ist, für Visualisierungen kann die CSG Datenstruktur nicht direkt verwendet werden. Hierfür kann zum Beispiel ein B-Rep Modell (siehe Kapitel 3.1.4) aus dem CSG Modell abgeleitet werden. Das Erzeugen von Eckpunkten, Kanten und Flächen der Geometrie ist allerdings mit großem Rechenaufwand verbunden, da alle Primitive untereinander verschnitten werden müssen.

### 3.1.4 B-Rep Modelle

Hier wird die Geometrie eines Objektes durch seine Oberfläche beschrieben. Bei dieser Oberflächendarstellung (**B**oundary **R**epresentation) bilden die Eckpunkte (Knoten, vertex), die durch ihre Koordinaten gegeben sind, die Basis der Geometrie. Die weiteren Grundelemente sind die Kante (edge) und die Fläche (face). Dabei stellt eine Kante die Verbindung zwischen zwei Knoten dar und eine Fläche ein aus Kanten gebildetes Polygon. Das Objekt (Körper, solid) setzt sich schließlich aus vielen zusammenhängenden Flächen zusammen.

Mit Hilfe von B-Rep Modellen lassen sich beliebig komplexe Objekte modellieren. Durch die zentrale Bedeutung der Knoten als Träger der geometrischen Information sind B-Rep Modelle bestens geeignet, um im Zuge einer photogrammetrischen Auswertung gewonnen zu werden. Im nächsten Kapitel über Datenstrukturen wird daher auf dieser Art der Objektbeschreibung besonders eingegangen.

## 3.2 3D Datenstrukturen

Für die interne Darstellung der geometrischen und topologischen Daten der rekonstruierten Objekte müssen geeignete Datenstrukturen verwendet werden. Die am häufigsten zum Einsatz kommenden Datenstrukturen sollen im folgenden vorgestellt werden.

### 3.2.1 Punktwolken

Hier wird das Objekt einfach durch die Menge von Punkten, deren Position im Raum durch ihre Koordinaten  $(x, y, z)$  festgelegt ist, repräsentiert. Dabei existiert keine direkte Information über Nachbarschaften, Oberfläche oder Volumen des Objektes.

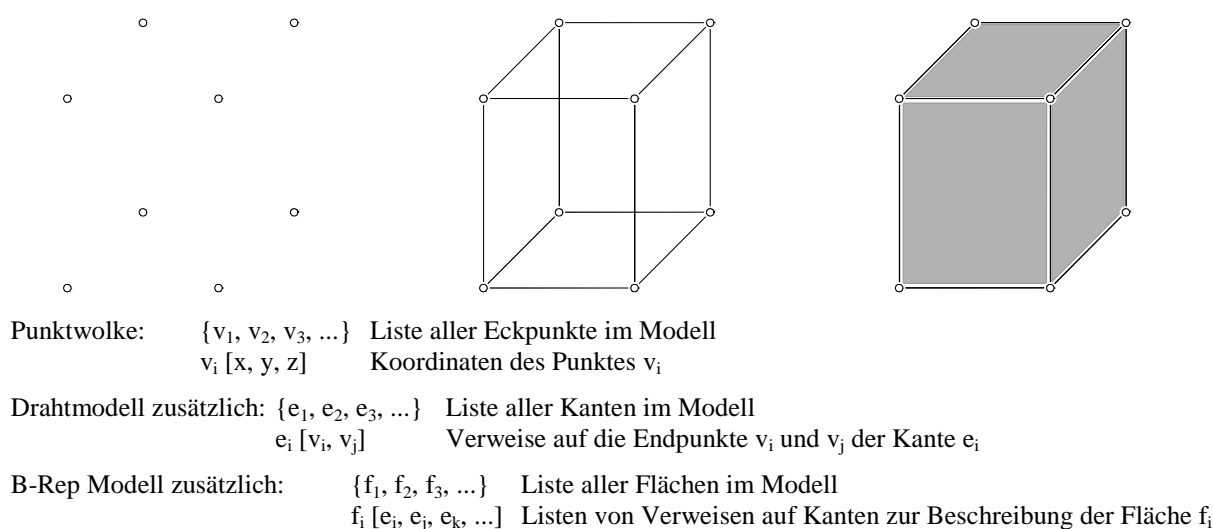
Die Darstellung von Punktwolken ist ganz einfach, da man nur die Punkte in die Bildebene projizieren muss. Daher wurde diese Art der Darstellung vor allem in den Anfängen der Computergrafik eingesetzt. Um gekrümmte Oberflächen hinreichend exakt zu repräsentieren, benötigt man allerdings eine sehr große Anzahl von Punkten.

Heute entstehen solche Punktwolken beim Digitalisieren oder durch automatische Datenerfassung zum Beispiel durch Laserscanner. Dabei ergeben sich zum Teil so hohe Punktdichten, dass man beim Rendern eines Bildes manchmal mehr Polygone verwendet als Pixel. In derartigen Situationen ist die Verwendung von Punkten oft effizienter als die Berechnung von Polygonen, die nur ein Pixel groß sind. Daher wurden in letzter Zeit auch neue Rendering-Algorithmen und Softwarepakete auf Basis von Punkten entwickelt. [Pfister et al., 2000], [Grossman & Dally, 1998].

### 3.2.2 Drahtmodelle

Die Idee bei der Verwendung von Drahtmodellen (wireframes) besteht darin, möglichst die gesamte geometrische Information in den Eckpunkten der Objekte zu konzentrieren. Zur topologischen Beschreibung von Objekten werden nur die Kanten zwischen den Eckpunkten verwendet, die als Graph gespeichert werden. Man besitzt in solchen Modellen keine Information über Oberfläche oder Volumen des Objektes.

Die Visualisierung von Drahtmodellen ist ähnlich einfach wie bei Punktwolken. Alle Eckpunkte werden in die Bildebene projiziert und durch ihre Kanten verbunden. Durch die Darstellung von Linien, die eigentlich durch Flächen verdeckt sind, entsteht aber oft ein schwer zu interpretierendes Bild aus Linien. So ist es in der mittleren Abbildung 3-3 in nicht möglich zu sagen, ob der Quader von rechts oben oder von links unten betrachtet wird.



**Abbildung 3-3: Gegenüberstellung der Datenstrukturen zur Beschreibung eines Quaders als Punktwolke, Drahtmodell und B-Rep**

### 3.2.3 B-Rep Datenstruktur

Wie in Kapitel 3.1.4 erwähnt werden hier Objekte vollständig durch ihre Oberflächen beschrieben, wobei man sich sehr oft auf Objekte beschränkt, die durch Polyeder approximiert werden können. Das bedeutet, dass am Objekt nur gerade Kanten vorkommen und dass alle Flächen durch geschlossene ebene Polygone begrenzt sind.

In der B-Rep Datenstruktur werden neben den Flächen (*faces*) auch die Kanten (*edges*) und Eckpunkte (*vertices*), sowie ihre topologische Beziehung zueinander mit aufgenommen. Als Graph betrachtet bilden die *vertices*, *edges* und *faces* die Knoten, während die Kanten des Graphen die nachbarschaftlichen Beziehung der Knoten beschreiben.

Neben den Koordinaten der Eckpunkte, die im Element *vertex* gespeichert sind, können noch weitere geometrische Informationen in den Knoten abgelegt werden, um später die Berechnungen zu beschleunigen. Die häufigste Form einer solchen Zusatzinformation ist der Normalvektor der Fläche, der im topologischen Element *face* gespeichert wird. Dabei werden die Vektoren normalerweise so orientiert, dass sie "Außen" zeigen. Es ist aber auch möglich die Form der Fläche durch eine implizite oder explizite Flächengleichung vorzugeben, oder die Form einer Kante durch eine Spline-Funktion oder einen Kreisbogen. Damit fällt bei der Objektmodellierung die Einschränkung auf Polyeder weg. Meist wird man aber dann direkt auf eine andere Datenstruktur übergehen, die es auch erlaubt nichtmannigfaltige Objekte zu modellieren [Weiler, 1986].

Die meisten Algorithmen für B-Rep Modelle sind nur für Objekte geeignet, bei denen geschlossene, orientierbare, zweidimensionale Mannigfaltigkeiten gegeben sind. Zweidimensional mannigfaltige Objekte sind solche, bei denen die Umgebung jedes beliebigen Punktes der Oberfläche homöomorph (d.h. bijektiv und in beiden Richtungen stetig aufeinander abbildbar) zur Kreisscheibe ist [Eshete et al., 1996]. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn jede Kante genau zwei benachbarte Flächen besitzt. Orientierbar bedeutet in diesem Zusammenhang, dass für alle Flächen ein Umlaufsinn definiert werden kann, so dass die gemeinsame Kante zweier benachbarter Flächen in jeder dieser Flächen einen entgegengesetzten Umlaufsinn hat [Mäntylä, 1988].

Damit ergeben sich folgende Anforderungen an eine B-Rep Datenstruktur:

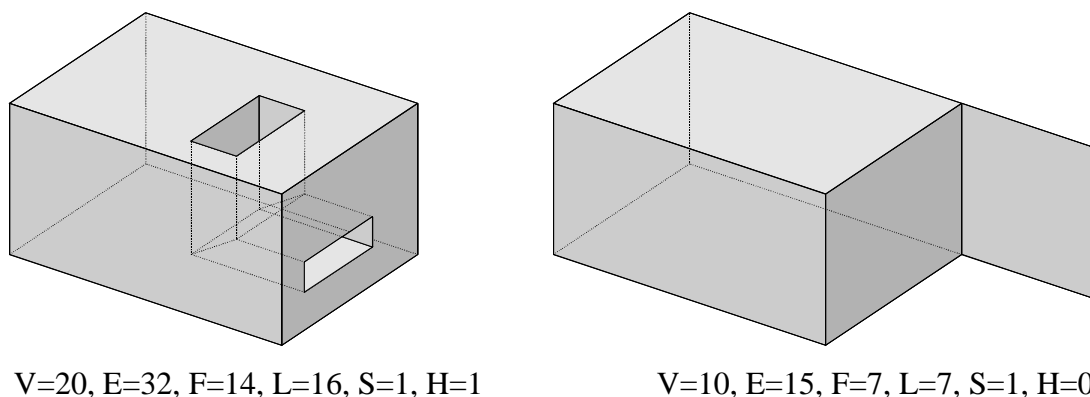
- Ein Objekt besteht aus einer Liste von Flächen, die miteinander verbunden sind und eine geschlossene, orientierbare, zweidimensionale Mannigfaltigkeit bilden.
- Jede Fläche wird durch eine Liste von Kanten begrenzt. Die Kanten einer Fläche sind sortiert und bilden einen geschlossenen Polygonzug (Schleife, *loop*).
- Jede Schleife hat einen definierten Umlaufsinn. Dadurch wird für das Objekt eine Unterscheidung zwischen "Innen" und "Außen" möglich.
- Jede Kante besitzt genau zwei benachbarte Flächen, die sich in der Kante schneiden.
- Die gemeinsame Kante zweier benachbarter Flächen hat in jeder dieser Flächen einen entgegengesetzten Umlaufsinn.
- Flächen dürfen sich nur in Kanten und Eckpunkten schneiden.
- Jede Kante verbindet genau zwei benachbarte Eckpunkte.
- Jeder Eckpunkt hat eine Liste von mindestens drei Kanten, die sich alle in diesem Punkt schneiden.

Komplexe Objekte können auch Löcher oder Hohlräume enthalten. Dazu werden neben den topologischen Elementen *vertex*, *edge* und *face* noch die Elemente Schleife (*loop*), Durchbruch (*hole*) und Schale (*shell*) verwendet. Jede Fläche (*face*) besitzt eine äußere Schleife (*outer loop*) und gegebenenfalls noch zusätzliche innere (*inner loops*). Die *inner loops* haben entgegengesetzten Umlaufsinn und begrenzen damit Löcher innerhalb einer Fläche. Eine zusammenhängende Menge von *faces* wird als Schale (*shell*) bezeichnet. Ein Würfel mit einem Hohlraum im Inneren besitzt daher beispielsweise zwei *shells*, eine äußere Schale, die dem normalen Würfel entspricht, und eine inneren Schale, die den inneren Hohlraum umschließt. Durchbrüche durch die Schale des Objektes werden als *hole* oder *genus* bezeichnet. Eine Polyederapproximierung eines Torus besitzt also ein *hole*.

Eine wichtige Forderung beim Arbeiten mit B-Rep Modellen ist, dass das Ergebnis einer Operation (Vereinigung, Durchschnitt, ...), die auf ein Objekt dieser Datenstruktur angewandt wird, wiederum ein Objekt ist, das durch eine B-Rep Datenstruktur beschrieben werden kann. Eine einfache Methode, die topologische Gültigkeit des Ergebnisses einer Operation zu überprüfen, ist die Verwendung der Euler-Poincaré Formel (Gleichung 3-2), die den Zusammenhang zwischen *vertex* (V), *edge* (E), *face* (F), *loop* (L), *shell* (S) und *hole* (H) herstellt.

$$V - E + F - (L - F) - 2 \cdot (S - H) = 0 \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Erfüllung dieser Formel für alle gültigen geschlossenen, orientierbaren, zweidimensional mannigfaltigen Objekte zwar notwendig, aber nicht hinreichend ist. Wenn also das Ergebnis der Euler-Poincaré Formel ungleich Null ist, so ist das Objekt definitiv topologisch nicht gültig, umgekehrt garantiert aber ein Ergebnis von Null nicht, dass es sich um eine gültige Objektrepräsentation handelt. Diese Überprüfung kann durch die Anwendung des Homöomorphismus erfolgen [Eshete et al., 1996].



**Abbildung 3-4: Beide Objekte erfüllen die Euler-Poincaré Formel, obwohl das rechte Objekt nicht zweidimensional mannigfaltig ist**

Für B-Rep Datenstrukturen existieren Operationen, welche die Einhaltung der Euler-Poincaré Formel gewährleisten. Die zugehörigen Basisoperatoren werden als Euler-Operatoren bezeichnet. Es kann gezeigt werden, dass drei lokale topologische Operatoren - und ihre dazugehörigen inversen Operatoren - ausreichen, um alle Manipulationen mit B-Reps durchführen zu können [Mäntylä, 1988]. Diese sind:

1. Einfügen eines Eckpunktes: Dabei wird ein bestehender Eckpunkt quasi in zwei Punkte zerlegt, die durch eine Kante miteinander verbunden sind. Dabei müssen auch Flächen und Schleifen entsprechend angepasst werden. Der inverse Operator löscht einen Eckpunkt aus



der Datenstruktur, indem zwei benachbarte Punkte zu einem zusammengefasst werden und die entsprechende Kante gelöscht wird.

2. Einfügen einer Fläche: Eine vorhandene Fläche wird durch Einfügen einer Kante in zwei zerlegt. Die Eckpunkte der neuen Kante müssen dabei auf der äußeren Schleife der Fläche liegen. Der inverse Operator vereint zwei benachbarte Flächen, indem er ihre gemeinsame Kante löscht.
3. Einfügen einer Schleife: Durch Löschen einer Kante wird eine bestehende Schleife in zwei zerlegt, die beide zur gleichen Fläche gehören. Daher wird immer nur eine neue innere Schleife erzeugt. Diese Operation kann nur dann durchgeführt werden, wenn die Kante spezielle Anforderungen erfüllt, in der Hinsicht, dass ihre beiden benachbarten Flächen gleich sind. Bei der inversen Operation wird eine innere Schleife entfernt, indem sie mit einer anderen inneren oder äußeren Schleife durch eine Kante verbunden wird.

Zusätzlich gibt es noch zwei paarweise inverse Operatoren, mit denen ein Objekt in seiner primitivsten Form (Prototyp) erzeugt und gelöscht werden kann. Ein solcher Prototyp besitzt nur eine Fläche ( $F=1$ ), bestehend aus einem einzigen Punkt ( $V=1$ ). Die Fläche hat eine äußere Schleife ( $L=1$ ) aber keine Kante ( $E=0$ ). Das Objekt hat daher eine Schale ( $S=1$ ) und natürlich keinen Durchbruch ( $H=0$ ), erfüllt aber bereits die Euler-Poincaré Formel (Gleichung 3-2). Außerdem werden noch globale Operatoren benötigt um ein Gesamtobjekt in zwei unabhängige zu zerlegen, oder um einen Durchbruch in einem Objekt zu schaffen.

### 3.2.4 Half-Edge-Datenstruktur

Das Arbeiten mit der einfachen hierarchischen Struktur der B-Rep ist nicht immer sinnvoll. Will man zum Beispiel zu einer gegebenen Fläche die benachbarten Flächen ermitteln, so kann das nur durch Überprüfung aller anderen Flächen in der Datenstruktur erfolgen. Wie man außerdem aus obiger Aufzählung der Euler-Operatoren erkennt, hat die Kante bei allen Operationen eine wesentliche Bedeutung, obwohl es keinen eigenen Euler-Operator für sie gibt. Aus diesen und ähnlichen Gründen ist die heute sehr weit verbreitete Winged-Edge-Datenstruktur entstanden [Baumgart, 1975], bei der die Kante die zentrale Datenstruktur eines Objektes bildet. Eine Erweiterung bildet die Half-Edge-Datenstruktur, wo noch ein zusätzliches topologisches Element, die Halbkante (*halfedge*) verwendet wird.

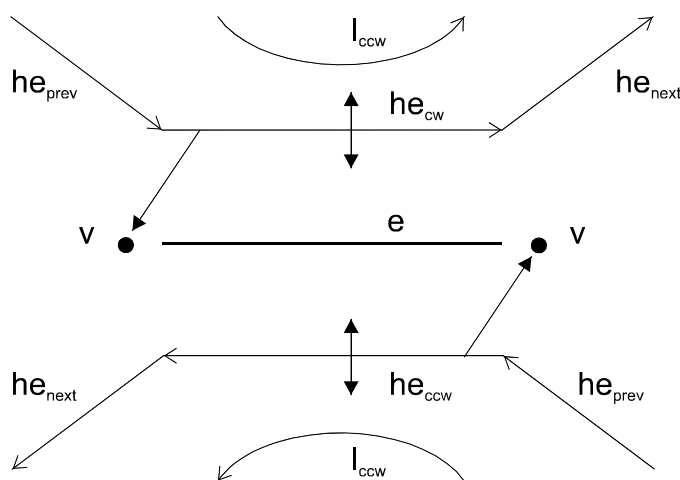


Abbildung 3-5: Zentrale Bedeutung der Halbkante in der Half-Edge Datenstruktur

In der Half-Edge-Datenstruktur bildet die Halbkante *he* die zentrale Rolle in der Datenstruktur (Abbildung 3-5). Sie beschreibt ein gerichtetes Segment einer Schleife und "zerlegt" quasi die

Kante in zwei entgegengesetzte Teile. Über sie hat man Zugriff auf ihren Ausgangspunkt  $v$ , ihre Schleife  $l$  und ihre Kante  $e$ . Außerdem existiert noch die Information über ihre Vorgänger- ( $he_{prev}$ ) und Nachfolger-Kante ( $he_{next}$ ). Jede Kante besitzt zwei gegengleiche Halbkanten. Aufgrund dieser entgegengesetzten Orientierung, kann unterschieden werden, ob eine Schleife - und somit auch eine Fläche - in Bezug auf die Richtung der Halbkante rechts (positiv, *counterclockwise ccw*) oder links (negativ, *clockwise cw*) liegt. Bei der Repräsentation einer Kante wird also ausgenutzt, dass es bei einer zweidimensionalen Mannigfaltigkeit zu jeder Kante nur genau zwei benachbarte Flächen geben kann.

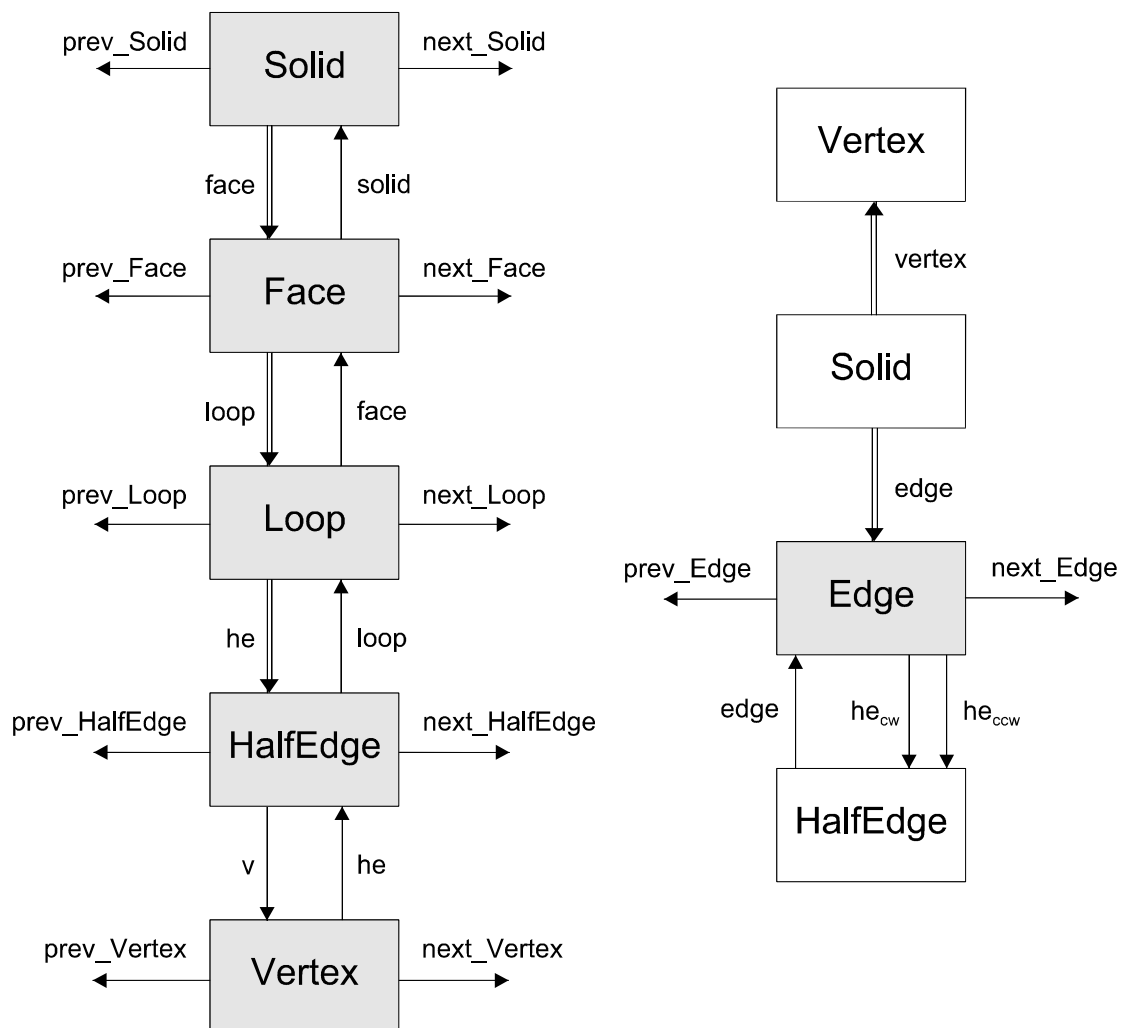


Abbildung 3-6: Hierarchische Darstellung der Half-Edge Datenstruktur

Der Aufbau der gesamte Half-Edge Datenstruktur ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Alle topologischen Elemente (*face*, *loop*, *halfedge*, *edge* und *vertex*) sind in Listen angeordnet. Um die Navigation innerhalb der Datenstruktur zu beschleunigen werden sie als doppelt verkettete Listen realisiert, so dass jedes Element einen Verweis auf seinen Vorgänger und auf seinen Nachfolger besitzt.

- Das Objekt (*solid*) stellt die Wurzel der Half-Edge Datenstruktur dar. Es besitzt eine Liste von Punkten, Kanten und Flächen. Da mehrere Objekte gleichzeitig existieren können, werden diese ebenfalls in einer Liste verwaltet.

- Die Flächen (*face f*) ist in Form eines geschlossenen ebenen Polygons gegeben. Sie besitzt eine Liste von Schleifen und hat einen Verweis auf das Objekt, das sie bildet. Die äußere Schleife (*outer loop*) wird zusätzlich besonders vermerkt.
- Die Schleife (*loop l*) beschreibt eine Randkurve einer Fläche. Je nach Lage handelt es sich dabei um eine äußere oder inner Schleife. Sie besitzt eine Ringliste von Halbkanten, sowie einen Verweis auf die ihr zugeordnete Fläche.
- Die Halbkante (*halfedge he*) repräsentiert ein gerichtetes Liniensegment einer Schleife. Sie hat Verweise auf ihre Schleife, auf ihre Kante und auf den Eckpunkt, von dem sie ausgeht. Da eine Schleife immer geschlossen ist, muss jede Halbkante immer einen Vorgänger und einen Nachfolger haben, so dass die Liste weder Anfang noch Ende besitzt, sondern einen Ring bildet.
- Die Kante (*edge e*) verbindet zwei Halbkanten miteinander. Sie besitzt Verweise auf ihre beiden Halbkanten, die entgegengesetzt orientiert sind.
- Der Eckpunkt (*vertex v*) schließlich hat einen Verweis auf eine beliebige von ihm ausgehende Halbkante.

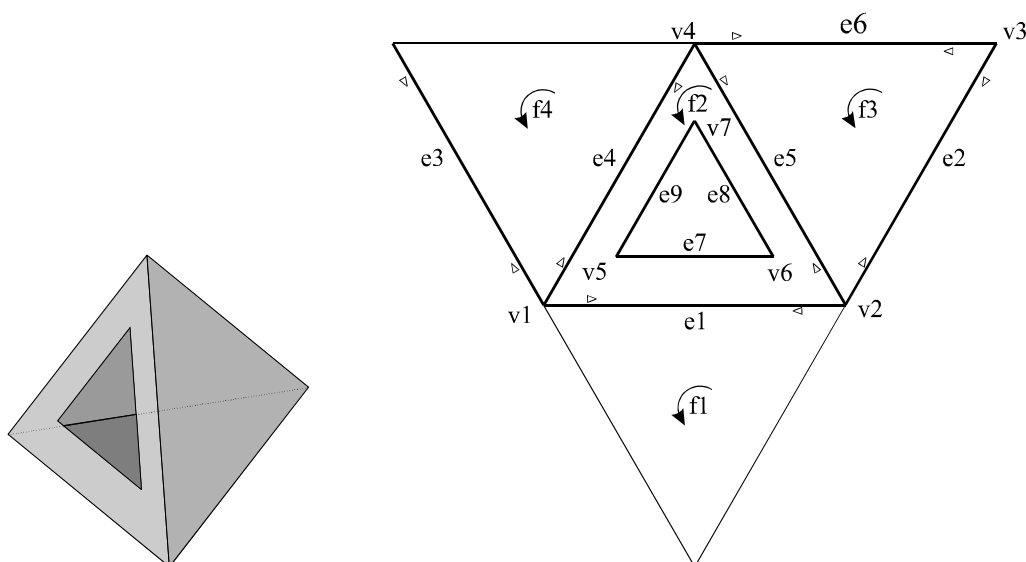


Abbildung 3-7: Tetraeder mit Loch in einer Seitenfläche – Graph der Half-Edge Datenstruktur

Das obigen Beispiel soll die Zusammenhänge in der Half-Edge Datenstruktur verdeutlichen. In der nachfolgenden Tabelle sind die Verweise für alle topologischen Elemente des Beispiels in Abbildung 3-7 angegeben. Die Nummerierung der Halbkanten erfolgte auf Basis der Punktnummern der zugehörigen Kante. Die Halbkante *he23* beispielsweise geht also vom Punkt *v2* aus und zeigt in Richtung des Punktes *v3*.

**Solid-Liste**

S	next	prev	f	E	V
<i>s1</i>	<i>null</i>	<i>null</i>	<i>f1</i>	<i>e1</i>	<i>v1</i>

**Face-Liste**

F	next	prev	s	l	outer-loop
<i>f1</i>	<i>2</i>	<i>null</i>	<i>s1</i>	<i>l1</i>	<i>l1</i>
<i>f2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>s1</i>	<i>l5</i>	<i>l2</i>
<i>f3</i>	<i>4</i>	<i>2</i>	<i>s1</i>	<i>l3</i>	<i>l3</i>

**Half-Edge-Liste**

HE	next	prev	l	e	v
<i>he13</i>	<i>he32</i>	<i>he21</i>	<i>l1</i>	<i>e3</i>	<i>v1</i>
<i>he32</i>	<i>he21</i>	<i>he13</i>	<i>l1</i>	<i>e2</i>	<i>v3</i>
<i>he21</i>	<i>he13</i>	<i>he32</i>	<i>l1</i>	<i>e1</i>	<i>v2</i>
<i>he12</i>	<i>he24</i>	<i>he41</i>	<i>l2</i>	<i>e1</i>	<i>v1</i>
<i>he24</i>	<i>he41</i>	<i>he12</i>	<i>l2</i>	<i>e5</i>	<i>v2</i>
<i>he41</i>	<i>he12</i>	<i>he24</i>	<i>l2</i>	<i>e4</i>	<i>v4</i>
<i>he23</i>	<i>he34</i>	<i>he42</i>	<i>l3</i>	<i>e2</i>	<i>v2</i>

<i>f4</i>	<i>null</i>	<i>3</i>	<i>s1</i>	<i>l4</i>	<i>l4</i>	<i>he34</i>	<i>he42</i>	<i>he23</i>	<i>l3</i>	<i>e6</i>	<i>v4</i>
<b>Loop-Liste</b>						<i>he42</i>	<i>he23</i>	<i>he34</i>	<i>l3</i>	<i>e5</i>	<i>v4</i>
<b>L</b>	<b>next</b>	<b>prev</b>	<b>f</b>	<b>he</b>		<i>he14</i>	<i>he43</i>	<i>he31</i>	<i>l4</i>	<i>e4</i>	<i>v1</i>
<i>l1</i>	<i>null</i>	<i>null</i>	<i>f1</i>	<i>he21</i>		<i>he43</i>	<i>he31</i>	<i>he14</i>	<i>l4</i>	<i>e6</i>	<i>v4</i>
<i>l2</i>	<i>null</i>	<i>l5</i>	<i>f2</i>	<i>he24</i>		<i>he31</i>	<i>he14</i>	<i>he43</i>	<i>l4</i>	<i>e3</i>	<i>v3</i>
<i>l3</i>	<i>null</i>	<i>null</i>	<i>f3</i>	<i>he34</i>		<i>he65</i>	<i>he57</i>	<i>he76</i>	<i>l5</i>	<i>e7</i>	<i>v6</i>
<i>l4</i>	<i>null</i>	<i>null</i>	<i>f4</i>	<i>he43</i>		<i>he57</i>	<i>he76</i>	<i>he65</i>	<i>l5</i>	<i>e9</i>	<i>v5</i>
<i>l5</i>	<i>l2</i>	<i>null</i>	<i>f2</i>	<i>he65</i>		<i>he76</i>	<i>he65</i>	<i>he57</i>	<i>l5</i>	<i>e8</i>	<i>v7</i>

**Edge-Liste**

<b>E</b>	<b>next</b>	<b>prev</b>	<b>he<sub>ccw</sub></b>	<b>he<sub>cw</sub></b>
<i>e1</i>	<i>e2</i>	<i>null</i>	<i>he12</i>	<i>he21</i>
<i>e2</i>	<i>e3</i>	<i>e1</i>	<i>he23</i>	<i>he32</i>
<i>e3</i>	<i>e4</i>	<i>e2</i>	<i>he13</i>	<i>he31</i>
<i>e4</i>	<i>e5</i>	<i>e3</i>	<i>he14</i>	<i>he41</i>
<i>e5</i>	<i>e6</i>	<i>e4</i>	<i>he24</i>	<i>he42</i>
<i>e6</i>	<i>e7</i>	<i>e5</i>	<i>he34</i>	<i>he43</i>
<i>e7</i>	<i>e8</i>	<i>e6</i>	<i>he65</i>	<i>null</i>
<i>e8</i>	<i>e9</i>	<i>e7</i>	<i>he76</i>	<i>null</i>
<i>e9</i>	<i>null</i>	<i>e8</i>	<i>he57</i>	<i>null</i>

**Vertex-Liste**

<b>V</b>	<b>next</b>	<b>prev</b>	<b>he</b>
<i>v1</i>	<i>v2</i>	<i>null</i>	<i>he12</i>
<i>v2</i>	<i>v3</i>	<i>v1</i>	<i>he24</i>
<i>v3</i>	<i>v4</i>	<i>v2</i>	<i>he31</i>
<i>v4</i>	<i>v5</i>	<i>v3</i>	<i>he42</i>
<i>v5</i>	<i>v6</i>	<i>v4</i>	<i>he65</i>
<i>v6</i>	<i>v7</i>	<i>v5</i>	<i>he57</i>
<i>v7</i>	<i>null</i>	<i>v6</i>	<i>he76</i>

**3.3 Implementierung der Datenstruktur**

Die oben beschriebene Half-Edge Datenstruktur wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Objektmodellierung und die Erzeugung von Photomodellen in ORPHEUS realisiert. Dabei wurde die Softwarebibliothek VRaniML™ [Great Hill Corporation, 2000] eingesetzt. VRaniML™ ist in der Beta Version 0.9.04 kommerziell erhältlich und ist objektorientiert in C++ implementiert ist. Da am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung ebenfalls zum Großteil in C++ entwickelt wird, konnte die Bibliothek gut als Ausgangsbasis für die Erweiterung des Programmpaket ORPHEUS verwendet werden. Durch diese Vorgehensweise konnte einerseits die sehr zeitaufwendige Neuimplementierung der Half-Edge-Datenstruktur vermieden werden, und andererseits bietet die VRaniML™ Bibliothek auch eine Ausgabemöglichkeit nach VRML97, einem Datenformat das sich ausgezeichnet für die Visualisierung im Internet eignet (siehe Kapitel 5.4).

Da es sich bei VRaniML™ um eine Beta Version handelt, die seit 1998 nicht weiterentwickelt wird, waren zunächst noch einige Fehler zu korrigieren und Algorithmen zu vervollständigen. Auch sind eine Reihe von unten beschriebenen Erweiterungen notwendig gewesen, um einerseits die Half-Edge-Datenstruktur überhaupt in einem photogrammetrischen Auswertesystem einsetzen zu können, und andererseits ein qualitativ hochwertiges Photomodell zu erzeugen, abzuspeichern und die Daten im Hinblick auf eine Internetdarstellung zu optimieren.

**3.3.1 Punktnummern**

Für die photogrammetrische Bestimmung eines räumlichen Objektpunktes werden in den digitalen Bildern homologe Punkte gemessen (vgl. Kapitel 2.2.2). Die Identifizierung der Punkte erfolgt dabei über idente Punktnummern, die der Operateur während der interaktiven Auswertung frei vergeben kann.

Der Punkt (*vertex*) in der Datenstruktur muss daher neben der geometrischen Information (Koordinaten) auch eine Punktnummer als Attribut besitzen. Diese Punktnummer ist nicht zu verwechseln mit einem laufenden Index, der automatisch vergeben wird und sich im Zuge von Objektmanipulationen verändern kann.

### 3.3.2 Referenzpunkt

In der Ingenieurgeodäsie und Photogrammetrie werden die Ergebnisse meist auf ein übergeordnetes Landessystem bezogen. Die verwendeten Koordinaten haben daher nicht selten 10 bis 12 signifikante Stellen. 3D Datenstrukturen arbeiten aber oft mit Gleitkommazahlen vom Typ *float*. Eine Koordinate dieses Datentyps wird mit 4 Bytes abgespeichert und hat daher nur eine Genauigkeit von 6 Stellen. Eine Abhilfe wäre die Verwendung des Datentyps *double*, mit dem Zahlen auf 15 signifikante Stellen gespeichert werden können. Der Nachteil dabei ist die Verdoppelung des notwendigen Speicherplatzes für jede benötigte Koordinate.

Besser ist es, für jedes Objekt einen Referenzpunkt zu verwenden, der als *double* gespeichert wird und die Koordinaten aller Punkte um die Werte des Referenzpunktes zu reduzieren. Dadurch wird intern mit kleineren Werten gearbeitet und alle Objektpunkte stehen für Berechnungen mit hinreichender Genauigkeit zur Verfügung. Im Bedarfsfall können jederzeit die Koordinaten des Landessystems wieder abgeleitet werden. Probleme treten nur bei solchen Objekten auf, die eine sehr große Ausdehnung haben (z.B. Geländedaten von ganz Europa).

### 3.3.3 Koordinatenvergleich

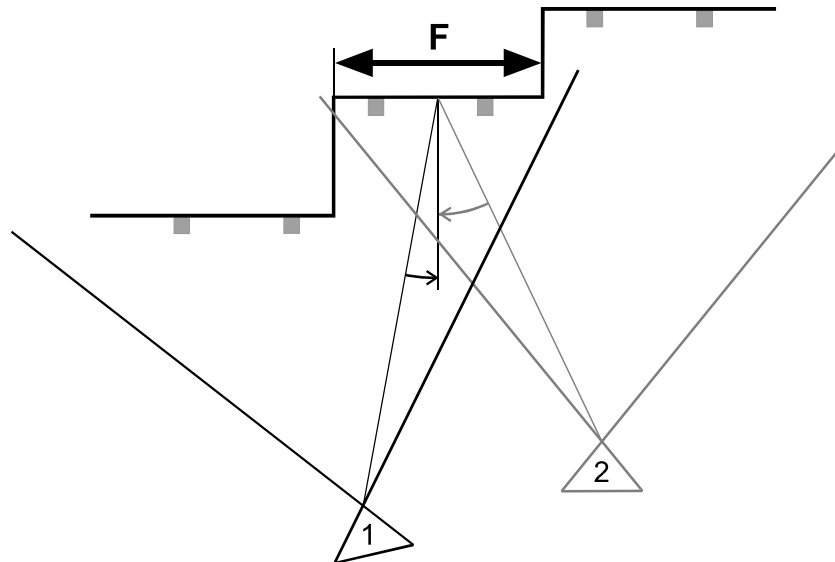
Beim Manipulieren von Objekten mit Hilfe von Booleschen Operatoren (vgl. Kapitel 3.1.3) müssen sehr viele Verschneidungen von Kanten und Flächen berechnet werden. Dabei muss immer wieder geprüft werden, ob zwei Punkte ident, zwei Kanten kollinear, oder zwei Flächen koplanar sind. Ein Vergleich der Koordinaten zweier Punkte oder Vektoren wird beim Arbeiten mit realen Objekten aufgrund von numerischen Ungenauigkeiten in den seltensten Fällen das gewünschte Ergebnis liefern. Solche Vergleiche müssen daher mit einem definierbaren Schwellwert  $\varepsilon$  durchgeführt werden. In diesem Sinne werden zwei Punkte als geometrisch ident betrachtet, wenn ihr Abstand  $d$  kleiner ist als  $\varepsilon$ .

### 3.3.4 Texturquelle

Der zentrale Punkt bei einem Photomodell ist die Textur. Im allgemeinen wird eine modellierte Fläche in mehreren Aufnahmen vollständig sichtbar sein. Bei der Berechnung des Photomodells muss daher eindeutig festgelegt sein, welche Aufnahme für welche Fläche als Texturquelle zur Berechnung der Phototextur verwendet werden soll. Für die Ermittlung dieser Information gibt es zwei Möglichkeiten. Im ersten Fall erhält der Benutzer eine Liste aller Photos, in denen eine bestimmte Fläche abgebildet ist. Aus dieser wählt er interaktiv eines aus. Aufgrund der großen Anzahl an Flächen ist diese Vorgehensweise aber nur in Einzelfällen sinnvoll.

Deshalb wurde ein automatisches Verfahren entwickelt, dem folgende Überlegung zugrunde liegt: Die Modellierung eines Objektes durch Teilflächen erfolgt je nach Aufgabenstellung mehr oder weniger detailliert. In jedem Fall aber werden am Objekt wegen des sonst zu hohen Aufwandes einige Kleinteile nicht modelliert werden. Dies führt zu radialen Versetzungen in der Textur. Als Entscheidungskriterium, welches Photo optimal zu einer Fläche passt, wird die Minimierung dieser radialen Versetzungen verwendet. Es werden also alle Photos untersucht, in denen die Teilfläche vollständig abgebildet ist. Das Kriterium wird dann von jener Aufnahme am besten erfüllt, bei der die Verbindungslinie zwischen Projektionszentrum und Schwerpunkt der

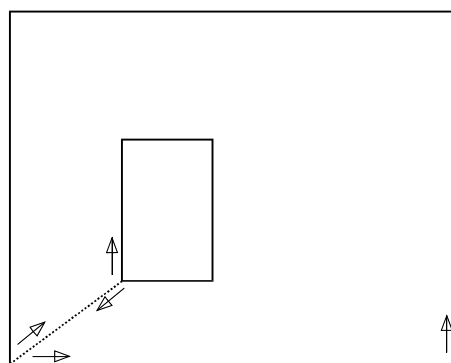
Fläche mit der Flächennormale den kleinsten Winkel einschließt (Abbildung 3-8). Diese Information über das "optimale Photo" ist ein wichtiger Bestandteil der Fläche und wird daher auch in der Datenstruktur gespeichert.



**Abbildung 3-8:** Auf der Fassade befinden sich kleine Objektteile (graue Vorsprünge), die nicht modelliert wurden. Für die in beiden Aufnahmen vollständig sichtbare Fläche  $F$  ist die radiale Versetzung in Aufnahme 1 kleiner als bei Aufnahme 2.

### 3.3.5 Innere Schleifen

Innere Schleifen dienen dazu Löcher (Fenster) innerhalb einer Fläche (Fassade) zu begrenzen. VRML unterstützt konkave Polygone, doch können diese nicht von mehreren geschlossenen Linienzügen begrenzt werden. Beim Exportieren eines Photomodells nach VRML müssen daher alle Schleifen einer Fläche zu einer einzigen zusammengefasst werden. Dazu wird ein Punkt der äußeren Schleife und ein Punkt einer inneren Schleife gesucht, deren Verbindungslinie vollständig innerhalb der Fläche liegt. Durch Einfügen dieser Linie wird dann die innere Schleife mit der äußeren vereinigt (Abbildung 3-9).



**Abbildung 3-9:** Entfernen von inneren Schleifen durch Einfügen einer Hilfslinie (strichliert). Zur Verdeutlichung ist auch der Umlaufsinn des Randpolygons eingetragen.

### 3.3.6 Zusammenfassen

Soll auf Basis eines externen Modells weitergearbeitet werden, so können die Daten importiert und in eine Half-Edge Datenstruktur konvertiert werden. Dabei kann es, zum Beispiel beim Importieren einer Triangulierung, zu sehr vielen kleinen Flächen kommen.

Um, im Hinblick auf eine Darstellung im Internet, die Datenmenge so klein wie möglich zu halten, ist es sinnvoll die Anzahl der Flächen zu reduzieren. Dies wurde in diesem Fall so gelöst, dass koplanare Flächen zusammengefasst werden. Zur Beurteilung, ob zwei Flächen koplanar sind, wird, ähnlich wie beim Koordinatenvergleich (Kapitel 3.3.3), ein Toleranzwert  $\epsilon$  verwendet. Verglichen werden dazu die zwei Normalvektoren der Fläche, deren Winkel kleiner als  $\epsilon$  sein muss. Als entscheidende Nebenbedingung müssen die Flächen aber auch die gleiche Texturquelle haben. Ansonsten können große Polygone entstehen, die aber in keinem Photo mehr vollständig abgebildet sind.

## 3.4 Benutzeroberfläche von ORPHEUS

Das eigentliche Modell entsteht durch das Verbinden der Punkte zur Definition von Flächen, also dem Herstellen einer Topologie. Die Automatisierung dieser Aufgabe kann auf zwei Arten erfolgen. In einem Fall erfolgt die Messung von Punkten interaktiv, während die Topologie aus der Punktwolke automatisch abgeleitet wird. Auf diesem Prinzip beruhen Systeme wie Cyber City Modeler™ [CyberCity, 2001] oder GO-3DM™ [Grintec, 1998]. Im anderen Fall ist die Objektmodellierung direkt in die photogrammetrische Auswertung integriert. Es werden einfache Gebäudemodelle vorgegeben und der Benutzer wählt auf Basis einer visuellen Interpretation ein passendes Modell aus und positioniert es näherungsweise in den Bildern. Die Feinmessung erfolgt dann automatisch. Komplexgebäude können durch Kombination der einfachen Modelle durch boolesche Mengenoperatoren modelliert werden (vgl. Kapitel 3.1.3). Solche Methoden sind zum Beispiel in den Systeme inJect™ [Inpho, 2001], OP3D™ [GTA Geoinformatik, 2001] oder auch ORPHEUS [Orient/Orpheus, 2002] implementiert.

Bis auf das letzte können mit allen genannten Systemen ausschließlich Gebäudemodelle aus Luftbildern erstellt werden. Sie sind daher sehr stark auf die Ermittlung von Dachformen ausgelegt und für den Einsatz im Nahbereich nicht geeignet. Aus den schon in Kapitel 2.4 angeführten Gründen erfolgt im Nahbereich sowohl die Punktmessung interaktiv, als auch das Verbinden der gemessenen Bildpunkte zu Flächen. Während die Gebäudemodellierung aus Luftbildern mit Hilfe von ORPHEUS ausführlich in [Rottensteiner, 2001] beschrieben ist, soll hier nur auf die Realisierung für den Einsatz im Nahbereich eingegangen werden.

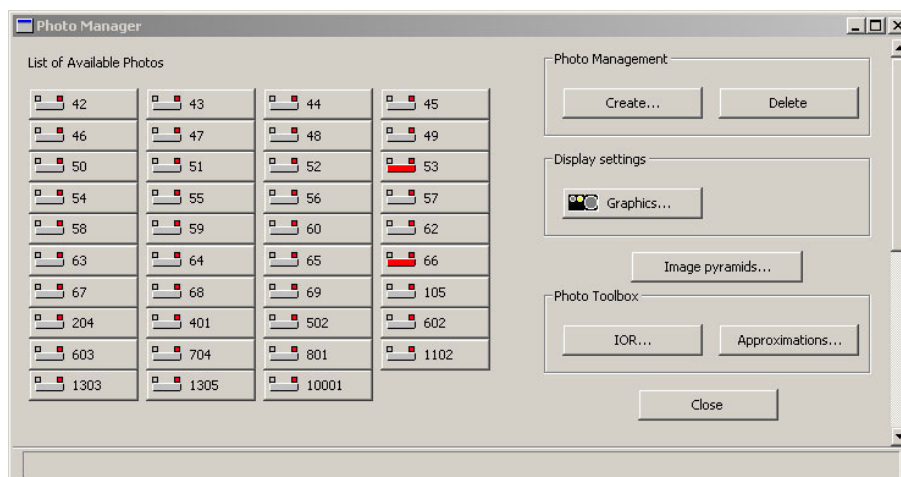


Abbildung 3-10: Photomanager von ORPHEUS

Die Verwaltung der Bilddaten eines Projektes erfolgt im PhotoManager (Abbildung 3-10). Hier können Bilder nicht nur eingefügt oder entfernt werden, sondern bei großen Datenmengen auch Bildpyramiden mit verschiedenen Niveaus berechnet werden. Des weiteren erfolgt über diese graphische Benutzeroberfläche auch der Zugang zu den Orientierungsdaten der Aufnahmen und zu verschiedenen Einstellungen der Grafikkfenster.

Jede Aufnahme wird in einem eigenen Fenster geöffnet (Abbildung 3-11). Im linken Teil wird das Photo dargestellt, rechts befindet sich eine "Lupe" in der Details angezeigt werden, ohne dass der Benutzer ständig hinein- und hinauszoomen muss. Auf dieser Oberfläche hat der Benutzer auch Zugang zu unterschiedlichen Bildverbesserungsfunktionen wie beispielsweise Helligkeits- oder Kontrastmanipulationen.

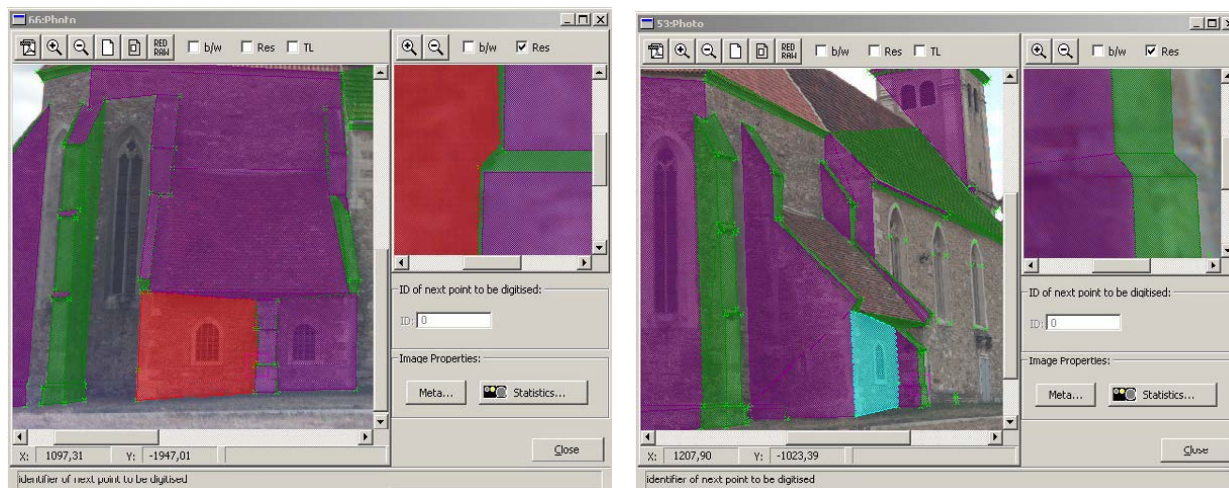


Abbildung 3-11: Grafikkfenster von ORPHEUS. Flächen, deren Textur aus dem dargestellten Photo genommen würde, werden violett dargestellt, sonst grün. Die jeweils zur Bearbeitung aktive Fläche wird rot (statt violett) bzw. cyan (statt grün) angezeigt.

In diesen Fenstern erfolgt auch die Objektmodellierung. Dabei verbindet der Benutzer die in den Photos gemessenen und durch Ausgleichung bestimmten Objektpunkte zu allgemeinen ebenen Polygonen. Für Polygone mit mehr als 3 Punkten werden diese Punkte natürlich nicht streng in einer Ebene liegen werden. Über einen Toleranzwert  $\epsilon$  kann daher gesteuert werden, wie weit das System die definierte Fläche als "eben" akzeptiert und dem Gesamtmodell hinzufügt. Die Punkte des Polygons werden dabei aus Sicht des Aufnahmestandpunktes gegen den



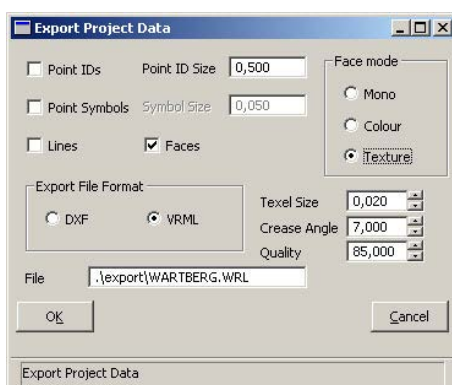
Uhrzeigersinn angeordnet und der Normalvektor zeigt immer nach außen, vom modellierten Objekt weg. Dadurch wird für jede Polygonfläche eine Innen- und eine Außenseite definiert.



**Abbildung 3-12: Flächeneditor von ORPHEUS**

Die Benutzersteuerung erfolgt über den Flächeneditor (Abbildung 3-12), wobei zwischen zwei verschiedenen Modi unterschieden wird. Im Digitalisier-Modus (*Digitize Face*) definiert der Benutzer, wie oben beschrieben neue Polygone, fügt sie in die Datenstruktur ein und baut damit das 3D-Modell auf. Soll eine bereits modellierte Fläche bearbeitet oder gelöscht werden, so muss sie zuerst im Editier-Modus (*Select Face*) ausgewählt werden.

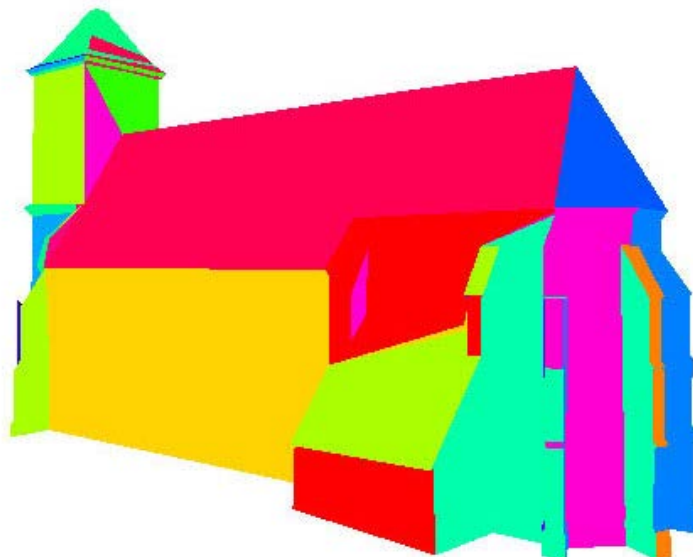
Nach Definition einer Fläche kann sich der Benutzer mit der in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Methode jenes Photo bestimmen lassen, das sich am besten als Texturquelle zur Berechnung des Photomodells eignet. Dieser Schritt ist vor allem dann notwendig, wenn ein Modell aus externer Datenquelle importiert worden ist. Ansonsten kann auch die Zuweisung zu jenem Photo erfolgen, in dem der Benutzer das Polygon interaktiv definiert hat. In jedem Fall besteht die Möglichkeit, auch im Nachhinein einer modellierten Fläche ein bestimmtes Photo als Texturquelle explizit zuzuweisen. Zur besseren Unterscheidung werden Flächen in jenem Photo, aus dem die Textur verwendet werden soll, violett dargestellt, während sie in den anderen Photos grün sind (Abbildung 3-11). Die gerade zur Bearbeitung aktive Fläche wird in rot (statt violett) beziehungsweise in cyan (statt grün) angezeigt.



**Abbildung 3-13: Datenexport aus ORPHEUS**

Soll das fertige Modell in einem externen CAD-System weiterarbeitet werden, so kann die Geometrie (Linien oder Flächen) als DXF exportiert werden. Dabei stehen noch verschiedene Optionen zur Verfügung, wie die Ausgabe der Punktnummern, oder das Einfärben der Flächen.

Diese Export-Möglichkeiten stehen auch bei VRML zur Verfügung. Zusätzlich kann hier auch durch die Option *Texture*, sowie die Angabe einer Texelgröße ein Photomodell erzeugt werden. Da dieser Prozess sehr rechenintensiv sein kann, ist es vorteilhaft zur Kontrolle zunächst nur das geometrische Modell ohne Textur zu exportieren und zu visualisieren. Dabei werden die Flächen je nach zugewiesenem Photo verschieden eingefärbt. So kann rasch ein Eindruck des zu erwartenden Ergebnisses gewonnen werden (Abbildung 3-14). Im Bedarfsfall können dann einzelne Flächen geometrisch korrigiert oder das "optimale" Photo interaktiv festgelegt werden.



**Abbildung 3-14: Visualisierung der Zuordnung Photo - Fläche**

Für die Darstellung in Form eines Photomodells eignen sich vor allem Objekte die eine relativ glatte und sehr texturierte Oberfläche aufweisen. Sofern die gegebene Aufgabenstellung eine gewisse Generalisierung der Geometrie erlaubt, lässt sich für Objekte im Nahbereich die "grobe" dreidimensionale Gebäudeform relativ einfach beschreiben - der Detailreichtum der Fassaden und Dächer wird dann allein durch die aufprojizierte Bildinformation dargestellt. Dieses Prinzip "Bildinformation ersetzt die Modellierung von Details" bedeutet in der Praxis natürlich eine beträchtliche Arbeitersparnis.



**Abbildung 3-15: 3D-Photomodell der Kirche Wartberg**

## 4 Texturierung

Zu einem Photomodell gehört neben dem geometrischen Modell auch die Phototextur, die auf die einzelnen Teilflächen projiziert wird. Durch die Bezeichnung Phototextur wird zum Ausdruck gebracht, dass die Farb- bzw. Grauwerte aus photographischen Aufnahmen stammen, meist jenen, die auch bei der Modellerzeugung verwendet wurden. Die Bildinformation in einem Photo stammt von den Photonen des - vor allem sichtbaren - Lichtes. Sie wird entweder photographisch auf Film, oder elektronisch mit CCD-Sensoren aufgezeichnet. "Selbst wenn eine Photographie digitalisiert wird, stammt der Bildinhalt immer noch vom ursprünglichen Photo. Wenn digitalisierte oder elektronisch aufgezeichnete Photos in Orthophotos, Stereopartner, dreidimensionale Photomodelle etc. umgebildet werden, stammt der Inhalt immer noch von den Photonen der ursprünglichen Aufnahmen. Damit unterscheidet sich der mit Licht erzeugte Bildinhalt gut vom künstlich erzeugten Bildinhalt, wie zum Beispiel bei der 'virtual reality'." (aus [Kraus, 1996])

Durch die Verwendung von Phototextur können fehlende geometrische Details eines Objektes durch die aufprojizierte Bildinformation ergänzt werden und man erreicht einen Gewinn an Information, der durch eine rein geometrische Modellierung höchstens mit sehr viel Aufwand möglich wäre. So liefern Texturen

- Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes,
- Farbinformationen der Oberfläche,
- Hinweise zur räumlichen Anordnung der Objekte in einer 3D-Szene und
- zusätzliche geometrische Details.

Der letzte Punkt gilt in aller Strenge natürlich nur für Details, die sich genau in der modellierten Teilfläche befinden. Ist eine Fassade beispielsweise durch eine einzige Ebene beschrieben, so sind die nicht modellierten Details, wie Fensternischen oder Stuck in der Textur mehr oder weniger geometrisch versetzt abgebildet (vgl. Kapitel 3.3.4). Es ist daher im Rahmen der Aufgabenstellung abzuklären, wie detailreich geometrisch modelliert werden muss und inwieweit solche "Fehler" toleriert werden können.

Die Art und Weise, in der radiometrische Information aus den photographischen Aufnahmen auf das Modell übertragen wird, hat maßgeblichen Einfluss auf die optische Qualität des Gesamtergebnisses. In den internetbasierten Visualisierungssystemen erfolgt die Übertragung der Textur auf die Objektgeometrie (texture mapping) durch Zerlegung in Dreiecke und anschließender affiner Umbildung. Dies wird getan, um unabhängig vom vorliegenden Modell die für das Rendern notwendigen Sichtbarkeitsberechnungen effizienter und schneller durchführen zu können. Die photographische Aufnahme eines Objektes stellt aber in erster Näherung eine Perspektive dar. Verwendet man nun für die Texturierung einer rechteckigen ebenen Fläche direkt das Photo (Abbildung 4-1), entstehen durch Einsatz der affinen Umbildung am Modell Unstetigkeiten (Abbildung 4-2). Um ein optisch ansprechendes Ergebnis zu erzielen, wird aus diesem Grund das Originalphoto immer zunächst unter Berücksichtigung der Abbildungsgeometrie umgebildet (z.B.: durch kollineare Umbildung - Abbildung 4-3), bevor es zur Texturierung verwendet wird.



**Abbildung 4-1: photographische Aufnahme mit eingetragener Geometrie**



**Abbildung 4-2: Unstetigkeiten bei affiner Umbildung**



**Abbildung 4-3: geometrisch korrekte kollineare Umbildung**

Hat man streng perspektiv abgebildete ebene Flächen, so liefert die kollineare Umbildung ein korrektes Ergebnis. Der photographische Inhalt wird aber auch durch die vorhandene Objektivverzeichnung verändert. Diese ist bei Amateurkameras deutlich größer als bei Messkameras und erreichen in jedem Fall signifikante Größen. Im Fall der am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) eingesetzten Digitalkamera DCS460c von Kodak™ kann der Maximalwert der Verzeichnung für das 28 mm Objektiv 22 Pixel, für das 15 mm Objektiv 11 Pixel betragen [Kraus, 1996].

Solange die Ausdehnung der Flächen im Photo relativ klein ist, kann dieser Effekt vernachlässigt werden. Bei der Modellierung wird aber versucht, möglichst wenige und daher entsprechend große Flächen zu definieren. Es ist daher notwendig, bei der Umbildung auch die Verzeichnung streng zu berücksichtigen, da sonst am Objekt gerade Linien im Texturbild gekrümmt dargestellt werden (Abbildung 4-4).



**Abbildung 4-4: gekrümmte Traufenlinie aufgrund nicht berücksichtigter Objektivverzeichnung**

Allen Methoden gemeinsam ist, dass ein Texturbild erzeugt wird, in dem ein dichter Raster für die **Texturelemente** (=Texel – als Unterscheidung zu den Pixel in einem normalen digitalen Bild) definiert ist. An den einzelnen Rasterpunkten (Texel) ermittelt man durch Transformation und Interpolation die Farb- bzw. Grauwertinformation aus den photographischen Aufnahmen. Die Wahl der Texelgröße legt die Auflösung des Photomodells und in der Folge den später benötigten Speicherplatzbedarf fest.

#### 4.1 Geometrische Rektifizierung

Die Aufgabe der geometrischen Rektifizierung ist es, die Positionen der Pixel aus einem Ausgangsbild (=photographische Aufnahme) in ein Texturbild zu übertragen. Berechnet man aus dem Ausgangsbild die Position der Pixel im Texturbild, so spricht man von der Methode der direkten Umbildung. Umgekehrt besteht auch die Möglichkeit, im Texturbild den Raster zu definieren und die dazugehörige Position im Ausgangsbild zu bestimmen (indirekte Umbildung). Ein Vorteil der indirekten Methode liegt darin, dass alle Texel im Texturbild besetzt werden können, während bei der direkten Methode Lücken auftreten können, die nachträglich gefüllt werden müssen.

Der Ablauf der indirekten Umbildung für Texturbilder gliedert sich im allgemeinen in zwei Schritte. Die im Texturbild definierten Texturkoordinaten  $(u, v)$  werden zunächst in den Objektraum auf die räumlichen Koordinaten  $(X, Y, Z)$  transformiert, die auf der modellierten Objektoberfläche definiert sind. Schließlich werden die Objektkoordinaten in das Ausgangsbild projiziert und man erhält die den Texturkoordinaten  $(u, v)$  entsprechenden Bildkoordinaten  $(x, y)$  (Abbildung 4-5).



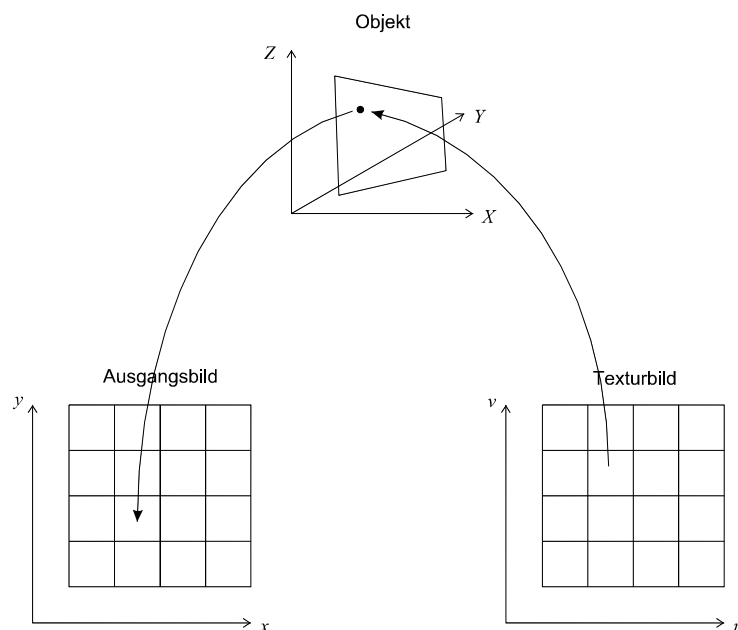


Abbildung 4-5: indirekte Umbildung

Dazu wird für jedes Polygon des Modells ein lokales Koordinatensystem festgelegt. In der  $uv$ -Ebene dieses lokalen Systems wird der Raster für die Texel definiert. Jeder Rasterpunkt wird dann durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation auf die Objektfläche im Objektraum transformiert. Mit Hilfe der Orientierungswerte und Kameradaten können die Objektkoordinaten dann in die als Texturquelle definierte Aufnahme projiziert werden.

## 4.2 Grauwertzuordnung

Die mit Hilfe obiger Abbildung bestimmten Bildkoordinaten eines Texels ( $u, v$ ) werden im allgemeinen nicht exakt einem Bildpunkt ( $x, y$ ) entsprechen, sondern zwischen verschiedenen Bildpunkten zu liegen kommen. Der Grauwert des Texels ist daher aus einem oder mehreren Grauwerten der umliegenden Bildpunkte zu bestimmen.

Im einfachsten Fall wird zur Ermittlung des Grauwertes eines Texels der Wert, des am nächsten liegenden Pixels herangezogen (*Nearest Neighbor – Resampling*). Diese Methode der nächsten Nachbarschaft erfordert geringe Rechenzeit, ist damit sehr schnell und verändert nicht die Grauwerte des Ausgangsbildes. Ein Nachteil ist allerdings, dass der einem Texel zugeordnete Grauwert im ungünstigsten Fall bis zu einer halben Pixelgröße verschoben wird. Durch diese Verschiebung kommt es zu Versetzungen (*Aliasing*) von bis zu einem Texel in den Linienstrukturen des Texturbildes (Treppeneffekt).

Ein besseres Verfahren zur Grauwertbestimmung ist die bilineare Interpolation. Hier wird der Grauwert durch bilineare Transformation aus den vier benachbarten Pixel bestimmt. Die bilineare Interpolation ist aufwendiger als die nächste Nachbarschaft, hat aber den Vorteil, dass der Treppeneffekt stark vermindert wird. Allerdings wirkt diese Methode wie ein Tiefpassfilter, so dass die ursprünglichen lokalen Bildkontraste gemindert werden. Die mit der bilinearen Interpolation verbundene Dämpfung des Kontrastes kann deutlich reduziert werden, wenn zur Berechnung des Grauwertes eines Texels die bikubische Interpolation herangezogen wird, welche die Grauwerte der 16 benachbarten Pixel verwendet.

Die geometrische Position eines Grauwertes in einem digitalen Bild wird in fast allen Bildverarbeitungssystemen dem Pixelmittelpunkt zugeordnet. Der dem Pixel zugeordnete

Grauwert repräsentiert aber nicht genau den Wert an dieser Position, sondern einen Mittelwert für die vom Pixel erfasste Fläche. Dieser Mittelwert ist durch das Aufnahmesystem bedingt. Bei einem CCD-Sensor handelt es sich um das Integral der auf das CCD-Element einfallenden optischen Strahlung.

Ein Texel stellt also keinen Punkt, sondern eine quadratische Rastermasche des Texturbildes dar. Diese Quadrat wird nach der Transformation ins Ausgangsbild im allgemeinen zu einem nicht geradlinigen Polygon (Patch) verzerrt. Die Bestimmung des Grauwertes darf also nicht allein von der Position des transformierten Mittelpunktes abhängen, sondern auch von der Form des verzerrten Patches. Entspricht die Texel-Auflösung in etwa der Auflösung des Originalbildes, so kann dieser Effekt bei Verwendung eines entsprechenden Interpolationsverfahrens meist vernachlässigt werden. Sind die Texel aber deutlich größer als die Pixel, so wird der Grauwert als gewichtetes Mittel aller innerhalb des Patches liegenden Pixel berechnet.

### **4.3 Abspeicherung der Textur**

Die Textur für das Photomodell wird in einer bestimmten geometrischen Auflösung gerechnet (z.B.: ein Texel entspricht in der Natur  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ). Als sinnvoll gilt in diesem Zusammenhang die, in den Originalaufnahmen vorhandene Auflösung. Jede höhere Auflösung bringt keinen Informationsgewinn im Photomodell, sondern führt nur zu größeren Texturdateien. Das wiederum beeinflusst in weiterer Folge negativ die Performance (Geschwindigkeit der Navigation, Ruckfreiheit, ...) der Visualisierung. Letztendlich aber hängt die Wahl der Auflösung vom Wunsch des Endbenutzers und dessen Möglichkeiten (Hardware) ab.

In der im Rahmen dieser Arbeit realisierten Lösung wird jede Teilfläche des modellierten Objektes einzeln entzerrt und ein Texturbild berechnet. Dadurch kann am gesamten Modell die gleiche, vom Benutzer vorgegebene, Texelgröße streng eingehalten werden. Speichert man nun aber jedes einzelne Texturbild als eigenen Datei ab, entstehen sehr viele kleine Texturdateien. So hat beispielsweise schon ein Einzelobjekt, wie die Kirche Wartberg (Abbildung 2-6 und Abbildung 3-14) mehr als 350 Teilflächen.

Um bei einer Visualisierung das Objektmodell zu texturieren, müssen alle Dateien eingelesen werden, was zu deutlich merkbareren Ladezeiten führt. Dieses Problem wird noch spürbarer, wenn das Photomodell im Internet visualisiert wird. Das Öffnen und Schließen von Dateien beansprucht in diesem Fall wesentlich mehr Zeit als das Lesen und Entpacken. Aus diesem Grund werden alle Texturbilder, die von derselben photographischen Aufnahme stammen, in einer Datei verspeichert. Die Texturdateien sind dadurch natürlich größer als vorhin, doch wird damit ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Dateizugriff und Einlesen erreicht.

### **4.4 Radiometrische Angleichung unterschiedlicher Aufnahmen**

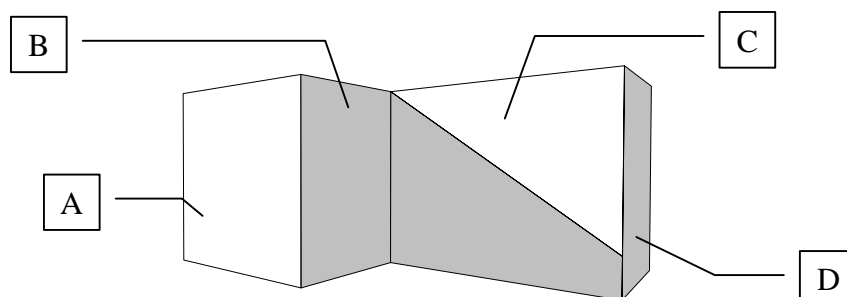
Die Textur für ein Photomodell stammt von sehr vielen Photos. Bei sehr großen Projekten mit über 100 Photos kann es sogar vorkommen, dass die Aufnahmen an verschiedenen Tagen gemacht worden sind. Doch auch sonst kommt es, aufgrund wechselnder Lichtverhältnisse und Einstellungen (Belichtungszeit, Blende) zwischen zwei Aufnahmen, immer wieder zu Farbunterschieden in den Photos. Werden solche Aufnahmen für die Erzeugung der Textur herangezogen, so können beispielsweise im Photomodell auf einer Fassade zwischen zwei benachbarten modellierten Flächen störende Helligkeits- oder Farbsprünge auftreten (Abbildung 4-6). Solche Effekte haben zwar keinen Einfluss auf die geometrische Genauigkeit der

aufgebrachten Textur, wirken aber befremdend für den unbeeinflussten Benutzer und mindern so subjektiv die Qualität und damit auch die Akzeptanz des Photomodells.



**Abbildung 4-6: störender Helligkeitssprung in einer Fassade durch Verwendung unterschiedlicher radiometrisch nicht korrigierter Aufnahmen**

Im Idealfall sollte im ganzen Modell das gleiche Material bei gleicher Beleuchtung auch dieselben radiometrischen Eigenschaften aufweisen. Dieses Ziel ist bei Verwendung realer Textur (Phototextur) nicht zu erreichen, zumindest aber lokal dürfen dem Betrachter keine augenscheinlichen Unterschiede auffallen. Das Ziel ist es also, möglichst automatisch Bilder mit einer homogenen Helligkeitsverteilung zu erzeugen. Helligkeitsunterschiede, die durch Schlagschatten hervorgerufen werden, sollen hier außer Betracht gelassen werden (Abbildung 4-7). Für die strenge Berücksichtigung solcher Effekte muss neben der 3D-Objektgeometrie und der Kameraorientierung auch die Position der Lichtquelle (Sonne) bekannt sein. Auf Basis dieser Ausgangsdaten und der photographischen Aufnahme lässt sich dann für jede modellierte Teilfläche die spektrale Reflexionsfunktion (BRDF – bi-directional reflectance distribution function) schätzen. Für eine ausführliche Beschreibung dieser in der Computergraphik als Inverse-Rendering bekannten Verfahren sein zum Beispiel auf [Gagalowicz & Boivin, 2002] verwiesen.



**Abbildung 4-7: aus [Leroy, 1998]. Die radiometrischen Unterschiede der Fassaden A, B, und D können automatisiert behoben werden, der durch den Schlagschatten hervorgerufene Unterschied in der Fassade C nicht.**

Es existieren bereits eine Reihe von Methoden zur Homogenisierung von Bildern, doch stammen diese fast ausschließlich aus dem Bereich der Mosaikierung von Orthophotos aus Luftbildern. Terrestrische Aufnahmen, wie sie für die Erstellung eines 3D Photomodells verwendet werden, weisen hier eigene Charakteristiken auf, so dass die für Luftbilder eingesetzten Verfahren nicht eins zu eins übernommen werden können.



Aufgabe eines solchen Algorithmus ist die Übertragung eines Grauwertes  $g$  in einen "verbesserten" Grauwert  $\bar{g}$  mit Hilfe einer Übertragungsfunktion  $f$  (Gleichung 4-1).

$$\bar{g} = f(g) \quad \text{Gleichung 4-1}$$

#### 4.4.1 Grauwertübertragungsfunktion

Die einfachste diesbezügliche Übertragungsfunktion ist die Gerade (Gleichung 4-2). Mit dem Parameter  $c$  (Steigung) kann der Kontrast, und mit dem Parameter  $d$  (Achsenabschnitt) die Helligkeit im Ergebnisbild gesteuert werden. Ein Wert von  $c$  kleiner 1 führt beispielsweise zu einer Dämpfung der Kontraste, ein Wert von  $d$  größer 0 zu einer Erhöhung der Helligkeit.

$$\bar{g} = c \cdot g + d \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Diese Funktion kann verwendet werden, um in einem Bild mit geringem Grauwertumfang (alle Grauwerte liegen eng beieinander; beanspruchen nur einen kleinen Teil des möglichen Wertebereichs [0..255]) die Grauwerte zu spreizen und so ein optisch ausgewogeneres Bild zu erzeugen. Dabei können aus dem Ausgangsbild automatisch die Parameter  $c$  und  $d$  abgeleitet werden (Gleichung 4-3), so dass der Wertebereich optimal ausgenutzt wird.

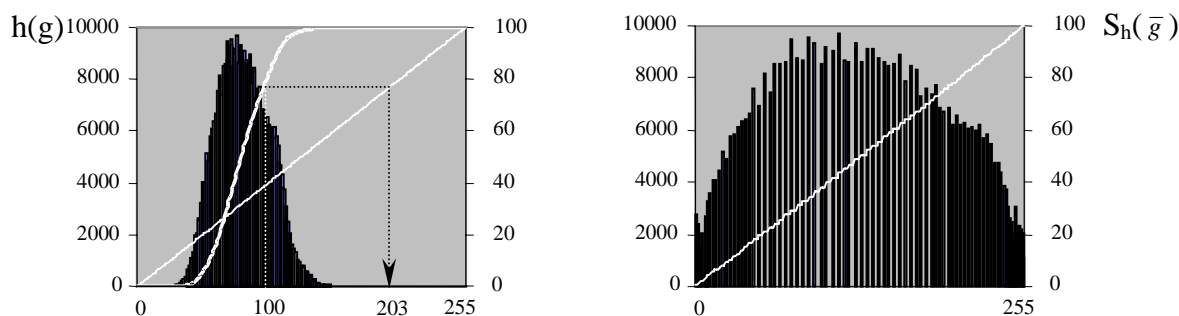
$$c = \frac{255}{g_{\max} - g_{\min}} \quad \text{und} \quad d = -c \cdot g_{\min} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Diese Grauwertveränderung kann auch intervallweise erfolgen und anstelle einer linearen Funktion können auch andere Übertragungsfunktionen gewählt werden. Als Beispiel sei hier die logarithmische Übertragungsfunktion genannt, die in Photoscannern Anwendung findet, um die Reizempfindung des menschlichen Auges zu berücksichtigen, die sich proportional zum dekadischen Logarithmus verhält.

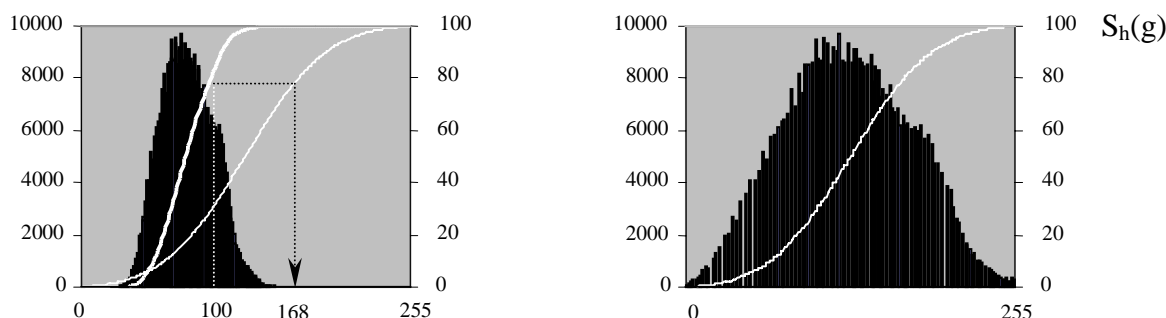
#### 4.4.2 Histogrammanpassung

Ein anderes, häufig eingesetztes Verfahren zur radiometrischen Anpassung des Bildinhaltes ist die Histogrammanpassung. Dabei werden die Grauwerte des Ausgangsbildes derart verändert, dass ihre Häufigkeitsverteilung (Histogramm)  $h(g)$  im Ergebnisbild bestimmte Anforderungen erfüllt. Die für die Berechnung notwendige Übertragungsfunktion bekommt man – wie generell bei Histogrammanpassungen – aus den Summenhäufigkeiten (Summenhistogramm) des Ausgangsbildes  $S_h(g) = \sum h(g)$  und des Zielbildes  $S_h(\bar{g})$ . Dieser Umweg ist notwendig, weil die Häufigkeitsverteilung nicht eindeutig umkehrbar ist (mehrere Grauwerte im Ausgangsbild können die gleiche Häufigkeit besitzen).

Bei der Histogrammeinebnung (Abbildung 4-8) ist das Ziel, eine Gleichverteilung der Grauwerte zu erreichen. Daraus folgt, dass die Summenhäufigkeit im Ergebnisbild eine schräge Gerade sein muss. Die Histogrammnormalisierung (Abbildung 4-9) beruht auf der Erkenntnis, dass das menschliche Auge die mittleren Grauwerte besser differenzieren kann, als die hellen oder dunklen. In diesem Fall wird eine normalverteilte Häufigkeitsverteilung angestrebt.



**Abbildung 4-8:** aus [Leroy, 1998]. **Histogrammeinebnung**  
 links: Histogramm und Summenhistogramm des Ausgangsbild sowie Zielfunktion. Ein Pixel im Originalbild mit Grauwert 100 hat im Ergebnisbild einen Grauwert von 203.  
 rechts: Histogramm und Summenhistogramm des Ergebnisbildes



**Abbildung 4-9:** aus [Leroy, 1998]. **Histogrammnormalisierung**  
 links: Histogramm und Summenhistogramm des Ausgangsbild sowie Zielfunktion. Ein Pixel im Originalbild mit Grauwert 100 hat im Ergebnisbild einen Grauwert von 168.  
 rechts: Histogramm und Summenhistogramm des Ergebnisbildes

Die genannten Ergebnisse (Einebnung bzw. Normalisierung) lassen sich nur bei Verwendung kontinuierlicher Häufigkeits- und Summenhäufigkeitsfunktionen streng erreichen. Mit diskreten Häufigkeits- und Summenhäufigkeitshistogrammen von realen Bildern erreicht man diese Zielvorgabe nur näherungsweise. Je nach Datenverteilung werden im Ergebnis mehrere Grauwerte zusammengefasst oder eng benachbarte Grauwerte auseinander geschoben.

#### 4.4.3 Ausgleichung von Summenhistogrammen

In den oben angeführten Verfahren werden jeweils die Grauwerte eines Ausgangsbildes entsprechend einer Zielvorstellung transferiert. Im Fall des 3D Photomodells geht es nicht darum, jedes Bild einzeln einer Korrektur (z.B. Histogrammnormalisierung) zu unterziehen, sondern für alle Bilder eine globale Homogenisierung durchzuführen. Es existiert also in diesem Fall keine vorgegebene Zielfunktion, sondern diese muss aus den Ausgangsbildern abgeleitet werden, wobei so wenig Interaktion wie möglich durch den Benutzer notwendig sein soll.

Eine in diesem Zusammenhang vielversprechende Methode aus der Orthophotoherstellung ist jenes von [He & Jansa, 1990]. Dieses Verfahren geht von der Bedingung aus, dass Bildszenen in Überlappungsbereichen das gleiche oder möglichst gleiche Summenhistogramm haben sollen. Es wird daher für jeden Grauwert  $g_i$  eines Bildes  $i$  der Korrekturwert  $x_i$  bestimmt, so dass gilt:

$$\bar{g}_i = f(g_i) = g_i + x_i \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Bei mehreren Bildern werden die Grauwerte  $\bar{g}_i$  nicht für alle Bilder gleich sein, doch kann ihre Differenz durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate minimiert werden. Die entsprechende Verbesserungsgleichung für zwei Bilder  $i$  und  $j$  lautet:

$$v_{ij} = \bar{g}_i - \bar{g}_j = x_i - x_j + g_i - g_j \quad \text{Gleichung 4-5}$$

"Die Verbesserungen  $v$  repräsentieren die Differenz der Grauwerte  $g$ , aber nicht der Summenhistogrammwerte  $S_h$ . Deshalb ist es notwendig, alle Summenhistogramme  $S_h(g)$  zu invertieren, d. h. in die Form  $g(S_h)$  zu bringen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass eine Verschiebung der Helligkeit der Bildszene sehr gut berücksichtigt werden kann" (aus [He & Jansa, 1990]).

Die Unbekannten  $x$  in Gleichung 4-5 sind unabhängig von den anderen Summenhistogrammwerten  $S_h$ , und man kann deshalb die Korrekturwerte  $x^h$  für jedes  $h$  separat berechnen. Für alle Bilder erhält man in Matrixschreibweise die Verbesserungsgleichungen für einen Summenhistogrammwert  $S_h$ :

$$v^h = A \cdot x^h + g^h \quad \text{Gleichung 4-6}$$

Dieses Ausgleichungsproblem hat allerdings ein Rangdefizit von 1. Zur Lösung dieses Problems wird eine Bedingung (Gleichung 4-7) in die Ausgleichung eingeführt, die bewirkt, dass die mittlere Helligkeit aller beteiligten Bilder nach der radiometrischen Anpassung unverändert bleibt.

$$\sum x_n^h = 0 \quad \text{Gleichung 4-7}$$

Jeweils zwei Bilder liefern eine Verbesserungsgleichung (Gleichung 4-5) und zusätzlich hat man die Bedingung (Gleichung 4-7). Ganz allgemein erhält man also für  $n$  Bilder  $\frac{(n-1) \cdot n}{2} + 1$  Gleichungen. Obwohl das Verfahren für die radiometrische Anpassung im Überlappungsbereichen von Bildszenen gedacht ist, müssen die Bilder, deren Summenhistogramme angeglichen werden sollen, einander nicht überlappen. Als Ergebnis der Ausgleichung erhält man die Unbekannten Korrekturwerte  $x$ , mit deren Hilfe für jedes Bild zuerst die korrigierten Summenhistogramme  $S_h(g)$  bestimmt werden, bevor man daraus die ausgeglichenen Grauwerte  $\bar{g}$  entnehmen kann.

#### 4.4.4 Besonderheiten bei Verwendung von terrestrischen Aufnahmen

Bei der Ausgleichung von Summenhistogrammen gibt es keine vorgegebene Zielfunktion; diese wird quasi automatisch im Zuge der Ausgleichung bestimmt. Vor allem bei Luft- oder Satellitenbilder führt diese Vorgangsweise auch meist zu einem guten Ergebnis, da sich die Beleuchtungsverhältnissen bei verschiedenen Bilder nicht so stark ändert. Bei terrestrischen Aufnahmen kommt es wesentlich öfter zu sehr unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen. Die Ursachen dafür können zum Beispiel wechselnde Lichtverhältnisse durch Wolken sein, die zu verschiedenen Kameraeinstellungen in Blende oder Belichtungszeit führen. Solche Bilder haben einen negativen Einfluß auf das Gesamtergebnis, und es ist daher besser, nur eine Teilmenge der Bilder zur Bestimmung der Zielfunktion zu verwenden.

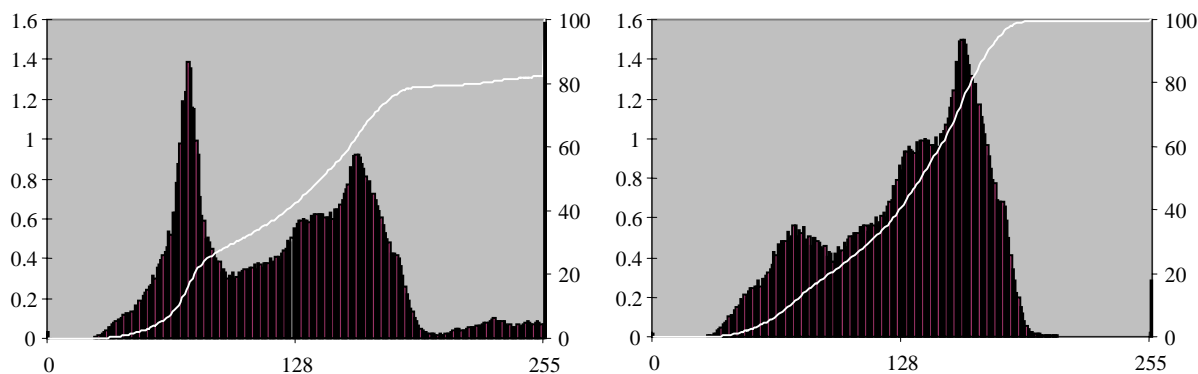
Ein weiteres Problem bei Verwendung von terrestrischen Aufnahmen ist jenes, dass nicht der gesamte Bildinhalt von Bedeutung ist. Neben dem eigentlichen Objekt befindet sich auf solchen Aufnahmen auch Himmel, Straße, Autos, Bäume und sonstige Umgebung. Der Anteil an der Gesamtbildfläche dieses, im Sinne des modellierten Objektes, sinnlosen Bildinhaltes variiert im Normalfall zwischen 10% und 60%. Bei der radiometrischen Anpassung sind aber nur jene Teile des Objektes von Interesse, die auch für die Texturierung verwendet werden. Der übrige Bildinhalt muß in die Berechnung nicht eingehen. Gerade dieser ist es aber, der aufgrund seiner Ausdehnung und Farbmonotonie (Himmel sehr hell, Straße einheitlich dunkles grau) maßgeblich die Form des Histogrammes und damit des Ergebnisses beeinflusst.



**Abbildung 4-10: Bildmaske der relevanten Bildinformation für die radiometrischen Anpassung**

Aufgrund der Objektmodellierung und der bekannten Bildorientierungen ist es aber möglich, in den einzelnen Bildern die Umrisse des 3D Modells zu ermitteln ([Leroy, 1998]). Für die Berechnung von Histogrammen werden dann nur die innerhalb dieser Bildmaske liegenden Grauwerte verwendet (Abbildung 4-10). Die Ermittlung der Bildmaske basiert einzig und allein auf der Modellierung; nicht modellierte Objekte, wie etwa Sichthindernisse (Auto, Baum, Bank, Laterne, ...) werden nicht berücksichtigt und können daher auch innerhalb der Bildmaske vorkommen. Ihr Anteil ist aber verglichen mit Himmel, Straße und Ähnlichem von geringem Einfluß.

Nach der radiometrischen Anpassung können zwar die nicht berücksichtigten Bildteile optisch völlig falsche Grauwerte haben, doch sind diese Artefakte für die weitere Verwendung der Bilder (Erzeugung eines Photomodells) ohne Bedeutung.



**Abbildung 4-11:** aus [Leroy, 1998]. **Histogramm und Summenhistogramm mit (links) und ohne (rechts) Verwendung der Bildmaske**

#### 4.4.5 Farbbilder

Bei der Farbwahrnehmung handelt es sich um einen Vorgang im menschlichen Sehorgan, der von Mensch zu Mensch unterschiedlich empfunden wird. "Um für den praktischen Gebrauch die Vielzahl der Farben einordnen zu können, hat man Farbsysteme entwickelt, die auf physiologischen und psychologischen Grundlagen aufbauen. Im physiologischen Bereich werden die physikalischen Gegebenheiten mit dem menschlichen Sehsinn verknüpft, im psychologischen Bereich geht es um Empfinden.

Die Sehnerven enden in der menschlichen Netzhaut in Form der sogenannten Zäpfchen und Stäbchen. Die Zäpfchen sind für die Farbwahrnehmung verantwortlich. Im wesentlichen gibt es Empfindungen in drei Farbbereichen: im Blau, im Grün und im Rot. Alle anderen Farben entstehen durch Mischung dieser drei Empfindungen. Es ist daher naheliegend, diese drei Farben als Koordinatenachsen in einem dreidimensionalen kartesischen System anzunehmen. Als Koordinatenwerte werden die Intensitäten aufgetragen, die für eine Farbmischung notwendig sind. Man erhält dann einen Farbkörper in Form eines Würfels, an dessen Ecken die Farben Rot, Grün, Blau, Cyan, Magenta, Yellow, Schwarz und Weiß angeordnet sind." (aus [Kraus et al., 1990]) Ein anderes Farbsystem ist das IHS-System, das für die Beschreibung einer Farbe die Begriffe Helligkeit (*Intensity*), Farbton (*Hue*) und Sättigung (*Saturation*) verwendet.

Im Verlauf des bisherigen Kapitels 4.4 über radiometrische Angleichung war immer nur von Grauwerten die Rede. Tatsächlich aber werden die erwähnten Algorithmen nicht auf Monochrombilder sondern auf Farbbilder angewandt. Es muß also zusätzlich darauf geachtet werden, bei der Angleichung die Farbwerte nicht zu verfälschen. Diese werden durch das Verhältnis R:G:B der 3 Kanäle Rot, Grün, Blau bestimmt, das auch nach einer Anpassung erhalten sein soll. Die simple Anwendung der Angleichung von Summenhistogrammen auf die Einzelkanäle kann also nicht zum gewünschten Ergebnis führen, da hierbei die Summenhistogramme der 3 Kanäle völlig unabhängig voneinander modifiziert werden.

Der wesentliche Unterschied zwischen verschiedenen Aufnahmen, die mit unterschiedlichen Belichtungseinstellungen durchgeführt worden sind, ist die Helligkeit. Es ist daher naheliegend, die Bilder, die im RGB System vorliegen, in ein IHS System zu transformieren. Für diese Bilder werden dann die Intensitätsbilder ausgeglichen und anschließend erfolgt wieder eine Transformation zurück in den RGB Farbraum.

Ein Ergebnis dazu zeigen die Bildausschnitte in Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13.



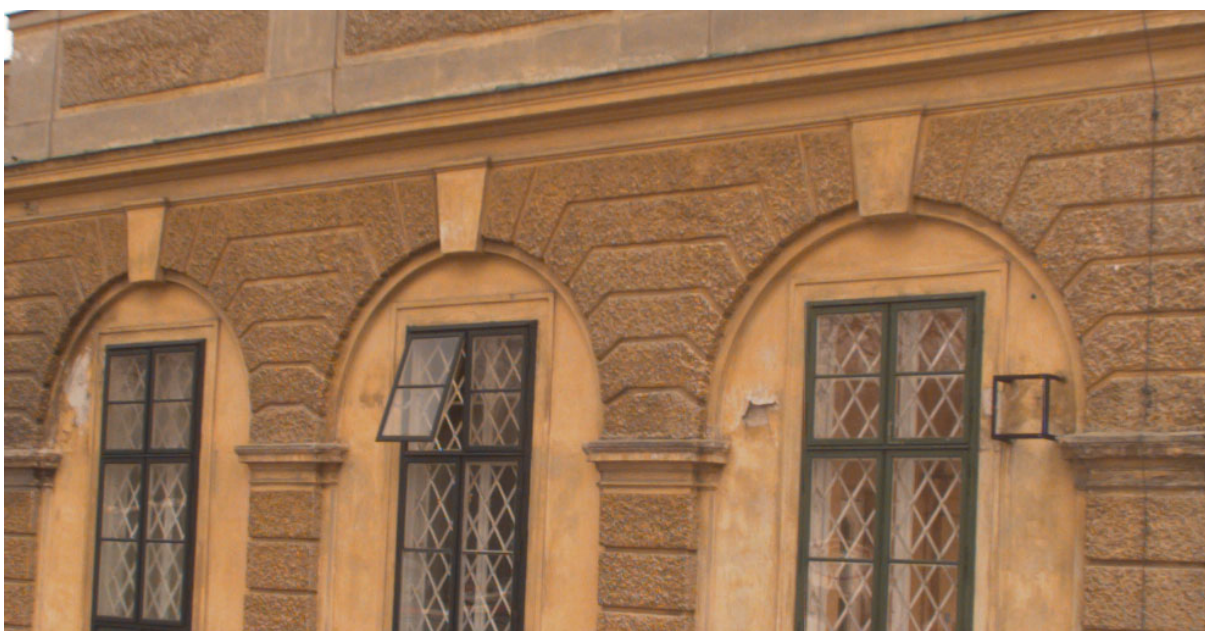
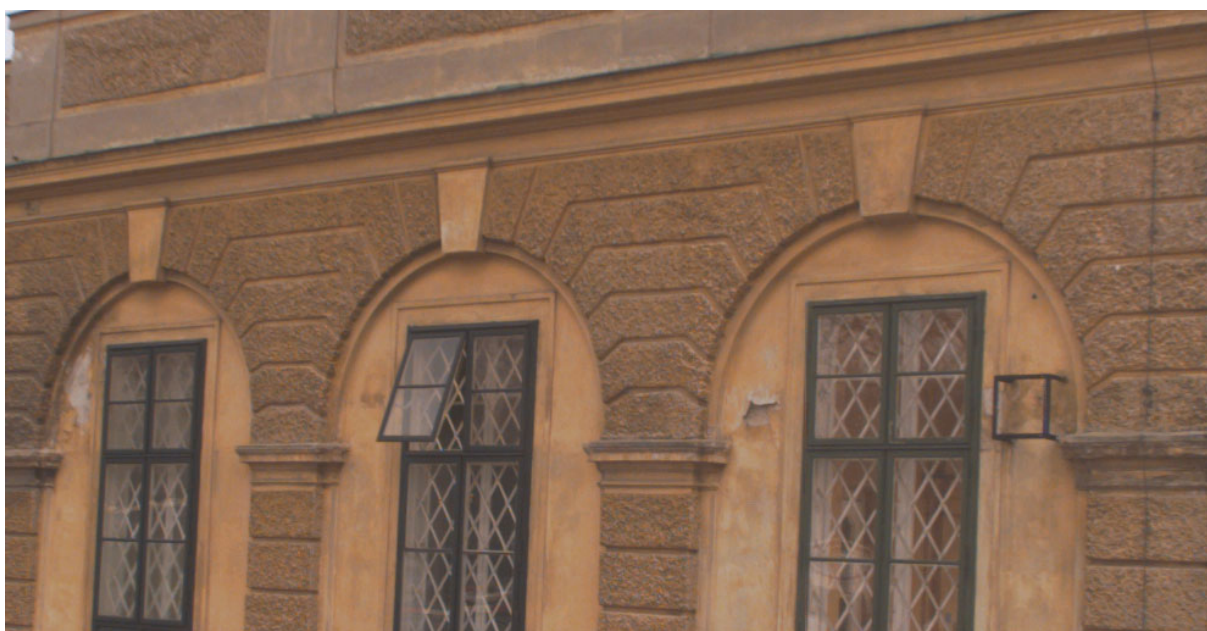
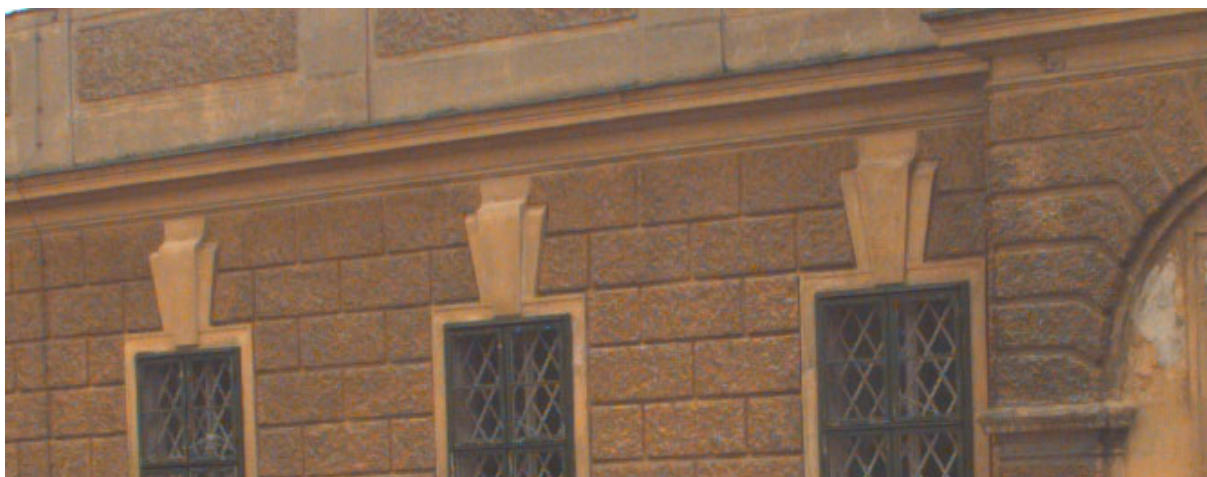


Abbildung 4-12: aus [Leroy, 1998]. Bildausschnitte aus drei Originalaufnahmen





**Abbildung 4-13:** aus [Leroy, 1998]. dieselben Bildausschnitte nach erfolgter radiometrischen Angleichung

---

## 5 Darstellung im Internet

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, um Informationen im Internet zu präsentieren. Am häufigsten geschieht dies zur Zeit zweidimensional auf Basis von HTML. Man hat aber sehr schnell erkannt, dass durch diese Art der Präsentation die Visualisierung stark eingeschränkt ist. In einer zweidimensionalen Darstellung kann Information nur in Form von Texten, Bildern oder nicht interaktiven Filmen erfolgen. Die Erweiterung der Darstellungsfläche zu einem virtuellen, dreidimensionalen Raum ermöglicht es dem Anwender, die Information zu "begehen" und der Anbieter gewinnt neue Möglichkeiten zur Visualisierung von Information. Für solche virtuellen Welten wird im Internet die 3D Beschreibungssprache VRML verwendet.

### 5.1 HTML (Hypertext Markup Language)

HTML ist abgeleitet von SGML (Standard Generalized Markup Language), einem internationalen Standard für Textauszeichnungssprachen. Die Standardisierung von HTML wird durch das *World-Wide-Web-Consortium* (WWWC) weiter vorangetrieben. Internet-Seiten werden mit Hilfe von HTML erzeugt. HTML kann weniger als Programmiersprache sondern eher als Beschreibungssprache bezeichnet werden, welche die Struktur und das Layout eines WWW-Dokumentes festlegt. Diese Beschreibung wird in einer reinen Textdatei abgelegt, die bei Aufruf durch den Web-Browser interpretiert und auf dem Bildschirm ausgewertet wird. In HTML ist es auch möglich, Multimedia-Objekten wie Bilder, Ton, Videos oder auch 3D Welten, die mit VRML erzeugt wurden, in die Internet Seite einzubinden. Meist sind diese Objekte durch entsprechende Verweise (Hyperlinks) für den Benutzer als solche gekennzeichnet.

Ursprünglich wurde durch einen Link der Inhalt des aktuellen Browser-Fensters durch den neuen ersetzt oder ein neues Browser-Fenster geöffnet. Durch die Verwendung von Frames (Rahmen) können WWW-Seiten in mehrere Teile unterteilt werden, die unabhängig voneinander Inhalte präsentieren können. In einem solchen Frame kann zum Beispiel ein Auswahlménü zur Verfügung gestellt werden, während in einem anderen Frame derselben Seite die ausgewählte Information angezeigt wird. Ursprünglich als browserspezifische Lösung der Firma Netscape™ eingeführt, hat das Konzept der Frames heute breite Anwendung auf WWW-Seiten gefunden. Frames werden bei Netscape™ ab der Version 2.0 und beim Internet Explorer von Microsoft™ ab der Version 3.0 unterstützt. Seit HTML 4.0 gehören Frames auch zum offiziellen HTML-Standard. Eine vollständige Spezifikation findet sich zum Beispiel bei [Münz & Nefzger, 1999].

### 5.2 JavaScript

Bei JavaScript handelt es sich um eine objektbasierte Scriptsprache. Sie unterstützt das Objektkonzept mit einigen schon bereitgestellten Objekten allgemeiner Art, sowie der Möglichkeit, eigene neue Objekte zu definieren. Nicht unterstützt werden wichtige Konzepte objektorientierter Sprachen (z.B. Java, C++), wie etwa die Vererbung. JavaScript wurde von der Firma Netscape™ Communications entwickelt und auch lizenziert. Deshalb beherrschen die jeweils neuen Versionen des Netscape-Browsers auch immer etwas mehr JavaScript-Funktionalität als die Konkurrenz und es sind nicht alle Befehle von allen Browsern interpretierbar.

JavaScript ist kein direkter Bestandteil von HTML, sondern eine eigene Programmiersprache. Diese Sprache wurde jedoch eigens zu dem Zweck geschaffen, HTML-Autoren ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dessen Hilfe sich Internet-Seiten optimieren lassen. JavaScript Programme werden zur Laufzeit interpretiert. Dazu besitzen die gängigen Internet-Browser



entsprechende Interpreter. Der Vorteil von JavaScript gegenüber Java ist, dass der Programmcode sich direkt in der HTML-Datei befinden kann und nicht erst übersetzt werden muss. Speziell für kleine Aufgaben bildet JavaScript eine einfache Programmierumgebung zur funktionalen Erweiterung von HTML. Externe JavaScript-Dateien wiederum haben den Vorteil, für mehrere HTML-Dokumente zur Verfügung zu stehen. Eine vollständige Spezifikation zu JavaScript ist zum Beispiel bei [Holzner, 1998] zu finden.

## 5.3 Java

Java ist eine objektorientierte, plattformunabhängige Programmiersprache, die von der Firma Sun Microsystems entwickelt wurde. Die Syntax enthält wesentliche Teile von C und C++, verfügt aber nicht über Konstrukte wie Zeiger und zusammengesetzte Strukturen. Im Gegensatz zu JavaScript ist der Code bei Java kompiliert und liegt als binärer Java Byte-Code vor. Im Sinne des Urheberschutzes hat Java daher den Vorteil, dass der kompilierte Code nicht direkt (z.B. in einem Texteditor) gelesen werden kann.

Java Programme, die in HTML-Seiten eingebunden sind, werden als Applets bezeichnet. Beim Laden einer Web-Seite wird der Byte-Code des Applets vom jeweiligen Server übertragen und im Browser ausgeführt. Es muss daher beim Benutzer keine Software installiert werden. Für die Programmierung von Anwendungen bietet Java eine umfangreiche Schnittstelle (Java-Application Programming Interface - API), über die auf eine vielfältige Funktionalität, wie beispielsweise Netzwerkdienste, Anbindung von Datenbanken oder Erzeugung von Benutzeroberflächen zurückgegriffen werden kann. Eine ausführliche Java-Beschreibung ist zum Beispiel bei [Walsh & Fronckowiak, 1998] zu finden.

## 5.4 VRML (Virtual Reality Modeling Language)

### 5.4.1 Geschichte

Die ersten Ideen zur Umsetzung von virtuellen 3D-Welten im WWW hatten Mark Pesce und Tony Parisi. Sie waren auf der Suche nach einer 3D-Bedieneroberfläche oder Schnittstelle im WWW und einer dazugehörigen Sprache zur Beschreibung von Objekten im Raum, deren Wiedergabe auf dem Bildschirm und einer Verknüpfung des Ganzen mit dem WWW.

"Die Geburtsstunde von VRML lässt sich ziemlich genau fixieren: der 20. April 1994 auf dem ersten internationalen World-Wide-Web-Kongress bei CERN in Genf. Es war Timothy Berners-Lee, der Erfinder des WWW, der den Anstoß für die Erfindung von VRML gab. Als Organisator des ersten WWW-Kongresses plante er einen Vortrag über "VR im WWW", noch bevor er dafür einen Redner hatte. In Mark Pesce erkannte er den Visionär, der ein solches Vorhaben ins Leben rufen und aktiv vorantreiben könnte. Alle drei – Berners-Lee, Pesce und Parisi – hatten das Ziel, die zwei heißesten Themen der Branche miteinander zu verbinden: das World Wide Web (WWW) und die "virtuelle Realität" (VR)." (aus [Kloss et al., 1998])

Im Rahmen dieser Konferenz wurde also eine Sitzung unter dem Thema „Virtual Reality Markup Language and the World Wide Web“ abgehalten. Hier wurden die Vorstellungen eines plattform-unabhängigen Standards für 3D-Anwendungen im WWW entwickelt und der Begriff VRML geprägt, wobei später das Wort "*Markup*" durch "*Modeling*" ersetzt wurde. Das Computermagazin WIRED stellte eine Mailing-Liste zur Verfügung, die es ermöglichte, Vorschläge und Diskussionsbeiträge zur Entwicklung von VRML per Email auszutauschen.

In den darauffolgenden Wochen sammelten sich etliche hundert begeisterte Mitwirkende. Die Zahl der täglichen Beiträge schwankte zwischen 20 und 120. Dieses völlig offene Forum wurde zum Zentrum des VRML-Entwicklungsprozesses. Als einer der ersten Punkte wurde beschlossen das Gesamtziel in drei Schritten anzugehen:

- die Beschreibung von Strukturen: wie Dinge in einer virtuellen Welt aufgebaut werden
- die Beschreibung vom Verhalten: wie solche Dinge sich bewegen
- die Beschreibung der Kommunikation: wie bewegliche Welten verteilt werden.

Diese drei Ziele sollten den jeweilige Fokus für drei geplante Ausbaustufen von VRML definieren.

Bereits weniger als 6 Monate später, auf der zweiten WWW-Konferenz in Chicago (Oktober 1994), wurde von Tony Parisi und Gavin Bell ein Entwurf für VRML 1.0 präsentiert. Den Kern bildete der lizenzfrei veröffentlichte Teil des Dateiformates "Open Inventor" der Firma Silicon Graphics Incorporation (SGI). "Open Inventor" ist eine C++-Klassenbibliothek, mit deren Hilfe sich dreidimensionale Szenen generieren lassen. In Folge wurde frei verfügbare Software entwickelt, um VRML-Welten zu erzeugen beziehungsweise wiederzugeben.

Auf der SIGGRAPH 95 (August 1995) wurde von Mark Pesce und Rick Carey die *VRML Architecture Group* (VAG) gegründet, die sich vor allem um die Koordinierung des Standardisierungsprozesses kümmert. Sie wurde auch zum zentralen Betreiber der VRML-Mailing-Liste. Im Jänner 1996 rief die VAG öffentlich zur Abgabe von Vorschläge für VRML 2.0 auf, wobei unter andern Vorschläge von Apple, Microsoft und SGI kamen. Durch Abstimmung im Internet wurde der Vorschlag von SGI mit dem Titel "Moving Worlds" angenommen.

Auf der SIGGRAPH96 in New Orleans (August 1996) wurde die Entwicklung "Moving Worlds" unter dem Namen VRML97 vorgestellt und das *VRML Consortium* gegründet. Es soll ohne Gewinn arbeiten und die Meinungen und Vorschläge der VRML-Gemeinschaft bündeln, um die Entwicklung von VRML zu fördern. Der Begriff VRML und die Spezifikation sind Eigentum des Consortiums.

Im Dezember 1997 schließlich wurde VRML97 durch die ISO (*International Organization for Standardization*) als Internationaler Standard (ISO/IEC 14772) zur Beschreibung interaktiver virtueller Welten im Internet festgelegt [ISO 1997]. Spezielle "Working Groups" beschäftigen sich ausschließlich mit bestimmten Teilbereichen von VRML, um etwaige Verbesserungen oder Ergänzungen für die Spezifikation zu erarbeiten.

#### **5.4.2 VRML-Versionen**

VRML 1.0 hatte zur Aufgabe, Objekte und deren Eigenschaften im dreidimensionalem Raum durch eine inhaltliche, plattform-unabhängige Sprache zu beschreiben.

Folgende grundlegende Funktionen wurden erfüllt:

- Nutzung von Koordinatensystemen.
- Objekte können aus Polygonen zusammengesetzt und mit Attributen wie Farbe und Oberflächenbeschaffenheit versehen werden.
- Platzierung der Objekte in der Szene.
- Objekte für eine Szene können verteilt im Netz stehen.
- Verwendung alternativer Darstellungen (verschiedene Detailstufen, Auflösungen,...).

Für die Kommunikation im Netz wurde keine Neuerfindung probiert, sondern auf HTTP gesetzt. Auch aus diesem Grund wurde VRML als Erweiterung von HTML verstanden, und daher entstanden sehr schnell von führenden Herstellern VRML-Viewer als Plug-Ins für HTML-Browser. VRML 1.0 ermöglicht es statische Welten zu erzeugen, die der Benutzer virtuell durchwandern und erforschen kann.

Bei der Weiterentwicklung zu VRML 97 wurden folgende grundlegende Veränderungen und Ergänzungen durchgesetzt:

- Syntax Bereinigung der VRML-Datenstruktur
- Neue Inhalte: Ton, Video, Animation, Interaktion
- Erweiterbarkeit durch Scripts analog der Script-Ideologie in HTML
- Erweiterbarkeit durch Prototypen, das heißt die Möglichkeit zur Erzeugung eigener (nicht standardisierter) Objekte
- Definition von Programmschnittstellen (API) mit denen sich Szenen auch von außen steuern lassen.

Eine der wesentlichen Neuerungen stellt die Möglichkeit zur Animation und Interaktion in der virtuellen Welt dar. Aus diesem Grund hatte der Entwurf von SGI den Namen "Moving Worlds" ("Bewegte Welten").

Unter *Animation* versteht man die automatische Bewegung von Objekten, die durch laufende Änderung ihrer Position in der Welt erzeugt wird. Diese Bewegung spielt sich auch ab, wenn der Betrachter in der VRML-Welt in Ruhe verharrt, das heißt, wenn sich seine Benutzersicht nicht ändert. Der Begriff Animation wird aber auch gerne für sich automatisch verändernde Formen, Lichteffekte, Geräuscheffekte oder ähnliches verwendet. Auch Rundflüge, bei denen der Benutzer den Eindruck hat, sich durch die Szene zu bewegen, werden als Animation bezeichnet, da sie automatisch ablaufen.

Unter *Interaktion* versteht man das Einwirken in eine VRML-Szene von außen, um Objekte (im eigentlichen Sinn) reagieren zu lassen. Es kann zum Beispiel ein Objekt aufgenommen und an einem andern Platz abgelegt oder ein Schalter umgelegt werden, der eine Animation auslöst. Das scheinbare "Durchwandern" einer Szene stellt keine Animation dar, sondern bloß eine interaktive Bewegung des Benutzers.

"Die Besonderheit von VRML ist, dass die Darstellung einer VRML-Welt getrennt ist von der Beschreibung dieser Welt. Das ist der entscheidende Unterschied zu Standards zur 3D-Graphikprogrammierung wie OpenGL [Neider, 1993] oder DirectX [Microsoft, 1998]. Die 3D-Darstellung einer Szene in Echtzeit übernimmt der VRML-Viewer." (aus [Landes, 1999])  
VRML stellt damit eine plattform-unabhängige Sprache dar.

### **5.4.3 Aufbau und Struktur**

VRML verwendet, wie die meisten Szenen-Beschreibungssprachen (SDL – Scene Description Language), einen objektorientierten Ansatz, um die Anordnung von 3D Objekten in einer Szene zu beschreiben. Eine VRML Datei besteht somit aus einer Liste von Objekten, die als Knoten (*nodes*) bezeichnet werden. Solche Knoten dienen zum Beispiel zur Beschreibung der Geometrie (Quader, Kugel, Polygon, ...), der Beschaffenheit von Körpern (Farbe, Material, ...), oder der Modellierung der Umgebung (Lichtquelle, Nebel, ...). Andere Knoten repräsentieren Sensoren zur Interaktion mit dem Benutzer oder dienen dazu obige Knoten zu Gruppen zusammenzufassen. Durch die Kombination der verschiedenen Knoten entsteht eine hierarchische Struktur, die als Szenengraph bezeichnet wird. Eine VRML-Datei enthält genau

einen Szenengraphen, der als reiner ASCII Text gespeichert wird. Für die Zeichenkodierung wird das Format UTF-8 (Unicode Transformation Format) gemäß ISO/IEC 10646-1 [ISO 1993] verwendet.

Laut Spezifikation gibt es in VRML97 5 verschiedene Gruppenknoten und 28 vordefinierte Kindknoten. Zusätzlich existieren noch 21 weitere Knoten (Objektknoten), die ausschließlich der Erzeugung und Gestaltung geometrischer Objekte dienen.

Gruppenknoten können eine beliebige Anzahl anderer Knoten enthalten. Eigenschaften eines übergeordneten Knotens (z.B. Transformation) werden an die untergeordneten weitergegeben (vererbt). Jeder Knoten ist durch einen Knotentyp (Box, Fog, ...) gekennzeichnet, der gemäß Spezifikation vordefiniert ist. Er besitzt verschiedene Eigenschaften (sogenannte Felder), die ihn charakterisieren. Jedes Feld hat einen Standardwert eines bestimmten Datentyps, so dass in der VRML-Datei nur jene Felder angegeben werden müssen, deren Werte sich vom Standardwert unterscheiden.

Zusätzlich zu den vordefinierten Knoten können vom Benutzer mit Hilfe der Anweisung **PROTO** eigene Knoten definiert werden. Die Idee von Prototypen besteht darin, häufig benötigte Knotentypen, die in der Spezifikation nicht enthalten sind, selbst zu erzeugen und damit den Sprachumfang von VRML zu erweitern. Prototypen müssen nicht in derselben Datei, wie der Szenengraph, deklariert werden, sondern können auch in externen Dateien abgelegt sein. Damit lassen sich Knotenbibliotheken aufbauen, die von mehreren genutzt werden können.

Neben der Erweiterbarkeit durch Prototypen gibt es in VRML noch die Möglichkeit der Referenzierbarkeit von Knoten. Dazu werden die Anweisung **DEF** und **USE** verwendet. Mit DEF kann einem beliebigen Knoten eine Bezeichnung zugeordnet werden, über die dann der Knoten mit USE referenziert werden kann. Dies ermöglicht es, bereits erzeugte Teilszenen mehrfach zu verwenden. Der Einsatz von DEF-USE ist allerdings auf die Benutzung innerhalb einer Datei beschränkt und bietet außerdem keine Möglichkeit, die eingefügte Teilszene durch zusätzliche Parameter zu beeinflussen. Bei der Verwendung von USE handelt es sich also um eine 1:1 Kopie des mit DEF erzeugten Objektes. Für die Visualisierung von Photomodellen ist daher die Anweisung USE ungeeignet.

Die Anweisung DEF hingegen hat auch noch eine andere Anwendungsmöglichkeit. Die meisten VRML-Knoten besitzen neben ihren statischen Feldern auch die Fähigkeit Ereignisse (*events*) zu senden und zu empfangen. Es existieren insgesamt 4 verschiedenen Typen von Feldern in VRML97. Neben dem normalen, statischen Feld (*field*) gibt es noch unidirektionale Ereignisfelder (*eventIn*, *eventOut*) und bidirektionale Ereignisfelder (*exposedField*). Ein unidirektionales Feld besitzt innerhalb der Knotendefinition keinen Standardwert. Es nimmt während der Darstellung Ereignisse entgegen (*eventIn*) oder sendet Ereignisse aus (*eventOut*). Das Feld *exposedField* entspricht dem normalen Feld mit dem Unterschied, dass während der Darstellung sein Wert durch ein Ereignis dynamisch geändert werden kann, bzw. eine Änderung des Wertes das Aussenden eines Ereignisses zur Folge haben kann. Es kann also sowohl als *eventIn*, als auch als *eventOut* fungieren.

Die Verbindung zwischen einem Knoten, der sendet und einem, der empfängt wird als **ROUTE** bezeichnet. Voraussetzung dafür ist, dass die betroffenen Knoten mit Hilfe der DEF Anweisung einen eindeutigen Namen erhalten haben, und dass die Datentypen der beiden Ereignisfelder *In* und *Out* übereinstimmen. Eine ROUTE stellt keinen Knoten dar. Es ist lediglich ein Kontrollmechanismus zur Kommunikation von Meldungen und Ereignissen zwischen Knoten über eine definierte Schnittstelle.

## 5.5 VRML-Knoten

Im folgenden sollen einige spezielle Knoten beschrieben werden, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Visualisierung von 3D Photomodellen stehen. Weitere Knoten sind auch in Kapitel 6.2 beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung aller VRML-Knoten findet man in [Carey & Bell, 1997].

### 5.5.1 NavigationInfo

In Verbindung mit Multi-User-Welten, worin mehrere Nutzer gleichzeitig auf dieselbe Szene zugreifen, in ihr agieren und sie eventuell verändern, existiert der Begriff Avatar. Dabei handelt es sich um eine künstliche Figur, die das eigene Ich in der virtuellen Welt repräsentiert, damit man von anderen Teilnehmern "gesehen" wird. Bei Photomodellen ist die Visualisierung des eigenen Ichs nicht sinnvoll, vielmehr wird die Szene (wie üblich) aus der Ich-Perspektive (der Benutzersicht) gesehen.

Um die Eigenschaften der Benutzersicht und die Navigation durch die Welt zu definieren, benutzt man den VRML-Knoten *NavigationInfo*. Hier kann der Mindestabstand für Kollisionen mit Objekten, die Flughöhe, die maximale Sichtweite, oder die Navigationsgeschwindigkeit in Einheiten pro Sekunde festgelegt werden. Zusätzlich kann die Art der Navigation bestimmt werden, wobei laut Spezifikation vier Arten möglich sind:

- *walk*: In diesem Modus steht der Avatar immer aufrecht (normal auf die xz-Ebene) (siehe Kapitel 5.7) und es wirkt auf ihn die Gravitation.
- *fly*: Im Unterschied zu *walk* wirkt hier keine Gravitation. Der Avatar kann daher auch über ein Gelände oder Objekte "fliegen".
- *examine*: Hier wird durch die Bewegungen der Maus nicht der Avatar sondern das Objekt bewegt. Man kann es drehen, verschieben, vergrößern und verkleinern.
- *none*: Hier besteht keine Navigationsmöglichkeit für den Benutzer.

### 5.5.2 Anchor

Ähnlich zu HTML kann auch in VRML der Zugriff auf andere Dateien im Internet durch Hyperlinks erfolgen. Der entsprechende VRML-Knoten heißt *Anchor*, er besitzt ein Feld *url*, in dem die WWW-Adresse (*Uniform Resource Locator*) der Datei steht, auf die verwiesen wird. Beim Knoten *Anchor* handelt es sich um einen Gruppenknoten mit einer beliebigen Anzahl von Kindknoten. Alle darin definierten Objekte werden als Anker für den Verweis verwendet und haben die Eigenschaft, dass sie vom Benutzer mit der Maus selektiert werden können. Durch Anklicken eines dieser Objektes wird zur angegebenen Adresse verzweigt. Handelt es sich bei dem Verweis um eine VRML-Datei so wird die aktuelle Szene durch die neue ersetzt. Andere Dokumente (z.B. eine HTML-Seite) ersetzen ebenfalls die Szene oder sie werden in einem eigenen Browser-Fenster oder Frame dargestellt.

In einem Gebäudeinformationssystem, zum Beispiel, kann ein Mausklick auf die Fassade eines Geschäftes zu einem Photomodell des Innenraumes führen. Der Link kann aber auch ein Textdokument mit Zusatzinformationen über Warenangebot, Öffnungszeiten, Telefonnummer und ähnliches öffnen, oder auch einfach nur zu einer detaillierten Ansicht der Schaufensterauslage führen.

### 5.5.3 Billboard

Der Name dieses Knotens bedeutet etwa soviel wie Reklametafel und hat die besondere Eigenschaft, seine Orientierung immer in Richtung der aktuellen Position des Betrachters auszurichten. Normalerweise erfolgt die Ausrichtung durch Rotation um eine vorgegebene Achse. Einen Spezialfall stellt die Rotationsmöglichkeit um alle Achsen dar, man spricht dann von *screen-alignment*.

Der Knoten **Billboard** findet häufig Anwendung bei Schriftzügen, die ein Objekt bezeichnen, da es in diesem Fall gewünscht ist, diesen aus jeder Perspektive zu sehen. Eine andere Einsatzmöglichkeit sind Objekte, die rundherum relativ homogen sind (Bäume, Straßenlaternen, ...). Solche Objekte werden meist nicht für ein Photomodell mitmodelliert, sondern dienen dazu das Ergebnis optisch ansprechend zu gestalten. Das "Modell" besteht daher meist nur aus einem rechteckigen, ebenen Polygon, bei dem als Textur eine Grafikdatei mit dem Bild des Objektes verwendet wird. Bei jeder Bewegung des Benutzer wird es mitgedreht, so dass es dreidimensional erscheint. Dieser Effekt wird zusätzlich verstärkt, wenn das verwendete Grafikformat transparente Pixel unterstützt. Dadurch erhält die Texturdatei durchsichtige Stellen und der Hintergrund der VRML-Szene scheint durch.

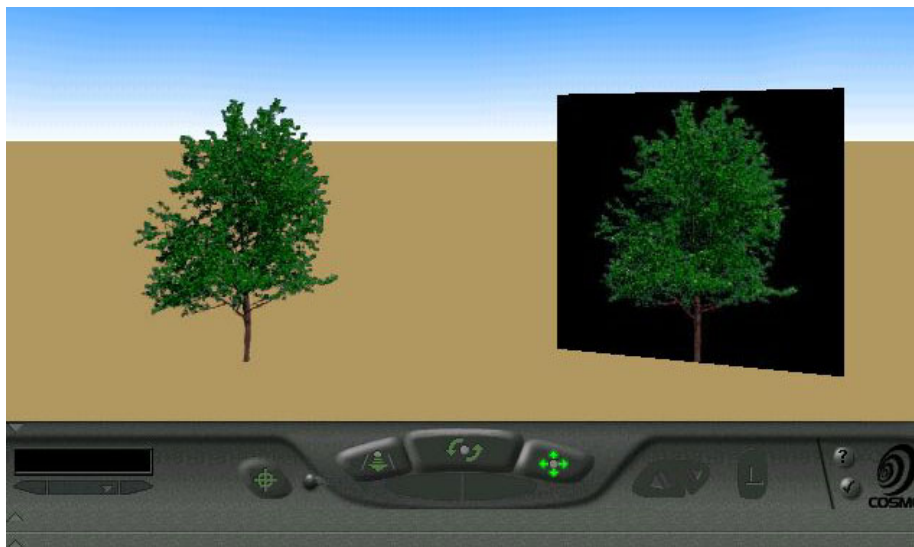


Abbildung 5-1: aus [Zeisler, 1999]. Billboard im VRML-Viewer CosmoPlayer™.  
Baum mit und ohne transparenter Textur

### 5.5.4 Shape

3D Objekte in einer Szene werden im VRML-Knoten **Shape** realisiert. Dieser enthält genau einen Geometrie-Knoten im Feld *geometry*, und die Objektattribute im Feld *appearance*.

Der wichtigste Geometrie-Knoten im Zusammenhang mit Photomodellen im Nahbereich ist der **IndexedFaceSet**. Er repräsentiert ein 3D Objekt, das durch ebene Polygone gebildet wird. Die Koordinaten der Objektpunkte werden im Knoten (**Coordinate**) zusammengefasst, die Topologie ist mit Hilfe des Feldes **coordIndex** realisiert, das die Indizes der Polygonpunkte enthält. Der Index bezieht sich dabei auf die Punkte im Knoten **Coordinate**. Zusätzlich existieren unter anderem noch Felder für die Verwendung von Texturkoordinaten, sowie die Berücksichtigung von Umlaufsinn und Komplexität der Polygone.

Der Knoten *Appearance* definiert die optischen Eigenschaften der Geometrie. Dies können einerseits Eigenschaften wie Farbe, Transparenz oder Leuchtkraft sein, und andererseits Texturen. Als Dateiformate für Texturbilder werden JPEG, PNG und GIF unterstützt.

## 5.6 Möglichkeiten der Interaktion mit VRML-Szenen

Bis jetzt galt das Hauptaugenmerk der reinen Visualisierung des Photomodells. Durch bestimmte VRML-Knoten zum Setzen von Lichtquellen oder zur Festlegung des Hintergrundes lässt sich schließlich auch eine optisch ansprechende Umgebung gestalten. Zudem kann über den Einsatz von *Anchor*-Knoten aus der VRML-Szene heraus weiter Information abgefragt werden. Dadurch wird ein Produkt erzeugt, das vor allem die breite Masse anspricht und für kommerzielle Zwecke geeignet ist.

Aus technischer Sicht wäre es aber auch wünschenswert, geometrische Informationen aus dem dargestellten Photomodell erhalten zu können. Die geometrisch richtige Phototextur ist zwar vorhanden, kann aber nicht direkt im Photomodell ausgewertet werden. Lediglich ein Verweis (*Anchor*), beispielsweise auf ein Orthophoto, das als Grafikdatei abgelegt wurde, ist möglich.

Obwohl das Öffnen einer anderen WWW-Seite, aufgrund eines Mausklicks des Benutzers, bereits als Interaktion bezeichnet wird, ist damit nur ein eingeschränkter Nutzen verbunden. Mit der Möglichkeit direkt im visualisierten Modell Koordinaten und in Folge Längen, Winkel usw. zu messen und diese auch anzuzeigen, kann das Produkt "3D-Photomodell" auch im Planungsprozess eingesetzt werden.

### 5.6.1 HUD (Head Up Display)

Eine Möglichkeit, auf die Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Umgebung zu reagieren, bieten die sogenannten Sensor-Knoten. Diese können unter anderem dazu benutzt werden, Position und Orientierung des Avatars zu erfassen, oder Objekt- bzw. Texturkoordinaten auszulesen. Sensor-Knoten lösen in bestimmten Fällen Ereignisse (*events*) aus, die über den ROUTE Mechanismus weitergeleitet und verarbeitet werden können. Um zum Beispiel Koordinaten in VRML ausgeben zu können, erzeugt man am einfachsten ein sogenanntes *Head Up Display* (HUD). Darunter versteht man eine Anzeige, die ihre Entfernung, Position und Orientierung in Bezug auf den Betrachter nicht verändert, auch wenn sich dieser bewegt. Sind nun Objekte in der Szene mit Berührungs-Sensoren (*TouchSensor*) ausgestattet, dann produzieren diese Ereignisse, wenn sich der Mauszeiger über ihre Oberfläche bewegt.

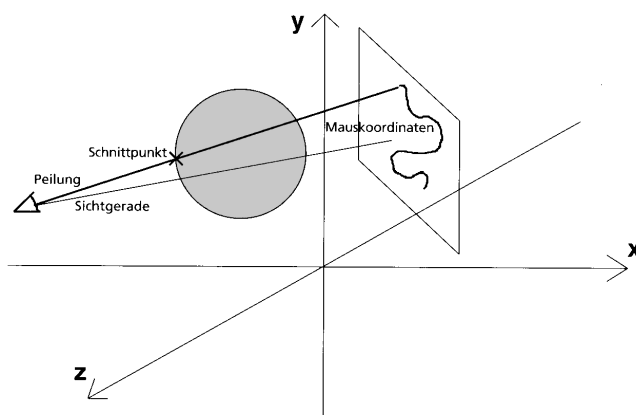


Abbildung 5-2: aus [Zeisler, 1999]. Prinzip der Peilung

Zur Feststellung der Berührung wird angenommen, dass sich die Maus in einer Ebene bewegt, die senkrecht zur Sichtgerade steht. Die gedachte Linie von der Position des Betrachters zur aktuellen Position der Maus wird als Peilung bezeichnet. Schneidet die Peilung ein Objekt, so entstehen ein oder mehrere Schnittpunkte mit seiner Oberfläche. (Abbildung 5-2). Werden mehrere Flächen geschnitten, so wird der dem Betrachter nächstliegende Schnittpunkt erfasst und diese Objektkoordinaten als Ereignis weitergeleitet. Sie werden dann in Zeichenketten umgewandelt, an das HUD gesendet und angezeigt. Der Benutzer hat somit den Eindruck eine Brille aufzuhaben, auf der die Werte (Koordinaten) abzulesen sind.

Bei Messungen auf Texturen des Photomodells wird die erwartete Genauigkeit (die bei der Erzeugung gewählte Texelgröße) auch gesichert erreicht. VRML lässt aber auch ein Zoomen zu. Der Benutzer kann beliebig nahe an ein Objekt herantreten. Die Sensoren liefern auch dann weiterhin Ergebnisse, wenn sich der Mauszeiger innerhalb eines Pixels bewegt. Die Koordinaten ändern sich also ständig und nicht nur texelweise (z.B. in 2 cm Schritten). Das bedeutet, es sind Messungen im Sub-Pixelbereich möglich. Der Benutzer kann also den tatsächlichen zu messenden Punkt innerhalb eines Pixels schätzen.

### 5.6.2 Skripts

Mit dem *Script*-Knoten kann VRML hinsichtlich solcher Anliegen funktionell erweitert werden. Ein Skript enthält ausführbare Routinen, die in einer bestimmten Programmiersprache geschrieben sind. Ein *Script*-Knoten kann Ereignisse empfangen, sie verarbeiten und wiederum neue Ereignisse zur Verarbeitung durch andere Knoten erzeugen. Zudem können in einem *Script*-Knoten Zustände und Parameter gespeichert werden.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten der Skript-Verwendung:

- Das Skript oder Programm liegt in einer externen Datei vor; der Zugriff auf die Datei erfolgt mittels `url`-Feld im *Script*-Knoten.
- Das Skript ist direkt im *Script*-Knoten (inline) kodiert, und zwar durch Angabe des entsprechenden Protokolls im `url`-Feld (`javascript:` für ein JavaScript-Skript, `javabc:` für ein Java-Skript).

Anzumerken ist hier, dass lediglich die Schnittstelle (nämlich der *Script*-Knoten selbst) zu anderen Programmiersprachen durch die VRML-Spezifikation standardisiert ist. Javascript und Java sind hingegen firmen- bzw. softwareabhängig, d.h. die einzelnen Versionen verfügen nicht über den gleichen Befehlsumfang oder unterscheiden sich sogar von Grund auf.

Um das obige Beispiel fortzusetzen, benötigt man ein Skript, das jede Bewegung des Avatars registriert und das HUD transformiert, damit es sich relativ zum Gesichtsfeld des Benutzers nicht verändert. VRML stellt selbst keine Typenkonvertierung für die Umwandlung der Koordinaten bzw. Orientierungen (Vektoren) in Zeichenketten (Strings) zur Verfügung, daher muss man auch dafür auf eine geeignete Sprache innerhalb eines *Script*-Knotens zurückgreifen. Es bietet sich hier am einfachsten JavaScript an, das entsprechende Objekte und Methoden zu Verfügung stellt.

Mit Hilfe von Skripten lassen sich VRML-Welten auch mit anderen, nicht in VRML kodierten Applikationen koppeln, um anwendungsübergreifenden Datenaustausch zu ermöglichen. Das Photomodell ist damit nicht mehr nur auf das reine Betrachten und die allgemeine Informationsbeschaffung beschränkt, sondern es können aktiv direkt in der Szene Manipulationen durchgeführt werden.



### 5.6.3 EAI (External Authoring Interface)

Bei VRML handelt es nicht um eine Programmiersprache, sondern um eine Beschreibungssprache mit Skriptunterstützung. Daher fehlen wichtige Sprachelemente für die Steuerung einer Szene, Datenbankanbindung oder Systemaufrufe. Deshalb wurde durch Festlegung von externen Programmierschnittstellen VRML zu einem offenen Sprachstandard erweitert. Eine solche Schnittstelle ist das EAI (External Authoring Interface) [Marrin, 1997].

Durch das EAI sind folgende Arten des Zugriffs auf die VRML-Szene definiert:

- Das Auslesen von Browser-Einstellungen und Objekteigenschaften
- Das Abfangen von Ereignissen, welche von Objekte aus einer Szene ausgesandt werden.
- Das Senden von Ereignissen zu Objekten innerhalb einer Szene
- Das dynamische Einbinden von Objekten in einer Szene
- Das Löschen von einzelnen Objekten aus einer Szene

Das EAI bietet diese Funktionalität über das JAVA-API an und erlaubt die Kommunikation zwischen einem Java-Applet und dem VRML-Viewer, wenn diese in die gleiche Web-Seite integriert sind. Auf diese Art lassen sich die bereits beschriebenen Interaktionsmöglichkeiten wesentlich benutzerfreundlicher gestalten. Als Weiterentwicklung der Diplomarbeit [Zeisler, 1999] wurde zum Beispiel ein Java-Applet mit Messfunktionen entwickelt, die gegenüber der oben dargestellten, Skript-basierten Lösung folgende Vorteile bietet (Abbildung 5-3):

- Die Anzeige der Koordinaten erfolgt in einem eigenen, vom Java-Applet generierten Fenster außerhalb des VRML-Viewers. Die Darstellung im VRML-Viewer selbst wird dadurch von Textelementen (z.B. in einem HUD) entlastet.
- Für die Koordinatenanzeige stehen alle von HTML unterstützten Schrifttypen zur Verfügung. Auch die Rundung der Zahlenwerte auf eine festgelegte Anzahl von Nachkomma-Stellen wurde im Java-Applet berücksichtigt. So kann die geometrische Genauigkeit des Photomodells berücksichtigt werden.
- Neben der Anzeige der aktuellen Standpunkts- und Objektkoordinaten hat sich auch die Distanzmessung mit Angabe der Höhendifferenz bewährt. Bei der hier beschriebenen Lösung legt der Benutzer mit Mausclick den Anfangspunkt der Messung fest und bewegt dann den Mauszeiger zum Endpunkt. Dabei wird permanent die aktuelle Distanz angezeigt.
- Besonders anschaulich wird diese Messung durch die Darstellung der aktuellen Strecke in Form eines „virtuellen Laserstrahls“ zwischen dem Anfangs- und Endpunkt. Anhand einer etwaigen Unterbrechung dieses Strahls, zum Beispiel bei einer Geländekuppe, erkennt der Benutzer sofort, dass keine direkte Sichtverbindung zwischen Anfangs- und Endpunkt gegeben ist. Im Gegensatz zum realen Messstrahl wird also die Entfernungsmessung immer durchgeführt, auch wenn es keine direkte Sichtverbindung gibt.



**Abbildung 5-3: Einsatz von Java-gesteuerten Messfunktionen am Beispiel einer geplanten Autobahn. In diesem Fall ist aufgrund einer Geländekuppe der angefahrte Teil der Autobahn vom Haus aus nicht sichtbar.**

Mit Hilfe von Messfunktionen im Photomodell lassen sich komplexe räumliche Beziehungen auch von Nicht-Technikern schnell quantifizieren. Fragen wie etwa „ist dieses Objekt höher als die Umgebung?“ oder „kann ich dieses Objekt von einem bestimmten Punkt aus sehen?“ stellen sich in der Praxis vor allem dann, wenn es sich um ein neues Bauprojekt in der bestehenden Umgebung handelt. Das Photomodell mit Messfunktionen eignet sich daher für die Öffentlichkeitsarbeit bei „sensiblen“ Bauvorhaben – zur umfassenden Information der betroffenen Bürger die nachteilige Auswirkungen auf die bestehende Umgebung befürchten.

In diesem Zusammenhang ist auch das Einschalten verschiedener Projektvarianten mit Hilfe eines JAVA-Applets nützlich. Die Voraussetzungen dafür müssen aber schon im Zuge der Modellierung geschaffen werden: Bei jeder einzelnen Projektvariante muss sowohl das entsprechende Modell des Projektes als auch der zu ersetzende Altbestand (z.B. die abzureißenden Gebäude) als jeweils eigene VRML Objekte vorliegen.

Durch die gemeinsame Darstellung des Photomodells mit Modellen von projektierten Bauvorhaben entsteht eine „virtuelle Welt“ die bei Stadtentwicklungs- oder Verkehrsprojekten eine Ausdehnung von mehreren km<sup>2</sup> in der Natur aufweist. Der Besucher einer so großen virtuellen Welt muss daher bei der Orientierung unterstützt werden. Für diese Aufgabe hat sich die graphische Anzeige der aktuellen Position und Blickrichtung auf einer Übersichtskarte bewährt. Die Realisierung in einem eigenen Fenster neben dem VRML-Viewer kann ebenfalls mit Hilfe eines JAVA-Applets erfolgen (Abbildung 5-4).



**Abbildung 5-4: Der Punkt in der Mitte zeigt die aktuelle Position, der Vektor die Blickrichtung des Benutzers beim Betrachten der in der Abbildung 5-3 dargestellten Szene.**

Durch die in Java verfügbaren Netzwerkklassen können VRML-Welten auch über das Internet miteinander kommunizieren, wodurch sich sogar Mehrbenutzerumgebungen realisieren lassen, die über Java-Routinen miteinander gekoppelt sind.

Diese Kombination von VRML und Java bietet zahlreiche Vorteile:

- Durch die Benutzung von plattformunabhängiger WWW-Standardsoftware ist keine spezielle Hardware erforderlich. Zwar ist für die Echtzeitdarstellung von komplexen VRML-Szenen eine Hardware-Grafikunterstützung empfehlenswert, die aber selbst für Standard-PCs verfügbar ist.
- Es müssen keine teuren Lizenzen für Software bezahlt werden.
- Nur die Software auf dem Server muss administriert werden, da keine zusätzliche Softwareinstallation auf den Clients erforderlich ist.

Damit aber die "Erforschung" des dreidimensionalen Raumes intuitiv vom Benutzer umgesetzt werden kann, sind zahlreiche Randbedingungen bei der Erschaffung einer 3D-Welt zu beachten. Dies ist um so wichtiger, wenn die 3D-Szene nicht nur zur Visualisierung, sondern auch als 3D-Benutzerschnittstelle für ein Informationssystem eingesetzt wird. Dann müssen auch weiterführende Hilfsmittel zur Navigation bereitgestellt werden, die bei der Modellierung der 3D-Szene nicht automatisch gegeben sind. [Landes, 1999]

#### **5.6.4 X3D (eXtensible 3D)**

Die VRML97 Spezifikation ist sehr komplex und es ist daher aufwendig für Softwarehersteller, diesen Standard vollständig zu implementieren. Meist wird nur ein Teilbereich, manchmal nur lesend oder schreibend, unterstützt. Da auch viele VRML-Browser VRML97 nicht vollständig unterstützen, ist es schwierig 3D-Daten über VRML auszutauschen, obwohl es von den Möglichkeiten her besser dafür geeignet ist als bestehende Standards, wie zum Beispiel DXF.

Dies war einer der Gründe für die Entwicklung von X3D™ (eXtensible 3D) [Web3D Consortium, 2001], [Web3D Consortium, 2002]. X3D soll der neue Standard für 3D-Visualisierung im Internet werden und wird bereits als Nachfolger des VRML97-Standards angesehen.

Folgende Punkte sollen durch den Einsatz von X3D abgedeckt werden:

- Kompatibilität mit bestehenden VRML-Welten und Viewern.
- Kleines einfaches Kernprofil mit Unterstützung nicht-interaktiver Animationen (X3D-1).
- Vollständiges VRML97-Profil zur Unterstützung bestehender komplexer VRML-Welten (X3D-2).
- Unterstützung weiterer Profile inklusive XML (eXtensible Markup Language) zur einfachen und engen Verknüpfung mit anderen Web-Technologien.
- Erweiterungsmechanismus zur Einführung von neuen Profilen, wie zum Beispiel die Unterstützung von NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

Im Gegensatz zu VRML folgt X3D einem komponentenbasierten Ansatz, der den Einsatz skalierbarer Applikationen und kleiner Anwendungsprogramme, sogenannter "thin clients", ermöglichen soll. Die Idee dahinter ist die, dass ein X3D-Viewer als kleines, skalierbares Java-Applet von beispielsweise nur 60 KB Größe ablaufen kann. Weitere Funktionen und Profile, die das Minimalmodell erweitern, können dann bei Bedarf dazugeladen werden.

Ein Vorteil der Verwendung von X3D liegt für den Benutzer auch darin, dass er kein Plug-In mehr auf seinem Rechner installieren muss. Das Java-Applet wird beim Aufruf der Seite automatisch geladen und die 3D-Szene dargestellt. Für die Unterstützung von VRML sind 2 Standardprofile verfügbar. Ein X3D-Kernprofil, welches die Grundfunktionen eines X3D-Betrachters beschreibt (X3D-1) und ein X3D-VRML97-Profil (X3D-2). Das X3D-Kernprofil enthält Elemente wie 3D-Geometrien, Animationen und Interaktionen sowie Rendering Mechanismen. Dieses Basisprofil unterstützt allerdings keine Navigation für einen Browser oder die Nutzung von Skript-Sprachen.

X3D ermöglicht den Firmen, in verschiedenen Stufen 3D Unterstützung anzubieten. Ein X3D-1 kompatibles Produkt wird sicher von allen Programmen, die X3D-1 unterstützen, verstanden. Durch die Aufteilung in solche Komponenten kann jeder die für ihn notwendigen Teilbereiche abdecken, ohne eine vollständige Implementierung aller VRML Spezifikationen machen zu müssen. VRML97 hat außerdem eine eigene Syntax und ist für andere Applikationen nicht ohne weiteres lesbar. XML hat sich als neuer Standard im WWW durchgesetzt und es ist daher vorteilhaft diesen als Beschreibungssprache zu unterstützen. Durch die Kodierung von X3D in XML besteht auch die Möglichkeit einer engen Verknüpfung mit anderen Web-Technologien. Damit lässt sich auch eine Standardisierung der Kommunikation mit anderen Komponenten und Programmen im WWW erreichen. Solche auf XML basierende Sprachen sind unter anderem MathML (Mathematical Markup Language) oder SVG (Scalable Vector Graphics).

## 5.7 Spezielle Problemlösungen im Zusammenhang mit Photomodellen

Das Landeskoordinatensystem in Österreich (Gauß-Krüger-System) ist ein linkshändiges, dreidimensionales, orthogonales Koordinatensystem, in dem die X-Achse (Hochwert) nach Norden und die Y-Achse (Rechtswert) nach Osten zeigt. Auf der Z-Achse werden die Höhen aufgetragen. Um das lästige Problem des Linkssystems zu umgehen, erfolgt zuerst die Angabe des Rechtswertes und anschließend des Hochwertes. In diesem System, sofern nicht irgend ein lokales System verwendet wird, werden normalerweise auch die Ergebnisse vermessungstechnischer Projekte geliefert.

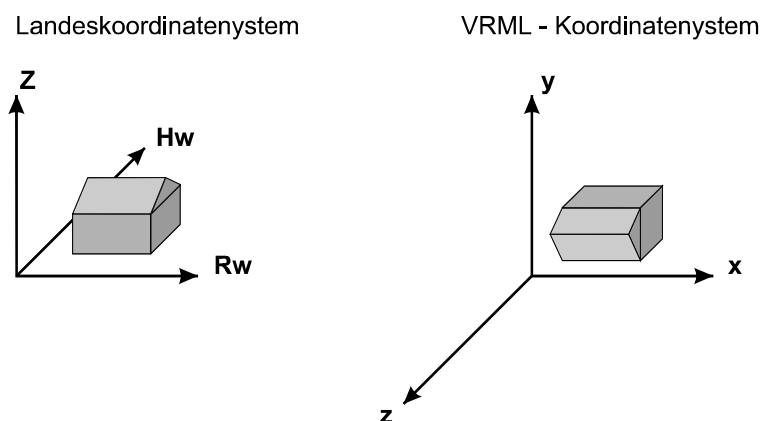


Abbildung 5-5: Haus im Landessystem und in VRML

VRML verwendet ein rechtshändiges, dreidimensionales, kartesisches globales Koordinatensystem, wobei die x-Achse nach rechts (Osten), die y-Achse nach oben (Zenit) und die z-Achse horizontal nach vorne (Süden) steht. Bei der Abbildung der Szene auf den zweidimensionalen Bildschirm wird per Voreinstellung in Richtung der positiven z-Achse projiziert (Abbildung 5-5). Die Einheiten des Koordinatensystems sind nicht vorgegeben.

Handelt es sich bei dem dargestellten Objekt um eine Zelle, so wären  $\mu\text{m}$ -Einheiten sinnvoll, während die Modellierung des Universums nach der Einheit Lichtjahre verlangen würde.

Trotzdem hat sich in der Literatur die Einheit Meter durchgesetzt, was vor allem durch die Definition der Attribute des Avatars sinnvoll erscheint. Der Standardwert im VRML-Knoten **NavigationInfo** für die Augenhöhe beträgt 1.7 Einheiten, die sinnvoll als Meter interpretiert werden können. In der Folge soll daher diese Überlegung beibehalten werden. Bei allen Winkelangaben handelt es sich um Bogenmaße und bei Zeitangaben um Sekunden.

Wird eine VRML-Datei geladen, ohne weitere Angaben über die Startposition des Betrachters zu machen, so befindet man sich 10 m vom Ursprung entfernt auf der positiven z-Achse. Mit der voreingestellten Orientierung blickt der Betrachter Richtung Koordinatenursprung. Befindet sich in dieser Szene ein Photomodell, so würde der Betrachter, obwohl er per Definition aufrecht steht, von oben auf das Modell schauen, also waagrecht in der Luft schweben. Auch die vordefinierten Navigationsarten (Kapitel 5.5.1) haben so keinen Sinn mehr (vor allem der *walk*- und der *fly*-Modus). Es ist daher notwendig, das Photomodell zu transformieren. Dazu wird der VRML-Knoten **Transform** verwendet, mit dem Objekte skaliert, verschoben und verdreht werden können. Eine Drehung wird beispielsweise durch Angabe von vier Dezimalzahlen im Feld *rotation* definiert. Die ersten drei Werte beschreiben den Vektor der Drehachse, um die das Objekt gedreht wird. Der vierte Wert gibt den Drehwinkel im Bogenmaß an.

Zu obigem Problem das Modell "aufzurichten" findet man in der Literatur meist eine Transformation der Form "*rotation 1 0 0 -1.570796*". Durch diese eine einfache Drehung um  $-\pi/2$  ( $= -1.570796\dots$ ) um die x-Achse (durch den Vektor  $[1,0,0]$  definiert) lässt sich das Modell zwar aufrichten, doch wird dabei das Vorzeichen des Hochwertes verändert. Solange es nur um eine Visualisierung geht, spielt das keine Rolle, will man aber im Photomodell messen und die Koordinaten im Landessystem ausgeben, so muss dieser Effekt berücksichtigt werden. Besser ist es daher durch Eingabe von "*1 1 1 4.1888*" im Feld *rotation* das Modell vom Landessystem in das VRML-System überzuführen. Dabei handelt es sich um eine Drehung um 4.188790 Radianten ( $=240^\circ$ ) um die 1. Raumdiagonale (Vektor  $[1,1,1]$ ). Bei dieser Transformation werden die Koordinaten zyklisch vertauscht, ohne ihre Werte zu verändern.

## 6 Geländemodelle

Sollen Objekte aus dem Nahbereich in einem möglichst realistischen Umfeld visualisiert werden, ist dafür auch die Einbeziehung eines digitalen Geländemodells (DGM) notwendig, da sonst die Objekte scheinbar im luftleeren Raum schweben. Für die geodätische Erfassung einer Geländeoberfläche gibt es folgende standardisierte Verfahren:

- Digitalisieren von analogen Karten (manchmal die einzige Möglichkeit, wenn keine anderen Datenquellen verfügbar sind)
- tachymetrische Aufnahme (ingenieurgeodätisches Verfahren zur hochgenauen Erfassung relativ kleiner Gebiete)
- Luftbildauswertung (klassisches photogrammetrisches Standardverfahren zur großflächigen Erfassung ganzer Landstriche)
- Laserscanning bzw. SAR Interferometrie (stark automatisierte Verfahren zur Erstellung von Oberflächen- und Geländemodellen)

### 6.1 Datenstruktur

#### 6.1.1 Rastermodell

Die verbreitetste Art Geländedaten abzuspeichern ist der 2.5D-Raster. Hier wird ein regelmäßiger rechteckiger Raster verwendet, in dem für jeden ebenen Rasterpunkt genau ein Höhenwert vorliegt. Diese Struktur kann daher sehr kompakt gespeichert werden, da die Topologieinformation implizit gegeben ist. Das Rastermodell stellt die einfachste Form dar, auf Oberflächeninformation zugreifen zu können. Durch die Anordnung in Rasterform können solche Modelle auch als Bilddaten interpretiert werden. Damit ist ihre Verwendung auch in einer Vielzahl von bildorientierten Systemen möglich (z.B. Erdas-Imagine™).

Der wesentliche Nachteil einer einfachen rasterförmigen Datenstruktur ist, dass es nicht möglich ist andere Geländeinformationen, wie Geländekanten oder Formlinien zu berücksichtigen. Dieses Manko ist für "sanfte" Geländeformen oder Anwendungen in sehr kleinen Maßstäben (Rasterweiten von 1 km oder mehr) kein Problem. In sehr "schroffen" Gebieten (Alpen) oder für hochgenaue Anwendungen (Hochwasserberechnungen, DGM einer Stadt) ist eine hinreichend genaue Beschreibung der Geländeform ohne Geländekanten aber nur unter Verwendung eines sehr engen Rasters möglich. Das wiederum führt zu extrem großen Datenmengen, weil der enge Raster auch für jene Gebiete vorliegt, in denen es keine Unstetigkeit des Geländes gibt.

#### 6.1.2 Triangulierung

Als Alternative zum Raster kann die Geländeform auch durch Triangulierung beschrieben werden. In dieser Datenstruktur können Geländekanten streng berücksichtigt werden. Ein weiterer Vorteil der Triangulierung gegenüber einem 2.5D-Raster ist, dass echte 3D-Geländeformen (Felsüberhänge, senkrechte Wände) modelliert werden können. Demgegenüber steht aber ein gravierender Nachteil, der Speicherplatz. Durch die unregelmäßige Verteilung der Dreiecke ist ein effizienter Einsatz von Dreiecksketten (Triangle Strips) oder Dreiecksfächern (Triangle Fans) nur in den seltensten Fällen möglich (Abbildung 6-1), wodurch der notwendige Speicherbedarf gegenüber einem Rastermodell bei gleicher Anzahl von Stützpunkten stark ansteigt.

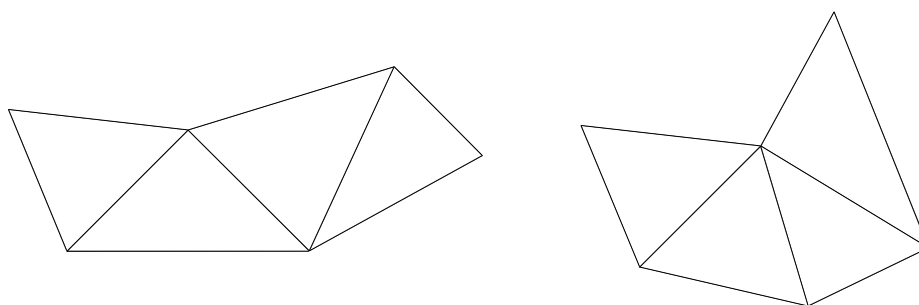


Abbildung 6-1: Dreieckskette (links) und Dreiecksfächer (rechts)

Ebenfalls deutlich aufwendiger ist der Zugriff auf Teilbereiche des Modells und das Navigieren innerhalb der Daten. Während bei einem Rastermodell sehr schnell der benachbarte Punkt oder die benachbarte Rastermasche ermittelt werden kann, stellt dies bei einer Triangulierung ein komplexes Problem dar [Heitzinger, 1999].

### 6.1.3 Hybrides Modell

Eine Erweiterung des Rastermodells stellt die hybride Datenstruktur dar. Hier werden neben dem Raster auch Geländekanten als Linieninformation gespeichert. Dadurch ist es möglich die Geländeform, wie bei einer Triangulierung, besser zu erfassen und trotzdem die Vorteile einer kompakten Verspeicherung und eines raschen Zugriffes beizubehalten. Solche komplexen Datenstrukturen werden allerdings nur in Spezialsystemen zur Erzeugung und Verarbeitung von digitalen Geländemodellen verwendet (Kapitel 6.3). Trotzdem können damit nur 2.5D-Daten verarbeitet werden.

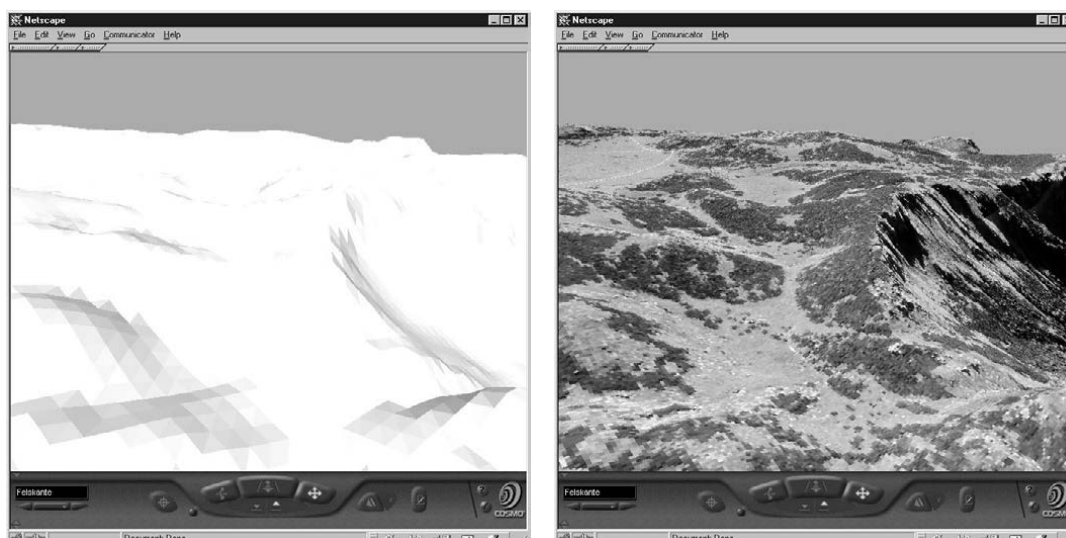
## 6.2 Visualisierung

Für die Darstellung eines DGM mit Hilfe von VRML kann sowohl eine Triangulierung, als auch ein Rastermodell verwendet werden. Bei der Triangulierung wird, wie bei Objekten im Nahbereich, der VRML-Knoten *IndexedFaceSet* benutzt (Kapitel 5.5.4).

### 6.2.1 Geländeraaster (ElevationGrid)

Liegen die Daten in Rasterform vor, so kann der VRML-Knoten *ElevationGrid* verwendet werden. Auch bei diesem VRML-Knoten besteht die Möglichkeit die Oberfläche zu texturieren. Werden dafür Orthophotos oder geokodierte Satellitenbilder verwendet, so entsteht durch die Kombination Geometrie und Phototextur ein Photomodell. Bei Verwendung eines Rasters ist die Überlagerung mit einem Orthophoto wesentlich einfacher zu realisieren. Es genügt die Angabe des Dateinamens, während bei einem *IndexedFaceSet* zusätzlich für sämtliche Punkte die Texturkoordinaten bestimmt werden müssen.

Wie oben erwähnt führt die Verwendung eines einfachen Rasters aber zu Ungenauigkeiten und Verfälschungen der modellierten Geländeoberfläche. Im Sinne eines qualitativ hochwertigen Produktes ist daher zu prüfen, inwieweit diese Vereinfachung das Ergebnis visuell beeinflusst. Auch hier zeigt sich der Vorteil des bereits in Kapitel 3.4 erwähnten Prinzips "Bildinformation ersetzt geometrische Details". Obwohl das Geländemodell in Abbildung 6-2 nur aus einem Raster besteht, werden dem Betrachter durch die Verwendung von Phototextur scharfe Geländekanten vorgetäuscht.



**Abbildung 6-2: gleicher Ausschnitt eines Geländemodells, links ohne und rechts mit Textur**

Diese Vorgehensweise ist allerdings nur dann gerechtfertigt, wenn das Orthophoto mit entsprechender Qualität, das heißt, unter Berücksichtigung der Geländekanten erzeugt wurde, da diese sonst im Orthophoto lagemäßig versetzt abgebildet werden [Ecker, 1991].

Wie bei Objekten im Nahbereich ist es auch hier das Ziel, solche Photomodelle, basierend auf Geländedaten, mit Hilfe von Standardwerkzeugen aus der Internettechnologie interaktiv darzustellen. Drei Techniken kommen hier zum Einsatz, um trotz der großen Datenmengen eine effiziente Visualisierung zu ermöglichen.

### 6.2.2 Verteilte Welten (Inline)

Das DGM wird nicht in einem einzigen *ElevationGrid* abgelegt, sondern in mehrere sinnvolle Einheiten (Kacheln) zerlegt. Diese werden in verschiedene Dateien gespeichert, die nacheinander über das WWW transportiert und erst im VRML-Viewer zu einer vollständigen virtuellen Welt zusammengesetzt werden. Der Einsatz vieler kleiner Dateien hat, gegenüber einer einzigen großen Datei, den Vorteil, dass bereits nach kurzer Zeit für den Benutzer ein Modell sichtbar wird, in dem er navigieren kann, während die restlichen Kacheln im Hintergrund nachgeladen werden. Zudem ist ein eventueller Datenverlust einzelner Dateien beim Transport über das WWW leichter zu verkraften.

Ein weiterer Vorteil des Zerlegens des Gesamtmodells ist, dass nur jene Dateien geladen und im Speicher gehalten werden müssen, die für den Benutzer gerade sichtbar sind. Die Integration mehrerer VRML-Dateien in einer einzigen Szene erfolgt mit Hilfe der VRML-Knoten *Inline*, die ein Feld *url* besitzen, in dem die WWW-Adressen der Dateien mit dem entsprechenden *ElevationGrid* stehen.

### 6.2.3 Level-of-Detail (LOD)

Eine weitere Steigerung der Darstellungsperformance lässt sich durch den Einsatz von *Levels-of-Detail* (LOD) erreichen. Dabei wird jedes Objekt (=jeder Teil des Geländemodells) in mehreren, unterschiedlich detaillierten Versionen (Auflösungsstufen) gespeichert. Während der Visualisierung wird laufend für jedes Objekt, in Abhängigkeit seiner Entfernung zur Betrachterposition, die für die Darstellung optimale Auflösung ermittelt. Objekte in der Nähe des Betrachters, die einen großen Bereich am Bildschirm ausfüllen, werden daher mit dem höchsten



Detailierungsgrad dargestellt. Im Gegensatz dazu sind bei weit entfernten und daher kleinen Objekten, aufgrund der entsprechend reduzierten Anzahl von zur Verfügung stehenden Bildschirmpixel, manche Details ohnehin nicht mehr erkennbar, so dass eine zeitaufwendige Berechnung nicht sinnvoll ist. Daher kann hier eine reduzierte Auflösungsstufe verwendet werden, um solche Objekte sehr rasch und trotzdem ohne sichtbaren Qualitätsverlust darzustellen.

Obwohl durch die Verwendung von mehreren Auflösungsstufen in Summe eine größere Datenmenge über das WWW transportiert werden muss, kann dadurch der momentan notwendige Speicherbedarf und damit die Anforderung an die Rechenleistung für die interaktive Visualisierung deutlich verringert werden. Die Realisierung von LOD in einer VRML-Datei erfolgt mit dem VRML-Knoten *LOD*.

LOD kommen sowohl bei Modellen aus dem Nahbereich, als auch bei Geländemodellen zum Einsatz. In Verbindung mit einem *ElevationGrid* ist noch ein weiterer Punkt zu beachten. Während bei Objekten wie Gebäuden oder Brücken bei einem Wechsel zwischen zwei Auflösungsstufen jeweils das ganze Objekt durch ein mehr oder weniger detailliertes ersetzt wird, ist dies bei einem DGM nicht möglich. Das gesamte, in Kacheln zerlegte, Gelände stellt eine stetige Oberfläche dar. Durch die gleichzeitige Darstellung von verschiedenen Auflösungsstufen kommt es daher an den Übergängen zu Unstetigkeiten in der Höhe.

Damit der Benutzer diese Übergänge nicht als störend empfindet, ist daher der Wahl der Parameter für die Erzeugung der verschiedenen Auflösungen besondere Aufmerksamkeit zu schenken, zumal nicht nur für die Geometrie, sondern auch für die Phototextur Auflösungsstufen generiert werden müssen. Die Erzeugung der Auflösungsstufen, wie sie in SCOP.ATM (Kapitel 6.3) realisiert wurde, erfolgt wie folgt:



**Abbildung 6-3: Prinzip der LOD Erzeugung**

Vier Geländekacheln hoher Auflösung werden zu einer Kachel niedriger Auflösung zusammengefasst (Abbildung 6-3). Damit wird vermieden, dass zu viele Dateien in der niedrigsten (=schlechtesten) Auflösung existieren, die eigentlich kaum mehr geometrische oder radiometrische Information beinhalten. In solchen Fällen wirkt sich nämlich der oftmalige Dateizugriff negativ auf die Geschwindigkeit der Darstellung aus. Auf der anderen Seite wird erreicht, dass auch bei der höchsten Auflösung die Dateigrößen klein bleiben und rasch geladen werden können.

#### **6.2.4 Kompression**

Eine entscheidende Rolle bei einer interaktiven Visualisierung spielt die Datenmenge, die über das WWW transportiert werden muss. Durch die Kachelung erreicht man zwar eine Aufteilung in kleinere Pakete, doch muss letztendlich, wenn der Benutzer die Szene vollständig "erforscht" hat, die gesamte Datenmenge übertragen werden. Um hier die Netzbelastung zu reduzieren und die Ladezeit beim Benutzer weiter zu verringern, können die Daten komprimiert werden.

VRML-Dateien lassen sich dazu mit Hilfe des Programms "*gzip*" komprimieren. Alle guten VRML-Viewer erkennen beim Laden selbständig, dass es sich um eine komprimierte Datei handelt und entpacken diese automatisch. Zur äußerlichen Kennzeichnung besitzen gepackte VRML-Dateien oft die Endung *wrz*. Durch diese Kompression kann ohne Qualitätsverlust die benötigte Datenmenge für das gesamte geometrische Modell auf ca. 20 % verringert werden.

Bei der Erzeugung eines Photomodells (DGM und Orthophoto) werden aber mehr als 99 % der Datenmenge benötigt, um die Phototextur in unkomprimiertem Zustand zu speichern. Hier kann mit verlustbehafteten Kompressionsverfahren, wie JPEG, die Textur-Datei auf ca. 5 % (1:20) ihrer ursprünglichen Größe verkleinert werden. Der dabei entstehende Qualitäts- und Informationsverlust ist visuell kaum merkbar und ist dann gerechtfertigt, wenn die so "verfälschten" Texturbilder zur Visualisierung und Animation verwendet werden. Soll die Phototextur auch für geometrische Analysen eingesetzt werden, muss die Kompressionsrate entsprechend verringert (max. 1:10) und eine größere Datenmenge in Kauf genommen werden [Kiefner, 2001].

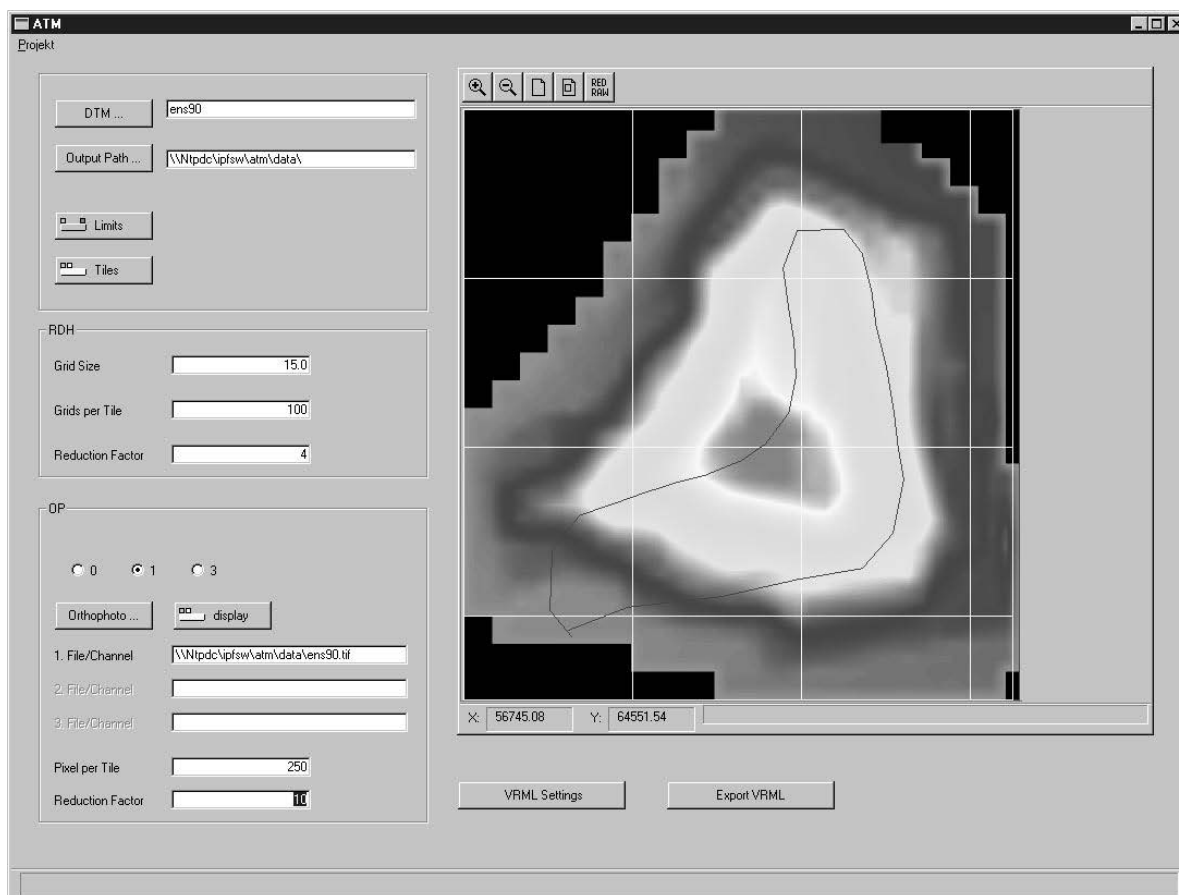
### 6.3 Implementierung

Das beschriebene Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit im System SCOP.ATM realisiert. SCOP selbst ist ein modulares Programmsystem zum Aufbau und zur Auswertung digitaler Geländemodelle [Molnar, 1992]. Es wurde Ende der 70er Jahre am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung in Wien in enger Zusammenarbeit mit der INPHO GmbH in Stuttgart entwickelt. Seit dieser Zeit wurde die Funktionalität ständig erweitert und verbessert.

Das SCOP Geländemodell ist ein hybrides Modell, das Rasterdaten mit Liniendaten verknüpft und dadurch hohe Qualitätsansprüche erfüllt. Aufbauend auf dieser zentralen Datenstruktur können mit speziellen Modulen eine Reihe von Folgeprodukten abgeleitet werden. Zu diesen zählen unter anderem:

- ISO: Berechnung von Isolinen von Modellen auf Basis der SCOP Datenstruktur. Die Modelle können Höhenmodell, Neigungsmodelle oder Differenzmodelle sein.
- DOP: Erzeugung von Orthophotos unter strenger Berücksichtigung von Geländekanten und Formlinien.
- PER: Ableitung von Ansichten eines DGM als Perspektive oder Parallelprojektion
- PRO: Interpolation von Höhenpunkten und Profilen für jedes Polygon innerhalb des DGM
- TopDM: Verwaltung und Archivierung von großen Geländedaten auf Basis einer relationalen topographischen Datenbank.

Mit Hilfe einer schattierten und mit Textur versehenen Perspektivansicht eines Geländemodells kann ein sehr anschaulicher Eindruck einer Landschaft erzeugt werden. Trotzdem handelt es sich nur um eine Darstellung eines wesentlich komplexeren Modells, das nur schwer mit statischen Bildern veranschaulicht werden kann. Diesem Umstand Rechnung tragend, wurde das Modul ATM (Animated Terrain Model) entwickelt [Dorffner, 2000].



**Abbildung 6-4** Benutzeroberfläche von SCOP.ATM: Im Grafikenster ist eine kodierte Darstellung des Geländemodells, sowie der durch den Benutzer definierte Kamerapfad

ATM ermöglicht es, auf einfache Weise SCOP Geländemodelle und Orthophotos für die interaktive Visualisierung aufzubereiten und als VRML zu exportieren. Dazu wird sowohl das Geländemodell, als auch das Orthophoto in Kacheln zerlegt (Kapitel 6.2.2) und verschiedene Auflösungsstufen berechnet (Kapitel 6.2.3). Je nach Anwendung und Leistungsfähigkeit des Rechners werden dafür vom Benutzer Werte für die Anzahl der Rasterpunkte und die Anzahl der Texel innerhalb einer Kachel definiert, sowie die Reduktionsfaktoren zur Generierung der Auflösungsstufen. Soll das Ergebnis im Internet zur Verfügung gestellt werden, wird man mehr, dafür kleinere Kacheln exportieren, als bei einer Visualisierung die lokal oder von CD weg erfolgt. Sind nur für Teilbereiche des DGM Orthophotos vorhanden, so wird dies vom System erkannt und das übrige Gelände ohne Textur grauschattiert.

Als Ergebnis liefert ATM eine VRML Steuerdatei, die für das Laden und die Darstellung der einzelnen Kacheln an der korrekten räumlichen Position und in der optimalen Auflösung sorgt. Damit die einzelnen Kacheln geometrisch und radiometrisch nahtlos aneinander anschließen, ist es notwendig, dass am Rand die Rasterpunkte in beiden benachbarten Kacheln vorkommen. Zusätzlich muss die Kachelgrenze genau durch die Pixelmittelpunkte des Orthophotos verlaufen, da keine halben oder drittel Pixel erzeugt werden können. Es existieren also zwischen den Parameter (Rasterweite und Pixelgröße, Anzahl der Rasterpunkte und Texel, Reduktionsfaktoren) Abhängigkeiten, so dass die vom Benutzer eingestellten Werte nur als Richtwerte dienen. Im Programm sind Prioritäten definiert, die eine Reihenfolge vorgeben, nach welcher die endgültigen Parameter zu berechnen sind. Mit diesen wird dann das gesamte Gebiet in Kacheln zerlegt.

Die höchste Priorität hat dabei die Pixelgröße des Orthophotos. Einerseits erwartet sich der Benutzer, dass die Auflösung des verwendeten Orthophotos auch bei der Visualisierung streng erhalten bleibt, und andererseits ist die Textur maßgeblich für den optischen Eindruck des Photomodells verantwortlich. Wird diese beim Export für die höchste Auflösung verändert, so bedeutet das eine Interpolation der Farbwerte für das Texturbild, was zwangsläufig zu einer gewissen Unschärfe im Ergebnis führt. Ebenso als konstant angesehen werden die definierten Reduktionsfaktoren.

Im Gegensatz dazu haben geringfügige Änderungen der übrigen Werte kaum Auswirkungen auf das exportierte Ergebnis. Deshalb werden diese, unter Berücksichtigung der oben genannten Abhängigkeiten, vom Programm so verändert, dass die vom Benutzer definierten Werte möglichst gut erhalten bleiben. Als Beispiel soll ein Geländemodell mit einer Rasterweite von 12.5 m und ein Orthophoto mit einer Pixelgröße von 1.2 m verwendet werden (siehe auch Kapitel 7.3). Die definierte Anzahl der Rasterpunkte pro Kachel soll 60x60 sein und der Reduktionsfaktor 4. Für das Orthophoto ist eine Anzahl von 600x600 Texel eingestellt und ebenfalls ein Reduktionsfaktor von 4. Damit die Rasterpunkte an den Kachelgrenzen in den Pixelmittelpunkte des Orthophotos zu liegen kommen, muss in diesem Fall die Rasterweite auf 13.2 m vergrößert werden. Daraus ergeben sich dann für die Anzahl der Rasterpunkte ein Wert von 57x57 und für die Anzahl der Texel ein Wert von 617x617.

Für die Geländedarstellung in VRML wird ein Rastermodell verwendet. Die Erzeugung der einzelnen Geländekacheln basiert aber auf der hybriden Datenstruktur von SCOP, so dass der interpolierte Raster eine höhere Genauigkeit aufweist, als ein einfacher Raster, welcher aus Originaldaten, ohne Berücksichtigung von Geländekanten, abgeleitet ist.

Optional kann in ATM auch ein Kamerapfad graphisch definiert werden, der bei der Visualisierung zur Animation eines Rundfluges verwendet werden kann. Zusätzlich ist es auch möglich Namensgut (Städte, Berggipfel, ...) beim Export zu berücksichtigen. Diese werden in den VRML-Dateien als **Billboard** (Kapitel 5.5.3) eingefügt und mit einem Hyperlink (**Anchor**) versehen. Damit ergibt sich auch hier, wie im Nahbereich, die Möglichkeit das Gelände-Photomodell über die reine interaktive Visualisierung hinaus als Basis eines räumlichen Informationssystems zu nutzen.

## 7 Beispiele

Die folgenden Beispiele sollen die Möglichkeiten des Einsatzes von Photomodellen zeigen. Sie wurden alle mit den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden und den dafür entwickelten Programmen erstellt. Die ersten beiden Projekte (Neunkirchen und Schönbrunn) wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Zivilingenieurbüro Polly & Partner in Neunkirchen durchgeführt [Polly & Partner, 2002]. Das letzte Projekt entstand für das und gemeinsam mit dem Landesamt für Kataster-, Vermessung- und Kartenwesen (LKVK) Saarland [LKVK Saarland, 2002].

### 7.1 Hauptplatz Neunkirchen

Ziel dieses Projektes war die Schaffung eines internetfähigen Informationssystems für die Geschäfte am Hauptplatz von Neunkirchen in Niederösterreich. Die Vermarktung erfolgte durch die ortsansässige Sparkasse.

Die Erfassung der Dachlandschaft und des Geländes am Hauptplatz erfolgte durch digitale Luftbild-Stereoauswertung. Für die Modellierung der Fassaden und der Pestsäule wurden 40 terrestrische Aufnahmen erstellt und bearbeitet. Die Berechnung der Fassaden erfolgte unter Berücksichtigung von Gestaltbeobachtungen, wobei auf die aus den Luftbildern ausgewertete Traufenlinie eingepasst wurde.

Um das Photomodell in eine realistischere Umgebung zu setzen, wurde auch die Pestsäule modelliert. Die Bäume am Hauptplatz sind *Billboard*-Knoten, und der Hintergrund wurde mit Wolken versehen (Abbildung 7-1).

In der Tabelle sind die technischen Daten des Photomodells zusammengefasst.

	<b>Modellierte Fläche</b>	<b>Anzahl Polygone</b>	<b>Texelgröße</b>	<b>Speicherbedarf der Texturen</b>
Fassaden und Pestsäule	2552 m <sup>2</sup>	181	3 cm <sup>2</sup>	594,7 KB
Dächer	2602 m <sup>2</sup>	130	20 cm <sup>2</sup>	22,4 KB
Gelände	14400 m <sup>2</sup>	1 ElevationGrid	20 cm <sup>2</sup>	54,8 KB

Speicherbedarf des aufbereiteten VRML-Modells (inkl. Animation, Umwelt, ...): 1,02 MB

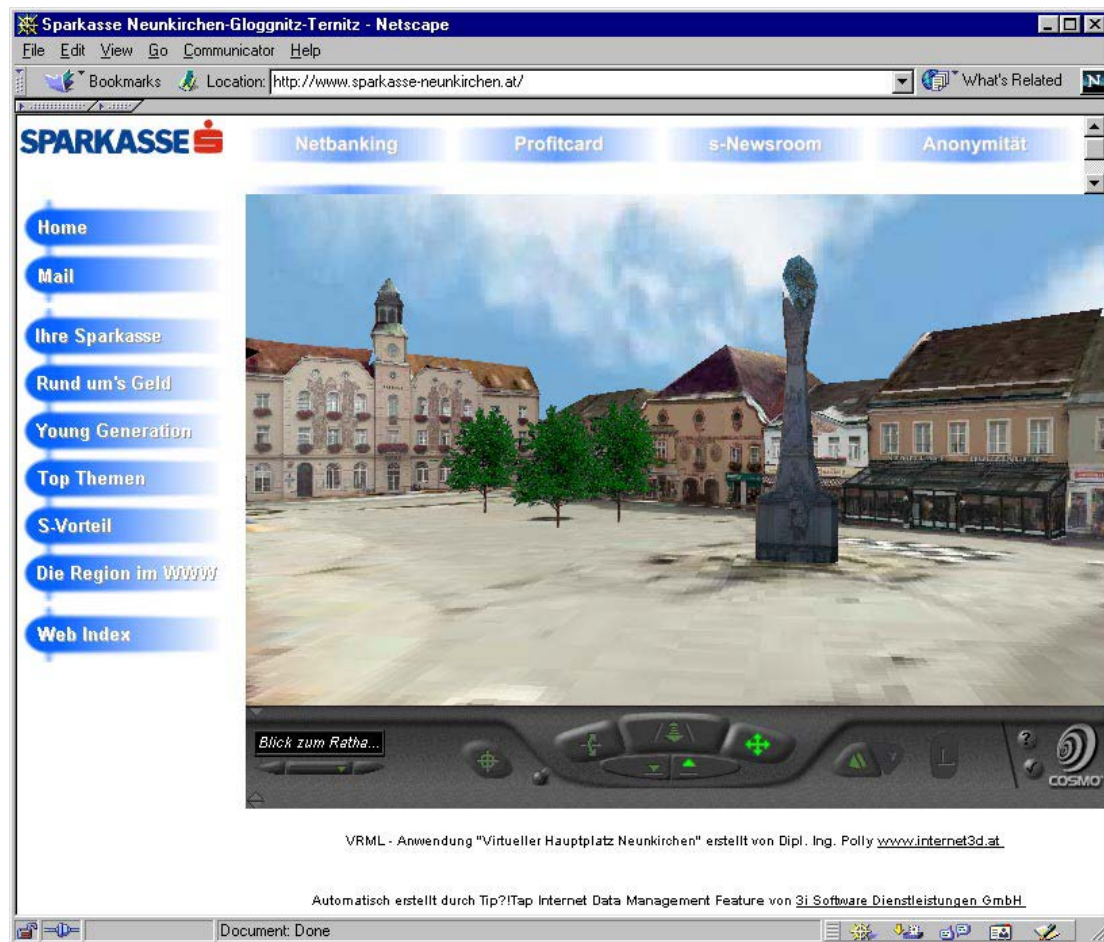


Abbildung 7-1: HTML-Seite mit eingebettetem VRML-Modell

Nach dem Laden des Photomodells kann der Benutzer virtuell über den Hauptplatz "bummeln". Das Rathaus sowie alle Fassaden sind als *Anchor*-Knoten realisiert. Durch Anklicken eines Eingangs wird in einem eigenen HTML-Fenster die Web-Seite des Geschäfts angezeigt. Hier können dann Informationen, wie Öffnungszeiten, Telefonnummer, Warenangebot und ähnliches ersichtlich gemacht werden. Den Inhalt dieser Seite kann jedes Geschäft selbst verändern und aktualisieren, ohne auf das gesamte Informationssystem zugreifen zu müssen.



Abbildung 7-2: Aktivierung einer aktuellen Auslage bei Annäherung durch den LOD-Knoten



Die einzelnen Geschäftsfassaden sind auch in einer besseren Auflösung vorhanden, die bei Annäherung des Benutzer automatisch angezeigt werden. Dadurch sind einerseits die ausgestellten Produkte besser erkennbar und andererseits kann die Detailansicht immer das aktuelle Schaufenster enthalten, ohne Teile des Photomodells neu berechnen zu müssen (Abbildung 7-2). Im Schaufenster selbst befinden sich wieder Verweise zu den Web-Seiten der Firmen der ausgestellten Produkte (Abbildung 7-3).

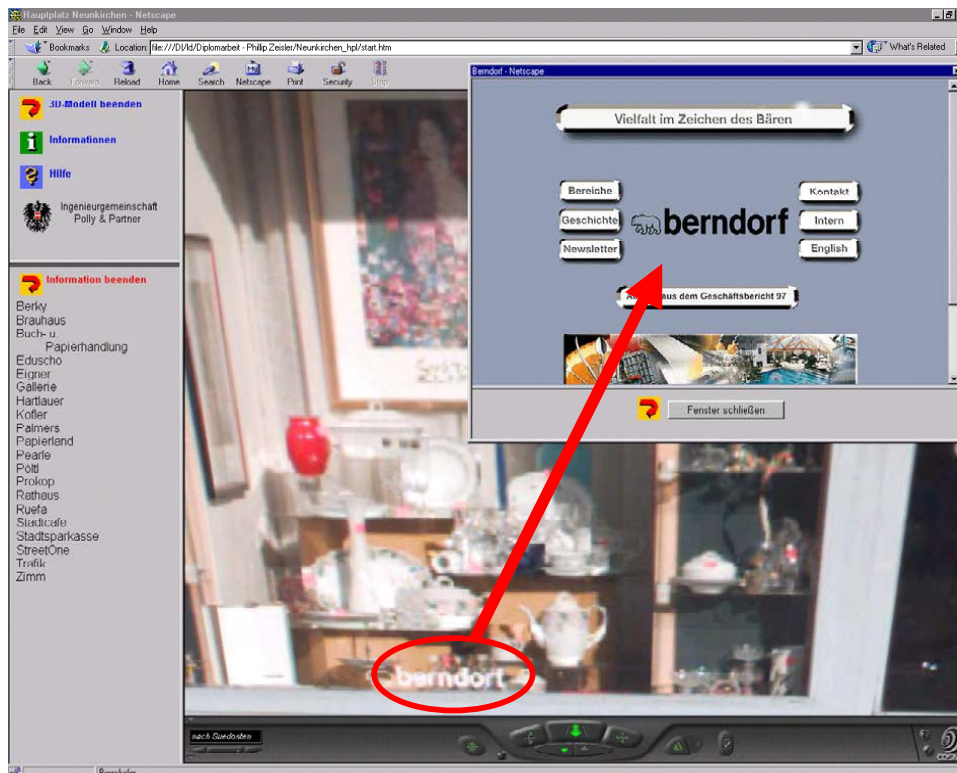


Abbildung 7-3: Zusatzinformation zu den, im Schaufenster ausgestellten Produkten

Das VRML-Modell ist in eine HTML-Seite eingebettet. Auf dieser HTML-Seite kann der Benutzer auf klassische Art und Weise ebenfalls die Informationen zu den Firmen und zum Rathaus abrufen. Zusätzlich kann er durch Auswahl eines bestimmten Geschäftes automatisch im VRML-Modell zu diesem hingeführt werden.

Als Erweiterung ist es in gleicher Art und Weise auch möglich Photomodelle von Innenräumen zu realisieren und diese über das Gesamtmodell miteinander zu verknüpfen.

## 7.2 Wohnhausanlage in Ottakring

Im Zuge eines Wohnbauprojektes soll ein bestehendes, unter Denkmalschutz stehendes, ehemaliges Fabriksgebäude neu genutzt werden. Für die Behördenverfahren war daher eine maßstabsgetreue 3D-Simulation der projektierten Um- und Neubaumaßnahmen erforderlich (Abbildung 7-4).

Die Fassaden der bestehenden Gebäude in unmittelbaren Umgebung (ca. 6.000 m<sup>2</sup>) wurden vom Boden aus photogrammetrisch erfasst und in Form eines Fassaden-Photomodells ausgewertet. Als Passinformation dienten die Grundrisslinien der Gebäude aus der digitalen Mehrzweckkarte (MZK) der Stadt Wien (vgl. Abbildung 2-5). Die Dachlandschaft der umliegenden Gebäude war von nachrangiger Bedeutung für die angestrebte Simulation und

wurde anhand von Photos aus einer Hubkanzel nur grob rekonstruiert (ca. 4.000 m<sup>2</sup>). Für die Firsthöhen wurde auf vorhandene Gebäudehöhenpunkte der Stadt Wien zurückgegriffen.



**Abbildung 7-4: Photomodell der angrenzenden Gebäude mit dem Modell Wohnhausanlage (Hintergrund)**

Die Modellierung des Straßenraumes (ca. 18.000 m<sup>2</sup>, mehr als 1.600 Polygone) – Fahrbahnen, Gehsteige, Grünflächen, Bäume, etc. – erfolgte ebenfalls mit Hilfe der MZK. Zur Darstellung der umgebenden Stadtlandschaft wurde ein Ausschnitt aus dem Geländemodell (ca. 22 km<sup>2</sup> Grundfläche) und ein Teil des Gebäude-Blockmodells (ca. 500.000 m<sup>2</sup> Grundfläche) der Stadt Wien übernommen.



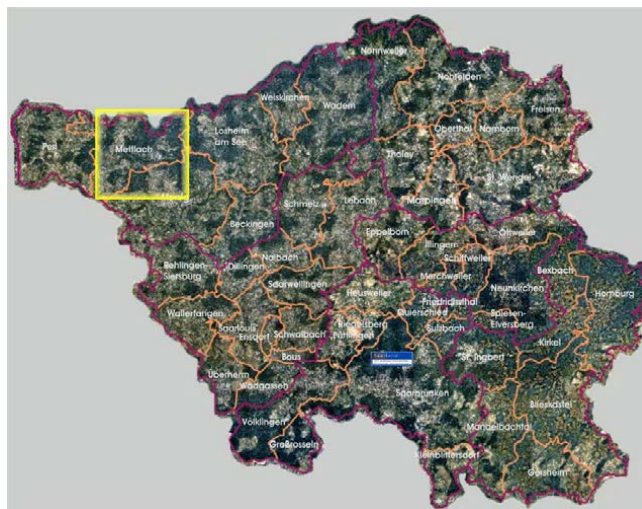
**Abbildung 7-5: Innenhofsituation mit Altbestand (links) und der geplanten Wohnhausanlage (rechts)**



Die Modellierung der geplanten Wohnhausanlage (ca. 3.100 m<sup>2</sup> Grundfläche) erfolgte durch ein Architekturbüro. Das Modell der Fabrikanlage wurde an das „künstliche“ Erscheinungsbild der Neubau-Teile angepasst. Das JAVA-Applet mit Messfunktionen (Kapitel 5.6.3) ermöglicht die interaktive Messung von Objektkoordinaten und Distanzen im Zuge der Präsentation (Abbildung 7-5). Der Speicherbedarf des aufbereiteten VRML-Modells beträgt 2,44 MB.

### 7.3 Saarschleife

Bei diesem Projekt handelt es sich um ein Pilotprojekt, mit dem Ziel, vom Gebiet des gesamten Saarlands (550 km<sup>2</sup>), unterteilt nach den einzelnen Landkreisen, VRML Modelle zu erstellen und auf CD zur Verfügung zu stellen. Die Basisdaten sind ein mit SCOP erstelltes Geländemodell mit einer Rasterweite von 12.5 m und Farorthophotos mit einer Auflösung von 1.2 m.



**Abbildung 7-6: Bundesland Saarland mit eingetragenem Gebiet der Saarschleife  
(Die Grafik wurde vom LKVK zur Verfügung gestellt)**

Für das Pilotprojekt wurde ein kleineres Gebiet von ca. 12 x 12 km<sup>2</sup> im Landkreis Merzig-Wadern (im Nordwesten des Saarlandes) herangezogen (Abbildung 7-6:). Dort verläuft die Saar in einer engen Schleife von 180° (Saarschleife), so dass das Gelände auch topographisch interessant ist.

Die Ausgangsdaten waren also knapp 1 Million Geländepunkte und ein Farb-Orthophoto von 300 MB. Durch die Forderung, die Pixelgröße des Orthophotos für die höchste Auflösungsstufe zu gewährleisten, musste die Rasterweite des Geländeasters geringfügig auf 13.2 m vergrößert werden (vgl. Kapitel 6.3).



**Abbildung 7-7: Ausschnitt des 3D-Modells aus der Vogelperspektive. Im Zentrum des Blickfeldes wird eine höhere Auflösung verwendet, als an der Rändern.**

Um sich in dem Modell auf einem Standard-PC interaktiv bewegen zu können, dürfen die Kacheln in der höchsten Auflösung nicht zu groß gewählt werden. Als optimal erwies es sich hier die Anzahl der Rasterpunkte mit 57x57 zu wählen, woraus sich Kacheln von 739.2x739.2 m<sup>2</sup> Ausdehnung ergeben. Die entsprechenden Texturdateien wurden daher mit jeweils 617x617 Pixel aus dem Orthophoto herausgeschnitten.

Diese Auflösung soll bis zu einer Entfernung von 1478.4 m gelten, so dass immer mindestens 2 Kacheln hoher Auflösung in Blickrichtung vorhanden sind. Für weiter entfernte Teile wird die niedrigere Auflösung verwendet. Diese wurden mit einem Reduktionsfaktor von 4 berechnet. Damit ergeben sich eine Rasterweite von 52.8 m und eine Pixelgröße von 4.8 m.

Schließlich wird für sehr weit entfernte Gebiete (mehr als 3000 m) eine Rasterweite von 211.2 m und eine Pixelgröße von 38.4 m verwendet. Für die Textur wurde also im zweiten Schritt ein Reduktionsfaktor von 8 verwendet. Diese Teile sind für den Benutzer im Detail nicht mehr erkennbar und man erreicht auf diese Art eine weitere Datenreduktion.



**Abbildung 7-8: Blick nach Südosten. Die Ortsnamen sind als Hyperlinks realisiert und leiten den Benutzer zu den Homepages der einzelnen Gemeinden.**

Bei diesem Beispiel müssen während der interaktiven Visualisierung auf diese Art immer nur maximal 10 % des Gesamtgebietes in der höchsten Auflösung dargestellt werden, während für über 60 % die niedrigste Auflösung ausreicht.

Zusätzlich sind die Namen der wichtigsten Gemeinden im Gebiet als *Billboard*-Knoten in das Modell eingefügt und mit einem *Anchor*-Knoten versehen, der zu den Homepages dieser Gemeinden führt. Außerdem gibt es noch einen vordefinierten Kamerapfad, auf dem der Benutzer automatisch einen Rundflug über das Gebiet durchführen kann.

Trotz des engen Geländerastrs und der hohen Auflösung der Textur kann das Modell auf einem Standard-PC (800 MHz mit 256MB Hauptspeicher und 32MB Grafikkarte) in einem VRML-Viewer flüssig bewegt und interaktiv durchfliegen werden. In den nächsten Monaten wird daher am Landesamt die nächste Projektstufe beginnen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Ein 3D-Photomodell ist ein durch Vermessung entstandenes dreidimensionales Oberflächenmodell eines realen Objektes mit photographischer Textur. Photomodelle sind bestens geeignet, um einen übersichtlichen und detaillierten Eindruck von bestehenden und geplanten Situationen zu vermitteln. Das in dieser Arbeit beschriebene geometrische Modell wird durch hybride Bündelblockausgleichung unter Verwendung von Gestaltinformationen erzeugt. Die bisherigen Projekte haben gezeigt, dass dadurch der beste Kompromiss zwischen geometrischer Genauigkeit und rationeller Erzeugung erzielt wird. Zur radiometrischen Anpassung der unterschiedlichen Texturquellen wurde ein, speziell auf die Situation im terrestrischen Nahbereich angepasstes Verfahren der Ausgleichung von Summenhistogrammen entwickelt.

Um Photomodelle in Zukunft noch rascher erzeugen zu können, werden andere Methoden zur Aufnahme eingesetzt werden. Große Hoffnung in diesem Bereich wird auf terrestrische Laserscanner gelegt, mit denen es möglich ist, die Geometrie eines Objektes mit einer hohen Punktdichte (einige Millionen Punkte) automatisch zu erfassen. Dabei entsteht eine unstrukturierte Punktwolke, die in einem zweiten Schritt trianguliert wird. Allerdings ist auch hier sehr viel interaktiver Aufwand notwendig, um die für eine Modellierung notwendigen, formgebenden Kanten und Flächen zu erfassen. Die jüngsten Forschungsergebnisse in diesen Bereichen weisen darauf hin, dass diese Aufgabe allein auf Basis der Punktwolke auch nicht zufriedenstellend gelöst werden kann. Hier ist eine Unterstützung durch Bildinformation notwendig, um die Positionen der formgebenden Kanten genau festlegen zu können. In Zukunft gilt es also entsprechende Methoden und Algorithmen zu entwickeln, die terrestrische Laserdaten und photographische Aufnahmen kombinieren können.

Für die Visualisierung wurde in dieser Arbeit ausschließlich VRML97 eingesetzt. Zum einen hat sich VRML als Standard für die interaktive Visualisierung von 3D Modellen im Internet durchgesetzt, und zum anderen ergeben sich für den Endbenutzer keine Kosten, da die entsprechenden Viewer kostenlos erhältlich sind. Es wurde anhand von Beispielen demonstriert, dass Photomodelle, trotz hoher geometrischer Genauigkeit und Verwendung von Phototextur, interaktiv in VRML visualisiert werden können. Durch entsprechendes Datenmanagement und Einsatz von LOD können auch sehr große Geländemodelle mit ansprechender Geschwindigkeit dargestellt werden. Selbstverständlich ist die Grenze des Machbaren hier früher erreicht, als mit leistungsfähigen Systemen, die ausschließlich für die Visualisierung entwickelt wurden, doch hebt die Möglichkeit einer Verbreitung über das Internet (oder zumindest über CD) dieses Manko bei weitem auf.

Durch den Einsatz von VRML können auch über die Geometrie oder Radiometrie hinausgehende Sachinformationen im Photomodell einfach verankert werden. Komplexe räumlich-thematische Sachverhalte können zusätzlich durch Animationen anschaulich dargestellt werden. Über die Schnittstelle EAI ist es möglich von externen Programmen aus mit VRML-Szenen eine beidseitige Verbindung aufzubauen. Damit können aus einer virtuellen Welt heraus Abfragen an externe Systeme getätigt werden, die Ergebnisse wieder zurückgespielt und dort für den Benutzer zugänglich gemacht werden. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen werden interaktive virtuelle Welten in Zukunft noch stärker an Bedeutung gewinnen. Hier stellt das digitale Photomodell in Verbindung mit VRML ein neues attraktives Produkt im Bereich von Planung und Dokumentation dar. Durch das geometrisch und radiometrisch korrekte Abbild der realen Welt trägt es auch dazu bei, das Digitale und Virtuelle etwas näher an die Realität heranzuführen. Im Bereich interaktive Visualisierung im Internet wird die weitere Entwicklung

zeigen, ob sich X3D wirklich als Standard durchsetzen kann und damit auch VRML zu noch mehr Verbreitung und Akzeptanz verhilft.

Durch die in dieser Arbeit vorgestellten Messmöglichkeit im Photomodell ergibt sich ein neues Anwendungsgebiet im Planungsbereich. In Diskussion stehende Projekte können in einem einheitlichen, qualitativ gesicherten Umgebungsmodell präsentiert, objektiv miteinander verglichen, und beurteilt werden. Im Rahmen von Bürgerveranstaltungen oder Diskussionsforen im Internet kann jeder die Auswirkungen eines Projektes von einem frei gewählten Standpunkt (z.B. sein eigenes Haus) aus analysieren und beurteilen. Diese Arbeit hat gezeigt, dass solche "Visionen" aus technischer Sicht realisierbar sind.

Sind also die Zeiten, in denen versucht wurde durch Zurückhalten von gewissen Informationen oder durch Montagen und Videos mit Musikuntermalung die Betroffenen zu "überlisten", endlich vorbei? Es ist zu hoffen, dass sich mit den technischen Möglichkeiten auch der politische Wille von Entscheidungsträgern ändert und die in dieser Arbeit aufgezeigten Verfahren genutzt werden, um die Bürgerinnen und Bürger auch bei kritischen Projekten ehrlich in die Planung einzubeziehen.

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATM	Animated Terrain Model
BRDF	bi-directional reflectance distribution function
B-Rep	Boundary Representation
CCD	Charged Coupled Devices
CSG	Constructive Solid Geometry
DGM	Digitales Geländemodell
EAI	External Authoring Interface
GIF	Graphics Interchange Format
HTML	Hypertext Markup Language
IDL	Interactive Data Language
IEC	International Electrotechnical Commission
I.P.F.	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien
ISO	International Organization for Standardization
JPEG	Joint Photographic Experts Group
KB	Kilobyte
LOD	Level of Detail
MathML	Mathematical Markup Language
MB	Megabyte
MZK	Mehrzweckkarte
PC	Personal Computer
PNG	Portable Network Graphics
SDL	Scene Description Language
SGI	Silicon Graphics Incorporation
SVG	Scalable Vector Graphics
UCS	Universal Character Set
URL	Uniform Resource Locator
UTF	Unicode Transformation Format
VAG	VRML Architecture Group
VR	Virtual Reality
VRML	Virtual Reality Modeling Language
WWW	World Wide Web
X3D	Extensible 3D
XML	Extensible Markup Language

## Literaturverzeichnis

- [Briese & Pfeifer, 2001] Briese C., Pfeifer N. (2001). Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. In: Optical 3-D Measurement Techniques V, 2001, S. 80-87.
- [Baumgart, 1975] Baumgart B. G. (1975). Winged-Edge Polyhedron Representation for Computer Vision. In: National Computer Conference May 1975.
- [Carey & Bell, 1997] Carey R., Bell G. (1997). The Annotated VRML 2.0 Reference Manual. Addison-Wesley Developers Press.
- [CyberCity, 2001] CyberCity AG Zürich. <http://www.cybercity.ethz.ch/> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Dorffner, 1996] Dorffner L., (1996). Der digitale Behaim-Globus – Visualisierung und Vermessung des historisch wertvollen Originals. In: Cartographica Helvetica – Fachzeitschrift für Kartengeschichte Nr. 14, 7/1996, S. 20-24.
- [Dorffner & Forkert, 1998] Dorffner L., Forkert G. (1998). Generation and visualization of 3D photo-models using hybrid block adjustment with assumptions on the object shape. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing - Theme Issue Imaging and Modeling for Virtual Reality, 53/6, 12/1998.
- [Dorffner, 2000] Dorffner L. (2000). Interactive Visualization of Terrain Models and Orthophotos. Geotetski Vestnik. Journal of the Association of Surveyors of Slovenia, Vol. 44, No. 3, S. 205 – 212, Ljubljana.
- [Dumfarth, 2001] Dumfarth E. (2001). Terrestrisches 3D Laserscanning: Real World ... Scan Data ... 3D Modell. CORP 2001. 6. Internationales Symposium zur Rolle der Informationstechnologie in der und für die Raumplanung S. 165-167
- [Ecker, 1991] Ecker R. (1991). Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 38.
- [Eshete et al., 1996] Eshete T., Werner F., Wüthrich C. A. (1996). Checking Boundary Non-Manifoldness of Solid Objects for Steel Construction. In: The Fourth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization '96 (WSCG'96), S. 388-398.
- [Foley et al., 1994] Foley J.D., van Dam A., Feiner S.K., Hughes J.F., Phillips R.L. (1994). Grundlagen der Computergraphik. Verlag Addison-Wesley.
- [Forkert & Stanek, 1997] Forkert G., Stanek H. (1997). Der Einsatz der Kodak DCS460 für die digitale Photogrammetrie. IX. Internationale Geödätische Woche, Obergurgl 1997.
- [Gagalowicz & Boivin, 2002] Gagalowicz A., Boivin S. (2002). Inverse Rendering from a Single Image. In: The First European Conference on Colour in Graphics, Image and Vision (CGIV 2002), S. 268-277.



- [Gaupmann, 1999] Gaupmann B. (1999). 3D-Auswertung von digitalen Nahbereichsaufnahmen mit Bündelblockausgleichung und Gestaltbedingungen - Zuverlässigkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- [GEONOVA, 2002] GEONOVA AG. <http://www.geonova.ch/> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Great Hill Corporation, 2000] <http://www.greathill.com/vraniml/index.htm> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Grintec, 1998] Grintec Graz. <http://www.grintec.com/> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Grossman & Dally, 1998] J. P. Grossman, W. J. Dally (1998). Point sample rendering. In: Rendering Techniques '98, S. 181-192.
- [GTA Geoinformatik, 2001] GTA Geoinformatik Neubrandenburg. <http://www.gta-geo.com/op3d.html> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [He & Jansa, 1990] He G., Jansa J. (1990). Eine radiometrische Anpassungsmethode für die Mosaikherstellung aus digitalen Bildern. In: Österreichische Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF), Band 58 Heft 2/1990, S. 43-49.
- [Heitzinger, 1999] Heitzinger D. (1999). Wissensbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- [Holzner, 1998] Holzner S. (1998). JavaScript complete. McGraw-Hill, New York.
- [Inpho, 2001] Inpho GmbH Stuttgart. <http://www.inpho.de/> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [ISO 1993] Information technology – universal multiple-octet coded character set (ucs) – part 1:Architecture and basic multilingual plane. International Organization for Standardization, ISO/IEC 10646-1:1993.
- [ISO 1997] Information technology – computer graphics and image processing – the virtual reality modeling language. International Organization for Standardization, ISO/IEC 14772:1997.
- [Kager & Kraus, 1976] Kager H., Kraus K. (1976). Gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen. In: Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der TU Wien, Heft 8, 1976 S. 113-133.
- [Kager, 1989] Kager, H. (1989). ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. In: Optical 3-D Measurement Techniques, S. 447-455, Herbert Wicham Verlag, Karlsruhe.
- [Kiefner, 2001] Kiefner M. (2001). Einfluss von Bildkompressionsverfahren auf die Qualität der digitalen Punktübertragung. Dissertation, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart. Deutsche Geodätische Kommission, Heft Nr. 531.



- [Kloss et al., 1998] Kloss J., Rockwell R., Szabó K., Duchrow M. (1998). VRML97 - Der neue Standard für interaktive 3D-Welten im World Wide Web. Addison-Wesley Longman Verlag, Bonn.
- [Kraus et al., 1990] Kraus K. (1990). Fernerkundung Band 2 – Auswertung photographischer und digitaler Bilder – mit Beiträgen von J. Jansa und W. Schneider. Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 1994] Kraus K. (1994). Photogrammetrie Band 1 – Grundlagen und Standardverfahren. 5. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 1996] Kraus K. (1996). Photogrammetrie Band 2 – Verfeinerte Methoden und Anwendung. 3. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 2000] Kraus K. (2000). Photogrammetrie Band 3 – Topographische Informationssysteme. Dümmler Verlag, Bonn.
- [Landes, 1999] Landes S. (1999). Funktionalität des internetbasierten 3D-Campus-Informationssystem der Universität Karlsruhe (CISKA). Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe. Deutsche Geodätische Kommission, Heft Nr. 513.
- [Leroy, 1998] Leroy T. (1998). Correction des couleur pour les photo-modèles. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- [LKVK Saarland, 2002] <http://www.lkvk.saarland.de> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Lorensen & Cline, 1987] Lorensen W., Cline H. (1987). Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: Computer Graphics (SIGGRAPH 1987 Proceedings), S. 163-169.
- [Mäntylä, 1988] Mäntylä M. (1988). An introduction to solid modeling. Computer Science Press, Maryland, USA.
- [Marrin, 1997] Marrin C. (1997). Proposal for a VRML 2.0 informative annex: External authoring interface reference. <http://www.vrml.org/WorkingGroups/vrml-eai/ExternalInterface.html> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Microsoft, 1998] DirectX 5.0 SDK. <http://www.microsoft.com/directX> (Seite verfügbar am 19.02.02)
- [Molnar , 1992] Molnar L. (1992). Principles for a new edition of the digital elevation modeling system SCOP. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission IV, Vol. 19, Part B4, S. 962-968, Washington D.C.
- [Münz & Nefzger, 1999] Münz S., Nefzger W. (1999). HTML 4.0 Referenz. Franzis-Verlag GmbH, Poing.
- [Neider, 1993] Neider J. (1993). OpenGL Programming Guide, Addison-Wesley Developers Press.
- [Orient/Orpheus, 2002] [http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/orient/html\\_hjk/orient.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/orient/html_hjk/orient.html). (Seite verfügbar am 30.04.02)
-

- [Pfister et al., 2000] H. Pfister, M. Zwicker, J. van Baar, M. Gross (2000). Surfels: Surface Elements as Rendering Primitives. In SIGGRAPH 2000, S. 335-342.
- [Polly & Partner, 2002] <http://www.internet3d.at> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Rottensteiner, 2001] Rottensteiner F. (2001). Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 56.
- [ViewTec, 2002] ViewTec AG. <http://www.viewtec.ch/> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Walsh & Fronckowiak, 1998] Walsh A., Fronckowiak J. (1998). Die Java Bibel. MITP-Verlag GmbH, Bonn.
- [Web3D Consortium, 2001] X3D™ - Extensible 3D. <http://www.web3d.org/x3d> (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Web3D Consortium, 2002] X3D™ Graphics Working Group. [http://www.vrml.org/fs\\_x3d.htm](http://www.vrml.org/fs_x3d.htm) (Seite verfügbar am 30.04.02)
- [Weiler, 1986] Weiler K. J. (1986). Topological Structures for Geometric Modeling. Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [Zeisler, 1999] Zeisler P. (1999). Nutzung von VRML für Informationssysteme basierend auf 3D-Photomodellen. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.

# Lebenslauf von DI Lionel Dorffner

## persönliche Daten

Geboren am 19. Oktober 1968 in Lomé (Togo) als Sohn von Gerhard und Béatrice Dorffner  
österreichischer und französischer Staatsbürger

Seit Juni 1994 verheiratet mit Andrea Dundler

2 Kinder - Simon, geboren im August 1995 und Sophie geboren im Nov. 1997

Religion: röm.-kath.

Sprachen: Deutsch, Englisch und Französisch in Wort und Schrift

## Ausbildung

1975 – 1979	Besuch der Volksschule in 1020 Wien, Wittelsbachstraße 6
1979 – 1987	Besuch des Bundesrealgymnasiums III in 1030 Wien, Kundmangasse 22
11. Juni 1987	Ablegung der Reifeprüfung
Oktober 1987 - Mai 1988	Ableistung des Präsenzdienstes beim österreichischen Bundesheer
Oktober 1988 - April 1994	Studium an der Technischen Universität Wien, Studienrichtung Vermessungswesen, Wahlfachgruppe Photogrammetrie und Kartographie
Oktober 1990	1. Diplomprüfung der Studienrichtung Vermessungswesen mit Auszeichnung
5. April 1994	2. Diplomprüfung der Studienrichtung Vermessungswesen, Wahlfachgruppe Photogrammetrie und Kartographie mit Auszeichnung

## berufliche Tätigkeit

Mai 1994 – Februar 1998	Forschungsassistent am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien.
März 1998 - Februar 2002	Universitätsassistent am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
Seit März 2002	Mitarbeiter bei der Stadt Wien, MA41 - Stadtvermessung

## **Danksagung**

Zunächst möchte ich meinen Eltern danken, die mir das Diplomstudium ermöglicht haben, ein Umstand der in einer 7-köpfigen Familie durchaus nicht selbstverständlich ist. Ein zumindest ebenso großes Danke gebührt meiner geliebten Frau Andrea für die ständige moralische Unterstützung und meinen 2 Kindern Simon und Sophie, die vor allem in den letzten Monaten stark auf ihren Vater verzichten mussten.

Mein Dank richtet sich auch an die Firma Polly & Partner für das Testen der Applikationen und das konstruktive Feedback, sowie für die Bereitstellung von Beispielen, im Besonderen Gerald Forkert, mit dem mich auch eine langjährige Freundschaft verbindet. Ebenfalls danken möchte ich der Wiener Stadtvermessung, mit der als einer der ersten das Produkt Photomodell auf seine Akzeptanz und Praxistauglichkeit getestet wurde.

Mein besonderer Dank gilt auch den Diplomanden Bernhard Gaupmann, Thomas Leroy und Philip Zeisler, die viele praktische Tests durchgeführt haben und mitgeholfen haben, theoretische Ideen zu bekräftigen oder zu verwerfen, sowie den Studierenden, die ich im Rahmen meiner Zeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) betreuen durfte. Viele von Ihnen haben sich bereit erklärt als Beta-Tester eingesetzt zu werden. Dadurch konnten viele Probleme aufgedeckt und neue Anregungen gewonnen werden.

Prof. Kraus, als Institutsvorstand und in jeder Beziehung hervorragendem Arbeitgeber über viele Jahre danke ich ebenso wie meinem Betreuer Prof. Jansa für die Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Ebenfalls recht herzlich bedanken möchte ich mich bei Prof. Purgathofer für die Übernahme des Koreferates.

Schließlich danke ich all meinen Kolleginnen und Kollegen am I.P.F. für die gute und angenehme Zusammenarbeit, im Besonderen Franz Rottensteiner, mit dem ich vor allem während der Softwareimplementierung in ORPHEUS eng zusammengearbeitet habe.

## GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1970-1973, Dezember 1976.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen. 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1973-1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1974-1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1976.
- Heft 13 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1976-1978, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichungen des Instituts für allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.
- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.
- Heft 21 Veröffentlichungen des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.

- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSKA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassung der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Juni 1986.
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.
- Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.
- Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.
- Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.
- Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.
- Heft 36 o. Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.
- Heft 37 G. GERSTBACH, H. P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zur GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.
- Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.
- Heft 39 Kartographische Forschungen und anwendungsorientierte Entwicklungen, herausgegeben von W. Stams und F. Kelnhofer zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. W. Pillewizer, Wien, Juli 1991.
- Heft 39a W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodells, Wien, Juli 1992.
- Heft 40 K. STEINNOCHER, Methodische Erweiterungen der Landnutzungsklassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk, Wien, Juli 1994.
- Heft 41 G. FORKERT, Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente, Wien, Juli 1994.
- Heft 42 M. SCHÖNER, W. SCHÖNER, Photogrammetrische und glaziologische Untersuchungen am Gsbre (Ergebnisse der Spitzbergenexpedition 1991), Wien, Mai 1996.

- Heft 43 M. ROIC, Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Wien, April 1996.
- Heft 44 G. RETSCHER, 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Wien, April 1996.
- Heft 45 W. DAXINGER, Astrogravimetrische Geoidbestimmung für Ingenieurprojekte, Wien, Juli 1996.
- Heft 46 M. PLONER, CCD-Astrometrie von Objekten des geostationären Ringes, Wien, November 1996.
- Heft 47 Zum Gedenken an Karl Killian „Ingenieur“ und „Geodät“ 1903-1991, Veröffentlichung der Fachgruppe Geowissenschaften, Wien, Februar 1997.
- Heft 48 A. SINDHUBER, Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen, Wien, Mai 1998.
- Heft 49 W. WAGNER, Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data, Wien, Dezember 1998.
- Heft 50 R. WEBER, E. FRAGNER (Editoren), Prof. Bretterbauer, Festschrift zum 70. Geburtstag, Wien, Juli 1999.
- Heft 51 Ch. ÖHRENER, A Similarity Measure for Global Image Matching Based on the Forward Modeling Principle, Wien, April 1999.
- Heft 52 M. LECHTHALER, G. GARTNER (Hrsg.), Per Aspera ad Astra, Festschrift für Fritz Kelnhofer zum 60. Geburtstag, Wien, Jänner 2000.
- Heft 53 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER (Hrsg.), Interaktive Karten (Atlanten) und Multimedia-Applikationen, Wien, März 2000.
- Heft 54 A. MISCHKE, Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten, Wien, Dezember 2000.
- Heft 55 Veröffentlichung des I.P.F. anlässlich der Emeritierung von Prof. Dr. Peter Waldhäusl, Wien, September 2001.
- Heft 56 F. ROTTENSTEINER, Semi-automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS, Wien, Mai 2001.
- Heft 57 D. LEGENSTEIN, Objektrekonstruktion aus perspektiven Bildern unter Einbeziehung von Umrisslinien, Wien, Juli 2001.
- Heft 58 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER und K. BRUNNER (Hrsg.), Telekartographie und Location Based Services, Wien, Jänner 2002.
- Heft 59 K. BRETTERBAUER, Die runde Erde eben dargestellt: Abbildungslehre und sphärische Kartennetzentwürfe, Wien, 2002.
- Heft 60 G. GARTNER, Maps and the Internet 2002, Wien, September 2002



Wir vermessen die Stadt

Die Stadtvermessung (Magistratsabteilung 41) ist die zentrale Servicestelle für alle vermessungstechnischen Angelegenheiten im Magistrat der Stadt Wien.

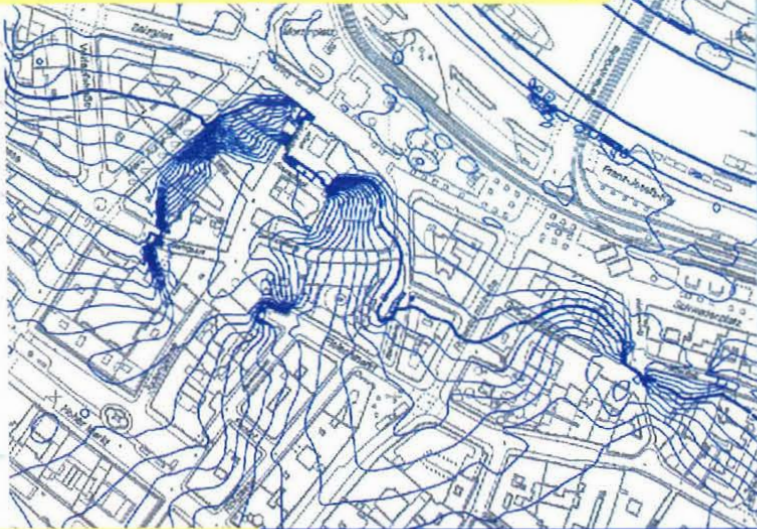
Eines unserer Hauptprodukte ist die **Mehrzweckkarte (MZK)**, die Grundkarte der Stadt Wien. Zur Erstellung wird ganz Wien in einem 3-jahres Zyklus im Straßenbereich mit cm-Genauigkeit terrestrisch vermessen. Im übrigen Stadtgebiet erfolgt die Datenerfassung durch photogrammetrische Luftbildauswertung. Die MZK existiert als linien- und flächenhaftes Operat. Die Ausgabe erfolgt digital in Vektor- und Rasterform oder analog.



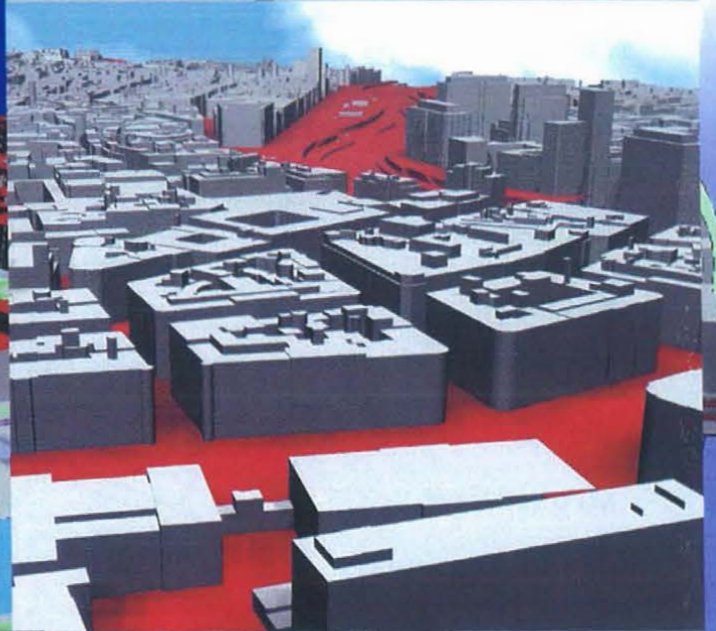
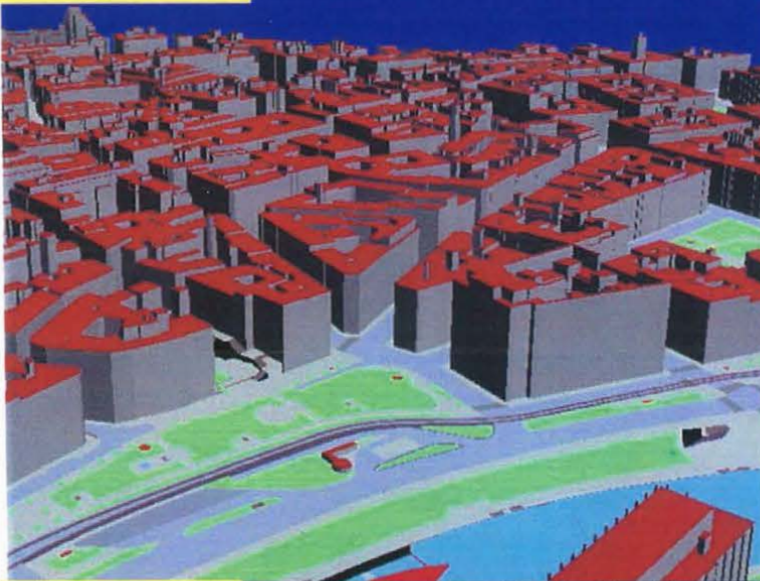


# Produkte basierend auf der MZK

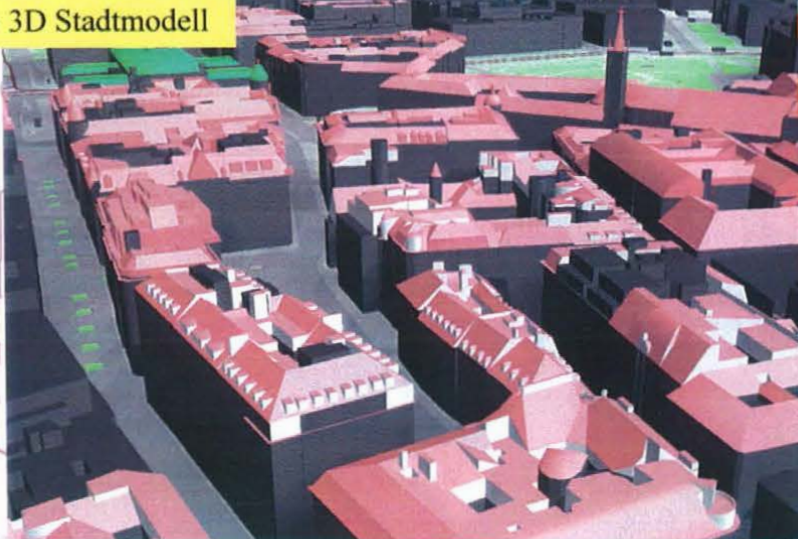
- digitales Geländemodell (Rasterweite 2.5 m)



- Baukörpermodell



- 3D Stadtmodell



**Noch Fragen? Nehmen Sie mit uns Kontakt auf!**

**Magistratsabteilung 41 - Stadtvermessung**  
Muthgasse 62, A-1190 Wien

web: <http://www.wien.gv.at/ma41/>  
email: [mz@m41.magwien.gv.at](mailto:mz@m41.magwien.gv.at)

Kartenvertrieb: Tel. +43 (0)1 4000 - 89163  
Fax. +43 (0)1 4000 - 99 89163