

Seminar

**Erzeugung von Panoramabildern mittels
zylindrischer und sphärischer
Transformationen**

Boris Quaing

Universität Mannheim

Lehrstuhl für Praktische Informatik IV (PI4)

Prof. Dr. Wolfgang Effelsberg

68159 Mannheim

Germany

Telefon: +49 621 181 2600

Fax: +49 621 181 2601

Internet: <http://www.informatik.uni-mannheim.de/pi4/home/>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Erstellung von Panoramabildern (Alternativen)	6
3	Erstellung von Panoramabildern (Schritte beim Stitching)	8
3.1	Aufnahme der Szene	9
3.2	Vorbereitung	9
3.3	Image Warping	11
3.4	Image Registration	11
3.5	Image Compositing	12
3.6	Nachbearbeitung	12
4	Panoramabildarten / Projektionskörper	13
4.1	Planare Panoramen	13
4.2	Kubische Panoramen	13
4.3	Zylindrische Panoramen	14
4.4	Sphärische Panoramen	17
4.5	Polyedrische Panoramen	19
A	Projektionen	20
B	Lochkameramodell	21

Abbildungsverzeichnis

1	Rotunde mit Riesenrundgemälde in Innsbruck (Quelle: Unbekannt, 2008a)	5
2	Panorama in Rotunde von Robert Barker (Quelle: Alloa, 2006) . .	5
3	Katadioptrisches Kamerasystem	7
4	Venedig in Einzelbildern (Quelle: Hohenauer, 2004)	7
5	D-Star Panorama - Farben verändert (Quelle: Opportunity, 2007)	8
6	Parallaxe-Effekt	9
7	Aufnahme von Einzelbildern bei Kamerarotation	10
8	Nodalpunktadapter (Quelle: Unbekannt, 2008b)	10
9	Einreihiges Panorama	11
10	Mehreihiges Panorama	11
11	Bestimmung des Bildwinkels (HFOV)	11
12	Planares / flaches Panorama (Quelle: Rigg, 2008)	13
13	Kubisches Panorama (Quelle: Rigg, 2008)	14
14	Kubisches Panorama - entfaltet (Quelle: Dahmann, 2008)	14
15	Zylindrisches Panorama (Quelle: Rigg, 2008)	15
16	Projektion auf Einheitszylinder in 3D	15
17	Abbildung auf Einheitszylinder - Bestimmung von θ	16
18	Goniometrie - Winkelfunktionen	16
19	Abbildung auf Einheitszylinder - Bestimmung von ν	17
20	Transformation in Zylinderkoordinaten (Quelle (Originalbild): Un- bekannt, 2006)	18
21	Quelle (Originalbilder): Unbekannt, 2006	18
22	Sphärisches Panorama (Quelle: Rigg, 2008)	19
23	Projektion auf Einheitskugel in 3D	19
24	Polyedrisches Panorama (Quelle: Hurbain, 2008)	20
25	Konvexer Polyeder (Quelle: Weisstein, 2008)	20
26	Parallelprojektion in Seitenansicht	20
27	Parallelprojektion in perspektivischer Ansicht (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	20
28	Normalprojektion in Seitenansicht	21
29	Normalprojektion in perspektivischer Ansicht (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	21
30	Orthografische Projektion (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	22
31	Zentralprojektion in Seitenansicht	22
32	Zentralprojektion in perspektivischer Ansicht (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	22
33	Gnomonische Projektion (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	23
34	Orthografische Projektion (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	23
35	Lochkamera (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)	23

36	Lochkameramodell - Seitenansicht	23
37	Lochkameramodell und „negative Brennweite“ - Seitenansicht . . .	24
38	Lochkameramodell in 3D	24

1 Einleitung

Der Begriff Panorama stammt aus dem Griechischen und bedeutet „Allschau“ oder auch „Allsicht“. Er setzt sich aus den beiden Wörtern „pân“ für „alles“ und „hórâma“ für „das Geschaute, Sehen, Sicht“ zusammen (Neupert, 2006, S. 1). Die Historie von Panoramen ist lang. Bereits vor einigen Jahrtausenden gab es erste illusionistisch ausgemalte Innenräume, die einem Betrachter das Gefühl vermitteln sollten, sich in einer anderen Realität zu befinden. Ein wesentlicher Meilenstein in der Entwicklung von Panoramen wurde im Jahr 1787 von Robert Barker gelegt (Wright u. a., 1999, S. 3). Er meldete unter dem Namen „La Nature à [un] Coup d’Oeil“ ein Patent an, welches sich primär mit der Darstellung von Panoramen¹ befasste. Konkret beinhaltete es ein zylindrisches Gemälde, ein rundes Gebäude (Rotunde) zur Ausstellung des Gemäldes, eine erhobene Aussichtsplattform in der Mitte des Gebäudes und Vorrichtungen, um den unteren und oberen Teil des Gemäldes zu verdecken (Otto, 2007, S. 18). Beispiele für eine Rotunde in Innsbruck und eine gemalte Innendarstellung des Malers Robert Barker sind in den Abbildungen 1 und 2 zu sehen.



Abbildung 1: Rotunde mit Riesenrundgemälde in Innsbruck (Quelle: Unbekannt, 2008a)



Abbildung 2: Panorama in Rotunde von Robert Barker (Quelle: Alloa, 2006)

Ein weiterer wichtiger Meilenstein für Panoramen wurde kurz nach der Erfindung der Fotografie im Jahre 1839 gelegt: 1843 wurde dem Österreicher Joseph Puchberger ein Patent für eine per Handkurbel betriebene Schwinglinsenkamera (vgl. Abschnitt 2) erteilt. Eine ausführliche Betrachtung der zeitlichen Entwicklung ist im Internet² zu finden.

Die Geschichte von bewegten Panoramabildern begann im Jahre 1897. Raoul Grimoin-Sansons meldete zu dieser Zeit ein Patent mit dem Namen „Cinéora-

¹und weniger mit deren Erzeugung

² <http://www.panoramicphoto.com/timeline.htm>

ma” an. Auf der Weltausstellung von 1900 in Paris sollten die Besucher Reisen zu verschiedenen Orten in Europa und Afrika in einem Ballon nacherleben können. Dazu wurde eigens ein Rundgebäude von 30 Metern Durchmesser direkt unter dem Eiffelturm errichtet. In der Mitte des Gebäudes befanden sich unter der Zuschauerplattform 10 Projektoren, so dass die Betrachter komplett von Bildern umgeben waren ([Herbert u. McKernan, 1996](#); [Schwebs, 2005](#), S. 27). Im 20. Jahrhundert folgten Systeme wie Disneys Circarama und Circle Vision 360 sowie moderne Kinos wie das IMAX und OMNIMAX.

Der verbleibende Teil dieser Seminararbeit ist wie folgt aufgebaut: Im folgenden Kapitel 2 werden mögliche Alternativen zur Erzeugung von Panoramabildern aufgezeigt. Daraufhin werden die Einzelschritte zur Erstellung von Panoramen unter Berücksichtigung eines bestimmten Verfahrens (Stitching) genauer betrachtet (Kapitel 3). Ein Einzelschritt, das so genannte „Image Warping”, wird im Kapitel 4 herausgegriffen und detailliert beschrieben. Die Darstellung der für das Verständnis notwendigen Grundlagen zu Projektionen und dem Lochkameramodell erfolgt im Anhang in den Teilen A und B.

2 Erstellung von Panoramabildern (Alternativen)

Eine mögliche Art der Differenzierung bei der Erstellung von Panoramabildern ist die Unterscheidung zwischen „Ein-Bild-Verfahren” und „Mehr-Bild-Verfahren”. Zu den erstgenannten Verfahren gehören u. a.

- Weitwinkel- oder Fischaugenobjektive
- Schwinglinsenkameras
- Rotations(zeilen)kameras
- Katadioptrische Kamerasysteme

Ein Fischauge ist ein spezielles Objektiv, welches einen großen Bildwinkel, also eine kurze Brennweite im Verhältnis zur Größe des Bildformats besitzt. Mit einem Fischauge aufgenommene und digitalisierte Fotos können mit spezieller Software so verarbeitet werden, dass die Aufnahme natürlich erscheint ([Schwebs, 2005](#), S. 25ff).

Bei einer Schwinglinsenkamera dreht sich die Linse um ihr optisches Zentrum. Dabei wird nur ein schmaler Lichtspalt auf den kreisförmig gespannten Film gelassen, so dass die Entfernung vom Brennpunkt zur Filmebene konstant bleibt. Der Film bewegt sich bei der Belichtung der Aufnahme nicht. Ein Beispiel für eine Schwinglinsenkamera ist die Horizon 202 ([Thien, 2007](#)).

Bei einer Rotationszeilenkamera rotiert nicht nur das Objektiv, sondern die gesamte Kamera um den Brennpunkt. Während der Bewegung wird der Film synchron zur Kamerabewegung vorwärts transportiert. Ein Beispiel für diesen Kamertyp ist die Roundshot 28-220³.

Katadioptrische Kamerasysteme bestehen aus Kameras, Linsen (engl. dioptrics) und Spiegeln (engl. catoptrics) (Zhang, 2006, S. 422). Ein Beispiel ist auf einen konvexen Spiegel gerichtete Kamera, wie Abbildung 3 veranschaulicht.

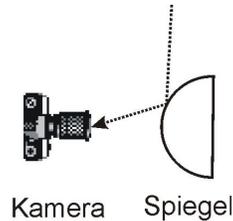


Abbildung 3: Katadioptrisches Kamerasystem

Bei den „Mehr-Bild-Verfahren“ lassen sich im Wesentlichen zwei Alternativen unterscheiden:

- Einfaches Übereinander-/Zusammenkleben
- „Stitching“

Beim ersten Verfahren werden im einfachsten Fall Einzelbilder ohne weitere Bearbeitung übereinander geklebt. Ein Beispiel hierfür enthält Abbildung 4.



Abbildung 4: Venedig in Einzelbildern (Quelle: Hohenauer, 2004)

³ <http://www.roundshot.ch/xml1/internet/de/application/d438/d854/f443.cfm> (Abruf: 29.03.2008)

Stitching kann als die digitale Variante des Übereinander-/Zusammenklebens angesehen werden. Das Wort leitet sich aus dem Englischen (to stitch: zusammennähen) ab. In der Fotografie bezeichnet es „das Erstellen einer großen Fotografie aus verschiedenen kleineren Einzelaufnahmen“ (Unbekannt, 2008d). Das Verfahren besteht aus mehreren Einzelschritten, die im Abschnitt 3 detailliert beschrieben werden.

Im engen Zusammenhang mit den „Mehr-Bild-Verfahren“ stehen die so genannten Mosaikbilder. Diese aus mehreren Einzelbildern zusammengesetzten Bilder werden seit der Entwicklung der Fotografie genutzt (Klein u. Koop, 2004, S. 5) und verfolgen im Wesentlichen zwei Ziele. Zum einen stellen sie die Antwort auf die beschränkten Bildauflösungen von Kameras dar, zum anderen dienen sie zur Erhöhung des Sicht-/Bildfeldes. Insbesondere im Hinblick auf das zweite Ziel korrelieren Mosaikbilder mit Panoramen. Abbildung 5 zeigt ein zusammengesetztes Mosaikbild, welches als Einzelbilder von dem Fahrzeug „Opportunity“ auf dem Mars im April 2007 aufgezeichnet worden ist.

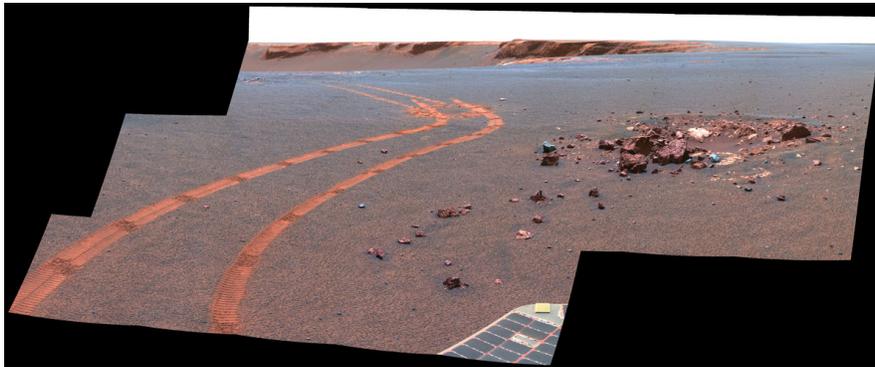


Abbildung 5: D-Star Panorama - Farben verändert (Quelle: [Opportunity, 2007](#))

3 Erstellung von Panoramabildern (Schritte beim Stitching)

Zur Erstellung von Panoramabildern sind beim Stitching mehrere Einzelschritte zu durchlaufen (vgl. [Peleg u. Herman, 1997](#), [Gümüstekin, 1999](#), [Deng u. Zhang, 2003](#)). Die folgenden sechs Schritte können dabei voneinander abgegrenzt werden:

1. Aufnahme der Szene
2. Vorbereitung

3. Image Warping
4. Image Registration
5. Image Compositing
6. Nachbearbeitung

3.1 Aufnahme der Szene

Bei der Aufnahme der Szene wird die Kamera horizontal um den „No-Parallax-Point“ (NPP) gedreht (vgl. Abbildung 7). Dies dient zur Vermeidung von Parallaxe-Fehlern. Der Parallaxe-Effekt besagt, dass unterschiedlich weit entfernte, sich nicht bewegend Objekte bei einer seitlichen Bewegung der Kamera gegeneinander verschoben erscheinen. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 6 veranschaulicht.

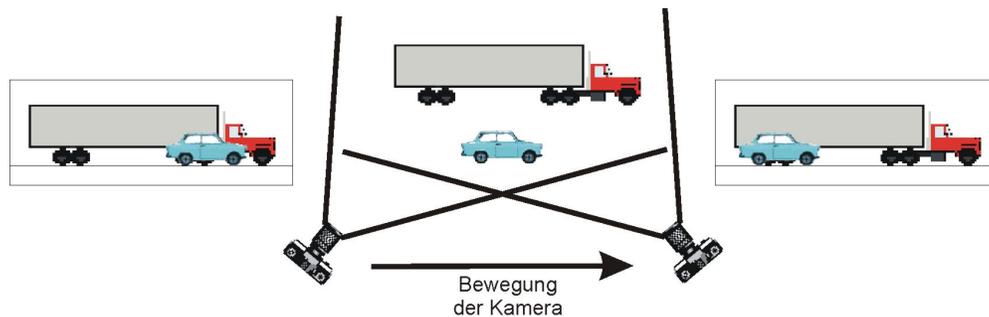


Abbildung 6: Parallaxe-Effekt

Häufig wird der NPP auch als Nodalpunkt bezeichnet. Die Punkte müssen jedoch nicht zwangsläufig übereinstimmen. Dennoch werden die Adapter zur Dreh- und Aufnahmeunterstützung häufig als Nodalpunktadapter (vgl. Abbildung 8) vertrieben.

Die Aufnahme des Panoramas kann sowohl einreihig, als auch mehrreihig erfolgen (vgl. Abbildungen 9 und 10). Es ist darauf zu achten, dass sich Bildpaare jeweils um ca. 20-50% (je nach verwendetem Registrierungsalgorithmus) überlappen. Außerdem sollten bei allen Aufnahmen die gleichen Parameter, wie Belichtung (Blende und Belichtungszeit), Fokus und Weißabgleich, verwendet werden.

3.2 Vorbereitung

In der Vorbereitungsphase werden die für das endgültige Panorama zu verwendenden Bilder ausgewählt und in das jeweilige Stitch-Programm geladen. Dabei wird ein Bild als Basisbild oder auch Anker ausgewählt. Entsprechend diesem

Bild werden alle anderen Bilder ausgerichtet. Meist erfolgt während der Vorbereitungsphase auch eine initiale Zuordnung bezüglich der Positionierung der Bilder im fertigen Panorama, d. h. welches Bild überlappt mit welchem an welcher Kante. Von ganz entscheidender Bedeutung für die Qualität des zu erzeugenden Panoramas ist die Eingabe korrekter Kamera- und Objektivdaten⁴. Beispielsweise werden die Brennweiten und Beschnittfaktoren der Bilder benötigt. Hiermit lassen sich die horizontalen Bildwinkel (Horizontal Field Of View, HFOV) entsprechend der Formel

$$HFOV = 2 * \arctan\left(\frac{B}{2 * f}\right) \quad (1)$$

berechnen. B ist dabei die Breite der Filmaufnahmefläche bzw. des CCD-Sensors⁵, BF der Beschnittfaktor (engl. crop factor) und f die Brennweite (engl. focal length). Betrachtet man Abbildung 11, dann lässt sich die Formel schnell herleiten: $\tan(\theta) = \frac{\frac{B_{35mm}}{2}}{f} = \frac{B_{35mm}}{2*f} \Rightarrow \theta = \arctan\left(\frac{B_{35mm}}{2*f}\right)$; B_{35mm} ist die Breite beim 35mm Kleinbildformat.

Neben der Brennweite und dem Beschnittfaktor können bei vielen Programmen auch Linsenkorrekturwerte z. B. zur Tonnen-/Kissenentzerrung und Vignettierungskorrektur eingegeben werden.

Ebenfalls zur Vorbereitungsphase gehören etwaige Bildbearbeitungs- und Verbesserungsmaßnahmen wie z. B. Drehen, Beschneiden, Ausmaskieren und Helligkeits- bzw. Farbanpassungen. Vorzugsweise werden diese jedoch in die Nachbearbeitungsphase durchgeführt.

⁴Einige Programme können diese Werte auch automatisch ermitteln.

⁵Bei 35mm Kleinbildformat: Querformat: 36mm; Hochformat: 24mm

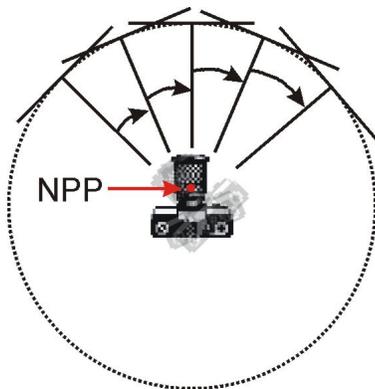


Abbildung 7: Aufnahme von Einzelbildern bei Kamerarotation



Abbildung 8: Nodalpunktadapter (Quelle: [Unbekannt, 2008b](#))

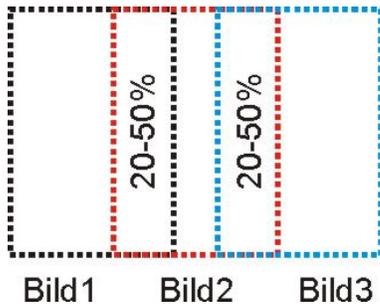


Abbildung 9: Einreihiges Panorama

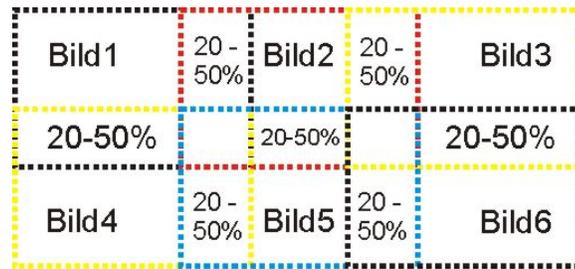


Abbildung 10: Mehrreihiges Panorama

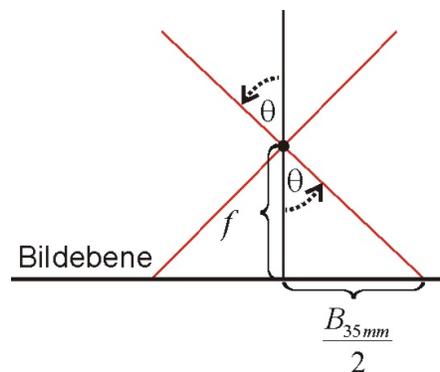


Abbildung 11: Bestimmung des Bildwinkels (HFOV)

3.3 Image Warping

„Warping beschreibt das Deformieren eines Bildes oder Bildausschnitts durch Umordnen der Pixel eines Bildes, also eine geometrische Transformation oder Verzerrung des Bildes“ (Schwebs, 2005, S. 18). Im engeren Sinne versteht man unter dem Begriff „Image Warping“ die Projektion der zu einem Panorama zusammenzufügenden Bilder auf ein geometrisches Objekt, wie z. B. einen Zylinder oder eine Kugel (Pomaska, 2005, Abs. 3). Das „Image Warping“ bildet einen zentralen Teil dieser Arbeit. Auf diese Thematik wird im Kapitel 4 detailliert eingegangen.

3.4 Image Registration

Die Registrierung oder auch „Image Registration“ (Zitova u. Flusser, 2003; McGuire, 1998; Coorg, 1998, S. 59ff) ist der zentrale Schritt bei der Panoramabildstellung. Ziel der Registrierung ist es, für zwei Bilder A und B diejenige Transformation zu finden, die die Punkte des Bildes A optimal auf die des Bildes B für den Überlappungsbereich beider Bilder abbildet. Um die Optimalität messen

bzw. spezifizieren zu können, werden Maßzahlen wie z. B. die L2-Norm verwendet. Ein Optimum für zwei Bilder kann also beispielsweise durch die Minimierung der Fehlerfunktion

$$L_2(f) = \sqrt{\sum_y \sum_x (F(x, y) - G(f(x, y)))^2} \quad (2)$$

gefunden werden (Klein u. Koop, 2004, S. 8). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass eine sequentielle paarweise Registrierung nicht zu einem globalen Optimum führen muss (Shum u. Szeliski, 1997). Die Funktion f ergibt sich vorwiegend aufgrund der Kamerabewegung zwischen zwei konsekutiven Aufnahmen. Die dabei verwendeten Transformationen reichen von affin über perspektivisch bis polynomial (Gümüstekin, 1999, Abschnitt 1). Ist die Kamerabewegung bekannt, so lassen sich die Parameter der Funktion f berechnen. Eine Klassifikation von Registrierungsverfahren findet sich z. B. in Gümüstekin (1999, Abschnitt 2).

3.5 Image Compositing

Allgemein versteht man unter Compositing die „Kombination von Vordergrund-Elementen mit einem Hintergrund“ (Slusallek, 2000, S. 2). Speziell bei der Panoramabilderzeugung handelt es sich um die Behandlung der Überlappungsbereiche. Die Notwendigkeit des Compositing resultiert im Wesentlichen aus sich während der Kamerarotation bewegendem Objekten, unterschiedlichen Lichtverhältnissen, automatisch vorgenommenen Kameraeinstellungen sowie Registrierungsfehlern. Dem Problem der ungleichmäßigen Belichtung kann z. B. mit einem Histogrammausgleich oder der Verwendung einer passenden „Blending“-Funktion begegnet werden. Störungen durch sich bewegendem Objekte können durch Identifikation einer geeigneten „Schnittlinie“ beseitigt werden, die beispielsweise um sich bewegendem Objekte herum verläuft. Die Wahl der Schnittlinie hat einen erheblichen Einfluss auf die spätere Bildqualität (Mihal, 2004).

3.6 Nachbearbeitung

In der Nachbearbeitungsphase wird das erzeugte Panorama je nach verwendetem Transformationstyp bzw. Projektionskörper noch beschnitten. Dies liegt daran, dass beispielsweise ursprünglich horizontale Geraden bei einer zylindrischen Transformation in Kurven transformiert werden (Ringel u. Ringel, 2006; vgl. auch Abbildung 20). Außerdem gehören typische Bildbearbeitungs- und -verbesserungsmaßnahmen wie Helligkeits- und Farbanpassungen zur Nachbearbeitungsphase.

4 Panoramabildarten / Projektionskörper

Panoramabilder lassen sich auf verschiedene Projektionskörper abbilden. Im Wesentlichen lassen sich folgende Panoramabildarten unterscheiden:

- Planar / flach
- Kubisch
- Zylindrisch
- Sphärisch
- Polyedrisch

4.1 Planare Panoramen

Planare oder auch flache Panoramabilder sind „normale“ Fotografien ohne geometrische Korrekturen. Ein Beispiel ist in Abbildung 12 zu sehen.

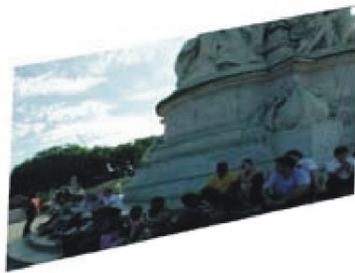


Abbildung 12: Planares / flaches Panorama (Quelle: [Rigg, 2008](#))

4.2 Kubische Panoramen

Bei kubischen Panoramabildern ([Xiong u. Turkowski, 1998](#); [Dahmann, 2008](#)) befindet sich der Betrachter in der Mitte eines Würfels (vgl. Abbildungen 13 und 14). Er ist dabei sinngemäß auf die Größe eines Punktes reduziert, um Verschiebungs- bzw. Parallaxefehler zu verhindern.

Kubische Panoramen besitzen einen Abbildungsbereich von 360° mal 180° , bieten also einen vollen Rundumblick. Sie sind mathematisch sehr einfach handhabbar und erfreuen sich deshalb noch immer großer Beliebtheit ([Chen, 1995](#); [Dahmann, 2008](#)).

4.3 Zylindrische Panoramen

Zylindrische Panoramen ([McMillan u. Bishop, 1995](#); [Szeliski, 1996](#); [Xiong u. Turkowski, 1998](#)) werden durch Projektion der Einzelbilder auf einen Zylinder erzeugt. Die Projektion (Image Warping) geschieht i. A. vor der Registrierung der Bilder, kann jedoch auch im Anschluss erfolgen. Wie bei den kubischen Panoramen ist der Betrachter auf die Größe eines Punktes reduziert und befindet sich in der Mitte des Zylinders. Die einzig zulässige Bewegung ist die Drehung um die vertikale Achse durch den Zylindermittelpunkt. Der Abbildungsbereich von zylindrischen Panoramen beträgt 360° horizontal und $<180^\circ$ vertikal⁶. Ein Beispiel für ein zylindrisches Panorama zeigt [Abbildung 15](#).

Im Folgenden soll die Frage behandelt werden, wie sich die Projektion der Einzelbilder auf einen Einheitszylinder (Radius beträgt eins) mathematisch beschreiben lässt. Ausgangspunkt ist [Abbildung 16](#).

Hier ist ein Lochkameramodell (vgl. [Abschnitt B](#)) in 3D mit einem rechtsdrehenden Koordinatensystem dargestellt. Der Ursprung des Koordinatensystems fällt mit dem Projektionszentrum O zusammen. Die Z-Achse trifft die Bildebene senkrecht im Hauptpunkt H . Die Entfernung zwischen dem Projektionszentrum und der Bildebene ist f . Weiterhin ist ein Einheitszylinder eingetragen. Nachdem der Weltpunkt P bereits auf den Bildpunkt P_B abgebildet worden ist, soll nun die Projektion von P_B auf den Zylinderpunkt P_Z näher betrachtet werden. Der Punkt P_Z wird im Wesentlichen durch einen Rotationswinkel θ und die kürzesten Entfernung zur X-Z-Ebene (ν) repräsentiert.

Um das Verständnis zu erhöhen, soll die Abbildung anhand von zwei Beispielbildpunkten $P1_B = (5; 5; 5)^T$ und $P2_B(10; 5; 5)^T$ sowie deren Abbilder $P1_Z$ und $P2_Z$ veranschaulicht werden. [Abbildung 17](#) zeigt den Sachverhalt in einer Draufsicht.

⁶i. A. liegt der max. vertikale Wert bei ca. 170°



Abbildung 13: Kubisches Panorama (Quelle: [Rigg, 2008](#))

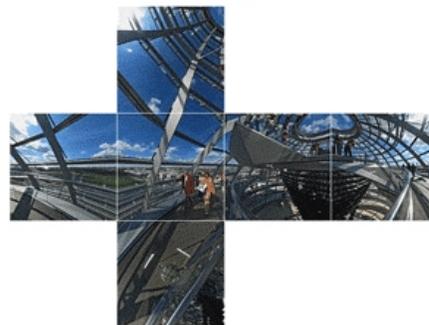


Abbildung 14: Kubisches Panorama - entfaltet (Quelle: [Dahmann, 2008](#))



Abbildung 15: Zylindrisches Panorama (Quelle: Rigg, 2008)

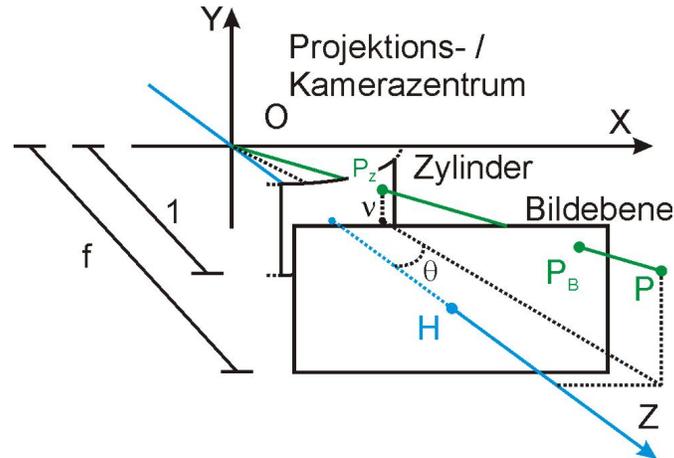


Abbildung 16: Projektion auf Einheitszylinder in 3D

Nach goniometrischen Grundlagen (siehe Abbildung 18) erhält man den Rotationswinkel θ allgemein durch

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_B}{z_B}\right) = \arctan\left(\frac{x_B}{f}\right); f = z_B \neq 0, \theta \neq 90^\circ \wedge \theta \neq 270^\circ \quad (3)$$

Im Beispiel ergeben sich für die beiden abgebildeten Punkte $P1_Z$ und $P2_Z$ die Rotationswinkel $\tan(\theta_1) = \frac{5}{5} \Rightarrow \theta_1 = 45^\circ$ und $\tan(\theta_2) = \frac{10}{5} \Rightarrow \theta_2 \approx 63,43^\circ$.

Zur Bestimmung von ν ist es hilfreich, den Sachverhalt auch von der Seite zu betrachten (vgl. Abbildung 19).

Entsprechend der Wahl des Zylinders ist die Strecke vom Projektionszentrum O zum Punkt $Q1_Z$ ($|OQ1_Z|$) gleich eins. Weiterhin lässt sich die Strecke $|OQ1_B|$

Draufsicht:

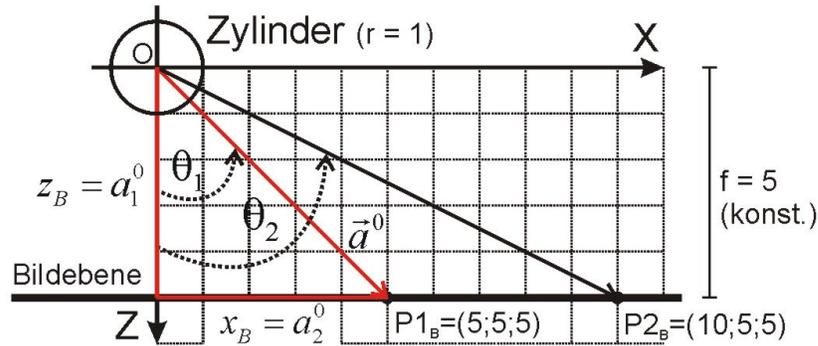
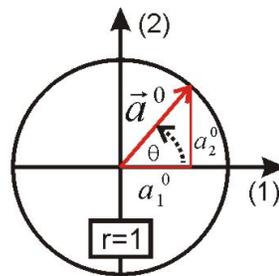


Abbildung 17: Abbildung auf Einheitszylinder - Bestimmung von θ



$$0 \leq \theta < 360^\circ$$

$$\vec{a}^0 = (\theta; 1) = \begin{pmatrix} a_1^0 \\ a_2^0 \end{pmatrix}$$

$$\sin(\theta) := a_2^0$$

$$\cos(\theta) := a_1^0$$

$$\tan(\theta) := \frac{a_2^0}{a_1^0} = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)}, (a_1^0 \neq 0; \theta \neq 90^\circ \wedge \theta \neq 270^\circ)$$

Abbildung 18: Goniometrie - Winkelfunktionen

nach dem Satz des Pythagoras ermitteln:

$$|OQ1_B|^2 = |OA|^2 + |AQ1_B|^2$$

$$\Rightarrow |OQ1_B| = \sqrt{|OA|^2 + |AQ1_B|^2} = \sqrt{z_B^2 + x_B^2}$$

Nach dem zweiten Strahlensatz gilt dann

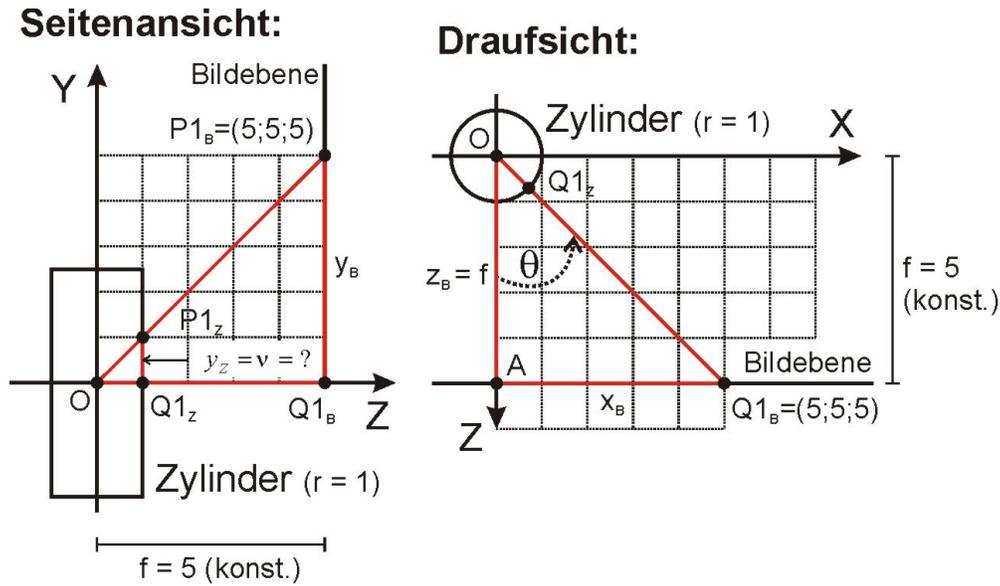
$$|P1_Z Q1_Z| : |P1_B Q1_B| = |OQ1_Z| : |OQ1_B|$$

$$\Rightarrow \nu : y_B = 1 : |OQ1_B|$$

und damit

$$\nu = \frac{y_B}{\sqrt{z_B^2 + x_B^2}} = \frac{y_B}{\sqrt{x_B^2 + f^2}} \quad (4)$$

Für die beiden Beispielpunkte $P1_Z$ und $P2_Z$ sind die ν -Werte entsprechend $\nu_1 = \frac{5}{\sqrt{5^2+5^2}} = \frac{5}{\sqrt{50}}$ und $\nu_2 = \frac{5}{\sqrt{5^2+10^2}} = \frac{5}{\sqrt{125}}$.


 Abbildung 19: Abbildung auf Einheitszylinder - Bestimmung von ν

Allgemein lässt sich die Abbildung auf einen Einheitszylinder durch

$$P_B = \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f \cdot x}{z} \\ \frac{f \cdot y}{z} \\ \frac{z}{f} \end{pmatrix} \mapsto P_Z = \begin{pmatrix} \theta \\ \nu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{x_B}{f}\right) \\ \frac{y_B}{\sqrt{x_B^2 + f^2}} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

formulieren. Dabei ist $f = z_B \neq 0, \theta \neq 90^\circ \wedge \theta \neq 270^\circ$ (vgl. [Szelski u. Shum, 1997](#), S. 2).

Ein Beispiel für ein auf einen Zylinder projiziertes Bild ist in [Abbildung 20](#) zu sehen. Es wird deutlich, dass horizontale Geraden in Kurven transformiert werden ([Ringel u. Ringel, 2006](#), Abschnitt 1).

Ist der Warping-Prozess für alle Einzelbilder abgeschlossen, folgen der Hauptschritt beim Stitching, die Registrierung und die Bearbeitung der Bildübergänge, das „Image Compositing“ (vgl. [Abschnitt 3](#)). Die Ergebnisse beider Schritte sind für zwei Beispielbilder in den [Abbildungen 21\(a\)](#) und [21\(b\)](#) zu sehen.

Einige Beispiele für vollständig geschlossene, zylindrische Panoramen sind im Internet bei [Möck \(2008\)](#) und [Stoß \(2008\)](#) zu finden.

4.4 Sphärische Panoramen

Bei sphärischen Panoramen ([Jacobs, 2002](#); [Pla u. Traver, 2002](#); [Coorg u. Teller, 2000](#)) befindet sich der Betrachter in der Mitte einer Kugel, auf welche die Einzelbilder des Panoramas projiziert worden sind (vgl. [Abbildung 22](#)). Wie bei den

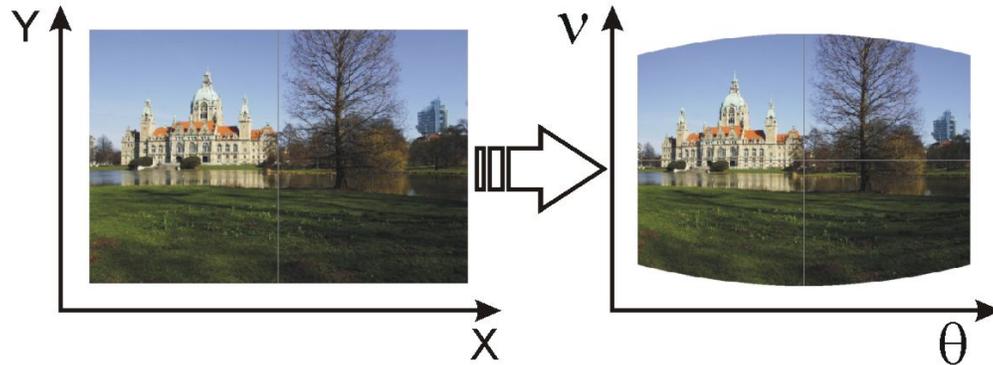


Abbildung 20: Transformation in Zylinderkoordinaten (Quelle (Originalbild): [Unbekannt, 2006](#))

zylindrischen Panoramen ist er sinngemäß auf die Größe eines Punktes reduziert, um Parallaxe-Fehler zu vermeiden. Innerhalb der Kugel kann der Betrachter Rotationsbewegungen in alle Richtungen vornehmen. Eingeschlossen sind Neigungen (engl. yaw), welche die Darstellung des Zenits und Nadirs zur Folge haben. Der



(a) Bilder nach Registrierung



(b) Bilder nach „Compositing“

Abbildung 21: Quelle (Originalbilder): [Unbekannt, 2006](#)

Abbildungsbereich beträgt dementsprechend volle 360° horizontal und 180° vertikal.

Der Projektionsprozess eines einzelnen Bildes auf eine Kugel wird in Abbildung 23 veranschaulicht.



Abbildung 22: Sphärisches Panorama (Quelle: [Rigg, 2008](#))

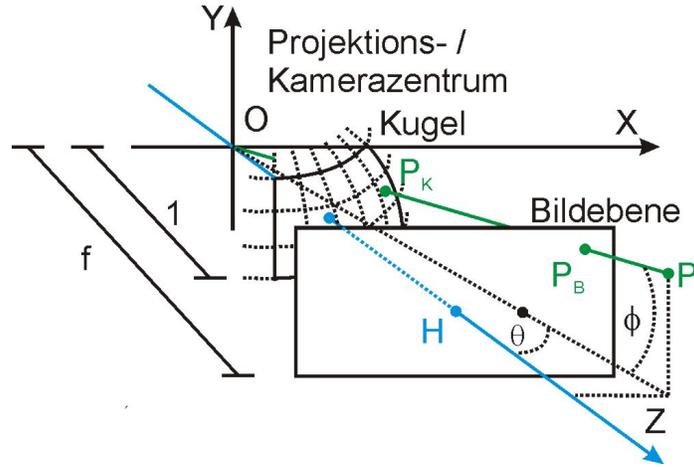


Abbildung 23: Projektion auf Einheitskugel in 3D

Der projizierte Kugelpunkt P_K lässt sich im Wesentlichen durch den Rotationswinkel θ (engl. pitch) und den Neigungswinkel ϕ (engl. yaw) beschreiben. Die mathematische Abbildungsvorschrift lautet

$$P_B = \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f*x}{z} \\ \frac{f*y}{z} \\ f \end{pmatrix} \mapsto P_K = \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{x_B}{f}\right) \\ \arctan\left(\frac{y_B}{\sqrt{x_B^2 + f^2}}\right) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Dabei gilt: $f = z_B \neq 0, \theta \neq 90^\circ \wedge \theta \neq 270^\circ, \phi \neq 90^\circ \wedge \phi \neq 270^\circ$.

Dies ist bei erneuter Betrachtung der Abbildungen 18 und 19 intuitiv nachvollziehbar, da sich $\tan(\phi)$ durch die Division von $|P_B Q_B|$ durch $|O Q_B|$ ergibt. Der wesentliche Unterschied zur Zylinderprojektion besteht darin, dass die zweite Koordinate von P_K ein Winkel ist.

Beispiele für sphärische Panoramen sind im Internet weit verbreitet. Interessante Quellen sind [Möck \(2008\)](#), [Stoß \(2008\)](#) und [Unbekannt \(2008c\)](#).

4.5 Polyedrische Panoramen

Polyedrische Projektionskörper ([Wu u. a., 2005](#), S. 5) werden nur sehr selten verwendet. Aus diesem Grund wird auf sie im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Die Abbildungen 24 und 25 zeigen ein Beispiel für ein polyedrisches Panorama und einen konvexen Polyeder.

A Projektionen

Eine Projektion ist eine Abbildung von dreidimensionalen Figuren auf eine Projektionsebene Π ⁷. Die Abbildung erfolgt durch Geraden (Projektionsstrahlen) vom Urbildpunkt zum Bildpunkt in der Projektionsebene. Die Projektionsstrahlen können parallel verlaufen (Parallelprojektion) oder von einem gemeinsamen Punkt (Projektionszentrum O) ausgehen (Zentralprojektion). Abbildungen 26 und 27 zeigen ein Beispiel für eine Parallelprojektion in Seitenansicht und perspektivischer Ansicht.

Eine Normalprojektion ist ein Spezialfall der Parallelprojektion. Ihre Projektionsstrahlen verlaufen senkrecht zur Projektionsebene. Ein Beispiel ist in den Abbildungen 28 und 29 zu sehen.

Ein typischer Anwendungsfall der Normalprojektion in der Kartografie bzw. beim Kartennetzentwurf ist die „Orthografische Projektion“ (vgl. Abbildung 30).

Bei der Zentralprojektion laufen alle Projektionsstrahlen durch ein gemeinsames Projektionszentrum. Ein Beispiel für diese Projektionsart ist in den Abbildungen

⁷häufig auch Bildebene genannt



Abbildung 24: Polyedrisches Panorama (Quelle: [Hurbain, 2008](#))

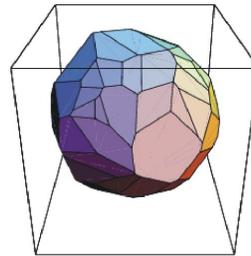


Abbildung 25: Konvexes Polyeder (Quelle: [Weisstein, 2008](#))

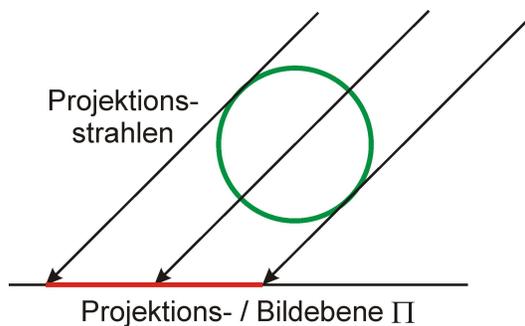


Abbildung 26: Parallelprojektion in Seitenansicht

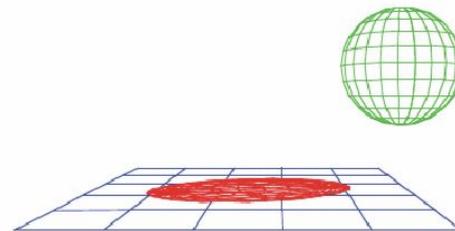


Abbildung 27: Parallelprojektion in perspektivischer Ansicht (Quelle: [Walsers, 2008, Modul 1](#))

31 und 32 zu sehen.

Beispiele für Zentralprojektionen in der Kartografie sind die „Gnomonische Projektion“ und „Stereografische Projektion“ (siehe Abbildungen 33 und 34). Bei der gnomonischen Projektion ist das Projektionszentrum der Kugelmittelpunkt. Die Projektionsebene ist in der Regel eine Tangentialebene an die Kugel.

Bei der stereografischen Projektion ist das Projektionszentrum ein beliebiger Kugelpunkt. Die Projektionsebene ist die Tangentialebene durch den diametralen Kugelpunkt oder eine dazu parallele Ebene.

B Lochkameramodell

Das Lochkameramodell (auch „Camera obscura“) ist das wohl einfachste Kamera-modell. Es beschreibt die Abbildung einer dreidimensionalen Umgebung auf eine zweidimensionale Projektions- bzw. Bildfläche (vgl. Abbildungen 35 und 36).

Die Lochkamera wird durch eine Zentralprojektion beschrieben. Das Projektionszentrum wird auch Kamerazentrum genannt. Die zur Bildebene senkrecht verlaufene Gerade durch das Projektionszentrum heißt Kammerachse, die Entfernung zwischen der Bildebene und dem Projektionszentrum Kammerkonstante, der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Bildebene Hauptpunkt H. Obwohl das Lochkameramodell kein optisches Linsensystem besitzt, wird die Kammerkonstante oftmals auch als Brennweite bezeichnet und dementsprechend mit dem Buchstaben f abgekürzt.

Um das Verständnis bei projektiven Betrachtungen weiter zu erhöhen, arbeitet man im Zusammenhang mit dem Lochkameramodell häufig mit einer „negativen Brennweite“ (Nef, 2002, S. 30-31). Hierbei befinden sich die abgebildeten Objekte „vor“ dem Projektionszentrum (auf einer Seite mit dem Originalobjekt) und stehen nicht mehr auf dem Kopf. Diesen Sachverhalt veranschaulicht Abbildung 37.

Abbildung 38 zeigt das Lochkameramodell in einer dreidimensionalen Perspektive.

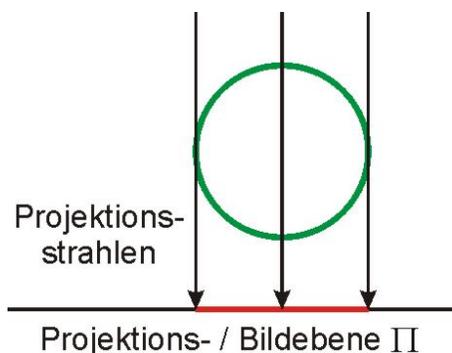


Abbildung 28: Normalprojektion in Seitenansicht

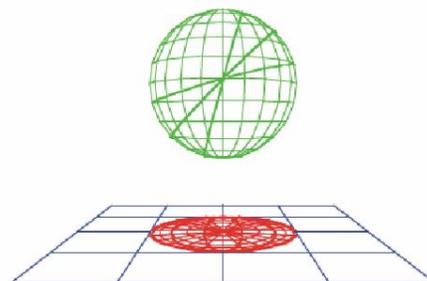


Abbildung 29: Normalprojektion in perspektivischer Ansicht (Quelle: Walser, 2008, Modul 1)

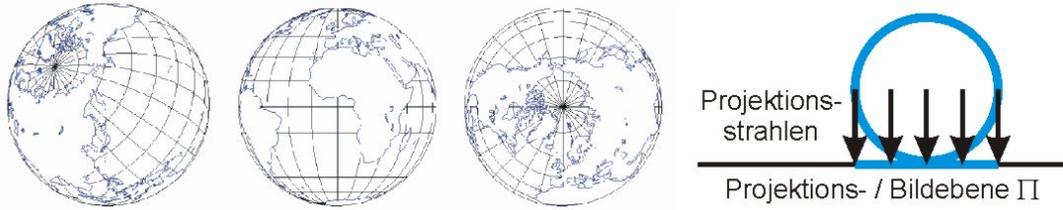


Abbildung 30: Orthografische Projektion (Quelle: [Walser, 2008](#), Modul 1)

Auch hier befindet sich die Bildebene vor dem Projektionszentrum in positiver Z-Richtung.

Mathematisch lässt sich die Projektion auf die Bildebene folgendermaßen beschreiben:

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto P_B = \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f \cdot x}{z} \\ \frac{f \cdot y}{z} \\ f \end{pmatrix}; f = z_B = \textit{konstant}$$

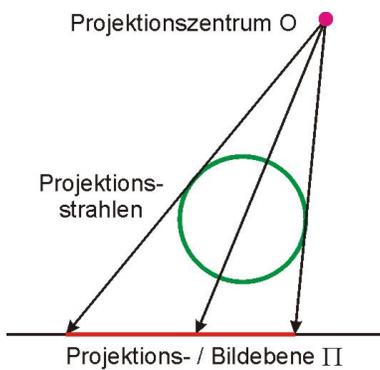


Abbildung 31: Zentralprojektion in Seitenansicht



Abbildung 32: Zentralprojektion in perspektivischer Ansicht (Quelle: [Walser, 2008](#), Modul 1)

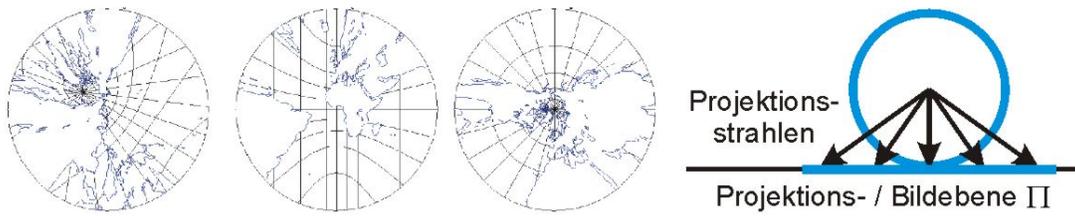


Abbildung 33: Gnomonische Projektion (Quelle: [Walser, 2008](#), Modul 1)

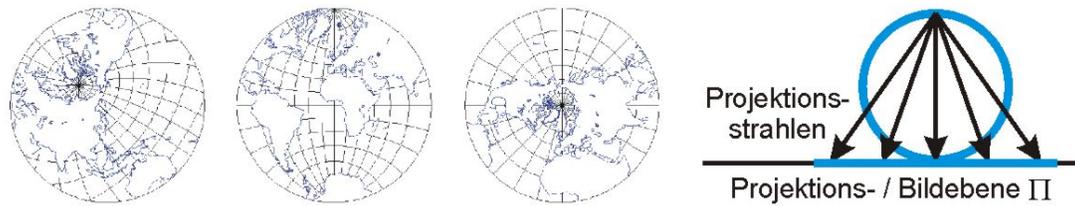


Abbildung 34: Orthografische Projektion (Quelle: [Walser, 2008](#), Modul 1)

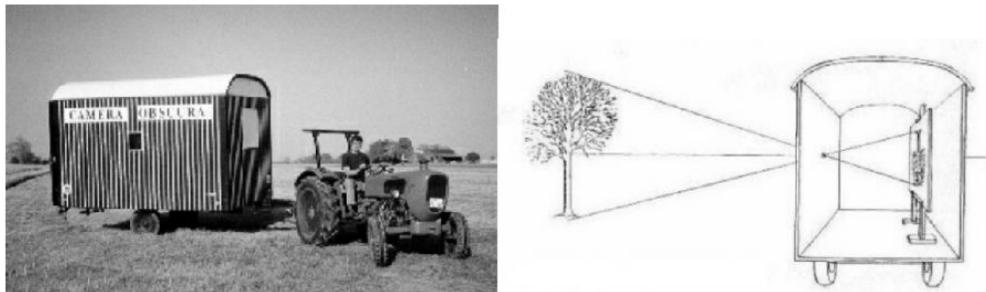


Abbildung 35: Lochkamera (Quelle: [Walser, 2008](#), Modul 1)

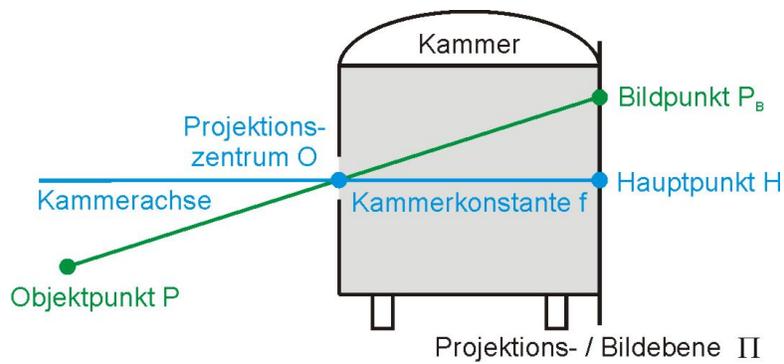


Abbildung 36: Lochkammermodell - Seitenansicht

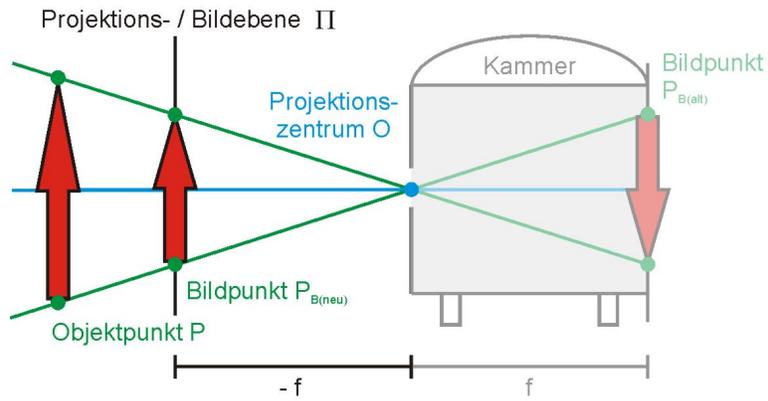


Abbildung 37: Lochkameramodell und „negative Brennweite“ - Seitenansicht

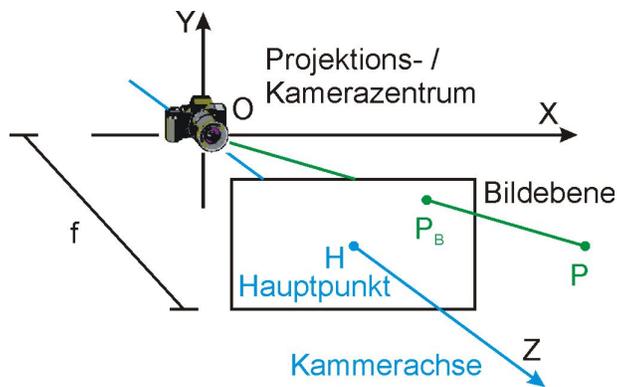


Abbildung 38: Lochkameramodell in 3D

Literatur

[Alloa 2006]

ALLOA, Emanuel: *Von der Mobilmachung der Bilder, Teil 1 - Fernweh, das Panorama und andere Sehüchte*. http://www.artnet.de/magazine_de/features/alloa/alloa11-17-06.asp. Version: November 2006. – Abruf: 28.03.2008 3, 5

[Chen 1995]

CHEN, Shenchang E.: *QuickTime VR - An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation*, 1995, S. 29–38 13

[Coorg u. Teller 2000]

COORG, Satyan ; TELLER, Seth: *Spherical Mosaics with Quaternions and Dense Correlation*. In: *International Journal of Computer Vision* 37 (2000), Nr. 3, S. 259–273 17

[Coorg 1998]

COORG, Satyan R.: *Pose Imagery and Automated Three-Dimensional Modeling of Urban Environments*, MIT, Diss., September 1998. <http://citeseer.ist.psu.edu/coorg98pose.html>. – Elektronische Ressource 11

[Dahmann 2008]

DAHMAN, Manuel: *Erstellen eines Quicktime VR Cubic Panorama-Movies*. <http://www.kubische-panoramen.de/vrmanual/index.html>. Version: 2008. – Abruf: 30.03.2008 3, 13, 14

[Deng u. Zhang 2003]

DENG, Yining ; ZHANG, Tong: *Generating Panorama Photos*. In: SMITH, John R. (Hrsg.) ; PANCHANATHAN, Sethuraman (Hrsg.) ; ZHANG, Tong (Hrsg.): *Proceedings of the SPIE - Internet Multimedia Management Systems IV* Bd. 5242, 270-279 8

[Gümüstekin 1999]

GÜMÜSTEKIN, Sevet: *An Introduction to Image Mosaicing*. <http://www.iyte.edu.tr/eee/sevgum/research/mosaicing99/>. Version: July 1999 8, 12

[Herbert u. McKernan 1996]

HERBERT, Stephen (Hrsg.) ; MCKERNAN, Luke (Hrsg.): *Who's Who of Victorian Cinema: a Worldwide Survey*. BFI Publishing, 1996 6

[Hohenauer 2004]

HOHENAUER, Oliver: *Projektionsarten*. http://panoramen.hohenauer.ch/theorie/panoramas2_d.php. Version: 2004. – Abruf: 29.03.2008 3, 7

[Hurbain 2008]

HURBAIN, Philippe: *3-D panorama printing: enter physical reality*. <http://www.philohome.com/rhombicuboctahedron/rhombicuboctahedron.htm>.
Version: 2008. – Abruf: 29.03.2008 3, 20

[Jacobs 2002]

JACOBS, Corinna: *Sphärische Panoramen im Web*, Fachhochschule Stuttgart - Hochschule der Medien, Diplomarbeit, August 2002 17

[Klein u. Koop 2004]

KLEIN, Hans-Ulrich ; KOOP, Michael: Image Mosaicing. In: *Ausgewählte Themen zu Bildverstehen und Mustererkennung*, 2004 8, 12

[McGuire 1998]

MCGUIRE, Morgan: An image registration technique for recovering rotation, scale and translation parameters / NEC. Version: 1998. <http://www.cs.brown.edu/~morgan/>. – Forschungsbericht. – Elektronische Ressource 11

[Möck 2008]

MÖCK, Martin: *Panoramaplanet*. <http://www.panoramaplanet.de/index.htm>. Version: 2008 17, 19

[McMillan u. Bishop 1995]

MCMILLAN, Leonard ; BISHOP, Gary: Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System. In: *Computer Graphics (SIGGRAPH'95)* 29 (1995), August, S. 39–46 14

[McMillan 1997]

MCMILLAN, Leonard J.: *An Image-Based Approach to Three-Dimensional Computer Graphics*, University of North Carolina, Diss., 1997

[Mihal 2004]

MIHAL, Andrew: *Enblend - How It Works*. <http://enblend.sourceforge.net/details.htm>. Version: October 2004 12

[Nef 2002]

NEF, Marco: *Entwicklung eines Systems zur Simulation eines multi-Kamera-basierten Gesichtsscanners*, Computer Graphics Lab, Departement Informatik, ETH Zürich, Diplomarbeit, 2002 21

[Neupert 2006]

NEUPERT, Max: *Der Über-Blick*, Burg Giebichenstein - Hochschule für Kunst und Design, Diplomarbeit, 2006 5

- [Opportunity 2007]
OPPORTUNITY: *D-Star Panorama*. <http://www.jpl.nasa.gov/missions/mer/images.cfm?id=2169>. Version: April 2007 3, 8
- [Otto 2007]
OTTO, Peter: Between the Virtual and the Actual: Robert Barker's Panorama of London and the Multiplication of the Real in late eighteenth-century London. In: *Romanticism on the Net* 46 (2007), May. <http://www.erudit.org/revue/ron/2007/v/n46/016130ar.html>. – Abruf: 28.03.2008 5
- [Peleg u. Herman 1997]
PELEG, Shmuel ; HERMAN, Joshua: Panoramic Mosaics by Manifold Projection. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97)* (1997), S. 338–343 8
- [Pla u. Traver 2002]
PLA, Filiberto ; TRAVER, V. J.: Spherical Panoramas for Pan-Tilt Camera Motion Compensation in Space-Variant Images. In: *Topics in Artificial Intelligence* 2504 (2002), S. 375–387 17
- [Pomaska 2005]
POMASKA, Günter: *Zur Photographischen Aufnahme und Wiedergabe von Panoramen*. <http://www.imagefact.de/d/panoramen/index.html>. Version: Dezember 2005. – Abruf: 29.03.2008 11
- [Rigg 2008]
RIGG, James: *Types of panoramic images*. <http://www.panoguide.com/howto/panoramas/types.jsp>. Version: 2008. – Abruf: 30.03.2008 3, 13, 14, 15, 19
- [Ringel u. Ringel 2006]
RINGEL, Barbara ; RINGEL, Claus M.: *Panorama-Fotografie und mehr ... Sinuskurven überall*. <http://www.math.uni-bielefeld.de/~ringel/opus/panorama/text.htm>. Version: Oktober 2006. – Abruf: 29.03.2008 12, 17
- [Schwebs 2005]
SCHWEBS, Walter: *Bildbasiertes Rendering für die Navigation in virtuellen Welten*, Universität Koblenz - Landau Institut für Computervisualistik Arbeitsgruppe Computergrafik, Diplomarbeit, Juli 2005 6, 11
- [Shum u. Szeliski 1997]
SHUM, Heung-Yeung ; SZELISKI, Richard: Panoramic Image Mosaics / Microsoft Research. 1997 (MSR-TR-97-23). – Forschungsbericht 12

- [Slusallek 2000]
SLUSALLEK, Philipp: *Computergraphik - Imaging*. http://graphics.cs.uni-sb.de/Courses/ws9900/cg/s_de_index.html. Version: Januar 2000 12
- [Stoß 2008]
STOSS, Michael: *Die Panorama Seite*. <http://die-panorama-seite.de>. Version: 2008 17, 19
- [Szeliski 1996]
SZELISKI, Richard: Video Mosaics for Virtual Environments. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 16 (1996), March, Nr. 2, S. 22–30 14
- [Szeliski u. Shum 1997]
SZELISKI, Richard ; SHUM, Heung-Yeung: Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps / Microsoft Research. 1997. – Forschungsbericht 17
- [Thien 2007]
THIEN, Norbert: *Panoramafotografie*. <http://www.panoramic-shot.com/technik.htm>. Version: September 2007. – Abruf: 29.03.2008 6
- [Unbekannt 2006]
UNBEKANNT: *Panoramen mit HUGIN*. http://www.panoclub.de/hugin_tut/hugin_tut_main.html. Version: Oktober 2006. – Abruf: 30.03.2008 3, 18
- [Unbekannt 2008a]
UNBEKANNT: *Innsbrucker Riesenrundgemälde*. http://de.wikipedia.org/wiki/Innsbrucker_Riesenrundgem%C3%A4lde. Version: März 2008. – Abruf: 29.03.2008 3, 5
- [Unbekannt 2008b]
UNBEKANNT: *Knotenpunkt (Fotografie)*. [http://de.wikipedia.org/wiki/Knotenpunkt_\(Fotografie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Knotenpunkt_(Fotografie)). Version: Januar 2008. – Abruf: 31.03.2008 3, 10
- [Unbekannt 2008c]
UNBEKANNT: *Panorama: interaktive Panoramen und Panoramafotografie*. <http://nightshift.de/service/panorama.html>. Version: März 2008. – Abruf: 31.03.2008 19
- [Unbekannt 2008d]
UNBEKANNT: *Stitching*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Stitching>. Version: Januar 2008. – Abruf: 31.03.2008 8

[Walser 2008]

WALSER, Hans: *Geometrie und Computergrafik - Teil Geometrie*. <http://www.math.unibas.ch/~walser/institut/vorlesungen/08fs/ETH/index.html>.
Version: Februar 2008. – Abruf: 31.03.2008 3, 20, 21, 22, 23

[Weisstein 2008]

WEISSTEIN, Eric W.: *Polyhedron*. <http://mathworld.wolfram.com/Polyhedron.html>. Version: 2008. – Abruf: 29.03.2008 3, 20

[Wright u. a. 1999]

WRIGHT, Mark W. ; WATSON, Gordon ; DUNLOP, Gair ; MIDDLETON, Roy: Edinburgh: 200 years of heritage through image-based virtual environments. In: *EUROGRAPHICS '99 - M.A. Alberti, G. Gallo, I. Jelinek* (1999), S. 1–4 5

[Wu u. a. 2005]

WU, Shaomei ; WANG, Renshen ; WANG, Jiaxin: Campus Virtual Tour System based on Cylindric Panorama. In: *11th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM 2005)*, 2005 19

[Xiong u. Turkowski 1998]

XIONG, Yalin ; TURKOWSKI, Ken: Registration, Calibration and Blending in Creating High Quality Panoramas. In: *4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision* (1998), S. 69–74 13, 14

[Zhang 2006]

ZHANG, Jianwei: *Vorlesung Angewandte Sensorik - Omnidirektionale Sichtsysteme*. http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2005ws/vorlesung/angewandte_sensorik/vorlesung_11.4.pdf. Version: Januar 2006. – Abruf: 30.03.2008 7

[Zitova u. Flusser 2003]

ZITOVA, Barbara ; FLUSSER, Jan: Image registration methods: a survey. In: *Image and Vision Computing* 21 (2003), S. 977–1000 11