

# Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades  
Diplom-Ingenieur  
aus dem Fachbereich  
**Vermessungswesen und Geoinformation**

an der Technischen Universität Wien  
Institut für Geodäsie und Geoinformation



Thema:  
**Deformationsmessung an Holztüren mit digitaler  
Photogrammetrie**

Eingereicht von: **Werner EBERHARD**  
Theodor-Sickel-Gasse 12/11/12  
1100 Wien

Betreuer: Dr. techn. Camillo Ressler  
Dr. techn. Franz Rottensteiner

Begutachter: o. Univ. Prof. Dr. techn. Norbert Pfeifer

Wien, im September 2015

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, September 2015

.....  
Werner EBERHARD

## **Abstract**

### Deformation Analysis of Wooden Doors

In a joint research project carried out at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing with the Austrian Timber Research institute, procedures for automatic derivation of surface models were tested in 1997. The goal of this diploma thesis was to derive exact models of the surface of wooden doors for an exact deformation analysis for quality control. In a compare of digital and semidigital procedures, the usability of a non-photogrammetric digital camera should be tested for this purpose. A photogrammetric camera gave the reference in two epochs. Retroreflective target marks were produced for the purpose of automatic target measurement. After the automatic target measurement, the object coordinates were calculated in a bundle adjustment. Accuracy less than 0.2 mm in elevation was obtained only by the photogrammetric camera. The non-photogrammetric digital camera obtained models with an accuracy of 0.4 mm. The surface of difference models was smoothed to enhance the accuracy.

Different elevation plots show the deformation in an easy way to give technicians a base for decisions.

This is just another example that photogrammetric work is indeed able to achieve subpixel and submillimetre accuracy. To reach the desired accuracy digital photogrammetry needs high-resolution images and large scale.

## Kurzfassung

Am österreichischen Holzforschungsinstitut wurden 1997 Laubengangtüren auf Differenzklima getestet. Ziel dieser Arbeit ist es, zu ermitteln, ob ein rein digitales photogrammetrisches Auswerteverfahren die gewünschte Höhengenaugigkeit eines Differenzmodells ergibt. Ein Vergleich einer analogen Messbildkamera mit einer digitalen Amateurkamera soll zeigen, ob die Digitaltechnologie des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung schon bereit für photogrammetrische Präzisionsvermessungen ist. Es wurden in einem Versuch Deformationsmessungen in zwei Epochen mit beiden Kameras digital ausgewertet. Dazu wurden retroreflektierende Zielmarken erstellt, die dann auch zur automatischen Messung der Bildkoordinaten verwendet wurden. Die Objektkoordinaten wurden mit einem Bündelblockausgleich berechnet. Eine Höhengenaugigkeit kleiner als 0,2 mm konnte nur mit der analogen Messbildkamera erreicht werden. Die Genauigkeit der mit Hilfe der Amateurkamera erzeugten Modelle erreichten 0,4 mm. Durch die Glättung der Fläche konnte die Genauigkeit noch gesteigert werden. Verschiedene graphische Höhendarstellungen sollen den Technikern als Entscheidungshilfe dienen.

Zur Erreichung von Subpixel- und Submillimeter- Genauigkeiten war die Software, die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung entwickelt wurde, einzusetzen. Der Umweg über analoge Bilder liefert einen größeren Bildmaßstab und daher auch die erforderliche Genauigkeit. Die digitale Photogrammetrie benötigt detailreiche digitale Bilder.

# Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	i
Kurzfassung.....	ii
Inhaltsverzeichnis .....	iii
1. Einleitung .....	1
1.1. Motivation .....	1
1.2. Aufgabenstellung.....	2
1.3. Geforderte Genauigkeiten .....	3
2. Messverfahren .....	5
2.1. Die Auswertung mit Messuhren.....	5
2.1.1. Messung der Kantenverformung.....	5
2.1.2. Messung der Verwindung .....	6
2.2. Photogrammetrischer Lösungsansatz .....	7
3. Photogrammetrische Vorarbeiten.....	11
3.1. Objekt.....	11
3.2. Verwendete Kameras .....	12
3.2.1. Analoge Messbildkamera Leica P31 .....	12
3.2.2. Amateurlinse Kodak DCS 460.....	13
3.3. Berechnung der Aufnahmeentfernung .....	15
3.4. Bildgröße und Bildmaßstab.....	16
3.5. Signalgröße im Bild.....	16
3.6. Tiefenschärfe .....	17
3.7. Versuchsaufbau .....	18
3.8. A priori Genauigkeitsabschätzungen.....	19
3.9. Signalisierung.....	20
3.9.1. Herstellung von Klebemarken.....	21
4. Koordinatensysteme .....	22
4.1. Bildkoordinatensystem .....	22
4.1.1. Digitales Bild.....	22
4.1.2. Gescanntes Analogbild.....	23
4.1.3. Bildpyramiden .....	24
4.2. Objektkoordinatensystem.....	25
4.3. Lagerung und Orientierung .....	26
4.3.1. Zwangsfreie Lagerung.....	26
4.3.2. Näherungsorientierung der Bilder .....	27
5. Messung und Orientierung der Bilder .....	28
5.1. Messung von vier Punkten pro Bild mit ORPHEUS .....	28
5.2. Vororientierung der Bilder mit ORIENT .....	29
5.3. Erste automatische Messung mit CENTROID.....	29
5.4. Zweite automatische Messung mit CENTROID.....	30
5.5. Händische Korrekturen in ORPHEUS .....	31
5.6. Bündelblockausgleichung .....	31
5.6.1. Ergebnisse der Ausgleichung .....	33
5.7. Die Genauigkeit der Punktauswertung.....	38

---

6.	Analyse .....	39
6.1.	Interpolation .....	39
6.2.	Differenzmodelle .....	40
6.3.	Isolinien und Visualisierungen .....	41
7.	Zusammenfassung .....	47
7.1.	Ergebnisse .....	47
7.2.	Die durchgeführten Arbeiten am ÖHFI.....	48
7.3.	Ausblick und andere Verfahren.....	52
8.	Verzeichnisse.....	54
8.1.	Literaturverzeichnis .....	54
8.2.	Abbildungsverzeichnis .....	55
8.3.	Tabellenverzeichnis .....	56
9.	Anhang .....	57
10.	Lebenslauf .....	58

# 1. Einleitung

Diese Diplomarbeit entstand, da am Österreichischen Holzforschungsinstitut ÖHFI neue Möglichkeiten der Messung von Proben in Betracht gezogen wurden. Eine der speziellen Prüfungen beschäftigt sich mit der Verformung von Türen. Aus der breiten Palette von Türen wurden die Laubengangtüren als jene Art von Türen untersucht, die eine Prüfung auf Differenzklima bestehen müssen. In einer Klimakammer werden die Türen einseitig mit verschiedener Temperatur und Luftfeuchtigkeit belastet und deren Verformung an den Kanten gemessen. Der mehrschichtige Aufbau des Türblattes soll die Verformung so gering halten, dass die Dichtungen der Tür noch funktionstüchtig bleiben und andere Erfordernisse in Hinblick auf Sicherheit und Funktionstüchtigkeit erfüllt sind. Diese Prüfungen werden durchgeführt, um die Qualitätssicherung gemäß ÖNORM (B 5330 Teil 1, EN79, EN 24 und EN43) zu erfüllen.

## 1.1. Motivation

Das in den Normen beschriebene, konventionelle Verfahren sieht den Einsatz von Messuhren vor, siehe Kapitel 2.1. Diese haben den Vorteil, dass sie gleichbleibende Genauigkeiten ermöglichen, elektronische Daten in Echtzeit liefern und an exakt vordefinierten Punkten Messwerte bereitstellen. In dieser konventionellen Prüfung werden die Kantenverformung und die Verwindung in zwei speziellen Verfahren vermessen.

Der Nachteil, aus Sicht der Vermessung, bei dieser Methode ist, dass beim Einsatz von Messuhren feste Punkte als Voraussetzung vorhanden sein müssen. Es können immer nur relative Messungen durchgeführt werden. Die Messungen der einzelnen Kantenverformungen sind nur in ein grobes Modell eingebettet. Die Anzahl der Messpunkte ist durch die Verwendung von Messuhren stark limitiert.

Die Erfassung der Kantenverformung ist pro Kante mit einem Messwert vorgesehen. Daraus werden Rückschlüsse auf den gesamten Verlauf der Kante gemacht. Zusätzliche Parameter für die bekannten Schwachstellen eines Türblattes, wie die Bänder oder das Schloss, sind nicht vorgesehen.

Die Verwindung bezieht sich auf eine relative Messung im Verhältnis zu den anderen Eckpunkten, es wird daher kein direkter Zusammenhang mit der Kantenverformung bestimmt. Es könnte ein Fall eintreten, bei dem sich positive und negative Krümmungen aufheben und die Kantenverformung nicht erkannt wird. Außerdem könnte die Messeinrichtung selbst Einfluss auf die Verformung der Tür nehmen.

Eine berührungslose Vermessung, wie sie etwa in der Photogrammetrie möglich ist, die einem verfeinerten Modell zugrunde liegt und die gesamte Oberfläche einbezieht, scheint eine Verbesserung der Messmethode zu sein. Die Oberfläche einer Tür ist in erster Näherung eine Ebene. Die Deformation aufgrund von Differenzklima wird eine Oberfläche ergeben, die stetig ist. Das Vorhandensein von Bruchkanten, wie es in Geländemodellen üblich ist, wurde vorerst ausgeschlossen.

Hingegen wurde ein glatter Verlauf entlang einer Biegelinie unterstellt. Im Fall, dass dieser Ansatz zu grob erschien wäre, hätte die Möglichkeit bestanden, ihn mit Hilfe von Daten aus der Praxis zu verfeinern. Augenscheinlich gab es aber dazu keine Notwendigkeit, selbst bei den Schwachstellen Schloss und Band wurde ein glatter Verlauf erwartet.

Mit Differenzklima belastete Laubengangtüren verhalten sich stetig. Die Verformungen sind im Verhältnis zur Ausdehnung des Objektes klein. Die Steigungen sind, ebenso wie die Krümmungen, stetig. Das heißt, es gibt keine Bruchkanten. Die auftretenden Extremwerte sind nicht am Rand zu erwarten.

Die zu messende Verformung tritt nur senkrecht auf die Türblattebene auf. Das bedeutet, dass eine etwaige Verkleinerung oder Vergrößerung des Türblattes nicht Gegenstand dieser Untersuchung ist. Diese Art der Verformung wäre aufgrund der punktwisen Auswertung auch messbar, wird aber für die hier gestellte Frage vernachlässigt. Das untersuchte Verhalten ist eine Abweichung von der Ebene. Das Vorhandensein einer bestimmten vorgegebenen Ebene ist keine zwingende Voraussetzung. Die Krümmungen können sowohl positiv als auch negativ sein. Die Oberfläche ist durch eine Interpolation zu glätten, wobei ein zufälliger Messfehler angenommen werden kann. Daher ist eine Interpolation nach der Methode der kleinsten Quadrate mit Filterung durchzuführen, wie sie in Kapitel 6.1 dargestellt wird.

Die Transformation der beiden Epochen aufeinander hat so zu erfolgen, dass entweder der Schwerpunkt der Flächen ident ist, oder bestimmte zu definierende Punkte entlang eines Profils zur Deckung kommen. Bei der Differenzbildung mit Hilfe der Schwerpunkte kann die Oberfläche – und damit die Verwindung der Türblätter – dargestellt werden. Die Kantenverformung kann durch die Verwendung von Punkten auf dem gesuchten Profil exakter modelliert werden. Die zu untersuchenden Fragestellungen sind im folgenden Kapitel dargestellt.

## 1.2. Aufgabenstellung

Einer der Vorteile einer photogrammetrischen Erfassung der Daten ist, dass die gesamte Fläche in mehreren Epochen darstellbar wird. Dadurch kann ein schematisches Bild der Verformung erarbeitet werden.

Die aufgetretene Frage ist:

- Kann Photogrammetrie unter Verwendung einer analogen Messbildkamera und einem digitalen Arbeitsfluss die Fehlergrenzen einhalten?

Die eigene Software des IPF soll dafür verwendet werden:

ORIENT ist für den Bündelblockausgleich zu verwenden. Diese Software ist häufig in Verwendung und in den Anwendungen des IPF weit verbreitet.

**CENTROID** ist eine Routine, die automatische Messungen von signalisierten Punkten vornehmen kann. Dieses Programm war in Entwicklung und wurde einem Praxistest unterzogen.

**ORPHEUS** ist eine Weiterentwicklung von **ORIENT** und beinhaltet die Funktion eines Monokomparators. Dieses Programm war neu entwickelt und jede Art der Verwendung gewünscht.

**SCOP** kann topographische Modelle bearbeiten und ISO-Linien generieren. Die graphischen Ausgaben wurden mit diesem bewährten Programm durchgeführt.

Analoge Auswertungen haben sich bewährt, bei dieser Messmethode werden hohe mechanische Ressourcen zur Anwendung gebracht. Unter anderem müssen Filmplatten entwickelt und digitalisiert werden.

Eine andere Fragestellung lautet daher:

- Ist dies anno 1997 unter Verwendung einer digitalen Kamera auch möglich?

Ein spezielles Problem hierbei stellt die geringe Auflösung der Digitalkameras im Vergleich zu einer terrestrischen Messbildkamera dar. Die sich daraus ergebenden Genauigkeitsunterschiede sollen Ziel dieser Arbeit sein. Die zu diesem Zeitpunkt verfügbare Digitalkamera war die Kodak DCS 460. Als analoge Messbildkamera stand die Wild P31 zur Verfügung.

Es soll nach einer Lösung gesucht werden, bei der die Anzahl der Bilder für beide Kameras gleich ist.

Die Durchführung des photogrammetrischen Versuchs erfolgte 1997/98. Die schriftliche Ausfertigung dieser Arbeit erfolgte im Jahre 2015.

### **1.3. Geforderte Genauigkeiten**

Hier sind die Wünsche des Auftraggebers (ÖHFI), die Vorgaben der ÖNORM und das vorhandene Messsystem einzubringen. Die Normen geben Standards vor, die dem Konsumenten ein optimales Maß an Sicherheit geben sollen. Dies ist immer ein Kompromiss zwischen dem technisch Machbaren und wirtschaftlichen Überlegungen. Die ÖNORM definiert in diesem Fall die minimalen Erfordernisse. Das vorhandene Messsystem kann punktuell eine hohe Genauigkeit erreichen. Ein neues bildgebendes Verfahren würde hinsichtlich der Genauigkeit dazwischen liegen.

Bei der Genauigkeit von Messuhren wird eine innere und eine äußere Genauigkeit unterschieden. Unabhängig von den Herstellerangaben der inneren Genauigkeit,

soll das gesamte Messsystem beurteilt werden. Nach den Angaben des ÖHFI erreicht ihre Messstation mit Messuhren eine Wiederholungsgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm für eine Messdauer von ca. 4 Wochen. Die angegebenen Genauigkeiten in Tabelle 1 verstehen sich als Standardabweichungen bei Wiederholungsmessungen.

Die ÖNORM B 5330 Teil 1 (Türen allgemein) und EN 79 (Prüfung) bzw. EN 24 (Ebenheit) und EN 43 (Differenzklima) treffen die Aussage, dass eine Standardabweichung von  $\pm 0,5$  mm für die gesamte Laufzeit der Versuchsanordnung sicherzustellen ist.

Das ÖFHI erwartet sich für die photogrammetrische Auswertung nicht die gleiche Genauigkeit wie die der Messuhren, jedoch soll eine Standardabweichung von  $\pm 0,2$  mm angestrebt werden, um genügend Sicherheitsreserve zu haben. Mit dieser Genauigkeitsangabe ist der mittlere Fehler der interpolierten Fläche gemeint.

Geforderte Genauigkeiten	$\pm 0,5$ mm
Messung der Kantenverformung mit Messuhren	$\pm 0,1$ mm
Photogrammetrische Flächenbestimmung	$\pm 0,2$ mm

**Tabelle 1: Genauigkeiten der Verformung**

Für eine Einzelpunktauswertung kann die erreichte Genauigkeit nach einer photogrammetrischen Auswertung gut angegeben werden. Eine interpolierte Fläche ist abhängig von der Homogenität der Oberfläche, der Übertragungsfunktion der Interpolationsmethode und ihres Leistungsspektrums (KRAUS, 2000). Für die Bereiche innerhalb der Stützstellen wird die Glättung der Fläche eine zusätzliche Verbesserung bewirken.

## **2. Messverfahren**

Das derzeitige Messverfahren, wie es die ÖNORM zur Qualitätssicherung (B 5330 Teil 1, EN79, EN 24, und EN43) vorsieht, beschreibt die Messung der Verformung von Laubgangtüren, die auf Differenzklima geprüft werden. Es soll gezeigt werden, wie die Messung bisher stattfindet und wie ein neues Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie aussehen könnte.

### **2.1. Die Auswertung mit Messuhren**

Messuhren messen kleine Längendifferenzen und benötigen feste Ankerpunkte. Sie haben eine innere Genauigkeit von einigen hundertstel Millimetern. Es gibt analoge Messuhren und solche, bei denen der Längenunterschied digital abgetastet wird. Sie sind für elektronische Überwachungsmessungen in Echtzeit besonders geeignet.

Aufgrund von Wiederholungsmessungen innerhalb des Versuchszeitraums ergibt sich eine Standardabweichung von 0,1 – 0,2 mm für das gesamte Messsystem. Das entspricht mehr als der doppelten Genauigkeit, die von der Norm gefordert wird. Die vorgeschriebene maximale Standardabweichung beträgt dort 0,5 mm.

Die Verformungen, die aufgrund des Differenzklimas (Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit) auftreten, betragen während der mehrwöchigen Versuchsdauer bis zu einigen Zentimetern. Dies kann es notwendig machen, die Messuhren während der Versuchsdauer nachzustellen, da man an die Grenzen des Messbereichs, der ungefähr 1,5 cm beträgt, gelangt.

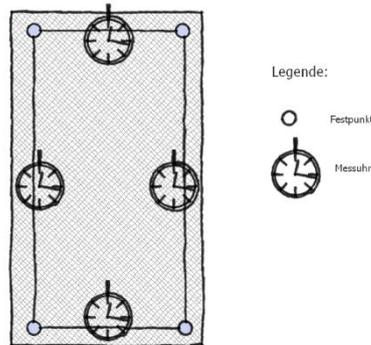
Die Messuhren liefern in Echtzeit Daten über die Verformung, die graphisch dargestellt werden. Übersteigt eine Messung einen vorher eingegeben Grenzwert, so kann eine Warnung den Versuchsleiter darüber informieren. Dieser kann dann entscheiden, ob es sich dabei um ein normales Verhalten handelt. Bei solchen Langzeitversuchen ist eine laufende Überwachung notwendig, um nicht vermeidbare Störungen dokumentieren zu können.

#### **2.1.1. Messung der Kantenverformung**

Das System "Tür und Türstock" trifft an den Kanten der Tür aufeinander. Hier sind auch die notwendigen Dichtungen angebracht. Diese haben nur einen kleinen Bereich, in dem sie Deformationen ausgleichen können. Die Funktionstüchtigkeit dieses Systems entscheidet sich aber genau an diesem sensiblen Bereich.

Die Belastung eines Türblattes mit Differenzklima bewirkt eine Verbiegung, die an den Kanten des Türblattes gemessen wird. Die Messuhren messen Abweichungen senkrecht auf das Türblatt, und damit die Verbiegung des Türblattes in Relation zum Rahmen. Dazu ist an jedem Mittelpunkt der Kanten eine Messstelle mit Messuhr eingerichtet, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die Messstellen sind

von der Kante des Türblattes um  $3 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$  eingerückt. Die Messstelle liefert während der Versuchsdauer elektronische Messdaten in Echtzeit. Die Eckpunkte der Tür werden dabei als unbewegliche Festpunkte betrachtet. Der Türrahmen übt in dieser Versuchsanordnung keinerlei Zwang auf das Türblatt aus und wird aus diesem Grund in die Messung nicht einbezogen.



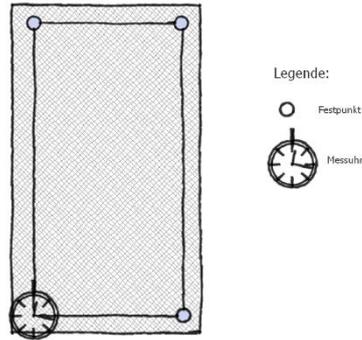
**Abbildung 1: Messanordnung für die Kantenverformung**

Die Verformung wird in Folge als Kettenlinie modelliert, die ihr Maximum in der Mitte der Kante hat. Treten an einer Kante eine konvexe und eine konkave Krümmung gleicher Größe auf und sind die Kurvenlängen auch gleich, so ist der Messwert in der Mitte der Kante verschwindend klein, obwohl die Deformationen erheblich sein können.

Punkte, die einen Zwang ausüben, sind in diesem Modell nicht berücksichtigt. Dies sind die Türbänder und diverse Arten von Zuhaltemechanismen. Für diese zahlreichen Möglichkeiten ist eine allgemeinere Modellierung notwendig. Das könnte über die Bestimmung der Oberflächendifferenz erreicht werden.

### 2.1.2. Messung der Verwindung

Die Verwindung gibt an, wie weit die vier Eckpunkte des Türblattes von einer Ebene abweichen. Wie in Abbildung 2 gezeigt, wird ein Gestell an drei Eckpunkten aufgelegt, das eine Ebene definiert und am vierten Eckpunkt wird mit einer Messuhr die Abweichung gemessen. Diese Abweichung wird in vier Durchgängen gemessen, wobei die Messuhren jeweils an einem anderen Eckpunkt angebracht werden.



**Abbildung 2: Messanordnung für die Bestimmung der Verwindung**

Die Daten werden gemittelt und repräsentieren die Abweichung von der Ebene. Diese Messungen sind stark korreliert, haben Redundanz, lassen aber noch einige Fragen offen.

- Existiert keine Verwindung wenn die Messuhren keine anzeigen?

Denkbar sind alle symmetrischen Fälle, bei denen die Kantenverformungen links und rechts gleich sind. Sie würden keine Verwindung ergeben, obwohl die gesamte Oberfläche deformiert ist.

- Ist die Verwindung alleine ein Maß für die Qualität einer Tür?

Wenn man aus einem Paraboloid symmetrisch ein Rechteck schneidet, kann man darauf mit dieser Methode, die Verwindung mit Null bestimmen. Das zeigt, dass diese Verwindung kein notwendiges Maß, sehr wohl aber ein hinreichendes Maß (im Sinne von "ist vorhanden" oder "ist nicht vorhanden") für die Ebenheit einer Tür darstellt. Wird mit dieser Methode eine Verwindung gemessen, so ist die Tür sicher verzogen.

Das bedeutet aber auch, dass die gesamte Türe auf vier Eckpunkte reduziert wird, und dass potentielle Schwachstellen wie z.B. eine Schlossaussparung in dieser Messung nicht berücksichtigt werden. Man geht also wieder von einem stark vereinfachten Modell aus. Die Vorgänge, die in einer Tür bei Belastung auf Differenzklima auftreten, kann man mit einer Oberflächendifferenz aus mehreren Epochen gut darstellen.

## 2.2. Photogrammetrischer Lösungsansatz

Während in der oben dargestellten Messanordnung die Messuhren das Türblatt berühren und die Messung an diskreten Punkten erfolgt, ist der photogrammetrische Lösungsansatz flächenhaft und berührungslos.

In der Photogrammetrie wird zwischen einem Objekt und seinem Bild eine geometrische Beziehung geschaffen. Diese Beziehung ist die Zentralprojektion, sie ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Parameter, die die Eigenschaften der Kamera repräsentieren, werden innere Orientierung genannt.

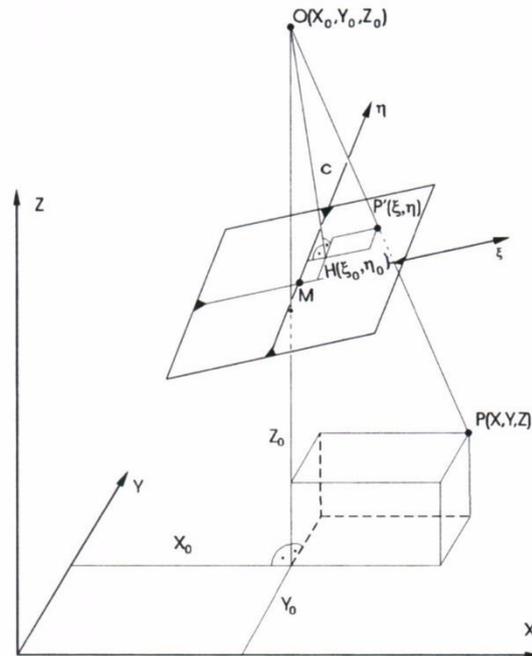


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten (KRAUS, 2004)

Die innere Orientierung beschreibt das bildseitige Projektionszentrum. Das sind die Bildkoordinaten des Hauptpunktes  $\xi_0, \eta_0$  und die Kamerakonstante  $c$ .

Die äußere Orientierung beschreibt das objektseitige Projektionszentrum mit den Koordinaten des Aufnahmeortes  $X_0, Y_0, Z_0$  und die Aufnahmerichtung  $\omega, \varphi, \kappa$ .

Die äußere Orientierung variiert in der Regel bei jeder Aufnahme und ist daher eine Unbekannte, während die innere Orientierung kameraspezifisch - und aufgrund einer Kalibrierung bekannt ist.

Ein fotografisches Bild erfüllt eine solche mathematische Beziehung mittels der Kollinearitätsgleichung:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

#### Gleichung 2.2-1

$X, Y, Z$	Objektkoordinaten
$X_0, Y_0, Z_0$	Aufnahmeort O
$\xi_0, \eta_0$	Bildkoordinaten des Hauptpunktes
$c$	Kamerakonstante
$r_{11}, \dots, r_{33}$	Elemente der räumlichen Drehmatrix

Die Gleichungen besagen, dass zu jedem Objektpunkt ein Bildpunkt gehört (KRAUS, 2004). Ein Bild alleine genügt zur photogrammetrischen Auswertung nicht - es muss jeder Punkt auf mindestens zwei Bildern dargestellt sein.

Die Auswertung gestaltet sich besonders einfach, wenn die beiden Aufnahmegerichtungen normal zur Basis B stehen und zueinander parallel sind. Dann spricht man vom Normalfall der Zweibildauswertung, den man in Abbildung 4 sehen kann.

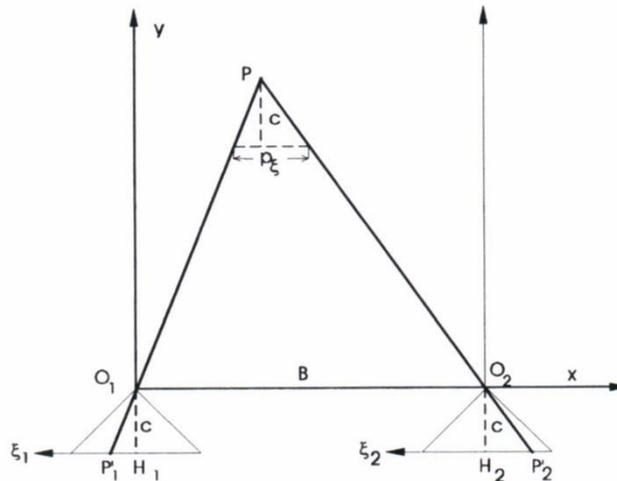


Abbildung 4: Terrestrischer Normalfall (KRAUS, 2004)

Die Abschätzung der Genauigkeit in Kapitel 3.8 erfolgte aufgrund der Fehlertheorie des Normalfalls.

Diese Aufnahmesituation ist ein sehr starres Instrumentarium, bei dem viele Vorgaben erfüllt sein müssen. Einfacher sind die Aufnahmen für einen konvergenten Bildverband. Dabei ist das Objekt aus verschiedenen Richtungen so aufzunehmen, dass jeder Punkt wenn möglich auf drei Bildern vorhanden ist, wie man in Abbildung 5 erkennen kann.

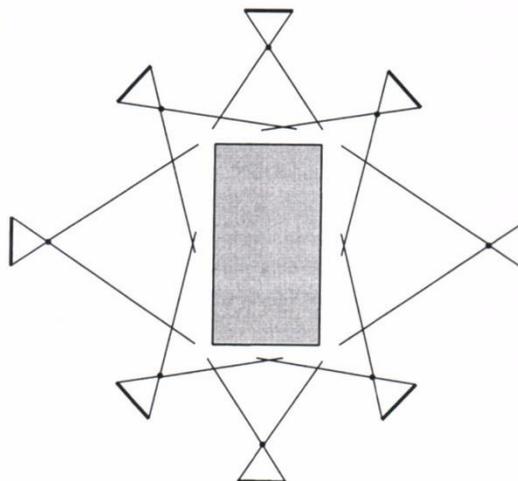
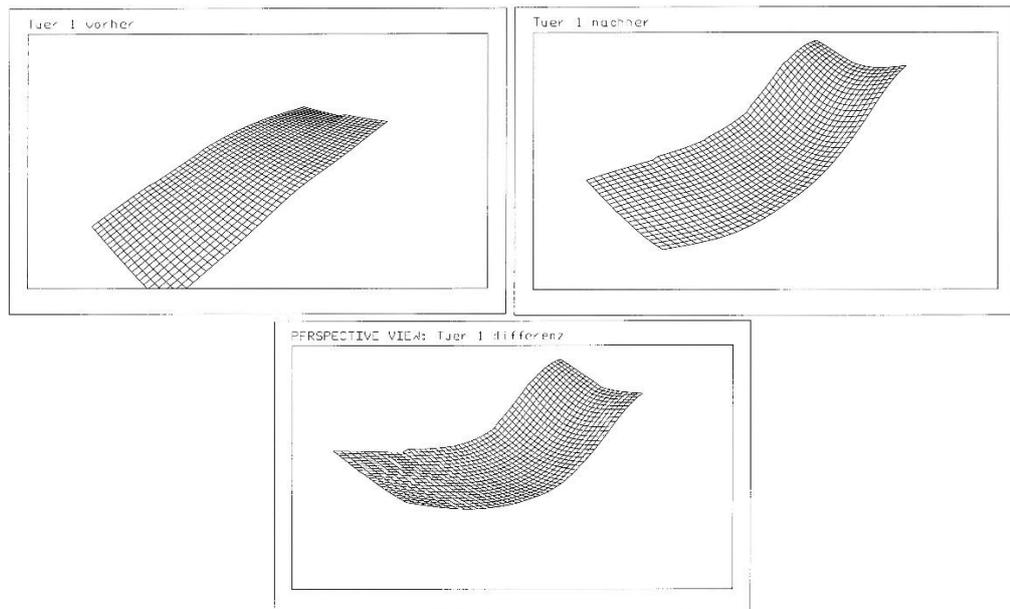


Abbildung 5: Allgemeine Anordnung eines Bildverbandes (KRAUS, 2004)

Konvergente Aufnahmen ermöglichen so eine gute Schnittbedingung zwischen den Strahlen der Bilder. Sie erzeugen einen Block, der durch eine Bündelblockausgleichung die jeweils gesuchten Objektpunkte liefert. Aus den Koordinaten der Objektpunkte interpoliert man eine homogene Fläche, das Oberflächenmodell. Solche Modelle sind für jede Epoche gesondert zu erstellen. Sie sind die Grundlage für das Differenzmodell, bei dem aus zwei Epochen die Verformung gerechnet wird. Die Abbildung 6 zeigt eine Variante einer graphischen Darstellung von Oberflächenmodellen. Es sind dort die Oberflächenmodelle für die Zeitpunkte „Vorher“ und „Nachher“ und ihr Differenzmodell zu sehen.



**Abbildung 6: Dreidimensionale Darstellungen von Geländemodellen**

Aus den Oberflächenmodellen können verschiedene graphische Produkte berechnet werden, wie Schnitte, 3D-Ansichten oder Höhenschichtenlinien. Diese graphischen Ausgaben sollen dem Nutzer als Entscheidungsgrundlage dienen und stellen das Ende des photogrammetrischen Prozesses dar.

### 3. Photogrammetrische Vorarbeiten

Im folgenden Kapitel werden die Arbeiten vorgestellt, die für eine photogrammetrische Auswertung durchzuführen sind. Zuerst wird das aufzunehmende Objekt beschrieben und danach die Kameras. Eine ausführliche Aufnahmeplanung ist genauso wichtig wie die a priori Genauigkeitsabschätzung. Danach wird auf das Problem der Signalisierung und der Erstellung der Signale eingegangen.

#### 3.1. Objekt

Anstelle einer Laubengangtüre wurde eine Ausstellungstafel verwendet, die in Abbildung 7 zu sehen ist. Diese konnte so adaptiert werden, dass eine zuverlässige Verformung in der entsprechenden Größenordnung erzielt werden konnte. Die in diesem Versuch vermessene Ausstellungstafel besteht aus einem hölzernen Rahmen mit einer Mittelstrebe und beidseitig aufgeleimten Hartfaserplatten. Die Objektgröße ist 1,0 x 2,5 x 0,1 m. Damit man eine Verformung darstellen kann, wurde in die Rückwand ein Loch gesägt und ein entsprechender Keil angefertigt. Der Keil soll die beiden Hartfaserplatten um einige Zentimeter auseinander drücken und so eine Verformung an der Vorderseite erwirken. Nachdem die Ausstellungstafel eine Mittelstrebe besitzt, ist die Verformung nur an der oberen Hälfte zu erwarten. Die Ebenheit war schon vor der Deformation nicht besonders hoch. Die vordere Hartfaserplatte hatte sich in der Mitte der beiden Felder bereits aufgewölbt. Dieser Zustand wurde als stabil über den Versuchszeitraum angesehen.



Abbildung 7: Ausstellungstafel als Ersatz für eine Tür

## 3.2. Verwendete Kameras

Es wurden zwei verschiedene Kameras des IPF für diese Arbeit verwendet:

- 1.) die analoge Messbildkamera Leica P31
- 2.) die digitale Amateurkamera Kodak DCS 460

### 3.2.1. Analoge Messbildkamera Leica P31

Die analoge Messbildkamera Leica P31 ist eine mit Filmplatten betriebene Kamera, deren nutzbares Bildformat 84 x 117 mm beträgt. Die Rahmenmarken sind durch Kreuze im Bild dargestellt. Vier Kreuze befinden sich am Rand des Bildes und eines, um 19 mm exzentrisch versetzt im Bild. Dieses asymmetrische Bildformat mit einer Hauptpunktversetzung hat unterschiedliche Bildwinkel, die je nach Anwendungszweck horizontal oder vertikal genutzt werden können (KRAUS, 1990).

Das Objektiv hat eine Kamerakonstante  $c$  von 99,13 mm, ist farbkorrigiert und hat eine Verzeichnung, die kleiner als  $4 \mu\text{m}$  ist. Mit Hilfe von Zwischenringen ist die Fokussierung herzustellen. Dies bewirkt eine Verlängerung der Kamerakonstante um 3,68 mm. In Abbildung 8 ist am rechten Bildrand die einbelichtete Kamerakonstante und der Betrag der Verlängerung zu erkennen.

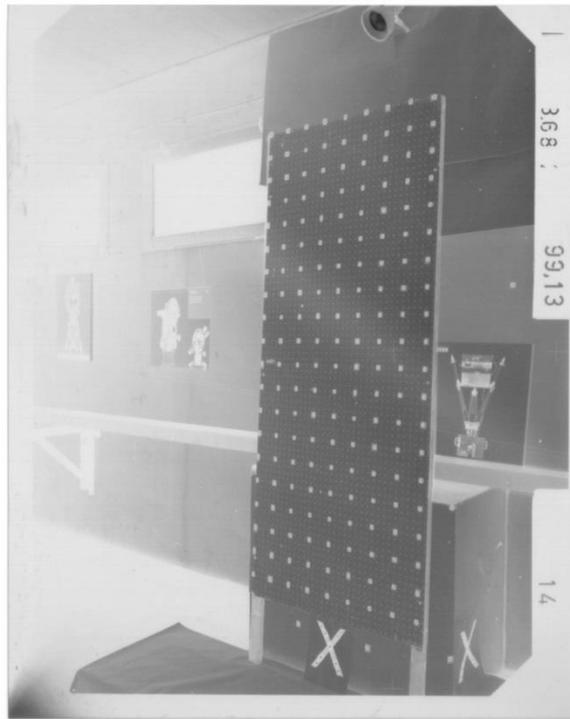


Abbildung 8: Filmnegativ der analogen Messbildkamera P31

Die Kamera wurde auf einem Stativ aufgebaut, wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Als Blitzgerät kam ein Ringblitz zur Anwendung, der konzentrisch am Objektiv angebracht ist und eine gleichmäßige Ausleuchtung nahe der optischen Achse ermöglicht. Das ist notwendig, da die Zielmarken nur einen kleinen Winkel haben, in dem sie retroreflektierend sind.

In Abbildung 9 ist die Versuchsanordnung und die analoge Messbildkamera zu erkennen.

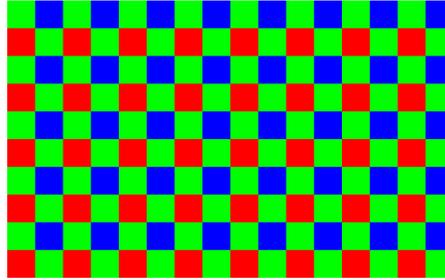


**Abbildung 9: Aufnahmesituation P31**

Die Bildnummern sind bei dieser Kamera händisch einzustellen. Dies wurde nicht durchgeführt. Nach dem Entwickeln der Bilder wurde dieser Fehler erkannt. Bei der neuerlichen Aufnahmen Serie wurden die Bildnummern genau eingestellt. Zusätzlich wurde eine Markierung zum Objekt gestellt, damit man auch im Bild den belasteten vom unbelasteten Fall unterscheiden kann. In Abbildung 8 ist das als weißes X zu erkennen und bezeichnet den deformierten Fall.

### **3.2.2. Amateurkamera Kodak DCS 460**

Diese Kamera besitzt einen CCD-Chip mit 3060 x 2036 Pixel (EASTMAN KODAK COMPANY, 1997). Die quadratischen Pixel sind farblich nach dem Konzept der Bayer-Matrix angeordnet. Das menschliche Auge erfasst die Farbinformationen nicht gleichmäßig über das Spektrum verteilt. 72% der Helligkeits- und Kontrastinformation von Grautönen werden durch das grüne Licht vermittelt, 21% dieser Informationen durch das blaue Licht und nur 7% durch das rote Licht (BAYER & BRYCE, 1975). Die Bayer-Matrix ist ein Farbfilter der 50% Grün- und je 25% Blau- und Rot Anteile besitzt, wie in Abbildung 10 zu sehen ist.



**Abbildung 10: Bayer-Matrix**

Es wurde nur mit einem Grauwertbild weitergearbeitet, dazu wurde der Grünauszug verwendet. Das Foto in Abbildung 11 zeigt deutlich die hellen Bereiche der Zielmarken, der Rest des Bildes wäre für die manuelle Auswertung zu dunkel.



**Abbildung 11: Histogramm DCS original und mit veränderter Tonwertverteilung**

Für die automatische Bestimmung des Grauwertgradienten ist diese Verteilung des Originalbildes aber kein Problem. Für manuelle Bearbeitungen und Visualisierungen kann die Tonwertverteilung der Aufgabenstellung angepasst werden.

Es standen die Objektive mit 15 mm und 55 mm zur Auswahl. Da das 15 mm Objektiv größere Verzeichnungen aufwies, wurde das 55 mm Objektiv verwendet. Die Fokussierung wurde auf einen mittleren Wert eingestellt und fixiert, womit die Kamerageometrie für alle Aufnahmen unverändert blieb. Auch bei dieser Kamera wurde ein symmetrisches Blitzgerät nahe der optischen Achse verwendet, wie in Abbildung 12 zu sehen ist.

Um das bei dieser Kamera bekannte Problem des lockeren Bildsensors zu beseitigen, wurde ein fahrbares Stativ verwendet. So konnte die Kamera während des gesamten Zeitraums in der gleichen Position verharren. Der Chip blieb dadurch in der gleichen Lage. Da dieses Problem unregelmäßig auftrat, war dieser Aufwand notwendig.

Um den Aufnahmeort bei allen Messungen konstant zu halten, wurde eine Markierung am Fußboden mit Kreide anbracht, die in Abbildung 12 zu sehen ist.



Abbildung 12: Die Kodak DCS 460 wird für die Aufnahme vorbereitet

### 3.3. Berechnung der Aufnahmeentfernung

Die Abbildung einer Senkrechtaufnahme kann mit dem Strahlensatz berechnet werden. Nach dem Abbildungsverhältnis (siehe Gleichung 3.3-1) kann die Aufnahmeentfernung  $E$  aus der Bildgröße  $s$ , der Objektgröße  $S$  und der Kammerkonstante  $c$  berechnet werden. Abbildung 13 zeigt die Parameter im Kameraraum ( $c$ ,  $s$ ) und im Objektraum ( $E$ ,  $S$ ).

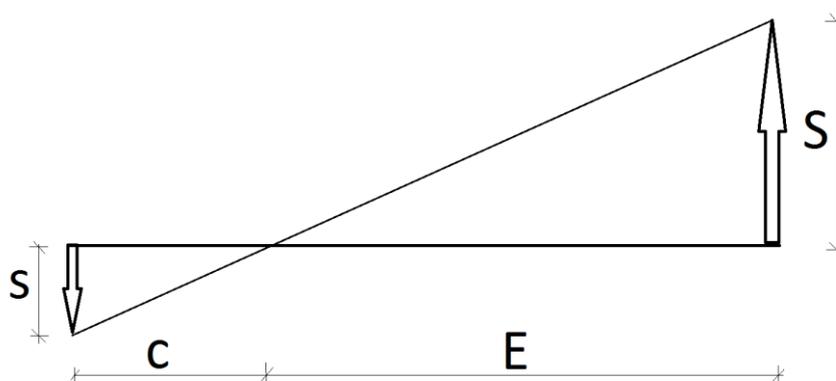


Abbildung 13: Verhältnis der fotografischen Abbildung

$$m_B = \frac{S}{s} = \frac{E}{c}$$

Gleichung 3.3-1

DCS: Um ein ca. 2,5 m großes Objekt mit einem Objektiv mit 55 mm Brennweite aufnehmen zu können, muss die Gegenstandsweite mindestens 5 m sein.

P31: Bei demselben Objekt muss die Gegenstandsweite mindestens 2,2 m betragen, um das Objektiv mit 100 mm Brennweite verwenden zu können. Da diese Kamera eine fixe Fokussierung hat, wurde der Zwischenring für die nächstgelegene Aufnahmeentfernung (2,5 m) gewählt (vgl. Tabelle 2). Die Aufnahmeentfernung wurde an den vorhandenen Zwischenring angepasst.

Kamera	Nutzbare Bildformat	Brennweite	Aufnahmeentfernung /Fokussierung	Pixelgröße
P31	83 x 117 mm	100 mm	2,5 m fix	15 $\mu$ m (Scanner)
DCS	3060 x 2036 Pixel	55 mm	ca. 5 m	9 $\mu$ m

**Tabelle 2: Vergleich der Kameradaten**

### 3.4. Bildgröße und Bildmaßstab

Der Bildmaßstab gibt an, in welchem Verhältnis der Gegenstand zu seinem Bild steht. Bei besonders tiefen Objekten oder bei starken Schrägaufnahmen kann es zu stark unterschiedlichen Bildmaßstäben kommen. Der Bildmaßstab hat einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit des Modells. Zur Berechnung verwendet man in Gleichung 3.3-1 das Verhältnis von Aufnahmeentfernung  $E$  zu Kammerkonstante  $c$ .

Es wurde versucht, bei beiden Kameras das Bildformat auszunützen. Wie Tabelle 3 zeigt, hat das zur Folge, dass die Bildmaßstabszahl bei der analogen Messbildkamera um den Faktor 4 größer als bei der Amateurlinienkamera ist.

Kamera	Bildmaßstab	Bildgröße des Objektes	Aufnahmeentfernung
P31	1:25	100 mm	2,5 m
DCS 460	1:90	28 mm	5 m

**Tabelle 3: Vergleich der Bildmaßstäbe**

### 3.5. Signalgröße im Bild

Um die Messmarken automatisch messen zu können, müssen sie Mindestgrößen aufweisen. Mit Hilfe des Bildmaßstabes kann man auch die Größe des Pixels im Objektraum bestimmen. Der Bildmaßstab ist das Verhältnis einer Strecke im Bild  $s$  zu seiner Länge  $S$  im Objektraum, bei Senkrechtaufnahmen.

Der entwickelte Film der analogen Messbildkamera wurde mit einer Auflösung von 15 µm gescannt. Die Pixelgröße der Amateurkamera wurde vom Hersteller mit 9 µm angegeben.

Das ergibt mit Hilfe des Bildmaßstabes aus Gleichung 3.3-1 eine Pixelgröße von 0,38 mm (P31) bzw. 0,81 mm (DCS) im Objektraum. Da die Messmarken einen Durchmesser von 2,5 mm haben (siehe 3.9), ergeben sich daraus die in Tabelle 4 angegebenen Pixel-Anzahlen im Bild. Mit einer Überstrahlung der Messmarken im vorderen Objektraum ist wegen des Blitzlichtes zu rechnen.

Kamera	Pixelgröße am Objekt [mm]	Durchmesser einer Signalmarke
P31	0,38	bis zu 7 Pixel
DCS 460	0,81	bis zu 3 Pixel

Tabelle 4: Vergleich der Signalgröße im Bild

### 3.6. Tiefenschärfe

Bei der fotografischen Abbildung wird ein Gegenstand im Idealfall in der Bildebene scharf abgebildet. Gegenstandsweite und Bildweite sind bei dieser Abbildung konstant. Das entspricht aber nicht der Realität. Die Objekte haben eine Ausdehnung im Gegenstandsraum und befinden sich nicht genau in der Gegenstandsweite, sie werden daher nicht scharf abgebildet. Gesucht sind jene Entfernungen, die für diese Abbildung eine vorgegebene Unschärfe  $u$  nicht übersteigen. Diese Gegenstandsweiten sind die Vordertiefe  $g_v$  und Hintertiefe  $g_h$  (KRAUS, 1990):

$$g_v = \frac{gf^2}{f^2 + \frac{f}{d}u(g-f)}$$

Gleichung 3.6-1

$$g_h = \frac{gf^2}{f^2 - \frac{f}{d}u(g-f)}$$

Gleichung 3.6-2

Um eine scharfe Abbildung im digitalen Bild zu erhalten, soll die Unschärfe die Dimension eines Pixels nicht übersteigen. Die Größe des gescannten Pixels ist 15 µm und das der Digitalkamera 9 µm. Bei einer Tiefenschärfe von 15 µm und Blende 22 ergibt das eine Schärfentiefe von 2,32 m – 2,72 m für die analoge Messbildkamera.

Die Digitalkamera erreicht für eine Tiefenschärfe von 9 µm und Blende 32 eine Schärfentiefe von 3,39 m – 9,54 m mit dem 55 mm Objektiv. Der Bereich, in dem

die Abbildungsunschärfe kleiner als die Auflösung der Kamera ist, wird in Abbildung 14 dargestellt. Dies gilt wenn die Fokussierung auf 5 m fixiert wird.

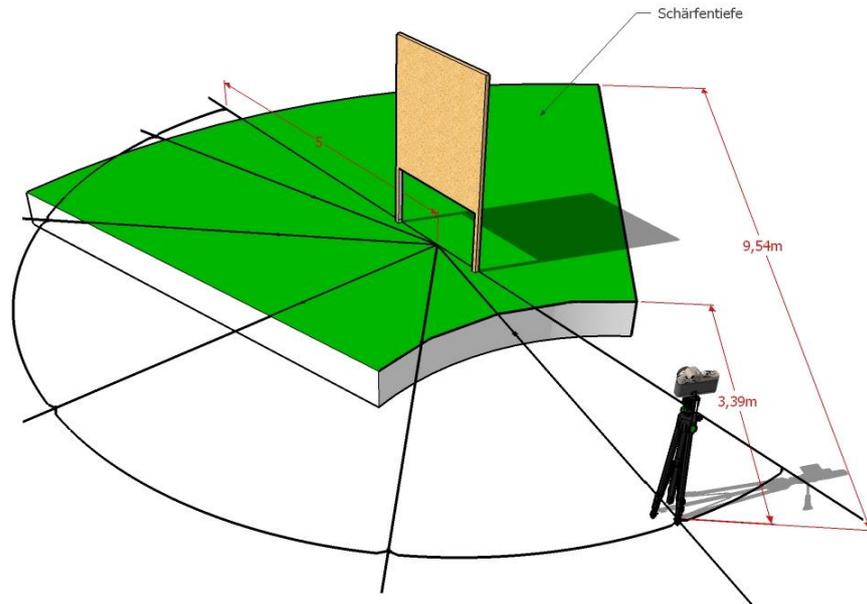


Abbildung 14 Schärfentiefe für die Digitalkamera

### 3.7. Versuchsaufbau

Um das digitale photogrammetrische Verfahren zu testen, wurde im Messkeller der Technischen Universität Wien ein Versuch aufgebaut. Für konvergente Aufnahmen wurden zu einer Senkrechtaufnahme noch Schrägaufnahmen unter  $45^\circ$  und  $75^\circ$  erstellt. Die retroreflektierende Folie der Zielmarken hat Grenzen im Reflexionsvermögen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (BALLIK, 1989). Daher wurde  $75^\circ$  als maximale Verschwenkung aus der Normalen gewählt. Abbildung 15 zeigt die fünf konvergenten Kamerarichtungen für beide Kameras.

Um digitale Verfahren und Auswerteverfahren vergleichen zu können, wurden aus denselben Richtungen Aufnahmen mit einer analogen Messbildkamera gemacht. Um die Bildgröße auszunutzen zu können, ist für jede Kamera eine unterschiedliche Aufnahmeentfernung notwendig gewesen. Die erste Epoche bestand daher aus den fünf Dateien der Digitalkamera und den fünf Filmplatten der analogen Messbildkamera. Diese Epoche stellt den unbelasteten Fall dar und wird in den Protokollen mit NONDEF bezeichnet. Danach erfolgte die Deformation und die Aufnahme der zweiten Epoche an den gleichen Standpunkten wie zuvor. Die Bezeichnung dieser Epoche ist DEF.

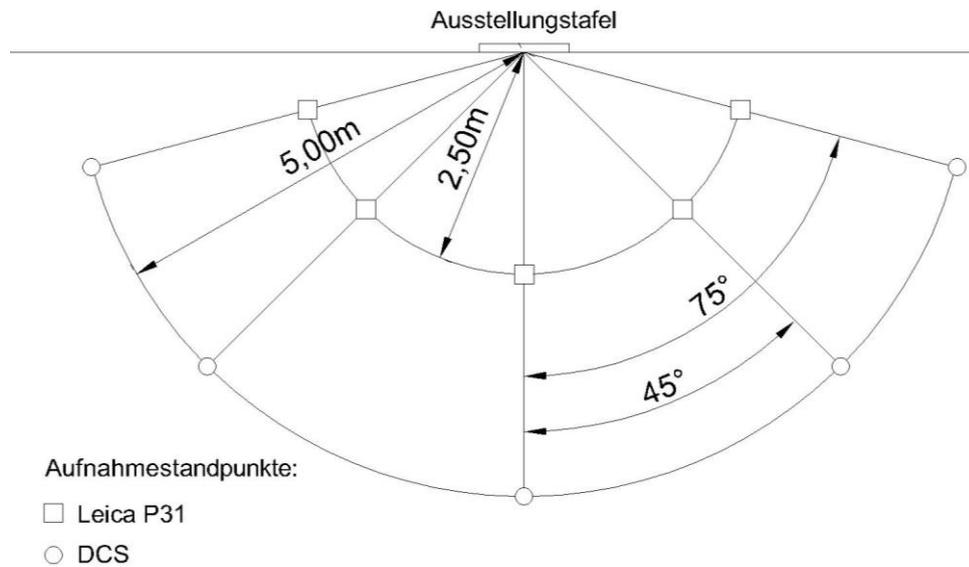


Abbildung 15: Anordnung der Aufnahmeorte

### 3.8. A priori Genauigkeitsabschätzungen

Zur Genauigkeitsabschätzung musste die Identifikationsgenauigkeit der signalisierten Punkte abgeschätzt werden. Bei signalisierten Punkten und einer guten räumlichen Verteilung der Aufnahmen kann von einer gesicherten Messgenauigkeit von  $\sigma_{Bild} = \frac{1}{4}$  Pixel ausgegangen werden (KRAUS, 1996). Für den Normalfall der Zweibildauswertung kann die Genauigkeit im Voraus mit Gleichung 3.8-1 und Gleichung 3.8-2 berechnet werden (KRAUS, 2004).

$$\sigma_{Lage} = m_b \sigma_{Bild}$$

Gleichung 3.8-1

$$\sigma_{Tiefe} = \frac{E}{B} m_b \sigma_{Bild}$$

Gleichung 3.8-2

Mit der Pixelgröße am Objekt aus Tabelle 4, ergibt das im Objektraum eine Lagegenauigkeit von 0,09 mm (P31) oder 0,21 mm (DCS). Die Konfiguration der Aufnahmen wurde so gewählt, dass keine schleifenden Schnitte entstehen. Die Schnittwinkel haben einen Sinus der größer als 0,5 ist.

Kamera	$\sigma_{\text{Lage}}$
P31	0,09 mm
DCS	0,21 mm

**Tabelle 5: Zu erwartende Genauigkeiten der Punktauswertung in der Lage**

Für die Berechnung der Tiefengenauigkeit wurde die Basis B mit 2 m (P31) und 4 m (DCS) angenommen. Unter Berücksichtigung des Bildmaßstabes und der Aufnahmeentfernung wurde die Genauigkeit der Tiefe mit Gleichung 3.8-2 berechnet, die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Kamera	$\sigma_{\text{Tiefe}}$
P31	0,12 mm
DCS	0,25 mm

**Tabelle 6: Zu erwartende Höhengenaugigkeit**

Diese Genauigkeitsangaben gelten für den Normalfall der Zweibildauswertung. Da es sich bei der Aufnahmesituation um mehrere konvergente Bilder handelt, ist eine höhere Genauigkeit zu erwarten.

Die Punktauswertung würde gerade den geforderten Genauigkeiten entsprechen. Da aber danach noch eine regelmäßige geglättete Fläche zur Darstellung der Differenzen bestimmt wird, ist mit einer Genauigkeitssteigerung zu rechnen.

### 3.9. Signalisierung

Die Signalisierung wurde punktweise gewählt, um die höchstmögliche Genauigkeit zu erlangen. Damit die automatische Punktmessung mit dem Programm CENTROID erfolgen kann, wurden runde Zielmarken mit einer retroreflektierenden Folie verwendet. Die Punktgröße wurde mit 2,5 mm Durchmesser gewählt, die im Bild mindestens drei Pixel ergeben.

Bei Senkrechtaufnahmen bildet das Signal einen Kreis ab. Je stärker die Abweichung von der Normalen ist, desto stärker ist die Verformung des Kreises zu einer Ellipse im Bild. Der Unterschied des Ellipsenmittelpunktes und des Kreismittelpunktes ist die Exzentrizität. Wie in (OTEPKA, 2005) beschrieben, soll der Durchmesser einer Messmarke sieben Pixel nicht übersteigen um den Fehler der Exzentrizität vernachlässigbar klein zu halten.

Ein Signal in unterschiedlichen Auflösungen ist exemplarisch in Abbildung 16 dargestellt.

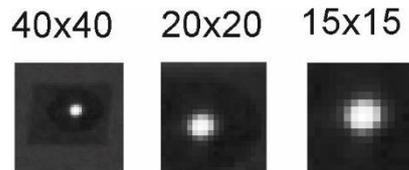


Abbildung 16: Klebmarken in unterschiedlichen Auflösungen

Die Klebmarken wurden in einem regelmäßigen Raster von 10 cm aufgebracht. Dies erleichterte die Bestimmung der Näherungskoodinaten im Modellraum von ORIENT. Zur Festlegung des Maßstabes im Bündelblockausgleich wurden Passstrecken zwischen sechs Punkten gemessen, siehe Kapitel 4.2.

### 3.9.1. Herstellung von Klebmarken

Um die Signale für den Einsatz im Österreichischen Holzforschungsinstitut vorzubereiten, müssen sie einige besondere Eigenschaften besitzen:

- Die Größe soll so beschaffen sein, dass ausreichend Pixel im Bild davon betroffen sind um sie automatisch zu erkennen.
- Die Messmarken sollen schnell anzubringen sein.
- Damit die Klebmarken wieder verwendbar sind, wurde ein geeigneter Träger gesucht. Er sollte so beschaffen sein, dass auf der Rückseite die Befestigung am Objekt sichergestellt ist und auf der Vorderseite die Reflexionsfolie samt Passepartout aufgebracht werden kann. Weiters sollte das Trägermaterial thermisch belastbar und hydrophob sein, um den Belastungen in der Klimakammer standzuhalten. Das kostengünstigste Material, das diese Eigenschaften erfüllt, war ein altes, großformatiges Filmnegativ. Die konstante Dicke war ein weiteres Merkmal, welches für dieses Trägermaterial sprach.

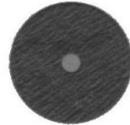
Um die notwendigen Klebmarken zu erhalten, wurde folgender Aufbau aus (BALLIK, 1989) übernommen:

Auf der Vorderseite wurde ein kleines Stück der retroreflektierenden Folie „High Grain Grade (7610)“ der Firma M3 zentrisch aufgeklebt. Darüber wurde dann ein Passepartout mit einer Öffnung in der Größe der gewünschten Zielmarke angebracht.

Um die Signale an der Tür anbringen zu können, wurden im Anschluss die Filmstücke mit doppelseitigem Klebeband versehen. Die Schwachstelle dieser Konstruktion ist die Materialstärke des Passepartouts. Dadurch waren extreme Schrägaufnahmen nicht möglich, da das Passepartout das Loch abschattete. Es nahm auch der Reflexionsgrad der Folie mit zunehmender Verschwenkung aus der Normalen ab.

In (BALLIK, 1989) wurde auch der Reflexionsgrad in Abhängigkeit vom Einfallswinkel untersucht. Nachdem in der Versuchsanordnung nur Aufnahmen mit maximal  $75^\circ$  Verschwenkung geplant waren, entsprach das der obengenannten Studie.

Die in Abbildung 17 dargestellte Klebmarke entspricht den oben angeführten Beschreibungen und wurde in einer Anzahl von 250 Stück handgefertigt.



**Abbildung 17: Klebmarke aus eigener Produktion**

## **4. Koordinatensysteme**

In der Photogrammetrie ist es üblich, unterschiedliche Koordinatensysteme zu verwenden. Dabei werden ebene Koordinatensysteme für Bilder verwendet und zur Darstellung des Objektraumes dreidimensionale, kartesische Koordinaten. Der Ursprung kann rein technisch definiert sein, wie beim digitalen Bild, oder einen geometrischen Zusammenhang haben, wie beim analogen Messbild. Koordinatensysteme können linksdrehend sein, man spricht dann von einem "Rechtssystem". In der Vermessung bevorzugt man den natürlichen Drehsinn, der aufgrund des Uhrzeigersinns jedem bekannt ist. Solche Koordinatensysteme können mit drei Fingern der linken Hand dargestellt werden; sie werden auch als "Linkssystem" bezeichnet. In der Photogrammetrie werden häufig Rechtssysteme verwendet.

### **4.1. Bildkoordinatensystem**

Bilder werden mittels ebener Koordinatensysteme dargestellt. Zu unterscheiden sind – je nach Form der Darstellung – analoge und digitale Bilder. Dabei gibt es eine wesentliche Unterscheidung hinsichtlich der Lage des Koordinatensystems. Während digitale Messbilder aus gleichmäßigen Bildpunkten bestehen, deren Mittelpunkt die Koordinaten des jeweiligen Bildpunktes bestimmt, müssen die Koordinaten des analog erzeugten und nachträglich digitalisierten – d.h. gescannten – Bildes mittels Rahmenmarken festgelegt werden. Die beiden Verfahren der Erstellung von Koordinatensystemen von digitalen und analogen Bildern werden im Folgenden dargestellt.

#### **4.1.1. Digitales Bild**

Ein digitales Bild besteht aus einer Matrix von  $n \times m$  Bildpunkten (Pixel). Dabei werden die Zeilen und Spalten von links oben zu zählen begonnen ( $i=1, j=1$ ). Der Mittelpunkt jedes Bildpunktes repräsentiert die Bildkoordinaten des gesamten Bildpunktes. Bildpunkte haben alle dieselbe Größe. Die Zeilen  $i$  und Spalten  $j$

ergeben aufgrund der Größe der Pixel die kartesischen Bildkoordinaten  $(x,-y)$ . Es handelt sich dabei um ein Rechtssystem, wie aus Abbildung 18 ersichtlich ist (KAGER, et al., 2002).

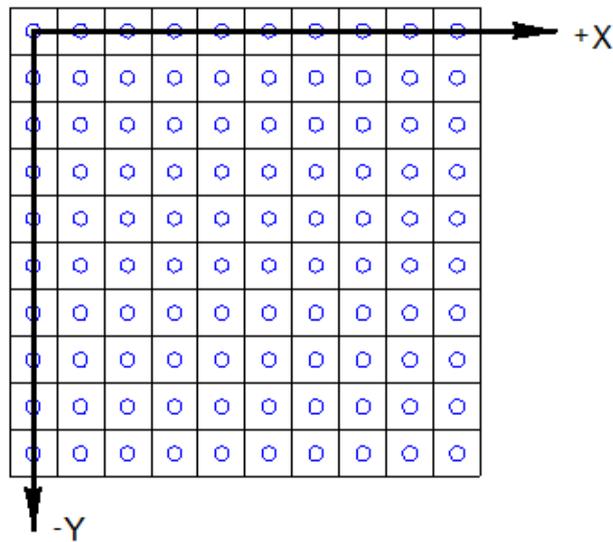


Abbildung 18: Koordinatensystem eines digitalen Bildes

### 4.1.2. Gescanntes Analogbild

Ein konventionell erzeugtes Messbild weist an den Rändern Rahmenmarken auf. Ihre Lage wird durch Kalibrierung in einem Labor festgestellt und liegt in Form eines Protokolls auf. Die kalibrierten Rahmenmarken sind die Grundlage für das Bildkoordinatensystem, in dem die Parameter der inneren Orientierung bestimmt wurden. Die Koordinaten  $(x,y)$  eines Punktes in diesem System heißen Bildkoordinaten.

Um diese Bilder in eine digitale Form zu bringen, bedarf es eines geeigneten Scanners, dessen Abbildungsfehler klein sind. Bei abgetasteten Bildern wird auch in der digitalen Photogrammetrie der Zusammenhang zwischen Abtast- und Bildkoordinaten mit Hilfe der Rahmenmarken hergestellt. Der Zusammenhang wird mit einer Affintransformation beschrieben:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_3 & a_5 \\ a_4 & a_6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$$

Gleichung 4.1.2-1

- $(i,j)$  Abtastkoordinaten eines Bildelements
- $(x,y)$  Bildkoordinaten
- $a_k$  Parameter der Affintransformation
- $\Delta x; \Delta y$  ev. Korrekturglieder für Abtastfehler, Abbildungsfehler, etc.

Eine Affintransformation ist in diesem Zusammenhang einer Ähnlichkeitstransformation vorzuziehen, da sie besser die systematischen Fehler der Abtastung berücksichtigt. Die größten Fehler sind die Drifterscheinung aufgrund von Temperatureinflüssen und die nicht berücksichtigten Unterschiede der Digitalisierungsintervalle (FABIANKOWITSCH, 1990).

### 4.1.3. Bildpyramiden

Eine Bildpyramide besteht aus ein und demselben Bild in unterschiedlichen Skalierungen (KRAUS 1990, KROPATSCH 1991). Das Original des Bildes ist die Basis der Bildpyramide. Sie stellt die Ebene 0 dar. Jede höhere Ebene wird durch Skalierung der vorhergehenden gewonnen. Dazu eignet sich eine Tiefpassfilterung am besten. Hat die dazu nötige Gewichtsfunktion eine Verteilungsfunktion nach Gauß, so spricht man von einer Gauß-Pyramide. In der Photogrammetrie werden Gauß-Pyramiden gerne verwendet. Diese Filterung reduziert den Rauschanteil in den höheren Pyramidenniveaus (ACKERMANN 1991).

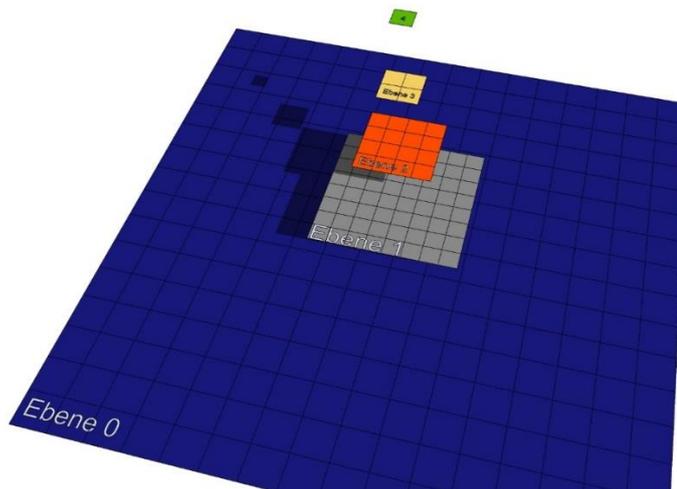


Abbildung 19: Bildpyramiden

Der Flächenreduktionsfaktor einer Bildpyramide gibt an, wie das Verhältnis der Anzahl der Pixel im Ausgangsniveau zu dem des Folgebildes ist. Es wird fast ausschließlich ein Flächenreduktionsfaktor von 4 verwendet, was einer Skalierung von 0,5 in horizontaler und vertikaler Richtung entspricht. Vier Pixel des Ausgangsbildes ergeben daher ein Pixel des Folgeniveaus, wie in Abbildung 19 zu sehen ist. Der Speicherplatzbedarf folgt einer geometrischen Reihe und nimmt maximal um ein Drittel des Originalbildes zu (KRAUS, 1990).

ORPHEUS verwendet Bildpyramiden um einerseits durch Subvarianten des Bildes eine schnellere Darstellung zu ermöglichen und andererseits Prozesse in verschiedenen Pyramidenebenen durchzuführen.

## 4.2. Objektkoordinatensystem

Das Objektkoordinatensystem wurde so gewählt, dass nicht nur die signalisierten Punkte, sondern das gesamte Objekt im positiven Bereich des Koordinatensystems liegt. Der Punkt 3011 bekam die Koordinaten (100,100,100). Als Längeneinheit wurden Millimeter gewählt, da die zu erwartenden Deformationen in Millimeter angegeben werden.

Es wurde ein Punktnummernsystem gewählt, bei dem die Punktnummern aus vier Ziffern (zzss) bestehen. Die ersten beiden Ziffern geben die Zeile zz an, die letzten beiden die Spalte ss. Da die Zeilen über den Wert 10 hinausgehen und ein einheitliches Bild des Nummernsystems als praktikabel erschien, war der erste Wert 11 (zz=11 bis 19; ss=11 bis 30).

Wie in Abbildung 20 erkennbar ist, wurden für die 180 Punkte die Punktnummern 1111 bis 3019 verwendet. Es wurden für eine eventuelle Kalibrierung noch Punkte außerhalb der Ebene signalisiert. Die in 4.3.1 verwendeten Datumspunkte wurden mit einem Symbol dargestellt. Die Z-Koordinatenachse verläuft aus dem Blatt heraus.

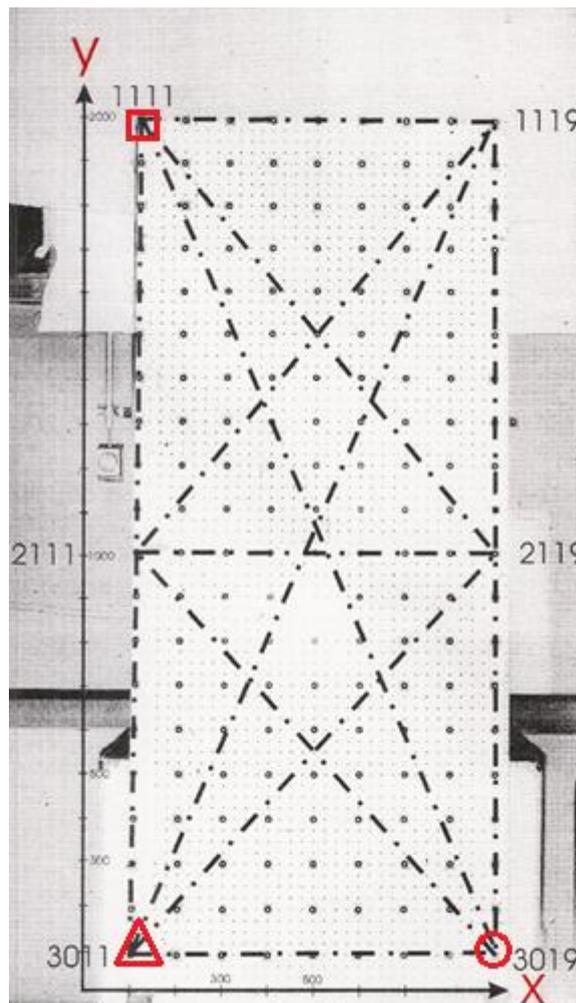


Abbildung 20: Objektkoordinatensystem und Passstrecken

Im Abstand von 100 mm wurden Klebmarken, wie in 3.9.1 beschrieben, angebracht. Für die Verwendung von Modell-Koordinaten in ORIENT eignet sich dieses System gut. Die Näherungskoordinaten sind leicht zu bestimmen und zu kontrollieren.

In Abbildung 20 sind die 13 gemessenen Passstrecken als strichpunktierte Linien eingezeichnet.

Diese Passstrecken wurden mit Hilfe von Maßbandmessungen bestimmt. Um keinen Nullpunktsfehler zu begehen, wurde die Ablesung des Maßbandes nicht an dessen Ende sondern an unterschiedlichen Stellen des Maßbandes durchgeführt. Damit der Fehler des Durchhanges vernachlässigbar klein blieb, erfolgte die Messung in einer horizontalen Position der Ausstellungstafel. Das Maßband wurde nicht nur aufgelegt, sondern auch mit der angegebenen Eichzugkraft gespannt. Damit sich das Maßband der Umgebungstemperatur - die nahe der Eichtemperatur lag - angleichen kann, ist vor dem Einsatz pro Grad Temperaturdifferenz eine Minute Wartezeit einzuplanen. Es wurde pauschal eine Wartezeit von 30 Minuten eingehalten. Die so durchgeführten Maßbandmessungen erfolgten mehrfach für jede Passstrecke wobei der Median als repräsentativer Wert herangezogen wurde.

### **4.3. Lagerung und Orientierung**

Die Wahl des Koordinatensystems hängt mit der Lagerung des Koordinatensystems zusammen. Lagerungen können starr sein und fixe Referenzpunkte schaffen oder nur soweit definiert sein, dass sie genauso viele Gleichungen liefern, wie Unbekannte vorhanden sind. In diesem Fall spricht man von weichen Lagerungen.

#### **4.3.1. Zwangsfreie Lagerung**

Es gibt in der Versuchsanordnung keine Punkte, die als unbeweglich angesehen werden können. Mehrere Vollpasspunkte würden nicht der Beweglichkeit des Objektes entsprechen und einen Zwang in der Ausgleichung ausüben. Daher wurde eine Lagerung gewählt, die genauso viele Elemente aufweist, dass keine Redundanz eintritt und das Koordinatensystem trotzdem definiert ist. Diese Art der Lagerung wird als „zwangsfrei“ bezeichnet.

Um ein dreidimensionales Koordinatensystem eindeutig zu definieren, müssen für die sieben Unbekannten (drei Translationen, drei Drehungen und den Maßstab) passende Gleichungen bestimmt werden. Da mehrere Entfernungen gemessen wurden, kann der Ansatz für den Datumsdefekt um die Unbekannte des Maßstabs reduziert werden.

Es bleiben daher sechs Unbekannte, die durch genau sechs Koordinateninformationen definiert sind, wie in Tabelle 7 zu sehen ist. Der klassische Ansatz ist ein Vollpasspunkt (X,Y,Z), ein Lagepunkt (X,Y) und ein Höhenpunkt (Z), die nicht auf einer Geraden liegen. Da bei dieser Aufgabenstellung

der Höhe besonderes Interesse zukommt, wurden sechs andere Koordinateninformationen verwendet.

Punkt	Y	X	Z
3011	100	100	100
3019			100
1111		100	100

**Tabelle 7: zwangsfreie Lagerung**

Die Lage dieser Punkte am Objekt sind in Abbildung 20 dargestellt.

### **4.3.2. Näherungsorientierung der Bilder**

Die Orientierung setzt sich aus der inneren und der äußeren Orientierung zusammen. Die innere Orientierung beschreibt die Parameter der Kamera. Bei einer analogen Messbildkamera ist diese im Kalibrierungsprotokoll festgehalten. Zur Amateurbildkamera gibt es Näherungen, die zu verwenden waren. Zusätzlich wurde eine „on the job“- Kalibrierung durchgeführt.

Die äußere Orientierung beschreibt den Aufnahmeort und die Aufnahmerichtung, welche im Zuge einer Bündelblockausgleichung zu bestimmen sind. Dafür werden Näherungen für die Drehwinkel benötigt. In ORIENT wurden diese über genäherte Aufnahmerichtungen bestimmt.

Die Aufnahmekonfiguration wurde vor Ort abgesteckt und markiert. Dadurch konnten von allen Aufnahmeorten die Näherungskordinaten vorab bestimmt werden.

Diese Vorarbeiten waren für die Auswertung des Bündelblockausgleichs notwendig, welcher im Kapitel 5.6 beschrieben wird.

## 5. Messung und Orientierung der Bilder

Die Auswertung erfolgte in mehreren Schritten: Zunächst wurden in jedem Bild die Bildkoordinaten von vier Punkten händisch bestimmt. Danach konnten die Bilder vororientiert werden. Dann erfolgte die automatische Bestimmung aller Bildkoordinaten aufgrund von Modellkoordinaten. Punkte, die nicht automatisch gemessen werden konnten, wurden händisch bestimmt. Die anschließende Bündelblockausgleichung lieferte die Koordinaten in beiden Epochen. Bei der robusten Schätzung wurden grob falsche Beobachtungen ermittelt und eliminiert. Bei jedem Arbeitsschritt ist auch das verwendete Programm angegeben.

### 5.1. Messung von vier Punkten pro Bild mit ORPHEUS

Die Punkte 1111, 1119, 3019 und 3011 sind die Eckpunkte des regelmäßigen Rasters. Von ihnen wurden mit dem Monokomparator des Programms ORPHEUS die Bildkoordinaten bestimmt. Dies erfolgte mit der Genauigkeit einer manuellen Positionierung. In Abbildung 21 ist die Messung der Bildkoordinaten im belasteten Fall (P31) mit dem Programm ORPHEUS zu erkennen.

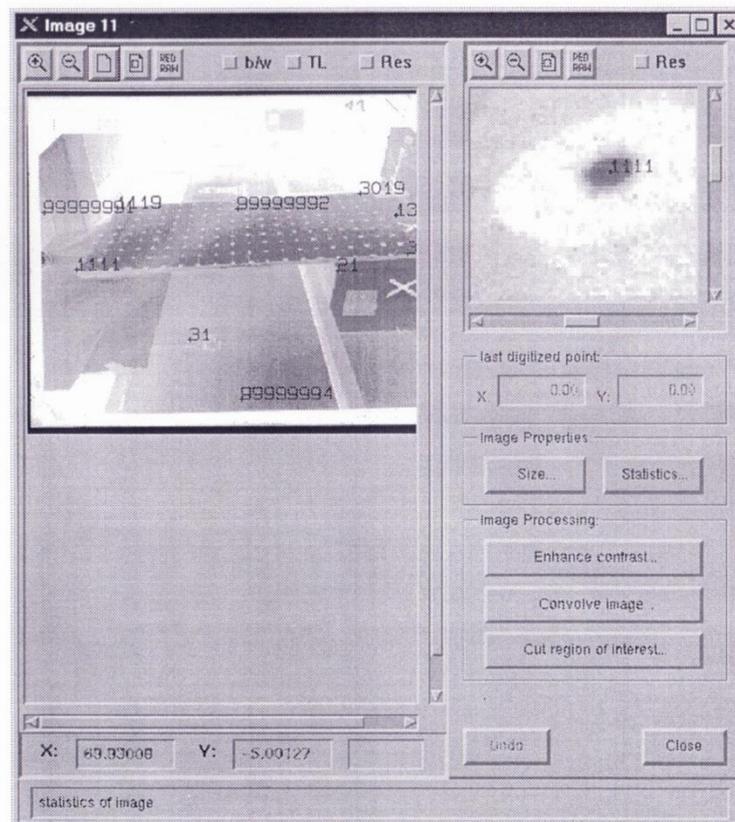


Abbildung 21: Das Programm ORPHEUS bei der Messung von Bildkoordinaten

## 5.2. Vororientierung der Bilder mit ORIENT

Zur Vororientierung wurde ein Bündelblockausgleich mit dem Programm ORIENT berechnet. Als Messungen gingen die Bildkoordinaten der händisch gemessenen vier Punkte und die Passstrecken ein. Die Koordinaten der Passpunkte waren für die Lagerung verantwortlich. Bei konstanter innerer Orientierung wurden die Elemente der äußeren Orientierung bestimmt. Aufgrund der Modellkoordinaten konnten alle zu messenden Punkte in den Bildraum projiziert werden. Es lagen somit für alle zu messenden Punkte genäherte Bildkoordinaten vor.

## 5.3. Erste automatische Messung mit CENTROID

Zur Bestimmung des Zentrums der Signale wurde die Schwerpunktmethode verwendet. Bei dieser wird eine symmetrische Verteilung von Grauwerten um das Zentrum vorausgesetzt.

Die Berechnung erfolgt in geeigneten Fenstern, deren Mittelpunkte durch die Näherungskordinaten der zu messenden Punkte gegeben sind. Mit Hilfe der Gleichung 5.3-1 kann der Mittelpunkt einer Messmarke automatisch gemessen werden. Das Programm CENTROID verwendet diese Methode und gibt die gemessenen Bildkoordinaten mit einer Genauigkeitsangabe in einem ORIENT lesbaren Format aus.

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} \begin{pmatrix} x_i \\ y_j \end{pmatrix}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}}$$

Gleichung 5.3-1

Wobei  $x_c$ ,  $y_c$  die Zentrumskoordinaten,  $x_i$ ,  $y_j$  die Pixelkoordinaten und  $g_{ij}$  den Grauwert an den Pixelkoordinaten  $(x_i, y_j)$  innerhalb eines Fensters der Größe von  $n \times m$  Pixel darstellen. Die beschriebenen Genauigkeiten der ermittelten Bildkoordinaten in Gleichung 5.3-2 erhält man durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes (MAAS, 1992).

$$\sigma_{x_c} = \frac{\sqrt{\sum (x_i - x_c)^2}}{\sum g_i} \sigma_g$$

$$\sigma_{y_c} = \frac{\sqrt{\sum (y_i - y_c)^2}}{\sum g_i} \sigma_g$$

Gleichung 5.3-2

Die Standardabweichung des Zentrums hängt linear vom Grauertrauschen  $\sigma_g$  sowie vom Abstand zum Zentrum ab. Damit diese Methode mit gutem Erfolg angewandt werden kann, ist ein helles Signal auf möglichst dunklem oder schwarzem Hintergrund notwendig. Wenn der Hintergrund nur "dunkel" ist, aber sich das Signal nicht sehr zentriert im Fenster befindet, nehmen die Hintergrundpixel starken Einfluss auf das Resultat.

In (LUHMANN, 2000) wird die optimale Signalgröße für dieses Verfahren mit 2 bis 9 Pixel angegeben. Die erreichbare Genauigkeit wird dort mit 0,013-0,1 Pixel beschrieben.

Die Bestimmung der Bildkoordinaten erfolgte für die deformierte Epoche und die undeformierte Epoche mit den gleichen Einstellungen. Für die analoge Messbildkamera mussten andere optimale Fenstergrößen ermittelt werden. Die Fenstergrößen waren in jedem Fall quadratisch.

Nach ersten Experimenten stellte sich heraus, dass die Fenstergrößen 10 (DCS) bzw. 15 (P31) gut geeignet waren. Damit wurden verbesserte Näherungskordinaten erhalten.

## **5.4. Zweite automatische Messung mit CENTROID**

Eine zweite automatische Bestimmung der Bildkoordinaten erwies sich als notwendig, da die Anzahl der grob falschen Punkte zu hoch war. Bei der zweiten automatischen Messung wurden die Ergebnisse der ersten Messung als Näherungskordinaten verwendet, wodurch die Fenstergrößen bei diesem zweiten Durchgang kleiner gewählt werden konnten. Um störende Randeinflüsse zu verhindern, wurde die Fenstergröße auf 8 (DCS), bzw. 12 Pixel (P31) reduziert.

Die Größe der Zielmarken im Bild variierte deutlich. Speziell in den Schrägaufnahmen ergaben die weiter entfernten Zielmarken nur eine Signalgröße von zwei bis fünf Pixel mit niedrigeren Grauwertdifferenzen. Die Zielmarken, die näher der Kamera gelegen waren, überstrahlten ihre wahre Größe.

Die Schwerpunktsbestimmung gemäß Gleichung 5.3-2 mit dem Programm CENTROID ergaben Genauigkeiten von 0,01 bis 5 Pixel und größere Ausreißer. Die visuelle Kontrolle der automatischen Messung ermöglichte die Festlegung einer Schranke von 0,9 Pixel für diese Genauigkeit.

Die meisten falsch berechneten Punkte wurden auf den äußeren Rand des Passepartouts gesetzt. Nachdem die Messmarken mit einem runden Passepartout versehen waren und das Messfenster rechteckig war, kam es vor, dass hellere Stellen des Hintergrunds einen störenden Einfluss ausübten. Abhilfe schafften bessere Näherungskordinaten und kleinere Messfenster.

Durch dieses zweistufige Verfahren konnten 97% der Bildkoordinatenmessungen maschinell berechnet werden.

## 5.5. Händische Korrekturen in ORPHEUS

Bei der visuellen Kontrolle der Ergebnisse wurden ca. fünf Punkte pro Bild als grob falsch erkannt. Um einen vollständigen Satz an Bildkoordinaten zur Verfügung zu haben, wurden diese Punkte händisch mittels Monokomparator in ORPHEUS bestimmt. Nachdem die Bildkoordinaten von allen Punkten vorhanden waren, konnte die Berechnung des Bündelblockausgleichs erfolgen.

## 5.6. Bündelblockausgleichung

Bei der Bündelblockausgleichung werden, wie in anderen photogrammetrischen Verfahren, die gesuchten Objektkoordinaten nicht direkt gemessen, sondern aus anderen Beobachtungen abgeleitet. Die größte Gruppe stellt sicher die aus einer Mehrbild-Monokomparator-Auswertung gemessenen Bildkoordinaten dar. Andere Beobachtungen sind gemessene Entfernungen, Richtungen und Koordinaten von Passpunkten. Auch fiktive Beobachtungen, wie die „Gestalt“ eines Objekts können einfließen. Konstanten, wie die Elemente der inneren Orientierung, werden als Beobachtungen eingeführt und können auch Verbesserungen erhalten. Diese Art der Berechnung kann in einem Arbeitsgang für alle Beobachtungen die wahrscheinlichsten Werte der Objektkoordinaten bestimmen. Die Grundlage der Abbildungsfunktion in ORIENT (KAGER, 1989) stellt die räumliche Ähnlichkeitstransformation (Gleichung 5.6-1) dar.

$$\left[ \vec{p} - \vec{p}_0(adp) \right] = \lambda R^T(\Theta) (\vec{P} - \vec{P}_0)$$

Gleichung 5.6-1

Die kann man auch schreiben als:

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

Gleichung 5.6-2

Dabei gilt:

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

Eine übliche Parametrisierung von R verwendet die Winkel  $\alpha$ ,  $\zeta$  und  $\kappa$ . Die Koeffizienten von R sind durch drei Drehungen um die Winkel  $\alpha$ ,  $\zeta$  und  $\kappa$  entstanden.

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

Gleichung 5.6-3

Der Zusammenhang zwischen Bild und Objektkoordinaten beschreibt die perspektivische Transformation. Für eine Transformation benötigt man idente Informationen (Identpunkte) in beiden Koordinatensystemen. Objektseitig ist das das Projektionszentrum mit seinen Koordinaten  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ . Im Bildkoordinatensystem entspricht das dem bildseitigen Projektionszentrum  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $c$ . Da die Bildkoordinaten in einer Ebene liegen, sind ihre z-Koordinaten gleich null. Daher kann Gleichung 5.6-2 durch die dritte Zeile dividiert werden, woraus die Verbesserungsgleichungen der beobachteten Bildkoordinaten  $x$  und  $y$  resultieren.

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

Gleichung 5.6-4

Dabei gilt:

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

Bei diesen Formeln wurde der Maßstabsfaktor  $\lambda$  eliminiert. Das entspricht einer Zentralprojektion, bei der der Maßstab von Bildpunkt zu Bildpunkt variiert. Der zusätzliche Parameter  $adp$  des inneren Referenzpunktes  $\bar{p}_0$  steht für die Verzeichnung des Kamerasystems.

Bei der Verwendung von Passpunkten werden die Koordinaten auch als Beobachtungen eingeführt. Dazu verwendet man in Gleichung 5.6-2 die idente Abbildung. Der Maßstabsfaktor  $\lambda$  wird im Allgemeinen mit 1 angenommen und die Koordinaten vom inneren und äußeren Referenzpunkt ( $\bar{p}_0$  und  $\bar{P}_0$ ) werden gleich gesetzt. Die Rotationsmatrix R entspricht der Einheitsmatrix. Dadurch vereinfacht sich Gleichung 5.6-2 erheblich und man erhält die Verbesserungsgleichungen von gegebenen Passpunktkoordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (KAGER, et al., 2002).

$$\bar{x} = x + v_x = X$$

$$\bar{y} = y + v_y = Y$$

$$\bar{z} = z + v_z = Z$$

**Gleichung 5.6-5**

Die Berechnung der Objektkoordinaten erfolgte für jede Kamera und Epoche getrennt. Bei der Bündelblockausgleichung wurden zuerst die Elemente der äußeren Orientierung bestimmt. Dazu benötigt man die drei Passpunkte für die zwangsfreie Lagerung. Die 13 Passstrecken wurden in einem Polarraum von ORIENT bereitgestellt. Wenn der Ausgleich konvergiert, kann der nächste Schritt berechnet werden.

Bei vorhandener Orientierung wurden die Objektkoordinaten berechnet. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler  $\sigma_0$  ist dabei ein wichtiger Hinweis auf den Zustand des Ausgleichs. Die notwendige Fehlersuche wurde durch ein „Robustes Verfahren“ durchgeführt.

Nach der Fehlersuche wurde, zur Minimierung der zufälligen Fehler, noch einmal eine Ausgleichung durchgeführt. Danach begann die finale Ausgleichung. Dabei waren bereits ausgezeichnete Näherungen für alle Unbekannten vorhanden. Im Anschluss wurden alle Elemente der äußeren und inneren Orientierung zur Veränderung freigegeben und auch alle Punkte des Objektraums standen für eine globale Optimierung zur Verfügung. Bei der folgenden Durchsicht des Projektes wurden die wichtigsten Parameter genau überprüft. Die Kamerakalibrierung wurde kontrolliert, die Passstrecken, die Passpunkte, die Aufnahmeorte und die Aufnahmerichtungen wurden auf ihre Plausibilität überprüft.

Die Auswertungen der beiden Epochen sind gleich genau.

### **5.6.1. Ergebnisse der Ausgleichung**

Um die Genauigkeit aller Punkte zu beurteilen, wurden Fehlerellipsoide berechnet und in verschiedenen Ansichten des Koordinatensystems dargestellt. Dies soll den Zustand des Ausgleichs nach der robusten Schätzung wiedergeben. Wie man in Abbildung 22 erkennen kann, führen Anordnung der Bilder und die Messungen in den Bildern zu homogenen Genauigkeiten der Objektpunkte.

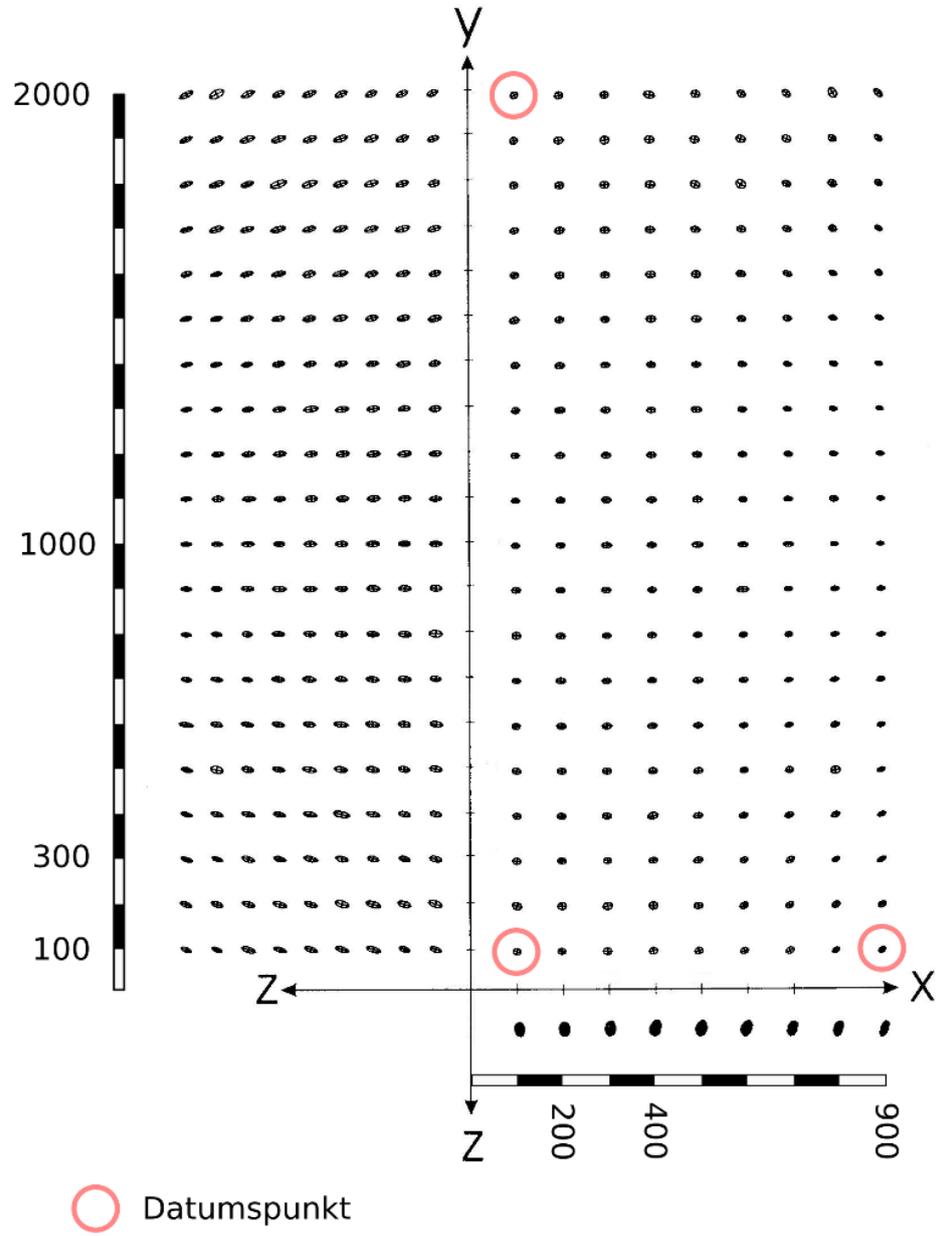


Abbildung 22: Fehlerellipsen, unbelastet, P31, Fehlermaßstab 100/3

In Abbildung 23 sieht man die Fehlerellipsen des belasteten Falls P31. Bei der durch Deformation belasteten Epoche kann man die Abweichungen im oberen Bereich des Objektes erkennen. Die mittleren Punktlagefehler sind nicht in der Mitte der oberen Hälfte angestiegen, wo die Deformation am größten ist, sondern verlagern sich zum Rand. Die Fehlerellipsen sind noch immer klein und die automatische Messung der Bildkoordinaten kann als gut beurteilt werden.

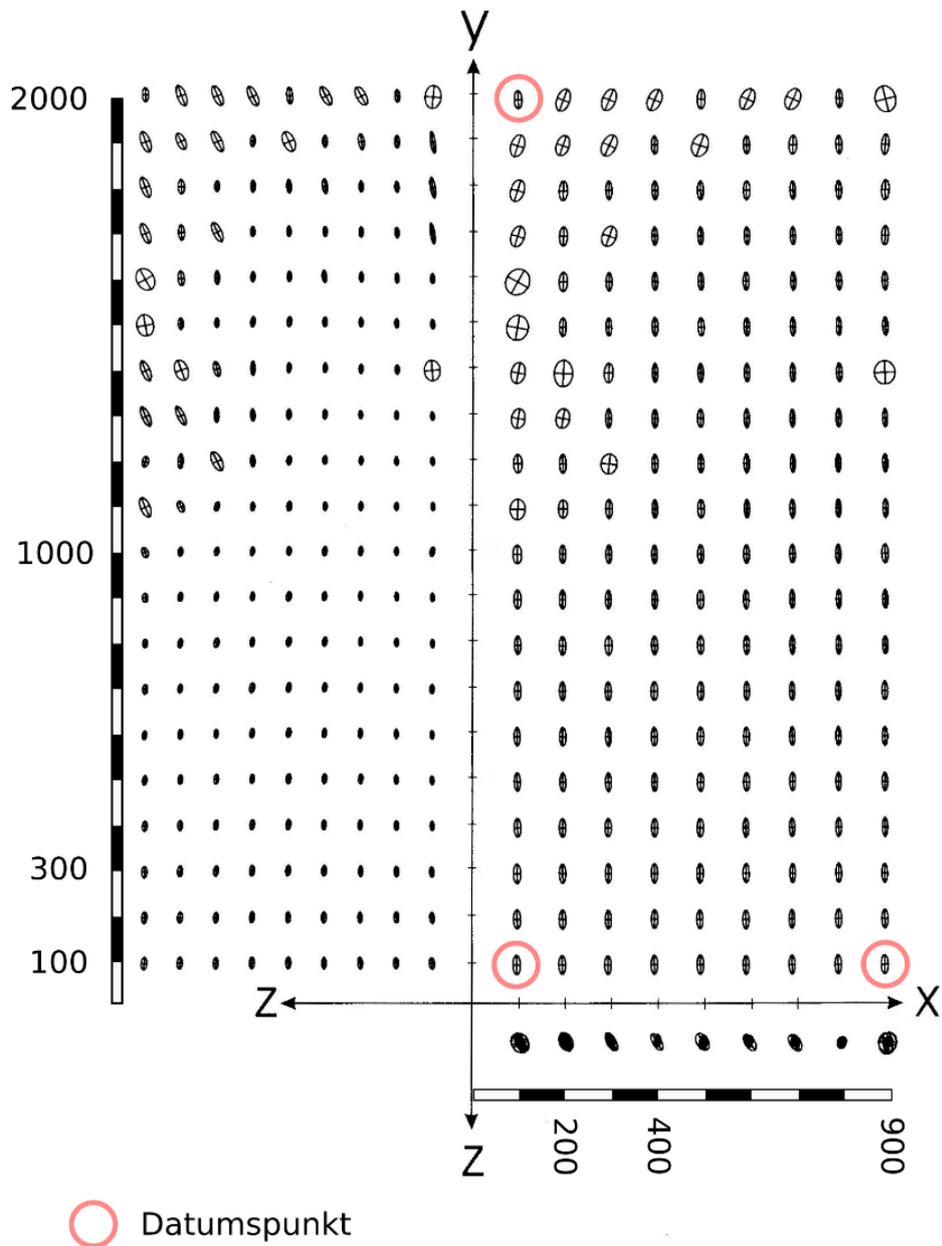


Abbildung 23: Fehlerellipsen, belastet, P31, Fehlermaßstab 100/3

Abbildung 24 zeigt die Fehlerellipsen im unbelasteten Fall für die DCS. Das Größenverhältnis der fehlerzeigenden Figur beider Kameras entspricht dem Verhältnis ihrer Bildmaßstäbe. Die automatische Messung der Bildkoordinaten mit dem Programm CENTROID lieferte bei guten Näherungskoodinaten und kleiner Fenstergröße ein homogenes Bild der Genauigkeiten.

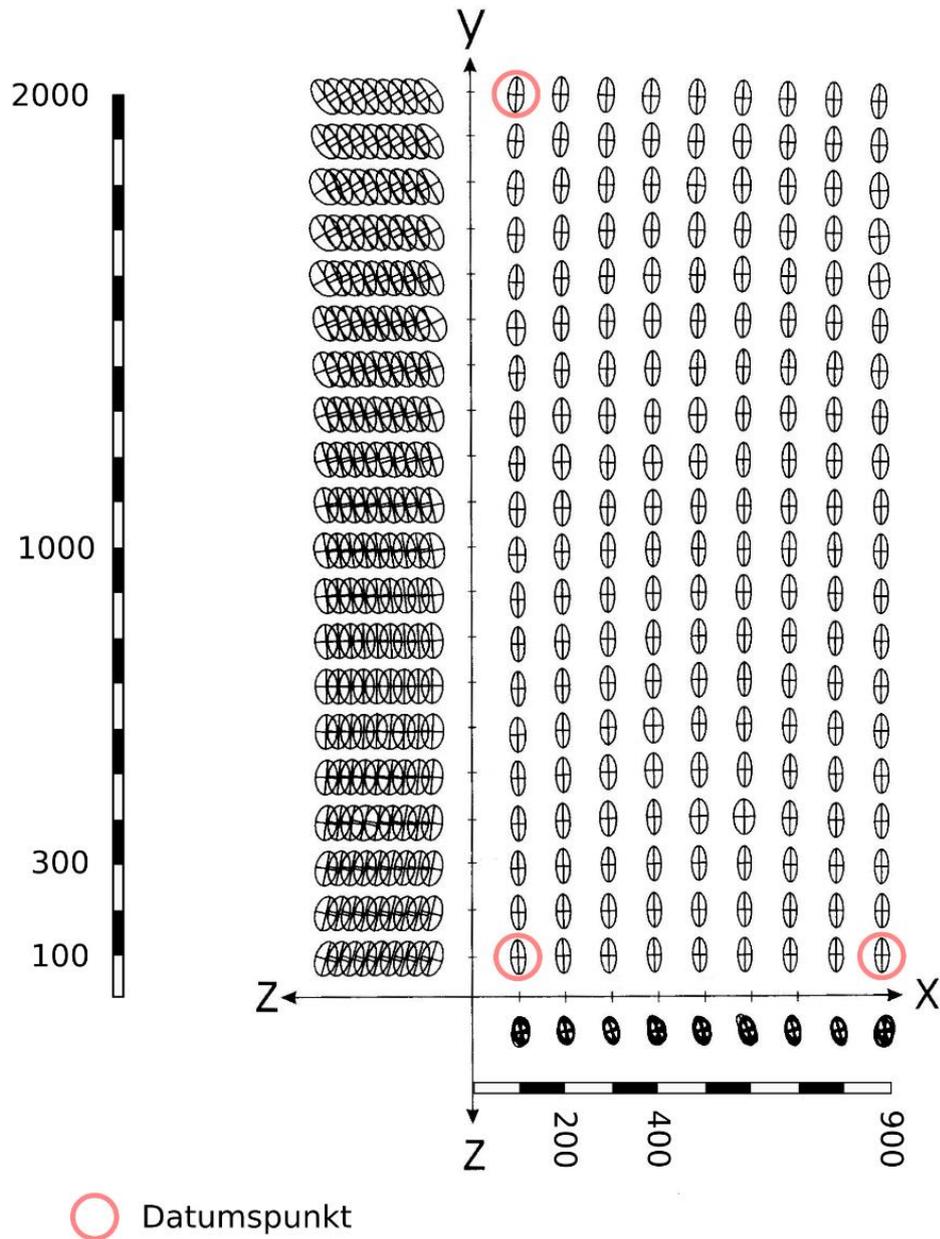


Abbildung 24: Fehlerellipsen, unbelastet, DCS, Fehlermaßstab 100/3

Die deformierte Epoche, mit der Amateurkamera aufgenommen, ergab die größten fehlerzeigenden Figuren, wie in Abbildung 25 zu erkennen ist. Man kann deutlich erkennen, dass einige Messungen zu Fehlern in der X-Achse und in der Z-Achse führten. Es handelt sich um eine geringe Anzahl von Punkten mit geringfügigen Abweichungen, die nicht gehäuft auftreten. Bei der Anordnung der Punkte in einem regelmäßigen Raster ist die Gefahr von Hebelpunkten nicht gegeben.

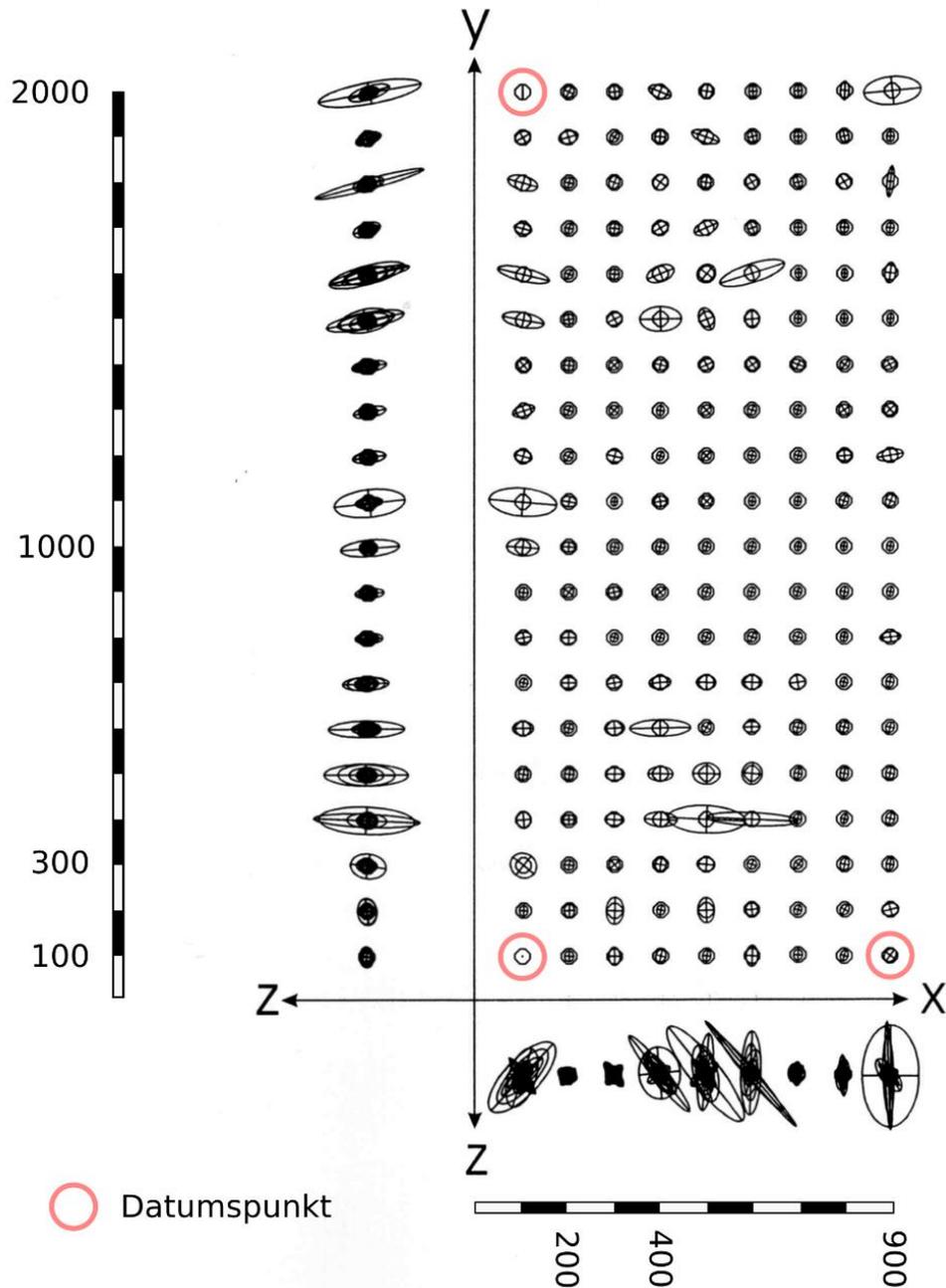


Abbildung 25: Fehlerellipsen, belastet, DCS, Fehlermaßstab 100/3

## 5.7. Die Genauigkeit der Punktauswertung

Der mittlere Lagefehler der Punktauswertung nach der finalen Ausgleichung ist in Tabelle 8 aufgelistet:

	P31[mm]	P31[Pixel]	DCS[mm]	DCS[Pixel]
unbelastet	0,14	0,37	0,30	0,37
belastet	0,15	0,40	0,32	0,40

**Tabelle 8: Mittlerer Lagefehler der Ausgleichung**

In Kapitel 3.5 wird die theoretische Größe der Pixel im Objektraum angegeben. Daraus wurde die erreichte Genauigkeit in Pixel berechnet. Nach der Ausgleichung konnte mit beiden Kameras dieselbe Genauigkeit erreicht werden. Die gesamte Messmethode konnte eine Bildmessgenauigkeit von ca.  $\frac{1}{3}$  Pixel erreichen. Die Annahme der Bildmessgenauigkeit in 3.8 war daher zu optimistisch.

Die Genauigkeit der Koordinaten zeigt einen geringen Unterschied zwischen der Lage (X,Y) und der Höhe (Z). Für die Auswertung der analogen Messbildkamera konnte eine Lagegenauigkeit von 0,15 mm und eine Höhengenaugigkeit von 0,13 mm erreicht werden. Die Digitalkamera erreicht in der Lage einen mittleren Fehler von 0,30 mm und in der Höhe eine Genauigkeit von 0,28 mm.

## 6. Analyse

Der Vergleich von zwei Epochen, die Referenzmessung und die belastete Messung erfolgte in mehreren Schritten. Das Differenzmodell wurde in ORIENT gerechnet; die graphische Aufbereitung und Glättung erfolgte mit dem Programm SCOP.

### 6.1. Interpolation

Bei der Deformationsmessung von Türen erwartet man als Ergebnis glatte Oberflächen, die sich stetig verhalten. Es liegt also nahe, auch so ein Modell anzunehmen, um aus diskreten Punkten ein Kontinuum zu erzeugen. Nachdem nicht zu erwarten war, dass Knicke und Kanten auftreten, wurden diese auch nicht in die Modellplanung eingebracht.

Interpolierte Höhenschichtenlinien müssen nicht zwingend einen ansprechenden und der Situation entsprechenden Verlauf haben. Zu nahe beieinander liegende Stützstellen können einen glatten Verlauf verhindern. Durch das Ausschwingen der Höhenschichtenlinien kann der Abstand von zwei Schichtenlinien verringert werden. Dies kann sogar zum Schnitt von 2 Isolinien führen, den es per definitionem nicht geben kann. Der Abstand von Schichtenlinien ist ein Maß für die Steigung und daher ein wichtiges Werkzeug zur Interpretation.

Eine Lösung des Problems des Ausschwingens ist die Flächeninterpolation. Dabei wird eine Fläche höherer Ordnung durch die Stützstellen gelegt und geglättet. Aus dem so erzeugten Modell können die Höhenschichtenlinien mit guter Scharungsplastik abgeleitet werden.

Eine andere Möglichkeit ist die Interpolation mittels Flächensummation. Dabei wird um jede Stützstelle eine Rotationsfläche gelegt und die Oberfläche durch Summation dieser Flächen erzeugt. Die Fläche verläuft direkt durch die Stützstellen hindurch. Die Funktion, die diese Rotationsfläche erzeugt, nennt man Kernfunktion. Für einen Kegel ist das eine Gerade. Dann würden sich aber in den Stützstellen Trichter oder Spitzen darstellen. Es werden daher Hyperboloide als Rotationsflächen verwendet. Die Steigung der Hyperbel wird über die Entfernung zwischen den beiden am meisten benachbarten Stützstellen im Interpolationsgebiet angepasst. Man kann die Kernfunktionen aber auch für jede Stützstelle anpassen, dann spricht man von individuellen Kernfunktionen. Die Interpolation mittels Flächensummation wurde ursprünglich ohne Filterung durchgeführt (KRAUS, 2000).

Eine Interpolationsmethode, bei der eine Glättung üblich ist, ist die Interpolation nach kleinsten Quadraten. Es wird dabei anstelle der Kernfunktion die Kovarianzfunktion in Form einer Gauß'schen Glockenkurve verwendet. Nahe beieinanderliegende Stützstellen haben eine große Kovarianz, das entspricht aber nicht dem Verhalten von Höhen. Daher ist von der Höhe ein Trend abzuspalten. Übrig bleiben ein systematischer Anteil und ein zufälliger Anteil. Damit sind die Voraussetzungen für eine Interpolation nach den kleinsten Quadraten geschaffen. Diese Methode kann mit einer Filterung oder auch ohne erfolgen.

Die lineare Prädiktion nach der Methode der kleinsten Quadrate wird zur Geländeflächenbeschreibung im Sinne eines Filters verwendet. Der Filterbetrag enthält die zu eliminierende Oberflächenrauigkeit. Eine Unterteilung in regelmäßige Teilgebiete, Dreiecksvermaschungen, oder in gleitende Flächen wird mit Hilfe von Überlappungsbereichen vollzogen. Im Programm SCOP ist die lineare Prädiktion nach der Methode der kleinsten Quadrate implementiert.

Die Prädiktion mit Gewichtsfunktion ermöglicht eine bessere Beschreibung von Geländeflächen (WILD, 1983).

## 6.2. Differenzmodelle

Alle berechneten Modelle weisen das gleiche geodätische Datum auf, das heißt, dass sie die gleiche Lagerung besitzen. Auch die Punkte des Datums können einer Verformung unterliegen. Daher ist für die Differenzbildung eine Transformation verwendet worden. In diesem Versuch hat die Mehrheit der Punkte ihre Position nicht verändert und kann daher für die Lagerung verwendet werden.

Es wurde eine Transformation mit robuster Schätzung durchgeführt, um die Punkte mit Deformation heraus zu filtern. Die restlichen Punkte waren die Identpunkte für die Transformation.

Die Genauigkeiten der Punktauswertung wurden herangezogen, um daraus die Genauigkeiten der Differenzmodelle zu bestimmen. Die Tabelle 9 zeigt die Genauigkeiten der im Versuch verwendeten Kameras. Dabei wurde in den Zeilen „unbelastet“ und „belastet“ der mittlere Fehler der Z-Koordinaten angegeben. Die Zeile „Differenz“ wurde mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet. In der Zeile „Interpolation“ wurde die Zeile „Differenz“ reduziert um den Faktor 2 ausgewiesen. Dies entspricht dem zu erwartenden Genauigkeitserfolg durch die Interpolation.

	P31[mm]	DCS[mm]
unbelastet	0,13	0,28
belastet	0,14	0,30
Differenz	0,19	0,41
Interpolation	0,10	0,21

**Tabelle 9: Höhengenaugigkeit der Fläche**

Das Programm SCOP gibt mittlere Filterbeträge für die berechneten Modelle an, aufgrund derer sich die Genauigkeit des Höhenmodells vergleichen lässt.

Der Vergleich von Tabelle 9 (Differenz) und Tabelle 10 zeigt, dass die Genauigkeiten der Höhen in Tabelle 9 etwas zu optimistisch waren.

	P31[mm]	DCS[mm]
unbelastet	0,348	0,362
belastet	0,375	0,470

**Tabelle 10: Durchschnittliche Filterbeträge**

Die interpolierten Differenzmodelle dienen zur Herstellung von grafischen Darstellungen, wie zum Beispiel von Isolinien. Isolinien sind die Verbindung von Punkten gleicher Eigenschaft. Damit wird die Höhe dargestellt, wenn man die Ebenheit eines Objektes betrachtet. Die Änderung der Höhe kann dargestellt werden, indem man das Differenzmodell als Grundlage heranzieht.

Isolinien können in jedem beliebigen Intervall produziert werden. Setzt man das Intervall kleiner als die Genauigkeit des Modells, so entstehen Isolinien mit Artefakten. Diese Abbildung von zufälligen Fehlern wird als „Rauschen“ bezeichnet. Das Rauschen entstand beim Differenzmodell mit der analogen Messbildkamera bei einem Intervall kleiner als 0,15 mm. Das Modell der Amateurkamera zeigte dieses Verhalten bei einem Intervall kleiner als 0,5 mm.

Bei den folgenden Darstellungen der Isolinien ist einheitlich das Intervall 0,5 mm gewählt worden.

### **6.3. Isolinien und Visualisierungen**

In Abbildung 26 sind die Höhengschichtenlinien der P31 (unbelasteter Fall) zu sehen. Deutlich ist die geringere Wölbung in der oberen Hälfte des Objektes zu erkennen, da die Höhengschichtlinien dort in geringerer Anzahl zueinander vorhanden sind.

Die hölzerne Mittelstrebe trennt einen oberen und unteren Bereich, der von der Ebene deutlich abweicht. Die Ausbuchtung im unteren Bereich beträgt ca. 5 mm. Diese Abweichung von der Ebene war von vorne und auch bei leichten Schrägaufnahmen optisch nicht zu erkennen. Das Intervall der Höhengschichtenlinien ist mit einem halben Millimeter sehr eng gewählt, wodurch in Abbildung 26 auch kleinste Verformungen deutlich zutage treten.

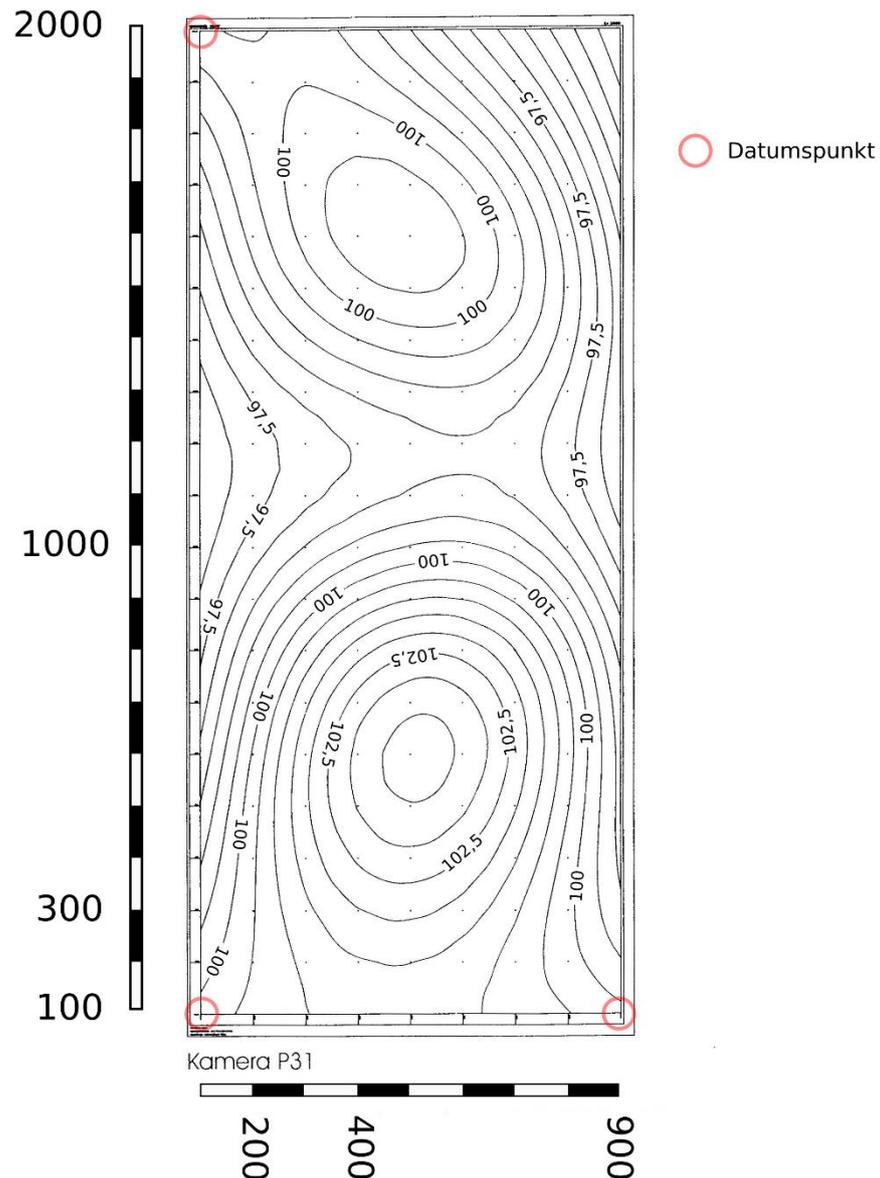


Abbildung 26: Höhenschichtenlinien, unbelastet, P31, Äquidistanz 0,5 mm

Der Belastungsfall wird durch einen applizierten Keil erreicht, der die obere Hälfte der Tafel verformt. Deutlich kann man in der oberen Hälfte der Abbildung 27 die stärkere Verformung erkennen, die sich in einer größeren Anzahl von Höhenschichtenlinien darstellt.

Konstruktive Schwachstellen oder Versteifungen, wie die Mittelstrebe, sind in dieser Darstellung ebenfalls gut zu erkennen. Eine flächenhafte Darstellung gibt mehr Aufschluss über die Vorgänge der Deformation als die Messung der Ebenheit über vier Punkte mittels Messuhren, siehe Kapitel 2.1.2. Durch einen Profilschnitt oder durch Abzählen der Schichtenlinien am Rand kann die Kantenverformung der Epoche verglichen werden. Diese muss nicht unbedingt in der Mitte der Kante ihr Maximum aufweisen, sondern muss je nach Schwachstelle individuell beurteilt werden. Eine besondere Veränderung einer Tür kann im Bereich des Schlosses auftreten, da dort das Türblatt geschwächt ist und stark unterschiedliche Materialien verwendet werden. Die Beurteilung der Oberfläche stellt hierbei eine Erweiterung der von der ÖNORM geforderten Messmethoden dar.

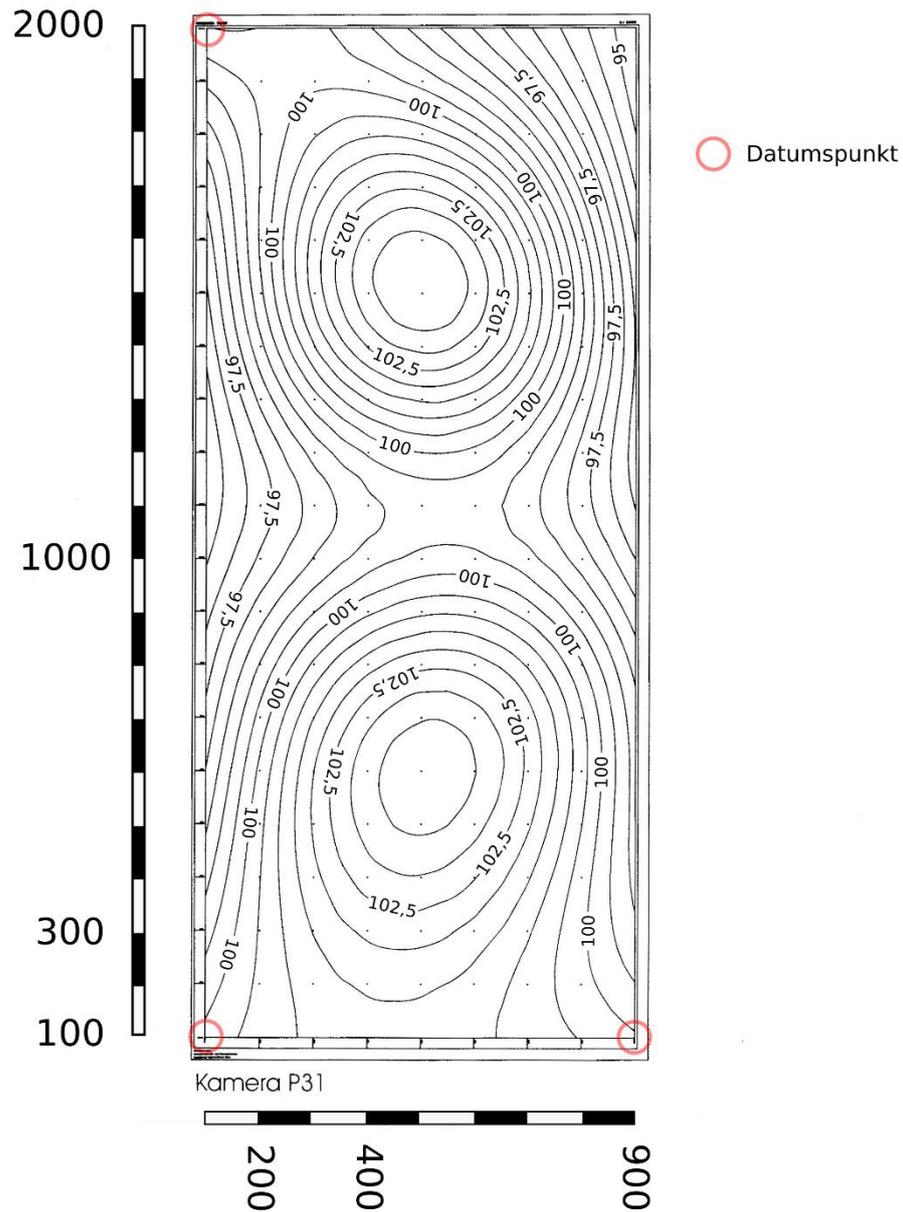


Abbildung 27: Höhenschichtlinien, belastet, P31, Äquidistanz 0,5 mm

Die Isolinien des Differenzmodells stellen die Änderung der Höhe beider Epochen dar. Das ist eine Möglichkeit, die Verformung der Oberfläche zu visualisieren.

In Abbildung 28 ist die Verformung in der oberen Hälfte zu erkennen. Die untere Hälfte blieb frei von Verformungen. Auch die Kantenverformung aller vier Kanten ist nicht vorhanden. Einzig die gewollte Verformung in der Mitte der oberen Hälfte zeichnet sich ab.

Die Lage der Nulllinie im unteren Bereich erscheint willkürlich, da hier keine Deformationen vorhanden sind. In einem flachen Gelände gibt die Lage einer einzelnen Höhenschichtenlinie auch keine besondere Information über die Geländeform.

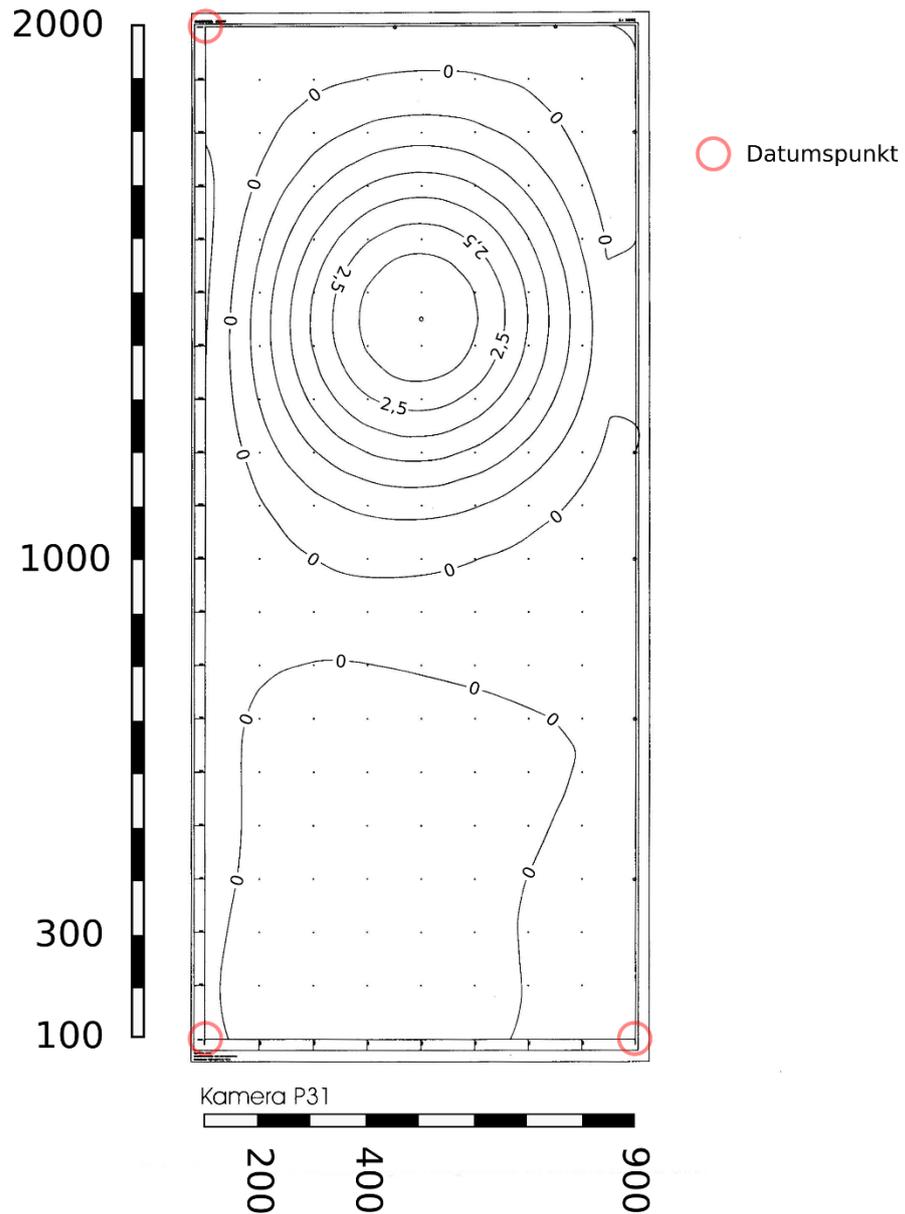


Abbildung 28: Isolinien des Differenzmodells, P31, Äquidistanz 0,5 mm

Das Differenzhöhenmodell der Amateurkamera, wie es in Abbildung 29 zu sehen ist, zeigt die Deformationen, die im Wesentlichen dem Differenzmodell der P31 entsprechen.

Wenn man die maximale Verformung betrachtet, so weisen die beiden Modelle Differenzen auf. Bei der analogen Messbildkamera kann die dargestellte Isolinie mit höchster Kote mit 3,5 mm aus Abbildung 28 herausgelesen werden, bei der Amateurkamera ist sie laut Abbildung 29 jedoch 2,5 mm.

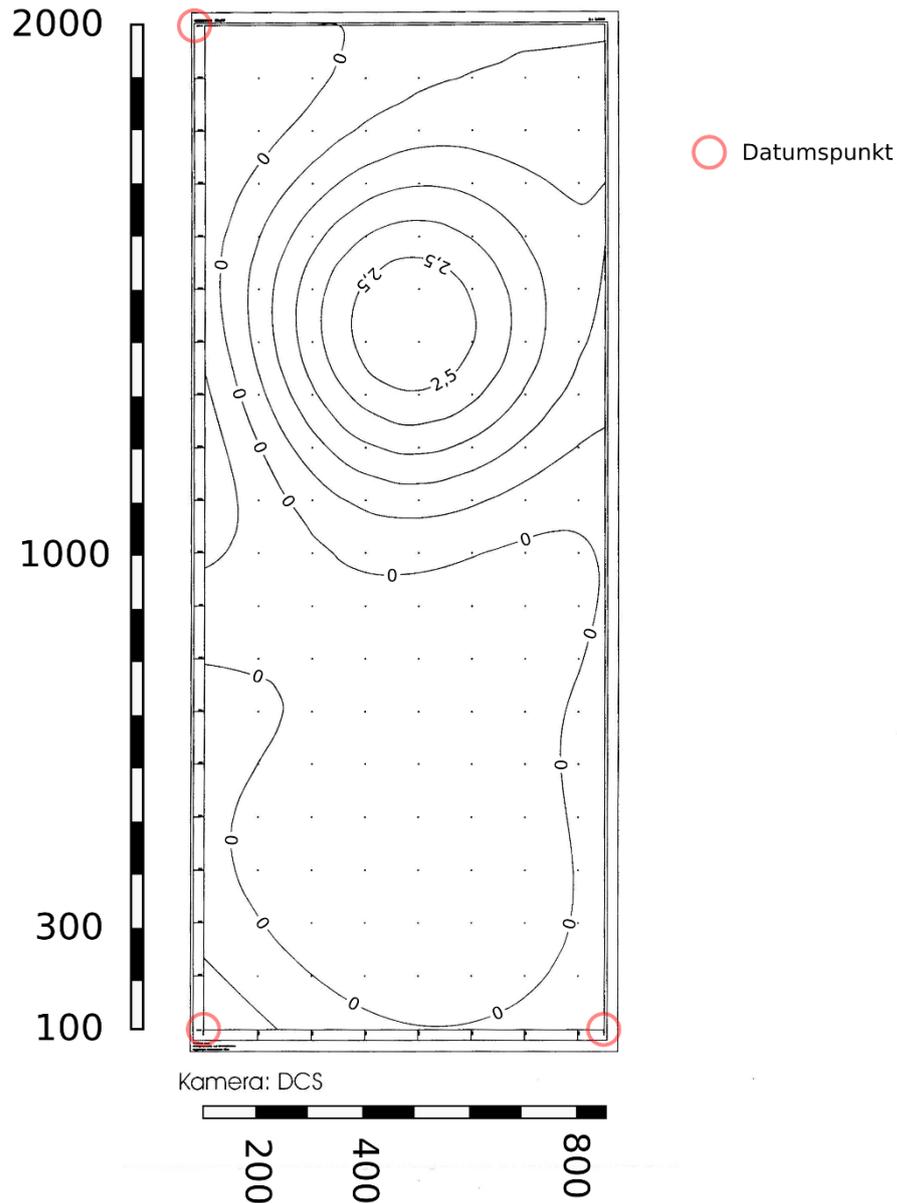


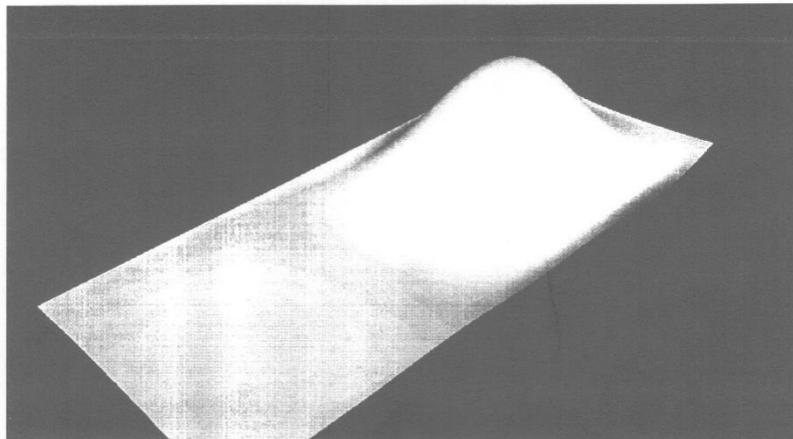
Abbildung 29: Isolinien des Differenzmodells, DCS, Äquidistanz 0,5 mm

Dieser Vergleich fällt allerdings ungünstig aus, da es bei Glättungen einer Funktion zum Ausschlagen kommen kann und das den Maximalwert verfälscht. In dem Differenzmodell der analogen Messbildkamera konnte die Isolinie mit 3,5 mm gerade noch dargestellt werden. Ob das Erreichen dieser Schranke ein Artefakt ist, lässt sich aus dieser Abbildung nicht feststellen. Keiner der Messpunkte befindet sich innerhalb dieser Isolinie, daher kann man auch aus den berechneten Koordinaten der Einzelpunktauswertung dieses Maximum nicht bestätigen.

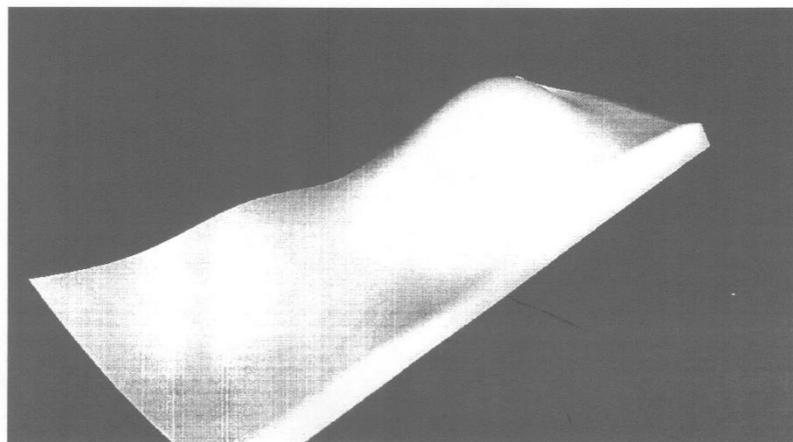
Möglicherweise wurde die Isolinie 3,0 mm beim Differenzmodell der Amateurkamera nur äußerst knapp nicht erreicht. Das heißt ein Fehler von  $\pm 1$  Isolinie lässt einigen Interpretationsspielraum offen. Für die Beurteilung eines Differenzmodells stellt daher das Maximum kein hinreichend genaues Kriterium dar.

Bedingt durch die Versuchsanordnung gab es eine zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmeserien der P31 und der DCS. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die beiden Aufnahmeserien unterschiedliche Stadien einer kontinuierlichen Verformung abbilden.

Die perspektive Darstellung der Differenzen ist eine Möglichkeit, um einen Eindruck von den Vorgängen zwischen den Epochen zu bekommen. Sie ist besonders anschaulich, wenn eine Überhöhung gewählt wurde, wie in Abbildung 30 zu erkennen ist. Die Beurteilung der Verformung stellt so für den photogrammetrischen Laien kein Hindernis dar.



Kamera : P31 100mm



Kamera :DCS 55mm

**Abbildung 30: 3D-Darstellung der Differenzmodelle, Überhöhung 50-fach**

## 7. Zusammenfassung

Zunächst werden die Fragestellungen dieser Arbeit beantwortet. Danach wird kurz erwähnt, wie die Erkenntnisse dieser praktischen Arbeiten von 1997 in Experimenten mit richtigen Türen in der Klimakammer vom ÖHFI angewandt wurden. Abschließend werden andere Möglichkeiten dargestellt mittels derer die Aufgabenstellung aus heutiger Sicht gelöst werden könnte.

### 7.1. Ergebnisse

Zwei Fragestellungen wurden in dieser Arbeit untersucht:

- a) **Kann Photogrammetrie unter Verwendung einer analogen Messbildkamera und einem digitalen Arbeitsfluss die Fehlergrenzen einhalten?**

Der Vergleich der analogen Messbildkamera mit der digitalen Amateurkamera war schon ausgehend vom Bildmaßstab stark unterschiedlich. Das professionelle Kamerasystem liefert eine viermal größere Abbildung des Objektes.

Die Einhaltung der vom Österreichischen Holzforschungsinstitut gewünschten Fehlergrenze von 0,2 mm für die Oberfläche des Differenzmodells war für das Auswerteverfahren mit einer analogen Messbildkamera möglich.

ORPHEUS war 1997 erst als Monokomparator fertig gestellt worden und konnte so einem weiteren Praxistest unterzogen werden. Das Programm ORIENT zur Berechnung des Bündelblockausgleichs zählt hingegen zu den Standardverfahren des IPF. Das Programm CENTROID wurde im Zuge dieser Arbeit einem weiteren Test unterzogen, was zu kleineren Verbesserungen an diesem Programm führte.

Die Koordinaten für die Bestimmung des Zentrums wurden in einem zweistufigen Verfahren berechnet. Eine hohe Anzahl von Bildkoordinaten wurde semi-automatisch für jede Epoche bestimmt. Dies stellte einen wesentlichen Schritt für die Auswertung von signalisierten Punkten in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie dar.

Eine Aufgabe dieser Arbeit war es, die quadratischen Fenstergrößen für die Bestimmung des Zentrums zu ermitteln. Für die analoge Messbildkamera wurde eine Fenstergröße von 15 Pixeln im ersten Durchgang und 12 Pixeln zweiten Durchgang ermittelt. Die Amateurkamera benötigte eine Fenstergröße von 10 Pixeln und 8 Pixeln um 97% der Punkte korrekt zu bestimmen.

Von den 180 signalisierten Punkten pro Bild wurden circa 5 Punkte bei der automatischen Bestimmung der Bildkoordinaten nicht an die richtige Stelle gesetzt. Das sind weniger als 3% falsch gesetzte Punkte. Die anschließende Bündelblockausgleichung konnte jedoch den Einfluss der falsch gemessenen Bildkoordinaten mit Hilfe der robusten Schätzung minimieren.

Die Oberflächenmodellierung und die Ableitung von Isolinien erfolgten im Programm SCOP. Die Verknüpfung der einzelnen Programme über ihre Schnittstellen war ohne größeren Aufwand möglich. Der direkte digitale Datenfluss war überall gegeben. Einer rein digitalen Auswertung stand nichts im Wege.

**b) Ist dies anno 1997 unter Verwendung einer digitalen Kamera auch möglich?**

Die Genauigkeit der Auswertungen, die aus den Daten der Digitalkamera gewonnen wurden, liegen bei der Einzelpunktauswertung und bei der Oberfläche des Differenzmodells über der geforderten Genauigkeit von 0,2 mm.

Um mit der Digitalkamera DCS 460 genauere Ergebnisse zu erreichen, müssten Parameter der Konfiguration geändert werden. Der Bildmaßstab ist für die Genauigkeit der Ergebnisse verantwortlich. Um diesen zu verbessern, kann die Aufnahmeentfernung verringert werden oder eine Kamera mit höherer Auflösung verwendet werden. Eine andere Kamera stand nicht zur Verfügung und eine kleinere Aufnahmeentfernung hätte zur Folge, dass die Anzahl der notwendigen Bilder stark anwächst. Mit der Anzahl der Bilder (pro Objektpunkt) verbessert sich zwar generell die Genauigkeit, bei der Arbeit 1997 wurde aber darauf geachtet, dass Messbildkamera und Digitalkamera dieselbe Bildanzahl verwenden.

Aus heutigem Standpunkt stellt die Bilderanzahl bei nahezu vollautomatischer Prozesskette aber kein wirkliches Hindernis mehr da.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit konnte der Einsatz der analogen Messbildkamera für den Einsatz in der Klimakammer am Österreichischen Holzforschungsinstitut empfohlen werden. Diese Auswertung wurde im Rahmen eines von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft geförderten Projektes durchgeführt.

## 7.2. Die durchgeführten Arbeiten am ÖHFI

In der Klimakammer des ÖHFI wurden in zwei Serien zu jeweils zwei Epochen Laubgangtüren vermessen. Es konnten jeweils sechs Türen gleichzeitig einer Belastung mit Differenzklima ausgesetzt werden. Die Zeitpunkte der Aufnahmen sind in Tabelle 11 dargestellt.

Serie / Epoche	Vorher	Nachher
1.Serie	23.06.1999	03.08.1999
2.Serie	09.08.1999	13.09.1999

**Tabelle 11: Zeitpunkte der Aufnahme**

Jede Tür wurde mit 102 Messmarken versehen, die in einem Abstand von 15 cm angebracht wurden. Zum leichteren Anbringen wurden jeweils sechs Messmarken auf einem doppelseitigen Klebestreifen befestigt, wie in Abbildung 31 zu sehen ist.

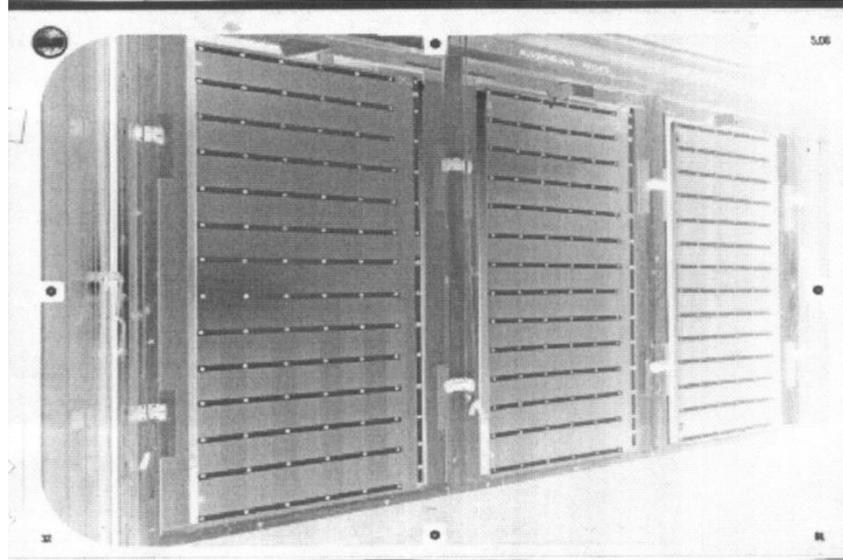


Abbildung 31: Aufnahme in der Klimakammer

Dazu wurde eine analoge Messbildkamera (UMK Zeiss) verwendet. Bei 2 m Aufnahmeentfernung konnte ein Bildmaßstab von 1:20 erreicht werden. Die Anordnung der 16 Aufnahmen pro Epoche wurde so gewählt, dass jeder Messpunkt auf mindestens 4 Fotos sichtbar war.

In Tabelle 12 ist die Genauigkeit der Oberfläche der einzelnen Epochen in Millimeter angegeben. Die Zeile „Differenz“ gibt die Genauigkeit nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz an. In der Zeile „Fläche“ ist die Genauigkeit der „Differenz“ reduziert um den Faktor 2 ausgewiesen (ungefährer Genauigkeitsgewinn aufgrund der Interpolation).

Serie 1						
Tür	1	2	3	4	5	6
Vorher	0,08	0,14	0,13	0,23	0,18	0,22
Nachher	0,25	0,18	0,19	0,21	0,17	0,25
Differenz	0,26	0,23	0,23	0,31	0,25	0,33
Fläche	0,13	0,12	0,12	0,16	0,12	0,16
Serie 2						
Tür	1	2	3	4	5	6
Vorher	0,12	0,13	0,24	0,13	0,13	0,22
Nachher	0,13	0,16	0,23	0,14	0,15	0,18
Differenz	0,18	0,21	0,33	0,19	0,20	0,28
Fläche	0,09	0,11	0,17	0,10	0,10	0,14

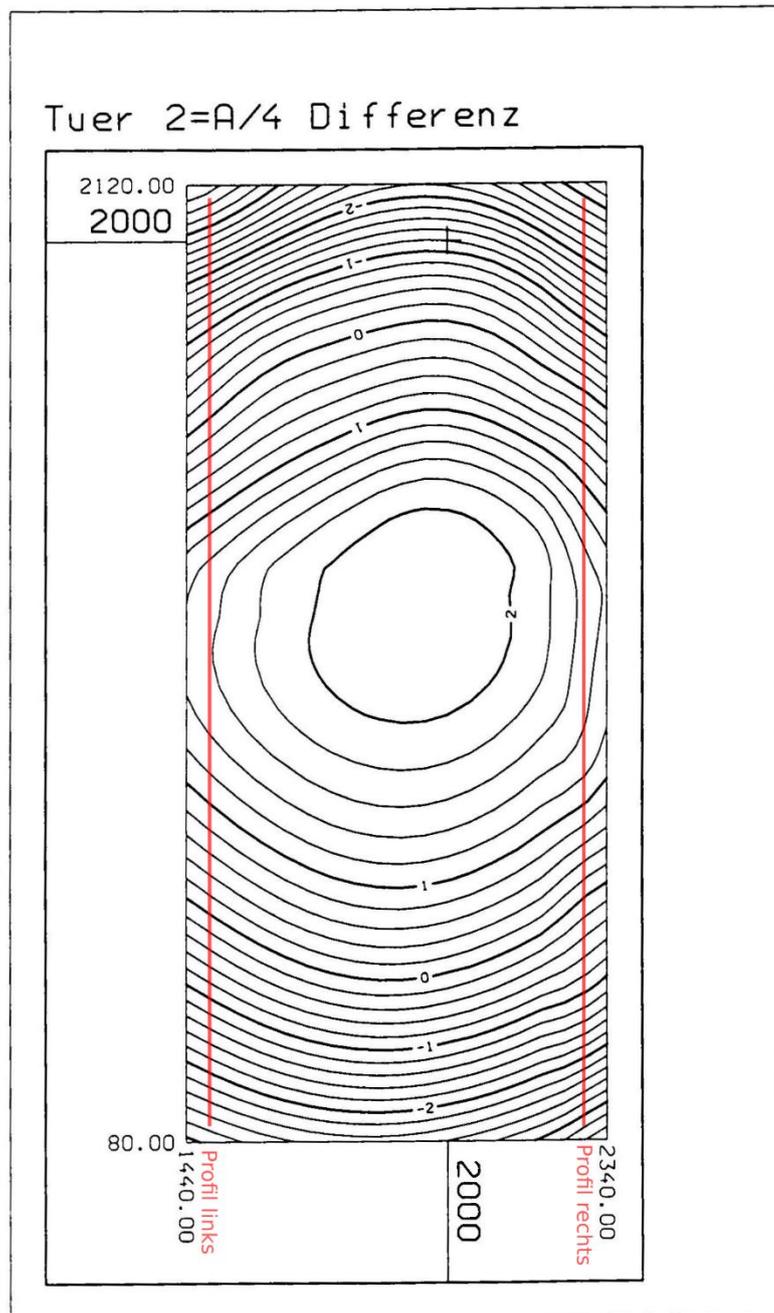
Tabelle 12: Genauigkeiten am ÖHFI

Zur Darstellung der Deformationen wurden Isolinienplots mit einem Intervall von 0,2 mm erstellt. Zusätzlich wurden Profile ausgegeben, deren Schnittlinien sich an derselben Stelle befinden, wie die Messungen der Kantendurchbiegung des ÖHFI.



In Abbildung 33 sind die Isolinien zu den oben gezeigten Profilen dargestellt.

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU - Wien



Isolinienintervall: 0.2 mm  
Maße in [mm]

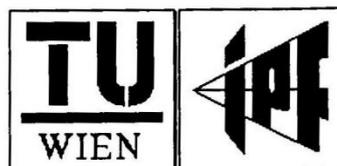


Abbildung 33: Isolinien ÖHFI

### 7.3. Ausblick und andere Verfahren

Die Nahbereichsphotogrammetrie ist einem starken, zeitlichen Wandel unterworfen. Aktuelle Digitalkameras besitzen eine vielfach höhere Auflösung, als die in dieser Arbeit verwendete Kamera. Neue Nahbereichslaserscanner sind für die Aufgaben der Deformationsmessung hinzugekommen. Eine kurze Beschreibung von Instrumenten zeigt aktuelle Alternativen auf.

Eine **hochauflösende digitale Spiegelreflexkamera**, die derzeit in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt wird, ist die Nikon D 800. Ihr CMOS-Sensor im FX-Format hat eine Auflösung von 36,3 Megapixeln. Es kann wahlweise der Sucher oder der eingebauten Bildschirm mit 8 cm Diagonale verwendet werden. Eine große Anzahl an Objektiven steht zur Auswahl, denn es können auch ältere Objektive der Firma Nikon verwendet werden (manche mit Funktionseinbußen). Durch eine geringe Masse von 1 kg ist diese Kamera auch für viele Spezialanwendungen einsetzbar. Die Bilder werden auf SD- und CF-Karten gespeichert. Neben der automatischen Fokussierung ist auch die manuelle Scharfstellung möglich.

Eine weitere Alternative stellen **Triangulationsscanner** dar. Dabei handelt es sich um einen berührungslosen 3D-Digitizer (Laserscanner), der nach dem Triangulationsverfahren arbeitet. Mit einem Laser als Lichtquelle wird ein Profil auf ein Objekt projiziert. Dieses wird von einer Kamera aufgenommen, die einen bekannten Abstand zur Lichtquelle hat. Für jeden Punkt werden die Bildkoordinaten und der Winkel gemessen. Daraus werden die drei Koordinaten des Objektpunktes, wie in (KRAUS, 2004) beschrieben, berechnet. Solche Messsysteme können Objekte vollautomatisch auswerten und als Fotomodell darstellen. Ein am Markt befindliches Produkt ist das Gerät VIVID 910 von Konica/Minolta, das in Abbildung 34 zu sehen ist. Mit einem Scan lassen sich damit Objekte mit einer Ausdehnung von maximal 95 x 110 cm auf einmal auswerten. Die Genauigkeit einer solchen Auswertung wird vom Hersteller mit 0,1 mm angegeben. In (SPITZER, 2009) wird eine Anwendung mit diesem Instrument für schwer zugängliche Objekte beschrieben.



Abbildung 34: Triangulationsscanner, [www.minolta.com](http://www.minolta.com)

Eine dritte Alternative stellt der **Messarm** dar. Dieser ermöglicht die Ortsveränderung des Laserscanners. So können kleine und leichte Laserscanner für den Nahbereich Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen erstellen. Daraus lässt sich ein 3D-Modell des Objektes berechnen. Eine taktile Spitze ermöglicht die Aufnahme von Einzelpunkten. Ein Beispiel dafür ist der FARO Edge ScanArm HD, der in Abbildung 35 zu sehen ist. Die maximale Entfernung bei diesem Gerät beträgt 3m. Die Genauigkeit ist mit 0,3 - 0,07 mm angegeben.



Abbildung 35: Messarm, [www.faro.com](http://www.faro.com)

## 8. Verzeichnisse

### 8.1. Literaturverzeichnis

ACKERMANN, F. & HAHN, M., 1991. *Image Pyramids for digital Photogrammetry*. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag.

BALLIK, C., 1989. *Signalisierung in der Präzisionsphotogrammetrie mit retroreflektierendem Material, Diplomarbeit*. Wien: TU-Wien.

BAYER & BRYCE, E., 1975. *Color imaging array*. USA, Patentnr. US3971065 A.

EASTMAN KODAK COMPANY, 1997. *Kodak.com*. <ftp://ftp.kodak.com/web/service/manuals/dcs/1h6359.pdf> [Zugriff am 02 05 2015].

FABIANKOWITSCH, J., 1990. *Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern, Dissertation*. Wien: TU-Wien.

KAGER, H., 1989. *ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjust System*. Karlsruhe: Wichman Verlag.

KAGER, H., ROTTENSTEINER, F., KERSCHNER, M. & STADLER, P., 2002. *ORPHEUS 3.2.1 User Manual..* Wien: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technologie.

KRAUS, K., 1990. *Photogrammetrie, Grundlagen und Standardverfahren, 3. Auflage*. Wien: Ferd. Dümmers Verlag; Bonn.

KRAUS, K., 1996. *Photogrammetrie, Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Bonn: Ferd. Dümmers Verlag.

KRAUS, K., 2000. *Photogrammetrie, Topographische Informationssysteme*. Köln: Dümmeler- Verlag H. Stam GmbH.

KRAUS, K., 2004. *Photogrammetrie*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.

KROPATSCH, W., 1991. *Image Pyramids and Curves; An Overview, Technical Report*. Wien: Dep. for Pattern Recognition and Image Processing of the Institute for Automation at the TU-Wien.

LUHMANN, T., 2000. *Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen Methoden Anwendungen*. Oldenburg: Wichmann Verlag.

MAAS, H.-G., 1992. *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Zürich: Dissertation ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie.

OTEPKA, J., 2005. *Precision Target Mensuration in Vision Metrology, Dissertation.* Wien: TU-Wien.

SPITZER, A., 2009. *Verwendung von Spiegeln zur vollständigen photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion von schwer zugänglichen Objekten.* Wien: Diplomarbeit TU-Wien.

WILD, E., 1983. *Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen.* München: Dissertation: Universität Stuttgart.

ZUMBRUNN, R., 1995. *Optical Engineering; Systematic pointing errors with retroreflective targets.*

ÖNORM B5330 Teil 1 *Innentüren - Teil 1: Allgemeine Maße; 2012, Austrian Standards, Wien*

ÖNORM EN 79 *Prüfverfahren für Türen; Verhalten von Türblättern zwischen zwei unterschiedlichen Klimaten, 1986, Austrian Standards, Wien*

ÖNORM EN 24 *Türen; Prüfung von Fehlern in der allgemeinen Ebenheit von Türblättern, 1976, Austrian Standards, Wien*

ÖNORM EN 43 *Prüfverfahren an Türen; Verhalten von Türblättern unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen in aufeinanderfolgenden, allseitig einheitlich einwirkenden konstanten klimatischen Verhältnissen, 1986, Austrian Standards, Wien*

## 8.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messanordnung für die Kantenverformung .....	6
Abbildung 2: Messanordnung für die Bestimmung der Verwindung .....	7
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten (KRAUS, 2004).....	8
Abbildung 4: Terrestrischer Normalfall (KRAUS, 2004).....	9
Abbildung 5: Allgemeine Anordnung eines Bildverbandes (KRAUS, 2004) .....	9
Abbildung 6: Dreidimensionale Darstellungen von Geländemodellen.....	10
Abbildung 7: Ausstellungstafel als Ersatz für eine Tür .....	11
Abbildung 8: Filmnegativ der analogen Messbildkamera P31 .....	12
Abbildung 9: Aufnahmesituation P31 .....	13
Abbildung 10: Bayer-Matrix .....	14
Abbildung 11: Histogramm DCS original und mit veränderter Tonwertverteilung .....	14
Abbildung 12: Die Kodak DCS 460 wird für die Aufnahme vorbereitet .....	15
Abbildung 13: Verhältnis der fotografischen Abbildung.....	15
Abbildung 14 Schärftiefe für die Digitalkamera .....	18
Abbildung 15: Anordnung der Aufnahmeorte .....	19
Abbildung 16: Klebmarken in unterschiedlichen Auflösungen .....	21
Abbildung 17: Klebmarke aus eigener Produktion .....	22

Abbildung 18: Koordinatensystem eines digitalen Bildes .....	23
Abbildung 19: Bildpyramiden.....	24
Abbildung 20: Objektkoordinatensystem und Passstrecken .....	25
Abbildung 21: Das Programm ORPHEUS bei der Messung von Bildkoordinaten .....	28
Abbildung 22: Fehlerellipsen, unbelastet, P31, Fehlermaßstab 100/3 .....	34
Abbildung 23: Fehlerellipsen, belastet, P31, Fehlermaßstab 100/3 .....	35
Abbildung 24: Fehlerellipsen, unbelastet, DCS, Fehlermaßstab 100/3 .....	36
Abbildung 25: Fehlerellipsen, belastet, DCS, Fehlermaßstab 100/3 .....	37
Abbildung 26: Höhengschichtenlinien, unbelastet, P31, Äquidistanz 0,5 mm.....	42
Abbildung 27: Höhengschichtenlinien, belastet, P31, Äquidistanz 0,5 mm.....	43
Abbildung 28: Isolinien des Differenzmodells, P31, Äquidistanz 0,5 mm.....	44
Abbildung 29: Isolinien des Differenzmodells, DCS, Äquidistanz 0,5 mm .....	45
Abbildung 30: 3D-Darstellung des Differenzmodells, Überhöhung 50-fach .....	46
Abbildung 31: Aufnahme in der Klimakammer.....	49
Abbildung 32: Profil Kantenverformung ÖHFI.....	50
Abbildung 33: Isolinien ÖHFI .....	51
Abbildung 34: Triangulationsscanner, <a href="http://www.minolta.com">www.minolta.com</a> .....	52
Abbildung 35: Messarm, <a href="http://www.faro.com">www.faro.com</a> .....	53

### 8.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Genauigkeiten der Verformung.....	4
Tabelle 2: Vergleich der Kameradaten.....	16
Tabelle 3: Vergleich der Bildmaßstäbe .....	16
Tabelle 4: Vergleich der Signalgröße im Bild.....	17
Tabelle 5: Zu erwartende Genauigkeiten der Punktauswertung in der Lage .....	20
Tabelle 6: Zu erwartende Höhengenaugigkeit .....	20
Tabelle 7: zwangsfreie Lagerung .....	27
Tabelle 8: Mittlerer Lagefehler der Ausgleich .....	38
Tabelle 9: Höhengenaugigkeit der Fläche.....	40
Tabelle 10: Durchschnittliche Filterbeträge .....	41
Tabelle 11: Zeitpunkte der Aufnahme.....	48
Tabelle 12: Genauigkeiten am OHFI .....	49

## 9. Anhang

Quelle: (EASTMAN KODAK COMPANY, 1997)

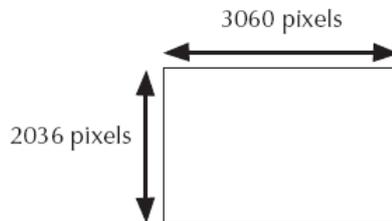
KODAK PROFESSIONAL DCS 460 Digital Camera

DCS 460 Camera Specifications

- Image storage on removable PC cards, Type III; 42 images per 260 MB
- 12 bits/color
- Normal operation for camera exposure with all metering modes available
- 18.4 x 27.6-mm imager magnifies focal length only 1.3X
- SCSI interface with host
- DCS 460 Color: ISO 80
- DCS 460 Mono: ISO 160
- Continuous-frame capture rate of approximately 12 seconds/image
- 250 images per battery charge, with 1 hour to recharge
- AC adapter/charger power requirements: 50/60 Hz, 100, 120, 220, 240 V AC
- Approximate size: 6.7in.W x 4.5in. D x 8.2 in. H (170mm x 114mm x 208mm)
- Weight (without lens): 3.75 lbs. (1.70 kg)
- Certified FCC Class B, UL, CSA, TUV

DCS 460 (both models) —

Width 27.6 mm x 18.4 mm, 3060 x 2036-pixels.



55 mm Objektiv

## 10. Lebenslauf

Werner EBERHARD



Geboren:	25. 12. 1966 in Wien
Vater: Dr. h.c. Günter EBERHARD	Berufsschulinspektor
Mutter: Helga HEIN-KRAUS	Bundesdienst
Ausbildung:	
Volksschule in Wien 22	1973 – 1977
Hauptschule in Wien 22	1977 – 1981
HTL Hochbau in Krems	1981 – Juni 1986
Studium Vermessungstechnik	seit 1986
Abschluss des Lehramtsstudium für Berufsschulen an der Berufspädagogischen Akademie	15. 6. 2007
Berufserfahrung:	
Ferialpraktikum im Bauwesen – Baustelle	Sommer 1983
Ferialpraktikum im Bauwesen - Architekt	Sommer 1985
Höhlenführer am Untersberg in Deutschland	Sommer 1989
Grenzstein Kontrolle für die ÖBF	Sommer 1991
Lehrtätigkeit am WIFI	seit 1992
Zivildienst beim Roten Kreuz	1996 – 1997
Fa. E&W, Projektbetreuer	1997 – 1999
Forschungsprojekt am IFP Holztüren	Juni-Dez 1999
Lehrer an der Berufsschule für Baugewerbe	seit 1999
Lehrer an der Werkmeisterschule	seit 2001
Rettungssanitäter beim Roten Kreuz	1990-2000
Lehrbeauftragter für Erste Hilfe	1995-2005
Vaterschaftskarenz	2013