

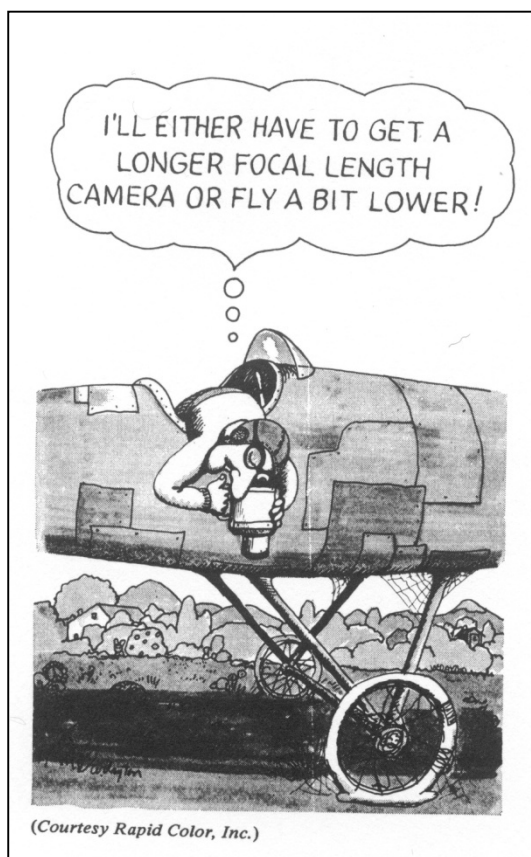


In bunten Bildern wenig Klarheit,
Viel Irrtum und ein Fünkchen Wahrheit,
So wird der beste Trank gebraut,
Der alle Welt erquickt und aufbaut. (Johann Wolfgang v. Goethe)



LV 522.203
SS 2025 2 VO

Photogrammetrie



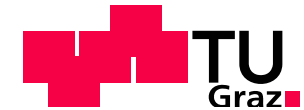
Viktor Kaufmann
Institut für Geodäsie
AG Fernerkundung und Photogrammetrie
Technische Universität Graz
Steyrergasse 30, A-8010 Graz

Tel.: +43 316 873-6336
Fax: +43 316 873-6337
Email: viktor.kaufmann@tugraz.at
www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/



Photogrammetrie

Inhaltsverzeichnis



1. Einleitung

- 1.1 Begriffsbestimmung
- 1.2 Einteilung der Photogrammetrie
- 1.3 Photogrammetrische Produkte
- 1.4 Geschichtliche Betrachtungen
- 1.5 ISPRS
- 1.6 EuroSDR

2. Mathematisches Modell der zentralprojektiven Abbildung

- 2.1 Messbild
- 2.2 Koordinatensysteme
- 2.3 Strahlenbündel
 - 2.3.1 Mathematische Grundlagen
 - 2.3.2 Grundgleichungen der Photogrammetrie
 - 2.3.3 Normalfall
 - 2.3.4 Differentialformen für den genäherten Normalfall

3. Herstellen von Messbildern

- 3.1 Optische Grundlagen
 - 3.1.1 Optische Abbildung
 - 3.1.2 Abbildungsfehler
 - 3.1.2.1 Verzeichnung
 - 3.1.2.2 Chromatische Aberration
 - 3.1.3 Scharfabbildung
 - 3.1.3.1 Scheimpflugbedingung
 - 3.1.3.2 Tiefenschärfe
 - 3.1.3.3 Beugungs- und Bewegungsunschärfe
- 3.2 Luftbildaufnahme
 - 3.2.1 Luftbildmesskamera
 - 3.2.2 Luftbildfilme
 - 3.2.3 Flugplanung und Bildflug

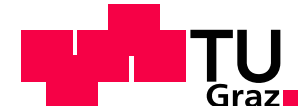
- 3.2.4 Luftbildarchiv des BEV
- 3.2.5 Kalibrierungsprotokoll
- 3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme
- 3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

4. Einbildauswertung

- 4.1 Wiederherstellung der inneren Orientierung
 - 4.1.1 Rahmenmarken und Réseau
 - 4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung
 - 4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung
- 4.2 Geometrische Auswertung der strengen Senkrechtaufnahme
- 4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme
 - 4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt
 - 4.3.2 Direkte lineare Transformation (DLT)
- 4.4 Geometrische Auswertung der genäherten Senkrechtaufnahme in der Praxis
 - 4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)
 - 4.4.1.1 Analytische Koordinatenbestimmung
 - 4.4.1.2 Photographische Umbildung
 - 4.4.1.3 Digitale Entzerrung
 - 4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialentzerrung)
 - 4.4.2.1 Digitales Geländemodell
 - 4.4.2.2 Monoplotting
 - 4.4.2.3 Photographische Umbildung
 - 4.4.2.4 Digitale Orthophotoherstellung
 - 4.4.2.5 Stereoorthophotos
 - 4.4.2.6 True Orthophoto



Photogrammetrie Inhaltsverzeichnis



5. Zweibildauswertung

- 5.1 Räumliches Sehen
 - 5.1.1 Natürliches räumliches Sehen
 - 5.1.1.1 Monokulares Sehen
 - 5.1.1.2 Binokulares Sehen
 - 5.1.2 Künstliches räumliches Sehen
- 5.2 Normalfall der Zweibildauswertung
 - 5.2.1 Grundlagen und Definitionen
 - 5.2.2 Räumlicher Vorwärtsschnitt
 - 5.2.3 Fehlertheorie des Normalfalles
- 5.3 Einfache Messung von kleinen Höhenunterschieden
 - 5.3.1 Stereoskopisches Messprinzip
 - 5.3.2 x-Parallaxe
 - 5.3.3 Praktische Durchführung
- 5.4 Orientierung eines Stereobildpaares
 - 5.4.1 Motivation und Definition
 - 5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung
 - 5.4.2.1 Relative Orientierung
 - 5.4.2.2 Absolute Orientierung
- 5.5 Stereoauswertegeräte
 - 5.5.1 Analogauswertegeräte
 - 5.5.2 Analytische Auswertegeräte
 - 5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen
- 5.6 Auswerteelemente und Genauigkeiten
- 5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie
 - 5.7.1 Bildpyramide
 - 5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern
 - 5.7.3 Digitale Punktübertragung
 - 5.7.4 Digitalisieren von analogen Bildvorlagen

6. Mehrbildauswertung

- 6.1 Motivation und Definition
- 6.2 Methoden
 - 6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 - 6.2.2 Bündelblockausgleichung

7. Laserscanning

- 7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning
- 7.2 Terrestrisches Laserscanning
- 7.3 Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie

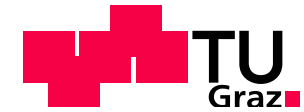
Anhang

- Literaturquellen
- Konferenzen und Fortbildungskurse
- Photogrammetrie-Adressen im WWW



Photogrammetrie EF

Inhaltsverzeichnis



1. Einleitung

- 1.1 Begriffsbestimmung
- 1.2 Einteilung der Photogrammetrie
- 1.3 Photogrammetrische Produkte
- 1.4 Geschichtliche Betrachtungen
- 1.5 ISPRS
- 1.6 EuroSDR, DGPF, ASPRS

2. Mathematisches Modell der zentralprojektiven Abbildung

- 2.1 Messbild
- 2.2 Koordinatensysteme
- 2.3 Strahlenbündel
 - 2.3.1 Mathematische Grundlagen
 - 2.3.2 Grundgleichungen der Photogrammetrie
 - 2.3.3 Normalfall

3. Herstellen von Messbildern

- 3.1 Optische Grundlagen
 - 3.1.1 Optische Abbildung
 - 3.1.2 Abbildungsfehler
 - 3.1.2.1 Verzeichnung
 - 3.1.2.2 Chromatische Aberration
- 3.2 Luftbildaufnahme
 - 3.2.1 Luftbildmesskamera
 - 3.2.2 Luftbildfilme
 - 3.2.3 Flugplanung und Bildflug
 - 3.2.4 Luftbildarchiv des BEV
 - 3.2.5 Kalibrierungsprotokoll
 - 3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme
 - 3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

4. Einbildauswertung

- 4.1 Wiederherstellung der inneren Orientierung
 - 4.1.1 Rahmenmarken und Réseau
 - 4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung
 - 4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung
- 4.2 Geometrische Auswertung der strengen Senkrechtaufnahme
- 4.4 Geometrische Auswertung der genäherten Senkrechtaufnahme in der Praxis
 - 4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)
 - 4.4.2.1 Digitales Geländemodell
 - 4.4.2.2 Monoplotting
 - 4.4.2.3 Photographische Umbildung
 - 4.4.2.4 Digitale Orthophotoherstellung
 - 4.4.2.5 Stereoorthophotos
 - 4.4.2.6 True Orthophoto



Photogrammetrie EF

Inhaltsverzeichnis



5. Zweibildauswertung

- 5.1.1.2 Binokulares Sehen
- 5.1.2 Künstliches räumliches Sehen
- 5.2 Normalfall der Zweibildauswertung
 - 5.2.1 Grundlagen und Definitionen
 - 5.2.2 Räumlicher Vorwärtsschnitt
 - 5.2.3 Fehlertheorie des Normalfalles
- 5.4 Orientierung eines Stereobildpaares
 - 5.4.1 Motivation und Definition
 - 5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung
 - 5.4.2.2 Absolute Orientierung
- 5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen
- 5.6 Auswerteelemente und Genauigkeiten
- 5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie
 - 5.7.1 Bildpyramide
 - 5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern
 - 5.7.3 Digitale Punktübertragung
 - 5.7.4 Digitalisieren von analogen Bildvorlagen

6. Mehrbildauswertung

- 6.1 Motivation und Definition
- 6.2 Methoden
 - 6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 - 6.2.2 Bündelblockausgleichung

7. Laserscanning

- 7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning
- 7.2 Terrestrisches Laserscanning
- 7.3 Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie

Anhang

- Literaturquellen
- Konferenzen und Fortbildungskurse
- Photogrammetrie-Adressen im WWW



1. Einleitung

1.1 Begriffsbestimmung

Unter **Photogrammetrie** (engl. **photogrammetry**) versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objektes *indirekt* dessen Form und Lage durch **Bildmessungen** sowie dessen inhaltliche Beschreibung durch **Bildinterpretation** zu gewinnen (Luhmann 2000).

Primäres Ziel einer photogrammetrischen Messung ist die exakte dreidimensionale (3D) geometrische Rekonstruktion des Objektes, wobei das Objekt in digitaler (Koordinaten, abgeleitete geometrische Elemente) oder graphischer Form (Bilder, Pläne, Karten) modelliert wird. Daneben stellt das Bild einen Informationsspeicher dar, auf dem zu jedem Zeitpunkt, auch für eine inhaltliche Interpretation, zurückgegriffen werden kann.

Das Wort **Photogrammetrie** enthält drei griechische Wortstämme:

photos	φωτόζ	Licht	vgl. Photon, Phosphor, Photosynthese, Photographie
gramma	γράμμα	Aufzeichnung (Buchstabe, Zeichen), Geschriebenes	vgl. Grammophon, Grammatik, Gramm
metron	μέτρον	Maß	vgl. Metronom [Taktmesser], Metrologie [Maß- und Gewichtskunde]

Die Begriffsprägung »**Photogrammetrie**« erfolgte durch *Albrecht Meydenbauer* im Jahre 1867. Meydenbauer hatte schon seit 1858 Versuche zur Architektur- und Bauvermessung mittels Phototheodolits angestellt. Meydenbauer (1834-1921) sprach selbst meist vom „Messbildverfahren“ oder gar von der „**Messbildkunst**“. Vor der Einführung des Wortes Photogrammetrie sprach man von der Photographometrie, Photometrographie, Metrophotographie bzw. Ikonometrie.

Wie schreibt man dieses Wort eigentlich?

- Duden (neue deutsche Rechtsschreibung): PHOTOGRAMMETRIE
- Die Fachwelt (DGPF, ÖVG, SGPBF) hat Ende 1999 entschieden: PHOTOGRAMMETRIE .
Wort kommt nur in der Fachsprache vor!
- Photogrametrie (abgeleitet von Photographometrie) versus Photogrammetrie (abgeleitet von Photogramm).



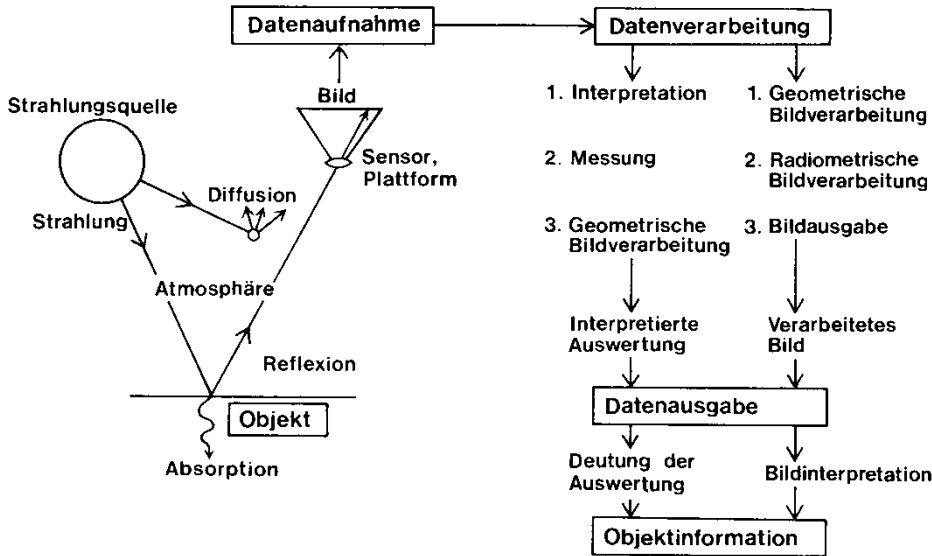
1. Einleitung

1.1 Begriffsbestimmung

Photogrammetrie ist ein Verfahren der **Fernerkundung** (engl. remote sensing).

Offizielle Definition der Int. Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung:

"Photogrammetry and remote sensing is the science, technology and art of obtaining reliable information about the Earth and its environments, and about other physical objects and processes, through the process of recording, measuring, interpreting, and displaying imagery and digital representations thereof derived from non-contact sensor-systems." (Torlegård 1992; ISPRS 1993)

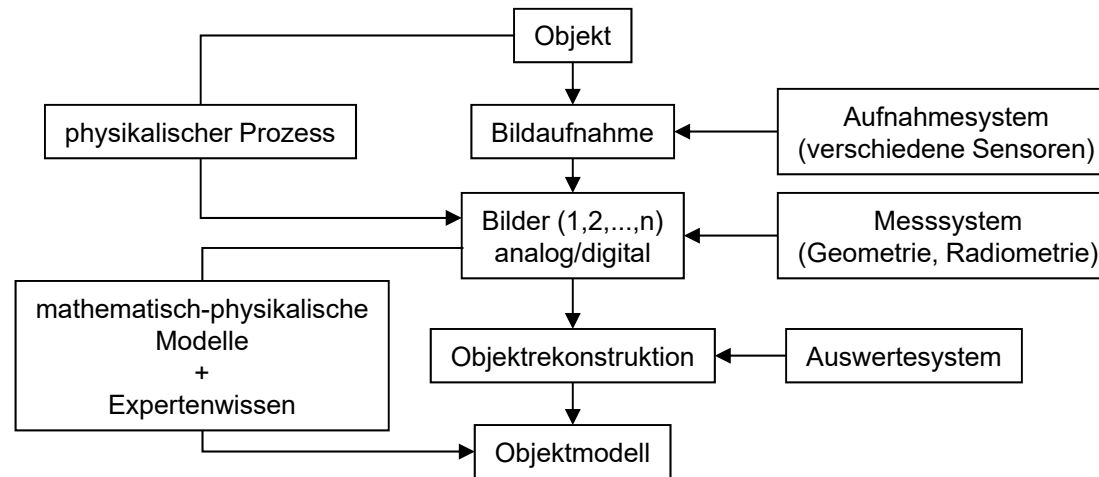


Prozess der Fernerkundung (aus Konecny & Lehmann 1984).



1. Einleitung

1.1 Begriffsbestimmung



Vom Objekt zum Modell (modifiziert nach Luhmann 2000).



1. Einleitung

1.2 Einteilung der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie kann man nach verschiedensten Gesichtspunkten einteilen:

- **nach der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung für die Abbildung;**
(Röntgenstrahlen, sichtbares Licht, nahes Infrarot, Thermalstrahlung, Mikrowellen, etc.)
- **nach der Anzahl der Medien, in denen gemessen wird;**
Einmedien-(meist Luft), Zweimedien-(Luft/Wasser oder Vakuum) und Mehrmedienphotogrammetrie
- **nach der Anzahl der gemeinsam ausgewerteten Aufnahmen;**
Einbild-, Zweibild- und Mehrbildphotogrammetrie
- **nach dem Standort des Aufnahmesystems und der Entfernung zum Objekt;**
 - Mikro-/Makrophotogrammetrie (vgl. Rasterelektronenmikroskopaufnahmen)
 - Nahbereichsphotogrammetrie: $h < 300$ m
 - Terrestrische Photogrammetrie = Aufnahme von erdfesten Standpunkten
 - Aerophotogrammetrie = Aufnahme vom Flugzeug, Ballon, Hubschrauber, etc., $h > 300$ m
 - Satellitenphotogrammetrie: $h < 200$ km, erdnahe Weltraum; bemannt/unbemannt; vgl. SSEOP
 - Extraterrestrische Photogrammetrie: Mond, Venus, Mars
- **nach der Art des aufgenommenen Objektes;**
Topographische Photogrammetrie, Katasterphotogrammetrie, Architekturphotogrammetrie, Archäologische Photogrammetrie, Gletscherphotogrammetrie, Medizinische Photogrammetrie, Industriephotogrammetrie, Forensische Photogrammetrie (forensisch, lat. gerichtlich)
- **nach dem Aufnahme- und Auswerteverfahren;**
 - Messtischphotogrammetrie: graphisch-zeichnerische Auswertung (bis ca. 1930)
 - Analogphotogrammetrie: analoge Kameras, optisch-mechanische Auswertesysteme (bis 1980)
 - Analytische Photogrammetrie: analoge Bilder, rechnerische Auswertung
 - Digitalphotogrammetrie: digitale Bilder, rechnerische Auswertung
- **nach der Verfügbarkeit der Messergebnisse;**
 - Realtime-Photogrammetrie: Aufnahme und Auswertung in Echtzeit
 - Offline-Photogrammetrie: sequentielle Bildaufnahme, zeitlich und räumlich getrennte Auswertung
 - Online-Photogrammetrie: simultane digitale Mehrbildaufnahme, unmittelbare Auswertung
- **nach der Art des Aufnahmeegerätes;**
 - Messkammer
 - Réseaukamera
 - Nichtmesskamera
 - Amateurkamera
 - andere Fernerkundungssensoren (RADAR, opto-mechanischer Zeilenabtaster, etc.)



1. Einleitung

1.2 Einteilung der Photogrammetrie

Art der Strahlung	Wellenlänge nm = 10^{-9} m	Frequenz GHz = 10^9 Hz MHz = 10^6 Hz KHz = 10^3 Hz		Verwendung	Detektor	
Kosmische Strahlung	10^{-13} – 10^{-16} m	$4,7 \cdot 10^{23}$ Hz $-3 \cdot 10^{24}$ Hz	Weltraum	–	Ionisationsdetektor	
γ -Strahlen	10^{-4} nm–0,4 nm	$8 \cdot 10^{17}$ $-4,7 \cdot 10^{21}$ Hz	begrenzt durch Atmosphäre	Radioaktivität	Ionisationsdetektor	
Röntgenstrahlen	0,4 nm–10 nm	$3 \cdot 10^{16}$ $-8 \cdot 10^{17}$ Hz	nur Nahbereich, Weltraum	Nahbereich	Phosphor	
Ultraviolett	10–380 nm	$7,9 \cdot 10^{14}$ $-3 \cdot 10^{16}$ Hz	schwach durch Atmosphäre	–	Phosphor	
sichtbares Licht	380–780 nm	$3,8 \cdot 10^{14}$ $-7,9 \cdot 10^{14}$ Hz	gut durch Atmosphäre	passive Fernerkundung, Sicht	Photographie Photodiode	
nah	780 nm– 1μ m	$3,0 \cdot 10^{14}$ $-3,8 \cdot 10^{14}$ Hz	gut durch Atmosphäre	passive Fernerkundung	Photographie Photodiode	
Infrarot	mittel	1μ m– 8μ m	$3,7 \cdot 10^{13}$ $-3,0 \cdot 10^{14}$ Hz	in Fenstern durch Atmosphäre	passive Fernerkundung	Quantumdetektor
thermal	8μ m–1 mm	$3 \cdot 10^{11}$ $-3,7 \cdot 10^{13}$ Hz	in Fenstern durch Atmosphäre Tag u. Nacht	passive Fernerkundung	Quantumdetektor	
Mikrowellen	1 mm–1 m	300 MHz –300 GHz	Tag u. Nacht durch Wolken hindurch	aktive Fernerkundung	Antenne	
Radio- wellen	UKW	1–10 m	30–300 MHz	Sichtweite	Fernsehen, Rundfunk	Antenne
	KW	10–100 m	3–30 MHz	weltweit	Rundfunk	Antenne
	MW	182 m–1 km	300–1650 KHz	regional	Rundfunk	Antenne
	LW	1–10 km	30–300 KHz	weltweit	Rundfunk	Antenne
Tonfrequenz	15–6000 km	50 Hz–20 KHz	Kabel	Tonübertragung	Kabel	
Wechselstrom	6000 km 18000 km	50 Hz $16\frac{2}{3}$ Hz	Kabel, Oberleitung	Energieversorgung, elektr. Bahn	Kabel	

In den Erdwissenschaften (Geodäsie, Geographie, etc.) spielt das Luftbild als Daten- bzw. Informationsträger eine große und wichtige Rolle.

→ **Luftbildphotogrammetrie** (Objekt = Mannigfaltigkeit der Erdoberfläche)

In den Ingenieurwissenschaften kommt auch die **Nahbereichsphotogrammetrie** oft zum Einsatz.

Das elektromagnetische Feld (aus Konecny & Lehmann 1984).

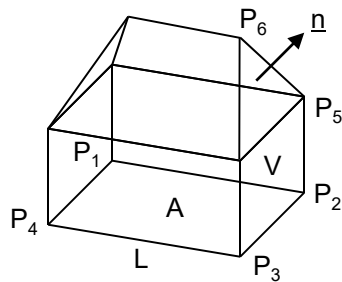


1. Einleitung

1.3 Photogrammetrische Produkte

Die Ergebnisse einer photogrammetrischen Auswertung können sein:

- Maßzahlen**, nämlich Koordinaten einzelner Objektpunkte in einem dreidimensionalen Koordinatensystem (= räumliche Punktbestimmung im Landes- oder Lokalsystem)



Punktnummer	X (m)	Y (m)	Z (m)
P1	X_1	Y_1	Z_1
P2	X_2	Y_2	Z_2
P3	X_3	Y_3	Z_3
P4	X_4	Y_4	Z_4
P5	---	---	Z_5
P6	X_6	Y_6	Z_6

abgeleitete Maßzahlen und andere geometrische Größen:

Fläche (A), Volumen (V), Höhe/Tiefe (Δh), Länge (L), Neigung und Exposition einer Fläche (\underline{n}), etc.

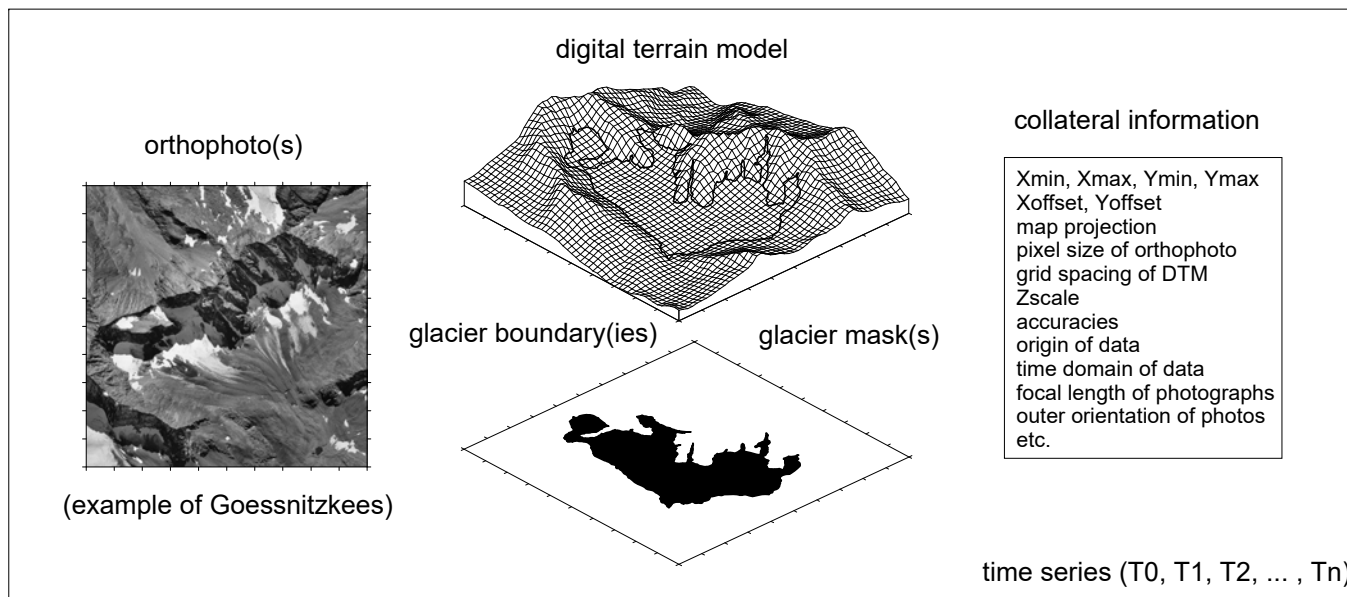
- Zeichnungen, d.h. Karten und Pläne** (analog und/oder digital) mit Grundriss- und Höhenlinien und sonstige graphischen Darstellungen der Objekte (des Geländes)
 - Topographische Karten: Abbild der Erdoberfläche
 - Photogrammetrische Manuskripte (= Kartenmanuskripte): Originalauswertungen im Kartiermaßstab
 - Lage- und Höhenpläne: Planungsgrundlagen für ingenieurtechnische Projekte
- Digitale Geländemodelle/ Oberflächenmodelle** (Punktwolke, Dreiecksvermaschung, Raster)
- Bilder** (photographisch oder digital), vor allem entzerrte Photographien (Orthophotos) und daraus hergeleitete Luftbildkarten, aber auch Photomontagen, Raumbilder und Computeranimationen
- Thematische Information** durch Klassifizierung der Bildinformation nach verschiedenen Merkmalen (Photointerpretation)

Diese photogrammetrischen Produkte bilden den Datenbestand eines **topographischen Informationssystems** (oder eines **GIS**).
 Voraussetzung hierfür ist, dass die Daten digital vorliegen (= das **digitale topographische Modell**).

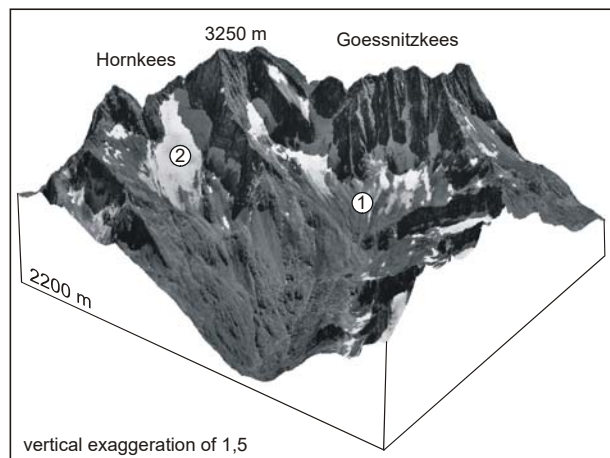


1. Einleitung

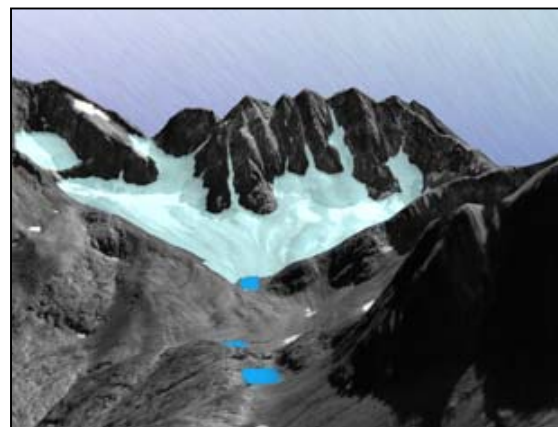
1.3 Photogrammetrische Produkte



Digitales topographisches Modell für Gletscherstudien.



Perspektivische Ansicht.

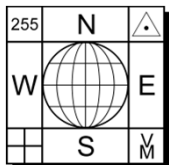


Einzelbild einer Videoanimation.

Investigations on the retreat of two small cirque glaciers (Goessnitzkees and Hornkees) in the Austrian Alps, Europe

<http://www.youtube.com/user/photogrammetrie>
(<http://www.youtube.com/watch?v=zhVl4t7WJf4>)



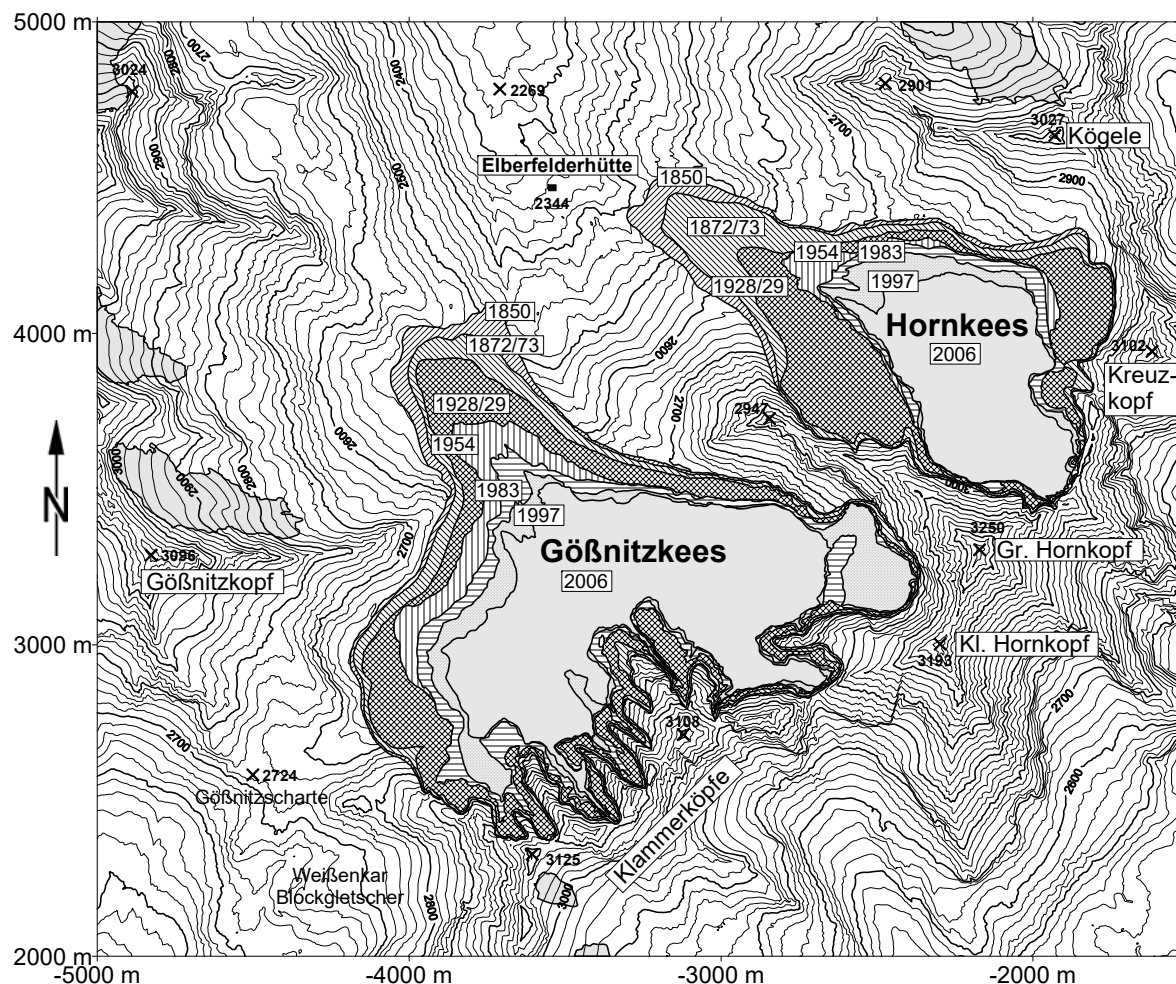


1. Einleitung

1.3 Photogrammetrische Produkte



Gletscherstände 1850, 1872/73, 1928/29, 1954, 1983, 1997, 2006



Flächenangaben

1850
 Gößnitzkees: 155.5 ha
 Hornkees: 91.6 ha

1872/73
 Gößnitzkees: 146.1 ha
 Hornkees: 84.4

1928/29
 Gößnitzkees: 111.1 ha
 Hornkees: 70.5 ha

1954
 Gößnitzkees: 97.3 ha
 Hornkees: 43.9 ha

1983
 Gößnitzkees: 90.1 ha
 Hornkees: 41.3 ha

1997
 Gößnitzkees: 75.7 ha
 Hornkees: 36.1 ha

2006
 Gößnitzkees: 58.9 ha
 Hornkees: 30.6 ha

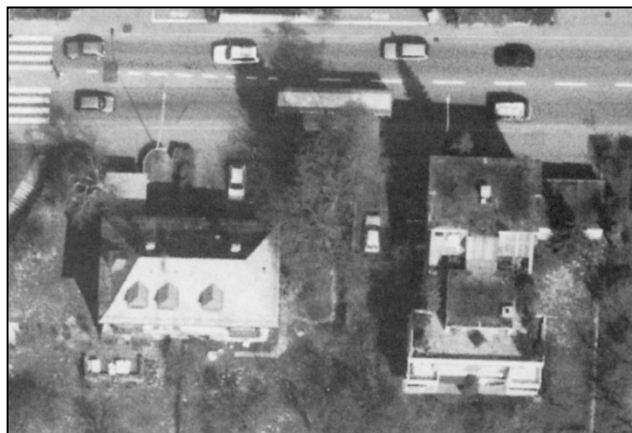


Thematische Karte zum Gletscherrückgang.

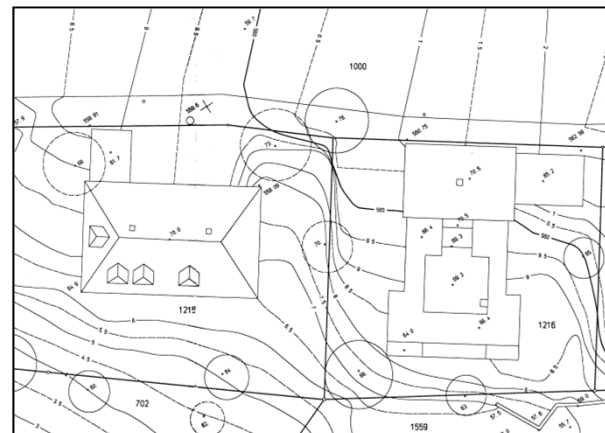


1. Einleitung

1.3 Photogrammetrische Produkte



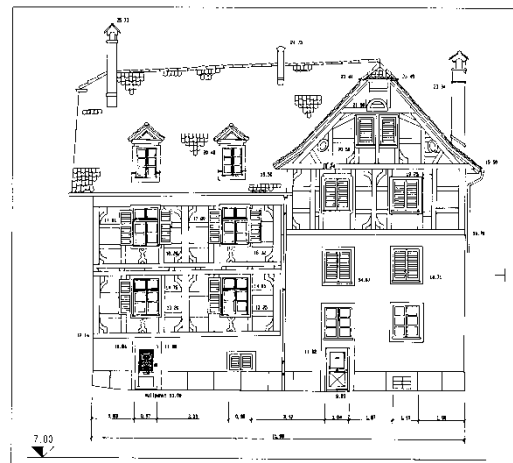
Luftbildaufnahme für die photogrammetrische Auswertung von Dachlandschaften, Topographie und Baumbeständen.



Photogrammetrische Auswertung
(Originalmaßstab M = 1:500)



Bestandsaufnahme mit einer Rolleimetric.



Photogrammetrisch ausgewertete Fassade
(Originalmaßstab M = 1:50)



1. Einleitung

1.3 Photogrammetrische Produkte

Photogrammetrische Rekonstruktion der großen Buddha-Statue von Bamiyan (Afghanistan)



3 metrische Aufnahmen, Kamera TAL, R. Kostka, 1970



4 verschiedene Amateurphotos aus dem Internet

- ▶ Erbaut um das Jahr 550
- ▶ Zerstörung durch die Taliban im Jahr 2001
- ▶ Metrische Auswertung (Schichtlinienplan) von R. Kostka
- ▶ Manuelle Auswertung
- ▶ Automatisierte Auswertung

Quellen: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/167.pdf
<http://diglib.tugraz.at/download.php?id=504dd6e53cfbc&location=browse>



rekonstruiertes 3D-Modell





1. Einleitung

1.3 Photogrammetrische Produkte

- ✓ Terrestrisch-photogrammetrische Dokumentationen (1996, 2003) der straßenseitigen Fassaden
- ✓ Geodätische Vermessung der straßenseitigen Fassaden (2003)
- ✓ Dachlandschaft aus Luftbildauswertung (Messungsflug 2000, Magistrat Graz)
- ✓ Phototexturiertes 3D-Modell (virtueller Überflug)



Stereobildpaar

Aufnahme vom 11. Dezember 1996

Teilmesskamera Rolleiflex 6006 metric



Bildverband

Aufnahmen vom 17. Mai 2003

Digitale SLR Nikon D100

Computeranimation: St. Josel, Ch. Pöllabauer, W. Ziegler (Bakkalaureatsarbeit, 2005)

YouTube: <http://www.youtube.com/user/photogrammetrie> (http://www.youtube.com/watch?v=_UyPUFOi1AM)

Datei: Kommod-Haus_animation.avi





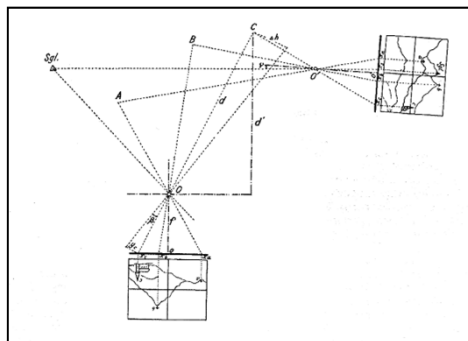
1. Einleitung

1.4 Geschichtliche Betrachtungen

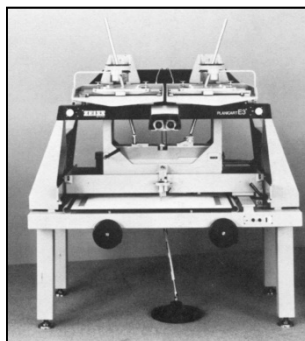
Zur Entwicklung der Photogrammetrie vor nunmehr über 100 Jahren trugen Entwicklungen und Erfindungen aus mehreren Wissensgebieten bei. Die Optik, die Geräte- und Vermessungstechnik, die Geometrie, die Physik, die Mathematik, die Luftfahrttechnik und vor allem die Photographie sind Puzzleteile, aus denen die Photogrammetrie sich als eigenständige Wissenschaft zusammengesetzt hat.

Die Entwicklung der Photogrammetrie erfolgte in erkennbaren Stufen (Phasen):

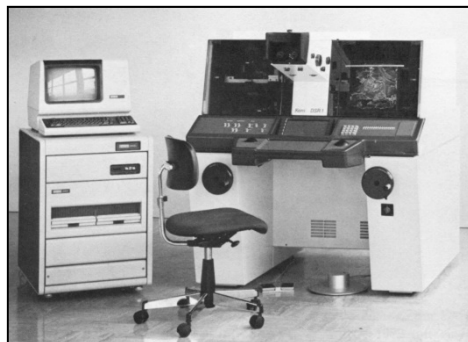
1. **Messtischphotogrammetrie (1850 – 1900)**
2. **Analogphotogrammetrie (1901 – ca. 1970)**
3. **Analytische Photogrammetrie (ca. 1970 – ca. 1990)**
4. **Digitalphotogrammetrie (ab ca. 1990 – jetzt)**



1.



2.



3.



4.

Bis Ende des 19. Jahrhunderts war die Photogrammetrie durch Forschung und Experimente in vielen Ländern, vor allem in Frankreich, Deutschland und Österreich gekennzeichnet. Das Verfahren der Messtisch- oder Einschneidephotogrammetrie fand in der Praxis Anwendung. Theoretische Abhandlungen über die Hauptaufgabe der Photogrammetrie wurden geschrieben. Die Photogrammetrie fand Einzug in die Universitäten und Technischen Hochschulen. Die Entwicklung der stereoskopischen Messprinzipien um die Jahrhundertwende und das Aufkommen der Luftfahrt mündeten in die *Luftbildmessung*. Die Photogrammetrie konnte weitgehend Aufgaben der topographischen Geländeaufnahme übernehmen und in die katastrale Aufnahme einbringen. Ab dem Zweiten Weltkrieg leitete die Erfindung der Computer eine entscheidende Wende in der Photogrammetrie ein. Aus der Kombination von herkömmlichen und neuen Techniken entstand z.B. der *analytische Plotter*. In jüngster Zeit kam die *digitale Photogrammetrie*, die Fernerkundung und die digitale Bildverarbeitung hinzu. Von der Computer Vision (Machine/Robot Vision) gehen in der letzten Zeit sehr viele Impulse (vgl. "Photogrammetry meets Machine Vision") aus.



1. Einleitung

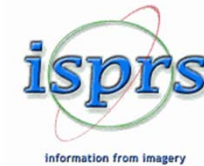
1.5 ISPRS



International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)

Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung

- 1907:** Eduard DOLEŽAL gründet die „Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie“ in Wien (weltweit erste photogrammetrische Gesellschaft)
- 1909:** Gründung der „Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie“
- 1910:** Gründung der „Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie (ISP)“ durch DOLEŽAL in Wien
- 1913:** 1. Kongress der ISP in Wien (300 Teilnehmer)
- 1980:** Am 14. Kongress der ISP wurde die Gesellschaft in „Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung“ umbenannt.
Alle 4 Jahre wird ein großer Kongress veranstaltet (1996 in Wien).
- 2004:** XXth ISPRS-Congress in Istanbul (12.-23.6.2004), über 2500 Teilnehmer, Leitthema: „Geo-Imagery – Bridging Continents“.
- 2008:** XXIst ISPRS-Congress in Beijing (3.-11.7.2008), Leitthema: „Silk Road for Information from Imagery“.
- 2010:** Centenary Celebrations, July 4, 2010, Vienna University of Technology
- 2012:** XXIIInd ISPRS-Congress in Melbourne (24.8-3.9.2012)
- 2016:** XXIIIrd ISPRS-Congress in Prag (12.-19.7.2016)



<http://www.isprs.org/>

Mitglieder	
91	Mitgliedsländer
12	assoziierte Mitglieder
14	Regionalmitglieder
69	unterstützende Mitglieder

2012-2016: 8 Technical Commissions and about 60 Working Groups

- I Sensors and Platforms for Remote Sensing
- II Theory and Concepts of Spatial Information Science
- III Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis (Prof. Konrad Schindler, ETH Zurich)
- IV Geospatial Databases and Location Based Services
- V Close-Range Imaging, Analysis and Applications
- VI Education, Technology Transfer and Capacity Development
- VII Thematic Processing, Modeling and Analysis of Remotely Sensed Data
- VIII Remote Sensing Applications and Policies



Prof. Dr. Franz Leberl (ICG, TUGraz)
Brock Gold Medal (2012)



1. Einleitung

1.6 EuroSDR, DGPF, ASPRS



EuroSDR

European Spatial Data Research Organisation (EuroSDR)

Nachfolgeorganisation der OEEPE (Europäische Organisation für experimentelle photogrammetrische Studien)

EuroSDR is a pan-European organisation established by International Treaty, as OEEPE, in 1953 in Paris in accordance with a recommendation passed by the Council of the Organisation for European Economic Co-operation. Organisations of European countries (that are members of the Council of Europe) represent, by their membership of EuroSDR, the spatial data research interests of those countries. The result is a network of delegates of European Geographic Information organisations and research institutes effectively and practically addressing Europe's spatial data research requirements.

Collaborative research projects address the acquisition, management and delivery of spatial data and services and International workshops and courses, in collaboration with related organisations, address key issues in a timely and focussed manner.

■ Commissions

- Sensors, primary data acquisition and georeferencing
- Image analysis and information extraction
- Production systems and processes
- Core geoinformation databases
- Integration and delivery of data and services

■ Publications

- Online proceedings
- Project reports

■ E-Learning

- EduServ (short e-Learning courses)

Automatic Orientation of Aerial Images on Databases, Integrated Sensor Orientation, Laser Scanning and Airborne Interferometric SAR, Digital Cameras and Sensors, Co-ordinate Systems and Transformations, Positional Accuracy Improvement for GI Databases, Laserscanning for 3D city models, Methods for Checking and Improving of Digital Terrain Models, etc.

■ Workshops

■ Research Topics:

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| - Building Extraction | - Change Detection | - CityGML |
| - Detection of Buildings | - Direct Georeferencing Reliability | - Digital Camera Calibration |
| - Generalisation | - Quality of DTMs | - Roads Extraction |
| - SAR Optical Contest | - Tree Extraction | - Unconventional Platforms |



<http://www.eurosd.net>



Österreichischer Vertreter:
M. Franzen (BEV, Wien)



1. Einleitung

1.6 EuroSDR, DGPF, ASPRS



DGPF

Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.

**Photogrammetrie
Fernerkundung
Geoinformation**

Organ der Deutschen
Gesellschaft für
Photogrammetrie,
Fernerkundung
und Geoinformation
(DGPF) e.V.



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart

ab 2018
PFG – Journal of Photogrammetry, Remote
Sensing and Geoinformation Science
(<http://www.springer.com/>)



<http://www.dgpf.de>

Die Zeitschrift erscheint jährlich mit 6 Heften.

ASPRS

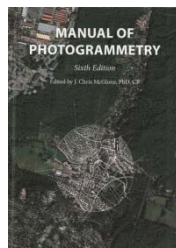
American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
(The Imaging & Geospatial Information Society)

PE&RS

Photogrammetric Engineering & Remote Sensing
Die Zeitschrift erscheint jährlich mit 12 Heften.



<http://www.asprs.org>



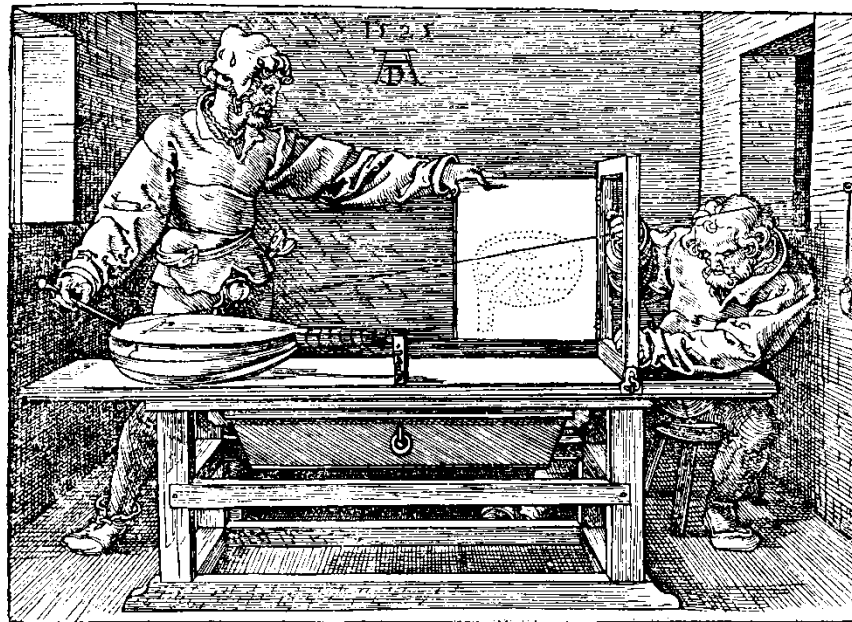
Manual of Photogrammetry, 6th Edition, 2013



2. Mathematisches Modell der zentralprojektiven Abbildung

»Zu Anfang der Photogrammetrie stand die Zentralperspektive«

Bereits Ende des 6. Jh. v. Chr. entdeckten die Griechen die Körperperspektive. Von ihr gelangten sie im späteren 5. und 4. Jh. v. Chr. zur Raumperspektive. Aristoteles (384-322 v. Chr.) stellt eine Theorie des Sehens auf. Die konstruierte Zentralperspektive und ihre theoretische Begründung sind erst eine Leistung der Frührenaissance (z.B. Giotto, Brunelleschi). Der Ital. L.B. Alberti war der erste, der das Bild als „ebenen Durchschnitt durch die Sehstrahlpyramide“ definierte (De Pictura, 1435). Weitere wissenschaftliche Abhandlungen über die Perspektive durch Leonardo da Vinci (1452-1519) und Albrecht Dürer (1471-1528).



Die Gesetze der perspektiven Abbildung werden vom deutschen Maler und Zeichner Albrecht Dürer in seinem Werk „Regeln für die Anfertigung perspektiver Geometrie, Unterweisung der Messung mit Zirkel und Richtscheid in Linien, Ebenen und Körpern“ formuliert und mitgeteilt (1525).



2. Mathematisches Modell der zentralprojektiven Abbildung



Visierstab von Albrecht Dürer.



2. Mathematisches Modell ...

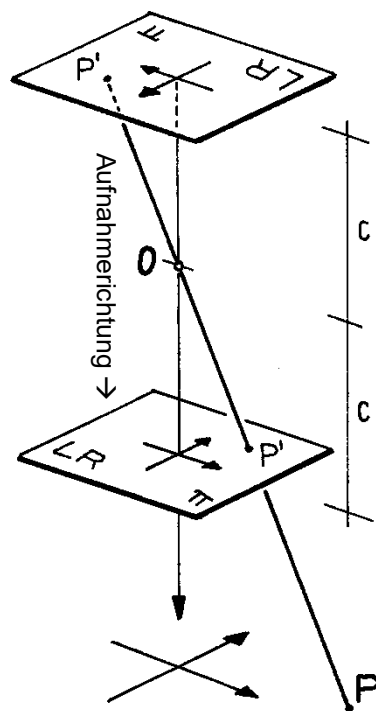
2.1 Messbild

Als mathematisches Modell wird für die geometrische Beziehung zwischen Objekt und Bild die **zentralprojektive Abbildung** durch **Strahlenbündel** unterstellt. Abweichungen der physikalischen Gegebenheiten von dieser Modellvorstellung sind zu berücksichtigen.

Die geometrischen Beziehungen werden mathematisch in **kartesischen Koordinatensystemen** beschrieben.

Bezüglich der durch die Aufnahmekammern erzeugten **Messbilder** wird zwischen

- Negativstellung** (= Aufnahme-Stellung) und
- Positivstellung** (= Betrachtungs-Stellung) unterschieden.



Negativstellung

Positivstellung

- P' ... Bildpunkt
- P ... Objektpunkt
- O ... Projektionszentrum

Messbilder sind Bilder mit bekannter oder bestimmbarer **innerer Orientierung** zur Rekonstruktion des Aufnahmestrahlenbündels. Die **Messkamera** (früher **Messkammer**) dient zur Aufnahme von Messbildern.

Die Parameter der inneren Orientierung einer Aufnahmekamera beschreiben die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive:

- x_0, y_0 ... Koordinaten des Bildhauptpunktes
- c ... Kamerakonstante (Kammerkonstante, Bildweite)
- Δr ... Verzeichnung



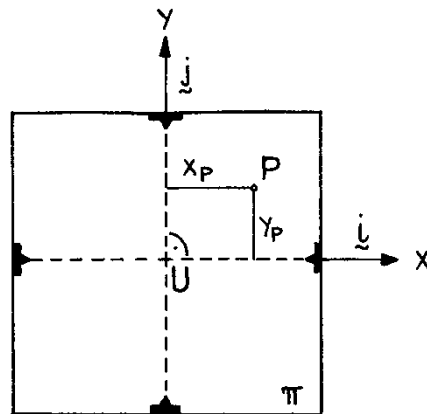
2. Mathematisches Modell ...

2.2 Koordinatensysteme

Es sind prinzipiell folgende Koordinatensysteme zu unterscheiden:

- A) Die photogrammetrischen Koordinatensysteme sind zwei- oder dreidimensionale **kartesische** Koordinatensysteme. (René Descartes, lat. Cartesius, 1596-1650, frz. Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler)
- B) Das übergeordnete Koordinatensystem ist meist **nicht-kartesisch**, wie z.B. das Koordinatensystem der Österr. Landesaufnahme (Gauß-Krüger Koordinatensystem, orthometrische Höhen) oder ellipsoidische bzw. sphärische Koordinatensysteme (φ, λ, H).

A.1 Bildkoordinatensystem:



ebenes kartesisches System
(rechtsdrehend)

Festgelegt durch die abgebildeten Rahmenmarken der Kammer und die Bildebene (π) in Diapositivstellung.

Ursprung U: Schnittpunkt der Verbindungsgeraden gegenüberliegender Rahmenmarken

Achsen:

x-Achse: Verbindungsgerade der Messmarken in Flugrichtung

y-Achse: Verbindungsgerade der Messmarken quer zur Flugrichtung

Achsrichtungen: i zeigt in Flugrichtung, j rechtsdrehend orthogonal dazu (Abweichungen vom Rechtwinkelsystem sind möglich, dann spricht man von einem schiefwinkligen bzw. affinen Koordinatensystem.)

Anmerkung: Bei einer WE-Befliegung zeigt i positiv nach E und j positiv nach N.

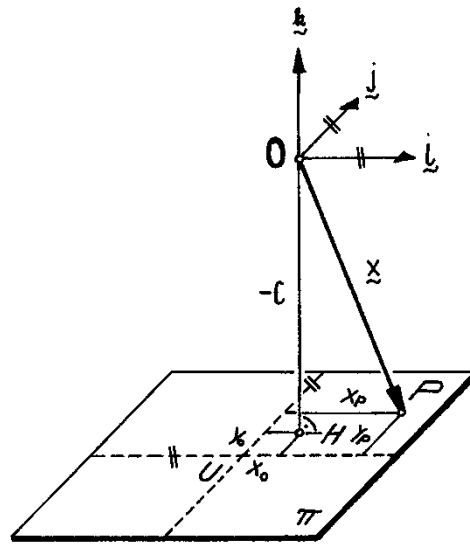
Bildpunkt: $P(x_P, y_P)$



2. Mathematisches Modell ...

2.2 Koordinatensysteme

A.2 Örtliches Koordinatensystem der Aufnahme:



räumliches kartesisches System
(rechtsdrehend)

Festgelegt durch die innere Orientierung der Aufnahmekamera in Diapositivstellung.

Ursprung O: bildseitige Projektionszentrum

Bildhauptpunkt H (x_0, y_0) ... Fußpunkt des Lotes vom Projektionszentrum O auf die Bildebene π (= Orthogonalprojektion von O auf π)

Kammerkonstante $c = \overline{OH}$

(Normalabstand des Projektionszentrums von der Bildebene π)

Achsen: x- und y-Achse parallel zu Bildkoordinaten, z-Achse normal auf π

Achsrichtungen:

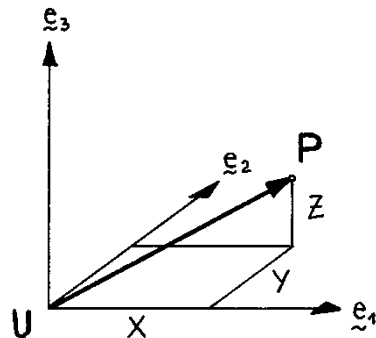
i-Achse ... x-Achse

j-Achse ... y-Achse

k-Achse ... z-Achse

Bildpunkt: Bündelvektor $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{pmatrix}$, $\mathbf{x} = (x - x_0, y - y_0, -c)^T$,
 $\mathbf{x}^T = (x - x_0, y - y_0, -c)$.

A.3 Objektkoordinatensystem:



ebenes kartesisches System
(rechtsdrehend)

1. Festgelegt durch Koordinatenführung im Auswertegerät (= **Maschinenkoordinatensystem**)
2. Festgelegt durch ein lokales System (= **Modellkoordinatensystem** oder **Tangentialkoordinatensystem**) oder durch ein globales **geozentrisches Koordinatensystem** (WGS 84).

Ursprung U ist i. Allg. frei wählbar (Beginn der Koordinatenzählung ist variabel).

Achsen: \mathbf{e}_1 ... positive X-Zählung
 \mathbf{e}_2 ... positive Y-Zählung
 \mathbf{e}_3 ... positive Z-Zählung

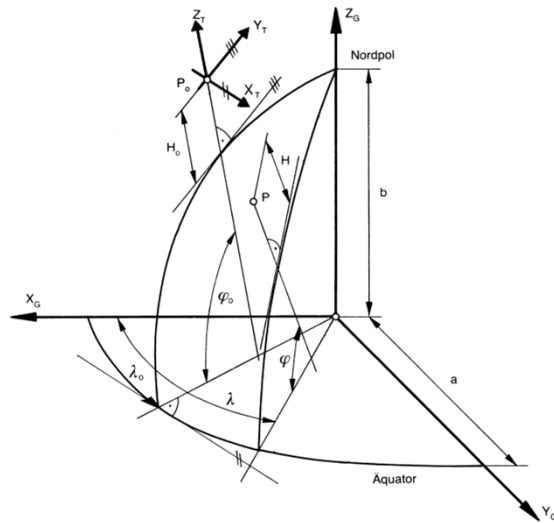
Objektpunkt: P (X, Y, Z)



2. Mathematisches Modell ...

2.2 Koordinatensysteme

A.3 Objektkoordinatensystem: cont.



Ellipsoidische Koordinaten: φ, λ, H
 (= krummlinige Koordinaten)

Geozentrische Koordinaten: X_G, Y_G, Z_G

Tangentialkoordinaten: X_T, Y_T, Z_T

a ... große Halbachse
 b ... kleine Halbachse

B. Landeskoordinatensystem:

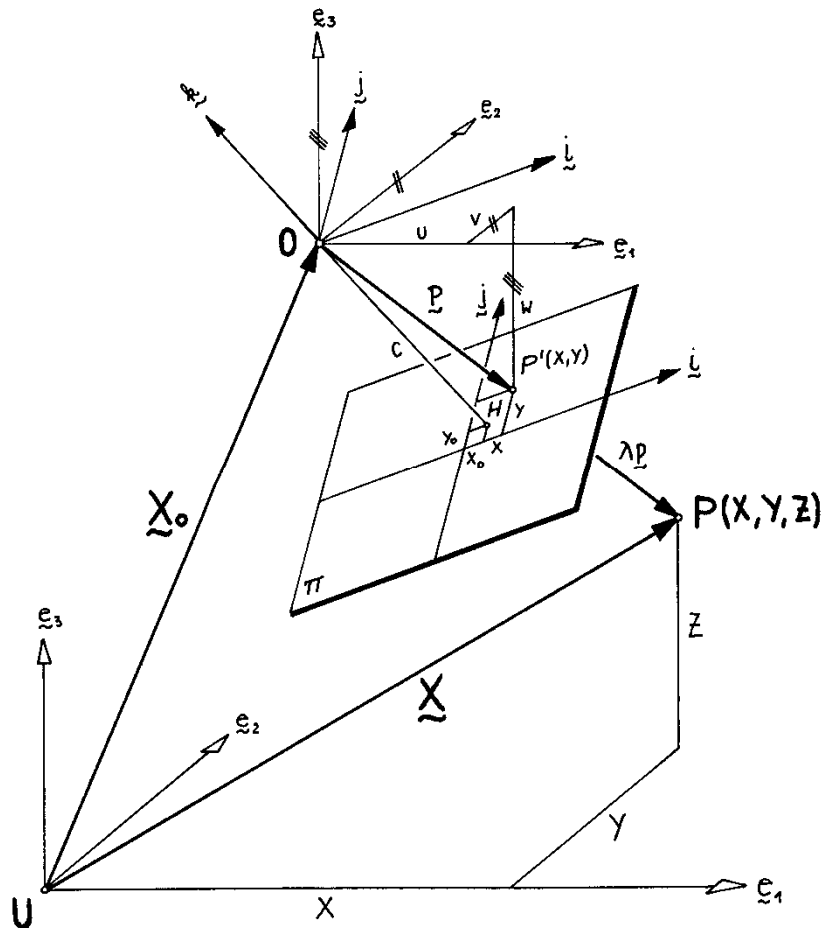
Die Transformation zwischen Bild- und Geländekoordinaten und umgekehrt setzt voraus, dass das Geländekoordinatensystem ein orthogonales kartesisches Koordinatensystem (vgl. Objektkoordinatensystem) ist. Diese Bedingung ist in der Geodäsie jedoch nicht erfüllt, weil LAGE und HÖHE verschiedene Referenzsysteme besitzen und weil die Lagekoordinaten auf dem Ellipsoid oder in die Ebene abwickelbaren Projektionen des Ellipsoides bestimmt sind (vgl. **Gauß-Krüger-Abbildung** oder **UTM-Abbildung**).



2.3 Strahlenbündel

2.3.1 Mathematische Grundlagen

Das Strahlenbündel im
photogrammetrischen Allgemeinfl
(verschwenkte Aufnahme)



\mathbf{x} ... Bündelvektor im örtlichen Koordinatensystem der Aufnahme (i, j, k)

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{pmatrix}; \quad \mathbf{x} \text{ ist ein nicht orientiertes Bündel}$$

\mathbf{p} ... Bündelvektor im Objektkoordinatensystem

$$\mathbf{p} = (x - x_0) \cdot \mathbf{i} + (y - y_0) \cdot \mathbf{j} - c \cdot \mathbf{k} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{p} = u \cdot \mathbf{e}_1 + v \cdot \mathbf{e}_2 + w \cdot \mathbf{e}_3$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}; \quad \mathbf{p} \text{ ist ein orientiertes Bündel}$$

$$\mathbf{R} = (\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3) = \begin{pmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad \dots \text{ Drehmatrix}$$

Eigenschaften der Drehmatrix: Orthogonalität $\rightarrow \mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}, \mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}, \mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}$

Normiertheit $\rightarrow \mathbf{i}^2 = 1, \mathbf{j}^2 = 1, \mathbf{k}^2 = 1$

Es gilt daher: $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$ bzw. $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{E}$ und $\det(\mathbf{R}) = 1$



2.3 Strahlenbündel

2.3.1 Mathematische Grundlagen

Bei der Aufnahme nimmt die Kamera eine ganz bestimmte Stellung im Raum ein, welche gemäß der Systemskizze (vgl. vorherige Abbildung) zu beschreiben ist. Demnach sind die Elemente \mathbf{X}_0 (= Lage des Projektionszentrums) und $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ (= Einheitsvektoren des Kammer systems ausgedrückt in Parametern des Objektkoordinatensystems) die geometrischen Größen für die Beschreibung der Kammerlage. Sie heißen daher

Elemente der **äußeren Orientierung** (= 6 Parameter).

Die dazu angegebenen Kalibrierwerte ($x_0, y_0, c; \Delta r$) sind im Gegensatz dazu die

Elemente der **inneren Orientierung** (= 3 Parameter + Verzeichnungsfunktion/-kurve).

Orientierungselemente:

$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{pmatrix}$ Vektor zu einem Bildpunkt im System der Aufnahme

x_0, y_0 Koordinaten des Bildhauptpunktes

c Kammerkonstante

$\mathbf{R}(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ Drehmatrix

$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}$ Projektionsstrahl im Modellraum, $\mathbf{p} = (u \ v \ w)^T$

$\mathbf{X}_0 = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$ Projektionszentrum

φ, ω, κ Querneigung, Längsneigung, Kantung (= 3 Drehwinkel)

$d\mathbf{R} = \mathbf{E} + d\mathbf{A}$... differentielle Drehmatrix

$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$... Einheitsmatrix

$d\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & -d\kappa & d\varphi \\ d\kappa & 0 & -d\omega \\ -d\varphi & d\omega & 0 \end{pmatrix}$... Differentialaxiator

$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$ \Leftrightarrow Drehmatrix für mitgedrehte Achsen
(Primärdrehung ω , Sekundärdrehung φ , Tertiärdrehung κ)



2.3 Strahlenbündel

2.3.1 Mathematische Grundlagen

Für die Angabe der Drehmatrix bestehen drei Möglichkeiten:

1. Mit Drehachse und Rotationswinkel, wobei die Drehachse ein Einheitsvektor ist und durch zwei Parameter definiert (geometrische Form) ist.
2. Durch Angabe von drei Drehwinkeln um Achsen (**Eulersche** und **Cardanische Drehungen**) (analytische Form).
3. Mittels vier algebraischer Parameter (algebraische Form).

Aus historischen (instrumentellen) Gründen wird die **kardanische Form** in der Luftbildmessung am häufigsten verwendet. (Geronimo Cardano, 1501-1576, ital. Mathematiker, Arzt und Philosoph)

Eine Drehung im Raum ist durch 3 unabhängige Parameter definiert. In der Photogrammetrie verwendet man häufig die drei Drehwinkel ω , φ , κ um drei Koordinatenachsen. Wenn wir ein Kardangehänge betrachten, ist auf die Hierarchie zu achten.

3 Drehungen um mitgedrehte Achsen:

um \mathbf{e}_1 (Primärachse) die ω -Drehung

um die mitgedrehte \mathbf{e}_2 ($= \mathbf{e}'_2$, d.h. Sekundärachse) die φ -Drehung

um die mitgedrehte \mathbf{e}_3 ($= \mathbf{e}''_3$, d.h. Tertiärachse) die κ -Drehung

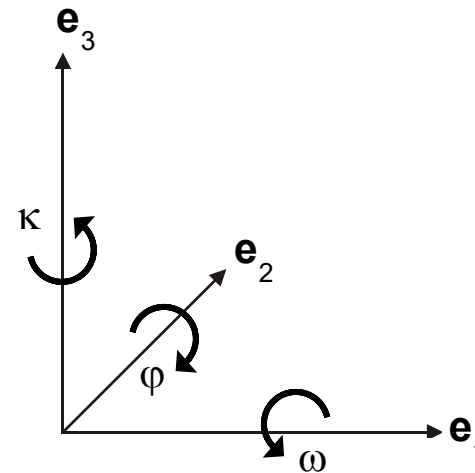
ω = Querneigung $\hat{=}$ Drehung um \mathbf{x} -Achse

φ = Längsneigung $\hat{=}$ Drehung um \mathbf{y} -Achse

κ = Kantung $\hat{=}$ Drehung um \mathbf{z} -Achse

Mathematisch ergibt sich die Gesamtdrehung \mathbf{R} mit $\mathbf{R}_1(\omega) \cdot \mathbf{R}_2(\varphi) \cdot \mathbf{R}_3(\kappa)$.

Die Reihenfolge der Drehungen spielt eine Rolle!
Bei festen Drehachsen ergibt sich wieder ein anderes Ergebnis!





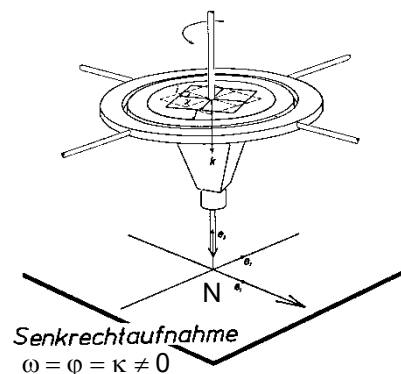
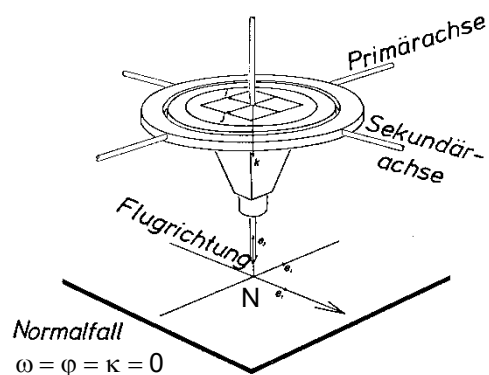
2.3 Strahlenbündel

2.3.1 Mathematische Grundlagen

Der **Normalfall** der Luftbildmessung liegt vor, wenn die Bildebene horizontal und die i -Achse des Bildkoordinatensystems in der Flugrichtung liegt. Der Hauptstrahl der Perspektive fällt in die Lotrichtung, Bildnadir N' und Bildhauptpunkt H sind daher identisch, die Nadirdistanz verschwindet.

Bei geringfügigen, differentiellen Abweichungen sprechen wir von **genäherten Normalaufnahmen**.

Bei horizontaler Bildebene, also verschwindender Längs- und Querneigung und endlicher Verkantung liegt der Fall einer **Senkrechtaufnahme** vor, weil der Hauptpunkt mit dem Lot zusammenfällt.



In diesem Beispiel liegt folgender Fall vor :

um e_2 (Primärachse) die φ -Drehung

um die mitgedrehte e_1 ($= e_1'$, d.h. Sekundärachse) die ω -Drehung

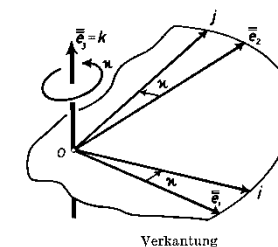
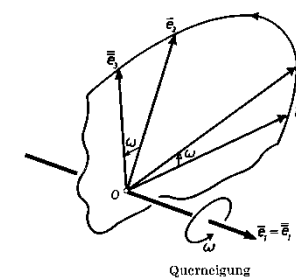
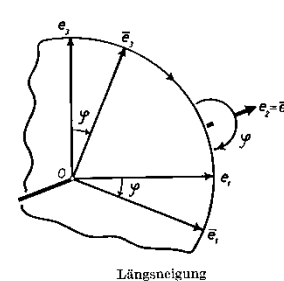
um die mitgedrehte e_3 ($= e_3''$, d.h. Tertiärachse) die κ -Drehung

ω = Querneigung $\hat{=}$ Drehung um x -Achse

φ = Längsneigung $\hat{=}$ Drehung um y -Achse

κ = Kantung $\hat{=}$ Drehung um z -Achse

Mathematisch ergibt sich die Gesamtdrehung R mit $R_1(\varphi) \cdot R_2(\omega) \cdot R_3(\kappa)$.





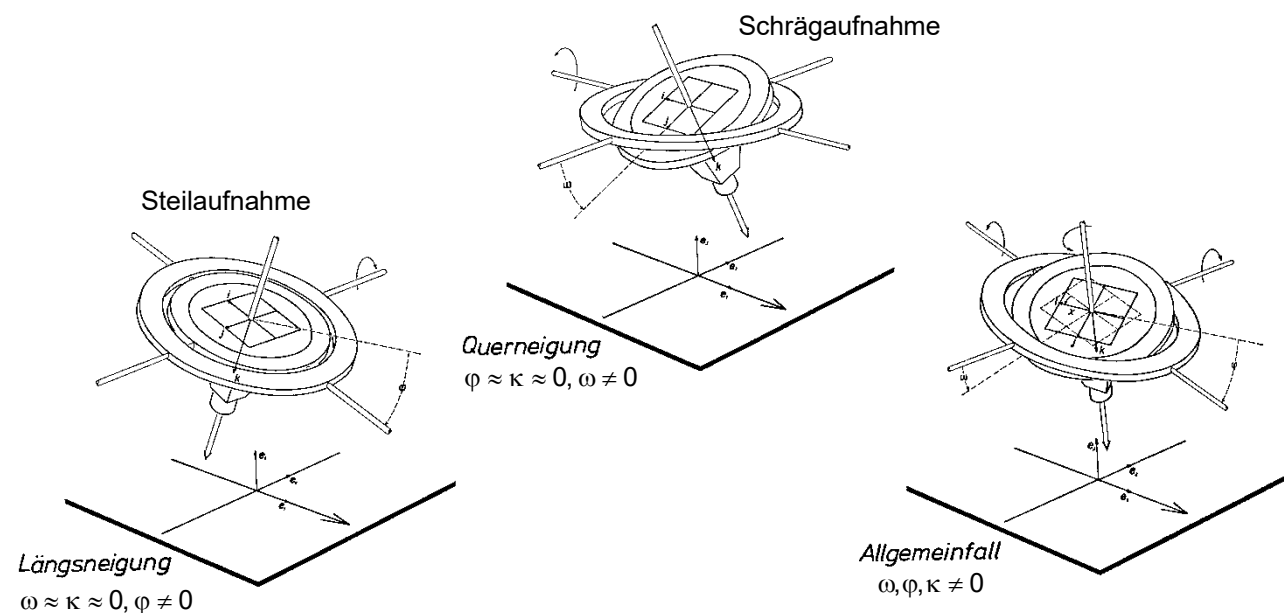
2.3 Strahlenbündel

2.3.1 Mathematische Grundlagen

Erfolgt die Aufnahme mit endlicher Längsneigung φ , aber differentieller Querneigung und Kantung, so sprechen wir von einer **längsgeneigten** oder **verschwenkten Aufnahme**.

Eine **quergeneigte** oder **Schrägaufnahme** besitzt einen endlichen Wert ω der Querneigung.

Im **Allgemeinfall** sind Längs- und Querneigung sowie die Verkantung endlich und können beliebige Werte annehmen.





2.3 Strahlenbündel

2.3.2 Grundgleichungen der Photogrammetrie

Aus der Abbildung „Das Strahlenbündel im photogrammetrischen Allgemeinfeld“ ist zu entnehmen, dass ein Vektor $\mathbf{X}-\mathbf{X}_0$ vom Projektionszentrum \mathbf{X}_0 zum Objektpunkt \mathbf{X} mit dem Projektionsstrahl \mathbf{p} anhand

$$\mathbf{X}-\mathbf{X}_0 = \lambda \mathbf{p} \quad (\text{"Kollinearitätsbedingung"})$$

verknüpft ist, wobei λ ein *skalärer (ortsabhängiger) Streckungsfaktor* ist. Da $\mathbf{p} = \mathbf{R}\mathbf{x}$ bzw. $\mathbf{x} = \mathbf{R}^T\mathbf{p}$, entsteht die **PROJEKTIONSGLEICHUNG**

$$(\mathbf{X}-\mathbf{X}_0) = \lambda \mathbf{R}\mathbf{x} = \lambda \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

für die Rekonstruktion und aus ihrer Umkehrung die fundamentale **ABBILDUNGSGLEICHUNG**

$$\lambda \mathbf{x} = \mathbf{R}^T(\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)$$

Wegen $\mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbf{E}$ ist $\lambda = +\sqrt{\frac{(\mathbf{X}-\mathbf{X}_0) \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)}{\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}}}$

und stets >1 , aber unbekannt. Die Elimination von λ erfolgt durch Division der ersten beiden Komponenten der Abbildungsgleichung durch die dritte, also wegen

$$\mathbf{x} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{R}^T(\mathbf{X}-\mathbf{X}_0) = \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} \mathbf{i} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0) \\ \mathbf{j} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0) \\ \mathbf{k} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0) \end{pmatrix}$$

$$x-x_0 = -c \frac{\mathbf{i} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)} \quad \text{und} \quad y-y_0 = -c \frac{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)} \quad \text{bzw.}$$

$$x = x_0 - c \frac{i_1(X-X_0) + i_2(Y-Y_0) + i_3(Z-Z_0)}{k_1(X-X_0) + k_2(Y-Y_0) + k_3(Z-Z_0)}$$

$$y = y_0 - c \frac{j_1(X-X_0) + j_2(Y-Y_0) + j_3(Z-Z_0)}{k_1(X-X_0) + k_2(Y-Y_0) + k_3(Z-Z_0)}$$

• Zu jedem Objektpunkt gehört ein Bildpunkt.



2.3 Strahlenbündel

2.3.2 Grundgleichungen der Photogrammetrie

Die Projektionsgleichung liefert analog

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \lambda \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}; \quad \text{3. Gleichung: } Z = Z_0 + \lambda w \Rightarrow \lambda = \frac{Z - Z_0}{w}$$

$$\frac{X - X_0}{Z - Z_0} = \frac{i_1(x - x_0) + j_1(y - y_0) - k_1c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3c} = \frac{u}{w}$$

$$\frac{Y - Y_0}{Z - Z_0} = \frac{i_2(x - x_0) + j_2(y - y_0) - k_2c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3c} = \frac{v}{w}$$

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{i_1(x - x_0) + j_1(y - y_0) - k_1c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{i_2(x - x_0) + j_2(y - y_0) - k_2c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3c}$$

- Zu jedem Bildpunkt gehören unendlich viele Objektpunkte, d.h. mit anderen Worten: **Aus einer Photographie (= Messbild) allein lässt sich ein räumliches Objekt nicht rekonstruieren.**
- Man braucht dazu entweder vom gleichen Objekt ein **zweites Bild** oder eine **Zusatzinformation** über die Z-Koordinate (z.B. alle Objektpunkte liegen in einer Horizontalebene mit konstanter Höhe).



2.3 Strahlenbündel

2.3.3 Normalfall

In diesem Fall ist

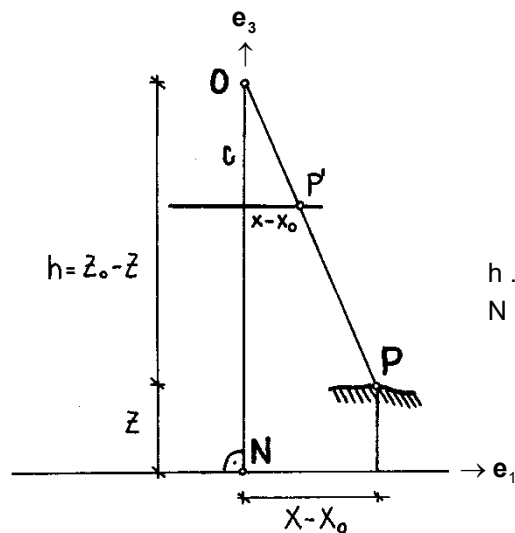
$$\mathbf{R} = \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{und daher} \quad \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x - x_0 \\ x - y_0 \\ -c \end{pmatrix}$$

woraus

$$\lambda = -\frac{Z - Z_0}{c} = \frac{h}{c}$$

folgt, wenn $h = Z_0 - Z$ (= Höhe über dem Objektpunkt). Daher wird

$$x - x_0 = \frac{c}{h}(X - X_0) \quad \text{und} \quad y - y_0 = \frac{c}{h}(Y - Y_0).$$



h ... Flughöhe über Grund für $Z_i \cong \text{const.}$
 N ... Nadirpunkt

Seitenrissdarstellung: e_2 -Achse ist projizierend





2.3 Strahlenbündel

2.3.4 Differentialformen für den genäherten Normalfall

Diese sind, wie in der Geodäsie üblich, so zu verstehen, dass sie die ersten Glieder einer **Taylor-Reihe** nach den unbekanntenen Variablen darstellen. Sie dienen der Linearisierung funktionaler Zusammenhänge höherer Ordnung unter der Voraussetzung, dass bereits gute Näherungswerte vorhanden sind, dass sie nur mehr um Beträge zu verbessern sind, die klein sind von erster Ordnung. Ist dies nicht der Fall, dann wird daraus ein iterativer Prozess, der so lange läuft, bis die Lösung der Linearansätze der obigen Forderung entsprechen!

Aus der allgemeinen Form der Differentialbeziehungen zwischen Bildkoordinaten und Orientierungsparametern (vgl. LV Bildmessung) können von diesen ausgehend mehrere Spezialformen abgeleitet werden.

Für die Aerophotogrammetrie ist die wichtigste Aufnahmedisposition der **genäherte Normalfall**. Für diesen kann $(\mathbf{R}) = \mathbf{E}$ gesetzt werden und die Richtungsabweichungen können differentiell klein angesetzt werden.

\mathbf{R} durch $d\mathbf{R} = \mathbf{E} + d\mathbf{A}$ ersetzen und man erhält folgende Differentialbeziehungen

Änderung der Bildkoordinaten:

$$dx = \underbrace{-\frac{c}{h} dX_0 - \frac{x}{h} dZ_0 - \frac{xy}{c} d\omega + \left(c + \frac{x^2}{c}\right) d\varphi + y d\kappa}_{\text{äußere Orientierung}} + \underbrace{dx_0 + \frac{x}{c} dc}_{\text{innere Orientierung}}$$

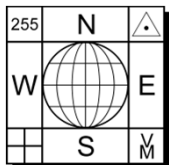
$$dy = \underbrace{-\frac{c}{h} dY_0 - \frac{y}{h} dZ_0 - \left(c + \frac{y^2}{c}\right) d\omega + \frac{xy}{c} d\varphi - x d\kappa}_{\text{äußere Orientierung}} + \underbrace{dy_0 + \frac{y}{c} dc}_{\text{innere Orientierung}}$$

Änderung der Objektkoordinaten:

$$dX = \underbrace{dX_0 + \frac{X}{h} dZ_0 + \frac{XY}{h} d\omega - h\left(1 + \frac{X^2}{h^2}\right) d\varphi - Y d\kappa}_{\text{äußere Orientierung}} - \underbrace{\frac{h}{c} dx_0 - \frac{X}{c} dc}_{\text{innere Orientierung}}$$

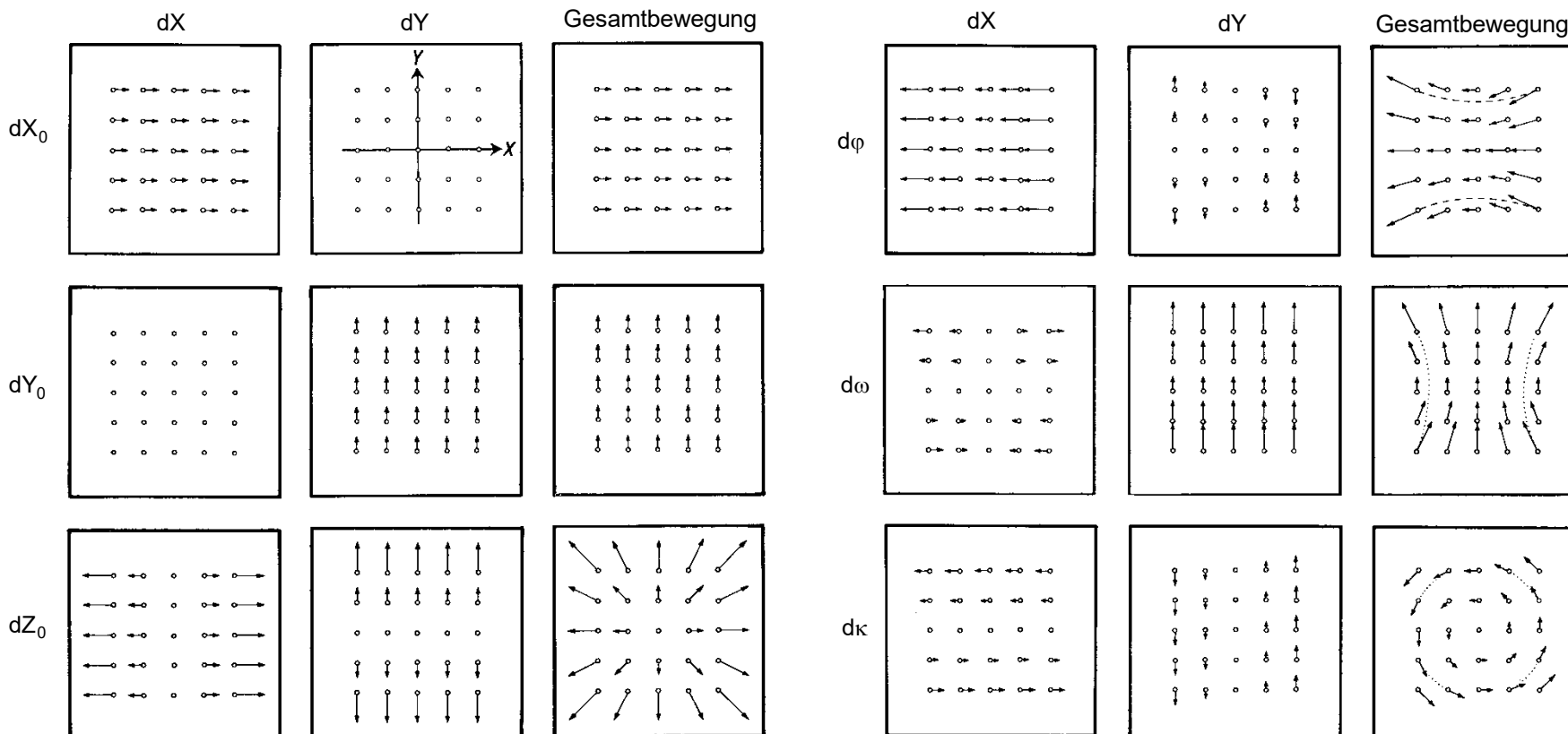
$$dY = \underbrace{dY_0 + \frac{Y}{h} dZ_0 + h\left(1 + \frac{Y^2}{h^2}\right) d\omega - \frac{XY}{h} d\varphi + X d\kappa}_{\text{äußere Orientierung}} - \underbrace{\frac{h}{c} dy_0 - \frac{Y}{c} dc}_{\text{innere Orientierung}}$$

vgl. nächste Seite



2.3 Strahlenbündel

2.3.4 Differentialformen für den genäherten Normalfall



Graphische Darstellung der Differentialbeziehungen
(Wirkungen der Kammerbewegungen).

Anmerkungen:

$$(\mathbf{i}) = \mathbf{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\mathbf{j}) = \mathbf{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\mathbf{k}) = \mathbf{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (\mathbf{R}) = \begin{pmatrix} 1 & -d\kappa & d\varphi \\ d\kappa & 1 & -d\omega \\ -d\varphi & d\omega & 1 \end{pmatrix}$$

$$h = (Z_0) - Z$$

() ... Näherungswerte; Koordinaten des Hauptpunktes: $(x_0) = (y_0) = 0$; Kammerkonstante: $(c) = c$



3. Herstellen von Messbildern

Das Messbild wurde bisher als exakte Zentralprojektion definiert. Nun gilt es die physikalische Realisierung mittels Abbildung durch optische Systeme (= Linsen) näher zu beleuchten.



1858

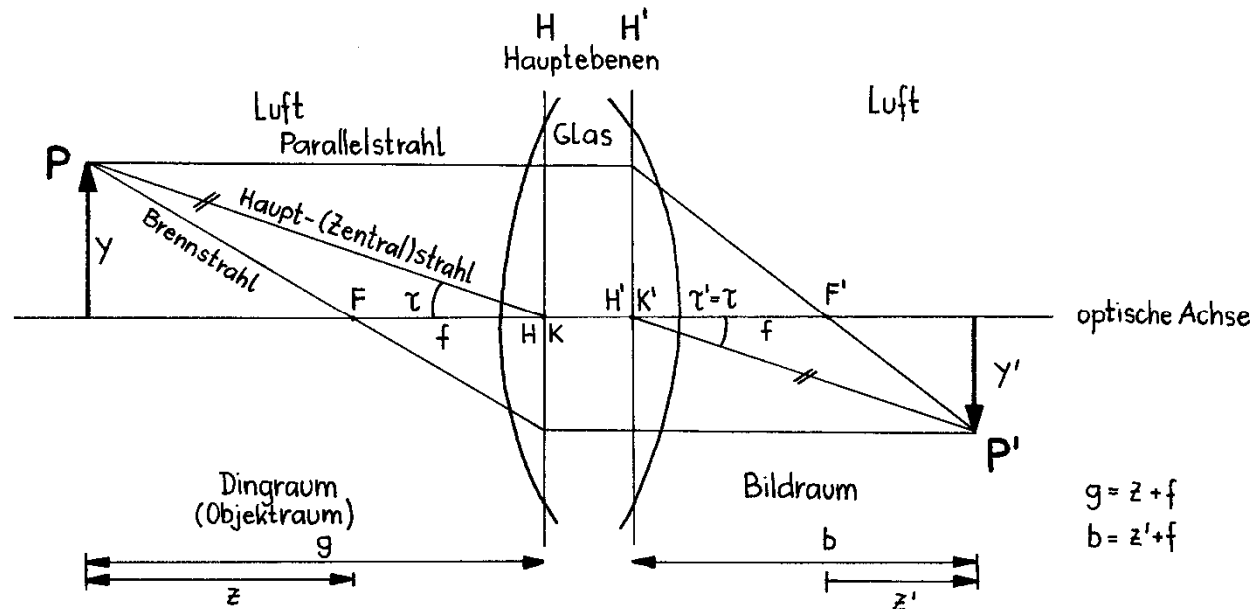
Der Pariser Photograph Gaspar-Félix Tournachon (1820-1910), genannt NADAR, macht die ersten Luftbildaufnahmen aus dem Fesselballon. NADAR begründet damit die Luftbildmessung.

Tournachon: „Ein sicherer gefesselter Ballon und ein guter photographischer Apparat, das ist alles, was ich brauche, um jede kleinere und größere Erdoberfläche genauer aufzunehmen und zu vermessen, als es mit Triangulation, Graphometer und Messlatte geschehen kann.“



3.1 Optische Grundlagen

3.1.1 Optische Abbildung



$$g = z + f$$

$$b = z' + f$$

Grundlage: Physikalischen Gesetze der Strahlenoptik (dünne Linsen, C.F. Gauß)

Linsen sind beidseitig sphärisch begrenzte Glaskörper mit definiertem Brechungsindex.

In der Strahlenoptik hat man für dicke Linsen bzw. Linsenkombinationen 2 **Hauptebenen H** und **H'** (objekt- und bildseitige Hauptebenen) definiert.

Bei Luft-Glas-Luft-Verhältnissen fallen die beiden optischen Hauptpunkte H und H' , d.h. die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der optischen Achse OA , mit den beiden **Knotenpunkten K** und K' zusammen.

Diese sind so definiert, dass die sogenannten Zentralstrahlen ungebrochen durch die Optik gelangen, dass also der bei K' austretende Strahl mit der optischen Achse den gleichen Winkel τ einschließt wie der bei K eintretende.



3.1 Optische Grundlagen

3.1.1 Optische Abbildung

Linsengleichung

$$\left. \begin{array}{l} \text{nach GAUSS: } \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \\ \text{nach NEWTON: } z \cdot z' = f^2 \end{array} \right\} \text{Äquivalenz gegeben}$$

Carl Friedrich Gauß (1777-1855)

Isaac Newton (1643-1727)

g ... Gegenstandsweite

b ... Bildweite

f ... Brennweite

Hauptpunkte (H, H') sind jene Punkte der optischen Achse, die von den Brennpunkten den Abstand f haben.

Die beiden Brennpunkte definieren die optische Achse.

Hauptebenen sind Ebenen normal zur optischen Achse in den Hauptpunkten, in denen sich einfallende Parallel- und austretende Brennstrahlen schneiden (zeichnerische Bildfindung).

Hauptstrahlen sind Strahlen durch die Hauptpunkte.

Nimmt man größere Einfallshöhen und größere Neigungen der einfallenden Strahlenbündel an (= Abweichung von der Paraxialität), so treten gegenüber den Eigenschaften der Abbildung im paraxialen Bereich Abweichungen auf, die wir als Abbildungsfehler der Linse bezeichnen.



3.1 Optische Grundlagen

3.1.2 Abbildungsfehler

Abbildungsfehler:

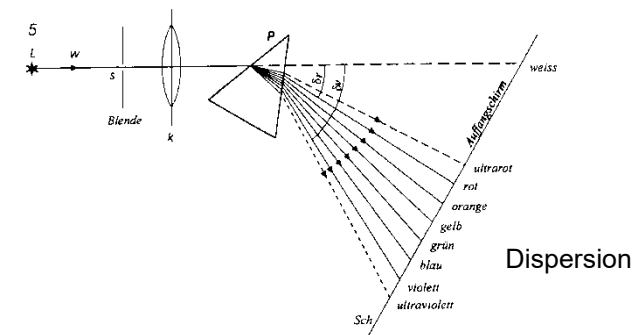
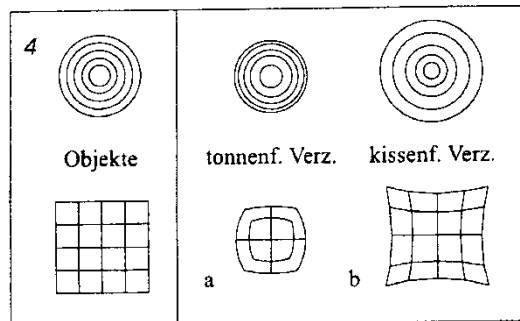
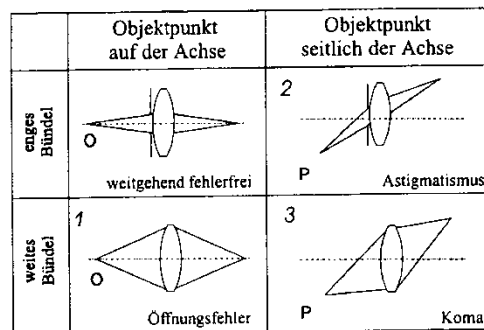
1. Abbildung achsnahe Objekte mit weiten Bündeln
2. Abbildung achsferner Objekte mit dünnen Bündeln
3. Abbildung achsferner Objekte mit weiten Bündeln
4. Ablenkungsfehler der Hauptstrahlen schiefer Bündel
5. Abhängigkeit des Brechungsindex von Wellenlänge (= Dispersion)

- ⇒ **Öffnungsfehler (sphärische Aberration)**
- ⇒ **Astigmatismus schiefer Bündel**
- ⇒ **Koma**
- ⇒ **Verzeichnung**
- ⇒ **Farbfehler oder chromatische Aberration**

Die optischen Abbildungsfehler 1, 2 und 3 entstehen durch Vereinigung von Bündeln, welche nicht der nur im achsnahe Raum geltenden (projektiven) Abbildungstheorie nach GAUSS und NEWTON entsprechen.

Der geometrische Abbildungsfehler 4 kommt durch das Zusammenwirken der optischen Abbildungsfehler zustande. Der resultierende „Bildpunkt“ entspricht nicht dem Verlauf der Hauptstrahlen gemäß Abbildungstheorie.

Der chromatische Fehler beruht auf der Dispersion optischer Werkstoffe, sodass farbabhängige Kenngrößen (f, F, H) für Linsen und Linsensysteme entstehen.

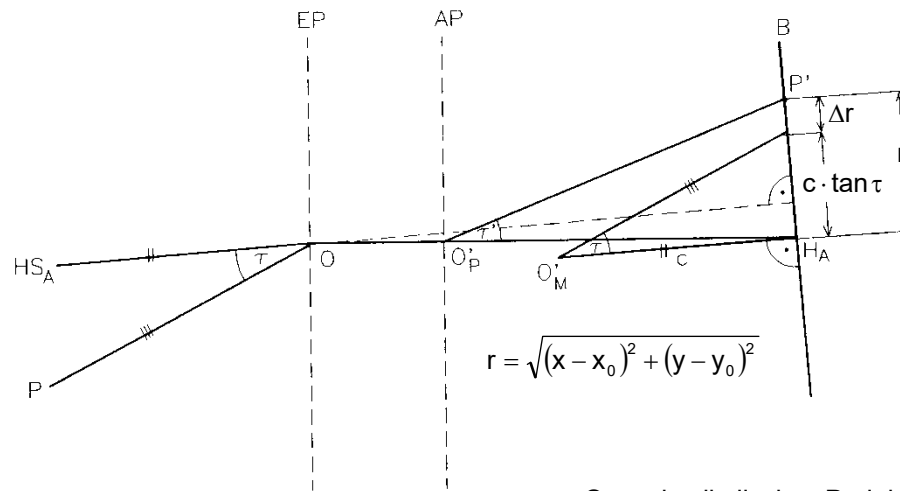




3.1.2 Abbildungsfehler

3.1.2.1 Verzeichnung

Aperturblenden dienen der Bündelbegrenzung. Sie befinden sich irgendwo im Strahlengang zwischen Objektivfassung und Bildebene. Durch das optische System kann die Blende in den Objekt- und Bildraum abgebildet werden. Die Bilder heißen nach E. Abbe (1840-1905):
im Objektraum **Eintrittspupille (EP)** und im Bildraum **Austrittspupille (AP)**.



O_M = mathematisches bildseitiges Projektionszentrum
 HS_A = (Autokollimations-) Hauptstrahl
 H_A = (Autokollimations-) Hauptpunkt in der Bildebene B

O_P = physikalisches Projektionszentrum
 c = Kammerkonstante
 r = Radialabstand (Entfernung vom Hauptpunkt)
 Δr = (radiale) optische Verzeichnung

Die Mitte der Eintrittspupille definiert das objektseitige Projektionszentrum.



3.1.2 Abbildungsfehler

3.1.2.1 Verzeichnung

Die reale photogrammetrische Optik und die idealisierte Optik unterscheiden sich voneinander wesentlich:

1. Bezugsachse der Photogrammetrie ist daher nicht die optische Achse, sondern ein kalibrierter Hauptstrahl HS, der objektseitig auf der Bildebene senkrecht steht und durch die Mitte der Eintrittspupille geht. Seine physikalische Verlängerung durchstößt die Bildebene im sogenannten **Autokollimationshauptpunkt H_A** (= Hauptpunkt).
2. Die Winkel τ werden in der Mitte der Eintrittspupille EP definiert und nicht in den Knotenpunkten. Da die EP meist nicht in der Hauptebene H liegt, folgt $\tau' \neq \tau$.
3. Die durch den Bildanlegerahmen mechanisch realisierte Bildweite weicht von der optischen Bildweite b_o um einen kleinen Fehlbetrag ab.
4. Die Bildebene steht nicht in aller Strenge senkrecht auf die optische Achse.

Im wesentlichen kommt es darauf an, dass aus den genannten Gründen die bildseitigen Winkel τ' nicht mit den gegenstandsseitigen Winkel τ übereinstimmen: Wir definieren daher ein **mathematisches Projektionszentrum O_M** derart, dass es im Abstand c , der **Kammerkonstanten**, senkrecht vor dem Autokollimationspunkt H_A liegt und die Winkel τ auch bildseitig gut realisiert.

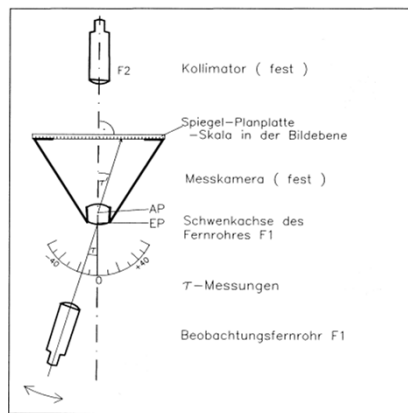
Restfehler führen zur optischen Verzeichnung Δr .



3.1.2 Abbildungsfehler

3.1.2.1 Verzeichnung

Die Kalibrierung einer Messkammer erfolgt im Labor mit Hilfe eines optischen Goniometers.



Schematische Darstellung der Funktionsweise eines (Photo-)Goniometers.



© Zeiss
Goniometer
Zeiss, Oberkochen



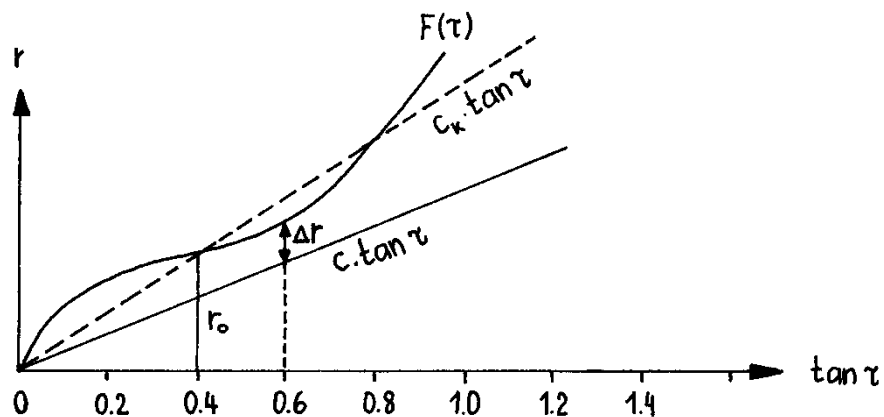
CVG Leica, Heerbrugg © Leica



Multi-collimator
USGS OSL, Reston © USGS

$$F(\tau) = r = c \cdot \tan \tau + \Delta r \quad \dots \text{Bildfunktion}$$

Quelle: M. Cramer, UNI Stuttgart



Ist r bekannt, so ist es möglich, die Kammerkonstante c in Abhängigkeit von Δr beliebig zu wählen.



3.1.2 Abbildungsfehler

3.1.2.1 Verzeichnung

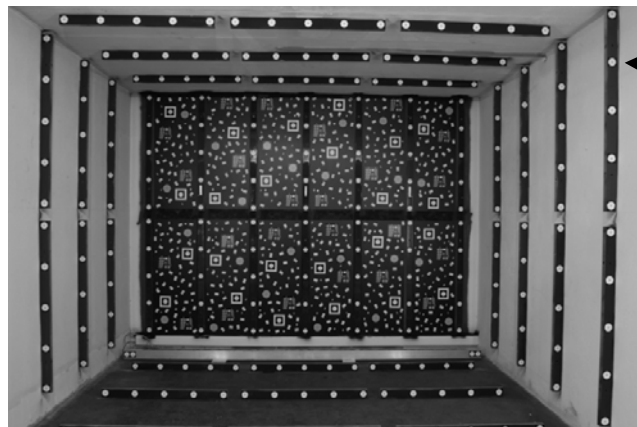
cont.

Für die mathematische Berechnung von c (bzw. c_k) gibt es mehrere Möglichkeiten:

1. c so wählen, dass für einen bestimmten Radialabstand $r = r_0$ die Verzeichnung zu Null wird.
2. Für n gleichabständige Punkte soll die Summe der Verzeichnungswerte verschwinden ($\sum \Delta r = 0$).
3. Für n gleichabständige Punkte soll die Quadratsumme der Verzeichnungswerte ein Minimum werden ($\sum \Delta r^2 = \min.$).

Bei Messkammern erweist sich die Verzeichnung meist als **rotationssymmetrisch**. Durch Zentrierfehler der Linsen, der Schräglage der Bildebene gegenüber der optischen Achse sowie auch der Linsenfehler an sich, können Verzeichnungskurven in den 4 Halbdagonalen zwar ähnlich aber nicht deckungsgleich sein (= **asymmetrische Verzeichnung**). Außerdem können noch **tangentiale Verzeichnungen** auftreten. Der Ursprung der Verzeichnungskurve wird oft auf einen Symmetriehauptpunkt H_S bezogen.

Praktische Durchführung: **Kammer-/Kamerakalibrierung** im Labor (siehe vorhin) bzw. durch **Bildkalibrierung** (a: Prüffeld im Labor bzw. vor Ort → **Testfeldkalibrierung** oder b: **Simultankalibrierung**). Wird die Simultankalibrierung nur mit *photogrammetrischen Beobachtungen* ausgeführt, spricht man auch von **Selbstkalibrierung**.



Passpunkt
mit bekannten Koordinaten

zahlreiche
Verknüpfungspunkte
an der Stirnseite

3D Testfeld (nicht mehr vorhanden) von Microsoft Vexcel in Graz

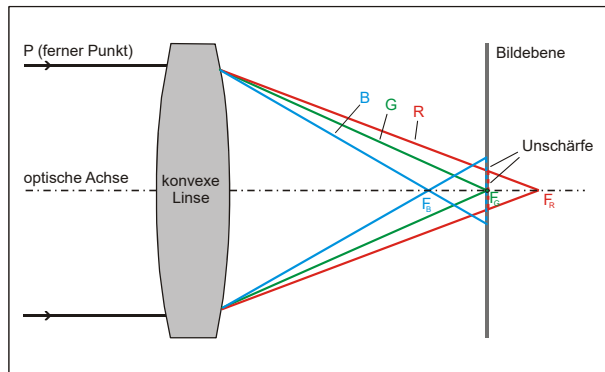


3.1.2 Abbildungsfehler

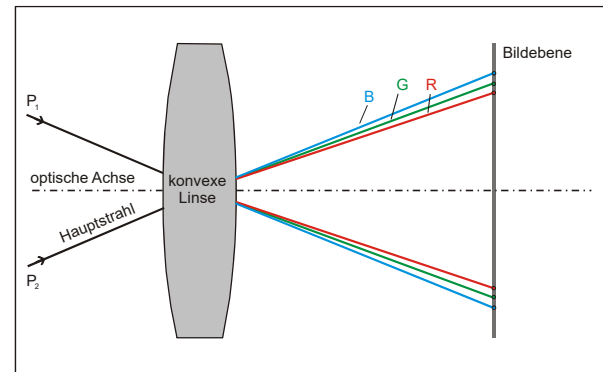
3.1.2.2 Chromatische Aberration



- Bei teuren Hochleistungskameras (z.B. analogen Luftbildkameras) erfolgt(e) die Minimierung des Einflusses der chromatischen Aberration durch Verwendung von Spezialobjektiven (Aplanate, Apochromate).
- Farbdigitalkameras (Consumer-Kameras) verursachen i. Allg. große Farbfehler in den RGB-Bildern.
- Es gibt zwei Arten von Farbfehlern:



Farblängsfehler (longitudinale chromatische Aberration)



Farbquerfehler (transversale chromatische Aberration)

Der Farbquerfehler ist in der Bildmitte Null und in den Bildecken am größten.

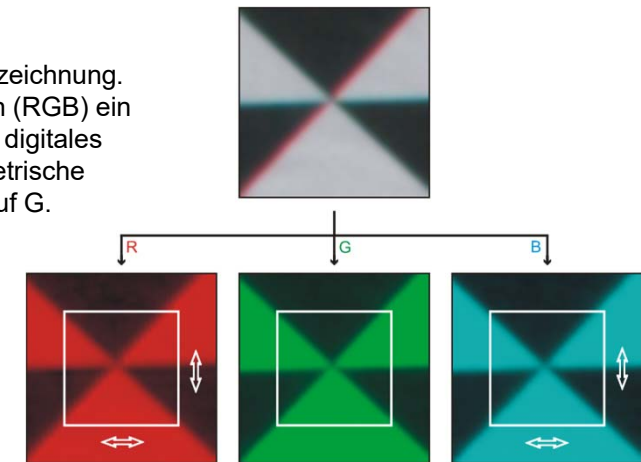
- Digitale Korrektur des Farbfehlers:
- Der Farblängsfehler kann nicht digital korrigiert werden!
 - Der Farbquerfehler wirkt wie eine radial-symmetrische Verzeichnung. In erster Näherung ergibt sich zwischen den 3 Farbkanälen (RGB) ein Maßstabsunterschied. Registrierung der Farbkanäle durch digitales Post-Processing: ① Messen der Farbverschiebung (geometrische Farbkalibrierung) mit ② Resampling der Kanäle R und B auf G.



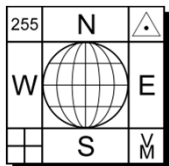
Rechnerische Korrektur der chromatischen Aberration mit DISTCORR (TU Graz)



Kommerzielle Lösung z. B. von Hasselblad: "Digital APO Correction (DAC)"

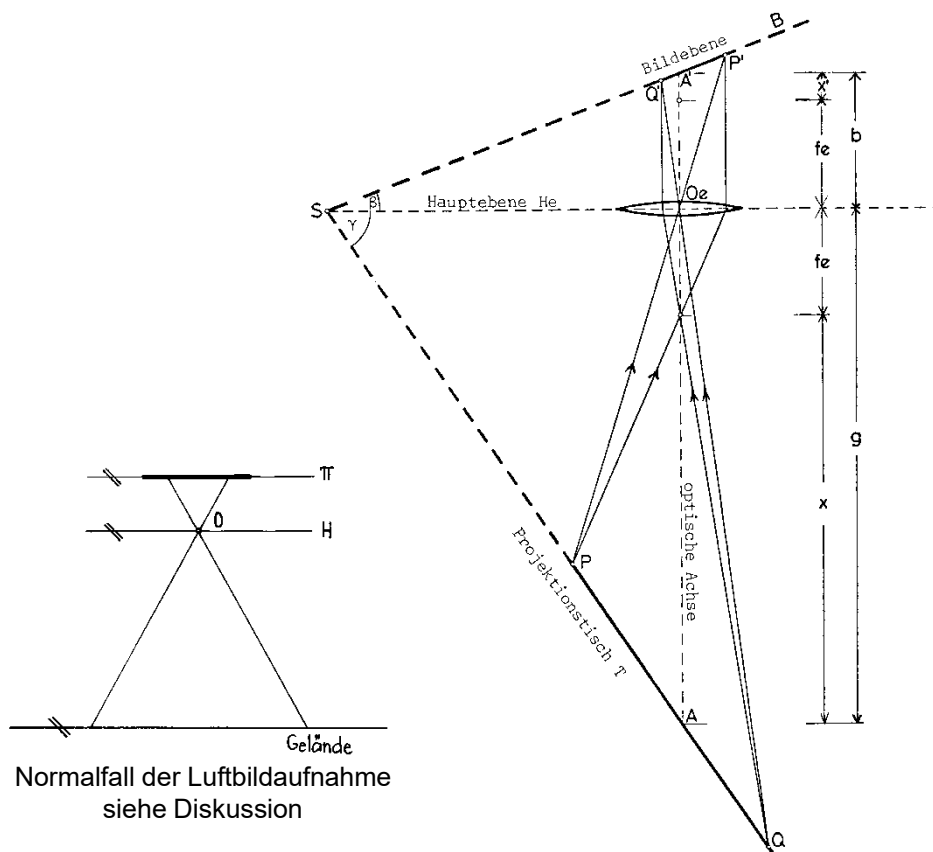


Messung der Farbverschiebung an einem schwarz-weißen Muster durch Image Matching (z. B. LSM).



3.1.3 Scharfabbildung

3.1.3.1 Scheimpflugbedingung



Theodor Scheimpflug
(1865-1911)

Die **Scheimpflugbedingung** besagt, dass sich die Bildebene, die Hauptebene(n) und die Objektebene in einer Schnittgeraden S schneiden müssen.



3.1.3 Scharfabbildung

3.1.3.1 Scheimpflugbedingung

Für die Scharfabbildung einer ausgewählten Objektebene in die Bildebene muss die Linsengleichung für alle homologen Punkte der Bild- und Objektebene gelten.

Dies kann dadurch erfüllt werden, indem

1. die Linsengleichung für die Punkte in der optischen Achse AA' eingehalten wird und bei
2. gleichzeitiger Berücksichtigung der Scheimpflugbedingung.

Die Scheimpflugbedingung spielt(e) in der photographischen perspektiven Umbildung (= Entzerrung) eine große Rolle!

Diskussion: Im Luftbildfall ist die Scheimpflugbedingung nur im Normalfall (= Senkrechtaufnahme) streng erfüllt. Bei der geneigten Aufnahme eines ebenen Objektes (Gelände) ist die Scheimpflugbedingung nicht eingehalten. Die dadurch im Prinzip auftretende Unschärfe spielt – zumindest im Luftbildfall – wegen der großen Aufnahmeentfernung keine Rolle. In der terrestrischen Photographie/Photogrammetrie ist jedoch die daraus resultierende Unschärfe (Tiefenschärfe) zu berücksichtigen.



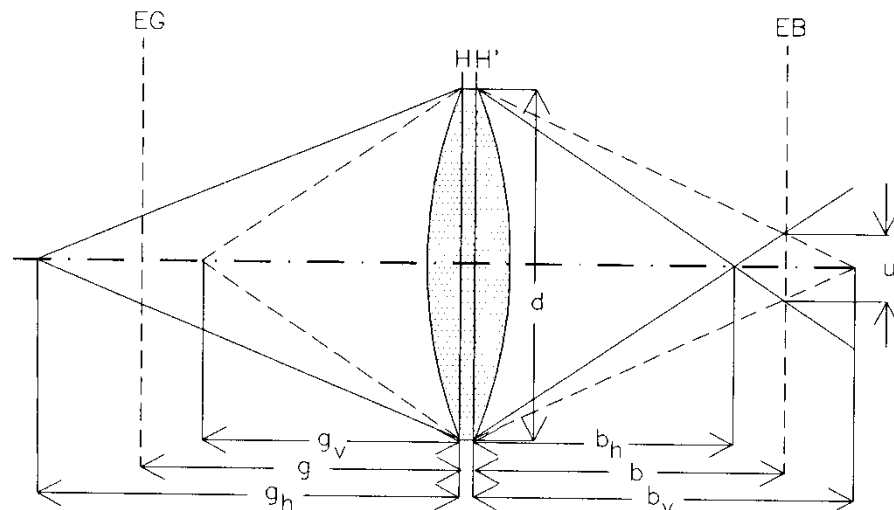
3.1.3 Scharfabbildung

3.1.3.2 Tiefenschärfe

Die Theorie der optischen Abbildung beruht auf der projektiven Zuordnung ebener Gebilde. Messbilder sollen jedoch i. Allg. *räumliche Gebilde* erfassen und diese in die Bildebene mit hinreichender Schärfe wiedergeben.

Dies führt vorerst zum Begriff **Schärfentiefe**, der den Bereich des Objektraumes angibt, der auf noch tolerierter Unschärfe (= **Tiefenschärfe**) beruht.

Da durch Unschärfe ein ungefähr kreisförmiger Lichtfleck entsteht, kann diese Toleranz als maximaler Durchmesser dieses Kreises festgelegt werden.



EG ... eingestellte Gegenstandsebene
EB ... eingestellte Bildebene

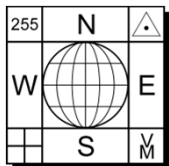
g ... Gegenstandsweite
 b ... Bildweite
 f ... Brennweite

u ... Durchmesser des „Zerstreuungskreise“

g_i ... effektive Gegenstandsweite
 g_v ... vordere Tiefe „Vordertiefe“
 g_h ... hintere Tiefe „Hintertiefe“
 d ... Blendendurchmesser

$k = f/d$... Blendenzahl

Schärfentiefe $T = g_h - g_v$.
 u ist das Maß für die Tiefenschärfe.



3.1.3 Scharfabbildung

3.1.3.2 Tiefenschärfe

cont.

$$g_v = \frac{g \cdot f^2}{f^2 + \frac{f}{d} \cdot u \cdot (g-f)} \quad , \quad g_h = \frac{g \cdot f^2}{f^2 - \frac{f}{d} \cdot u \cdot (g-f)} \quad , \quad g = \frac{2 \cdot g_v \cdot g_h}{g_v + g_h} \quad ; \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

$$u_i = \frac{\left(\frac{g}{g_i} - 1\right) \cdot f^2}{(g-f) \cdot \frac{f}{d}}$$

$$g_h \rightarrow \infty \quad g_\infty = \frac{f^2}{\underbrace{\left(\frac{f}{d}\right) \cdot u}_{g_\infty = 2 \cdot g_v}} \quad T = (\infty, g_v) \quad ; \quad \text{Grenzübergang} \Rightarrow g = \frac{2 \cdot g_v}{\frac{g_v}{g_h} + 1} \Rightarrow u_\infty = \frac{f^2}{\left(\frac{f}{d}\right) \cdot g_\infty}$$

Hinsichtlich der Zunahme von T gilt:

1. größere Blendenzahl (abblenden)
2. kleinere Brennweite (z.B. Weitwinkelobjektiv)
3. g nimmt zu (Objekt $\rightarrow \infty$)

Diskussion: Schärfentiefe spielt in der Nahbereichsphotogrammetrie eine große Rolle.

Aerophotogrammetrie: Fokussierung auf ∞ , Kammerkonstante $c \cong$ Brennweite f .

\Rightarrow Objekt ist sehr weit weg und daher immer scharf abgebildet.



3.1.3 Scharfabbildung

3.1.3.3 Beugungs- und Bewegungsunschärfe

Beugungsunschärfe:

Zufolge des Wellencharakters des Lichtes und dessen Beugung an einer kreisförmigen Blende gibt es keinen idealen, d.h. dimensionslosen Bildpunkt.

Aus der Beugungstheorie folgt, dass kein photographisch abgebildeter Punkt kleiner sein kann, als die verwendete Blendenzahl in μm .

$$u_{\min} \approx k \approx \frac{f}{d}$$

Der Minimalabstand zweier gerade noch als 2 Punkte unterscheidbarer Beugungsscheibchen wird mit

$$\delta = \frac{u}{2} = \frac{k}{2} \text{ angegeben.}$$

Bewegungsunschärfe:

Weitere Unschärfen werden durch die Bildwanderung während der Zeit der Verschlussöffnung verursacht, die eine Folge der Bewegung des Flugzeuges, dessen Rotationen und Eigenschwingungen bzw. der Bewegungen des Objektes sind.

$$u_{\text{th}} = v \cdot t \cdot \frac{c}{h} = \frac{v \cdot t}{m_b}$$

Moderne Luftbildmesskameras sind mit einer Vorrichtung zur Bewegungskompensation ausgestattet (vgl. Abschnitt 3.2).



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Die beiden Hauptaufgaben, die mit den Luftbildaufnahmen gelöst werden sollen, sind die

- Luftbildmessung und die
- Luftbildinterpretation.

Abhängig von der Aufgabenstellung sind verschiedene Ansprüche an eine Luftbildkamera/-kammer zu stellen.

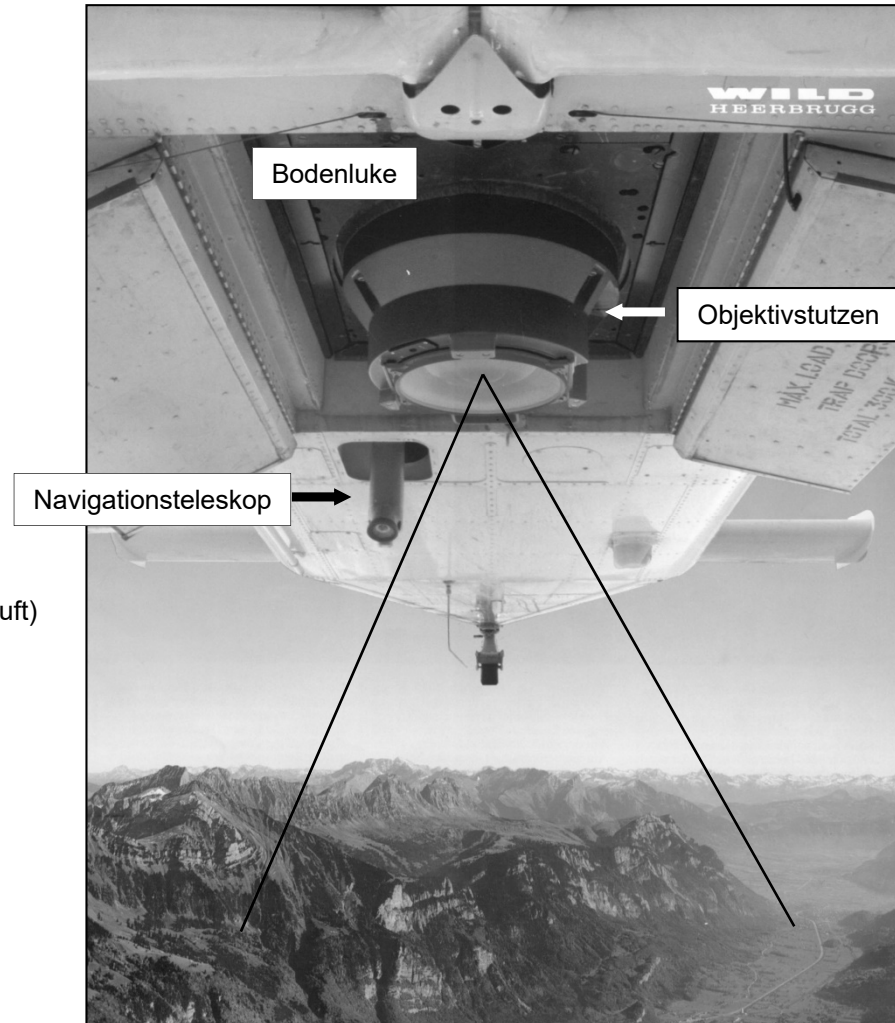
Die Luftbildmesskamera ist eine außerordentlich hochentwickelte Spezialkamera für die Herstellung von **Reihenmessbildern**.

Daher auch die Bezeichnung **Reihenmesskamera**.

Beechcraft Super King Air 200 (Bildflugzeug des BEV, 2010 verkauft)



Vermessungsflugzeug

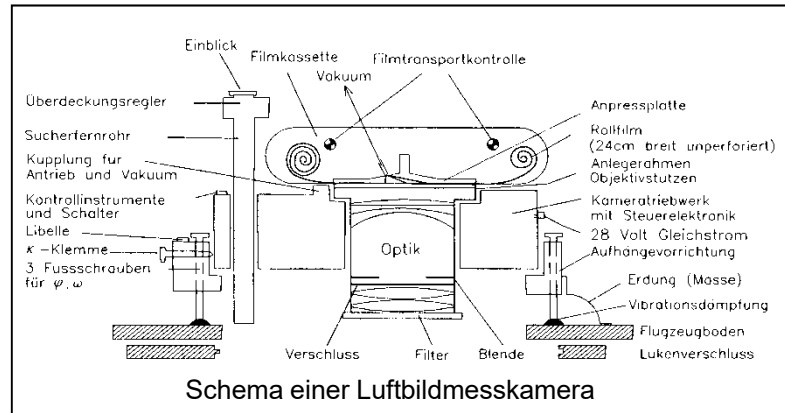




3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Aufbau eines Luftbildaufnahmesystems für Mess- und Interpretationszwecke



Systemkamera (Leica RC30 Aerial Film Camera) mit einzelnen Systembausteinen (Baukastenprinzip)



- 1 ... austauschbare Einzel-Filmkassette
- 2 ... Triebwerk
- 3 ... Kameraaufhängung
- 4 ... Wechselobjektiv
- 5 ... Sucher- und Navigationsfernrohr





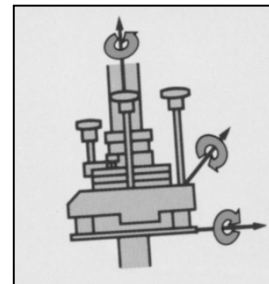
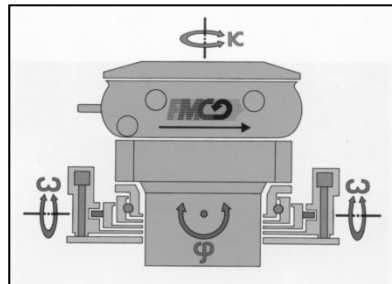
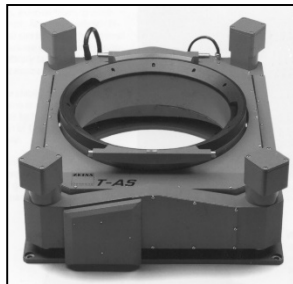
3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Aufhängevorrichtung:

Die Aufhängevorrichtung gewährleistet die stabile Verankerung der Filmkamera im Flugzeugrumpf und sorgt für die *Schwingungsabsorption* (= Vibrationsdämpfung) und *Horizontierung* bzw. *Verkantung* (Korrektur des Abtriftwinkels) der Messkammer (= Kamerahorizontierung um alle 3 Drehachsen über Servomotoren). Vibrationsdämpfende Elemente tragen die Aufhängevorrichtung, welche manuell über Fußschrauben oder ferngesteuert von einem Navigationsteleskop oder auch automatisch etwa mit einer Kreiselsteuerung horizontiert werden kann.

Längs- und Querneigung: $\pm 5^\circ$
Abtriftwinkel: $\pm 30^\circ$





3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Objektivstutzen:

- Hervorragende Informationsübertragungskapazität (gute Kontrastwiedergabe)
- Hohe und gleichmäßige Bildqualität über das ganze Bildformat und für alle Spektralbereiche
- Extrem niedrige und für die Auswertung vernachlässigbare Verzeichnung
- Hohe Lichtstärke für kurze Belichtungszeiten und Flughöhen
- Hohes Auflösungsvermögen bis zum Bildrand
- Langzeit-Justierhaltung
- Zentraler Rotationsverschluss mit hohem Wirkungsgrad: 1/100 – 1/1000 Sekunde (⇒ exakte Metrik)
- Kontinuierliche Irisblende (4-22)
- Eingebauter Belichtungsmesser
- Randdatenabbildung
- Formatsparende Rahmenmarkenabbildung



Filter:

- Spektrale Filterung
- Ausgleich des Lichtabfalls
- Ausschluss nicht erwünschter Spektralbereiche (vgl. Filmtypen); z.B. IR-Filter
- Absorption des kontrastminimierenden Streulichtes (Himmelslichtes) durch Haze-Filter
- optimale Lichtverteilung ($\cos^4\tau$ - Gesetz!)
- Farbbalance-Korrektur
- verschiedene Filter für verschiedene atmosphärische Bedingungen

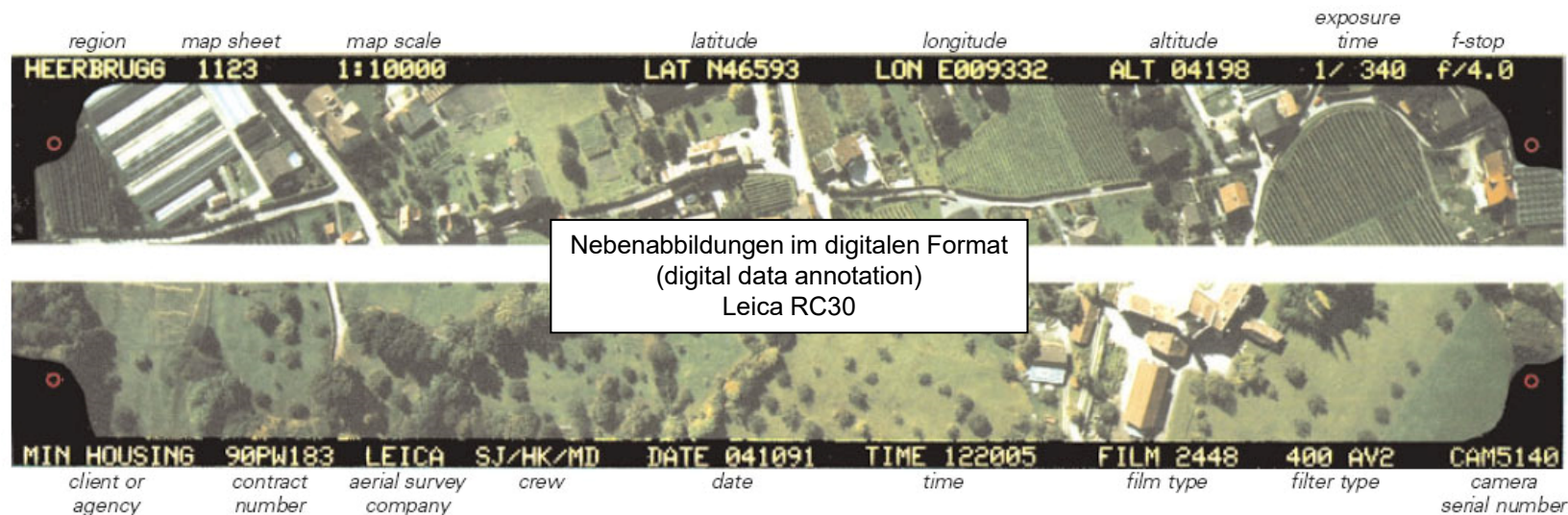


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Nebenabbildungen:

- 4 oder 8 Rahmenmarken (mit Nummern)
- Neunte, asymmetrisch angeordnete Rahmenmarke (wenn 1 ohne Nummer)
- Projektkurzbeschreibung (Schreibtäfelchen)
- Datum (Schreibtäfelchen)
- Uhrzeit
- Bildnummer
- Kamera-/ Objektivnummer
- Kammerkonstante
- Kassettensnummer (Schreibtäfelchen)
- Daten der äußeren Orientierung (INS und/oder GPS)
- Längsüberdeckung
- Bildmaßstab
- Dosenlibelle
- Grobhöhenmesser
- Feinhöhenmesser
- Belichtungszeit
- Blende
- Bildwanderungsbetrag
- Graukeil
- etc.





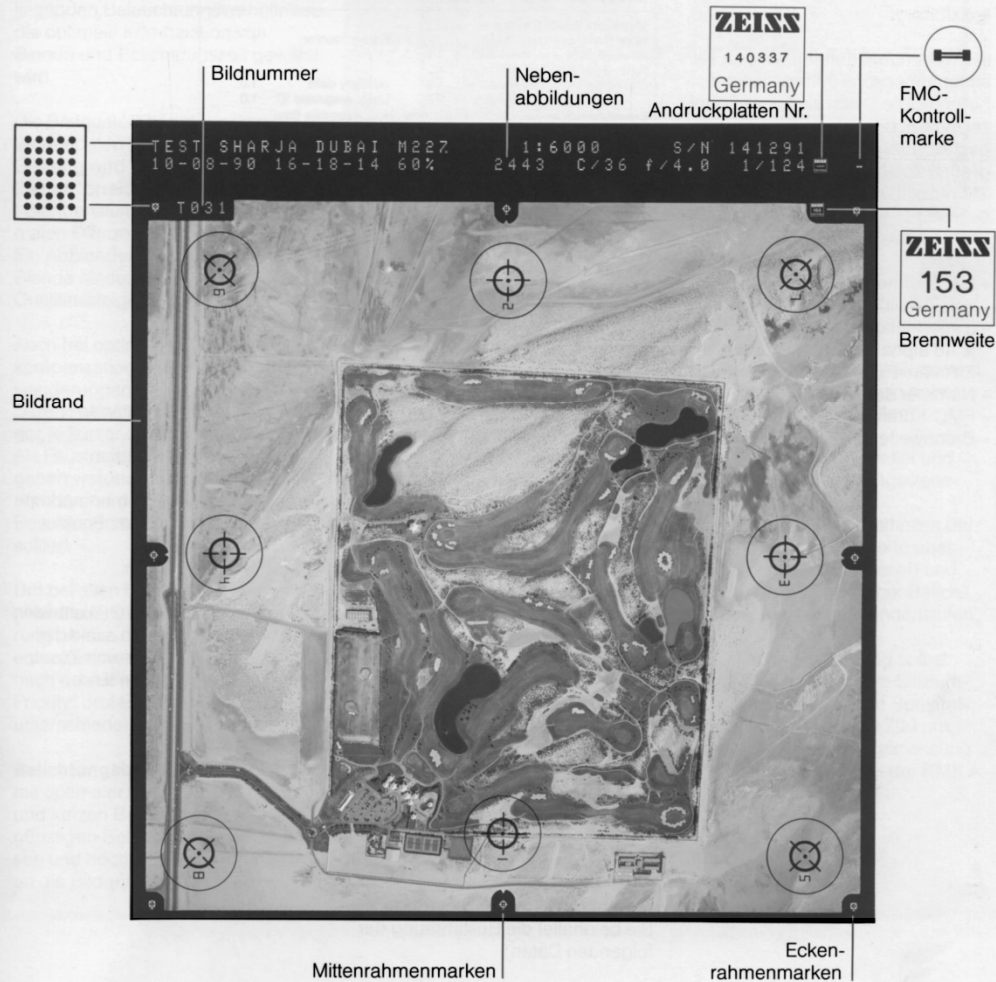
3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Eine photographische Aufnahme wird zum photogrammetrischen Bild, wenn das Objektiv streng nach dem Gesetz der Zentralprojektion abbildet und die innere Orientierung der Kammer durch Rahmenmarken und Kalibrierungsdaten definiert ist.

Die geometrische Genauigkeit der RMK TOP Objektive entspricht dem hohen Standard der bisherigen RMK A Objektive. Dies bedeutet, daß die Verzeichnung im Bereich weniger Mikrometer liegt und Rahmenmarkenschnittpunkt und optischer

Symmetriepunkt innerhalb 0,02 mm beieinander liegen.



Nebenabbildungen auf einem Messbild (RMK TOP)

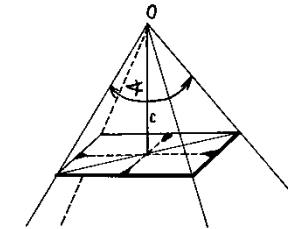


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Objektivtypen:

	SW	NW	ZW	WW	ÜWW
Bildwinkel α	Schmalwinkel 33 gon	Normalwinkel 62 gon	Zwischenwinkel 85 gon	Weitwinkel 100 gon	Überweitwinkel 140 gon
Kamerakonstante c [cm]	60	30	21	15	9
Verhältnis von Kamerakonstante c zur Bilddiagonale	2:1	1:1	2:3	1:2	1:4
Basisverhältnis (B/H) bei 60% Längsüberdeckg.	1:6.6	1:3.3	1:2.3	1:1.6	1:0.95
Modellfläche (3.7) ($h = \text{const.}$)	6	25	50	100%	290
Flughöhe über Grund (Fläche = const., Maßstab = const.)	400	200	150	100%	60
Anwendungsziele bzw. Beurteilungskriterien	Trend zur längeren Brennweite ←	←	Interpretation Photokarten Hochgebirge Städte	→	Trend zur kürzeren Brennweite ←
			Aerotriangulation Flugkosten Übersichtsflüge Höhengenaugigkeit	→	



Die wichtigsten Objektivtypen der Luftbildmessung
(Standardbildformat: 23 cm x 23 cm, h = Flughöhe über Grund)

Frühere Herstellerfirmen:

Fa. WILD – Heerbrugg: AVIOPHOT RC10, RC10A, RC20
 Fa. ZEISS – Oberkochen: RMK (Reihenmesskammer)
 Fa. JENOPTIK – Jena: LMK (Luftmesskammer)

Sonderanfertigungen für das Space Shuttle:

Fa. ZEISS – Oberkochen: MC (Metric Camera), Dez. 1983; RMK A 30/23, STS-9 Spacelab 1 Mission.
 Fa. ITEK – U.S.A.: LFC (Large Format Camera), Okt. 1984; Doppelformatkamera 23x46 cm², $f = 30$ cm.



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Herstellerfirmen (Stand 2007):

Intergraph: RMK TOP Aerial Survey Camera System (Gesamtlösung)

- RMK TOP 15, Weitwinkelobjektiv, $f = 153 \text{ mm}$
- RMK TOP 30, Normalwinkelobjektiv, $f = 305 \text{ mm}$

Weitere Informationen unter <http://www.intergraph.com/>



← Produktion eingestellt?

Leica: RC30 Aerial Camera System (Gesamtlösung)

- 15/4 UAG-S, Weitwinkelobjektiv, $f = 150 \text{ mm}$
- 30/4 NAT-S, Normalwinkelobjektiv, $f = 300 \text{ mm}$

Weitere Informationen unter <http://www.leica-geosystems.com/>

← Abverkauf im Jahr 2006!



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Triebwerk:

Das Triebwerk enthält den Filmtransportmechanismus, die elektronische Vakuumpumpe, Mechanismus zum Heben und Senken der Anpressplatte, Registriereinrichtungen für die Abbildung auf den Film.

Der *Kamerazyklus* läuft automatisch nach jedem Auslösebefehl ab: Belichtung, gleichzeitig wird bei den modernen Kameras die Bildebene verschoben (Bildwanderungskompensation; vgl. FMC), Anheben der Anpressplatte, Abblasen des Films, Weiterstellen des Bildnummerzählwerkes, Ansaugen des Films und Anpressen an den Anlegerahmen.

Möglichkeiten der Bildfolge: *gezielte Einzelaufnahmen* und *Reihenaufnahme*.

Bei der Reihenaufnahme sorgt der Überdeckungsregler dafür, dass die gewünschte Überdeckung (60% - 80%) eingehalten wird. Moderne Lösung über GPS (vgl. Abschnitt Flugplanung). Die Geschwindigkeit des Kamerazyklus legt die Aufnahmezeit (1.6 – 2 sec.) fest.

Filmkassetten:

Filmlängen zu 120 m, 150m bzw. 220m, abhängig von der Filmbasisdicke.

Sucherfernrohr:

Das Sucherfernrohr dient der Bildflugnavigation und der Orientierung der Kamera während des Fluges. In moderneren Systemen: GPS-Navigation, Kamerastabilisierung über elektronisch gesteuerte Servomotoren (vgl. Abschnitte über FMC und Flugplanung).

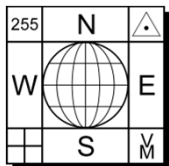
Überdeckungsregler:

In den älteren Systemen hatte der Überdeckungsregler die Aufgabe, Reihenaufnahmen in bestimmten Zeitintervallen selbstständig auszulösen. Die Bildfolgezeiten sind abhängig von der Flughöhe und Fluggeschwindigkeit (v/h -Verhältnis) über Grund, vom Blickwinkel des Aufnahmeobjektivs und vom gewünschten Überdeckungsgrad der Aufnahmen.

Das *Navigationsfernrohr* vereinigt die Aufgaben des Sucherfernrohres und des Überdeckungsreglers.

Steuereinheit:

Mikrocomputersteuerung der Abläufe.
Schnittstelle zu GPS und INS.

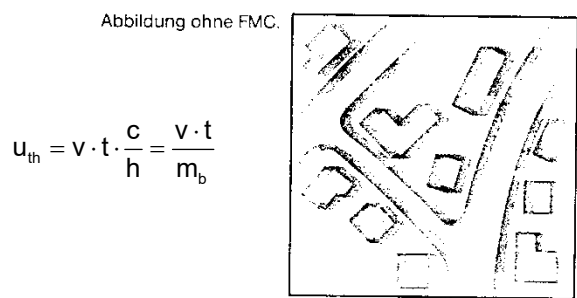


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

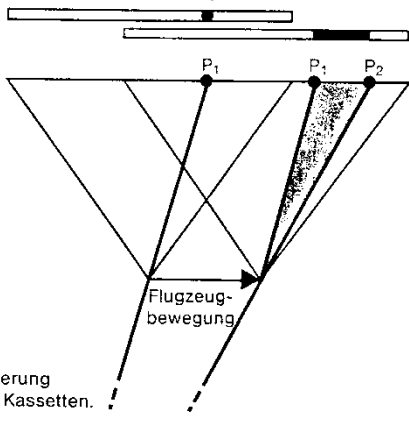
Unschärfen entstehen durch Bildwanderung während der Zeit der Verschlussöffnung. Sie sind eine Folge der (1) Fortbewegung des Flugzeuges, dessen (2) Rotationen und Eigenschwingungen.

ad 1) FORWARD MOTION COMPENSATION (FMC) - Bewegungskompensation

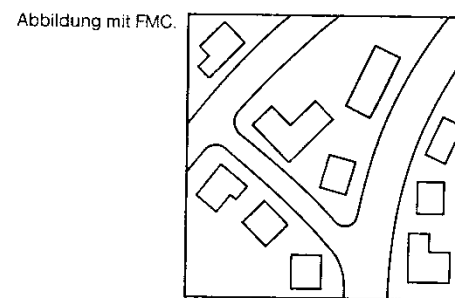


$$u_{th} = v \cdot t \cdot \frac{c}{h} = \frac{v \cdot t}{m_b}$$

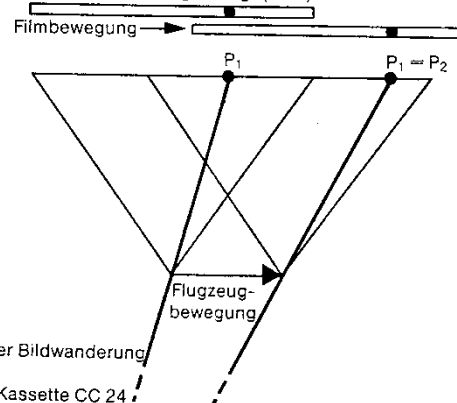
Film in fester Position zum Projektionszentrum.



1 mm/sec
bis
64 mm/sec



Film in Flugrichtung bewegt (FMC).



max. 640 μm
Bildwanderung
kann
kompensiert
werden



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

ad 2) ANGULAR MOTION COMPENSATION

Kamerastabilisierung durch elektronisch gesteuerte Servomotoren.

Möglichkeit der Verbindung mit Applinix POS. Hier werden die Neigungswinkel mit sehr hoher Genauigkeit in Echtzeit ermittelt und durch die Kamerastabilisierung kompensiert
 → Leica PAV30 PosOp



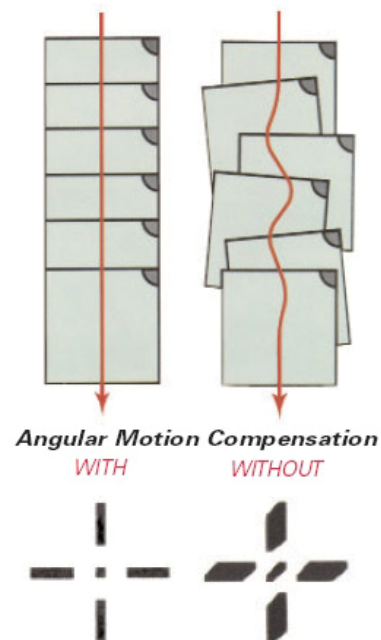
Leica PAV30 gyro-stabilized camera mount

Smearing in the image plane due to pitch or roll (φ und ω) movements for exposure time 1/200sec.

	Turbulent $\sim 10^\circ / s$		⇒	Stabilized $\sim 0.3^\circ / s$	
	center	corner		center	corner
SAG f = 88mm	77 μ	222 μ		2 μ	7 μ
UAG f = 153mm	134 μ	209 μ		4 μ	6 μ
NAT f = 303mm	264 μ	299 μ		8 μ	9 μ

Smearing in the image plane due to drift movements for exposure time 1/200sec. (κ)

	Turbulent $\sim 10^\circ / s$		⇒	Stabilized $\sim 0.3^\circ / s$	
All lens cones (independent of focal length)	center	corner		center	corner
	0 μ	132 μ		0 μ	8 μ



Abschätzung von Bewegungsunschärfen durch Kameraverschwenkung



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.1 Luftbildmesskamera

Image Motion Compensation

<https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-osprey-4-1/>

- forward motion blur
- angular/rotational motion blur

Correcting of motion blur

- *shutter speed*
Faster shutter requires larger aperture (risks lens distortion or higher gain (risks noise)).
- *mechanical FMC* (Forward Motion Compensation)
- *electronical FMC* through Time Delayed Integration (TDI) technique
- *software-based, AMC* (Adaptive Motion Compensation introduced first by Vexcel Imaging) through deconvolution (germ. Entfaltung/ inverse Faltung)

FMC works fine for an explicit average image scale but cannot handle different scales as they exist in oblique images or nadir images as well. Angular motion blur can be reduced by gyro-stabilized sensor mount. The magnitude of angular motion blur depends on the amount of angular motion during the exposure and the position in the image.

AMC: The individual point spread function (PSF) of each image position is estimated from known angular and translatory movement of the camera by making use of IMU and GNSS observations. A (rough) DSM is needed for computing the image scale at any image point. Specific effects caused from the camera system itself are known from the camera calibration.

AMC is computationally very demanding. AMC should not change the intrinsic parameters (x_0 , y_0 , c) of the camera.

Motion blur caused from a translatory movement

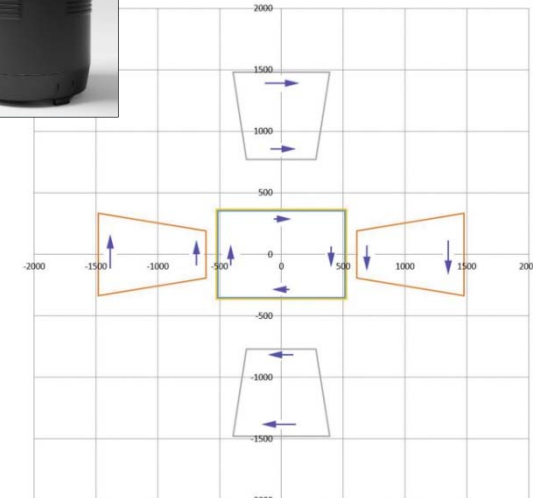
Speed over ground (SoG) = 75 m/sec
Scale = 1:10000
Exposure time value (Tv) = 2 milli-seconds
Pixel size = 4 μm

Magnitude of the blur = $7.5 \mu\text{m} * Tv = 16 \mu\text{m} = 4 \text{ pixels}$

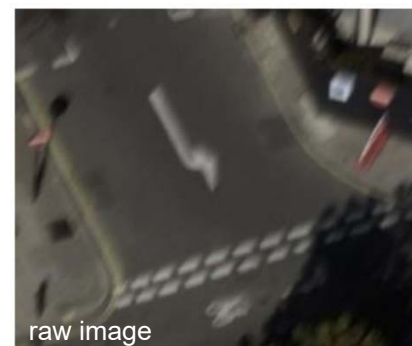
Source: Dohr Stefan, Muick, M., Schachinger, B., Gruber, M. (2022): IMAGE MOTION COMPENSATION – THE VEXCEL APPROACH. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B1-2022, 333-338. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B1-2022/333/2022/>



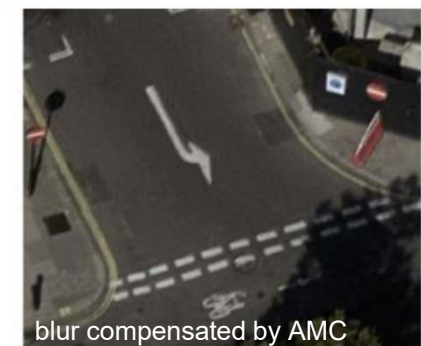
Vexcel Imaging UltraCam Osprey 4.1



Angular motion blur (Yaw) at different image positions

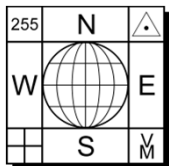


raw image



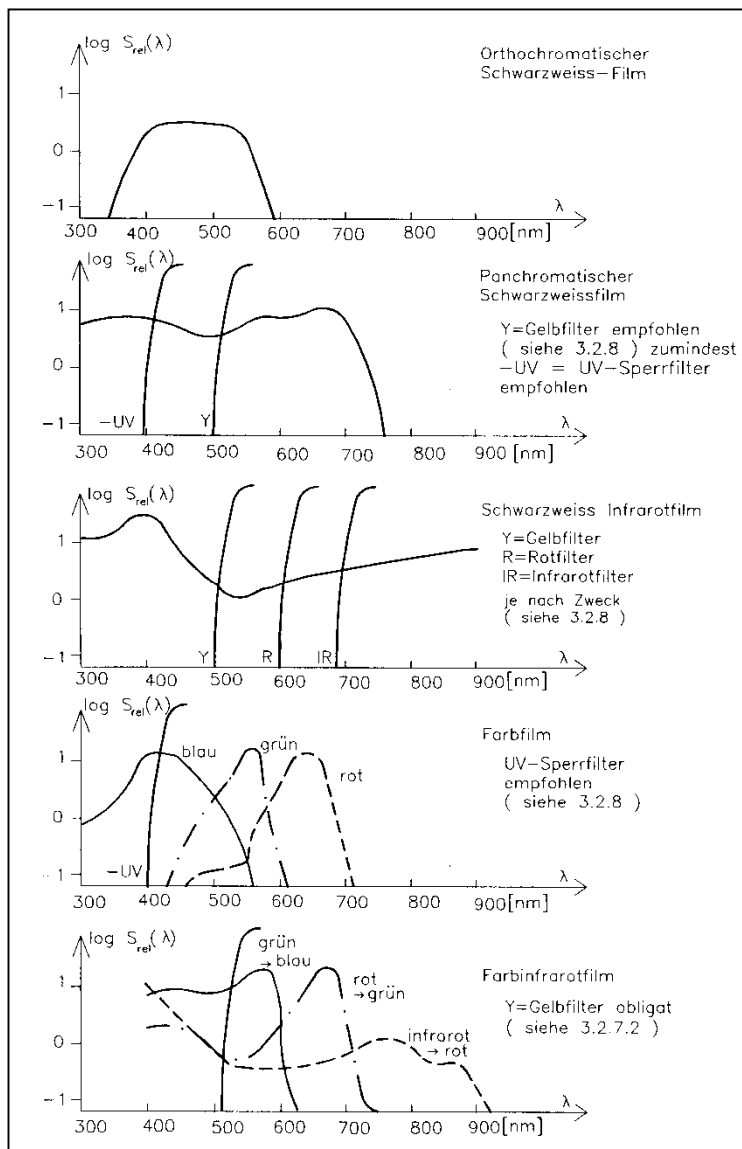
blur compensated by AMC

Street details of one large scale oblique image (left). Strong angular motion blur at about 11 pixels exists in the raw image data and this was successfully compensated by AMC.



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.2 Luftbildfilme



Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Filmtypen

- Orthochromatische Schichten sind blau-grün-empfindlich. Entwicklung bei rotem Dunkelkammerlicht.
- Panchromatisch sensibilisierte Schichten geben alle Spektralbereiche des sichtbaren Lichtes in ihren natürlichen Grautönen wieder. Entwicklung bei völliger Dunkelheit.
- Infrarot empfindliche Schwarzweißfilme: blau-rot; IR-Filter um die infrarote Strahlung aufzuzeichnen.
- Farbfilme (negativ bzw. positiv) und Farbinfrarotfilme: Besonders geeignet für Interpretationszwecke aber auch für metrische Luftbildauswertungen (meist im größeren Bildmaßstab).



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.3 Flugplanung und Bildflug

Die **Flugplanung** ist mit der **Projektplanung** untrennbar verbunden.

Randbedingungen: Art des Produktes, Genauigkeit (vgl. Abschnitt 5.6), Geländere relief, etc.

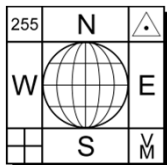
Als **Bildflug** wird ein Flug bezeichnet, welcher der photographischen Erfassung eines vorher definierten Gebietes dient. Der Zweck ist die stereoskopische Erfassung des gewünschten Gebietes, um zu einem späteren Zeitpunkt aus den Bildern Objektinformation (metrisch/ thematisch) zu erhalten.

Bei der Flugplanung wird meistens mit $l = 60\%$ (\Rightarrow Stereomodelle überlappen sich mit 10%) und $q = 30\%$ kalkuliert. Bei Farbinfrarotaufnahmen wird meistens mit $l = 80\%$ geflogen. Es ergeben sich daher jeweils 2 unabhängige Datensätze mit $l = 60\%$ (jedes zweite Luftbild wird ausgewählt). Dies hat gewisse Vorteile (Filmmaterial ist im Vergleich zu den gesamten Flugkosten nicht so teuer!).



Quelle: H.J.Przybilla

Bildflug mit Pilot, Co-Pilot und Navigator

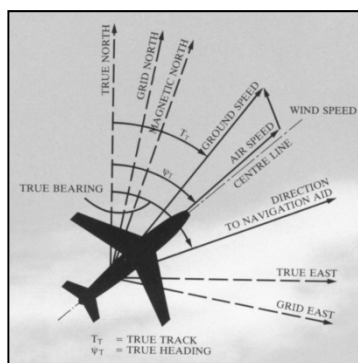
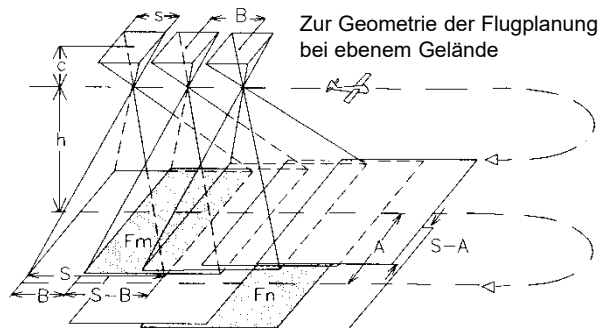


3.2 Luftbildaufnahme

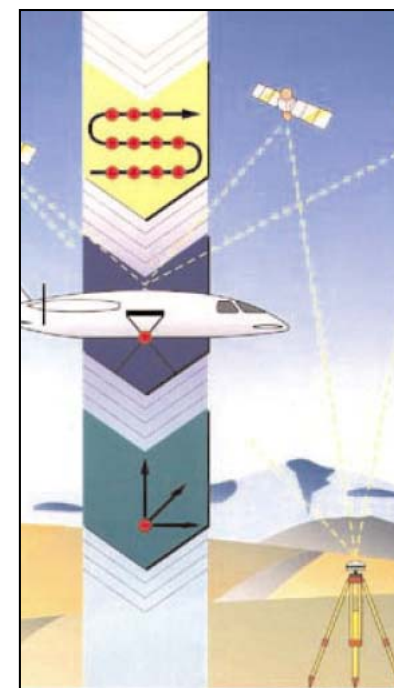
3.2.3 Flugplanung und Bildflug

Bildmaßstabszahl	$m_b = h/c$
Bildseite im Gelände	$S = s \cdot m_b$
Basis im Bild	$b = B/m_b$
Flughöhe über Grund	$h = c \cdot m_b$
Absolute Flughöhe	$Z_0 = h + Z$
Längsüberdeckung (%)	$l = \frac{S - B}{S} 100 = \left(1 - \frac{B}{S}\right) 100$
Querüberdeckung (%)	$q = \frac{S - A}{S} 100 = \left(1 - \frac{A}{S}\right) 100$
Gelände­fläche eines Bildes	$F_b = S^2 = s^2 \cdot m_b^2$
Basislänge bei $l\%$ Längsüberdeckung	$B = S \left(1 - \frac{l}{100}\right)$
Streifenabstand bei $q\%$ Querüberdeckung	$A = S \left(1 - \frac{q}{100}\right)$
Modellanzahl pro Streifen (Länge L) ¹	$n_m = \left[\frac{L}{B} + 1\right]$
Bilderanzahl pro Streifen	$n_b = n_m + 1$
Streifenanzahl pro Block (Breite Q) ¹	$n_s = \left[\frac{Q}{A} + 1\right]$
Stereoskopisch erfaßte Modellfläche	$F_m = (S - B) \cdot S$
Im Block pro Modell neu erfaßte Fläche	$F_n = A \cdot B$
Aufnahmefolgezeit in [s]	$\Delta t = \frac{B \text{ [m]}}{v \text{ [m/s]}} \geq 2.0 \quad (3.7.2)$

- A = Abstand der Flugachsen, Streifenabstand
- B = Basis bei der Aufnahme
- c = Kamerakonstante
- s = Bildseite (bis zum Rand!)
- h = Flughöhe über Grund
- Z = Geländehöhe
- Z₀ = Absolute Flughöhe
- v = Fluggeschwindigkeit über Grund
- L = Länge eines Streifens oder Aufnahmegebietes (Blockes)
- Q = Querausdehnung des Aufnahmegebietes (Blockes)



Leica ASCOT
(Aerial Survey Control Tool):
GPS-Supported Flight Management System
for the Acquisition of Aerial Photography



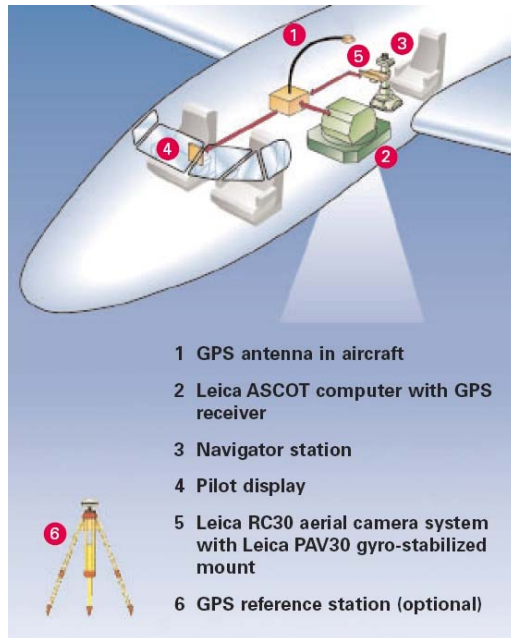
Berechnung von Kenngrößen einer Flugplanung

¹ [] = größtes Ganzes

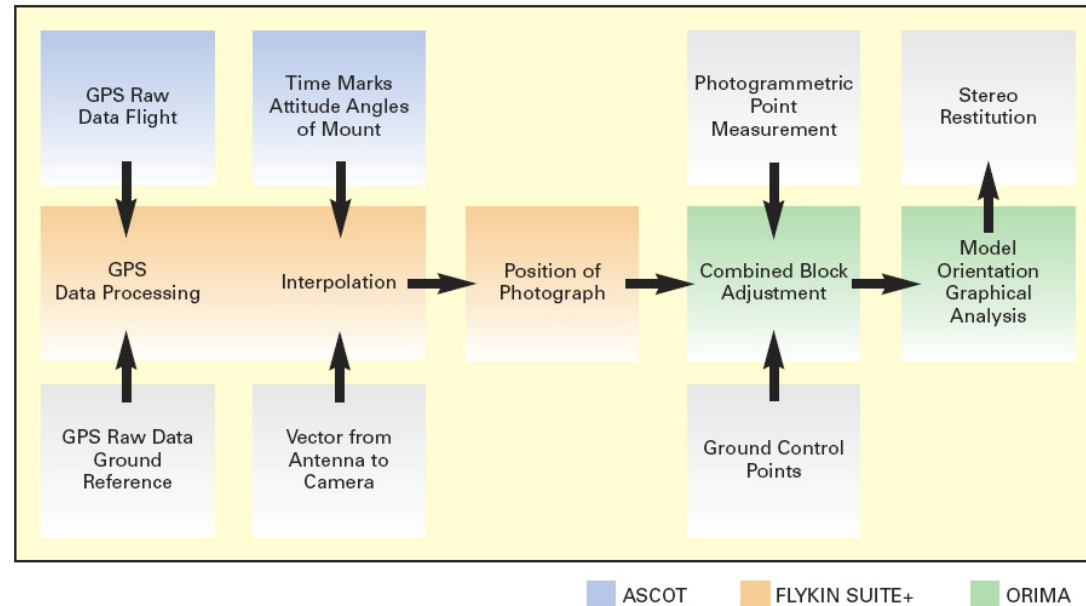


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.3 Flugplanung und Bildflug



Data Flow of the Leica Geosystems Solution



GPS ... Global Positioning System

- genaue Bestimmung der Koordinaten des Projektionszentrums
- Navigation und punktgenaue Kameraauslösung (Punktnavigation)
- Messung photogrammetrischer Passpunkte

GPS-gestützte Aerotriangulation:

Die genaue Bestimmung der Koordinaten der Projektionszentren erfolgt mit "kinematic differential GPS" und mit entsprechender Auswertesoftware, die es erlaubt die Offset-Koordinaten (Verschiebungsvektor Antenne → Projektionszentrum) zu bestimmen. Passpunkte selbst sind auch mit GPS gemessen.

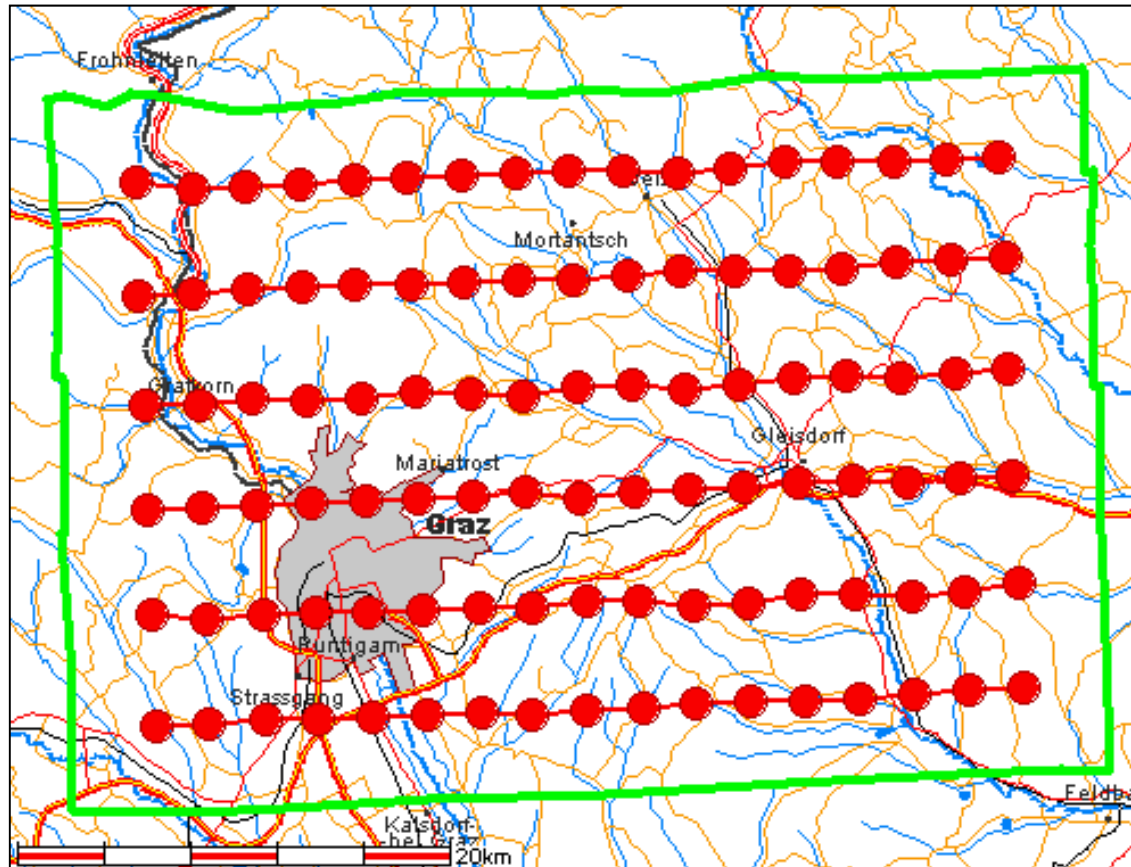


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.4 Luftbildarchiv des BEV

Im Luftbildarchiv des BEV stehen mehr als 450 000 Messungsaufnahmen von ganz Österreich ab dem Jahre 1949 zur Verfügung. In unterschiedlichen Maßstabsbereichen ist das gesamte Bundesgebiet mehrfach gedeckt. Eine Übersicht der Deckungsräume der einzelnen Flugprojekte und eine Tabelle mit technischen und administrativen Angaben zu den Flügen wird jährlich veröffentlicht. Die Flüge sind in einer Datenbank archiviert.

Messungsflugdatenbank online: <http://www.bev.gv.at/>



Archivnummer: 1997005

Bundesgesetzblatt BGBl. Nr. 173/2004:

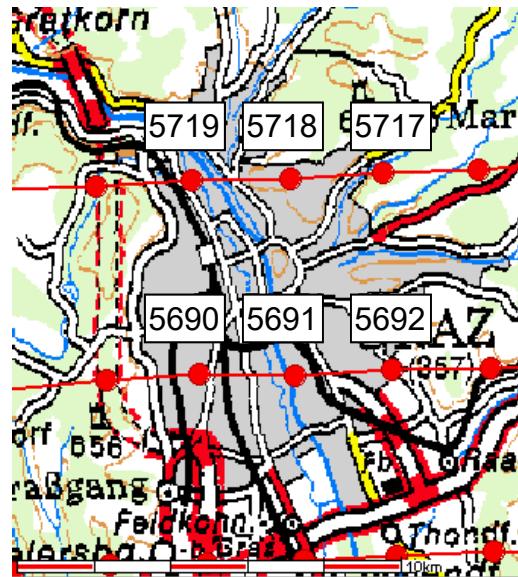
Bewilligungsfreie Herstellung und Verwendung von Luftbild- und Messungsaufnahmen in Österreich.

Bei wichtigen militärischen Interessen kann die Herstellung von Luftbildaufnahmen durch Verordnung verboten werden bzw. es können Beschränkungen für die Verbreitung von Luftbildaufnahmen festgelegt werden.



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.4 Luftbildarchiv des BEV



Streifen 4

Streifen 5

Streifen 6

Legende:	
Flughöhe	Flughöhe über Adria in Meter
Filmart FF	Filmart Falschfarbe
Filmart FP	Filmart Farbpositiv
Filmart PN	Filmart Schwarz-weiß
q %	Querüberdeckung der Flugstreifen
p %	Längsüberdeckung der Flugstreifen
Maßstab	Maßstab des Flugstreifens in Tausend
MEZ	Mitteuropäische Zeit
P/R	Punktflug, Reihenflug

Archivnummer 1997005

Flugtitel KF 164-165

[Legende](#)

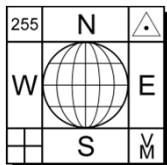
Streifennummer	Flughöhe	Objektiv	Objektivnummer	Maßstab	Nachbarstreifen	q %	p %	P/R	Filmart	Flugdatum	MEZ	Bildnummer	Bildanzahl
1	5700	15/4 UAG	13027	27,8 - 35,0	2	27 - 43	- 60	P	PN	08.04.1997	10:30:00	5763 - 5779	17
2	5700	15/4 UAG	13027	27,8 - 35,1	3	28 - 37	- 60	P	PN	08.04.1997	10:21:00	5744 - 5760	17
3	5700	15/4 UAG	13027	30,4 - 35,1	4	35 - 38	- 60	P	PN	08.04.1997	10:12:00	5725 - 5741	17
4	5700	15/4 UAG	13027	32,4 - 35,3	5	34 - 38	- 60	P	PN	08.04.1997	10:03:00	5706 - 5722	17
5	5700	15/4 UAG	13027	32,7 - 35,2	6	35 - 44	- 60	P	PN	08.04.1997	09:53:00	5687 - 5703	17
6	5700	15/4 UAG	13027	32,9 - 35,4		0 - 0	- 60	P	PN	08.04.1997	09:44:00	5668 - 5684	17

Summe: 6

Summe: 102

Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
 A-1080 Wien, Krotenthallergasse 3 Tel.: +43-1-40146-462 Fax: +43-1-40146-463
 kundenservice@bev.gv.at





3.2 Luftbildaufnahme

3.2.5 Kalibrierungsprotokoll



DEUTSCHER KALIBRIERDIENST (DKD)

Kalibrationslaboratorium für die Meßgröße der geometrischen Optik
 Calibration laboratory for measured quantities geometric optics

AKKREDITIERT DURCH DIE PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB)



Bildflug Fischer
 Mannagottaweg 18
 A-8010 GRAZ, Tel. 0316 / 34 83 43

0456
 DKD-K-05202
 97-01

Kalibrierschein Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
 Calibration mark

Gegenstand
 Object: Aerial Survey Camera

Hersteller
 Manufacturer: Carl Zeiss D-73446 Oberkochen

Typ
 Type: LC 1015

Fabrikat/Serien-Nr.
 Serial number: 266 620/B

Auftraggeber
 Customer: Bildflug Fischer
 Mannagottaweg 18
 A - 8010 Graz

Auftragsnummer
 Order No.: 659 1 5026

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
 Number of pages of the certificate: 4

Datum der Kalibrierung
 Date of calibration: 27.01.97

Der Deutsche Kalibrierdienst ist Unterzeichner des multilateralen Übereinkommens der Westem European Calibration Cooperation (WECC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
 Die Kalibrierung erfolgt auf der Grundlage des zwischen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und dem Träger abgeschlossenen Vertrages.
 Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Herstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI).
 Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
 The Deutsche Kalibrierdienst is signatory to the multilateral agreement of the Western European Calibration Cooperation (WECC) for the mutual recognition of calibration certificates.
 The calibration is performed according to the stipulations of the contract between the Physikalisch-Technische Bundesanstalt and the holder of the calibration laboratory.
 This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the physical units of measurement according to the International System of Units (SI).
 The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt als auch des ausstellenden Kalibrationslaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
 This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Physikalisch-Technische Bundesanstalt and the issuing laboratory.
 Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter der Kalibrierstelle Head of the calibration laboratory	Bearbeiter Person responsible
	03.02.97	Morgebrod	Müller

Carl Zeiss
 Servicebereich Qualität
 Meß-Kalibrierzentrum
 73446 Oberkochen

Telefon 07964-20-3731
 Telefax 07964-20-4511
 Telex 713751-55

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST (DKD)

Page 2 of certificate dated 03.02.97

0456
 DKD-K-05202
 97-01

CAMERA TYPE: LC 1015 SERIAL NO. 266620/B
 LENS TYPE: LAMEGON PL C SERIAL NO. 7384527C
 MAX. APERTURE: F/4.5 NOM. FOCAL LENGTH 150 MM

1) CALIBRATED FOCAL LENGTH = 152.383 MM
 2) DISTORTION /0.001 MM, REFERRING TO P.P. OF SYMMETRY PPS

S/MM=	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
5	0	1	1	3	2	0	0	0	-2	-2	-1	2	4	4	2	-3
6	0	0	1	2	1	0	0	0	-1	0	2	2	3	1	-1	
7	0	1	0	1	0	-1	0	-2	-2	-4	-3	-1	1	2	1	-2
8	0	0	1	1	0	-1	-2	-2	-3	-4	-3	2	3	3	1	-6
AV.	0	1	1	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-2	1	3	3	1	-3

3) P.P. OF AUTOCOLLIMATION AND FIDUCIAL CENTRE, REFERRING TO PPS

P.P. OF AUTOCOLLIMATION PPA	X=	.009	Y=	-.008	MM
FIDUCIAL CENTRE FC	X=	.006	Y=	.000	MM
CORNER FIDUCIAL CENTRE FCC	X=	.005	Y=	-.004	MM

4) FIDUCIAL MARKS, REFERRING TO PPS

X1=	112.011	X2=	-111.995	X3=	.006	X4=	.006	MM
Y1=	.000	Y2=	.000	Y3=	111.998	Y4=	-112.000	MM
DISTANCES		1-2=	224.006	3-4=	223.999	MM		
X5=	110.007	X6=	-109.995	X7=	-109.994	X8=	110.002	MM
Y5=	109.997	Y6=	-110.003	Y7=	109.997	Y8=	-110.001	MM

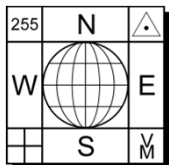
5) PHOTOGRAPHIC RESOLVING POWER, IN CYCLES PER MM
 (AS PER DEFINITION, R. P. IS NOT A CALIBRATED DATUM)
 AREA WEIGHTED AVERAGE RESOLUTION 82

FIELD ANGLE /DEG = 0 7 14 21 28 35 42

RADIAL LINES	146	130	104	97	103	95	86
TANGENTIAL LINES	146	102	78	72	72	62	57

FILM: KODAK PANATOMIC X 3412 SPEED 40 AFS
 DEVELOPED IN CEVASET

- 6) Filter
- 7) Magazine MA No.: 266 807/B



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.5 Kalibrierungsprotokoll

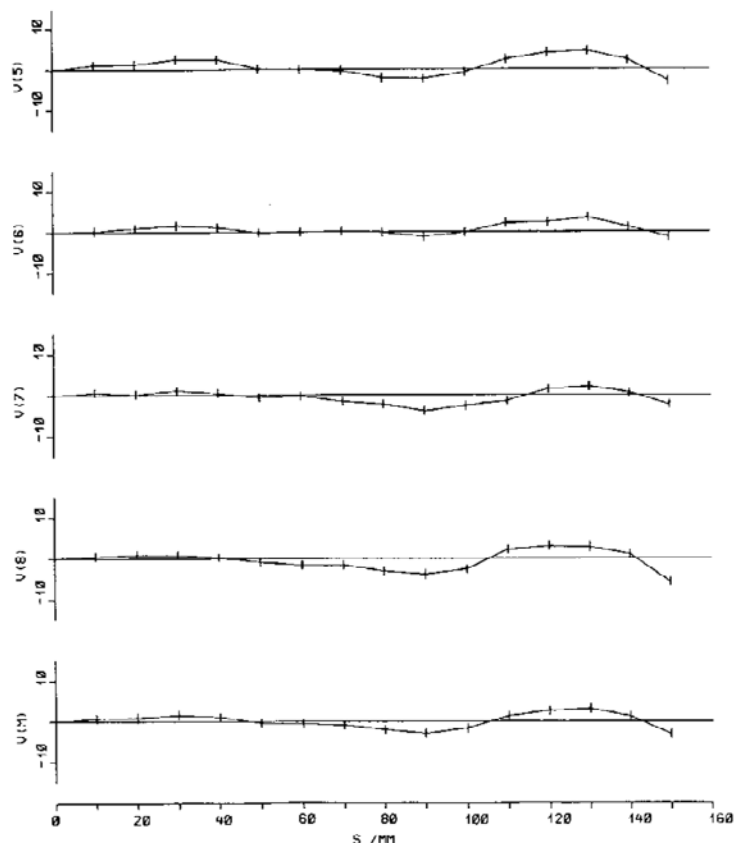


DEUTSCHER KALIBRIERDIENST (DKD)
Page 3 of certificate dated 03.02.97

0456
DKD-K-05202
97-01

LC 1015 NO.266620/B
LAMEGON PL C 4.5/150 NO.738452/C
CFL=152.383 MM

DISTORTION /0.001 MM, REFERRING TO PPS

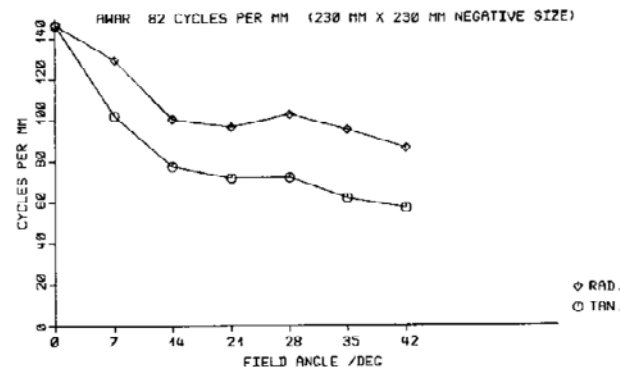


DEUTSCHER KALIBRIERDIENST (DKD)
Page 4 of certificate dated 03.02.97

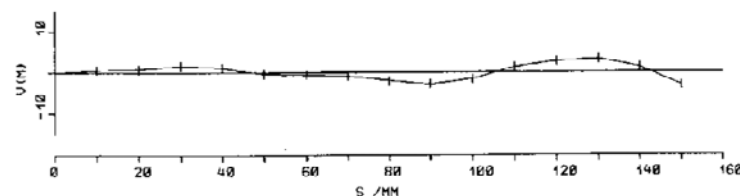
0456
DKD-K-05202
97-01

LC 1015 NO.266620/B

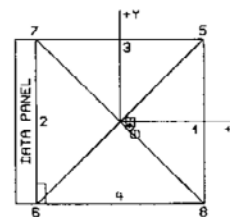
PHOTOGRAPHIC RESOLVING POWER



DEPARTURE OF AVERAGE DISTORTION FROM ZERO REFERENCE



PRINCIPAL POINT (PPA, PPS) AND FIDUCIAL CENTRE (FC)



COORDINATES, REFERRING TO PPS

	X /MM	Y /MM
○ PPA	0.003	-0.000
□ FC	0.006	-0.000
◇ FCC (CORNER FIDUCIAL CENTRE)	0.005	-0.004

1-1 0.01 MM, X-AXIS AS DEFINED BY FIDUCIAL MARK COORDINATES
 $\alpha(6) = 0.0^\circ$ $\alpha(8) = \alpha(6) + 90^\circ$



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.5 Kalibrierungsprotokoll

Appendix

This camera has been tested in accordance with the existing regulations. The methods used are based on the Recommended Procedures for Calibrating Photogrammetric Cameras and for Related Optical Tests (International Society of Photogrammetry, 1960, reaffirmed 1964). The optical performance and the external construction are in accordance with our terms of delivery.

1. Calibrated Focal Length

The calibrated focal length is chosen so as to minimize the square sum of the radial measured distortion.

2. Distortion

The values of radial distortion refer to the calibrated focal length and to the principal point of symmetry (Section 3). Regarding the origin for distortion values it must be realized that in the photogrammetric process, the asymmetry due to a displacement of that point is eliminated together with the asymmetry introduced by camera tilt. The principal point of symmetry is chosen as origin for distortion, because only this residual asymmetry cannot be eliminated by simple compensation.

The radial distortion is measured for points of the focal plane separated by 10 mm from the axis for each of the four radii 5, 6, 7 and 8. AV is the average radial measured distortion at a given radial distance. A positive value indicates that the image is further from the centre than its distortion-free position. Measurements are made at maximum aperture on the goniometer by attaching the filter D (cut-off wavelength 535 nm at transmittance 50 %). The standard deviation of the distortion values given can be assumed to be less than 0.002 mm.

The maximum tangential distortion, i.e. the displacement of the central image from a straight line connecting corresponding image points at equal but opposite angular separations from the axis, does not exceed 0.005 mm.

3. Principal Point and Fiducial Centre

The positions of the principal point of autocollimation and of the fiducial centre (Section 4) are given in a rectangular coordinate system as indicated in the plot, with the principal point of symmetry as origin.

4. Fiducial Marks

For coordinate measurements the fiducial marks are recorded on photographic glass plates. Coordinates of the fiducial marks are given in a rectangular system as shown in the plot, with the principal point of symmetry as origin. Fiducial marks 1 and 2 lie in the line of flight. The location of the fiducial marks can be assumed to be accurate within 0.005 mm.

In the course of camera assembly and maintenance the fiducial marks are adjusted to meet the following specifications:

- The lines joining opposite pairs of fiducial marks intersect at an angle within 30 seconds of 90°.
- The point of intersection (fiducial centre) is within 0.02 mm of the principal point of autocollimation.

5. Photographic Resolving Power

The resolving power is obtained by photographing a series of three line high contrast test figures. The photographs are taken under the recommended standard illumination by using the filter B (cut-off wavelength 490 nm at transmittance 50 %). The camera is used at full aperture. The resulting image is examined with a low power stereoscopic microscope to find the spatial frequency of the finest pattern resolved. The values of resolving power are reduced to the image plane and refer to the focus setting as used for determining the calibrated focal length.

6. Filters

The two surfaces of the filters listed in the certificate are within 5 seconds of being parallel.

7. Magazine Platen

The platen mounted in the film magazine, serial no. as indicated in the certificate, does not depart from a true plane by more than 0.010 mm.

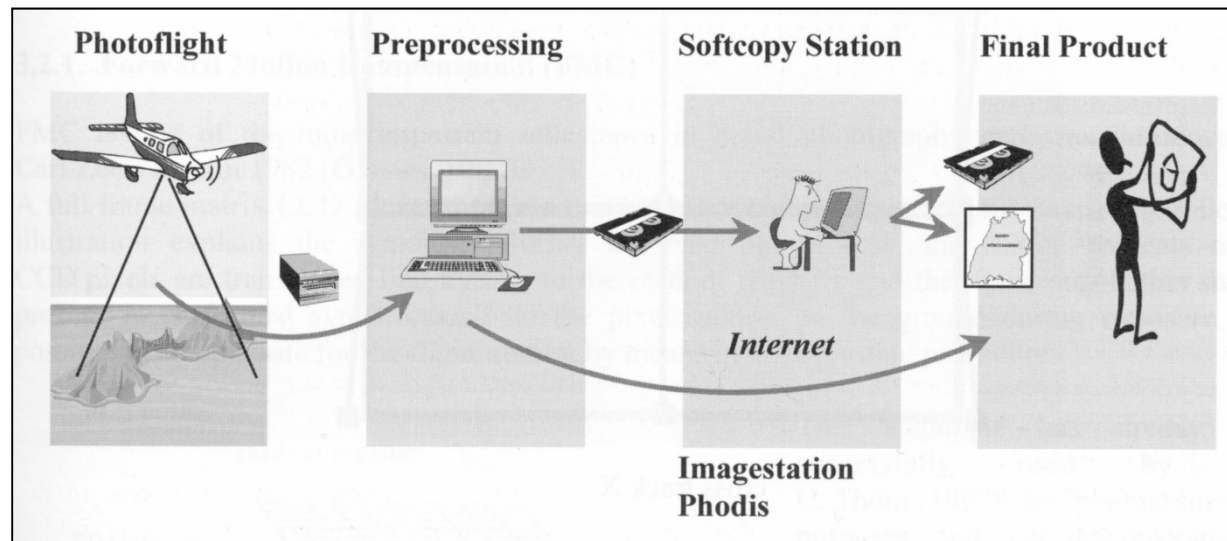


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Seit ca. 20 Jahren gibt es digitale Luftbildkameras.

Vorher: analoges Bild \rightarrow Scannen \rightarrow digitales Bild
Gegenwart: \rightarrow digitales Bild, d.h.
direkte Aufzeichnung der Bildinformation als Digitalbild ohne den Umweg
der A/D-Wandlung durch Scannen.



Der digitale photogrammetrische Auswerteprozess

Luftbildauswertung

Anmerkung: Die **direkte Georeferenzierung** über GPS/Trägheitsnavigation und Luftbildtriangulation ist technisch gelöst.

Probleme: Große Datenmengen und noch zu geringe geometrische Auflösung der "Chips".



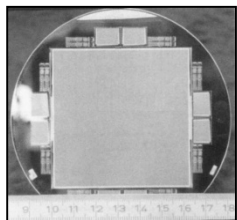
3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

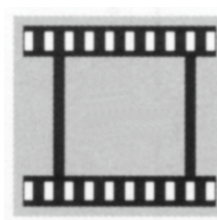
Warum digitale Luftbildaufnahme?

- **Kostensparnis**
 - kein Film
 - kein Photolabor
 - mehr Automation
 - zusätzliche Tage für Bildflüge
- **Zeitersparnis**
 - hoch automatisierbarer Arbeitsprozess
 - keine Filmentwicklung
 - kein stundenlanges Scannen
 - In-Flight Bildkontrolle (Quicklooks)
- **Höhere Qualität**
 - bessere radiometrische Auflösung
 - bessere radiometrische Genauigkeit (z.B. reproduzierbare Farben)
 - Bildkontrolle während der Aufnahme
 - gleichzeitige PAN + MS Möglichkeit
 - ergibt bessere geometrische Genauigkeit
- **Neue Anwendungen**
 - photogrammetrische Produkte "on-the-fly"
 - Multimedia-Photogrammetrie
 - gleichzeitige Unterstützung von PAN und MS bei der Objektauswertung (Multispektrale Information kann gleichzeitig bei der Auswertung genutzt werden.)

Datenmengen?



CCD-Sensor:
derzeit bis zu maximal
14K x 14K



Luftbild:
23 cm x 23 cm

7 μ m Pixel-Scan
⇒ 32800 Pixel/Zeile !



3.2 Luftbildaufnahme

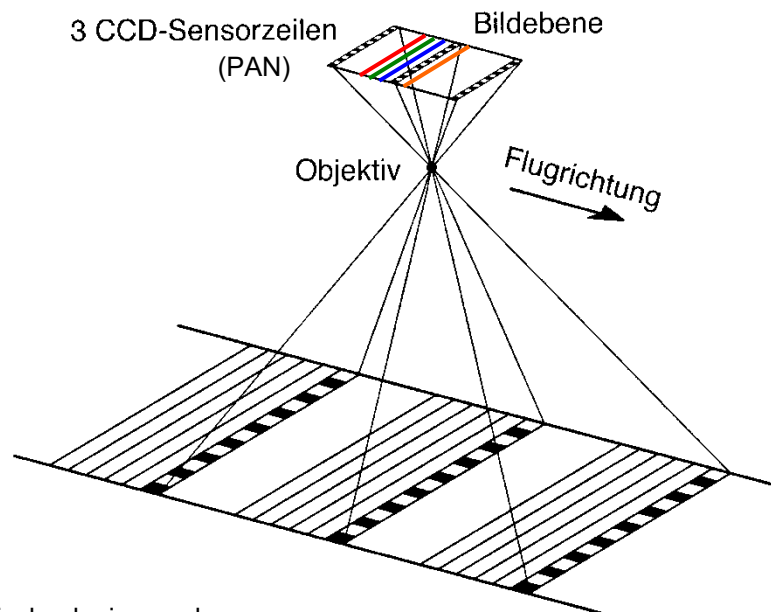
3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

2 Lösungsansätze für die Luftbildaufnahme, da CCD-Matrixsensoren nur in beschränkter Größe erhältlich sind:

- (1) Digitale 3-Zeilenkamera (Three-Line Scanner Approach): **ADS40 Airborne Digital Sensor (einst LH Systems)**
- (2) Digitale Flächenkamera (Frame Imaging Approach): **DMC Digital Modular Camera (einst Z/I Imaging)**

ad 1)

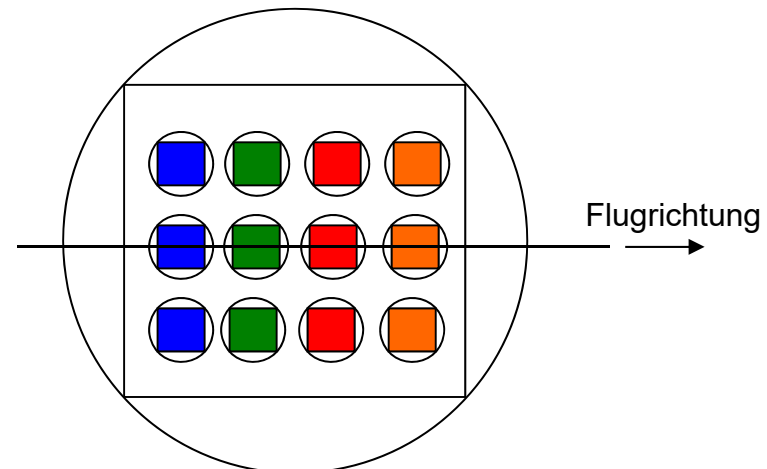
Dreizeilenkamera



Technologie aus der Satellitenfernerkundung entwickelt: *Push-Broom Scanning*

ad 2)

Kombination mehrerer CCD-Flächen zur Realisierung eines größeren Bildformats, um effiziente Flächenabdeckung und günstige Aufnahmegeometrie zu realisieren (Mehrkopfsysteme).

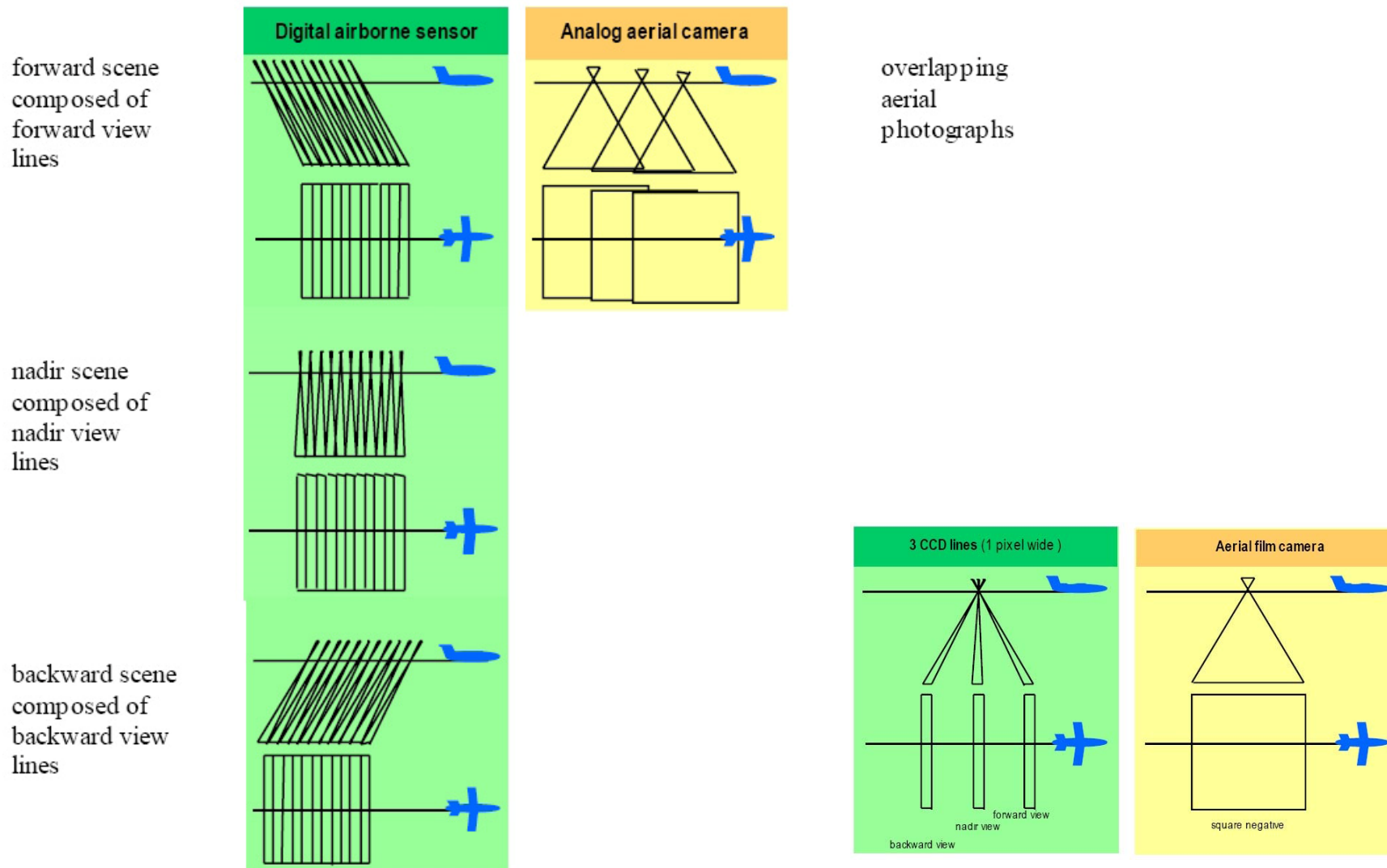


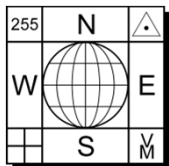


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Three-Line Scanner vs. Aerial Camera: Basic geometric characteristics

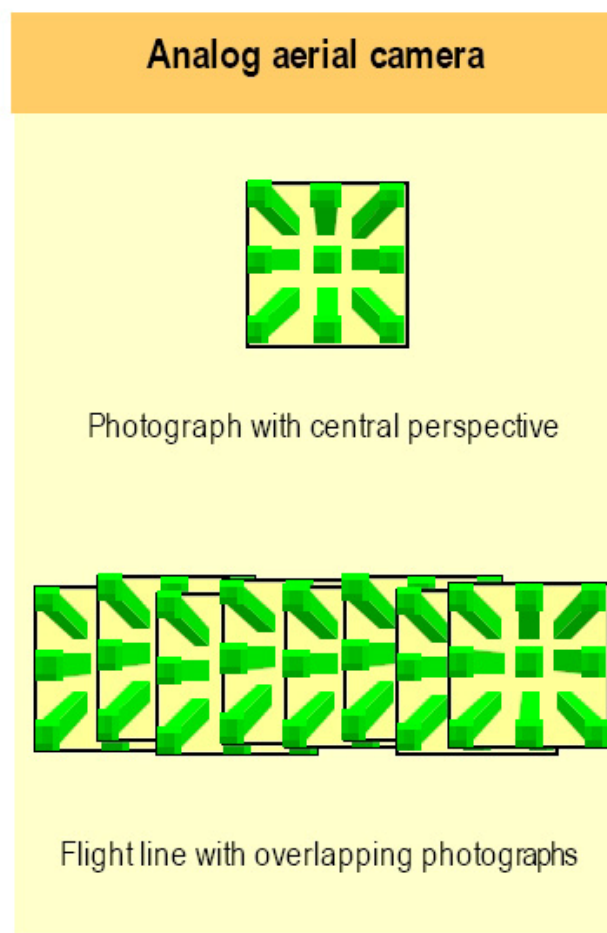
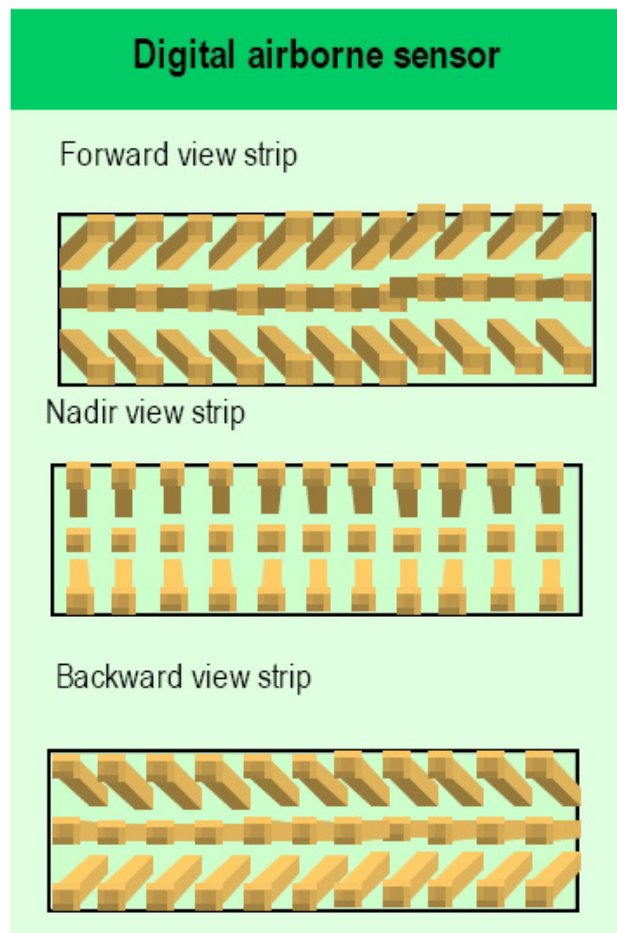




3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Three-Line Scanner vs. Aerial Camera: Effect of terrain relief

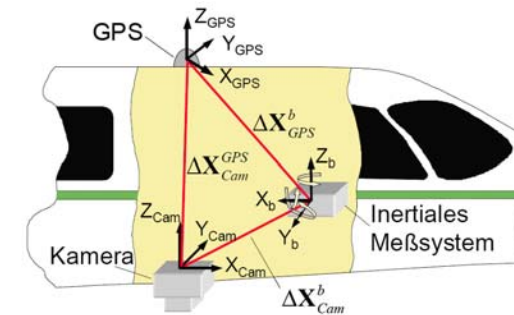
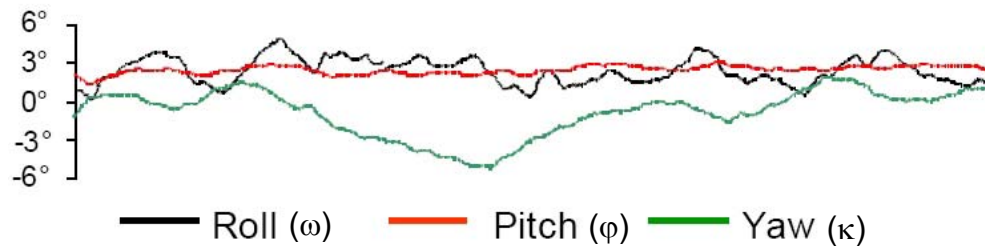




3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Georeferenzierung von 3-Zeilenkamera-Aufnahmen



GPS- und INS-Instrumentierung

Um Flugzeugscanneraufnahmen geometrisch auswerten zu können, **muss** die äußere Orientierung jeder Abtastzeile bekannt sein. Aufgrund der Dynamik des Aufnahmevorganges kann sich die äußere Orientierung der Sensorplattform von Abtastzeile zu Abtastzeile beträchtlich ändern. Messung der Orientierungsparameter mittels GPS/INS notwendig. Die *direkte Georeferenzierung* erfolgt i. Allg. durch eine Kombination von GPS/INS und Aerotriangulation. Für die Berechnung eines Orthobildes wird weiters ein DGM benötigt. Dieses lässt sich aus den Bilddaten (stereoskopische Dreifachüberdeckung) mittels automatischer Matching-Verfahren ableiten. Die erzielbare geometrische Genauigkeit ist sehr hoch. Es gibt operationelle Auswertesysteme.

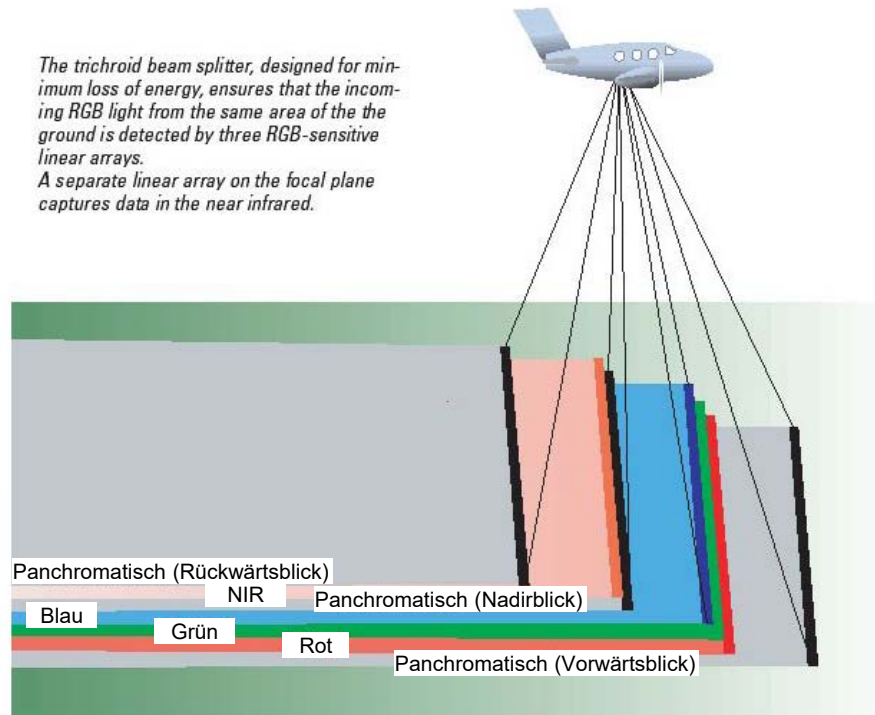


3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

(1) Digitale Zeilenkamera: ADS40 Airborne Digital Sensor (LH Systems)

The trichroid beam splitter, designed for minimum loss of energy, ensures that the incoming RGB light from the same area of the ground is detected by three RGB-sensitive linear arrays. A separate linear array on the focal plane captures data in the near infrared.



Erste Vorstellung am 19th ISPRS Congress in Amsterdam (2000).
Entwicklung in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

- Dreizeilenscanner-Technologie (Prof. Hofmann, 70er-Jahre)
- APPLANIX System (GPS & INS) zur Orientierung und Positionierung

Weitere Informationen: <http://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/imaging-sensors>

erste
"Large Format Digital Camera"
am Markt, 2001



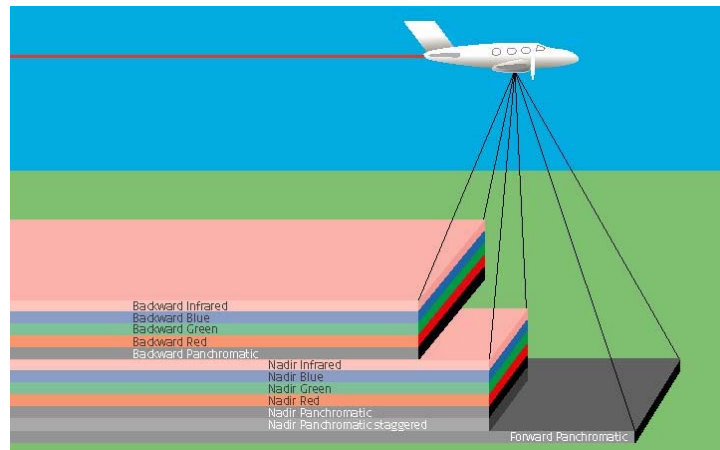
- 3 panchromatische CCD-Zeilen jeweils 2 x 12000 Pixel/Zeile um 3.75 μm versetzt angeordnet (sog. "staggered array")
- 4 multispektrale CCD-Zeilen jeweils 12000 Pixel/Zeile
- Pixelgröße 7.5 μm x 7.5 μm
- Bandbreite 12 bit (Rohdaten)
- radiometrische Auflösung 8 bit
- Öffnungswinkel 74°



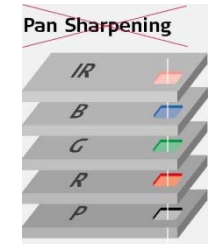
3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Leica ADS40 2nd Generation Airborne Digital Camera



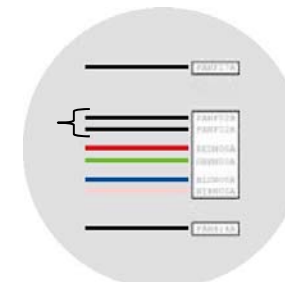
Sensor Head SH52



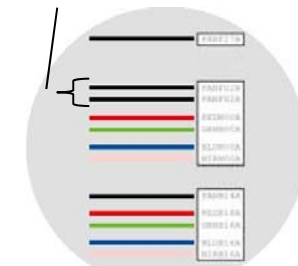
Production of co-registered equal resolution 5-Band imagery

CCD lines with 12000 pixels
pixel size 6.5 μm

staggered by half a pixel



SH51



Focal Plate of

SH52

- Direct georeferencing of airborne sensor data: every pixel has its calculated geographic coordinate.
- Provides imagery for color, color-infrared and panchromatic orthophotos and true orthophotos.
- Color and panchromatic stereo-viewing with SH51 images; and additionally, color-infrared stereo-viewing with SH52 images.
- Perfect co-registration of all multi-spectral bands by the new, patented Tetrachroid beamsplitter.
- Dynamic range CCD chain: 12 bit
- Recording interval per line ≥ 1.25 msec
- Field of View (FoV): 64° across track

Quality of external orientation:

Mission Type 6: DGPS data used for trajectory calculation, Bundle Adjustment, GCPs available

Quality at 20 cm GSD: Relative Orientation with RMSE 0.5 Pixels ($\sim 3 \mu\text{m}$)

Absolute Orientation with RMSE < 10 cm

Stand 2020:

Leica ADS100 (CCD lines with 20000 pixels)

<https://leica-geosystems.com/de-at/products/airborne-systems/-imaging-sensors/leica-ads100-airborne-digital-sensor>

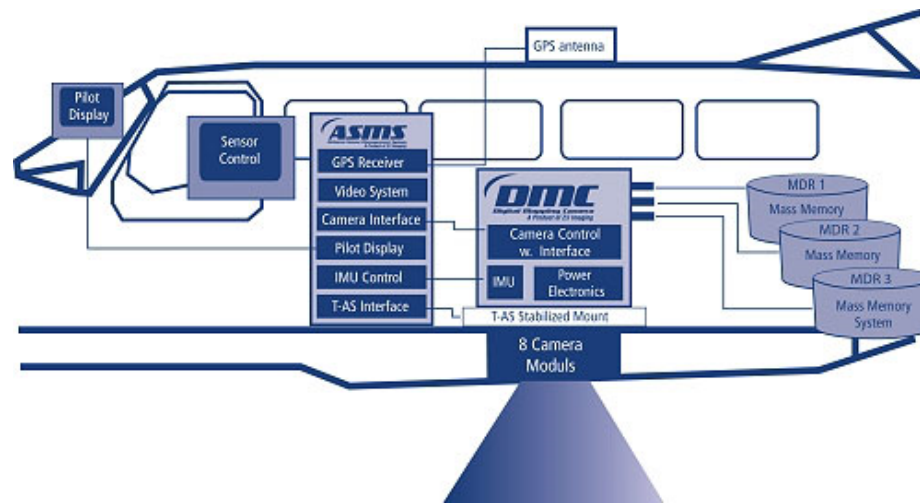
Weitere Informationen: <http://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/imaging-sensors/leica-ads100-airborne-digital-sensor>



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

(2) Digitale Flächenkamera: DMC Digital Modular Camera (Z/I Imaging)



PAN: 13500 x 8000 Pixel

Die modular aufgebaute DMC beinhaltet in der höchsten Ausbaustufe 8 synchron betriebene, kalibrierte Einzelkameras basierend auf lichtempfindlichen Flächensensoren zum Erzielen bestmöglicher geometrischer und radiometrischer Auflösung.

Im Detail sind dies:

- 4 zueinander geneigte panchromatische Einzelkameras (7K x 4K) zur Erreichung der Auflösung
- 4 multispektrale Einzelkameras (3K x 2K) mit austauschbaren Filtern (R,G,B,NIR) für die Farbinhalte.

Lens focal distance: 120 mm (PAN), 25 mm (RGB & NIR)

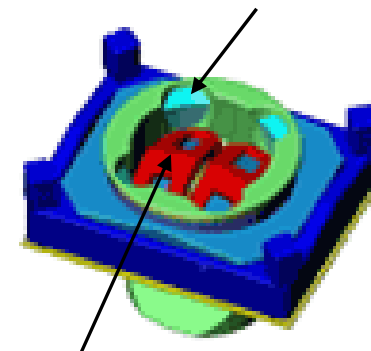
Frame rate: 2 sec / image

Forward-motion compensation (through TDI)

Radiometric resolution: 12 bit

Storage: 4400 images

4 multispektrale Kameraköpfe



4 hochauflösende panchromatische Kameraköpfe

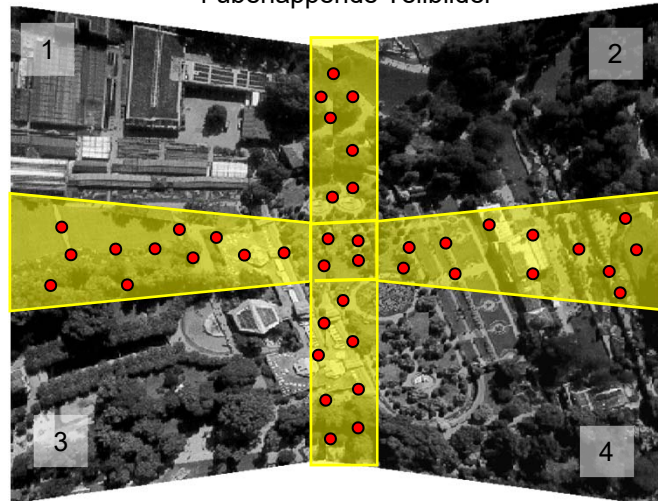
Weitere Informationen: <http://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/imaging-sensors/leica-dmciij>



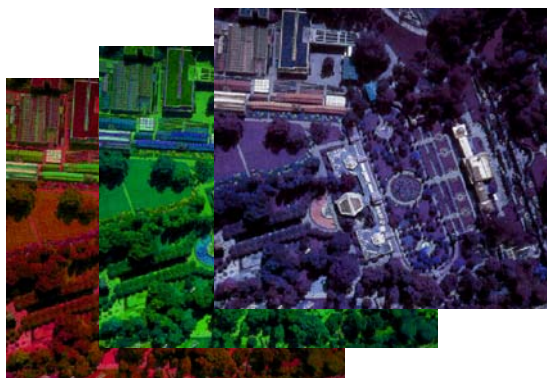
3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

4 überlappende Teilbilder



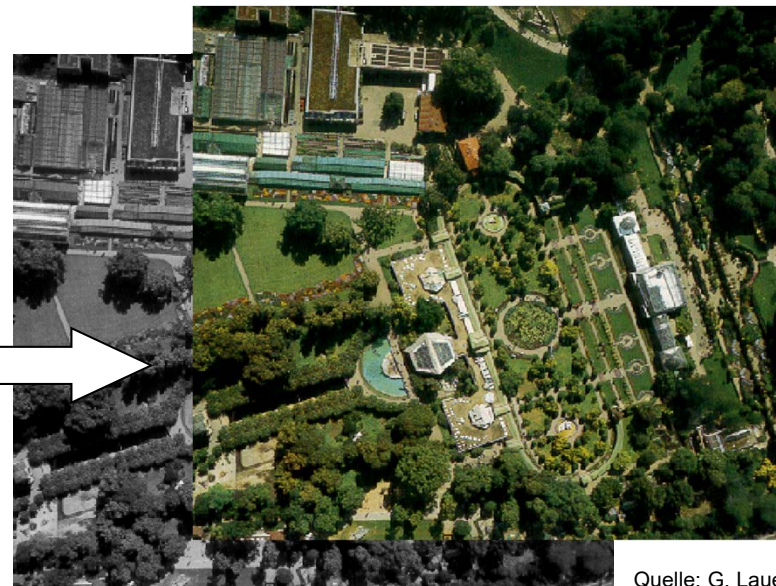
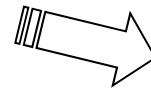
- Überlappungsgebiet
- Verknüpfungspunkt



DMC – Digital Modular Camera Bildzusammensetzung ⇨ "Siliziumpizza"

- Kalibrierung der Einzelkameras
- Geometrische und radiometrische Korrektur
- Verknüpfungspunktmessung
- Ausgleichung
- Mosaikbildung der 4 Einzelbilder (→ Stiching)
- Zusammenführen der RGB-Kanäle (Farb-Matching)
- Farbkomposit (PAN + RGB)
(→ ideale Bildgeometrie: Hauptpunkt in Bildmitte, keine Verzerrung)

Stand 2020: **monolithischer Sensor!**
Leica DMCIII (CMOS mit 25.000+ Pixeln in Querrichtung)
<https://leica-geosystems.com/de-at/products/airborne-systems/imaging-sensors/leica-dmciii>



Quelle: G. Lauenroth (2005)



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Leica CityMapper-2 (1/3)



<https://www.youtube.com/watch?v=09yEzHBCIZo>
<https://www.youtube.com/watch?v=dqJg3LT-PRw>

<https://leica-geosystems.com/de-at/products/airborne-systems/leica-citymapper-2>
(letzter Zugriff 27.2.2020)

Optical System

- Two 150 MP nadir cameras (RGB & NIR)
- Four oblique 45° RGB cameras
- Backside illumination (BSI) CMOS chip
- Mechanical forward-motion-compensation (FMC)
- Customised low-distortion lenses
- A choice of two focal lengths for standard and high-altitude operation

LiDAR Sensor

- 2 MHz pulse repetition frequency
- Gateless Multiple-Pulses-in-the-Air (MPiA)
- 3 cm range accuracy
- Oblique scan pattern
- Even point distribution across data set
- USGS LiDAR quality Level 0 from up to 2 km altitude

CityMapper-2 is the best equipped airborne sensor in the market for highly-productive creation of 3D digital twins of cities, transforming the way the industry enables the digitisation of the world we live in and allowing you to create the most detailed geospatial base layers such as **orthophotos**, **point clouds**, **3D building models** and **meshes**, all from one single flight. (Source: <https://leica-geosystems.com/de-at/products/airborne-systems/leica-citymapper-2>)

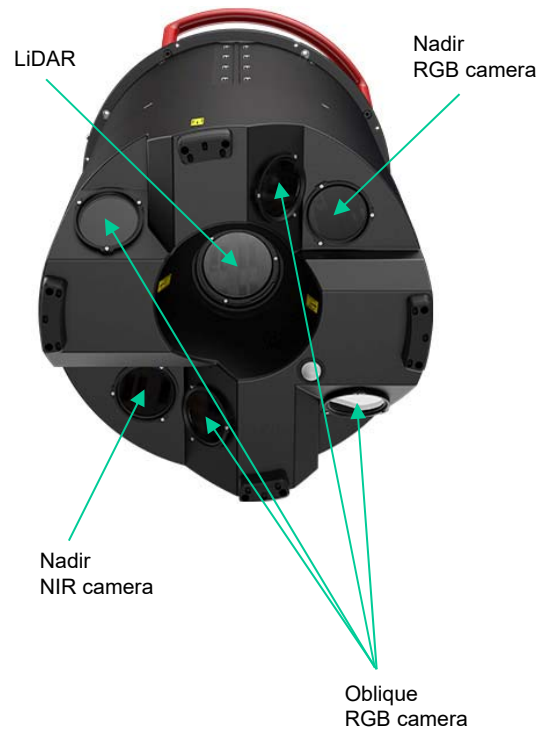
Toschi, I., Remondino, F., Rothe, R., Klimek, K. (2018): Combining airborne oblique camera and LiDAR sensors: Investigation and new perspectives. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-1, 437-444.
<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-1/437/2018/isprs-archives-XLII-1-437-2018.pdf>



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Leica CityMapper-2 (2/3)



CITYMAPPER-2 POD

Consists of	
Nadir RGB camera	1 x Leica MFC150
Nadir NIR camera	1 x Leica MFC150-NIR, monochrome
Oblique RGB camera	4 x Leica MFC150, viewing angle 45°
LiDAR unit	1 x Leica Hyperion2
GNSS/IMU	Integrated NovAtel SPAN
Sensor controller/data logger	Integrated
Height / diameter	747 mm / 408 mm
Weight	62 kg
Max. system frame rate	0.8 sec
Designed for installation in Leica PAV100 with Leica PodLifter.	

CITYMAPPER-2 VERSIONS

CityMapper-2S	
Nadir lenses	
RGB	Leica D69.112/4.0 with 112 mm focal length 26.8° FOV across track, 20.3° FOV along track
NIR	Leica D69.70/4.0-NIR with 70 mm focal length 41.7° FOV across track, 31.9° FOV along track
Oblique RGB lenses	
Left/Right	Leica D69.146/4.8 with 146 mm focal length 45° ±7.8° FOV across track, 20.7° FOV along track
Forward/Backward	20.7° FOV across track, 45° ±7.8° FOV along track
RGB : NIR resolution	1 : 1.6
Nadir : Oblique focal length ratio	1 : 1.3
Flying height	1500 m AGL @ 5 cm GSD
CityMapper-2H	
Nadir lenses	
RGB	Leica D69.146/4.8 with 146 mm focal length 20.7° FOV across track, 15.6° FOV along track
NIR	Leica D69.70/4.0-NIR with 70 mm focal length 41.7° FOV across track, 31.9° FOV along track
Oblique RGB lenses	
Left/Right	Leica D69.189/5.6 with 189 mm focal length 45° ±6.0° FOV across track, 16.1° FOV along track
Forward/Backward	16.1° FOV across track, 45° ±6.0° FOV along track
RGB : NIR resolution	1 : 2.1
Nadir : Oblique focal length ratio	1 : 1.3
Flying height	1900 m AGL @ 5 cm GSD

CAMERA HEAD LEICA MFC150 / LEICA MFC150-NIR

Sensor size (150MP)	14,192 x 10,640 pixels
Pixel size & type	3.76 um, BSI CMOS
Dynamic range	83 dB
Resolution A/D converter	14-bit
Data channel	14-bit proprietary compression
Motion compensation	Mechanical FMC
Spectral bands	
MFC150 (Bayer pattern)	R (580 - 660 nm) G (480 - 590 nm) B (420 - 510 nm)
MFC150-NIR	NIR (720 - 850 nm) (Monochrome)
Shutter	Max. speed 1/1000 sec Mechanical central shutter with up to 500,000 cycles Field exchangeable
Aperture	Automatically controlled aperture 7 half f-stop steps
Lens mount	Exchangeable lenses, positive mechanical connection

LiDAR UNIT LEICA HYPERION2 6

Laser wavelength	1,064 nm
Laser divergence	0.23 mrad (1/e ²) nominal
Pulse repetition frequency	Up to 2 MHz (height dependent)
Return pulses	<ul style="list-style-type: none"> • Programmable up to 15 returns, including intensity • Full waveform recording option at down-sampled rates • Real time waveform analysis and pulse extraction • Multiple-Pulses-in-the-Air (MPIA): Up to 35 MPIA zones simultaneously • Ambiguity resolution for targets in multiple simultaneous MPIA zones • Gateless MPIA
Intensity digitisation	14 bits
Operation altitude¹	300 - 5,500 m AGL
Scanner pattern	Oblique scanning with options for constant point density or constant pulse rate
Scan speed	Programmable, 60-150 Hz (120-300 scan lines per second)
Field of view	20 - 40°
Min. vertical separation	0.5 m
Vertical accuracy^{2,3,4}	< 5 cm 1 σ
Horizontal accuracy^{2,3,4}	< 13 cm 1 σ



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Leica CityMapper-2 (3/3)

INTEGRATED SENSOR CONTROL MODULE & DATA LOGGER

Sensor Controller	Controls all camera heads, LiDAR unit and gyro-stabilised mount Includes deeply coupled GNSS/IMU solution
Processor	64-bit WIN10, 16 GB RAM, 64 GB SSD, USB 3.0, SATA 3
Mass memory	Leica MM30 solid state drive 7,680 GB each CityMapper-2 holds 2 MM30s
Mass memory weight	0.5 kg each, 2 required, removable and portable
Mass memory capacity ⁶	Joint volume 15.36 TB, ≥ 8.0 h of data collection

INTEGRATED GNSS/IMU SYSTEM

IMU	SPAN CNUS5-H, Class 5, 500 Hz, FOG no export license required US ECCN 7A994
GNSS	NovAtel SPAN OEM7, 555 channel multi constellation Receiver with 20 Hz GNSS data rate
Additional features	Real-time deeply coupled solution for position and attitude at highest accuracies, fully integrated and embedded solution, no interfaces to 3 rd party needed
Position RMS DGNSS	Post processed (specification): X,Y ≤ 3-5 cm, Z ≤ 5-7 cm Post processed (typical): X,Y ≤ 2-3 cm, Z ≤ 3-5 cm
Attitude RMS	Post processed (specification): R,P ≤ 0.005°, H ≤ 0.008° Post processed (experienced): R,P ≤ 0.003°, H ≤ 0.004°

PERIPHERALS

Sensor mount	Leica PAV100-HPH gyro-stabilised mount for high-performance data acquisition 36 kg
Pod lifter (optional)	Leica PodLifter, to retract entire CityMapper-2 pod for takeoff and landing 20 kg
Operator display	Leica OC60 12.1" screen with 1024 x 768 resolution 5.0 kg
Pilot display	Leica PD60 6.3" screen with 1024 x 768 resolution, designed for cockpit mounting 1.0 kg
IS40 stand	Pedestal for Operator Display OC60 3.5 kg

ENVIRONMENTAL

Pressure	Non-pressurised cabin up to ICAO 15,000 ft
Humidity	0% to 95% RH according to ISO7137 (non-condensing)
Operating temperature	0°C to 35°C
Storage temperature	-40°C to 70°C

ELECTRICAL

Max. avg. power consumption of complete system	950 W / 28 VDC
Max. peak power consumption of complete system	1,200 W (<60s) / 28 VDC
Fuse on aircraft power outlet	1 x 50A recommended

SYSTEM WEIGHT

System Installation without Pod Lifter	< 115 kg
System installation with Pod Lifter	< 135 kg

SOFTWARE

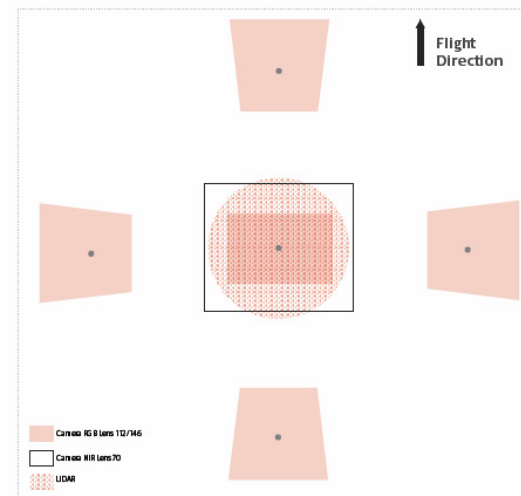
Mission planning	Leica MissionPro
Flight navigation & sensor operation	Leica FlightPro
GNSS/INS trajectory processing	NovAtel Inertial Explorer
Point cloud/Image processing	Leica HxMap

STANDARDS

RTCA DO-160G, EUROCAE-14G, USA FCC Part 15, ISO7137, EN/IEC 60825-1:2014



Leica CityMapper-2 with peripherals





3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme



UltraCam-D large format digital aerial camera (Microsoft VEXCEL Imaging)

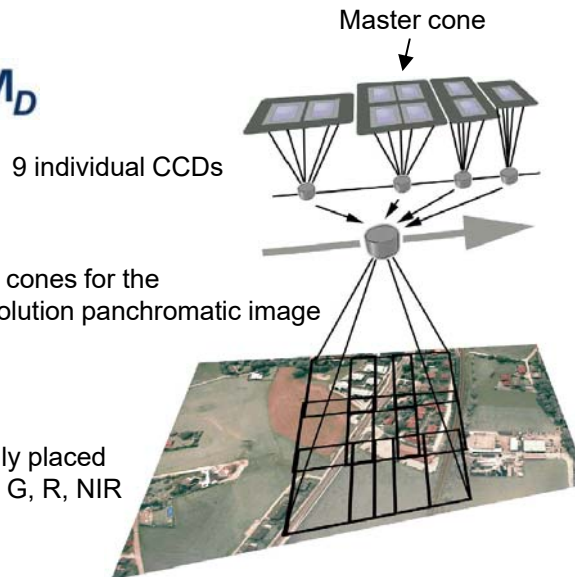
(Baujahr 2003)



sensor unit

- + on-board storage + computing unit
- + interactive on-board monitor + software

ULTRACAM_D



Synchronous versus Syntopic Image Triggering



jetzt



More information: <http://www.vexcel-imaging.com/>

Vexcel Imaging GmbH, Anzengrubergasse 8, A-8010 Graz, Austria

ASPRS Announces Dr. Franz Leberl as the Winner of the 2012 Outstanding Technical Achievement Award

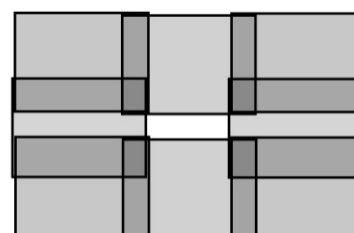
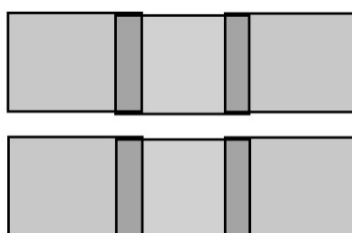
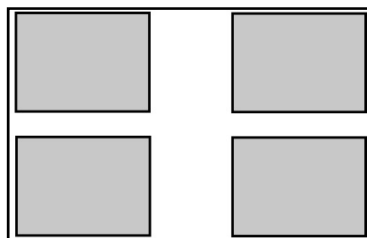


3.2 Luftbildaufnahme

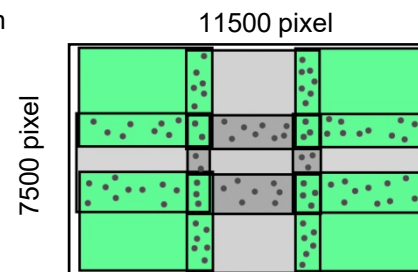
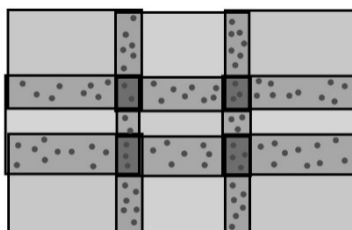
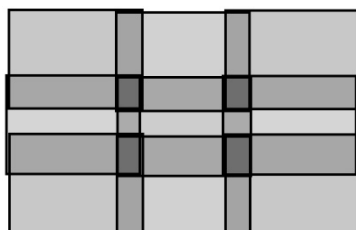
3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

UltraCam-D large format digital aerial camera (Microsoft VEXCEL Imaging)

Master-Konus



Verknüpfungspunkte in Überlappungszonen



Flight direction

STICHING

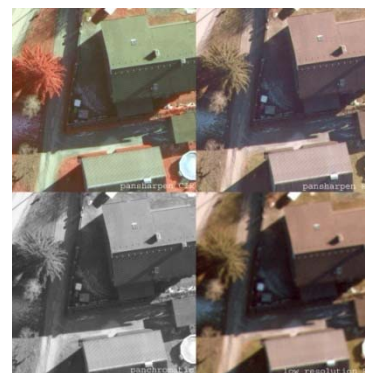
Pan-sharpened CIR

Pan-sharpened RGB

PAN-SHARPENING
(Image Fusion)

PAN

RGB



Quelle: R. Kalliany



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

UltraCam-D large format digital aerial camera (Microsoft VEXCEL Imaging)

Sensing Unit

Panchromatic image format	11500 * 7500 pixel @ 9 μ m, 103.5 mm * 67.5 mm
Lens system focal distance and aperture	100 mm, f 1/5.6
Field of view cross/along track	55° / 37°
Multi-spectral (RGB, NIR)	4,008 * 2,672 pixel, @ 9 μ m
Shutter, seconds	1/500 – 1/60
FMC	TDI controlled
Frame rate	1.3 frames / second
Radiometric resolution	> 12 bit
Dimensions	45 cm * 45 cm * 60 cm
Weight	< 30 kg

Storage & Computing Unit

Storage Capacity	> 1.5 TB
Uncompressed Frames	> 2775 frames
Dimensions	55 cm * 40 cm * 65 cm
Weight	< 35 kg

Specifications of the UltraCam-D digital aerial camera



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

UltraCam-X large format digital aerial camera (Microsoft VEXCEL Imaging)

(Baujahr 2006)



Stand 2010:

Large Format Aerial Camera

UltraCamXp: 17310 x 11310 (196 megapixels)

Photogrammetric Medium Format

Digital Aerial mapping Camera

UltraCamL: 11704 x 7920 (92 megapixels)

More information: <http://www.vexcel-imaging.com/>

Anwendungsbeispiel: Bildmessflug



Diamond Airborne Sensing GmbH
Ferdinand Graf von Zeppelin Strasse 1
A-2700 Wiener Neustadt, Austria
<https://www.diamondaircraft.com/de/>



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

UltraCam-X large format digital aerial camera (Microsoft VEXCEL Imaging)

Technical Specifications

Digital Camera Technical Data (Sensor Unit S-X)

Panchromatic image size	14,430 × 9,420 pixels	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> Analogous to an aerial film image at a format of 23 × 15 cm, scanned at 15 μm. Image geometric accuracy ±2μm </div>
Panchromatic physical pixel size	7.2 μm	
Input data quantity per image	435 MB	
Physical format of the focal plane	104 mm × 68.4 mm	
Panchromatic lens focal distance	100 mm	
Color (multi-spectral capability)	4 channels – RGB & NIR	
Color image size	4992 × 3328 pixels	
Color lens system focal distance	33 mm	
Shutter speed options	1/500 to 1/32 seconds	
Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled	
Maximum FMC-capability	50 pixels	
Pixel size on the ground (GSD) at flying height of 500 m	3.6 cm	
Frame rate per second (minimum inter-image interval)	1 frame per 1.35 seconds	
Analog-to-digital conversion at	14 bits (Image data formats: JPEG; TIF with options for 8, 12 and 16 bits)	
Radiometric resolution in each color channel	> 12 bit	

In Flight Data Storage D-X and Data Processing C-X

In-flight capacity to collect uncompressed frames	Unlimited with multiple D-X units; per D-X (~1.7 TB) unit (~3900 images)
Method of exchanging D-X units in-flight	In less than 1 minute
Configuration of Storage D-X and Computing C-X	C-X with 14 Pentium-M CPUs; each D-X with 28 disks
Redundancy	Storing mirror images of the data
Data transfer into office environment	Removable D-X data units; docking station

Operational Specifications

Data collection period at 70% & 20% overlap, at 20 cm GSD (film scale 1:10,000)	8.5 hours per single D-X unit
Exterior orientation support	Compatible with DGPS/IMU systems



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

UltraCamL medium-format digital aerial mapping camera (Microsoft VEXCEL Imaging)

ULTRACAML
Photogrammetric Medium Format
Digital Aerial Mapping Camera



(Baujahr 2009)



More information: <http://www.vexcel-imaging.com/>

UCL Features

- Highest quality medium format available (64 megapixels in pan format; 9,735 across track, 6,588 along track) means superior price/performance ratio
- 1:1.83 pan-to-color ratio delivers brilliant true-color and color-infrared (CIR) image quality with unmatched radiometric range
- Short frame interval allows multi-ray photogrammetry even for large-scale mapping at low altitude and high aircraft speed; forward overlaps of 80% are achieved at a 10 cm pixel size at 105 knots
- High level of detail with no blur due to Forward Motion Compensation (FMC) using Time Delayed Integration (TDI)
- Pixel size on the ground (GSD) at flying height of 486 m is 5 cm (10 cm GSD at 972 m altitude)
- Removable storage units provide two benefits: the length of missions is limited only by the constraints of the aircraft; ground time is minimized
- Maximum use of legacy environments; supports ALL standard gyro-stabilized camera mounts (PAV-30, Z/I-TAS, GSM3000) and most common GPS/IMU system
- Utilizes only a sensor head with integrated sensor and computing sub-systems, integrated computing sub-system and integrated solid-state devices (storage sub-system) for maximum reliability; no additional computing or storage units are required
- Weight of UltraCamL sensor head is approximately 55 kg



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Aerial Cameras (1/7) (Stand 2020)



Vexcel Imaging GmbH
Anzengrubergergasse 8
8010 Graz

<https://www.vexcel-imaging.com/>

Photogrammetric Nadir: **UltraCam Falcon Mark 2**

SENSOR SYSTEM

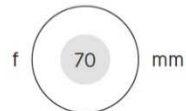
1 cone, 1 lens, 1 focal plane, 1 CCD sensor array

PAN image size	17,310 x 11,310 pixels
PAN physical pixel size	6.0 µm
Color capability (multi-spectral)	4 channels - R, G, B & NIR
Color image size	5,770 x 3,770 pixels
Color physical pixel size	6.0 µm
Pansharpen ratio	1 : 3

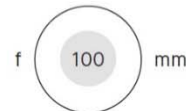
196 Megapixels

Imaging sensor	CCD
Shutter (longlife central leaf)	1/1000 to 1/64
Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled
Maximum FMC capacity	50 pixels
Frame rate (minimum inter-image interval)	1 frame per 1.35 seconds
Dynamic range	> 72 db
Analog-to-digital-conversion at	14 bits

LENS SYSTEM



PAN focal length for photogrammetric applications requiring minimal flight altitude.



PAN focal length for photogrammetric applications, balancing flight altitude and footprint under lean restrictions at the image edges.

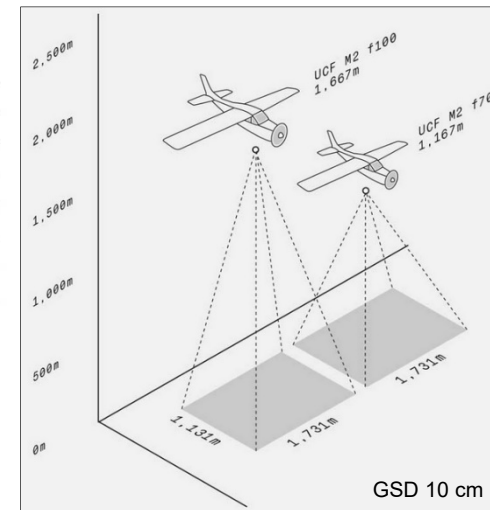


	f70	f100
PAN lens system focal length	70 mm	100 mm
PAN lens aperture	f=1/5.6	f=1/5.6
Color (R, G, B & NIR) lens system focal length	23 mm	33 mm
Color (R, G, B & NIR) lens aperture	f=1/5.6	f=1/4.8
PAN total field of view, across track (along track)	73,1° (51,7°)	54,9° (37,5°)
Flying height for PAN pixel size @ 10 cm GSD	1,167 m	1,667 m

Weight: 61 kg
In-flight exchangeable & redundant storage system: SSD pack
Data unit storage capacity: 5 TB (~5,200 images)
Input data quantity per image: 787 MB

Mounting: UltraMounts (GSM 4000 & GSM 3000) and third party systems
GNSS/INS/FMS system support: UltraNav (Applanix POSTrack OEM) and third party systems

Data processing: UltraMap processing suite



Source: <https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-falcon/>



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Aerial Cameras (2/7) (Stand 2020)



Photogrammetric Nadir: **UltraCam Eagle Mark 3**

SENSOR SYSTEM		4 cones, 4 lenses, 4 focal planes, 9 CCD sensor arrays		
PAN image size	450 Megapixels	26,460 x 17,004 pixels	Imaging sensor	CCD
PAN physical pixel size		4.0 μm	Shutter (longlife central leaf)	1/1000 to 1/64
Color capability (multi-spectral)		4 channels - R, G, B & NIR	Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled
Color image size		8,820 x 5,668 pixels	Maximum FMC capacity	50 pixels
Color physical pixel size		4.0 μm	Frame rate (minimum inter-image interval)	1 frame per 1.5 seconds
Pansharpen ratio		1 : 3	Dynamic range	> 72 db
			Analog-to-digital-conversion at	14 bits

LENS SYSTEM

ULTRACAM EAGLE MARK 3 - PAN FOCAL LENGTH (MM)



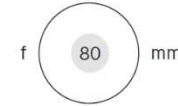
For regions with flight altitude restrictions when collection of high resolution images of highest



For photogrammetric applications, optimizing usable footprint under lean restrictions at the image



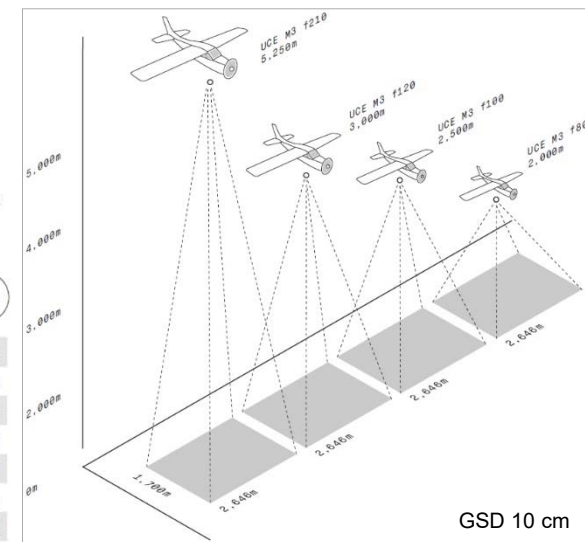
For photogrammetric applications, balancing flight altitude and footprint under lean restrictions at



For photogrammetric applications requiring minimal flight altitude.

	f80	f100	f120	f210
PAN lens system focal length	80 mm	100 mm	120 mm	210 mm
PAN lens aperture	f=1/5.6	f=1/5.6	f=1/5.6	f=1/7.8
Color (R, G, B & NIR) lens system focal length	27 mm	33 mm	40 mm	70 mm
Color (R, G, B & NIR) lens aperture	f=1/4.8	f=1/4.8	f=1/4.8	f=1/5.6
PAN total field of view, across track (along track)	67,0° (46,1°)	55,8° (37,6°)	47,6° (31,6°)	28,3° (18,4°)
Flying height for PAN pixel size @ 10 cm GSD	2,000 m	2,500 m	3,000 m	5,250 m
Footprint for lean restriction of 1 m lean @ 5 m height (across x along)	8,000 x 8,000	10,000 x 10,000	12,000 x 12,000	21,000 x 17,004

The UltraCam Eagle Mark 3 is the only photogrammetric camera that features a user-exchangeable lens system.



Source: <https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-eagle/>



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Aerial Cameras (3/7) (Stand 2020)



Photogrammetric Oblique: **UltraCam Osprey Mark 3 Premium**

SENSOR SYSTEM

Nadir

116 Megapixels

PAN image size	13,470 x 8,670 pixels
PAN physical pixel size	5.2 μ m
Color capability (multi-spectral)	4 channels - RGB Bayer pattern & NIR
Color image size	6,735 x 4,335 pixels
Color physical pixel size	5.2 μ m
Pansharpen ratio	1 : 2

Imaging sensor	CCD
Shutter (longlife central leaf)	1/750 to 1/64
Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled
Maximum FMC capacity	50 pixels
Frame rate (minimum inter-image interval)	1 frame per 1.75 seconds
Dynamic range	> 72 db
Analog-to-digital-conversion at	14 bits

Oblique

80 Megapixels

Color capability	3 channels - RGB Bayer pattern
Color image size	10,300 x 7,700 pixels
Color physical pixel size	5.2 μ m

LENS SYSTEM

Nadir

PAN lens system focal length	80 mm
PAN lens aperture	f=1/5.6
Color (RGB Bayer pattern & NIR) lens system focal length	40 mm
Color (RGB Bayer pattern & NIR) lens aperture	f=1/5.6
Total field of view, across track along track	47,3° 31,5°
Flying height for RGB pixel size @ 10 cm GSD	1,538 m

Oblique

Color (RGB Bayer pattern) lens system focal length	120 mm
Color (RGB Bayer pattern) lens aperture	f=1/4.4
Total field of view, across track along track	45° (+9,5° / -15,7°) 45° (+9,5° / -9,5°)



Source: <https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-osprey-m3-premium/>



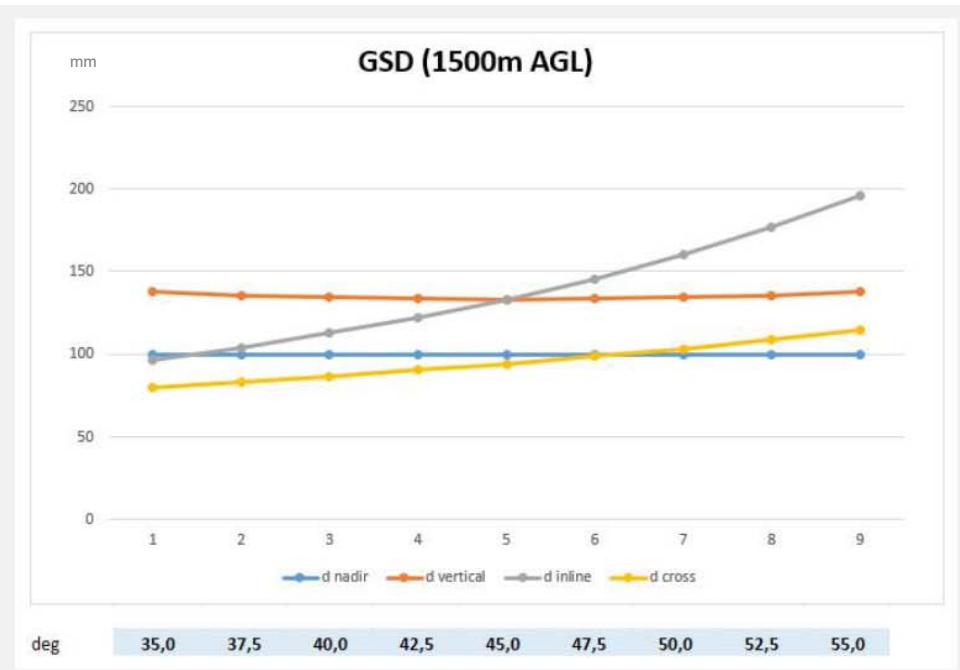
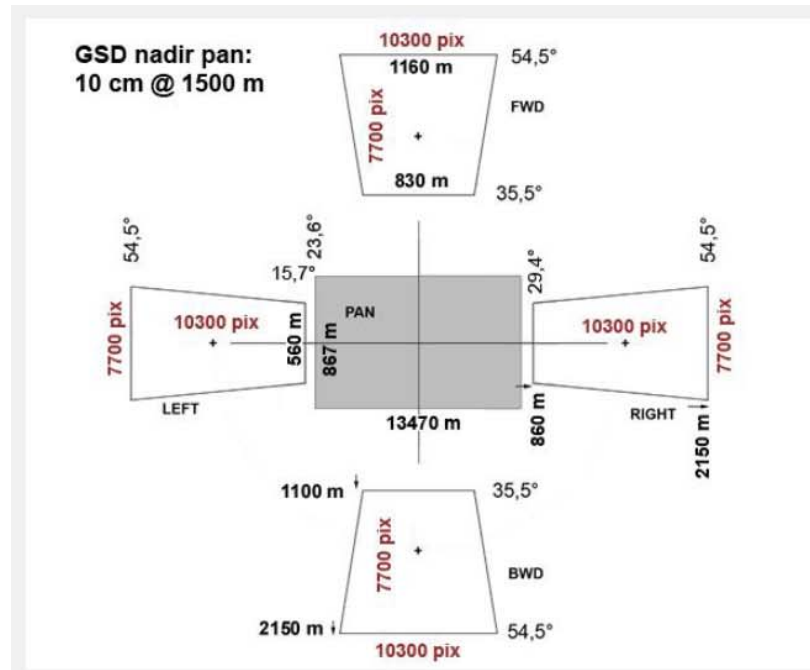
3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

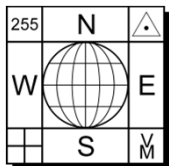


Aerial Cameras (4/7)
(Stand 2020)

Photogrammetric Oblique: **UltraCam Osprey Mark 3 Premium**



Source: 30 Jahre Photogrammetrie, Stadtvermessungsamt Graz, 28.5.2019.



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Aerial Cameras (5/7)
(Stand 2020)

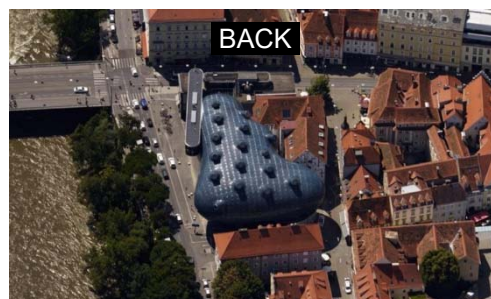


<https://www.vexcel-imaging.com/>

Photogrammetric Oblique: **UltraCam Osprey Mark 3 Premium**



Kunsthaus, Graz (Detailausschnitt)



GSD 6.5 cm RGB

Source: <https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-osprey-m3-premium/>



3.2 Luftbildaufnahme

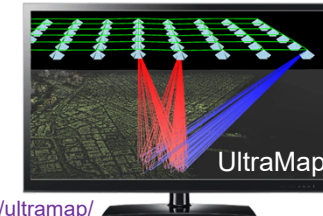
3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Aerial Cameras (6/7) (Stand 2020)

Wide Area Mapping: **UltraCam Condor Mark 1**



<https://www.vexcel-imaging.com/>



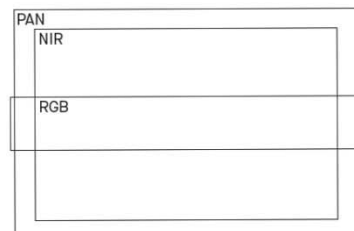
<https://www.vexcel-imaging.com/ultramap/>

SENSOR SYSTEM

Color capability (multi-spectral)	4 channels - RGB Bayer pattern & NIR
Color (RGB Bayer pattern) image size	38,000 x 5,000 pixels
Color (RGB Bayer pattern) physical pixel size	4.6 μm
PAN image size	13,280 x 9,000 pixels
PAN physical pixel size	5.2 μm
Color (NIR) image size	7,600 x 5,000 pixels
Color (NIR) physical pixel size	4.6 μm
Ratio RGB to PAN / NIR	1 : 2,77 / 4,37

Imaging sensor	CCD
Shutter (longlife central leaf)	1/1000 to 1/64
Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled
Maximum FMC capacity	50 pixels
Frame rate (minimum inter-image interval)	1 frame per 1.75 seconds
Dynamic range	> 72 db
Analog-to-digital-conversion at	14 bits

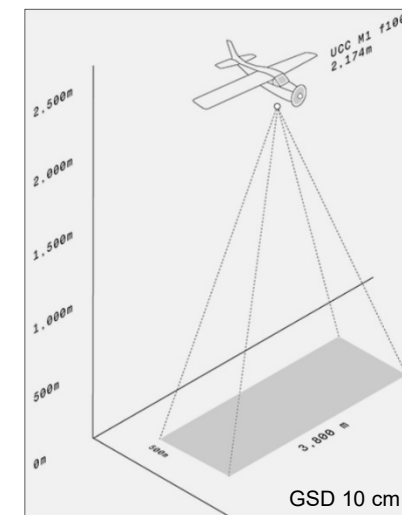
LENS SYSTEM



UltraCam Condor camera footprint

Color (RGB Bayer pattern) lens system focal length	100 mm
Color (RGB Bayer pattern) lens aperture	f=1/5.6
PAN lens system focal length	40 mm
PAN lens aperture	f=1/4.8
Color (NIR) lens system focal length	23 mm
Color (NIR) lens aperture	f=1/5.6
PAN total field of view, across track (along track)	81,6° (60,7°)
RGB total field of view, across track (along track)	82,3° (13,1°)
NIR total field of view, across track (along track)	74,5° (53,1°)
Flying height for RGB pixel size @ 10 cm GSD	2,174 m

f100



The predecessor model of the new UltraCam Condor was used exclusively to provide [Bing Maps](#) imagery with stunning 30 cm blanket coverage of the continental United States and Western Europe in two flight seasons.

→ Vexcel Data Program (VDP): For example, the National Insurance Crime Bureau is using pre- and post-disaster imagery.

Source: <https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-condor/>



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Aerial Cameras (7/7)

(Stand 2023)

<https://www.vexcel-imaging.com/products/>



<https://www.vexcel-imaging.com/>



UltraCam
Merlin 4.1



UltraCam
Eagle 4.1



UltraCam
Osprey 4.1



UltraCam
Condor 4.1



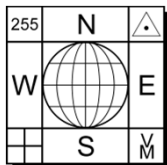
UltraCam
Dragon 4.1



UltraMap
Suite



UltraCam
Falcon Mark 2



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

DiMAC Camera (DIGITAL MODULAR AERIAL CAMERA)



Camera Module (CM)

The DiMAC Camera Module is a complete, independent assembly that acquires one color image via one color CCD through one lens. It consists of the Kodak area Bayer-filter CCD (7216 x 5412 effective pixels per CCD) packaged within a PhaseOne digital back, the patented piezo-driven forward motion compensation actuator (allowing flight speeds of up to 280 knots), the lens assembly (flexible configuration allowing for lens options from 55mm to 120mm), the Rollei mechanical shutter (from 1/125 to 1/500 sec., f4 to f16, with mechanical iris) and the optical filters (either RGB or IRC).

Camera Cylindrical Frames (CCF)

The DiMAC Camera Cylindrical Frame houses from 1 to 4 camera modules (CMs) within a carbon-fiber frame that fits into most existing aerial camera mounts (40 cm diameter). The CCF provides the optimal operational environment for the CMs, with integrated thermal and high-frequency vibrational isolation. In addition, the carbon fiber enclosure contains a rigid support for any industry standard IMU device (not provided or required, but highly recommended), allowing for optimal placement of the IMU relative to the area CCD sensor.

Normal flight planning and aerial operation

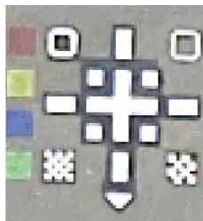
The DiMAC provides a large ground coverage footprint of 10,500 by 7,200 pixels (achieved through the use of 2 adjacent camera modules). This results in a swath width only slightly less than a standard film-based aerial camera. The piezo-driven forward motion compensation that moves CCD during capture to a positional tolerance of several nanometers allows for flight speeds that far exceed normal aircraft operational requirements. When swath width and aircraft speeds are considered, flight planning and operation with the DiMAC is similar to industry standard operational practices.

<http://www.dimac-camera.com/>



DiMAC Camera digital

f = 100 mm, GSD = 10 cm,
H = 3600 ft.



LMK 2000 Camera film-based

f = 150 mm, scanning at 14 μ m,
GSD = 8.5 cm, H = 3600 ft.





3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

Applanix DSS 322
(DIGITAL SENSOR SYSTEM)

The first complete turn-key, all-digital medium-format mapping system with:

Integrated POS AV Direct Georeferencing System

5.5 k x 4k True Color and CIR Digital Imager (22 Mega Pixels) with Yaw stabilized Azimuth mount

Ruggedized data logger and pressurized drive

Built in Flight Management System (FMS)

Imagery and POS AV data post-processing software



DSS™

<http://www.applanix.com/>

APPLANIX
A TRIMBLE COMPANY



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.6 Digitale Aufnahmesysteme

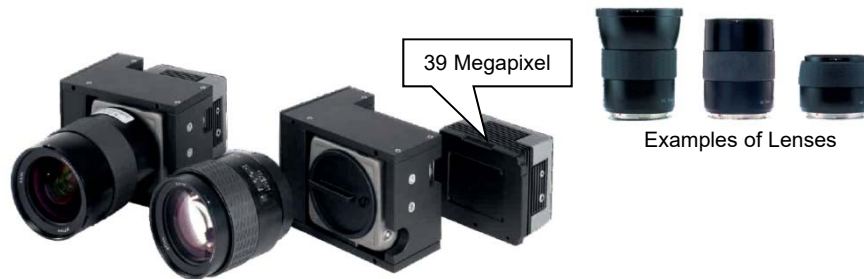
DIGICAM™

IGI DigiCAM

The IGI *DigiCAM* is a medium-format airborne digital camera system for professional, but affordable digital aerial photography. By using IGI's core competence in airborne developments, the digital camera is built by IGI for airborne conditions and aerial survey applications. Combined with IGI's flight management system *CCNS4* and the *AEROcontrol* GPS / IMU system the *DigiCAM* forms a complete solution for an extremely rapid and automated workflow for the generation of directly georeferenced images.



Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
 IGI mbH, 57223 Kreuztal, Germany
<http://www.igi-ccns.com/products/digicam.htm>



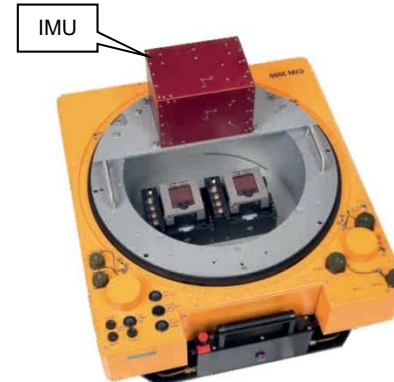
Camera head, lens, camera body and digital back



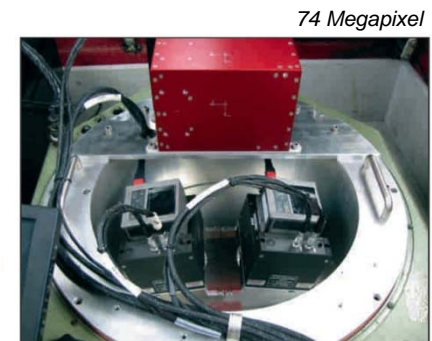
Examples of Lenses



Display, *DigiControl* with 2 Storage Units, Camera head and filters



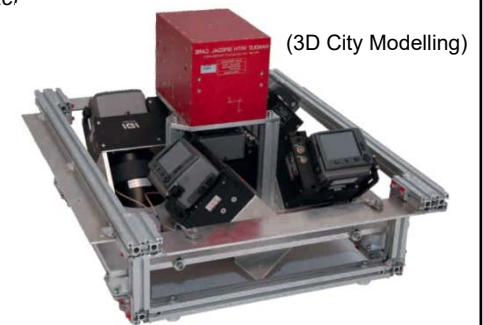
Double-DigiCAM



Dual-DigiCAM
arranged along track



Quattro-DigiCAM



Penta-DigiCAM



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

Ausgewählte kommerzielle Systeme (siehe www.geo-matching.com)



www.microdrones.com/de

md4-1000 Movie: [YouTube](#)

Platform: Copter (4 rotors)
Weight: 2.65 kg
max. payload: 1.2 kg
max. stay in the air: 88 min.
max. speed: 54 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, IMU, barometer, compass
Onboard imaging/scanning devices: Camera, Lidar

UAV ... *unmanned aerial vehicle(s)*
UAS ... *unmanned aircraft system(s)*
RPAS ... *remotely piloted aircraft system(s)*
UVS ... *unmanned vehicle system(s)*

Real time image and video downlink
Build-in stabilization
Sensor tilting to allow oblique views
Launching method: From ground (vertical take-off)
Automatic landing, autonomous emergency landing
Fully pre-programmable flight

Flight planning software: mdCockpit



www.aibotix.com/de

Aibot X6 Movie: [YouTube](#)

Platform: Copter (6 rotors)
Weight: 3.4 kg
max. payload: 2 kg
max. stay in the air: 30 min.
max. speed: 50 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, IMU, barometer, compass
Onboard imaging/scanning devices: Camera, additional sensors

Real time image and video downlink

Launching method: From ground (vertical take-off)
Automatic landing
Fully pre-programmable flight

Flight planning software: AiProFlight 2.5
Photogrammetric software: Agisoft Photoscan Professional



www.asctec.de

Falcon 8 Movie: [YouTube](#)

Platform: V-Form Octocopter (8 rotors)
Size (BxLxH): 770 x 820 x 125 mm
Smallest and lightest flight system for 36 MP images
Max. take off weight: 2.2 kg
Flight time 12-22 min.
max. air speed: 57.6 km/h

Safety through intelligent redundancy, resistant to magnet fields
360° field of view
Camera options: Sony Alpha 7 & 7R, Camcorder Sony PJ780VE (full-HD)



Mobile Ground Station



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

Ausgewählte kommerzielle Systeme (siehe www.geo-matching.com)



www.sensefly.com

eBee RTK Movie: [YouTube](#)

Platform: Aircraft (1 propeller)
Weight: 0.73 kg (incl. supplied camera), Wingspan: 0.96 m
max. stay in the air: 40 min.
max. speed: 90 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, IMU, barometer, compass
Type of GNSS: L1/L2 GNSS
Onboard imaging/scanning devices: Camera (16 MP IXUS/ELPH)

Swiss made

No real time image and video downlink
Collision avoidance system

Launching method: By hand
Automatic landing
Fully pre-programmable flight

Flight planning software: eMotion 2
Photogrammetric software: Postflight Terra 3D
(→ 3D Landscape Models, DEMs, Orthomosaics)



www.uas.trimble.com

Trimble UX5 Movie: [YouTube](#)

Platform: Aircraft (1 propeller)
Weight: 2.5 kg, Wingspan: 1 m
max. payload: 0.5 kg
max. stay in the air: 50 min.
max. speed: 140 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, no further information
Onboard imaging/scanning devices: Camera (16 MP Sony NEX5R)

No real time image and video downlink
Trimble tablet
Launching method: Catapult
Automatic landing
Fully pre-programmable flight

Flight planning software: Trimble Access Aerial Imaging module
Photogrammetric software: Trimble Business Center PM
(incl. INPHO photogrammetric software)



www.mavinci.de

SIRIUS PRO Movie: [YouTube](#)

Platform: Aircraft (1 propeller)
Weight: 2.05 kg, Length: 1.22 m, Wingspan: 1.63 m
max. payload: 1.1 kg
max. stay in the air: 50 min.
max. speed: 80 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, IMU, barometer, compass
Type of GNSS: TOPCON sub-cm RTK
Type of IMU: 9DOF MAVinci
Onboard imaging/scanning devices: Camera (Panasonic GX1)

No real time image and video downlink
Air traffic monitoring system

Launching method: By hand
Automatic landing
Fully pre-programmable flight

Flight planning software: MAVinci Desktop
Photogrammetric software: Agisoft Photoscan Professional
(→ 3D Landscape Models, DEMs, Orthomosaics)



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)



Weitere kommerzielle Systeme



www.riegl.com

Riegl RiCOPTER with VUX-SYS

Movie: [YouTube](#)

Platform: Copter (8 rotors)
Weight: 9 kg, Wingspan: 1.92 m, Height: 0.47 m
max. payload: 16 kg (sensors and power supply)
max. stay in the air: 30 min.
max. speed: 60 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, IMU, barometer, compass
Onboard imaging/scanning devices: Camera (optional), Riegl VUX-1
→ up to 350,000 meas./sec, max. range 550 m, range accuracy 10 mm



Real time image and video downlink

Launching method: From ground (vertical take-off)
Automatic landing
Fully pre-programmable flight

Flight planning software: Yes
Point cloud processing: RiPROCESS



www.questuav.com

Q-POD

Movies: [YouTube 1](#) & [YouTube 2](#)

Platform: Aircraft (1 propeller)
Weight: 3.6 kg (without power supply), Wingspan: 1.95 m
max. take-off weight: 4.5 kg
max. stay in the air: 25 min.
max. speed: 90 km/h, min. speed: 43.2 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, no further information
Onboard imaging/scanning devices: Swappable sensor pods, various cameras, e.g., Sony A6000, LUMIX LX7, Thermal, IR

No real time image and video downlink

Launching method: By hand (Safelaunch @ bungee system)
Automatic landing (Belly land or parachute)
Fully pre-programmable flight (Autopilot SC2, SkyCircuits, UK)

Flight planning software: GRID-IT Flightmanager
Photogrammetric software: [Pix4D](#), [AgiSoft PhotoScan](#), etc.



twinHEX

Movie: [not available](#)

Platform: Copter (6 propellers)
Weight: 2.47 kg, Wingspan: 1.22 m, Height: 0.26 m
max. payload: 2.63 kg
max. stay in the air: 35 min.
max. speed: 40 km/h

Onboard navigation sensors: GNSS, IMU, compass
Camera platforms: twinVERTICAL/SWIVEL/SPHERE
Onboard imaging/scanning devices: Camera (RICOH GXR)

No real time image and video downlink

Launching method: From ground (vertical take-off)
Automatic landing
Fully pre-programmable flight (Autopilot MikroKopter)

Flight planning software: GRID-IT Flightmanager
Photogrammetric software: Agisoft Photoscan Professional
(→ 3D Landscape Models, DEMs, Orthomosaics)



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

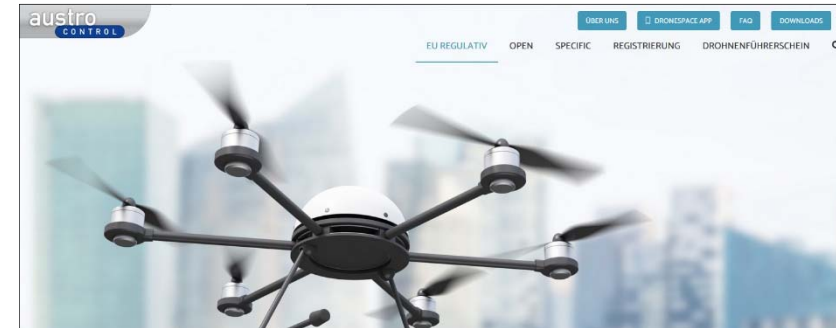
Das neue europäische Drohnen-Regulativ

Mit einer neuen EU-Verordnung wird das Fliegen mit Drohnen in der EU einheitlich geregelt. Die Verordnung (EU) 2019/947 tritt am 31.12.2020 in Kraft. Übergangsregelungen bis 2023 und darüber hinaus stellen sicher, dass der Übergang ein fließender ist, und bereits gekaufte Drohnen weiterhin verwendet werden dürfen.

- Mit dem Drohnenregulativ der Europäischen Kommission werden **die nationalen Gesetze** zu unbemannten Luftfahrzeugen der EU Mitgliedsstaaten **vereinheitlicht**.
 - Damit wird der europäische Markt standardisiert, was zu **Vereinfachungen für den Drohnenutzer aber auch für Hersteller** führen soll.
 - Das neue Regulativ tritt mit 31. Dezember 2020 in Kraft, eine Übergangsperiode für ältere Drohnen, die die neuen technischen Anforderungen nicht erfüllen, ist bis 1. Jänner 2023 vorgesehen.
 - Die Einstufung des Drohnenbetriebs wird in die Kategorien **"open"**, **"specific"** und **"certified"** eingeteilt, die für den Freizeitanwender relevante "open" Kategorie, wird in drei weitere Unterkategorien aufgeteilt.
 - Damit ermöglicht man den Nutzern möglichst viel Freiheit und gewährleistet gleichzeitig die **Sicherheit** der bemannten Luftfahrt und die Sicherheit am Boden.
 - In der **"Open"** Kategorie ist der Flug bis zu 120 m über Grund gestattet, ein Überfliegen von Menschenansammlungen ist dabei prinzipiell verboten.
 - Neu ist auch die **Registrierung**, die Drohnenbesitzer vornehmen müssen. Online-Schulungen und Kompetenznachweise (Drohnenführerschein) können ebenfalls erforderlich sein, um das Sicherheitsverständnis zu fördern.
 - Für **Kleinstdrohnen unter 250g und Modellflugzeuge** ändert sich dabei wenig, da bisherige Daten zeigen, dass diese bereits sehr sicher sind.
- (Quelle: https://www.dronespace.at/eu_regulativ)

In **bestimmten Gebieten** (z.B. Gebiete rund um Flughäfen und Flugplätze, Flugbeschränkungsgebiete) dürfen Flüge nur mit **vorheriger Bewilligung** von Austro Control bzw. von anderen Behörden durchgeführt werden.

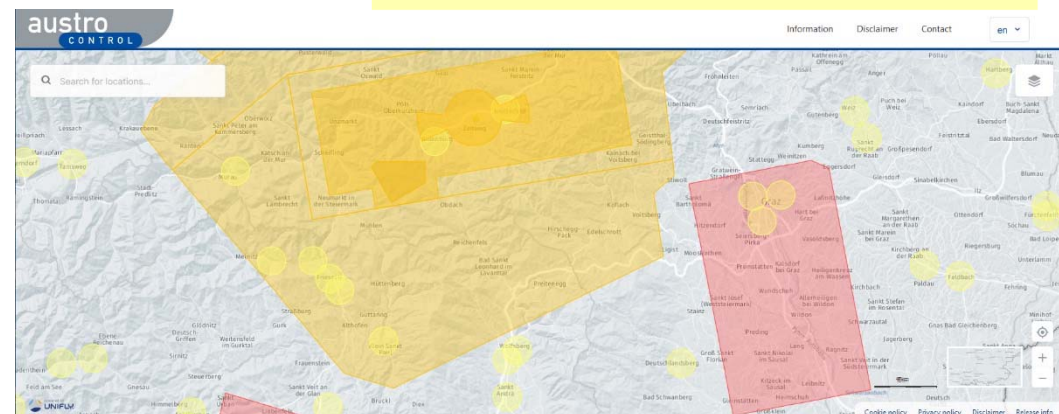
Eine Übersicht über diese Gebiete sowie weitere Informationen finden sie unter [map.dronespace.at](https://www.dronespace.at) bzw. in der Austro Control **Drohnen-App „Drone Space“**.



<https://www.dronespace.at>

ÖAMTC Drohnen-Info App:

<https://www.oamtc.at/thema/drohnen/drohnen-info-app-26853120>

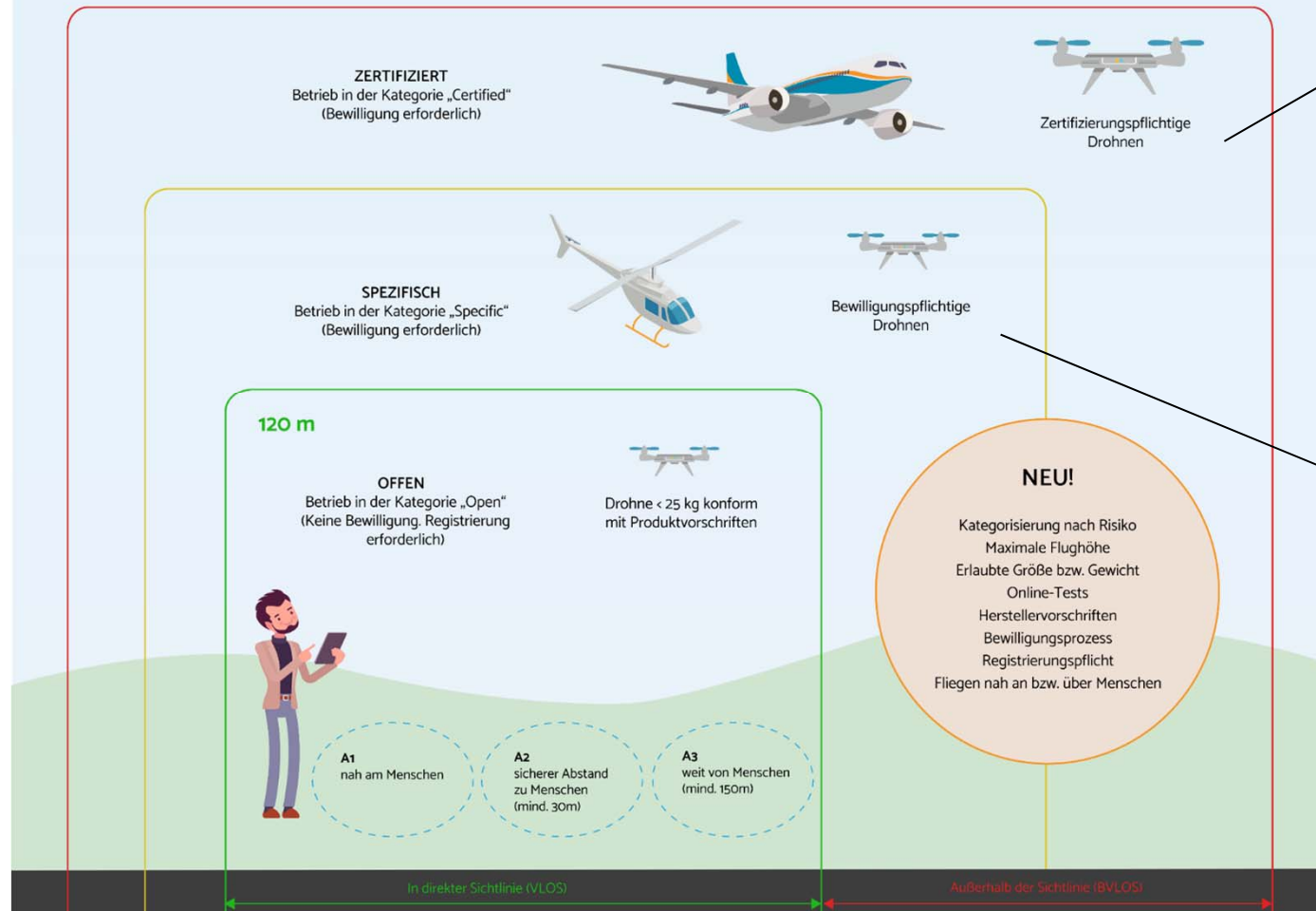




3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

DROHNEN: Rechtliche Rahmenbedingungen ab 31.12.2020



Die Kategorie „Certified“ ist für Drohneneinsätze vorgesehen, bei denen das vorliegende Risiko vergleichbar zur bemannten Luftfahrt ist. Diese sieht u.a. eine Zertifizierung des Fluggerätes vor.

Folgende Flüge fallen jedenfalls in die „Certified“ Kategorie:

- Transport von Personen
- Transport von Gefahrgut
- Flüge über Menschenansammlungen mit Drohnen von über 3 Metern Größe

Wenn eine der Vorgaben der „Open“ Kategorie nicht erfüllt ist, fällt der Flug in die Kategorie „Specific“ und vor dem Betrieb ist eine **Bewilligung** von Austro Control einzuholen. Die „Specific“ Kategorie erlaubt somit auch **Flüge außerhalb der Sichtweite** (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS), **Flüge mit Drohnen über 25 kg** oder Flüge mit Drohnen **über 4 kg im besiedelten Gebiet**. Anwendungsfälle für diese Kategorie können Kameraflüge über Städten oder die Befliegung von Infrastruktur sein.

Weiterführende Informationen zum europäischen Regulativ finden sich auf der Homepage der [EASA](https://www.easa.europa.eu/).

(Quelle: <https://www.dronespace.at>)



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

DROHNEN MIT "CE"-KENNZEICHEN									
	DROHNEN-KLASSE	MODELL (BEISPIEL)	MAX. FLUGHÖHE	ABSTÄNDE	MINDESTALTER	HAFTPFLICHT	REGISTRIERUNG	KENNTNISNACHWEIS	
A1 OFFENE KATEGORIE	C0 mit Kamera und < 250 g Geschwindigkeit < 19 m/s	noch nicht erhältlich	120 Meter über Grund	über einzelnen Personen und im Wohngebiet erlaubt, Aufnah- men nur mit Zustimmung	✓	✓	Ja	Ja (A1/A3)	
	C0 ohne Kamera und < 250 g Geschwindigkeit < 19 m/s		15 Meter über Hindernis > 105m	über einzelnen Personen und im Wohngebiet erlaubt				Nein	
	C1 Abfluggewicht < 900 g Geschwindigkeit < 19 m/s	noch nicht erhältlich	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	keine Flüge über Menschenansammlun- gen und in Wohnge- bieten	✓	Bei kommerzieller Nutzung gewerbliche Haftpflicht!	Ja	Ja (A1/A3)	
A2 OFFENE KATEGORIE	C2 Abfluggewicht < 4.0 kg	noch nicht erhältlich	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	30m Abstand zu Personen / keine Flüge in Wohngebieten	✓	Bei kommerzieller Nutzung gewerbliche Haftpflicht!	Ja	Ja (A1/A3) + A2 Zertifikat	
A3 OFFENE KATEGORIE	C3 / C4 Abfluggewicht < 25.0 kg	noch nicht erhältlich	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	Abstand zu Personen und Wohngebieten 150m	✓	Bei kommerzieller Nutzung gewerbliche Haftpflicht!	Ja	Ja (A1/A3)	
SPEZIELL			Drohnenbetrieb unterliegt der Einzelerlaubnis gemäß den verfügbaren Standardszenarien oder geprüfter Risikobewertung (SORA)		✓	✓	Ja	Ja (A1/A3)	

(Quelle: Drohnenmagazin, 6. Jg., Heft 1, 2021, <http://www.drohnenmagazin.com/>)

Der Betrieb innerhalb der Kategorie Specific/Speziell kann nur nach einer Risikobewertung durchgeführt werden. Diese Risikoanalyse, auch **SORA** („Specific Operation Risk Assessment“) genannt, wird entweder im Voraus von der zuständigen Behörde durchgeführt und veröffentlicht oder vom Betreiber ausgearbeitet.

In der „Specific“ Kategorie gibt es die Möglichkeit der Beantragung eines „**Light UAS Operator Certificate**“, kurz LUC. Mit dem LUC erteilt Austro Control den Betreibern die **Berechtigung ihren eigenen Flugbetrieb zu genehmigen**. In anderen Worten, der Betreiber genehmigt sich seinen "Specific" Kategorie Flüge selbst, wo normalerweise die Genehmigung von Austro Control erforderlich gewesen wäre. Diese „**erweiterte Betriebsgenehmigung**“ erfordert jedoch erhebliche zusätzliche Aufwände seitens des Betreibers, insbesondere im Hinblick auf die Aspekte des Sicherheitsmanagements (SMS).

(Quelle: <https://www.dronespace.at>)



3.2 Luftbildaufnahme

3.2.7 Unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ)

DROHNEN OHNE "CE"-KENNZEICHEN								
	DROHNEN-GEWICHT	MODELL (BEISPIEL)	MAX. FLUGHÖHE	ABSTÄNDE	MINDESTALTER	HAFTPFLICHT	REGISTRIERUNG	KENNTNISNACHWEIS
A1 LIMITIERT OFFENE KATEGORIE	mit Kamera und < 250 g Geschwindigkeit < 19 m/s	Eachine EX5 DJI Mavic Mini DJI Mini 2 DJI Tello Parrot Airborne	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	über einzelnen Personen und im Wohngebiet erlaubt, Aufnahmen nur mit Zustimmung über einzelnen Personen und im Wohngebiet erlaubt	✓	✓	Ja	Ja (A1/A3)
	ohne Kamera und < 250 g Geschwindigkeit < 19 m/s							Nein
	Abfluggewicht < 500 g	Parrot Anafi	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	keine Flüge über Menschenansammlungen und in Wohngebieten	✓	Bei kommerzieller Nutzung gewerbliche Haftpflicht!	Ja	Ja (A1/A3)
A2 LIMITIERT OFFENE KATEGORIE	Abfluggewicht < 2.0 kg	DJI Phantom 1-4 DJI Mavic 1+2	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	Abstand zu Personen und Wohngebieten 50m, Überflug verboten	✓	Bei kommerzieller Nutzung gewerbliche Haftpflicht!	Ja	Ja (A1/A3) + A2 Zertifikat
A3 LIMITIERT OFFENE KATEGORIE	Abfluggewicht > 500g und < 2.0 kg	DJI Phantom 1-4 DJI Mavic 1+2	120 Meter über Grund oder 15 Meter über Hindernis > 105m	Abstand zu Personen und Wohngebieten 150m, Überflug verboten	✓	Bei kommerzieller Nutzung gewerbliche Haftpflicht!	Ja	Ja (A1/A3)
	Gewicht < 25.0 kg	DJI Inspire						
	Ab 1.1.2023 > 500 g und < 25.0 kg	Alle Drohnen ohne "CE"-Kennzeichen						

(Quelle: Drohnenmagazin, 6. Jg., Heft 1, 2021, <http://www.drohnenmagazin.com/>)

July 14-17, 2021
Friedrichshafen
UAS/ RPAS Expo
(Zivile Drohnen)
<https://www.aero-expo.com/aero-de/>





4. Einbildauswertung

Vorbemerkung:

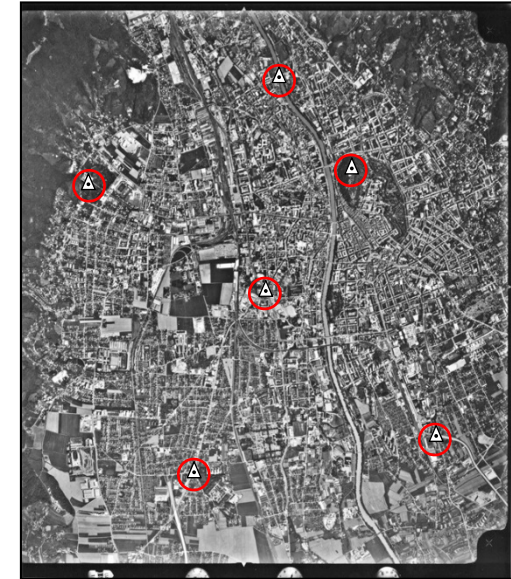
Bei der Bildauswertung wollen wir im wesentlichen die modernen **analytischen Auswerteverfahren** zur Berechnung von Orientierungsparametern der Bilder und zur Bestimmung von Objektinformation (Koordinaten, geometrische Elemente) aus gemessenen Bildkoordinaten betrachten.

Die Bildkoordinaten können sowohl durch analoge Bildmessung als auch durch Verfahren der digitalen Bildverarbeitung gewonnen werden. Wir wollen die analytischen Auswerteverfahren nach der Anzahl der beteiligten Messbilder aufteilen. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass der Bezug zwischen Bildinformation und Objektgeometrie über die Parameter der inneren und äußeren Orientierung der Bilder hergestellt wird.

Der Ablauf setzt sich in der Regel aus folgenden Schritten zusammen:

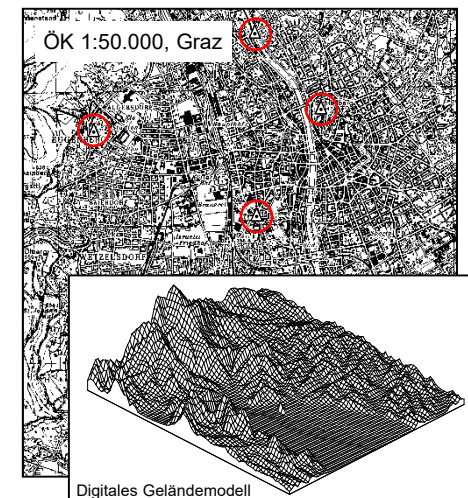
1. Bereitstellung von Objektinformation (Passpunkte, auch Strecken und andere geometrische Elemente)
2. Messen von Bildkoordinaten zur Orientierung (Bildkoordinaten)
3. Bestimmung von der Orientierungsparameter (innere und äußere Orientierung)
4. Rekonstruktion des Objektes aus orientierten Bildern (Neupunkte, geometrische Elemente)

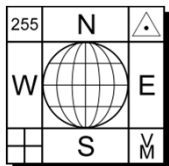
Verfahren der Ein-/Einzelbildauswertung haben zum Ziel, aus nur **einer** photographischen Aufnahme heraus entweder *Koordinaten* von *Objektpunkten* zu bestimmen oder eine (optische oder rechnerische) Umbildung der Aufnahme in eine andere Projektion vorzunehmen (*Orthophotoherstellung*). In beiden Fällen werden Orientierungsdaten des Bildes und geometrische Zusatzinformation (Passpunkte, geometrische Elemente) des Objektes benötigt. Grundsätzlich kann man zwischen der Auswertung ebener Objekte (topographisches Beispiel: Holland) und beliebiger dreidimensionaler Objektflächen (topographisches Beispiel: Hügelland, Gebirge) unterscheiden.



Luftmessbild - Graz, 1989

© BEV



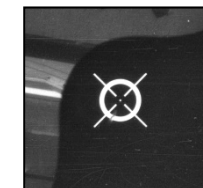
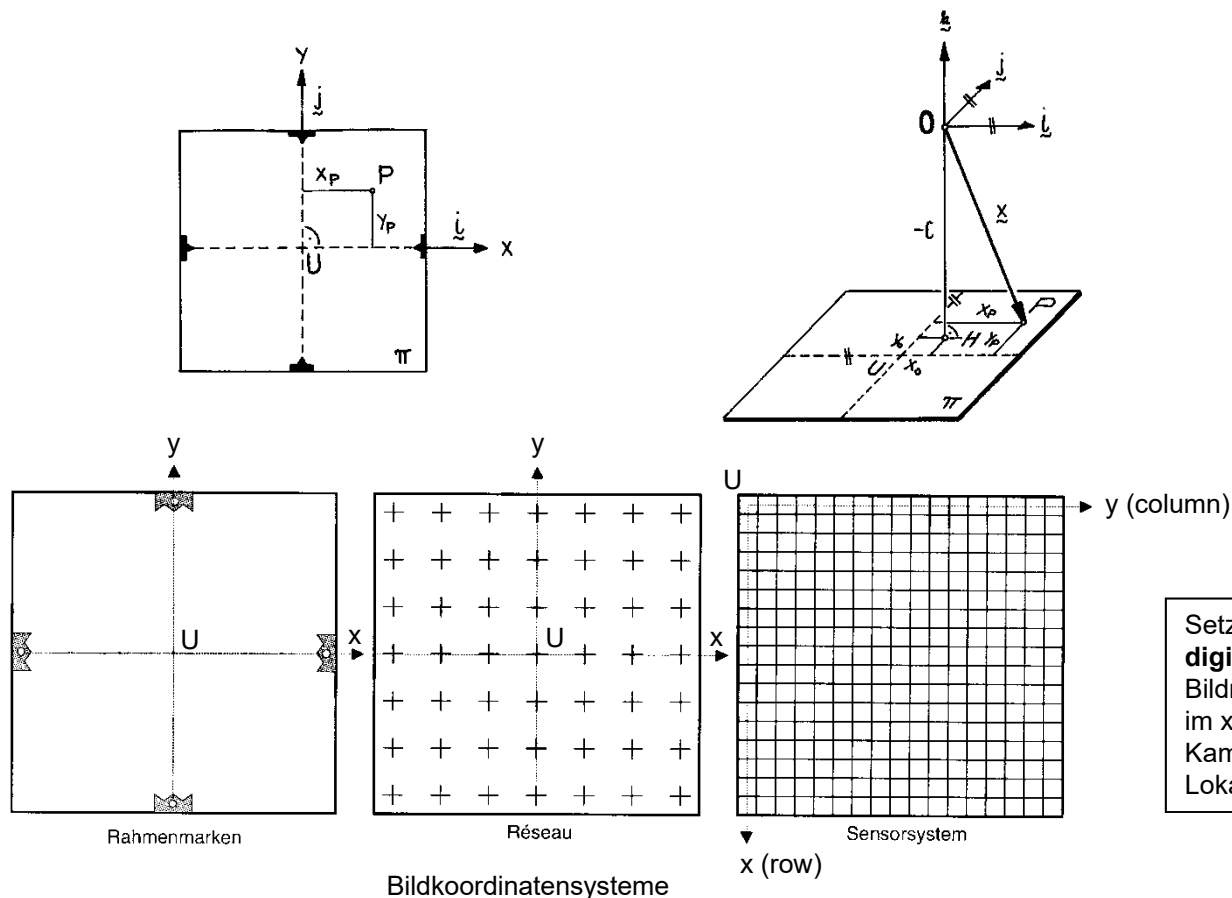


4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

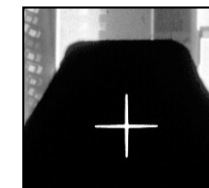
4.1.1 Rahmenmarken und Réseau

Für die Objektrekonstruktion muss das photogrammetrische **Strahlenbündel** der Aufnahme **konform (winkeltreu)** wiederhergestellt werden. Hierfür werden die bekannten Elemente der inneren Orientierung benötigt (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Das kamerafeste Bildkoordinatensystem (x,y) (= örtliche Koordinatensystem der Aufnahme) wird bei analogen Messkameras (= Rahmenmarkenkameras) meist durch 4 oder 8 **Rahmenmarken**, bei analogen Teilmesskameras über ein **Réseau** und bei digitalen Kameras über die **Zeilen** und **Spalten** der Bildmatrix definiert.



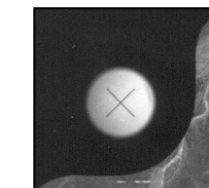
WILD 21 NAGII



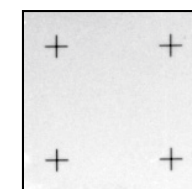
LMK 15



RMK TOP 15



WILD 21/18



Rolleimetric 6006

Setzt man für die Datengewinnung eine **digitale Kamera** ein, so hat man die Bildmatrizen der Ausgangsbilder unmittelbar im xy -Kamerakoordinatensystem. In solchen Kameras gibt es keine Rahmenmarken; die Lokalisierung der Rahmenmarken entfällt.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

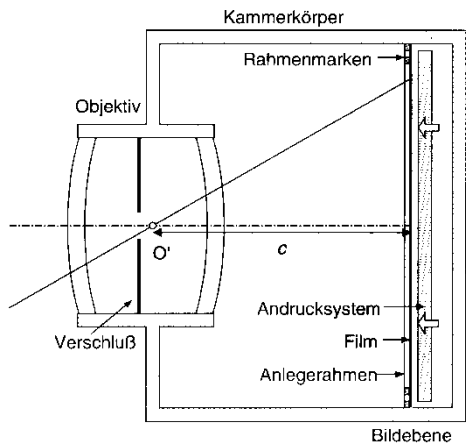
4.1.1 Rahmenmarken und Réseau



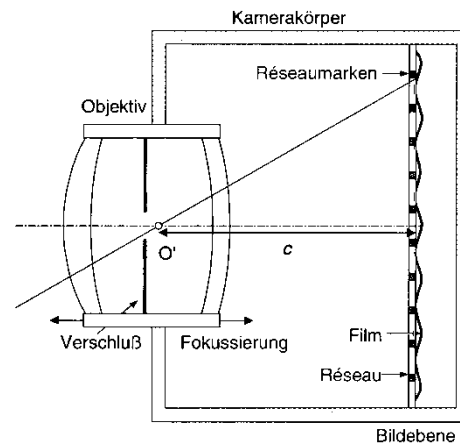
Réseau

Ein Réseau besteht aus einer dünnen ebenen Glasplatte, auf die ein Gitter von bekannten Referenzpunkten (= *Réseaukreuze*) aufgebracht ist. Es befindet sich unmittelbar vor dem Film und wird ebenfalls bei der Belichtung auf das Messbild projiziert (Beispiel Rolleimetric 6006). Abweichungen von der Planlage oder Deformationen des Films können mit Hilfe des Réseaus anschließend rechnerisch (durch maschenweise Interpolation) kompensiert werden.

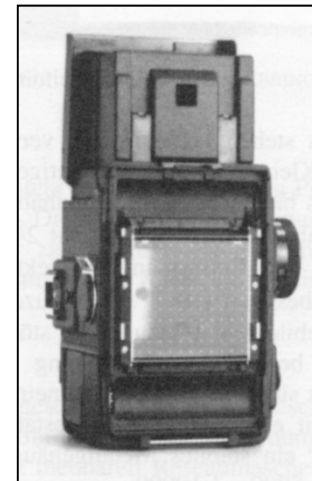
Prinzip von Mess- und Teilmesskamera



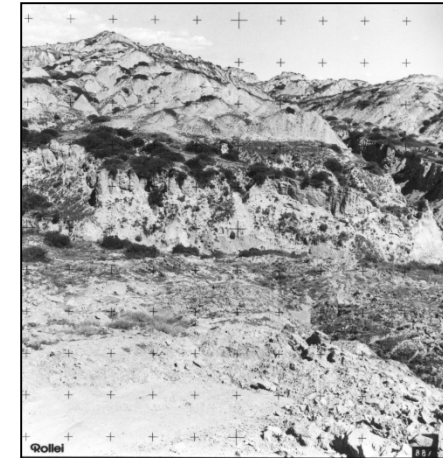
a) Messkamera



b) Teilmesskamera (Réseaukamera)



Mittelformatkamera
Rolleimetric 6006



Badlands in der Basilikata,
Südtalien, 1991.
(Rolleimetric 6006,
Mittelformat 6cm x 6cm,
121 Réseaukreuze im Abstand
von 5 mm).





4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

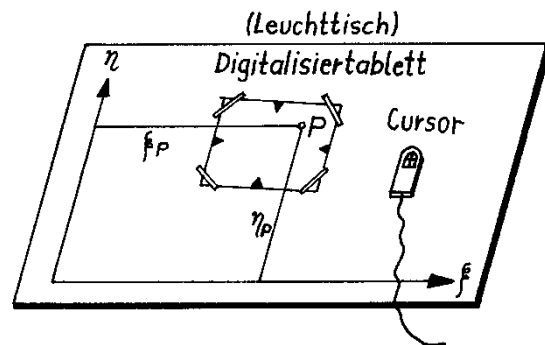
4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

Monoskopische versus stereoskopische Bildkoordinatenmessung (1 Bild \leftrightarrow 2 Bilder).

Aufgabenstellung: Messung von Lagekoordinaten von diskreten (z.B. signalisierten) Objektpunkten in Einzelbildern.

Analoge Bilder können als Filmdias (*transparent*) oder Papierabzüge (*opak*) vorliegen.

1) Digitalisiertisch (Digitizertablett)



Bildkoordinatenmessung mit einem Digitalisiertablett.



Hardwarekomponenten des Mehrbildauswertesystems Rolleimetric MR2. Steuerrechner, Digitizer zur Bildkoordinatenmessung und Plotter zur graphischen Ausgabe.

Beschreibung:

Das Bild wird im aktiven Messbereich des Digitalisiertisches (verschiedene Formate) mit Klebestreifen (Tixo) fixiert. Als analoge Messmarke dient das Fadenkreuz des Cursors (meist mit Messlupe). Messgenauigkeit etwa 25 μ m (abhängig von der Dichte der Messdrähte). Wiederholmessgenauigkeit liegt im Bereich der graphischen Genauigkeit von 0.1 mm. Um eine größere Positioniergenauigkeit zu erzielen, werden vergrößerte Papierabzüge (2x) verwendet.

Der Digitizer liefert als Messwerte sog. **Maschinenkoordinaten** (ξ, η). Um die Maschinenkoordinaten in die eigentlich gesuchten **Bildkoordinaten** (x, y) umrechnen zu können, müssen auch die Rahmenmarken bzw. die Réseaupunkte gemessen werden. Bei Réseaubildern können dadurch etwaige Bilddeformationen des Papierabzugs oder nichtlineare Einflüsse des Digitizers kompensiert werden. Bei einer Neupositionierung des Messbildes bzw. auch oft nach Initialisierung des Digitizers muss der Orientierungsvorgang (= innere Orientierung) durch Neumessung der Rahmenmarken oder etwaiger Referenzpunkte wiederholt werden.

Es gibt mehrere kommerzielle photogrammetrische Auswertesysteme, welche das Digitalisiertablett als Messmittel verwenden (vgl. Rolleimetric MR2). Die erreichbare Genauigkeit ist eingeschränkt. Anwendungsgebiete sind Architektur, Denkmalpflege und Unfalldokumentation.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

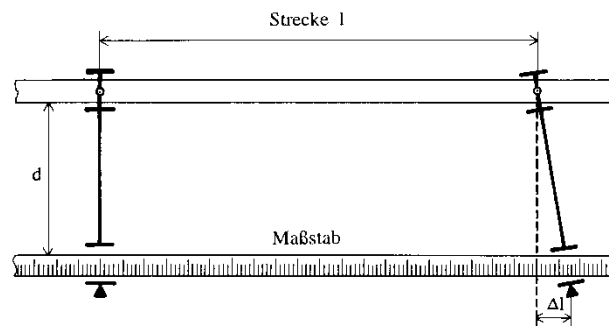
2) Monokomparator

Analoge Komparatoren gehören zu den ältesten Konstruktionen photogrammetrischer Bildmesssysteme (vgl. Stereokomparator von Pulfrich, 1901). Sie erlebten ihre Blütezeit zwischen ca. 1960 und 1980, als hochgenaue Bildkoordinaten für die neuen analytischen Auswerteverfahren benötigt wurden.



← Monokomparator Zeiss PK-1 mit automatischer Datenregistrierung, interne Messgenauigkeit: 1 μm .

Längenmesseinrichtung ohne Beachtung des Abbe'schen Komparatorprinzips →



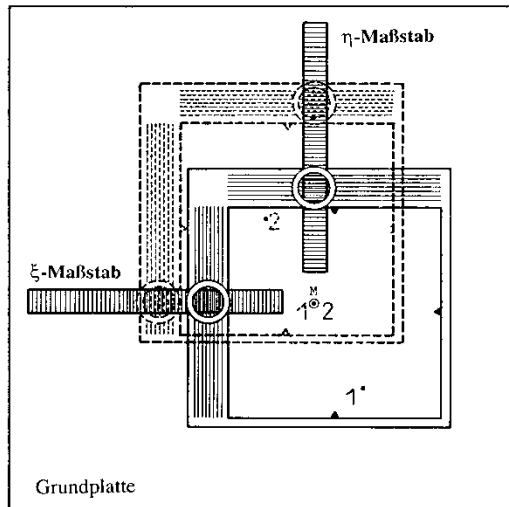
Photogrammetrische Präzisionskomparatoren sind nach dem **Abbe'schen Komparatorprinzip** aufgebaut, bei dem Messlineal (Maßstab) und zu messende Strecke in einer Linie angebracht sind, um Sekundärfehler durch Verkanten der Verbindungselemente zu vermeiden.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

cont.

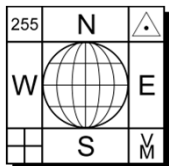


Meßprinzip des Zeiss-Präzisionskomparators PK 1
 ----- Position beim Messen des Punktes 1
 ——— Position beim Messen des Punktes 2

- Grundplatte mit zwei aufeinander senkrecht stehenden Glastmaßstäben, welche gleichabständige Striche aufweisen.
- Gleiche Strichmuster befinden sich ebenfalls auf dem parallel verschiebbaren Bildträger orthogonal dazu.
- Messmarke M wird in die Bildebene eingeblendet und ist stationär.
- Linearimpulsgeber messen photoelektrisch die Verschiebungsbeträge in ξ und η .
- Die interne Messgenauigkeit beträgt $1 \mu\text{m}$. Die tatsächlich erreichbare Punktmessgenauigkeit hängt von der Punktdefinition sowohl der Einzelpunkte (signalisierte, natürliche, künstliche) als auch der Rahmenmarken ab. Die Rahmenmarken müssen ebenfalls gemessen werden, um die innere Orientierung wiederherstellen zu können.
- Koordinatenanzeige am PC bzw. digitale Verspeicherung.

Eine Speziallösung stellen die digitalen Komparatoren, welche ausschnittsweise den Bildinhalt über eine CCD-Kamera aufnehmen:

- Komparator mit mechanischer Sensororientierung
- Komparator mit optisch-numerischer Sensororientierung (Réseau-Scanner von Rollei).



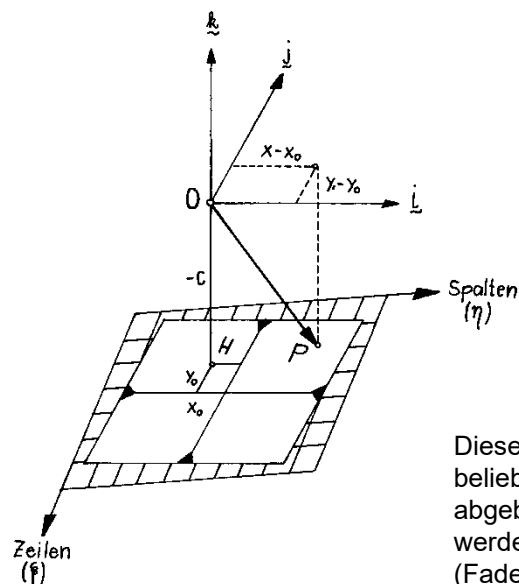
4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

3) Lokalisierung am Bildschirm

Setzt man für die Datengewinnung eine **digitale Kamera** ein, so hat man die Bildmatrizen der Ausgangsbilder unmittelbar im xy-Kamerakoordinatensystem. In solchen Kameras gibt es keine Rahmenmarken; die Lokalisierung der Rahmenmarken entfällt.

Voraussetzung für die Messung von Bildkoordinaten am Bildschirm ist die vorangegangene *Digitalisierung der photographischem Messbilder* (vgl. photogrammetrische Scanner im Abschnitt 5). Nach dem Digitalisieren hat man die jeweilige Bildmatrix im Koordinatensystem des Abtasters (Scanners).



Für die Wiederherstellung der **inneren Orientierung** der einzelnen Bilder sind die Rahmenmarken bzw. Réseaukreuze im $\xi\eta$ -System (= Pixelkoordinatensystem) koordinativ zu bestimmen.

Die Messung der Rahmenmarken bzw. von signalisierten Passpunkten kann *automatisiert* werden (\rightarrow Methode 4).

Manuelle Bildkoordinatenmessung:

Diese Funktionalität wird in vielen Bildverarbeitungsprogrammen (z.B. Photoshop) angeboten. Man kann in eine beliebige Auflösungsstufe hineinzoomen, d.h. ein physikalisches Pixel wird auf mehrere Bildschirmpixel abgebildet. Bei einer gewissen Zoomstufe ist die Pixelstruktur des gescannten Bildes zu erkennen. Angezeigt werden meist nur ganzzahlige Koordinatenwerte (Zeile, Spalte). Die Lokalisierung erfolgt mit Hilfe eines Cursors (Fadenkreuz, Zeigerspitze).

Die manuelle, interaktive Bildschirmkoordinatenmessung ist integraler Bestandteil jeder DPW (engl. digital photogrammetric workstation)/ jedes digital-photogrammetrischen Arbeitsplatzes.

Um die angestrebte Subpixel-Genauigkeit zu erreichen, wird häufig das „aufgeblasene“ Digitalbild einer zusätzlichen *Grauwertinterpolation* unterworfen.

Erzielbare Genauigkeiten zwischen 1/10 und 1/5 der Pixelgröße der digitalisierten Photographie bei gut definierten Punkten (Rahmenmarken, signalisierte Passpunkte).



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

4) Automatisierte Bildkoordinatenmessung

In vielen DPW kann die Messung der Rahmenmarken im Zuge der inneren Orientierung halbautomatisch bzw. überhaupt vollautomatisch durchgeführt werden.

Dieser Prozess erfolgt meist schon beim Scannen der Luftbilder.

Die Automatisierung des Messvorganges bietet sich insoweit an, da die Positionen der Rahmenmarken im Bild schon näherungsweise bekannt sind und die Muster der wenigen Rahmenmarkentypen ebenfalls bekannt sind.

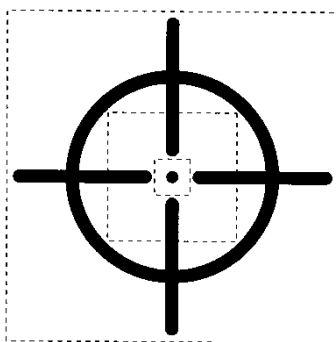
Es gibt zwei verschiedene methodische Ansätze bei der automatischen Messung von Rahmenmarken:

- **flächenbasierter Ansatz** (area based matching),
- **merkmalsbasierter Ansatz** (feature based matching).

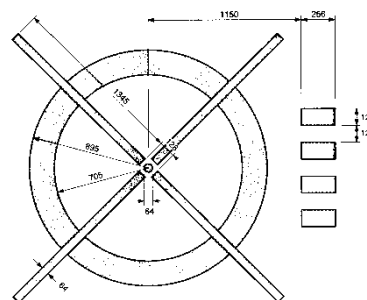
Flächenbasierter Ansatz:

Für jeden Kamerateyp sind am digitalen photogrammetrischen Arbeitsplatz Referenzbilder zu kreieren. Diese **Mustermatrizen** sollen idealerweise

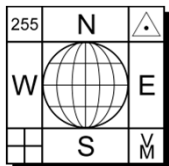
- in *verschieden großen Ausschnitten* und
- innerhalb des jeweiligen Ausschnittes in *verschiedenen Auflösungen* vorliegen.



Rahmenmarke als Negativ mit drei verschieden großen Ausschnitten.



Rahmenmarke (CAD-Modell) des Aufnahmesystems RC30 von LH Systems.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

Flächenbasierter Ansatz: cont.

Mit Hilfe der Mustermatrizen werden die Rahmenmarken im digitalisierten Bild (= Suchmatrix) gesucht und mit Subpixel-Genauigkeit gemessen. Meist 4 oder 8 Rahmenmarken.

Die Bildlage (*seitenrichtig, seitenverkehrt, Rotation*) muss ebenfalls richtig erkannt werden, um die Rahmenmarken richtig zu zuordnen. Dies geschieht mit zusätzlichen Codierungen bei den Rahmenmarken (Strichcode o.ä.) bzw. über eine zusätzlich asymmetrisch angeordnete Rahmenmarke.

Das größte Problem bei der automatischen Rahmenmarkenlokalisierung ist die Beschaffung von geeigneten **Näherungspositionen**:

- i) manuelle Lokalisierung in einem Übersichtsbild,
- ii) kontrolliertes Einlegen der zu digitalisierenden Photographien in den Scanner,
- iii) automatisches Suchen der Rahmenmarken im Gesamtbild (Beschleunigung des Suchprozesses durch Aufbau einer Bildpyramide).

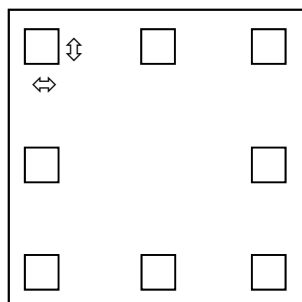
4 oder 8 Suchbereiche für die Lokalisierung der Rahmenmarken.

Als Ähnlichkeitsmaß wird der **(Kreuz-) Korrelationskoeffizient r** berechnet.

Der größte Korrelationswert zeigt die gesuchte Position der Rahmenmarke im Suchgebiet an.

Subpixelgenaue Positionierung erzielt man mit der **Kleinsten-Quadrate Korrelation (Least Squares Matching, LSM)** zum Abschluss.

Eine andere Möglichkeit der Messung mit Subpixelgenauigkeit besteht darin, daß man die diskrete Korrelationsfunktion in der Umgebung des größten Korrelationswertes durch eine analytische, kontinuierliche Korrelationsfunktion approximiert und in dieser das lokale Maximum bestimmt (meist ein Polynom 2. Ordnung).



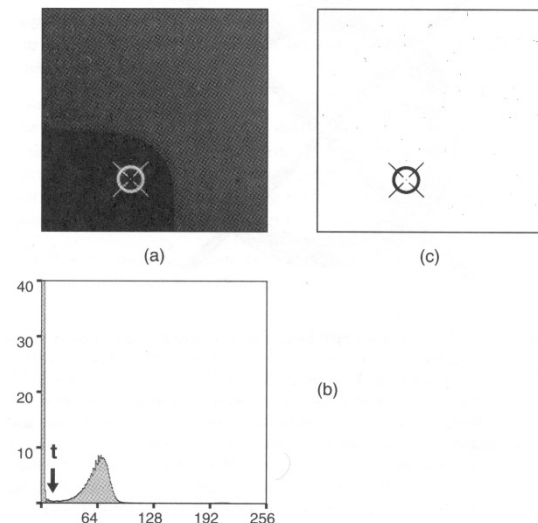
Pixelweises Verschieben der Mustermatrix in der Suchmatrix.
Bei jeder Position wird der Korrelationskoeffizient berechnet.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.2 Monoskopische Bildkoordinatenmessung

Flächenbasierter Ansatz: cont.

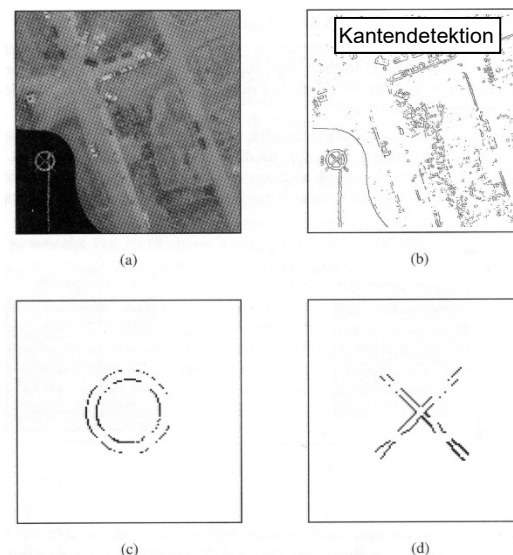


Einfache Bildklassifizierung durch Schwellwertbildung.

- Messen des Zentrums der Rahmenmarke:
 - Schwerpunktberechnung
 - template matching (vgl. vorhin)

Merkmalsbasierter Ansatz:

Dieser Ansatz wird seltener verwendet.
Er beruht auf Mustererkennungsalgorithmen.



- Automatische Detektion von Kreisen und Linien
 - [Hough-Transformation](#) → geometrische Primitive
 - Bestimmung des Zentrums der Rahmenmarke.

Genauigkeitsangaben zur automatisierten Bildkoordinatenmessung:

Praktische Erfahrungen haben ergeben, dass die automatische Einpassung mit einer Genauigkeit von etwa 1/10 – 1/5 Pixel gelingt. Bei einer Digitalisierung des Messbildes mit 15 µm entspricht dieser Wert einer Genauigkeit von ± 2 µm bis ± 3 µm im feinsten Niveau der Bildpyramide.

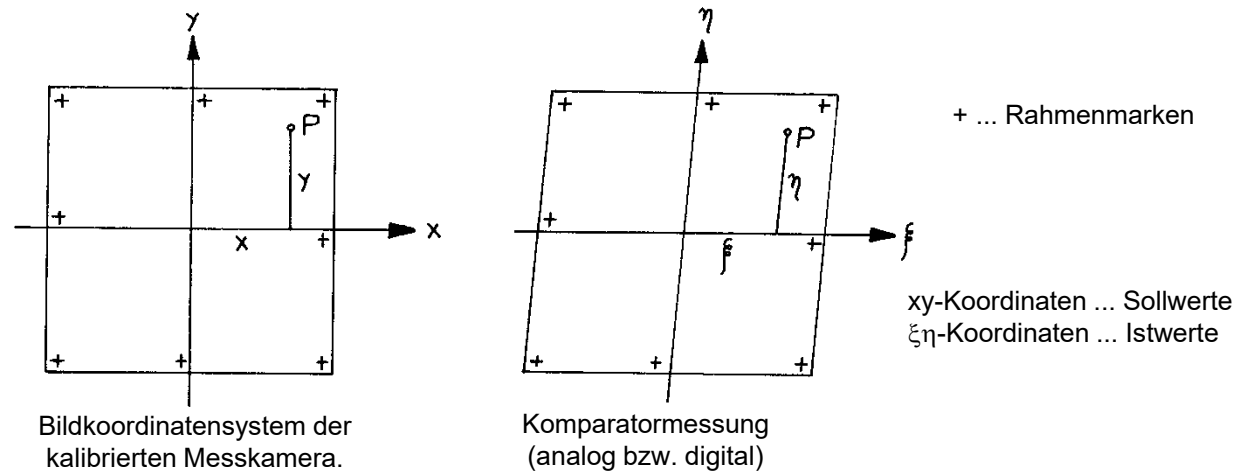


4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

Die gemessenen Bildkoordinaten ξ und η , welche sich auf ein Maschinen- bzw. Scannerkoordinatensystem beziehen, sind in das 2D kartesische Koordinatensystem des kamerafesten Bildkoordinatensystems zu transformieren. Die Definition des Bildkoordinatensystems erfolgt über die Koordinaten der Rahmenmarken, welche im Kalibrierungsprotokoll mitgeteilt werden. Damit kann auch der Filmverzug kompensiert werden.

Koordinatentransformationen:

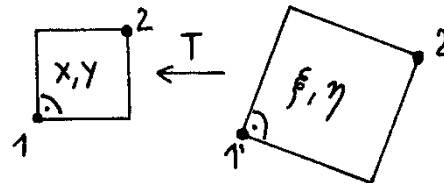


Für die Transformation aller gemessenen Bildpunkte vom $\xi\eta$ - in das xy -System können folgende ebene, lineare Koordinatentransformationen herangezogen werden:

(1) Ähnlichkeitstransformation (4-Parameter Transformation)
= ebene Drehstreckung, konforme (winkeltreue) Transformation

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & -b_1 \\ b_1 & a_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}$$

4 Unbekannte
mind. 2 idente Punkte (= Rahmenmarken)



2 Verschiebungen, 1 Drehung, 1 Maßstabsfaktor

Bei einer überbestimmten Ähnlichkeitstransformation spricht man von einer **Helmert-Transformation**.



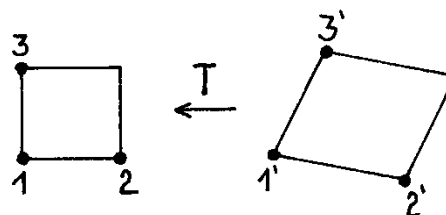
4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

(2) Affintransformation (6-Parameter Transformation)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}$$

6 Unbekannte
mind. 3 idente Punkte (= Rahmenmarken)

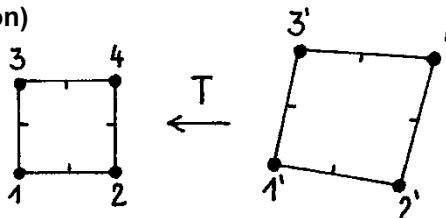


2 Verschiebungen, 1 Drehung + 1 Scherung,
2 Maßstabsfaktoren

(3) Bilineare Transformation (8-Parameter Transformation)

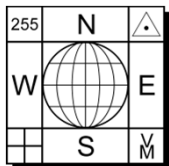
$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \cdot \xi\eta$$

8 Unbekannte
mind. 4 idente Punkte (= Rahmenmarken)



Teilungsverhältnisse entlang der Koordinatenrichtungen
bleiben erhalten (→ parabolisches Hyperboloid)

Anmerkung: Bei 4 Rahmenmarken in den Bildecken wird eine völlige Identität in diesen Punkten erzielt, auf den Verbindungsgeraden wird linear interpoliert. Wird auch angewendet bei der maschenweisen Transformation von Réseaukreuzen.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

(4) Projektivtransformation (8-Parameter Transformation)

$$x = \frac{a_0 + a_1 \cdot \xi + a_2 \cdot \eta}{1 + c_1 \cdot \xi + c_2 \cdot \eta}$$

$$y = \frac{b_0 + b_1 \cdot \xi + b_2 \cdot \eta}{1 + c_1 \cdot \xi + c_2 \cdot \eta}$$

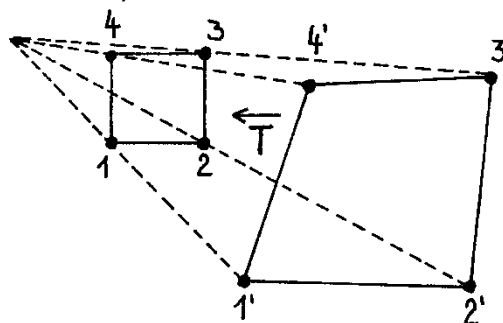
(linear gebrochene Form)

$$a_0 + a_1 \cdot \xi + a_2 \cdot \eta - x - c_1 \cdot \xi x - c_2 \cdot \eta x = 0$$

$$b_0 + b_1 \cdot \xi + b_2 \cdot \eta - y - c_1 \cdot \xi y - c_2 \cdot \eta y = 0$$

8 Unbekannte

mind. 4 idente Punkte (= Rahmenmarken)



Doppelverhältnis von Streckenabschnitten bleibt erhalten (vgl. Möbius-Netz, Papierstreifenkonstruktion)

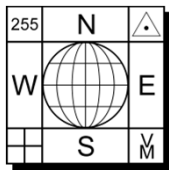
Anmerkung: Obige Formel ist eine Sonderform der photogrammetrischen Abbildungsgleichung und zwar wenn man eine beliebige Objektebene perspektiv in die Bildebene abbildet. Diese projektive Transformation spielt eine wichtige Rolle in der Einbildauswertung (z.B. bei der ebenen Entzerrung).

Alle hier angeführten Koordinatentransformationen sind linear und daher direkt lösbar. Sind mehr idente Punkte (= Rahmenmarken) gegeben als für die Berechnung der Transformationsparameter notwendig sind, erfolgt die Ermittlung derselben (= Unbekannten) durch eine **Kleinste-Quadrate-Ausgleichung** nach vermittelnden Beobachtungen. D.h., die Transformationsparameter werden so bestimmt, dass die Quadratsumme der Restklaffen in den identen Transformationpunkten ein Minimum wird (= **Gauß'sches Minimumsprinzip**).

Am häufigsten wird bei der Wiederherstellung der inneren Orientierung die **Affintransformation** gewählt, denn sie sorgt für

- Kompensation des konformen und affinen Anteils der Filmdeformation (= Filmschrumpfung, Filmverzug),
- Kompensation etwaiger Maßstabs- und Orthogonalitätsfehler des Komparators (besonders wichtig bei digitalisierten Bildern, da die meisten photogrammetrischen Scanner nicht „geometrisch“ perfekt sind).

Die projektive Transformation ist besonders dann anzuwenden, wenn die Bildvorlage durch eine oder mehrere optische Umbildungen entstanden ist, etwa bei Vergrößerungen auf Photopapier.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

Korrektur der Verzeichnung

Nach der Überführung der gemessenen Bildkoordinaten in das xy-Koordinatensystem der Messkamera, also in das Koordinatensystem des Kalibrierungsprotokolls, definieren die transformierten Punkte zusammen mit den Koordinaten x_0 und y_0 und der Kammerkonstanten c das *räumliche Strahlenbündel* der photogrammetrischen Aufnahme.

In weiterer Folge sind die Abweichungen von der idealen zentralperspektiven Abbildung zu berücksichtigen.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 + \Delta x \\ y - y_0 + \Delta y \\ -c \end{pmatrix}$$

Die **Objektivverzeichnung** wird rechnerisch durch kleine Korrekturwerte kompensiert.

Die Verzeichnung wird im Kalibrierungsprotokoll der Messkamera (vgl. Abschnitt 3.2.5) mitgeteilt.

2 Möglichkeiten der Darstellung:

- Radial-symmetrische Verzeichnung in Tabellenform $f(r)$,
- Radial-symmetrische und tangentiale Verzeichnung durch Koeffizienten K_1, K_2, K_3 bzw. P_1 und P_2 .

In der Luftbildmessung beschränkt man sich auf die **mittlere radiale Verzeichnung**.
(asymmetrische Verzeichnung und Tangentialverzeichnung werden nicht berücksichtigt!)

Praktische Durchführung:

- (1) Berechnung des Radialabstandes r (= Abstand von P von H) $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$

Anmerkung: Ist im Kalibrierungsprotokoll der Symmetriehauptpunkt (PPS) gegeben, so ist der Ursprung der Verzeichnungskurve nicht der Autokollimationshauptpunkt (PPA) sondern der PPS. Da PPA und PPS sich nur um einige μm voneinander lagemäßig unterscheiden, spielt es keine Rolle, ob man PPA oder PPS bzw. U als Ursprung der Verzeichnungskurve wählt. Als Hauptpunkt H ist stets der PPA zu nehmen!

- (2) Entnahme der radialen Verzeichnung Δr an der Stelle r durch (lineare) Interpolation.

- (3) Aufspalten der radialen Verzeichnung Δr in die Zuschläge Δx und Δy für die Bildkoordinaten x und y .

$$\Delta x = -\frac{x - x_0}{r} \cdot \Delta r \quad (\text{neg. Vorzeichen wegen Definition, vgl. Abschnitt 3.1.2.1})$$

$$\Delta y = -\frac{y - y_0}{r} \cdot \Delta r$$

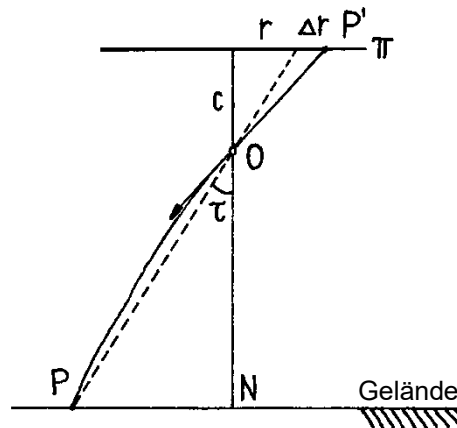


4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

Korrektur der atmosphärischen Refraktion

Für höchste Genauigkeitsansprüche muss man die Bildkoordinaten auch noch vom atmosphärischen Refraktions-Einfluss befreien.



Zufolge der Refraktion werden die Bildpunkte radial nach außen versetzt (= Abbildungsfehler). Die atmosphärische Refraktion entspricht für eine Senkrechtaufnahme einer radialsymmetrischen Verzeichnung.

Im Bildbereich kann der gekrümmte Lichtstrahl durch die Tangente an die Lichtkurve im Projektionszentrum O ersetzt werden.

Bildmaßstab	c (mm)	Z ₀ (km)	Korrektur Δr (μm)	
			r = 90	r = 130 mm
1:10000	300	3.5	3	5
	150	2.0	2	4
	85	1.3	2	5
1:30000	300	9.5	8	12
	150	5.0	6	11
	85	3.0	6	13
1:100000	85	9.0	15	34
1:800000	300	240	1	2

Anmerkung: **Satellitenaufnahmen** sind durch Refraktion nicht beeinträchtigt. Die Korrektur zufolge atmosphärischer Refraktion kann bei kleinen Bildmaßstäben – vor allem bei Überweitwinkelaufnahmen – mehr als 10 μm in den Bildecken betragen und muss daher rechnerisch berücksichtigt werden.

Korrektur der Bildkoordinaten wegen atmosphärischer Refraktion.
(Geländehöhe Z = 0.5 km)



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung



Berücksichtigung der Erdkrümmung

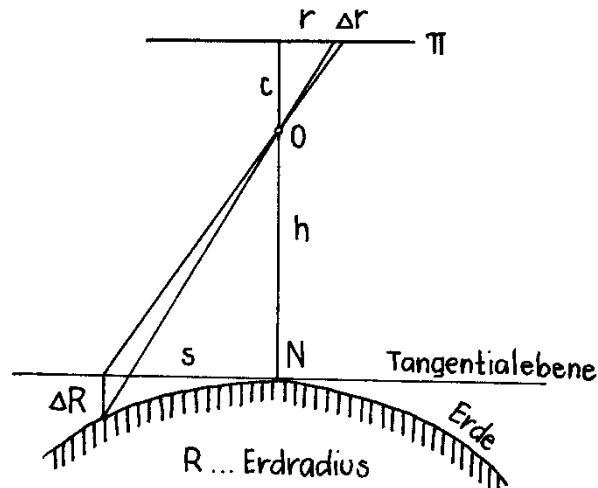
Die Erdkrümmung ist kein „Fehler der Photogrammetrie“, sondern ein Definitionsproblem der Koordinatensysteme. Die Photogrammetrie liefert Koordinaten in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem. Die Geländehöhen (in Österreich *orthometrische Höhen = Gebrauchshöhen*) der Landesvermessung beziehen sich auf das Geoid bzw. näherungsweise auf das Erdellipsoid (in Österreich *Bessel-Ellipsoid*) und die XY-Koordinaten der Landesvermessung sind durch die mathematische Verebnung des Erdellipsoides mehr oder weniger stark verzerrt. Das Landessystem stellt kein kartesisches Koordinatensystem dar. Theoretisch müssen die jeweiligen Koordinaten Y_L, X_L, Z_L der Landesvermessung in entsprechende 3D kartesische Koordinaten umgerechnet werden, um sie in der Photogrammetrie zu verwenden. Glücklicherweise weichen die Koordinatensysteme der Landesvermessung nur geringfügig von einem solchen 3D kartesischen Koordinatensystem ab.

Lage: Die Gauß-Krüger-Koordinaten (Y_L, X_L) können ohne wesentliche Genauigkeitsverluste als 2D kartesische Koordinaten (X, Y) in die photogrammetrische Auswertung übernommen werden.

Höhe: Die Höhen Z_L der Landesvermessung beziehen sich näherungsweise auf eine Kugel mit dem Radius R und nicht auf eine Ebene.

Das Phänomen der **Erkrümmung** muss in der Photogrammetrie entsprechend berücksichtigt werden, will man nicht die strengen Koordinatentransformationen durchführen.

Die Erdkrümmung wird am besten als „Bildfehler“ interpretiert. Die Bildpunkte werden radial um Δr nach innen versetzt. Es werden genäherte Senkrechtaufnahmen vorausgesetzt.



$$\Delta R \approx \frac{S^2}{2R} \dots \text{Tangentialabrückung zufolge Erkrümmung}$$

$$\Delta r = \frac{h \cdot r^3}{2 \cdot R \cdot c^2} \dots \text{radiale Bildpunktversetzung, wobei}$$

Δr in μm
 r, c in mm
 R in km
 h in m

In der bereitgestellten Näherungsformel sind Geländehöhenunterschiede vernachlässigt. Geländehöhenunterschiede ungleich Null verursachen zusätzliche Projektionsfehler.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

Berücksichtigung der Erdkrümmung cont.

Bildmaßstab (in Bildmitte)	$Z'_{L,0}$ (km)	c (mm)	$Z'_L = 0$	$Z'_L = -0.5$ km	$Z'_L = -1.0$ km
1:5 000	1.5	300	3	14	25 μm
	0.8	150	5	20	34 μm
	0.4	85	10	32	54 μm
1:10 000	3.0	300	6	17	28 μm
	1.5	150	11	25	40 μm
	0.8	85	19	41	63 μm
1:30 000	9.0	300	17	28	40 μm
	4.5	150	34	48	62 μm
	2.6	85	62	84	106 μm
1:100 000	8.5	85	202	225	247 μm
1:800 000	240	300	460	471	482 μm

Radiale Korrekturen Δr im Bild (μm) für unterschiedliche Bildmaßstäbe, Kammerkonstanten c und Geländehöhenunterschiede Z' ($r = 130$ mm, $R = 6380$ km).

Das Ansteigen der Werte Δr in den Spalten $\Delta h = -0.5$ km und $\Delta h = -1.0$ km ist – zumindest für **gebirgiges Gelände** – alarmierend.

Abhilfe durch:

- strengere Korrekturformeln,
- Umrechnung in ein 3D kartesisches Koordinatensystem – dies ist bei Satellitenbildern nahezu unerlässlich.



4.1 Wiederherstellen der inneren Orientierung

4.1.3 Bildkoordinatenbereinigung

Anmerkung: **Direkte Georeferenzierung** von Luftbildern in konformen Kartenabbildungen

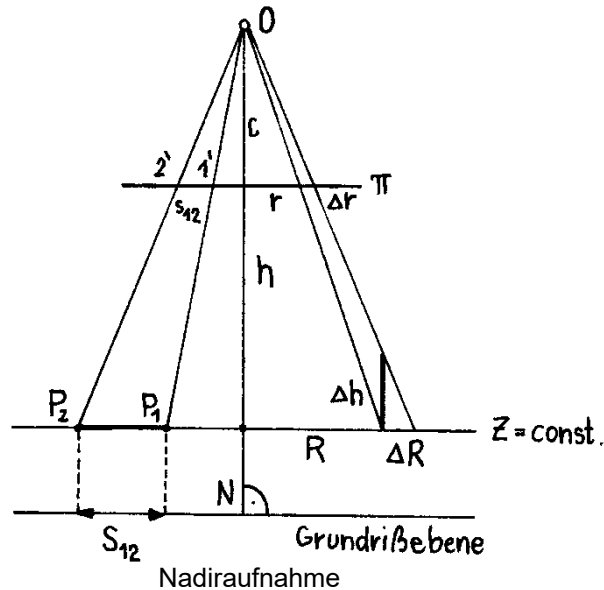
Wenn eine Aerotriangulation (nach der Bündelblockmethode) im System der Landesvermessung durchgeführt wird, müssen die Erdkrümmung (P1), der Unterschied zwischen Lage- und Höhenmaßstab (P2) und die Änderung des Lagemaßstabes im Projektgebiet (P3) berücksichtigt werden. Problem P1 kann sehr gut durch die vorhin beschriebene Erdkrümmungskorrektur gelöst werden. Während der Einfluss von P2 und P3 bei der konventionellen Aerotriangulation über Pass- und Verknüpfungspunkte (sog. Indirekte Georeferenzierung) in Lage und Höhe unwesentlich ist, kann er bei der direkten Georeferenzierung (über GPS/INS) in der Höhe nicht vernachlässigt werden. Die Lösung des Höhenproblems bei der direkten Georeferenzierung im Landeskoordinatensystem kann man sich auf 3 Arten vorstellen:

- Übergang zur Berechnung in einem Tangentialsystem
- Korrektur der Ellipsoidhöhen
- Korrektur der laborkalibrierten Kamerakonstanten

(Details vgl. LV Bildmessung)



4.2 Geometrische Auswertung der strengen Senkrechtaufnahme



$$s_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad \dots \quad \text{Strecke im Bild}$$

$$S_{12} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad \dots \quad \text{Strecke im Objektraum}$$

$$M_b = 1 : m_b = \frac{c}{h} = \frac{s_{12}}{S_{12}} = \frac{1}{\lambda}$$

- M_b ... Bildmaßstab
- m_b ... Maßstabszahl
- h ... Flughöhe über Grund

Spezialfall: Die Bildebene ist parallel zur Objektebene, d.h. $\varphi = \omega = 0$.

In diesem Fall ist die Geometrie des **photographischen Bildes** gleich einer **Karte**.
 \Rightarrow Der skalare Streckungsfaktor λ (vgl. Abschnitt 2.3.2) ist ortsunabhängig und konstant.

Aufnahmen unebenen Geländes ($Z \neq \text{const.}$) haben keinen einheitlichen Maßstab.
 Dies gilt auch für nicht senkrechte Aufnahmen bei $Z = \text{const.}$ Der Streckungsfaktor λ ist ortsabhängig.
 Punkte, welche nicht in einer Horizontalebene $Z = \text{const.}$ liegen, werden bei einer Senkrechtaufnahme um den Betrag Δr nach außen versetzt abgebildet:

$$\frac{\Delta h}{\Delta R} = \frac{h}{R} \Rightarrow \Delta R = \frac{R}{h} \cdot \Delta h \quad ; \quad r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

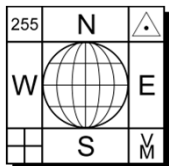
$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta r = \frac{r \cdot R}{R \cdot h} \cdot \Delta h = \frac{r}{h} \cdot \Delta h$$

Berechnung von Objekthöhen (z.B. eines Telegraphenmastes) ist möglich:

Anmerkung: Die Berechnung versagt im Nadirpunkt bzw. wird im Nahbereich von N (kleiner Blickwinkel) numerisch ungenau.

Aus $M_b = c/h = \text{const.}$ folgt, dass ein gleiches Bild mit unterschiedlichen Brennweiten gewonnen werden kann ($h = c/M_b$).

Mit anderen Worten: Ist die Aufnahmeentfernung (= Flughöhe) unbekannt, kann nicht auf die verwendete Brennweite zurückgeschlossen werden!



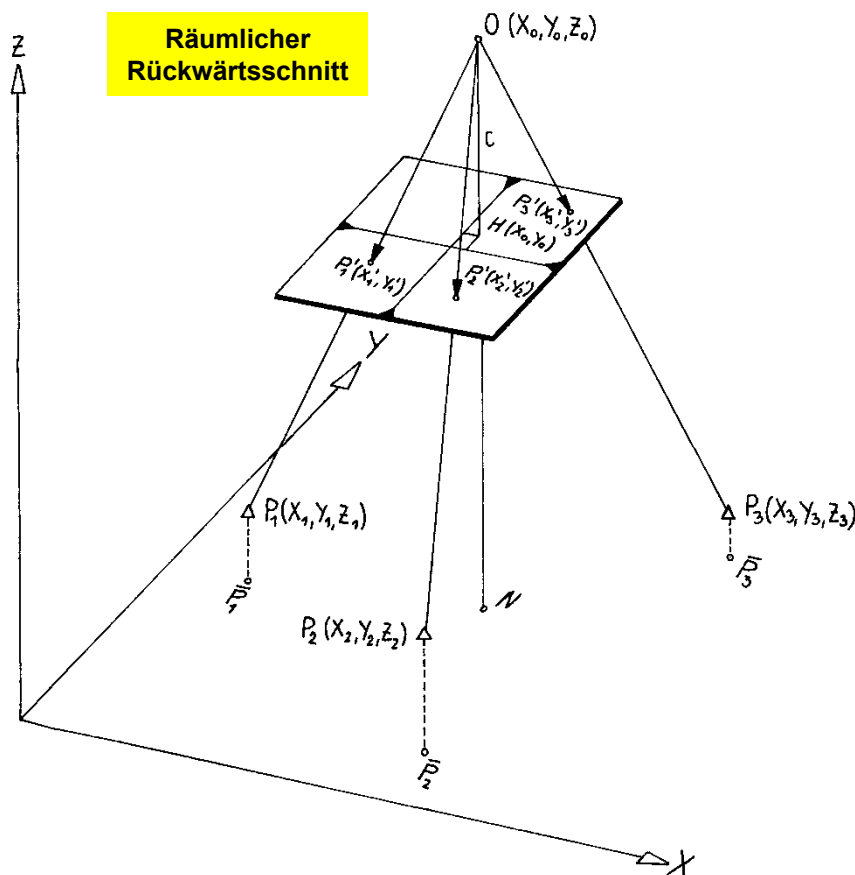
4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Unter Orientierung eines Einzelbildes wird die Ermittlung der äußeren Orientierung verstanden.

Die verbreiteten Rechenverfahren können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

1. Berechnung der äußeren Orientierung auf Basis des Strahlenbündels (RRWS)
2. Berechnung der äußeren Orientierung mit Hilfe projektiver Beziehungen (DLT).



Die Aufgabe besteht darin, aus Bildkoordinaten von mindestens drei oder mehreren gegebenen Passpunkten die äußere Orientierung (\mathbf{R}, \mathbf{X}_0) des Messbildes zu finden.

Die Bildkoordinaten sind von Abbildungsfehlern (z.B. Objektivverzeichnung) bereinigt.



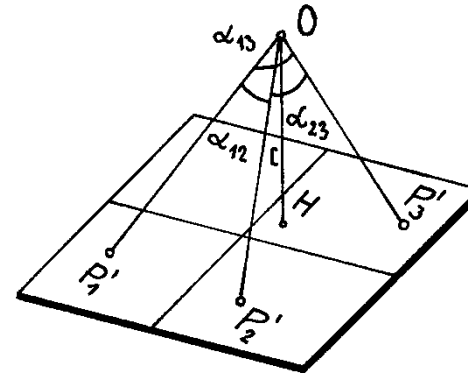
4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Berechnung aus Winkeln (Winkelmethode)

Diese Methode verwendet nur 3 Passpunkte.

Die Winkel α_{ik} sind hier allerdings aus Bildkoordinaten abgeleitete Größen, die aus dem skalaren Produkt je zweier Bildpunktvektoren zu erhalten sind.



$$\cos \alpha_{ik} = \frac{\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_k}{|\mathbf{x}_i| \cdot |\mathbf{x}_k|}$$

Der Punkt O ist nun geometrisch durch den Schnitt der drei Ortsflächen $\alpha_{ik} = \text{const.}$ über (P_i, P_k) zu erhalten. Da der geometrische Ort eines konstanten Winkels in einer Ebene der Peripheriekreis ist und die Ebene um die Achse $P_i - P_k$ gedreht werden kann, entsteht je ein **Torus**, so dass O einer der Schnittpunkte zwischen den drei Toren ist. (Anmerkung: Bei 3 Paßpunkten sind mehrere Lösungen möglich!) Die Gleichung für $\cos \alpha_{ik}$ zeigt, dass der Torus eine Fläche 4. Ordnung und daher eine geschlossene Lösung des Schnittes dreier Flächen nicht möglich ist. Es muß somit auch in diesem Fall ein Näherungsverfahren angewendet werden, aber mit dem Vorteil, dass vorerst nur 3 Unbekannte für \mathbf{X}_0 zu ermitteln sind, während die restlichen drei für \mathbf{R} getrennt davon anfallen.

Das Verfahren führt zur strengen Lösung und kann immer nur mit drei Passpunkten gerechnet werden. Rechenablauf siehe Literaturquellen.

Das dargestellte Verfahren eignet sich für die Berechnung von Näherungswerten (\mathbf{X}_0) und (\mathbf{R}) für **stark verschwenkte Messbilder**, welche in der Strahlenbündelmethode benötigt werden.

Näherungswerte für genäherte Senkrechtaufnahmen können jedoch über andere Berechnungsmethoden (siehe folgende Seiten) leichter bestimmt werden.



4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Berechnung mit Strahlenbündeln (Bündelmethode) = Sonderfall der Bündeltriangulation (n=1)

Es wird vorausgesetzt, dass die innere Orientierung bekannt ist.

Wir gehen von den bekannten Abbildungsgleichungen aus, welche die *Kollinearitätsbedingung* – Projektionszentrum, Bildpunkt und Objektpunkt müssen auf einer Geraden liegen – analytisch beschreiben (vgl. Abschnitt 2.3.2).

$$x = x_0 - c \frac{i \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}$$

$$y = y_0 - c \frac{j \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}$$

Für jeden Passpunkt können
2 Abbildungsgleichungen
angeschrieben werden.

Diese Gleichungen kann man allgemein als funktionales Modell auch so anschreiben:

x	=	$f(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa;$	$c, x_0;$	$X, Y, Z)$
y	=	$g(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa;$	$c, y_0;$	$X, Y, Z)$
gemessen		Unbekannte	bekannt	bekannt

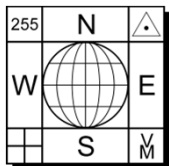
Da 6 Unbekannte zu berechnen sind, müssen mindestens **3 Passpunkte** gemessen werden.

Da die Unbekannten in nicht linearer Form (transzendente Funktionen in ω , φ und κ) bzw. in linear gebrochener Form (X_0, Y_0, Z_0) vorkommen, muss das System durch eine **Taylor-Entwicklung** an Näherungswerten der Unbekannten linearisiert werden (vgl. Abschnitt 2.3.4).

Die gemessenen Bildkoordinaten sind mit Messfehlern behaftet.

(\mathbf{X}_0) , (\mathbf{R}) ... Näherungswerte

Jeder gemessene Bildpunkt liefert zwei linearisierte **Verbesserungsgleichungen**:

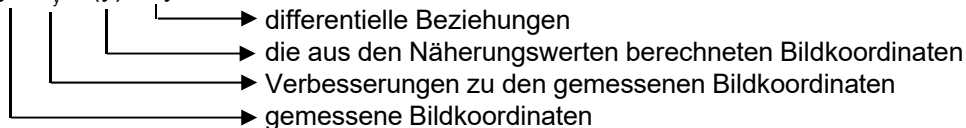


4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

$$x + v_x = (x) + dx$$

$$y + v_y = (y) + dy$$



$$dx = a_1 \cdot dX_0 + a_2 \cdot dY_0 + a_3 \cdot dZ_0 + a_4 \cdot d\omega + a_5 \cdot d\varphi + a_6 \cdot d\kappa$$

$$dy = b_1 \cdot dX_0 + b_2 \cdot dY_0 + b_3 \cdot dZ_0 + b_4 \cdot d\omega + b_5 \cdot d\varphi + b_6 \cdot d\kappa$$

$a_i, b_i \dots$ Differentialquotienten (an den Näherungswerten berechnet)

Bei mehr als 3 Passpunkten liegt ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem vor, das durch **Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen** gelöst wird.

$$x - (x) + v_x = dx$$

$$y - (y) + v_y = dy$$

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dt}$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{i6} \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{i6} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{dt} = (dX_0, dY_0, dZ_0, d\omega, d\varphi, d\kappa)^T$$

$$\mathbf{l}_i = (x_i - (x_i), y_i - (y_i))^T$$

Gauß'sche Minimumsprinzip: $\sum v_i^2 = \text{Minimum}$

$$\mathbf{dt} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l}$$

Als Ergebnis erhalten wir Zuschläge zu den Näherungswerten und somit neue, verbesserte Lösungen der Unbekannten:

$$\mathbf{X}_0'' = (\mathbf{X}_0') + d\mathbf{X}_0$$

$$\mathbf{R}'' = d\mathbf{R} \cdot (\mathbf{R}') \quad \text{bzw.} \quad \omega'' = (\omega') + d\omega, \quad \varphi'' = (\varphi') + d\varphi, \quad \kappa'' = (\kappa') + d\kappa.$$



4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Der Berechnungsvorgang läuft nun **iterativ** (Hochindex entspricht Iterationsstufe), da die Näherungen meist nicht für den linearen Ansatz genügen.

Abbruch erfolgt dann, wenn $d\mathbf{X}_0$ und $d\mathbf{R}$ unter einer vorgegebenen Rechenschärfe bleiben (mit anderen Worten: die Zuschläge werden von Iterationsstufe zu Iterationsstufe immer kleiner) oder eine gewisse Anzahl von Iterationen überschritten wurde.

$$\text{Fehlerrechnung: } m_0 = \pm \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{v}}{n-6}} \quad \dots \text{ mittlerer Gewichtseinheitsfehler (= } \sigma_0 \text{)}$$

Redundanz (= mittlerer Fehler einer Beobachtung mit dem Gewicht 1)

$$m_{dt} = \pm m_0 \sqrt{\mathbf{Q}_{dt,dt}} \quad \dots \text{ mittlerer Fehler der Unbekannten}$$

Durchgreifende Kontrolle :

$$\sum v_x = 0$$

$$\sum v_y = 0$$

$$x + v_x = x_0 - c \frac{\mathbf{i} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}$$

$$y + v_y = y_0 - c \frac{\mathbf{j} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}$$

- Für die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes sind gute Näherungswerte notwendig!



4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

→ Ermittlung von Näherungswerten (\mathbf{R}) und (\mathbf{X}_0) für genäherte Senkrechtaufnahmen:

Wenn ω und φ nur kleine Beträge ($< 5^\circ$) aufweisen, dann kann von den einfachen Beziehungen der Senkrechtaufnahme ausgegangen werden.

$$\left. \begin{array}{l} \omega = d\omega \approx 0 \\ \varphi = d\varphi \approx 0 \end{array} \right\} \Rightarrow (\omega) = (\varphi) = 0$$

κ kann beliebig sein, jedoch bei Spezialfällen gilt:

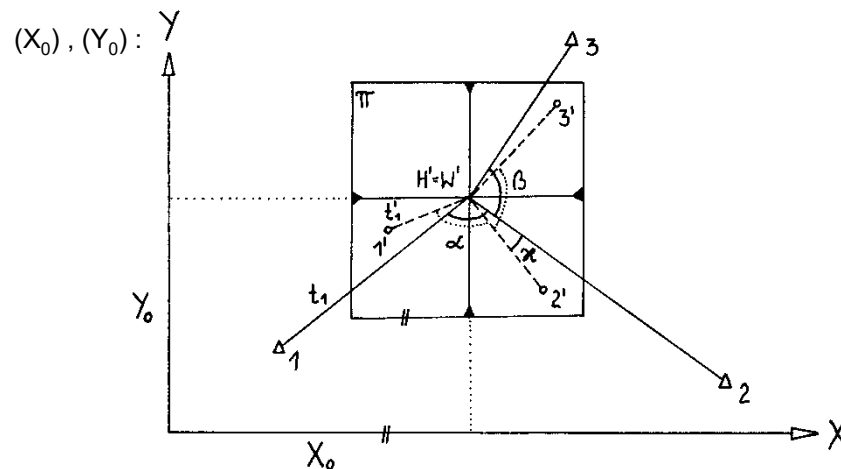
WE-Befliegung: (κ) = 0°

EW-Befliegung: (κ) = 180° (200°)

SN-Befliegung: (κ) = 90° (100°)

NS-Befliegung: (κ) = 270° (300°) bzw. -90° (-100°)

Bei der Senkrechtaufnahme wird der winkeltreue Punkt mit dem Hauptpunkt gleichgesetzt, so dass das **Strahlenbündel** von H zu den Passpunktabbildungen P' *konform* (= *winkeltreu*) mit den im Gelände gemessenen Richtungen ist. Damit folgt der Grundriss des Hauptpunktes aus einem **ebenen Rückwärtsschnitt** (aus Richtungen oder Winkeln $\gamma_{ik} = t_k - t_i$).



(κ) : Die Verkantung folgt aus der Differenz der Richtungen

$$t_i = \arctan \frac{Y_i - Y_0}{X_i - X_0},$$

$$t_i' = \arctan \frac{y_i}{x_i},$$

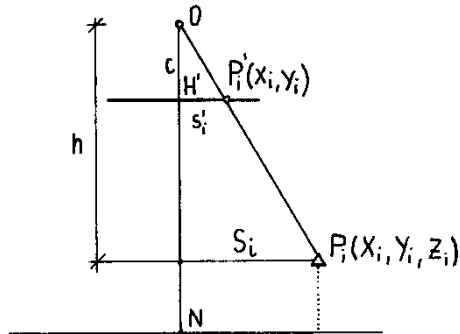
$$(\kappa) = t_i - t_i'$$



4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

(Z_0) :



$$(Z_0) = Z_i + \frac{S_i}{s'_i} \cdot c$$

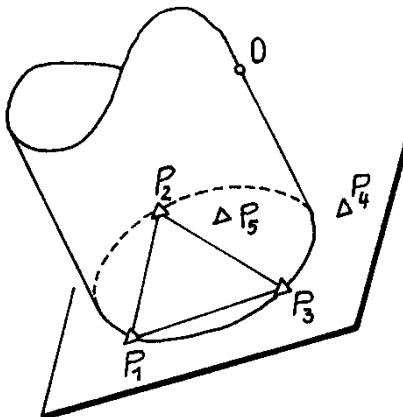
$$\frac{c}{h} = \frac{s'_i}{S_i} \Rightarrow h = c \cdot \frac{S_i}{s'_i} \quad (\text{ähnliche Dreiecke})$$

Die Werte (X_0) , (Y_0) und (κ) können jedoch auch aus den Bildmittenübersichten mit hinreichender Genauigkeit gut abgeschätzt werden, sofern eine Koordinatenreferenz (durch Hektarmarken) gegeben ist. (Anmerkung: Beim BEV sind die Bildmitten auf Blättern der ÖK 50 bzw. ÖK 25V eingetragen.)

Näherungswerte für die Elemente der äußeren Orientierung können aber auch aus GPS/INS-Daten – sofern vorhanden – gewonnen werden.

Der kritische Ort

Der räumliche Rückwärtsschnitt versagt bei folgender Konfiguration:



Kreiszyylinder normal auf das Passpunktdreieck,
Grundkreis geht durch die Passpunkte,
O liegt auf einer Erzeugenden.

In diesem Fall gibt es unendlich viele Lösungen.

Abhilfe: Mehr als 3 Passpunkte verwenden!



4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Anmerkungen:

Rückwärtsschnitt bei unbekannter innerer Orientierung →

Liegt die Aufnahme einer Kamera vor, deren Parameter der inneren Orientierung unbekannt sind, erhöht sich die Anzahl der zu bestimmenden Parameter um zunächst 3 (c, x_0, y_0) auf insgesamt 9 Bestimmungselemente (ohne Verzeichnungsparameter). Es werden also mindestens 2 Passpunkte (mit 4 Beobachtungsgleichungen der Bildkoordinaten) zusätzlich benötigt (insgesamt mindestens 5).

Liegen sämtliche Passpunkte näherungsweise in einer Ebene (d.h., das Gelände ist nahezu eben), wird das Normalgleichungssystem des Rückwärtsschnittes singulär, da das Problem bereits durch eine Projektivtransformation zwischen Bild- und Objektebene mit nur 8 Parametern gelöst werden kann ($M_b = c/h$; Z_0 ist von c linear abhängig). Wird eine Bestimmungsgröße (z.B. die Kammerkonstante) auf einen beliebigen Wert gesetzt, kann jedoch eine eindeutige Lösung gerechnet werden.

Bei ausreichender räumlicher Verteilung der Objektpunkte lassen sich mit dem Verfahren des räumlichen Rückwärtsschnittes auch die Parameter der inneren Orientierung (c, x_0, y_0) mit Verzeichnung aus nur einem Bild kalibrieren. Werden für die radial-symmetrische Verzeichnung zwei Parameter K_1 und K_2 eingeführt, erhöht sich die Zahl der Bestimmungselemente auf insgesamt 11 (6 der äußeren und 5 der inneren Orientierung). Es sind in diesem Fall also mindestens 6 räumlich verteilte XYZ-Passpunkte erforderlich.



4.3 Orientierung der genäherten Senkrechtaufnahme

4.3.2 Direkte Lineare Transformation (DLT)

Mit dem Ansatz der **Direkten Linearen Transformation (DLT)** gelingt es, die Orientierungselemente eines Bildes (auch für den Allgemeinflfall) ohne Näherungswerte in einem **linearen Gleichungssystem** zu bestimmen (= Linearisierung durch Überbestimmung). Das Verfahren basiert auf den photogrammetrischen Abbildungsgleichungen (= Kollinearitätsgleichungen), die um eine Affintransformation der Bildkoordinaten erweitert wurden.

Es benötigt keine Informationen über ein kamerafestes Bildkoordinatensystem.

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 - c \frac{i \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)} \\
 y &= y_0 - c \frac{j \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \left.
 \begin{aligned}
 x &= \frac{L_1 \cdot X + L_2 \cdot Y + L_3 \cdot Z + L_4}{L_9 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1} \\
 y &= \frac{L_5 \cdot X + L_6 \cdot Y + L_7 \cdot Z + L_8}{L_9 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1}
 \end{aligned}
 \right\} \text{Transformationsgleichungen für die DLT}$$

x, y ... gemessenen Komparator- oder auch Bildkoordinaten
 X, Y, Z ... 3D-Koordinaten der Passpunkte

Die Koeffizienten L_1 bis L_{11} sind die zu bestimmenden DLT-Parameter, aus denen die Parameter der inneren (3) und äußeren Orientierung (6) abgebildet werden können.

Die beiden übriggebliebenen Bestimmungselemente sind Scherung und Maßstabsfaktor einer Affintransformation.

Durch Umstellung ergibt sich folgendes lineares System:

$$\begin{aligned}
 L_1 \cdot X + L_2 \cdot Y + L_3 \cdot Z + L_4 - x \cdot L_9 \cdot X + x \cdot L_{10} \cdot Y + x \cdot L_{11} \cdot Z - x &= 0 \\
 L_5 \cdot X + L_6 \cdot Y + L_7 \cdot Z + L_8 - y \cdot L_9 \cdot X + y \cdot L_{10} \cdot Y + y \cdot L_{11} \cdot Z - y &= 0
 \end{aligned}$$

Es werden keine Näherungswerte benötigt!

Jeder Passpunkt liefert 2 Bestimmungsgleichungen.

Für die Bestimmung der 11 DLT-Parameter sind mindestens 6 Passpunkte (eigentlich $5\frac{1}{2}$) erforderlich.

Die DLT wird meistens zur **Näherungswertberechnung** der äußeren Orientierung im Vorfeld der Bündeltriangulation eingesetzt.

Aus den DLT-Parametern lassen sich die gesuchten Orientierungsgrößen der inneren und äußeren Orientierung berechnen.

Nachteile: - Ist die innere Orientierung bekannt, so ist die DLT überparametrisiert.

- Es kommt zu singulären bzw. schlecht konditionierten Gleichungssystemen, wenn die Passpunkte alle in oder fast in einer Objektebene liegen.
- Oft kann die Mindestanzahl von 6 Passpunkten nicht bereitgestellt werden.



4.4 Geometrische Auswertung der genäherten Senkrechtaufnahme in der Praxis



Aus der Projektionsgleichung

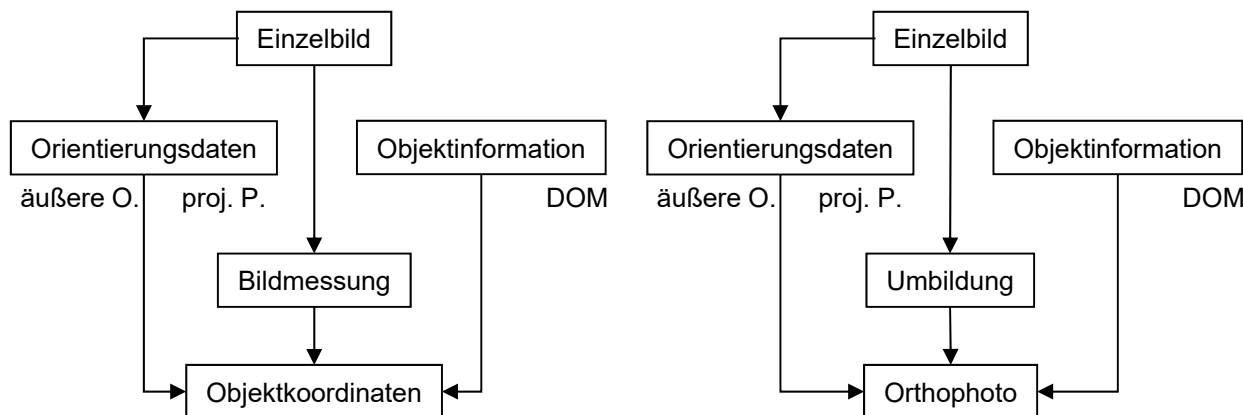
$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{i_1(x - x_0) + j_1(y - y_0) - k_1c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{i_2(x - x_0) + j_2(y - y_0) - k_2c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3c}$$

ersehen wir, daß zur Rekonstruktion eines räumlichen Objektes ein einzelnes Messbild nicht ausreicht. Um eine Lageauswertung der Objektpunkte in der Grundrissebene (= Kartierung in der XY-Koordinatenebene) durchführen zu können, benötigen wir zusätzlich geometrische Objektinformation. Als räumliche Information dient ein **digitales Objektmodell (DOM)**, welches im spezifischen Fall der geodätisch-kartographischen Anwendung ein **digitales Geländemodell (DGM)** ist. Einen Spezialfall stellt die schräge bzw. horizontale **Geländeebene** dar.

- Ergebnisse der Einzelbildauswertung:
- Objektkoordinaten (X,Y,Z)
 - bildhafte Produkte (Orthophotos)
- Aus Orthophotos können wiederum Objektkoordinaten abgeleitet werden.

Die Auswertung kann **analog** bzw. **digital** erfolgen.



analytisch

bildhaft

In weiterer Folge ist zwischen der Auswertung ebenen und unebenen Geländes zu unterscheiden.

Ein-/Einzelbildauswertung



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.1 Analytische Koordinatenbestimmung

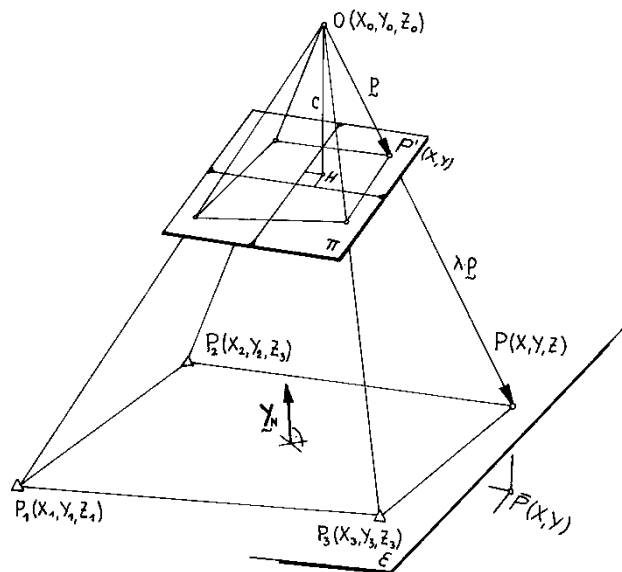
Ebene Entzerrung

Das Objekt bzw. die Geländeoberfläche wird als eben angenommen:

$$Z = a + b \cdot X + c \cdot Y$$

Analytische Koordinatenbestimmung

(a) innere und äußere Orientierung des Messbildes sind bekannt



Schnitt der Geraden

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \lambda \cdot \mathbf{p} \quad ; \quad \mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}$$

mit einer Ebene

$$\mathbf{Y}_n \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_1) = 0$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{\mathbf{Y}_n \cdot (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_1)}{\mathbf{Y}_n \cdot \mathbf{p}}$$

Für eine Grundrissdarstellung ist das Strahlenbündel der Aufnahme mit der Ebene ϵ zu schneiden.

Die Koordinaten X, Y des Schnittpunktes sind dann die Grundrisskoordinaten.

Die einzelnen Punkte seien durch Ortsvektoren vom Ursprung U aus gegeben. Ein Punkt \mathbf{X} in der Ebene ist dann durch die Bedingung der Komplanarität der Vektoren $\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1$, $\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1$ und $\mathbf{X} - \mathbf{X}_1$ definiert, also durch das Raumprodukt

$$|(\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1) \cdot (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_1)| = 0.$$



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.1 Analytische Koordinatenbestimmung

(a) innere und äußere Orientierung des Messbildes sind bekannt cont.

Dies kann bekanntlich auch in der Form

$$|(\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1) \cdot (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_1)| = 0.$$

geschrieben werden, oder mit dem **Normalenvektor** $\mathbf{Y}_n = (\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1) \times (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1)$ kurz $\mathbf{Y}_n \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_1) = 0$.

Der Geländepunkt ist andererseits aus der Aufnahme gemäß $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \lambda \cdot \mathbf{p}$ zu berechnen (\mathbf{p} im Landessystem!), womit durch Einsetzen von \mathbf{X}

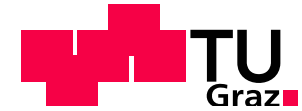
$$\mathbf{Y}_n \cdot (\mathbf{X}_0 - \lambda \cdot \mathbf{p} - \mathbf{X}_1) = \mathbf{Y}_n \cdot (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_1) - \lambda \cdot \mathbf{Y}_n \cdot \mathbf{p} = 0 \quad \text{und daraus mit}$$
$$\lambda = \frac{\mathbf{Y}_n \cdot (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_1)}{\mathbf{Y}_n \cdot \mathbf{p}}$$

der **örtliche Streckungsfaktor** folgt. Diese Formel versagt, wenn $\mathbf{Y}_n \cdot \mathbf{p} = 0$ (Orthogonalität!). Wenn der Wert nahe bei Null liegt, gibt es *schleifende Schnitte*.



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.1 Analytische Koordinatenbestimmung



(a) innere und äußere Orientierung des Messbildes sind unbekannt

Man benötigt mindestens **4** Passpunkte. Aus ihren Bild- und Objektkoordinaten können dann die **8** Parameter der projektiven Transformation

$$X = \frac{a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \quad \begin{array}{l} x, y \dots \text{Bildkoordinaten} \\ X, Y \dots \text{Objektkoordinaten} \end{array}$$
$$Y = \frac{b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y}$$

aus linearen Gleichungen ermittelt und anschließend alle Neupunkte in das Objektsystem transformiert werden (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Dieses numerische Entzerrungsverfahren kann auch graphisch gelöst werden. Siehe nächste Seite.



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.1 Analytische Koordinatenbestimmung



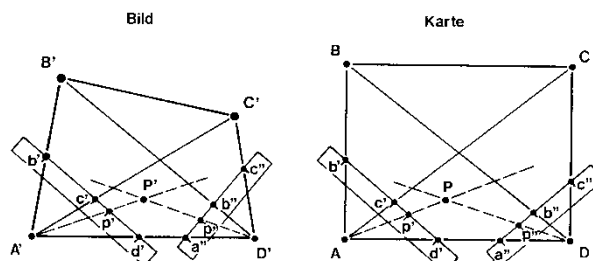
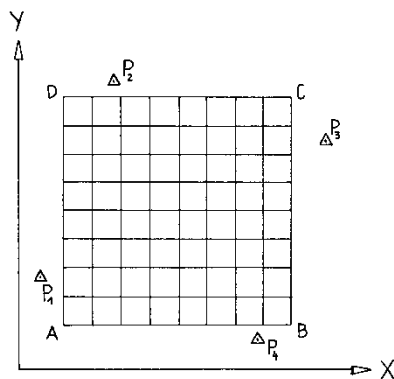
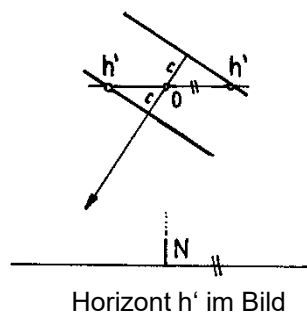
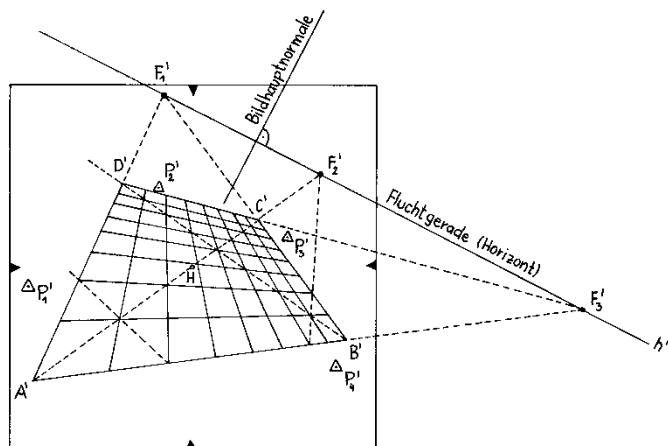
Dabei wird das **Doppelverhältnis** auf zugehörigen Objektgeraden ausgenutzt.

Praktische Durchführung mit Hilfe der **Papierstreifenmethode** (heute keine Bedeutung mehr!).

Eine Vielzahl von Punkten bzw. graphische Elemente (Linien) können mit Hilfe von *projektiven Netzen* mit guter Näherung in die Karte übertragen werden.

Ist das Netz in der Karte quadratisch, so spricht man vom **Möbiusnetz**. (A. F. Möbius, dt. Math., 1790-1868)

Parallele Geraden schneiden sich im Bild im zugeordneten Fluchtunkt. Der geometrische Ort aller Fluchtunkte ist die Fluchtgerade (= **Horizont**).



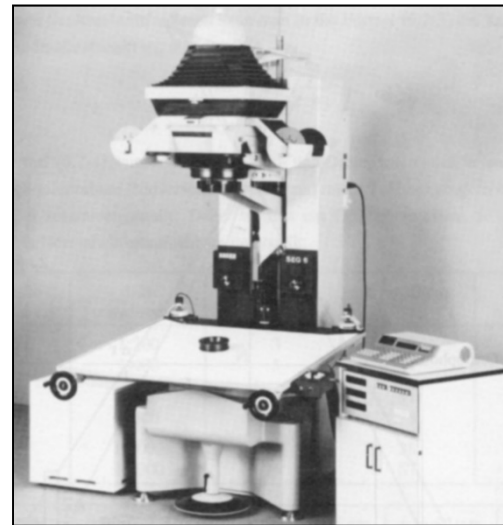
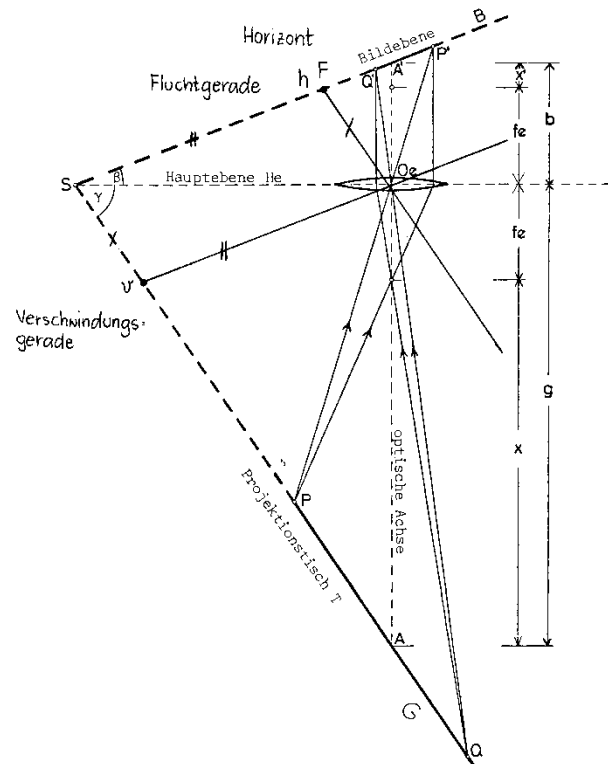
Papierstreifenkonstruktion
(Doppelverhältnis bleibt unverändert)



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.2 Photographische Umbildung

- Optische Bedingung: Scheimpflugbedingung (Scharfabbildung, vgl. Abschnitt 3.1.4.1)
 - Geometrische Bedingung: Drehsatz des Projektionszentrums (= Drehsatz der Kollineation)
- ⇒ unendlich viele Projektivitäten zwischen B und G möglich.



Entzerrungsgerät SEG 6 von Zeiss/Oberkochen (1978).

(erstes Entzerrungsgerät: Photoperspectograph Scheimpflug, Wien, 1903)



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.2 Photographische Umbildung



Da die Gauß'sche Linsengleichung einer projektiven Transformation entspricht, ist es naheliegend, diese optisch durchzuführen. Dabei wird ein Messbild so „**umphotographiert**“, dass das neue Bild der neuen entzerrten Grund- und Aufrissebene entspricht. Da zu diesem Zweck sowohl Bild- als auch Projektionsebene in endlicher (meist geringer) Entfernung vom Projektionsobjektiv angeordnet sind, kann nicht mit Tiefenschärfe operiert werden. Es muss vielmehr die **Scheimpflugbedingung** exakt eingehalten werden und daher auf einem entsprechenden Gerät einstellbar oder besser automatisch steuerbar sein.

Da diese Abbildung nur vom Entzerrungsobjektiv abhängt, ergibt sich Unabhängigkeit von der Aufnahmebildweite. Dies wird gewöhnlich mit dem Drehsatz der Kollineation bewiesen, und zwar im Normalschnitt der beiden Ebenen. Der geometrische Ort aller möglichen Projektionszentren ist ein Kreis um das Bild des Fernpunktes F , da dieser, unabhängig von der Lage der Ebenen zueinander, erhalten bleiben muss. Daraus ergibt sich, dass f_e frei wählbar ist und dass die Fern- bzw. Verschwindungsgerade (parallel zur Scheimpfluggeraden) das generelle Einstellelement für die Entzerrung sein muss.

So ergeben sich für die *optisch-mechanische Entzerrung* folgende Bedingungen:

1. Einhaltung der Linsengleichung,
2. Erfüllung des Drehsatzes,
3. Projektionsebene parallel zur Ebene durch Fluchtgerade und Projektionszentrum.

a) Entzerrung mit Einstelldaten

b) Entzerrung mit Passpunkten und mit Berücksichtigung der inneren Orientierung: 3 Passpunkte notwendig

c) Entzerrung mit Passpunkten und ohne Berücksichtigung der inneren Orientierung: 4 Passpunkte notwendig

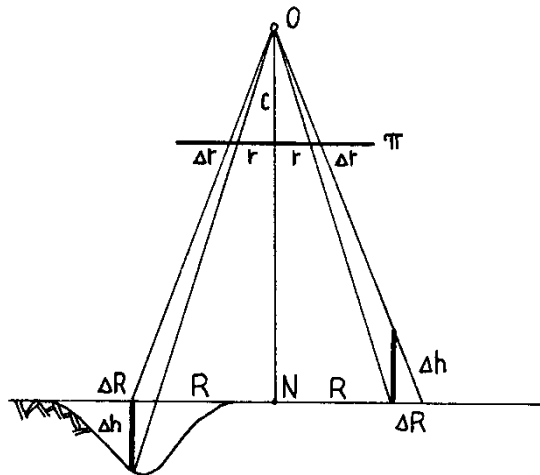


4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

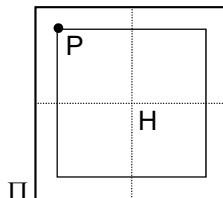
4.4.1.2 Photographische Umbildung

Genauigkeit der perspektiv entzerrten Orthophotos:

Bei der perspektiven Entzerrung werden die Einpass- bzw. Einstellfehler überlagert von Fehlern, die von den Abweichungen der tatsächlichen Objektoberfläche von der angenommenen Bezugsfläche herrühren. Es entsteht die sogenannte **Radialverzerrung**, das ist die wegen Zentralprojektion vom Nadirpunkt aus zu messende radiale Verschiebung der Punkte außerhalb der Ebene gegenüber einer entsprechenden Parallelprojektion. Für den vereinfachten Fall der Senkrechtaufnahme berechnet sich die Radialänderung (= radiale Bildversetzung) der Bildpunkte wie folgt:



Eine Höhenabweichung von 12.7 m von der Bezugsebene bewirkt eine maximale Bildversetzung von 1 mm im Orthophoto 1:10000 (Karteneckbereich).



$$\frac{c}{r} = \frac{\Delta h}{\Delta R}$$

$$\Delta R = \frac{r}{c} \cdot \Delta h$$

$$\Delta r = \frac{r}{h} \cdot \Delta h = \frac{r}{c \cdot m_b} \cdot \Delta h \quad ; \quad \frac{c}{h} = \frac{1}{m_b} = M_b$$

Beispiel: $M_b = 1:30000$ (BEV, Revisionsflug)

$M_k = 1:10000$ (ÖLK)

ÖLK ... 50 cm × 50 cm

$c = 150$ mm (Weitwinkelobjektiv)

$h = 4500$ m (Flughöhe über Grund)

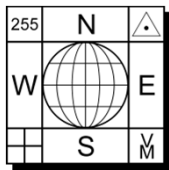
$\Delta R = \tan \tau \cdot \Delta h = \tan 38.2^\circ \cdot \Delta h = 0.786 \cdot \Delta h$

$\Delta r_b = 0.026$ mm [$\Delta h = 1$ m], 0.262 mm [$\Delta h = 10$ m]

$\Delta r_k = 0.079$ mm [$\Delta h = 1$ m], 0.786 mm [$\Delta h = 10$ m]

$\Delta r_b = 1.000$ mm [$\Delta h = 38.2$ m]

$\Delta r_k = 1.000$ mm [$\Delta h = 12.7$ m]



4.4.1 Auswertung ohne Höhenmodell (ebene Entzerrung)

4.4.1.3 Digitale Entzerrung



Die photographische Umbildung (= optisch-mechanische Entzerrung) wird in der Praxis kaum mehr durchgeführt. Die perspektive Entzerrung wird heutzutage völlig **digital** durchgeführt (= **digitale projektive Entzerrung**). In vielen Softwarepaketen, wie z.B. für Architekturvermessung, Unfalldokumentation, etc., ist die perspektive Entzerrung (8-Parameter Transformation) über Passpunkte (mind. 4) als eigenständiges Modul implementiert. Das zu entzerrende Bild muss als Digitalbild vorliegen.

Software-Beispiel: MONOBILD (IDC EDV GmbH, <http://www.geosi.at/>)

Dieselbe Aufgabenstellung kann aber auch über eine sog. Differentialentzerrung gelöst werden (vgl. nächster Abschnitt).

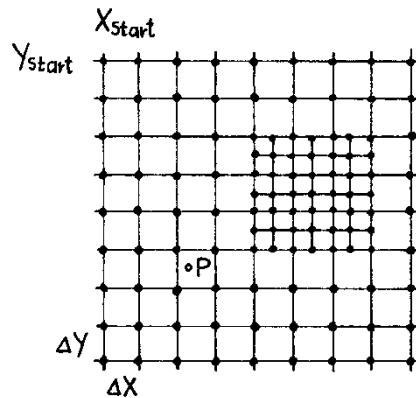


4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

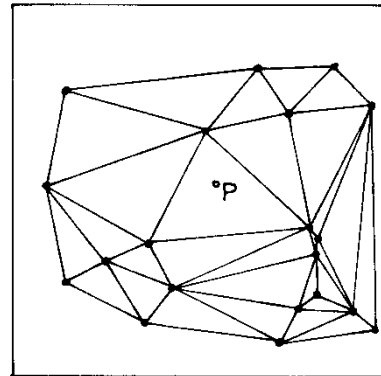
4.4.2.1 Digitales Geländemodell

Für die analytische Berechnung der Grundrisskoordinaten X und Y (vgl. Projektionsgleichung) benötigen wir ein **digitales Geländemodell (DGM)**.

Unter einem digitalen Geländemodell ist ein auf einem Datenträger verspeicherter Punkthaufen mit seinen Raumkoordinaten X, Y, Z (oder h) zu verstehen, der einen Teil der Erdoberfläche möglichst treu wiedergibt (= Bestandteil eines digitalen Oberflächenmodells, DOM).
Die Verspeicherung kann *strukturiert* oder *unstrukturiert* vorgenommen werden.



Rastermodell (Grid)



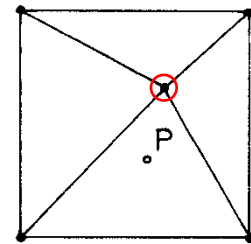
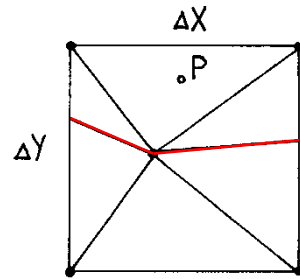
Dreiecksvermaschung (TIN)
TIN ... **T**riangulated **I**rrregular **N**etwork

Unter *strukturierter* Verspeicherung versteht man die Erfassung des Geländes in einem bestimmten Raster. Im allgemeinen ist das ein **Quadrat** raster, der nach runden, ebenen Koordinaten eingeteilt ist und zu dessen Punkten die Höhen bekannt sind. Auch die Strukturierung nach gleichseitigen Dreiecken und nach geographischen Koordinaten kann vorkommen. Da der gleichbleibende Quadrat raster in stark bewegtem Gelände zu starr sein kann, weil er zu wenig Detail erfasst, wird auch eine krümmungsabhängige Verdichtung verwendet (= **progressive Strukturierung; progressive Sampling**). Unstetigkeitsstellen im Gelände (Kanten, Grabenlinien, Spitzen, u.a.) müssen im Raster vermerkt separat gespeichert werden.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.1 Digitales Geländemodell



Rastermasche mit Triangulierung

links: Geländekante in einer Masche
rechts: markanter Punkt in einer Masche

Die Verspeicherung kann bei strukturierten Daten so erfolgen, dass die Grundrisslage einer bestimmten Speicheradresse entspricht, d.h., die Lagekoordinaten belegen keinen Speicherplatz (= Analogie zur digitalen Bildverarbeitung).

Unstrukturierte Verspeicherung bedeutet, dass auch die Lagekoordinaten des Punktes gespeichert sein müssen. Im allgemeinen wird diese Art der DGM-Darstellung dann verwendet, wenn die Geländeoberfläche in **Dreiecksfacetten** aufgelöst ist. Es sollten dann die einzelnen Ebenenstücke zwischen drei Punkten das Gelände bestmöglich approximieren. Unstrukturierte Verspeicherung ist besonders für technische Zwecke (Straßenbau, Industriebau usw.) sowie die Herstellung sehr guter Höhenlinienpläne am günstigsten. Neben den Lagekoordinaten sollten allerdings auch die topologischen Relationen zwischen den Punkten gespeichert sein, um die eindeutige Definition der Teilebenen zu sichern. Sind diese nicht bekannt, muss zwecks widerspruchsfreier Facettenbildung die sog. **Delaunay-Triangulation** vorgenommen werden.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.1 Digitales Geländemodell

Datengewinnung:

Im wesentlichen gibt es drei Arten des Dateneingangs:

1. Terrestrische Messung = tachymetrische Geländeaufnahme. Hier entstehen meist die Dreiecksfacetten, da diese Art der Aufnahme direkt so vorgenommen wird.
2. Vorhandene analoge Darstellungen des Geländes wie topographische Karten oder Schichtenlinienpläne. Diese müssen digitalisiert werden. Entweder durch Abtasten der einzelnen Linien mit einem Cursor oder durch optoelektronische Abtastung mittels Scanner. In beiden Fällen entstehen Binärbilder des Linienvlaufes, aus denen in weiterer Folge das DGM zu berechnen ist.
3. Photogrammetrie (Stereobildauswertung): Höhenlinienauswertung; Abfahren von Profilen im Modell und Registrieren in Rasterdistanzen; punktwises Messen im Rasterschema an analytischen Auswertegeräten, wo die Lage automatisch gesteuert werden kann und nur die Z-Steuerung vom Operator durchgeführt werden muss (= Aufsetzen der Messmarke); automatische Bildzuordnung in der digitalen Photogrammetrie; allgemeine Situationsauswertung (mit anschließender Dreiecksvermaschung).
4. Sonstige Fernerkundungsverfahren wie z.B. Radarinterferometrie und Laserscanning.

Nur die beiden Methoden von Punkt 3, nämlich Profilierung und punktweise Messung, liefern ein strukturiertes DGM. Aus den anderen muss es erst berechnet werden.

Interpolation innerhalb des digitalen Geländemodells

Die Aufgabe besteht darin, für eine beliebige Punktlage P die dazugehörige Geländehöhe aus den umgebenden Höhenwerten zu berechnen.

a) **Rastermodell:**

Innerhalb einer Masche ohne Geländekante und ohne markantem Höhenpunkt wird die (Gelände-) Deckfläche üblicherweise mit einem **hyperbolischen Paraboloid** approximiert:

$$Z = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y + a_3 \cdot XY$$

4 Stützstellen der Quadratmasche \Rightarrow 4 Gleichungen zur Bestimmung der Koeffizienten $a_i \Rightarrow$ Interpolation der Höhe Z für eine beliebige Punktlage innerhalb der Masche (Analogie zur bilinearen Koordinatentransformation und zur bilinearen Grauwertinterpolation).



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.1 Digitales Geländemodell



cont.

b) Dreiecksvermaschung:

Durch die Stützpunkte der betroffenen Dreiecksmasche ist eine **Schrägebene** zu legen. Die Formel lautet:

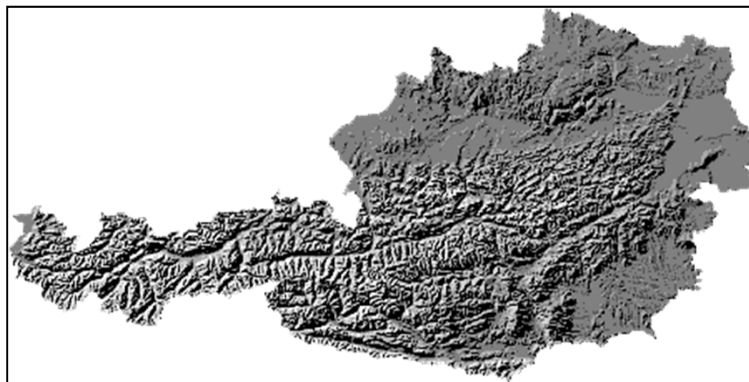
$$Z = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y \quad .$$

3 Stützpunkte des Dreiecks \Rightarrow 3 Gleichungen zur Bestimmung der Koeffizienten $a_i \Rightarrow$ Interpolation der Höhe Z für eine beliebige Punktlage innerhalb der Dreiecksfläche.

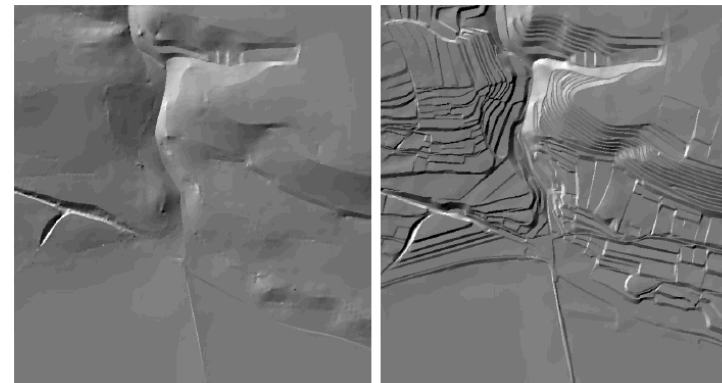
Digitales Geländemodell des BEV:

Von ganz Österreich liegt ein DGM mit einer Rasterweite von 50 (25, 10) m vor. Die erste flächendeckende Erfassung erfolgte aus Schwarzweiß-Bildern mit einem Bildmaßstab von 1:30000. Derzeit erfolgt die Verfeinerung der Geländehöhendaten aus Falschfarbbildern mit einem mittleren Maßstab von 1:15000. Markante Geländestrukturen werden ebenfalls gemessen. Die drei Standardprodukte (interpolierter Raster, Höhenschichtlinien und Strukturinformationen) können käuflich erworben werden.

Vgl. Produktinformation des BEV unter <http://www.bev.gv.at/> (Geobasisdaten, Digitales Geländehöhenmodell).



Digitales Geländehöhenmodell des BEV



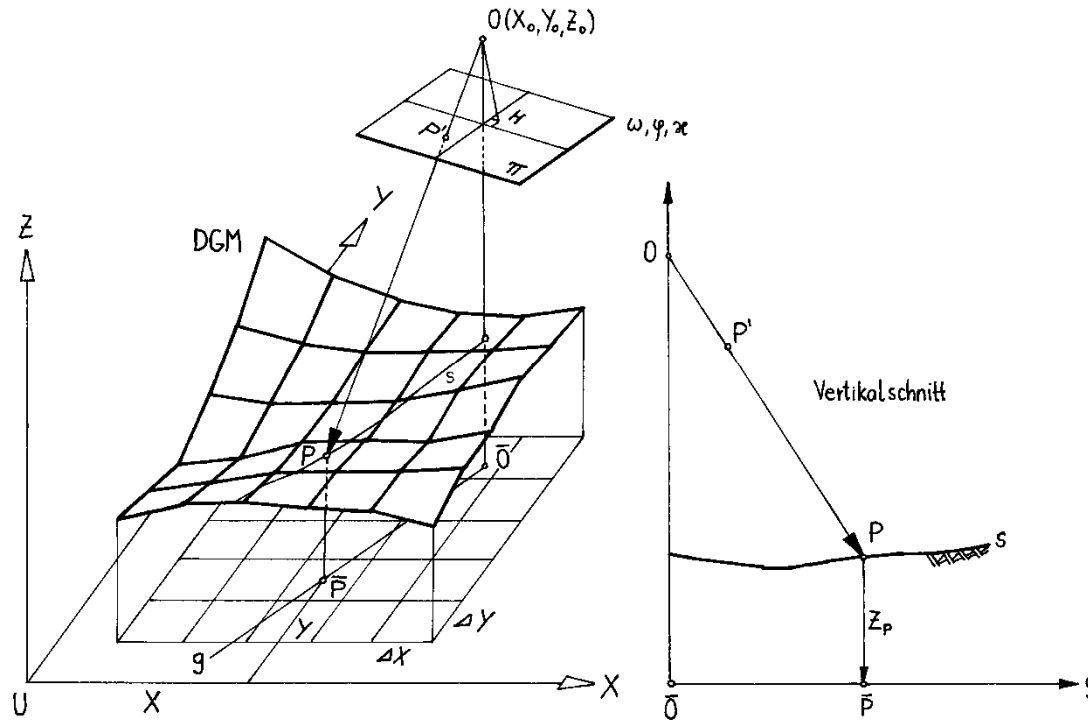
Original-Messdaten

Verdichtetes DGM



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.2 Monoplotting



1. Voraussetzung: Innere und äußere Orientierung des Messbildes sind bekannt.
2. Voraussetzung: Digitales Oberflächenmodell (DOM) ist vorhanden. In unserem Fall wollen wir ein Raster-DGM voraussetzen: die Z-Koordinaten beziehen sich auf einen XY-Quadratraster ($\Delta X = \Delta Y$). Das XY-Quadratraster soll so engmaschig sein, dass innerhalb eines Rasterelementes linear interpoliert werden kann.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.2 Monoplotting



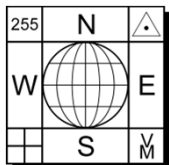
Für eine Grundrissdarstellung ist das Strahlenbündel der Aufnahme mit dem DGM zu schneiden. Die Schnittpunkte P dieses räumlichen Strahlenbündels mit dem DGM ergeben die X , Y und Z -Koordinaten im Objektkoordinatensystem.

Es ist vorerst die richtige Netzmasche für die Schnittberechnung (vgl. Abschnitt 4.4.1.1) zu finden \Rightarrow Schnitt des Projektionsstrahles mit dem *hyperbolischen Paraboloid* als Spezialfall oder einfacher durch lineare Interpolation.

Eine Suchstrategie: O und ein bestimmter Bündelvektor beschreiben eine *Vertikalebene*. Diese Ebene schneidet die XY -Ebene in der Geraden g und das Gelände in der Schnittlinie s . Die einzelnen Stützpunkte von s ergeben sich durch den Schnitt der Vertikalebene mit den Vertikalebenebenen der Rastersäulen, i. Allg. 2 Schnittkanten pro Säule/Masche. Verschnitt des Strahles OP^i mit dem vertikalen Profil s ; das Ergebnis ist die Z -Koordinate des Punktes P . Seine XY -Koordinaten ergeben sich im Grundriss. (Alternative Suchstrategie durch das „Schnecken-Suchverfahren“.)

Monoplotting ist eine Spezialmethode und ist i. Allg. nicht Bestandteil von photogrammetrischer Auswertesoftware. Anwendungen in der terrestrischen Photogrammetrie wie z.B. bei der Schneeflächenkartierung vom Gegenhang.

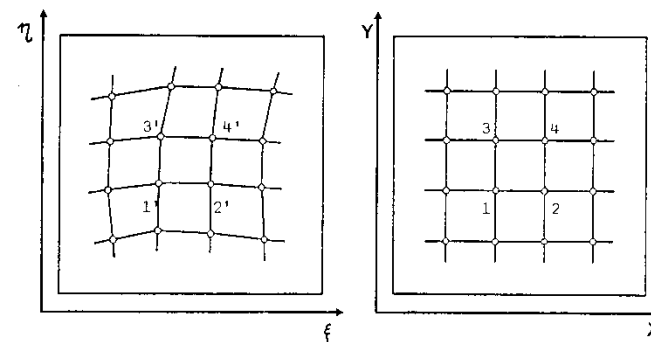
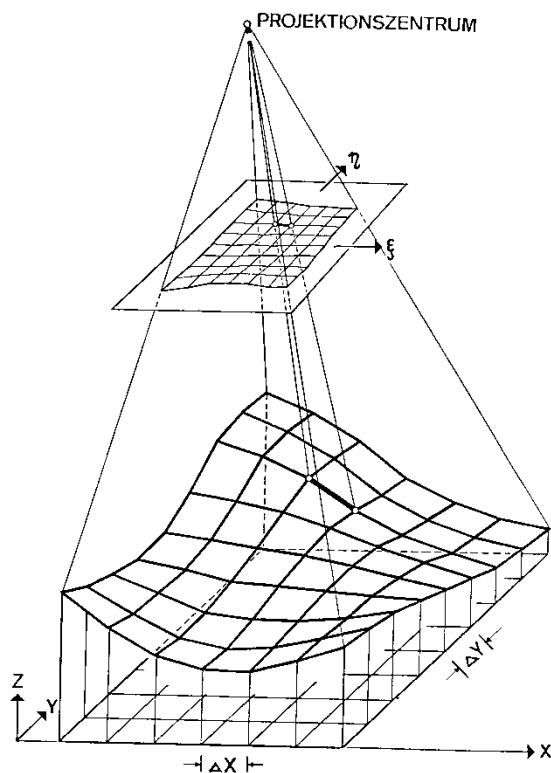
- a) Auswertung analoger Bilder mit Hilfe eines Digitizers oder
- b) Auswertung digitaler Bilder ohne Orthophotoherstellung.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialentzerrung)

4.4.2.3 Photographische Umbildung

Die Herstellung des **analogen Orthophotos** basiert auf der Entzerrung kleiner viereckiger Flächenelemente mit Hilfe prozessgesteuerter photographischer Umbildung.



Raster im Bild (Zentralprojektion) und in der Karte (Orthogonalprojektion).

Zusammenhang des quadratischen Rasters ($\Delta x = \Delta y$) in der XY-Ebene mit dem entsprechenden verzerrten Raster in der Bildebene.

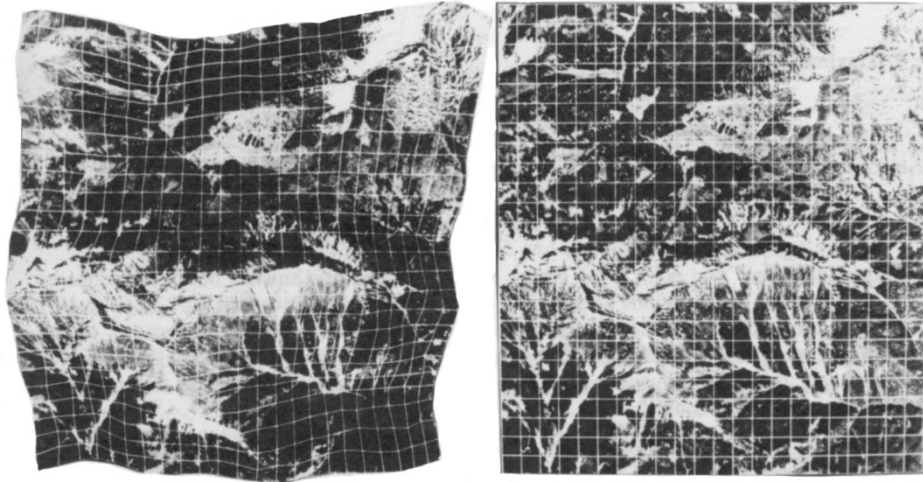
In der Grundrissebene wird ein regelmäßiger Quadratraster vorgegeben. Für alle Stützpunkte wird die entsprechende Geländehöhe aus dem DGM interpoliert. Damit ist das Maschennetz im Raum definiert und kann mit Hilfe der photogrammetrischen Abbildungsgleichung in das Bild übertragen werden.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.3 Photographische Umbildung

Die Deformation des Rasters ergibt einen sehr anschaulichen Eindruck von den Verzerrungen eines Messbildes.



Verzerrter Raster im Luftbild und quadratischer Raster im Orthophoto.



Wild Avioplan OR1 (1976)

Differentialumbildegeräte (heute nicht mehr im Einsatz):

- Wild Avioplan OR1 (1976)
- Carl Zeiss Orthocomp Z2 (1980)

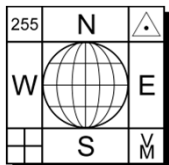
Patent zur Orthophotoherstellung:

Prof. L. Vietoris (1924),
Math.-Prof., Innsbruck

→ Orthophotoscope durch R. Bean (1953)



Prof. L. Vietoris
(1891-2002)



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

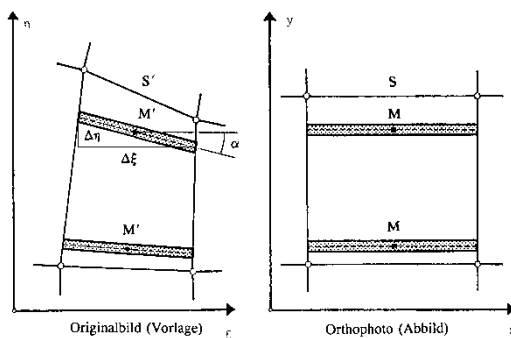
4.4.2.3 Photographische Umbildung

Es besteht die Aufgabe, den photographischen Inhalt eines Viereckes in ein Quadrat zu übertragen.

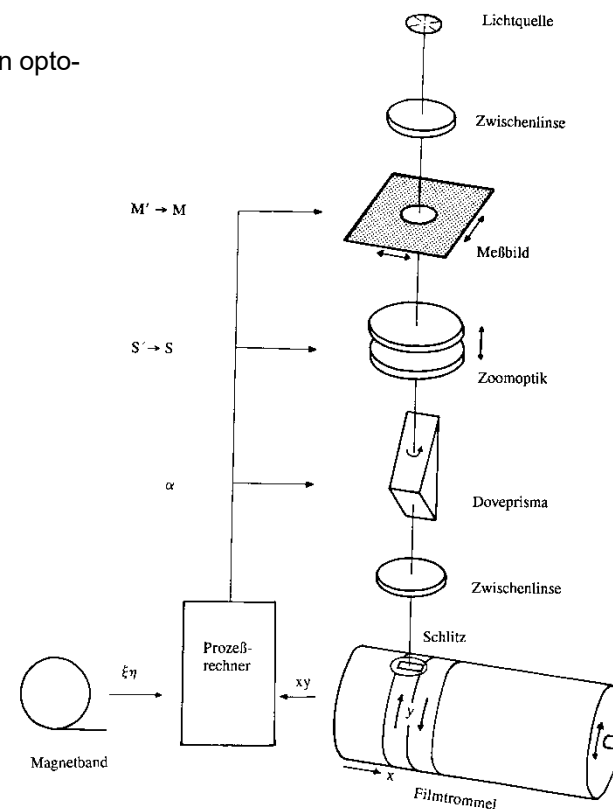
Die Umbildung kann mathematisch durch die schon bekannte *bilineare Transformation* mit ihren 8 Parametern beschrieben werden. Klarerweise müssen die Maschen umso enger sein, je stärker die topographische Gliederung des Geländes ist.

Die Transformation des Bildinhaltes in die Karte (Orthophoto) wird mit einer prozessgesteuerten opto-mechanischen Einrichtung (vgl. voriges Bild) durchgeführt. Die Steuerdaten werden aus den xy-Koordinaten der Rastereckpunkte ($1', 2', 3', 4'$) berechnet:

- Azimutale Steuerung der Schlitzeblende,
- lokaler Abbildungsmaßstab für Zoom-Optik,
- Parallelstellung des Streifens mittels Dove-Prisma,
- Eindreihen und Einschieben des Ergebnisträgers in die aktuelle Grundrissposition.



Differentialumbildung mit Linienelementen

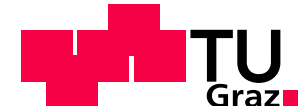


Digitale Steuerung der Differentialumbildung mit Linienelementen.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialentzerrung)

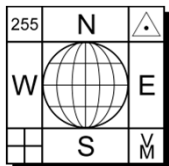
4.4.2.3 Photographische Umbildung



Genauigkeit der differentiell entzerrten Orthophotos – Anmerkungen:

- a) Radiale Bildversetzungen von Details (Bäume, Häuser, Masten, etc.) im Orthophoto, die nicht durch das DGM beschrieben sind (vgl. Abschnitt 4.4.1.3),
- b) Gerätefehler und Fehler des Ausgangsbildmaterials,
- c) Einpassfehler (innere Orientierung im Differentialumbildegerät),
- d) Interpolationsfehler des Differentialumbildegerätes (bilinear statt projektiv),
- e) Fehler bei der Interpolation der Z-Koordinate aus dem DGM.

Orthophotokarte: Entsteht durch kartographische Bearbeitung des Orthophotos in einem beschränkten Umfang (Kartenrandgestaltung, Koordinatengitter, ausgewähltes Namensgut, Höhenkoten und eventuell Höhenlinien).

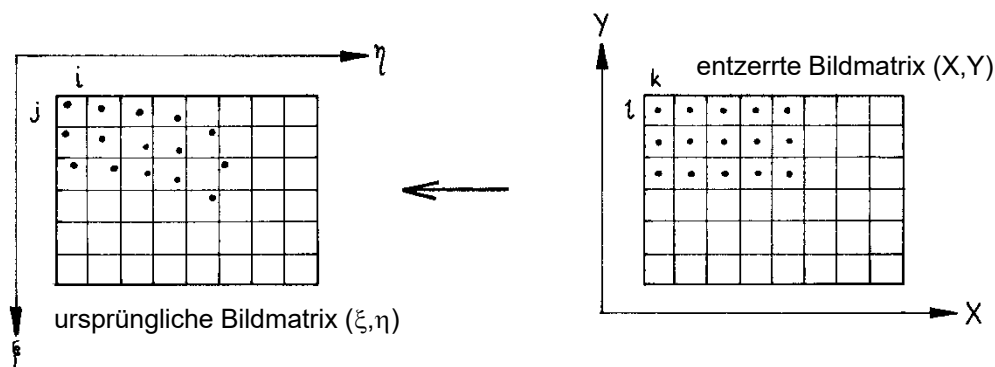


4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialentzerrung)

4.4.2.4 Digitale Orthophotoherstellung

Aus der Bildmatrix des digitalisierten Luftbildes soll eine neue Bildmatrix gerechnet werden, die geometrisch einer Orthogonalprojektion des abgebildeten Geländeausschnittes in die XY-Ebene des Landeskoordinatensystems entspricht. Das Ergebnis wird **digitales Orthophoto** genannt. Vgl. Produktinformation des BEV unter <http://www.bev.gv.at/> (Geobasisdaten, Orthophotos).

Die Herstellung des Orthophotos beginnt damit, daß in der XY-Ebene die gewünschte Bildmatrix definiert wird (X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , Bildelementgröße). Dann werden die Mittelpunkte der Bildelemente in das Bildkoordinatensystem x, y bzw. eigentlich in das Pixelsystem ξ, η des vorliegenden digitalen Ausgangsbildes transformiert. Für diese Transformation benötigt man zu den rasterförmig angeordneten Punkten in der X,Y-Ebene auch die Z-Koordinaten. Diese werden durch Interpolation aus dem DGM abgeleitet. Da die innere und äußere Orientierung des digitalen Messbildes, aus dem das Orthophoto entstehen soll, bekannt sind, können dann die Pixelmittlepunkte im Vorlagebild berechnet werden. Es kommt die perspektive Abbildungsgleichung zur Auswertung. Im Bild ist für jede berechnete Position durch **Grauwertinterpolation** (nächster Nachbar, bilinear, bikubisch) ein Grauwert zu berechnen und dieser dem Grundrisspunkt zuzuweisen (= **Resampling**).

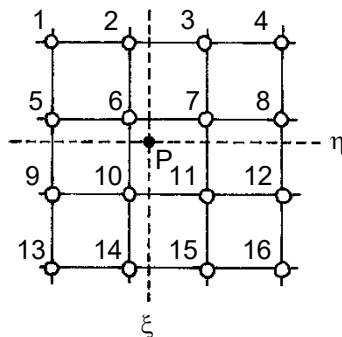


Indirekte Entzerrungsmethode.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.4 Digitale Orthophotoherstellung



- ... Bildelement (Pixel)
- ... Punkt P (ξ, η)

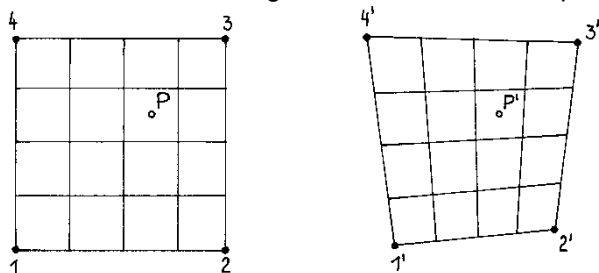
Grauwertzuweisung:

- a) nächster Nachbar: 11
- b) bilinear: 6, 7, 10 und 11
- c) biquadratisch: 6-8, 10-12, 14-16
- d) bikubisch: 1-16
- e) sinc-Funktion ($\sin x/x$): theoretisch beste Interpolationsfunktion; alle Bildelemente eines Bildes

Diskussion der Methoden zur Grauwertinterpolation:

- Je mehr Bildelemente zur Interpolation herangezogen werden, desto höher ist der Rechenaufwand.
- Bei der Methode des nächsten Nachbarn gehen Grauwertkanten verloren, d.h. Linien zwischen homogenen Regionen erhalten einen typisch sägezahnartigen Verlauf. Es entstehen entsprechende Lagefehler im Orthophoto.
- Bei der bilinearen Interpolation ist das Ergebnis schon wesentlich besser, da die unmittelbar vier benachbarten Bildelemente zur Grauwertinterpolation herangezogen werden. Bildglättender Effekt durch Tiefpassfilterung.
- Das beste Ergebnis erhält man durch bikubische Interpolation.

Die Rechenzeit für die Orthophotoherstellung kann verringert werden, indem man nicht alle Orthophotopixel exakt rechnet, sondern die geometrische Transformation über die **Ankerpunktmethode** löst. Dabei werden z.B. nur alle n-ten Bildelemente des Orthophotos in Zeilen- und Spaltenrichtung – idealerweise im Stützstellenabstand des DGM – exakt über die Abbildungsgleichung in das Bild gerechnet. Anschließend wird innerhalb der einzelnen viereckigen Rastermaschen die geometrische Zuordnung durch bilineare Koordinatentransformation gelöst. Die Grauwertinterpolation erfolgt wie vorhin beschrieben.

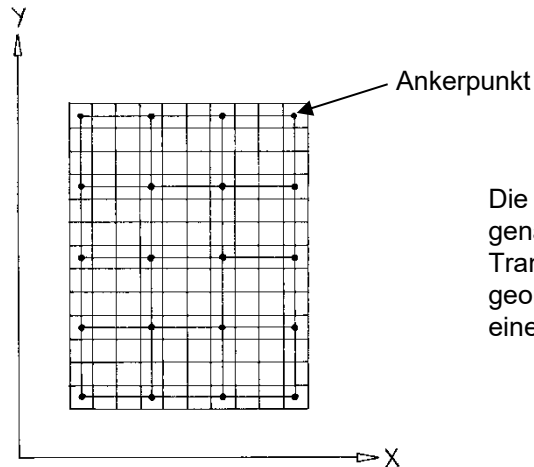


1,2,3,4 ... Ankerpunkte in der X,Y-Ebene 1',2',3',4' ... Ankerpunkte im verzerrten Bild



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.4 Digitale Orthophotoherstellung



Die Methode über die Ankerpunkte ist grundsätzlich weniger genau als die strenge Methode, da die strenge projektive Transformation, die eigentlich notwendig wäre bei der geometrischen Zuordnung der einzelnen Maschen, durch eine bilineare Transformation approximiert wird.

Die Fehlerbetrachtungen, welche bei der Differentialverzerrung auf optischem Wege diskutiert wurden, gelten auch beim digitalen Orthophoto.

Das digitale Orthophoto hat jedoch wesentliche *Vorteile*:

- kein Photolabor mehr notwendig,
- geometrische Genauigkeit ist grundsätzlich höher, da ein sehr engmaschiges Raster für die Approximation der Geländeoberfläche benutzt werden kann,
- Helligkeit und Kontrast kann leicht verändert werden,
- Orthophoto-Mosaik können aus mehreren Bildern leicht hergestellt werden, Möglichkeit der Grauwertanpassung an den Schnittstellen,
- diverse Möglichkeiten der Bildverbesserung wie z.B. Kantenschärfung,
- Möglichkeiten der Visualisierung (Axonometrien, Perspektiven, Animationen),
- computergestützte Bildanalyse (Mustererkennung, Bildsegmentierung, Klassifizierung, ...).

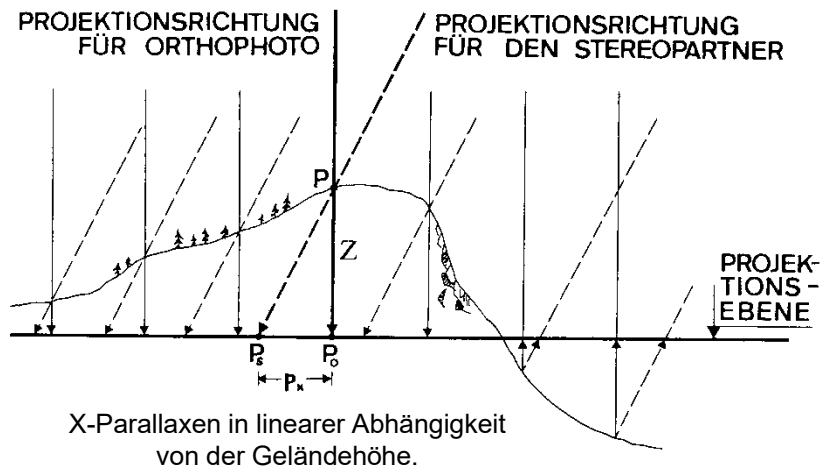


4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.5 Stereoorthophotos

Stereoorthophotos: Der Stereopartner zum Orthophoto entsteht dadurch, indem man die Geländeoberfläche durch schräge Parallelprojektion in die X,Y-Grundrissebene abbildet. Orthophoto und Stereopartner unterscheiden sich lagemäßig in Projektionsrichtung (X-Richtung) um die X-Parallaxe:

$$p_x = Z \cdot \tan \alpha$$



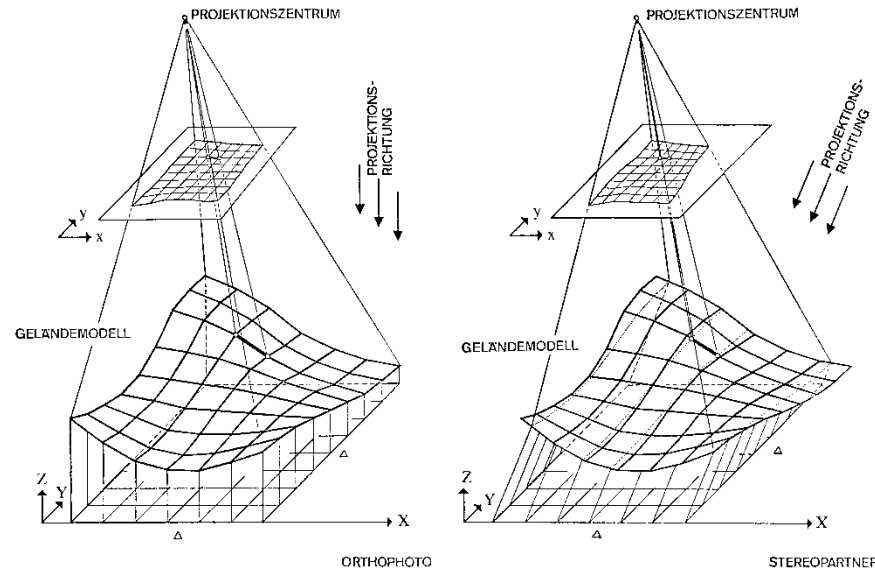
Stereoskopie:

- keine Y-Parallaxen,
- X-Parallaxe vermittelt die Raumwirkung



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.5 Stereoorthophotos



Zusammenhang
zwischen
Messbild,
Geländemodell
sowie
Orthophoto und
Stereopartner.

Berechnet man Orthobild und Stereopartner von zwei verschiedenen Vorlagebildern, die sich um etwa 60% überlappen (= Stereobildpaar), sieht man bei stereoskopischer Betrachtung nicht nur das Gelände, welches durch das DGM beschrieben ist, dreidimensional sondern auch die davon abweichenden Kleinformen (Bäume, Häuser, etc.).

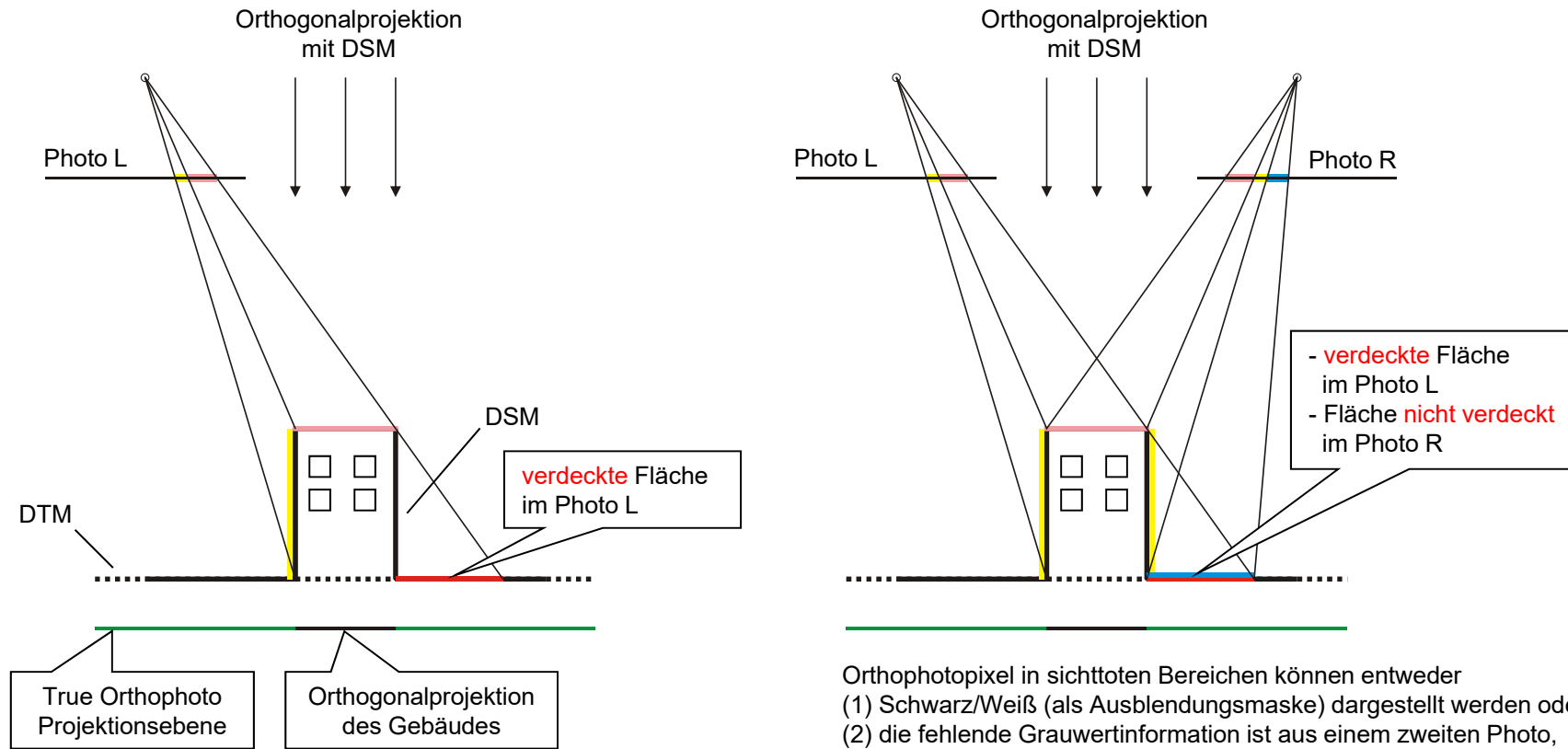
Würde man Orthophoto und Stereopartner vom gleichen Vorlagebild herstellen, läge nur die im Geländemodell erfasste Oberfläche stereoskopisch vor. Bäume, Häuser etc. würden sich bei der stereoskopischen Betrachtung nicht plastisch vom Gelände abheben (= im Gelände flach liegen).

- Orthophoto und Stereopartner sind Grundlage für vereinfachte photogrammetrische Auswerteverfahren.



4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.6 True Orthophoto



Orthophotopixel in sichttoten Bereichen können entweder
 (1) Schwarz/Weiß (als Ausblendungsmaske) dargestellt werden oder
 (2) die fehlende Grauwertinformation ist aus einem zweiten Photo,
 das von einem anderen Standpunkt aus aufgenommen wurde,
 zu übernehmen.

Orthophotoherstellung mit einem Oberflächenmodell.
 Es kommt – sofern keine Sichtbarkeitsanalyse vorgenommen wird –
 zu Doppelabbildungen in den sichttoten Räumen.

DSM ... digital surface model (Oberflächenmodell) – Es enthält z. B. auch Kunstbauten, Brücken u.ä.
 DTM ... digital terrain model (Geländemodell)

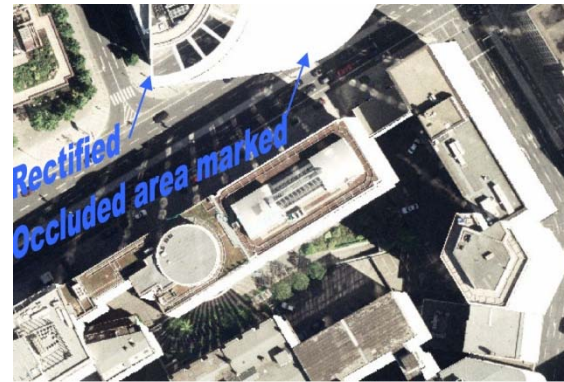


4.4.2 Auswertung mit Höhenmodell (Differentialverzerrung)

4.4.2.6 True Orthophoto



Ghosting effect due to the use of a DSM in a city without detection of occluded areas, even if the building is correctly rectified.



Orthophoto with occluded areas marked in white.



True orthophoto. Occlusions automatically replaced by using several overlapping orthophotos.

Quelle: J. Braun, INPHO, Stuttgart, PhoWo 2003.



5. Zweibildauswertung

5.1 Räumliches Sehen

Die Bildinterpretation und jede Bildmessung beruht auf der Sehfähigkeit des Menschen. Zur Auswertung der beiden Messbilder, die ein räumliches Modell festlegen, müssen die korrespondierenden Bildpunkte in beiden Aufnahmen eingestellt bzw. gemessen werden. Dieser Vorgang kann am bequemsten, schnellsten und genauesten mit Hilfe der **Stereoskopie** erfolgen.



Zufallsstereogramm

65 mm

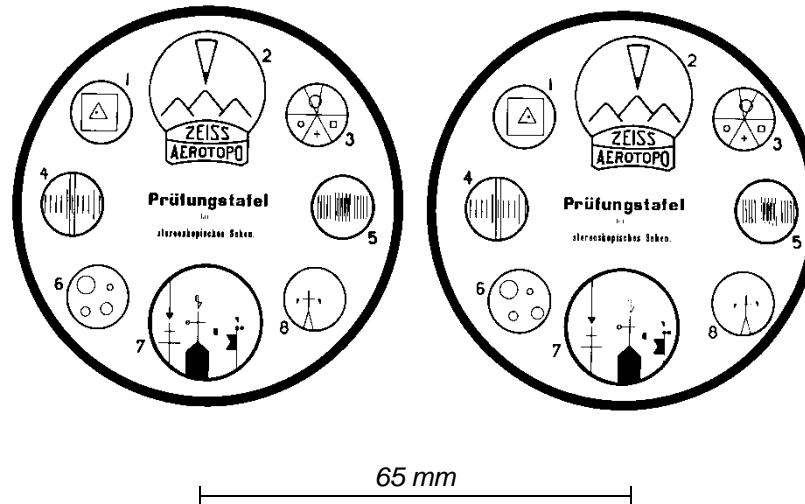
Zufallsstereogramme, von Bela Julesz in den Bell-Laboratorien erfunden, sind visuelle Muster, die außer binokularen Disparitäten keine Anhaltspunkte für das Stereosehen enthalten. Die Stereogramme bestehen aus dem gleichen zufälligen Muster mit kleinen schwarzen und weißen Quadraten. In einem der beiden ist jedoch ein quadratischer Ausschnitt etwas nach links, im anderen etwas nach rechts verschoben. (Betrachtung: freijugig oder mit einem Linsenstereoskop.)



5. Zweibildauswertung

5.1 Räumliches Sehen

Überprüfung der stereoskopischen Sehtüchtigkeit im Rahmen der LV Photogrammetrie KU.



Stereogramm

Die Tiefenfolge der Figuren in den einzelnen Ringen:

- 1 ... Umrandungsring – Quadrat – Punkt
- 2 ... Umrandungsring – seitliche Berge – Messmarke und Berg
- 3 ... Kreis links unten – Umrandungsring – Kreuz – Quadrat – Kreis oben Mitte
- 6 ... Kreis rechts oben – Umrandungsring – Kreis links oben – Kreis links unten – Kreis rechts unten
- 7 ... Umrandungsring – Doppelkreuz mit Pfeilspitze – schwarzes Dreieck – schwarzer Kreis – Fahne mit Kugel – schwarzes Rechteck – Turm mit Kreuz und Ring – weißes Dreieck – weißes Rechteck

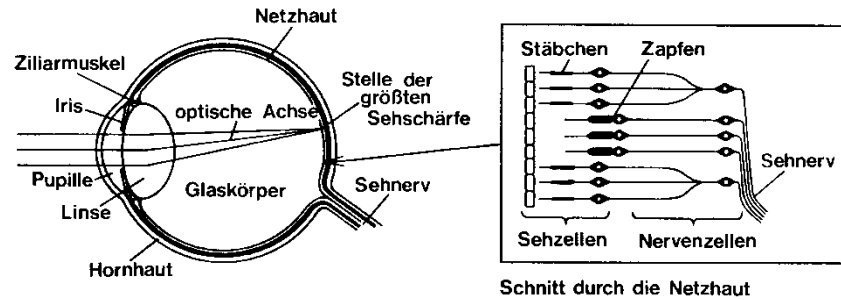


5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

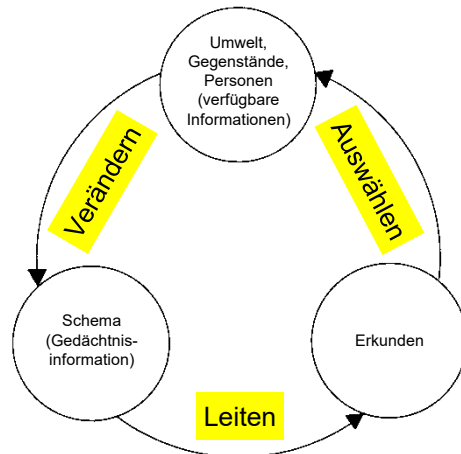
5.1.1.1 Monokulares Sehen



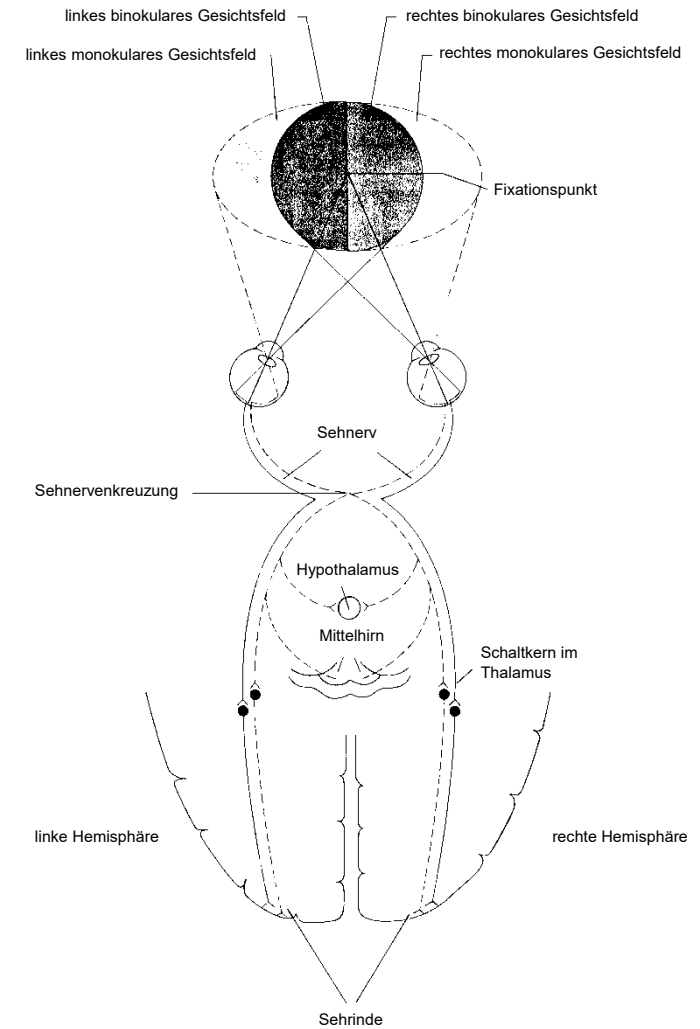
Das **menschliche Auge** ist ein optisches System bestehend aus Hornhaut, vorderer Augenkammer, Linse, Glaskörper und Netzhaut.



3 Bereiche der optischen Wahrnehmung: der *physikalische* Lichtreiz führt über chemische Umsetzung in der Netzhaut zu (*physiologisch* beschreibbaren) Empfindungen, welche durch die Nervenfasern als frequenzmodulierte Wechselströme dem Sehzentrum des Hinterhaupthirns zugeführt und dort unter Mitwirkung des Gedächtnisses (mit Vorstellung und Erfahrungen) zur Wahrnehmung verarbeitet werden (*psychologischer* Bereich).



← Der Wahrnehmungszyklus von U. Neisser.



Die Abbildung zeigt schematisch die Sehbahnen eines Säugetieres mit binokularem Gesichtsfeld.



5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.1 Monokulares Sehen

Die Netzhaut enthält zwei Arten von Lichtsinneszellen, welche das kontinuierliche Bild gleichsam rastern:

Stäbchen: helligkeitsempfindlich, Anzahl ca. 120 Millionen beim Menschen, in der ganzen Netzhaut verteilt (außer im Gelben Fleck), \varnothing 2 μm .

Zapfen: helligkeits- und farbempfindlich, Anzahl ca. 6 Millionen beim Menschen, \varnothing 2-8 μm .

Hierarchische Struktur: Die Nervenenden von ca. 130 Stäbchen münden in eine *Schaltzelle*, während jeder Zapfen von einer Schaltzelle erfasst wird. Mehrere Schaltzellen verbinden sich mit einer *Nervenzelle* des *Sehnervs*, der aus ungefähr 500.000 Fasern besteht.

Zur Hälfte überkreuzen sich dann die Sehnervenfasern. Die Sehnerven enden dann in drei verschiedenen Hirnregionen.

In den *Stäbchen* ist eine lichtempfindliche Substanz (*Sehpurpur*) enthalten, die durch Helligkeit zersetzt und bei Dunkelheit regeneriert wird.

Die Stelle des *deutlichsten Sehens*, die *Netzhautgrube* (Zentralgrube, fovea centralis, Gelber Fleck), ist bei einem Durchmesser von 0.8 mm ausschließlich mit *Zapfen* (14.000/mm²) besetzt. Der Bereich hoher Auflösung ist daher auf etwa 1-2° begrenzt (\approx 35 cm auf 10 m Entfernung). Das Farbsehen ermöglichen 3 Arten von Zapfen: sie besitzen Sehstoffe, die unterschiedliche Lichtwellen absorbieren. Die Mischfarben entstehen je nach Erregungsstärke der einzelnen Zapfensorten.

Die Augen werden durch 3 Paare von Augenmuskeln gleichsinnig bewegt.

Das auf die Netzhaut projizierte Bild unterscheidet sich nicht vom photographischen Bild.

Ruhende Linse des Auges: äußere Brennweite \cong 17 mm, innere Brennweite \cong 23 mm, mittlerer Augendurchmesser entlang der optischen Achse = 13 mm.

Akkomodation: Die Scharabbildung eines Gegenstandes erfolgt durch automatische (reflektorische) Krümmung der Linse (= Brechkraftänderung) mittels des Ciliarmuskels.

Adaption: Anpassung an den jeweiligen Helligkeitsgrad durch Veränderung der Pupillenweite. Diese Regulierung geschieht reflektorisch durch Erweiterung oder Verengung des Sehloches (zw. 2 und 8 mm Durchmesser) in der der Linse vorgelagerten Regenbogenhaut (= Iris).



5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.1 Monokulares Sehen

Die **Augenbasis** beträgt ca. **65 mm**.

Das *Auflösungsvermögen des Auges* ist durch die (1) Beugung an der Augenpupille und (2) Größe der Zapfen festgelegt.

Die **monokulare Sehschärfe** ist jener Winkel μ , unter dem ein Objekt noch getrennt wahrgenommen wird.

Normalsichtiges Auge: $\mu = 1' (= 2^\circ)$, um punktförmige Objekte zu trennen;
 $\mu = 0.25'$, um parallele Linien zu trennen.

Sakkadische Augenbewegungen (franz. saccade = Ruck) dienen dazu, nacheinander die verschiedenen Teile des Gesichtsfeldes in der Zentralgrube abzubilden (Größe $4'$ bis 15°).

Die **deutliche Sehweite** beträgt ca. **25 cm**, wobei hier das beste Auflösungsvermögen erzielt wird.

Beispiel: $\mu = 2^\circ$, $s = 25 \text{ cm}$

$$\frac{a}{s} = \hat{\mu} \rightarrow a = s \cdot \hat{\mu} = 73 \mu\text{m}$$

μ ... monokulare Sehschärfe

$\hat{\mu}$... Winkelangabe in Bogenmaß (Radiant)

s ... deutliche Sehweite

a ... lineares Auflösungsvermögen

Die Sehschärfe $\mu = 2^\circ$ ergibt in 25 cm Sehweite ein lineares Auflösungsvermögen von $73 \mu\text{m}$, das entspricht **7 Lp/mm**.

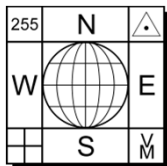
Photographischer Film (Diapositiv) hat (beispielsweise) $40 \text{ Lp/mm} = 12.5 \mu\text{m}$ lineare Auflösung. ← Scan-Pixelgröße!

Zur vollen Ausnutzung der Interpretationsfähigkeit muss die Vorlage 6-mal vergrößert werden.

Anmerkung: $a_B \cong 0.66 \cdot k [\mu\text{m}]$... Beugungsscheibchen auf der Netzhaut

$$k = \frac{f}{d}$$

$$\frac{a_B}{f} = \hat{\tau} = \frac{0.66 [\mu\text{m}]}{d [\mu\text{m}]} \cong 50'' - 60'' \quad (d = 2 \text{ mm})$$



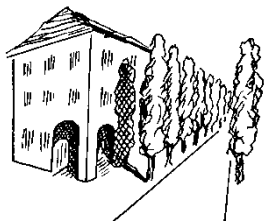
5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.1 Monokulares Sehen

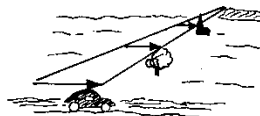
Echte Raumwahrnehmung kommt nur durch den räumlichen (stereoskopischen) Sehvorhang zustande.

Daneben vermitteln noch andere Eindrücke die Tiefe des Raumes:

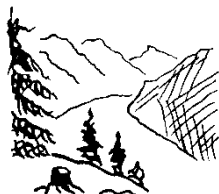
Raumvorstellungen liefert uns bei der Betrachtung unserer Umgebung oder von Bildern selbst mit **einem Auge** unser Gedächtnis durch die dort gespeicherte Erfahrungen: Größenverhältnisse bekannter Gegenstände, geometrische und Luftperspektive, teilweises Verdecken von Gegenständen bewirken sehr lebhaft räumliche Vorstellungen.



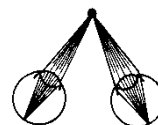
Vorstellungen aufgrund geometrischer Erfahrungen und Erinnerungen: Größenvergleich, Fluchten, Schattenwurf, usw.



Bewegungsplastik: Nahe Gegenstände bewegen sich scheinbar stärker.



Luftperspektive: Minderung von Licht- und Farbkontrasten mit der Entfernung.



Augenmotorik: Verschiedene Anstrengungen beim Blicken in Nähe und Ferne.

Doch sind diese Vorstellungen meist ungenau, oft labil und Täuschungen, ja selbst Inversionen (Vertauschen von vorn und hinten = bekannte schattenplastische Effekt durch die Änderung der Beleuchtungsrichtung) ausgesetzt.

Schattenplastische Reliefumkehr:



Krater am Mars
(ESA Sonde Mars Express)



Bild um 180° gedreht

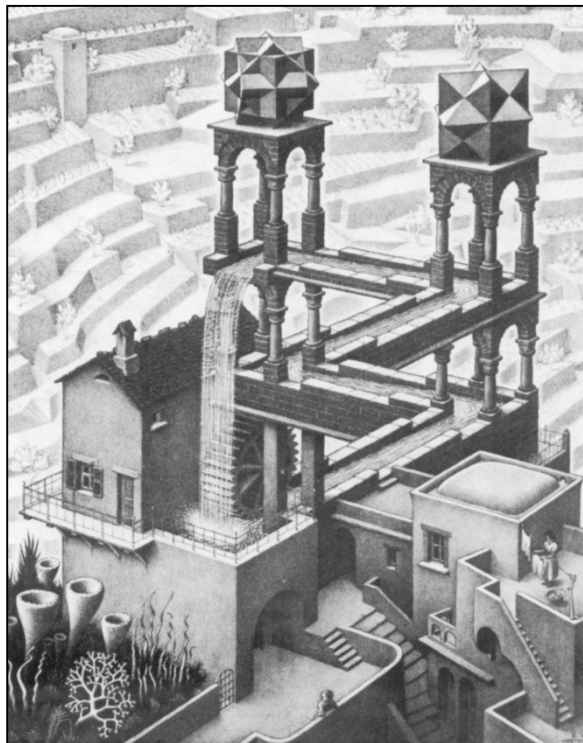


5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

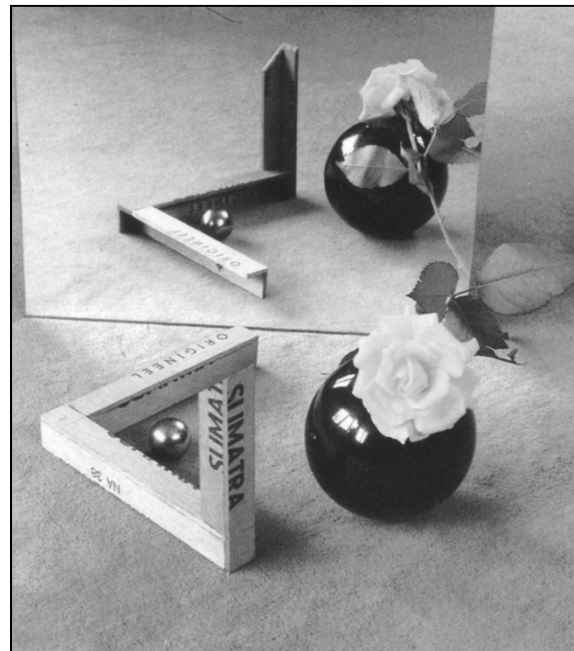
5.1.1.1 Monokulares Sehen

Geometrisch-optische Täuschungen aufgrund gewohnter Raumvorstellungen.

Es gibt geometrische Figuren, die vom Betrachter anders gesehen werden, als sie tatsächlich sind.



Lithographie „Wasserfall“ (Perpetuum mobile)
M.C. Escher, 1961



Diese Drei-Balken-Konstruktion ist eine der einfachsten unmöglichen Figuren und doch von großer optischer Wirksamkeit.

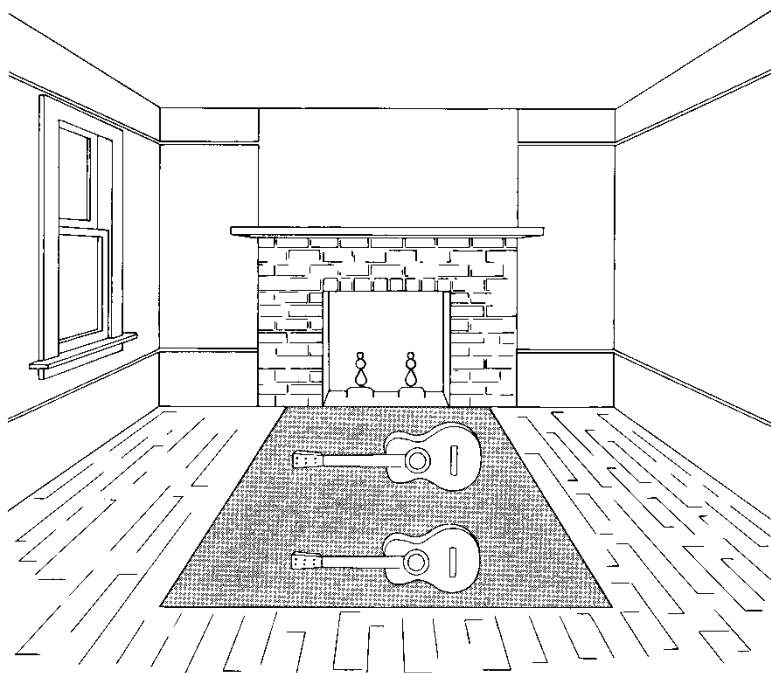
RAUMVORSTELLUNG kann zu Fehldeutungen führen.
STEREOSKOPISCHES SEHEN ist immer eindeutig.



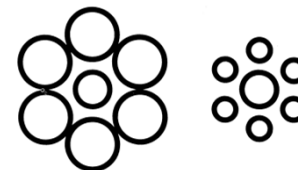
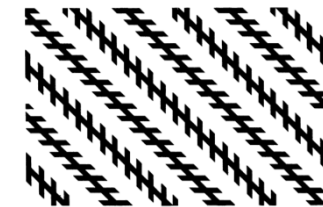
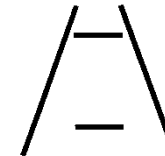
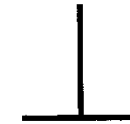
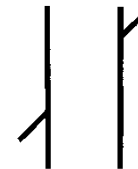
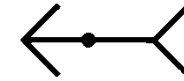
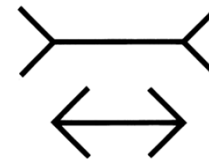
5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.1 Monokulares Sehen

In jeder der meisten Figuren (ca. 200) sind zwei Komponenten beim Zustandekommen der optischen Täuschungen beteiligt: Die eine löst die Täuschung aus (auslösende Komponente), und die andere ist die Komponente, über die man sich täuscht (Test-Komponente).



Diese Zeichnung enthält enthält einige der bekanntesten Täuschungsfiguren.





5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

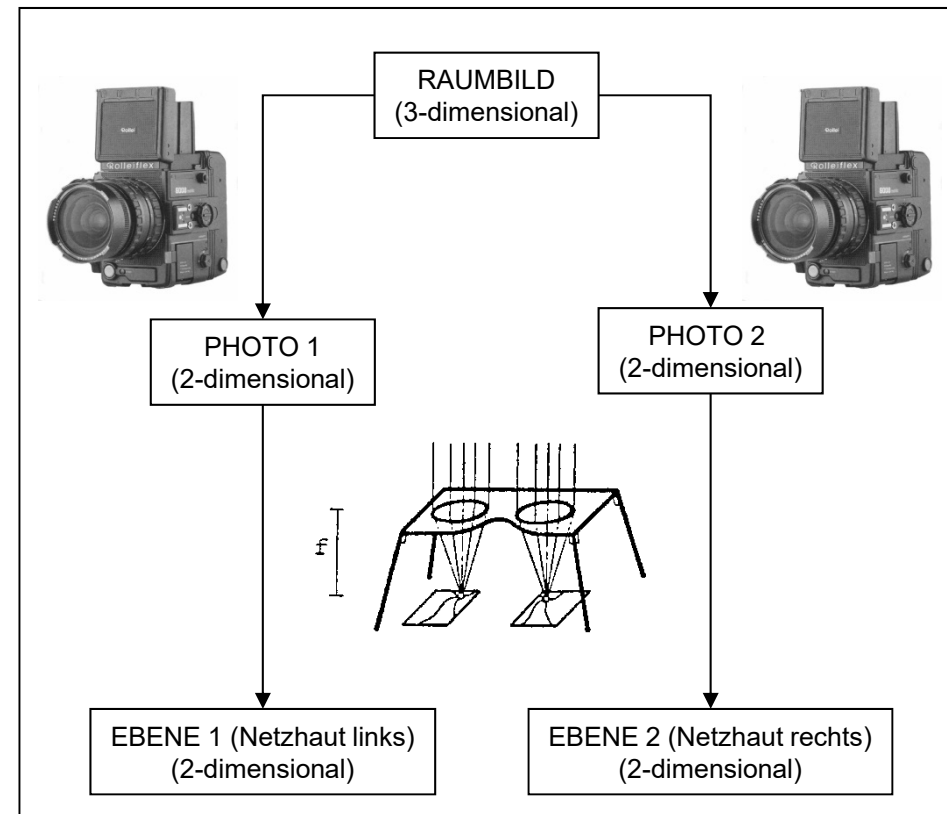
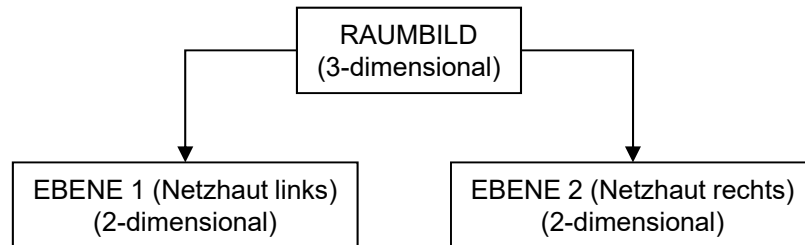
5.1.1.2 Binokulares Sehen

Genauere, eindeutige und nachprüfbarere Raumwahrnehmungen entstehen durch die Unterschiede der Netzhautbilder unseres rechten und linken Auges (nachgewiesen von Ch. Wheatstone, 1833).
(Ch. Wheatstone, brit. Physiker, 1802-1875)

Binokulares Sehen = stereoskopisches, räumliches Sehen

Stereoskopisches Sehen ist durch das Doppelorgan Auge möglich.

Physikalischer Vorgang:

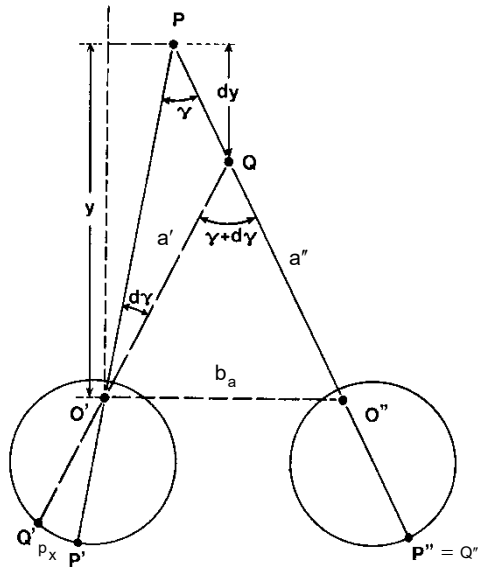


Prinzip der stereoskopischen Betrachtung in der Photogrammetrie



5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.2 Binokulares Sehen



- b_a ... Augenbasis
- P, Q ... Raumpunkte
- γ ... Konvergenzwinkel
- Y ... Entfernung
- p_x ... Horizontalparallaxe
- dy ... Differenz der Konvergenzwinkel
- a', a'' ... optische Achsen

Konvergenz der beiden optischen Achsen:

Augäpfel drehen sich so, dass sich die Augachsen (= optischen Achsen) im Punkt P schneiden, d.h. P' und P'' werden jeweils in der Zentralgrube (= Gelber Fleck), den Stellen des deutlichsten Sehens, abgebildet.

Ist der Punkt P im ∞ , dann sind die Blickrichtungen parallel zueinander.
Die Augen können nicht unabhängig voneinander bewegt werden!

Die Augachsen bilden am Punkt P den Konvergenzwinkel γ .
Akkommodation sorgt für die Scharfabbildung von P in der Netzhaut.

Die Augenbasis und der betrachtete Punkt P spannen die **Betrachtungs(Blick-)ebene** auf.

Mit dem Punkt P werden auch Punkte in der Umgebung entsprechend auf die Netzhaut abgebildet.
Diese Punkte werden i. Allg. unscharf abgebildet.



5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.2 Binokulares Sehen

Beispiel: P bewegt sich auf der Augachse a'' .

Auf der linken Netzhaut gibt sich ein Lageunterschied zw. P' und Q'.

Dieser Abstand wird **Horizontalparallaxe** p_x (zufolge des aufrechten Ganges des Menschen) genannt.

Das Verschmelzen der beiden Netzhautbilder, die sich um Horizontalparallaxen (= Parallaxen in Basisrichtung) unterscheiden, zu einem Raumbild bezeichnet man **räumliches Sehen** bzw. **Stereoskopie**.

Senkrecht zur Augenbasis ist die **Vertikalparallaxe** p_y definiert; sie muss Null sein.

D.h., dass die Netzhautbilder in vertikaler Richtung keine Lageunterschied aufweisen dürfen.

Das Auflösungsvermögen des räumlichen Sehens wird durch den kleinsten noch wahrnehmbaren Winkel $d\gamma = \gamma_Q - \gamma_P$ bestimmt.

$$b_a \ll Y \quad \gamma = \frac{b_a}{Y} \quad dY \dots \text{wahrnehmbarer Tiefenunterschied}$$

$$d\gamma = -\frac{b_a}{Y^2} \cdot dY$$

$$dY = -\frac{Y^2}{b_a} \cdot d\gamma$$

Die Güte des räumlichen Sehens nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab!

Monokulare Sehschärfe: $60'' \cong 73 \mu\text{m}$ } umgerechnet auf die deutliche Sehweite
 Binokulare Sehschärfe: $17'' \cong 21 \mu\text{m}$ } von 25 cm bei $b_a = 65 \text{ mm}$.

Die **binokulare Sehschärfe** ist wesentlich besser als die monokulare Sehschärfe.

Bei einer Entfernung Y ergeben sich folgende wahrnehmbare Tiefenunterschiede:

$$dY = \pm \frac{Y^2}{b_a} \cdot d\gamma = \pm \frac{Y^2}{0.065} \cdot \frac{17''}{\rho''} = \pm \frac{Y^2}{830} [\text{m}]$$

Für die relative Tiefenwahrnehmung gilt: $\frac{dY}{Y} = \pm \frac{Y}{830}$



5.1.1 Natürliches räumliches Sehen

5.1.1.2 Binokulares Sehen

Daraus folgt:

1. Tiefenwahrnehmung nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.
2. Für $Y = 830 \text{ m}$ wird $dY = Y$, d.h., es können keine Tiefenunterschiede mehr festgestellt werden.
(mathematischer Rechenwert!)
Tatsächlich: **400 – 500 m (= Radius des stereoskopischen Feldes)**
3. Im Nahbereich ist die Tiefenwahrnehmung sehr gut:

$$Y = 0.25 \text{ m} \Rightarrow dY = 75 \mu\text{m}$$

$$Y = 1.00 \text{ m} \Rightarrow dY = 1.2 \text{ mm}$$

4. Wird die angulare Parallaxe $d\gamma \cong 1^\circ$ (= Grenzwert der Stereoskopie) überschritten, zerfällt **entweder der Vorder- oder der Hintergrund in zwei Bilder**.

Versuch: Bleistift in deutlicher Sehweite halten.

Bleistift anschauen \rightarrow Hintergrund zerfällt in zwei Teilbilder

Hintergrund anschauen \rightarrow 2 Bleistifte (Teilbilder) des Vordergrundes sichtbar

Künstliche Realisierung des stereoskopischen Sehens

Beim normalen Sehen werden beim Anblick von natürlichen Objekten diese in die „Bildebenen“ der Augen abgebildet. Nun kann man diese Wirkung auch erzielen indem man jedem Auge getrennt ein gezeichnetes oder photographisches Bild vorlegt und zwar unter gewissen Voraussetzungen.

Die homologen Strahlen schneiden einander vor und hinter den Bildern.

Es entsteht ein **virtuelles räumliches Bild** des aufgenommenen Objektes.



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

Künstliche Realisierung des stereoskopischen Sehens (cont.)

Voraussetzungen:

- Aufnahme und Betrachtung unter denselben geometrischen Bedingungen.
- (Zentralperspektive) Bilder müssen von verschiedenen Standpunkten aufgenommen sein (= Stereoaufnahme). Kongruente Bilder verursachen keine Horizontalparallaxen!
- Jedem der beiden Augen muss praktisch gleichzeitig und getrennt ein Bild dargeboten werden und zwar jedem Auge muss das richtige Bild zugeführt werden.

Orthoskopischer und pseudoskopischer Effekt: Bei pseudoskopisch betrachteten Luftbildern ergibt sich eine Reliefumkehr: Täler werden zu Bergrücken und umgekehrt.



tief *hoch*
 Punkt – Kreis – Quadrat
 ($p_x=0$)



Quadrat – Kreis – Punkt
 ($p_x=0$)

- Es dürfen nur Horizontalparallaxen und keine Vertikalparallaxen auftreten. Dies ist beim Normalfall der Stereophotogrammetrie stets der Fall. Blickebenen des Beobachters müssen mit den sogenannten Kernebenen der Aufnahme zusammenfallen (= Betrachtung in **Kernebenen**).
- Basisverhältnis (B/H)** zwischen 1 : 2 und 1 : 20.
 Anmerkung: Augenbasis : deutlicher Sehweite = 1 : 4
- Maßstabsunterschiede zwischen linkem und rechtem Bild nicht größer als $\approx 14\%$.
- Schwärzung darf sich nicht zu stark unterscheiden.
 (Negativ vs. Positiv; Vormittags- vs. Nachmittagsaufnahme)
- Divergenz der Augachsen muß ausgeschlossen sein.
 (Blickrichtungen zu homologen Strahlen müssen annähernd einander schneiden.)

Bei *genäherten Senkrechtaufnahmen* (Originalbilder) kann die parallaxfreie Stereoskopie nur ausschnittsweise erfolgen.

Abhilfe: Umbildung des aufgenommenen Stereobildpaares in den Normalfall (vgl. Abschnitt 5.7 - spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie).



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

Verfahren zur stereoskopischen Betrachtung von Bildpaaren

Unterscheidung zwischen der Betrachtung von analogen und digitalen Stereobildpaare. Hierbei gibt es jeweils die Möglichkeit, die beiden Stereopartner **örtlich getrennt** oder **an gleicher Stelle überlagert** anzuordnen.

(1) Betrachtung von analogen Stereobildpaaren

- Optische Verfahren

- a) Linsenstereoskop (D. Brewster, 1852)
- b) Taschenspiegelstereoskop
- c) Spiegelstereoskop (1833 von Ch. Wheatstone erdacht, 1857 von H. von Helmholtz entwickelt)
- d) photogrammetrische Stereoauswertegeräte (analog bzw. analytisch)

D. Brewster, engl. Physiker, 1781-1868, Erfinder des Kaleidoskops.
H. von Helmholtz, dt. Physiker und Physiologe, 1821-1894.

- Anaglyphenverfahren ($\alpha\nu\alpha\lambda\upsilon\pi\epsilon\iota\nu$, griech. erhaben, reliefartig darstellen)

- a) nach Rollmann, 1853: stereoskopische Bilder in komplementären Farben – rot/grün – übereinander gedruckt. Bildtrennung durch Betrachtung mit einer „Anaglyphenbrille“. Farbbilder können nicht betrachtet werden.
- b) nach D’Almeida, 1858: Projektion der beiden Halbbilder durch komplementärfarbige Filter.

Es gibt auch ein modifiziertes Anaglyphenverfahren, mit dem man „Farben“ wahrnehmen kann.

- Polarisationsverfahren

Beim Polarisationsverfahren verwendet man bei der Projektion der Doppelbilder statt komplementärfarbiger Filter solche, die die Projektionsstrahlen der beiden Teilbilder senkrecht zueinander polarisieren (\uparrow , \rightarrow). Betrachtung mit „Polarisationsbrillen“ (= Analysator). Für Vorführungen geeignet. Farbige Bilder können stereoskopisch projiziert werden.

- Verfahren der Wechselblenden (nicht mehr aktuell)

Prinzip der „zeitlichen Bildtrennung“: mind. 5 Wechsel/sec., bei 35-40 Wechsel/sec. gibt es einen flimmerfreien Raumeindruck. Die Trägheit des Auges wird ausgenutzt, indem man die beiden Teilbilder nicht genau gleichzeitig, sondern in kurzen Intervallen abwechselnd den beiden Augen darbietet. Synchronisierte Blenden vorm Projektor und Auge! Vibrationen durch mechanische Beanspruchung ...



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

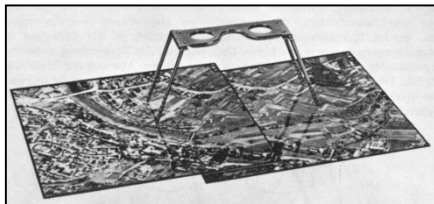
(1) Betrachtung von analogen Stereobildpaaren (cont.)

- Sonderverfahren

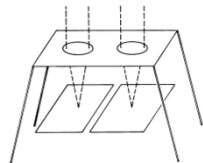
Holographie, Chromostereoskopie;
3D-Filmerstellung durch dynamische Bildsequenzen in Basisrichtung. Stereoskopische Betrachtung:
Lichtintensität eines Auges muss durch eine entsprechende Betrachtungsbrille gemindert werden.

Anmerkung zu den optischen Verfahrenen:

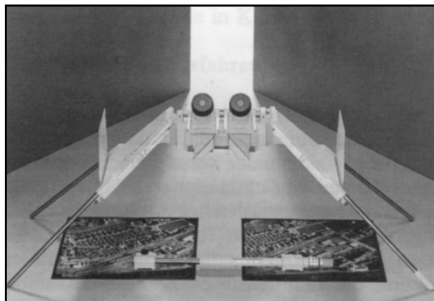
Bei der Betrachtung der beiden nebeneinander liegenden Bilder – etwa in der deutlichen Sehweite – entsteht ein Problem für das Augenpaar: Bei nahezu paralleler Blickrichtung (Konvergenzwinkel = 0) soll auf eine endliche Entfernung akkomodiert werden! Abhilfe durch Linsenstereoskope (vgl. Abb. unten). Mit etwas Übung ist die Bildbetrachtung bzw. -verschmelzung auch mit „freiem“ Auge möglich.



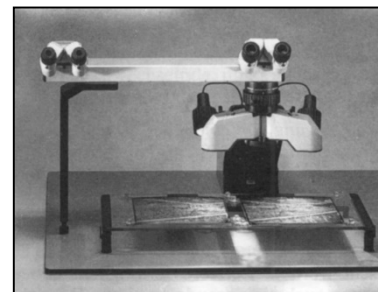
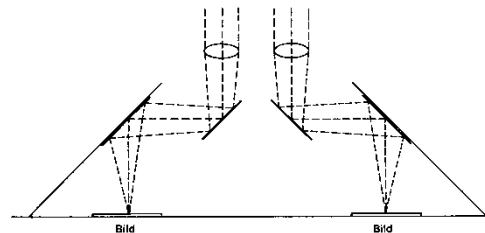
Linsenstereoskop



Taschen-Spiegelstereoskop



Spiegelstereoskop



Aviopret APT2 (Wild/Leica)



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

(2) Betrachtung von digitalen Stereobildpaaren am Bildschirm

Eine stereoskopische Betrachtungseinheit ist bei digitalen photogrammetrischen Arbeitsstationen unverzichtbar. Die notwendige Bildtrennung ist auf unterschiedliche Weise realisierbar:

physikalisches Prinzip der Bildtrennung	Realisierung	gleichzeitig für mehrere Betrachter	freie Kopfbewegung	Bemerkungen
räumlich	2 Monitore und Stereoskop	nein	nein	gerätetechnisch aufwendig, großer Raumbedarf
	1 vertikal geteilter Monitor und Stereoskop (Split-Screen-Methode)	nein	nein	nur halbe horizontale Auflösung
	2 Monitore und Polarisationsfilter	ja	ja	Gerätetechnisch aufwendig, großer Raumbedarf
	autostereoskopische Darstellung durch Mikroprismen	nein	ja	Displaysystem, noch keine Anwendung in der Photogrammetrie
spektral	Anaglyphenverfahren	ja	ja	keine oder nur beschränkte Farbdarstellung möglich, einfach realisierbar
zeitlich	abwechselnde Darstellung des linken und rechten Bildes; synchronisiert mit einer „Stereobrille“. Lösung mit Polarisationsbrille bzw. LCD-Shutterbrille	ja	ja	hohe Hardwareanforderungen, heute von allen Herstellern bevorzugt



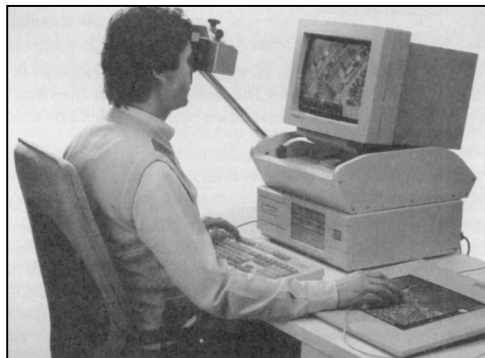
Planar 3D Monitor
(<http://www.planar.com/>)



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

Anmerkungen:

Split-Screen-Methode: Übergangslösung zwischen analytischen Auswertegeräten und DPAS.

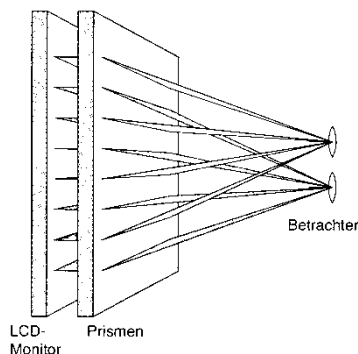


DVP digital photogrammetric workstation
(DVP Geomatics, Inc., Quebec)

Beide Bilder werden gleichzeitig nebeneinander auf dem Monitor angezeigt. Ein einfaches Linsensystem, das dem Prinzip des Spiegelstereoskops entspricht, gestattet die visuelle Betrachtung.

→ „Low-cost photogrammetry“

Autostereoskopische Darstellung:



Das Stereobild wird spaltenweise (gerade Spalten: linkes Bild; ungerade Spalten: rechtes Bild) dargestellt. Auf einer LCD-Monitorfläche befindet sich ein vertikales Mikroprismensystem, das die Spaltenbilder in die entsprechenden Augenrichtungen ablenkt. Der Stereoeindruck entsteht ohne zusätzliche Hilfsmittel, das Stereobild besitzt die halbe horizontale Monitorauflösung. Da Bewegungen des Operators über eine automatische Bild- und Prismennachführung (= eye finder) kompensiert werden, steht ein größerer Arbeitsbereich vor dem Monitor zur Verfügung. Nur für einen Betrachter geeignet!

← Autostereoskopisches Prinzip
(TU Dresden)

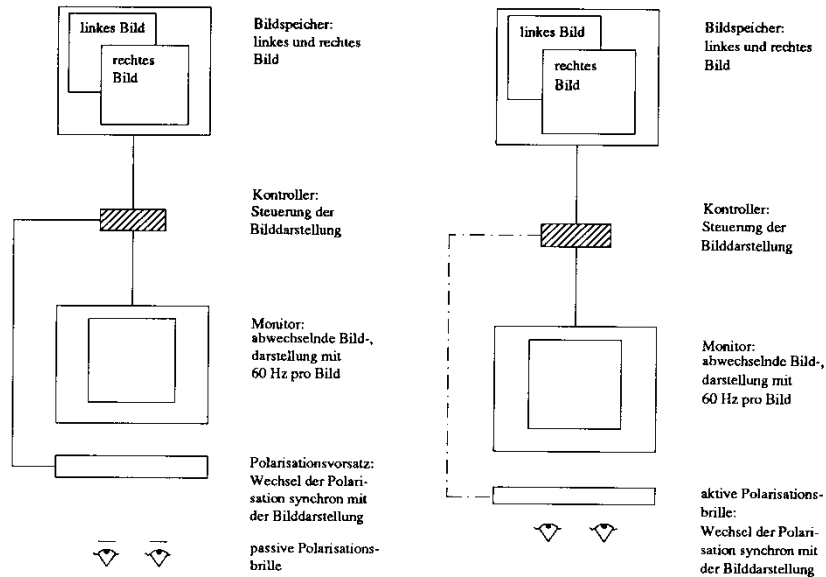


Multiview-Systeme arbeiten mit mehr als 2 stereoskopischen Teilbildern. (zwischen 8 und 20). Sie funktionieren ähnlich wie die bekannten 3D-Postkarten.



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

Zeitliche Bildtrennung:

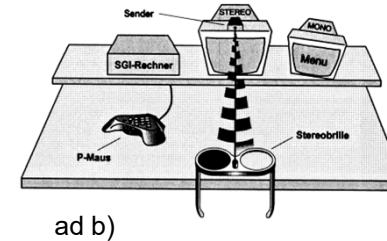
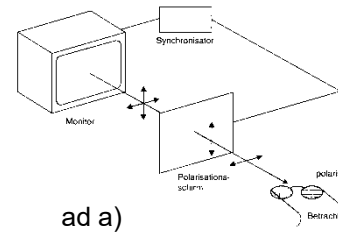


a) Bildtrennung nach Tektronix. b) Bildtrennung nach Stereographics.
 (Anmerkung: Bilder werden im „interlaced mode“ am Bildschirm dargestellt.)

ad a) Bilddarstellung mit polarisiertem Licht: Das vom Monitor abgestrahlte Bild wird mit einem LCD-Filter in der Bildwechselfrequenz unterschiedlich (↕→) polarisiert. Der Operator trägt wiederum eine Brille, deren Gläser entsprechend so polarisiert sind, dass jedes Auge nur das ihm entsprechende Bild sieht. Die Brille benötigt keine elektronische Steuerung. Sie ist daher leicht.

ad b) Es besteht im Prinzip kein Unterschied zur Methode a. Der Polarisationsvorsatz bei a wurde bei b (LCD-Technologie; liquid crystal device) ist in die Stereobrille integriert. Die Stereobrille funktioniert als „aktive Shutter-Brille“. (vgl. „Crystal Eyes“ von Stereographics, Kalifornien, USA)

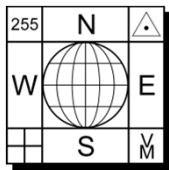
Weitere Informationen: <http://www.reald.com/scientific/>



Passive Stereo Configuration



Active Stereo Configuration



5.1.2 Künstliches räumliches Sehen

Künstliche Steigerung der Tiefenwahrnehmung

Die minimale wahrnehmbare Tiefe dY (vgl. Abschnitt 5.1.1.2) kann auf 2 Arten verbessert werden:

(1) durch Vergrößern der Basis (Faktor n)

- Basisvergrößerung durch die Aufnahmedisposition
- Basisvergrößerung durch das Auswertegerät (bei optischer Projektion)

n ... spezifische Plastik

(2) durch Verkleinern des Grenzwertes des parallaktischen Winkels durch Fernrohrvergrößerung (Faktor v). Raumeindruck wird hierbei kulissenartig verflacht.

Steigerung insgesamt: **totale Plastik = $n \cdot v$**

Verbesserung der Tiefenwahrnehmung: $dY = \frac{1}{n \cdot v} \cdot \frac{Y^2}{b_a} \cdot d\gamma$

Die gebräuchlichen Luftaufnahmen vermitteln bei stereoskopischer Betrachtung einen beachtlich **überhöhten Raumeindruck** → gesteigerte Plastizität.

	SW	NW	WW	ÜWW
c (mm)	600	300	150	85
B/H	1:6.6	1:3.3	1:1.6	1:0.9
ü	0.9	1.9	3.8	6.7

$$\ddot{u} = \frac{B}{H} \cdot \frac{d_a}{b_a}$$

Überhöhungsfaktor \ddot{u} bei der Betrachtung von Stereobildpaaren für $b_a/d_a = 65/400 = 1:6.2$ (Bildformat 23 cm x 23 cm, Längsüberdeckung 60%)

b_a ... Augenbasis

d_a ... scheinbare Entfernung, in der das virtuelle Raumbild entsteht (d_a ist nahezu unabhängig von der Vergrößerung des Stereoskops und dem Abstand der beiden Bilder zueinander!)

B ... Aufnahmebasis

H ... Flughöhe über Grund

Bei der Photointerpretation ist die gesteigerte Plastizität zu berücksichtigen. In der Photogrammetrie (Bildmessung) braucht man sich nicht um diesen Effekt kümmern. Ein guter Stereoeffekt ist beim Messen von korrespondierenden Punkten in den beiden Stereobildern von Vorteil.



5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.1 Grundlagen und Definitionen

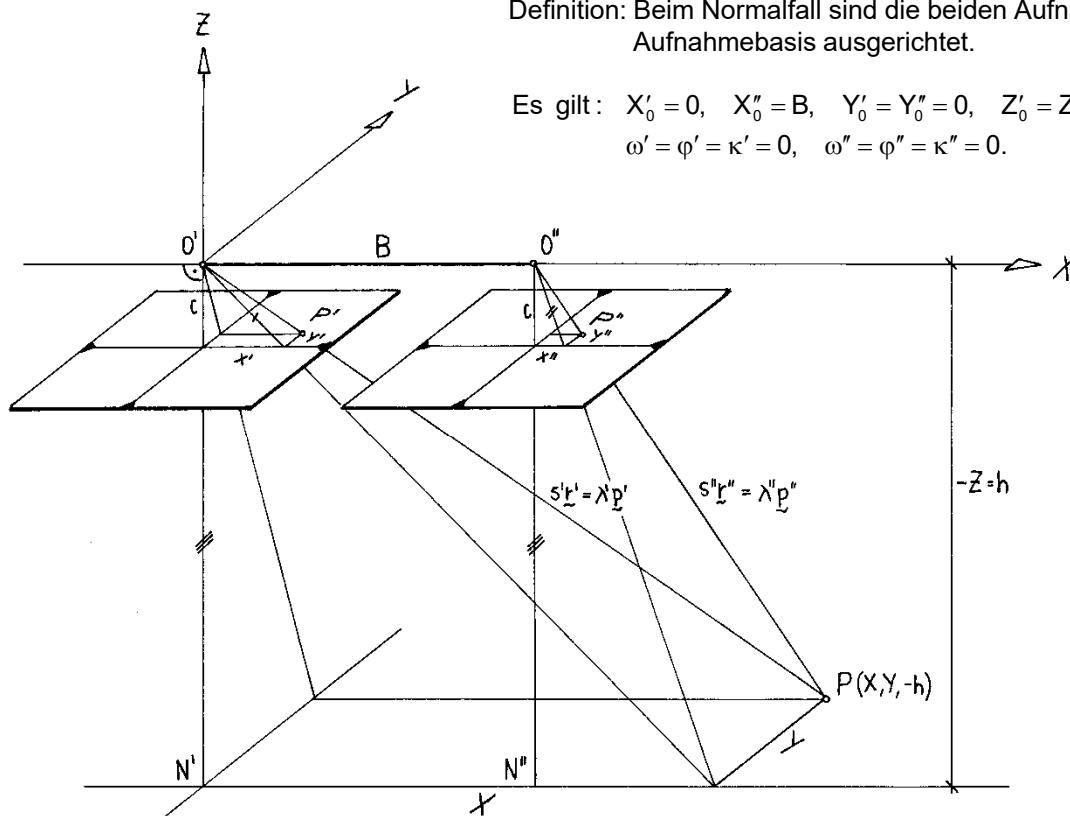
Die Zweibild- oder Stereophotogrammetrie dient zur Erfassung *räumlicher Objekte* mit Hilfe von zwei aus verschiedenen Standpunkten aufgenommenen Messbildern.

Die *Rekonstruktion* des Objektes – i. Allg. eines Modells desselben – erfolgt punktweise.

Bei bekannter äußerer Orientierung der beiden Messbilder kann die Punktlage $P(X, Y, Z)$ durch einen **räumlichen Vorwärtsschnitt** berechnet werden. Die Auswertung gestaltet sich besonders einfach beim sog. **Normalfall** (eigentlich **Stereonormalfall**).

Definition: Beim Normalfall sind die beiden Aufnahmerichtungen zueinander parallel und normal zur Aufnahmebasis ausgerichtet.

$$\left. \begin{aligned} \text{Es gilt: } X'_0 = 0, \quad X''_0 = B, \quad Y'_0 = Y''_0 = 0, \quad Z'_0 = Z''_0 = 0; \\ \omega' = \varphi' = \kappa' = 0, \quad \omega'' = \varphi'' = \kappa'' = 0. \end{aligned} \right\} \text{Elemente der äußeren Orientierung}$$



B ... Abstand der Projektionszentren O' und O''
(„**Stereobasis**“)

Basis wird in die X -Achse des Modellsystems gelegt.
Ursprung im linken Projektionszentrum.

$$\begin{aligned} Z - Z_0 &= -h \\ x_0 &= y_0 = 0 \end{aligned}$$

Normalfall der Stereophotogrammetrie.



5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.1 Grundlagen und Definitionen

Zweck: Der Normalfall stellt eine photogrammetrische Idealvorstellung dar.

- Der Normalfall kann in der Luftbildaufnahme i. Allg. nicht realisiert werden. Es wird daher der **genäherte Normalfall** angestrebt. Die Messbilder sind in diesem Falle **genäherte Senkrechtaufnahmen** (vgl. Einbildauswertung).
- In der terrestrischen Photogrammetrie ist der horizontale Stereonormalfall die Standard-aufnahmendisposition. Mit dem Phototheodoliten könnte man den Normalfall streng realisieren. Anmerkung: Die ersten photogrammetrischen Stereoauswertegeräte konnten nur Normalfälle auswerten. Die damit verbundene Orientierungs- und Auswerteprozess war relativ einfach.
- Die Ableitung der grundlegenden Beziehungen der Zweibildauswertung ist leicht möglich.
- Problemloser Übergang zum genäherten Stereonormalfall. (Behandlung von relativer und absoluter Orientierung)

Mathematische Formulierung

$$\mathbf{X}'_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{E} \quad \dots \text{ linke Messaufnahme}$$

$$\mathbf{X}''_0 = \begin{pmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}'' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{E} \quad \dots \text{ rechte Messaufnahme}$$

Beim Normalfall geht die räumliche Drehmatrix \mathbf{R} für beide Bilder in die Einheitsmatrix \mathbf{E} über.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{i_1(x - x_0) + j_1(y - y_0) - k_1 c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3 c} \Rightarrow X = X_0 + \frac{h}{c} \cdot (x - x_0)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{j_2(x - x_0) + j_2(y - y_0) - k_2 c}{i_3(x - x_0) + j_3(y - y_0) - k_3 c} \Rightarrow Y = Y_0 + \frac{h}{c} \cdot (y - y_0)$$

$$x = x_0 - c \cdot \frac{i_1(X - X_0) + i_2(Y - Y_0) + i_3(Z - Z_0)}{k_1(X - X_0) + k_2(Y - Y_0) + k_3(Z - Z_0)} \Rightarrow x = x_0 + \frac{c}{h} \cdot (X - X_0)$$

$$y = y_0 - c \cdot \frac{j_1(X - X_0) + j_2(Y - Y_0) + j_3(Z - Z_0)}{k_1(X - X_0) + k_2(Y - Y_0) + k_3(Z - Z_0)} \Rightarrow y = y_0 + \frac{c}{h} \cdot (Y - Y_0)$$

bzw. für beide Bilder: $x_0 = y_0 = 0$

$$\text{linkes Bild: } X = \frac{h}{c} \cdot x' \quad \Leftrightarrow \quad x' = \frac{c}{h} \cdot X \quad (1)$$

$$Y = \frac{h}{c} \cdot y' \quad \Leftrightarrow \quad y' = \frac{c}{h} \cdot Y \quad (2)$$

$$\text{rechtes Bild: } X = \mathbf{B} + \frac{h}{c} \cdot x'' \quad \Leftrightarrow \quad x'' = \frac{c}{h} \cdot (X - \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$Y = \frac{h}{c} \cdot y'' \quad \Leftrightarrow \quad y'' = \frac{c}{h} \cdot Y \quad (4)$$



5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.1 Grundlagen und Definitionen

Für jeden Punkt kann man 4 Beobachtungsgleichungen anschreiben, d.h. 4 Bildkoordinaten stehen 3 Objektkoordinaten gegenüber. Es muss daher **eine Bedingung** vorliegen.

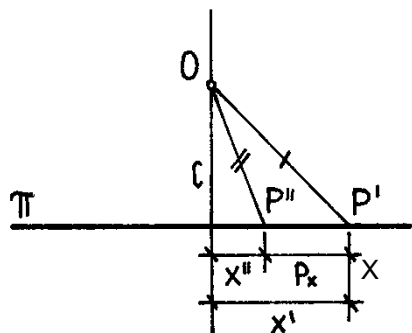
Gleichungen (2) und (4) stimmen nur dann, wenn $y' = y''$.

$$p_y = y' - y'' = 0 \quad (\text{keine } y\text{-Parallaxe})$$

$$\text{Es ergibt sich dann: } Y = \frac{h}{c} \cdot y' = \frac{h}{c} \cdot y'' = m_b \cdot y' = m_b \cdot y''$$

Von einem relativ orientierten Stereomodell verlangt man, dass keine y-Parallaxen vorhanden sind!

$$p_x = x' - x'' \quad \dots \quad (\text{absolute}) \quad x\text{-Parallaxe} \quad (\text{entspricht der Horizontalparallaxe!})$$



$$\text{Aus (1) und (3) folgt: } \frac{h}{c} \cdot x' = B + \frac{h}{c} \cdot x'' \quad \Rightarrow \quad h = \frac{c \cdot B}{p_x} = -Z \quad ; \quad \lambda' = \lambda'' = \frac{B}{p_x} \quad \dots \quad \text{Streckungsfaktor}$$

Die x-Parallaxe kann mit einem Stereokomparator direkt gemessen werden.

Zusammenfassung: Die beiden Aufnahmen legen 4 Gleichungen fest, womit 3 unbekannte Größen (X,Y,h) bestimmt werden können.

(X,Y,h) ... Raumkoordinaten des Objektpunktes



$$\begin{aligned} X &= \frac{h}{c} \cdot x' \\ Y &= \frac{h}{c} \cdot y' = \frac{h}{c} \cdot y'' \\ h &= -Z = \frac{c \cdot B}{p_x} \end{aligned}$$



5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.2 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Berechnung der Modellkoordinaten aus Bildkoordinaten

Vgl. die Formeln des Abschnittes 2.3.2.

Gegeben : $x_0, y_0, c; \mathbf{X}'_0, \mathbf{R}'_0, \mathbf{X}''_0, \mathbf{R}''_0$ (fehlerfrei oder mit Unsicherheiten behaftet)

Gemessen : x', y', x'', y'' (mit Messfehlern behaftete Bildkoordinaten)

Gesucht : X, Y, Z

Die angegebenen Formeln gelten nicht nur für den genäherten Normalfall sondern auch für den Allgemeinfeld der Zweibildauswertung.

Die Berechnung der Modellkoordinaten erfolgt nicht durch strenge Ausgleichung:

Ausgangsformel : $\mathbf{X} - \mathbf{X}_0 = \lambda \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$

$$\frac{X - X'_0}{u'} = \frac{Y - Y'_0}{v'} \quad (a)$$

$$\frac{X - X'_0}{u'} = \frac{Z - Z'_0}{w'} \quad (c)$$

$$X = X' = X''$$

$$Z = Z' = Z''$$

Vereinbarung

$$\frac{X - X''_0}{u''} = \frac{Y - Y''_0}{v''} \quad (b)$$

$$\frac{X - X''_0}{u''} = \frac{Z - Z''_0}{w''} \quad (d)$$

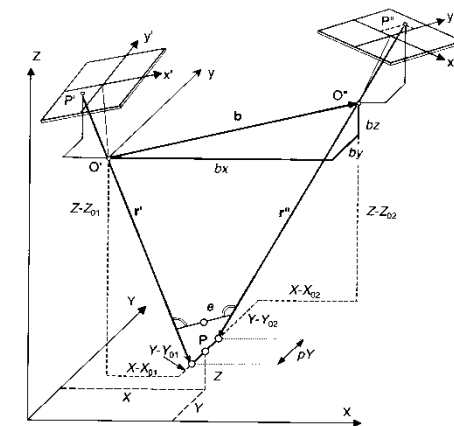
$$Y = \frac{(Y' + Y'')}{2}$$

Aus Gleichung (c) und (d) wird X und Z berechnet.

(a) und (b) liefern zwei Werte Y' , Y'' . Die Koordinate für Y ergibt sich aus dem Mittelwert von Y' und Y'' .

Die verbliebenen Diskrepanzen $Y' - Y'' = p_Y$ heißen **Restparallaxen** und sind somit im Falle der relativen Orientierung der beiden Messbilder zueinander ein Qualitätsmaß für das Stereomodell.

Rechnerische Auswertung





5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.3 Fehlertheorie des Normalfalles

Genauigkeitsgesetze der Photogrammetrie

- Messgrößen: x', y', p_x ; sie bestimmen indirekt die Objektkoordinaten X, Y und Z (bzw. h)
- Messfehler: $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{p_x}$
- Kammerkonstante c und Stereobasis B sind fehlerfrei angenommen

$\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$... Bildkoordinatenmessfehler
 σ_{p_x} ... Parallaxenmessfehler
 $\frac{B}{h}$... Basis – Höhenverhältnis (= Basisverhältnis)
 $\lambda = \frac{h}{c}$... Bildmaßstabszahl

Anmerkung: Die Angabe **einer** Bildmaßstabszahl λ ($= m_b$) für das **ganze** Bild ist nur dann streng rechtfertigt, wenn Bild- und Objektebene parallel zueinander sind. Für $h \approx \text{const.}$ kann man eine mittlere Maßstabszahl berechnen und diese als Rechenwert einführen.

Durch Anwenden des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Berechnungsformeln

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{c \cdot B}{p_x} \\ X &= \frac{h}{c} \cdot x' \\ Y &= \frac{h}{c} \cdot y' \end{aligned} \right\} \text{erhält man}$$

$$\sigma_h = \pm m_b \cdot \frac{h}{B} \cdot \sigma_{p_x} = \frac{h^2}{c \cdot B} \cdot \sigma_{p_x}$$

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\left(\frac{x'}{c} \cdot m_b \cdot \frac{h}{B} \cdot \sigma_{p_x} \right)^2 + (m_b \cdot \sigma_{x'})^2}$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\left(\frac{y'}{c} \cdot m_b \cdot \frac{h}{B} \cdot \sigma_{p_x} \right)^2 + (m_b \cdot \sigma_{y'})^2}$$

Anmerkung:

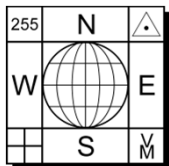
Kettenregel: \rightarrow

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{x}{c} \cdot \sigma_h \right)^2 + \left(\frac{h}{c} \cdot \sigma_{x'} \right)^2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{y}{c} \cdot \sigma_h \right)^2 + \left(\frac{h}{c} \cdot \sigma_{y'} \right)^2}$$

$$dh = -\frac{c \cdot B}{p_x^2} \cdot dp_x = -\frac{h^2}{c \cdot B} \cdot dp_x = -m_b \cdot \frac{h}{B} \cdot dp_x$$

$$\frac{h}{c} = m_b$$



5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.3 Fehlertheorie des Normalfalles

Aus den dargelegten Formeln können folgende **Genauigkeitsgesetze der Photogrammetrie** abgeleitet werden:

1. Mit einem geeigneten Bildmaßstab $M_b = 1:m_b$ kann jede gewünschte Genauigkeit erreicht werden.
2. Bei einem konstanten Basis-Höhenverhältnis B/h sind die Genauigkeiten aller drei Koordinaten direkt proportional zur Bildmaßstabszahl m_b .
3. $m_b = \text{const.}$, dann ist die Genauigkeit der Z-Koordinate umgekehrt proportional zum Basis-Höhenverhältnis.

Die Genauigkeiten der XY-Koordinaten verschlechtern sich dagegen nur geringfügig mit Verkleinerung des Basis-Höhenverhältnisses.

Bei $B/h = 1:1$ sind alle 3 Koordinaten etwa gleich genau zu bestimmen.

4. Bei konstanter Basis wachsen die mittleren Fehler der Z-Koordinaten mit dem **Quadrat der Aufnahmeentfernung**. (= wichtigstes Gesetz)



5.2 Normalfall der Zweibildauswertung

5.2.3 Fehlertheorie des Normalfalles

Zahlenbeispiel:

Gegeben : Bildkoordinaten $x' = y' = 50 \text{ mm} \pm 7 \text{ } \mu\text{m}$
 Parallaxenmessgenauigkeit $\sigma_{px} = \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$
 Kammerkons tante $c = 150 \text{ mm}$

Gesucht sind die mittleren Fehler der Objektkoordinaten in Abhängigkeit von der Bildmaßstabszahl und vom Basisverhältnis $B/Z (= B/h)$.

m_b	$B/Z = 1:1$		$B/Z = 1:3$		$B/Z = 1:10$		$B/Z = 1:20$	
	σ_{xy}	σ_z	σ_{xy}	σ_z	σ_{xy}	σ_z	σ_{xy}	σ_z
50000	0.36	0.25	0.43	0.75	0.90	2.50	1.70	5.00 m
10000	0.72	0.50	0.86	1.50	1.81	5.00	3.41	10.00 dm
1000	0.72	0.50	0.86	1.50	1.81	5.00	3.41	10.00 cm
100	0.72	0.50	0.86	1.50	1.81	5.00	3.41	10.00 mm
25	0.18	0.13	0.22	0.38	0.45	1.25	0.85	2.50 mm

Genauigkeit der Photogrammetrie abhängig vom Bildmaßstab und vom Basisverhältnis.





5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

5.3.1 Stereoskopisches Messprinzip

Wiederholung: Die einfachste Art der photogrammetrischen Messung besteht aus der Messung von Bildkoordinaten in Einzelbildern. Die Messung von Bildkoordinaten im Einzelbild erfolgt im *Monokomparator*. Der Bildpunkt der ausgemessen werden soll, wird mit einer Messmarke (+, •, °) zur Deckung gebracht. Messgenauigkeit: $\pm 1 \mu\text{m}$.

Im Gegensatz zum Monokomparator sollen nun beide Bilder eines Stereomodells gleichzeitig ausgemessen werden.

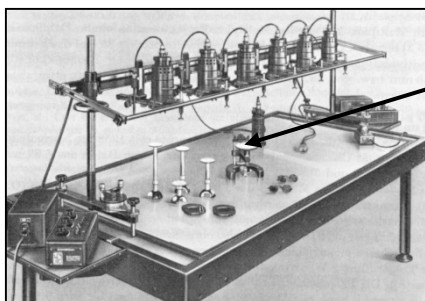
Die räumliche stereoskopische Messung kann mit einer

- a) **reellen Raummessmarke** (nicht mehr aktuell) oder mit einer
- b) **virtuellen Raummessmarke** erfolgen.

ad a) **Reelle Raummessmarke**

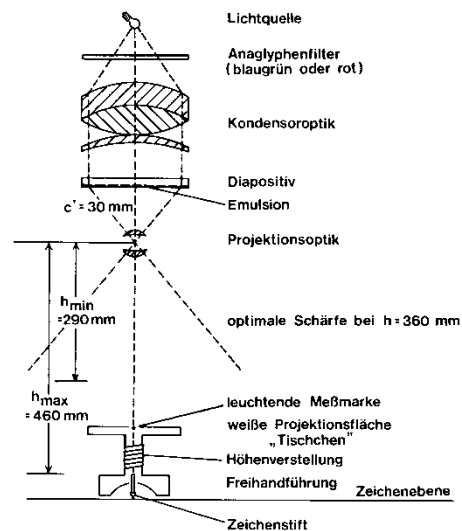
Bei projizierten, direkt betrachteten Stereobildern (Anaglyphentechnik) besteht die reelle Messmarke aus einem auf der Projektionsfläche gekennzeichneten oder einfach aufprojizierten Lichtpunkt, welcher vom Auge, je nach den vorhandenen Horizontalparallaxen, als im Raum schwebender Punkt gesehen wird. Ist keine Parallaxe vorhanden, so „sitzt“ der Punkt am Gelände auf.

Multiplex: eines der ersten kommerziellen Stereoauswertegeräte der Welt, 1938, Anaglyphentechnik.

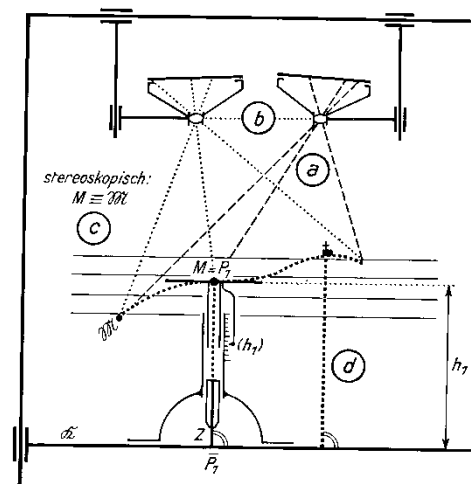


Messmarke

← Überweitwinkelmultiplex der Firma Jenoptik.



Prinzipskizze des Multiplex.



Der Aufbau eines räumlichen Meß- und Kartiergerätes:
 (a) = Projektions-System (c) = Beobachtungs-System
 (b) = Basis-System (d) = Meß- und Ausgabe-System

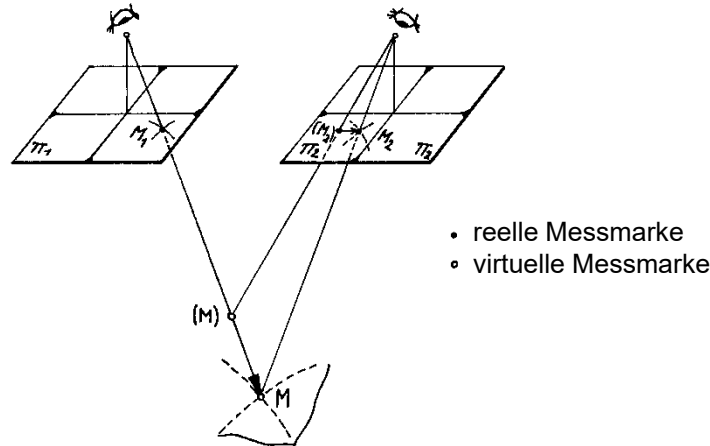
Doppelprojektor.



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

5.3.1 Stereoskopisches Messprinzip

ad b) Virtuelle Raummessmarke



Bei diesem Verfahren des stereoskopischen Messens werden **2 Messmarken** verwendet, die z.B. unter einem Spiegelstereoskop über den beiden Teilbildern (Π_1, Π_2) verschoben werden. In diesem Fall verschmelzen die beiden Teilbilder zu einem virtuellen Raumbild und die beiden Messmarken M_1 und M_2 – sofern keine Vertikalparallaxen vorhanden sind – zu einer **virtuellen Raummessmarke M**.

Befinden sich die beiden Messmarken in der Nähe eines *homologen Punktepaars*, so verschmelzen sie bei stereoskopischer Betrachtung zu einer „**räumlichen Marke M**“ ($\gamma_{\max} - \gamma_{\min} \leq 70'$).

Bei der Verschiebung der rechten Messmarke von der Position (M_2) in die richtige Position M_2 wandert die virtuelle Messmarke im Raumbild von der Position (M) in die Position M. Die Verschiebung der Messmarke in der Ebene wird als Höhen- bzw. Tiefenverschiebung wahrgenommen. Nach dem stereoskopischen „**Aufsetzen**“ der räumlichen Messmarke auf einen bestimmten Objektpunkt sind in beiden Teilbildern die korrespondierenden Punkte mit den Messmarken M_1 und M_2 fixiert. Falls entsprechende Messeinrichtungen vorhanden sind, können auch die Bildkoordinaten der beiden Bildpunkte (= Messmarken) abgelesen werden.



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

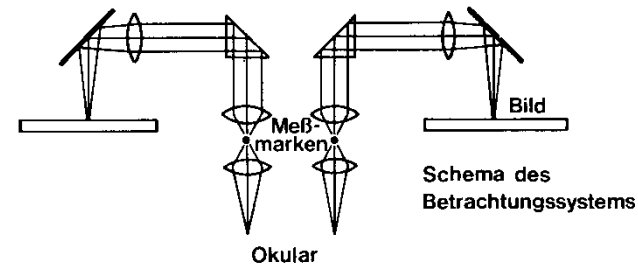
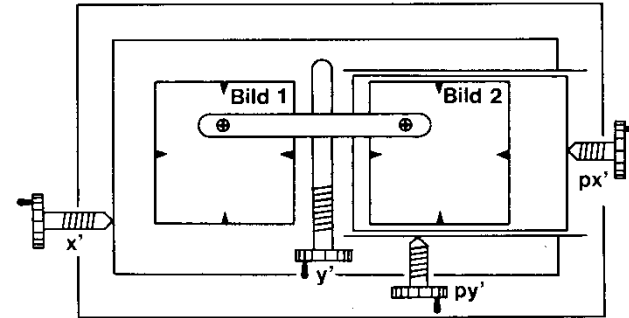
5.3.1 Stereoskopisches Messprinzip

F. Stolze hat 1892 das Messgitter erfunden. Diese Idee hat C. Pulfrich (dt. Optiker, 1858-1927) aufgegriffen (⇒ wandernde Messmarke).

Pulfrich hat 1901 bei der Firma Carl Zeiss Jena den ersten Stereokomparator entwickelt.

Aus dem Stereokomparator entwickelte sich der Stereoautograph (Eduard Ritter v. Orel, 1909), mit dem man kontinuierlich Grundriss- und Höhenlinien auswerten konnte.

Stereokomparatoren spielen heute keine Rolle mehr. (vgl. Monokomparator und analytisches Auswertegerät).



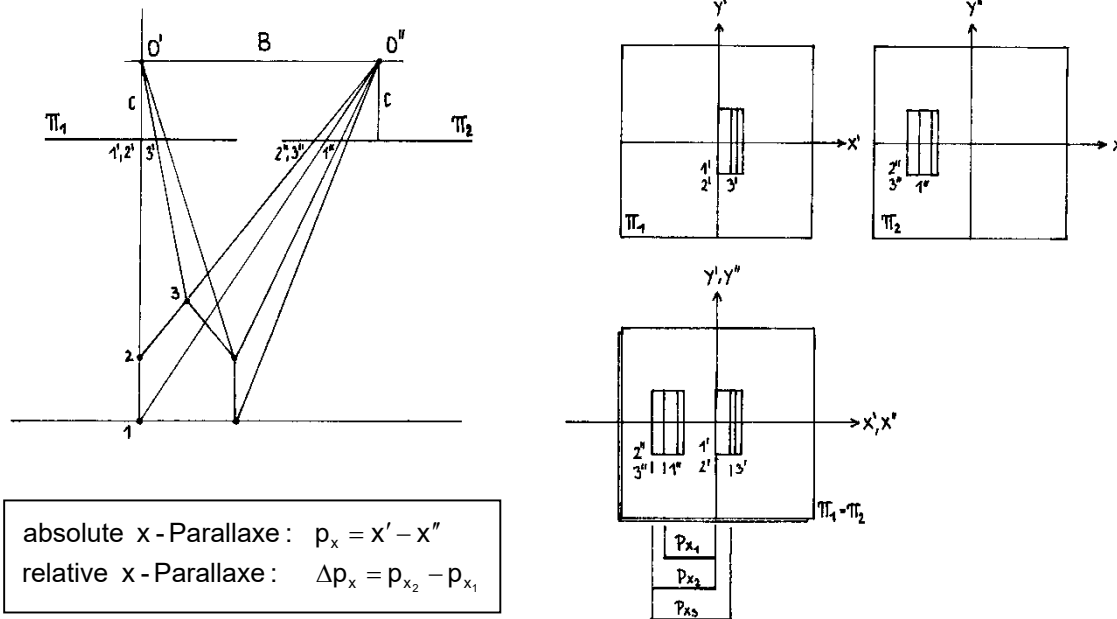
Prinzip eines Stereokomparators nach Pulfrich.



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

5.3.2 x-Parallaxe

Annahme: Stereonormalfall und annähernd ebenes Gelände.



Näher beim Aufnahmeort liegende Punkte haben eine größere x-Parallaxe (= Horizontalparallaxe) als solche, welche vom Aufnahmeort weiter entfernt sind. Für Punkte im Unendlichen ist die x-Parallaxe gleich Null (\Rightarrow Abbildungsstrahlen sind parallel zueinander).

Messmarke liegt scheinbar am Gelände auf: Messmarkenabstand = p_x des darunter liegenden Punktes.
 Messmarke liegt scheinbar über dem Gelände: Messmarkenabstand $> p_x$ des darunter liegenden Punktes.
 Messmarke liegt scheinbar unter dem Gelände: Messmarkenabstand $< p_x$ des darüber liegenden Punktes.

- Absolute Parallaxen können aus gemessenen Bildkoordinaten berechnet werden.
- Relative Parallaxen können mittels **Stereometer (Stereomikrometer)** sehr einfach gemessen werden. Das Stereometer ist ein einfaches photogrammetrisches Zweibildauswertegerät, mit dem man allerdings nur *Höhenunterschiede* zwischen einzelnen, benachbarten Punkten ermitteln kann.



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

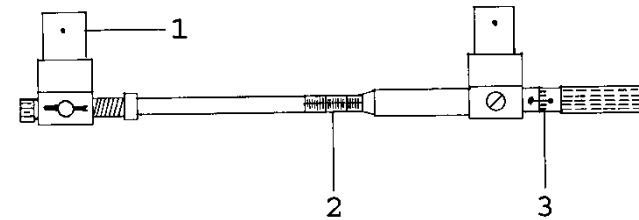
5.3.2 x-Parallaxe

Beschreibung des Stereomikrometers:

Ein Stereomikrometer besteht aus einer Stange mit zwei Messmarken auf Glasplättchen. Die eine Messmarke lässt sich mit einer Mikrometerschraube zur anderen verschieben. Mit dieser Vorrichtung kann unter gewissen Voraussetzungen die *Differenz der Horizontalparallaxen* (relative x-Parallaxe) zwischen zwei Bildpunkten gemessen werden, woraus man die Höhendifferenz ΔZ berechnen kann. Die Ablesewerte am Stereomikrometer beziehen sich auf einen beliebigen Nullpunkt.

$$\left. \begin{array}{l} w_1 = x'_1 - x''_1 + k \\ w_2 = x'_2 - x''_2 + k \end{array} \right\} \Delta p_x = p_{x_2} - p_{x_1} = w_2 - w_1$$

Δp_x ... Differenz der Horizontalparallaxen



Stereomikrometer:

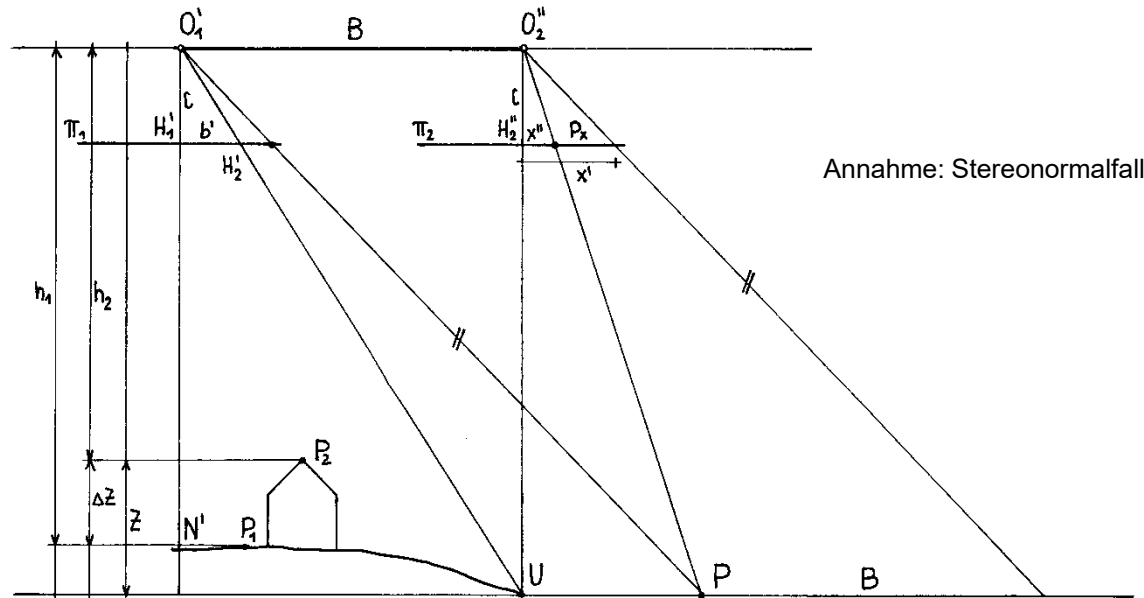
- 1 = Messmarken
- 2 = Millimeterskala
- 3 = Mikrometerschraube mit
Ablesenonius (i.d.R. 0.01 mm)



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

5.3.3 Praktische Durchführung

Der Höhenunterschied ΔZ der Punkte P_1 und P_2 soll berechnet werden.



$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{c \cdot B}{p_{x_1}} \\
 h_2 &= \frac{c \cdot B}{p_{x_2}}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} h_1 \\ h_2 \end{aligned}} \right\} \Delta Z = h_2 - h_1 = c \cdot B \cdot \frac{(p_{x_2} - p_{x_1})}{p_{x_1} \cdot p_{x_2}} = c \cdot B \cdot \frac{\Delta p_x}{p_{x_1} \cdot p_{x_2}} \Rightarrow$$

$$p_{x_2} = p_{x_1} + \Delta p_x$$

$$h = \frac{c \cdot B}{p_{x_1}}$$

Diese Formel gilt streng für beliebig große Höhenunterschiede.

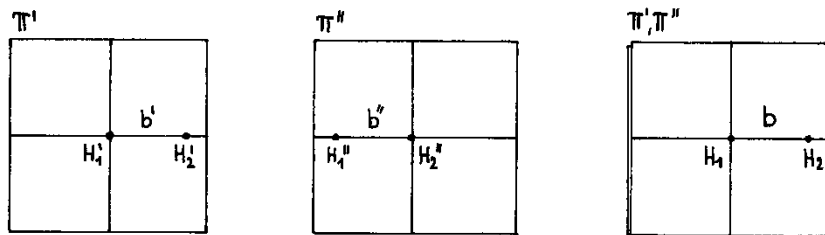
$$\Delta Z = \frac{h_1 \cdot \Delta p_x}{p_{x_1} + \Delta p_x}$$



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

5.3.3 Praktische Durchführung

Stellt man mit dem Stereomikrometer als ersten Punkt den Bildhauptpunkt H'' ein, so bezieht sich die Parallaxendifferenz Δp_x eines beliebigen Punktes P auf die Basis b' (= Abstand der beiden Hauptpunkte im linken Bild) und man erhält auf diese Weise die Höhe Z bezogen auf den Nullpunkt U .



$$Z = \frac{h_U}{b + \Delta p_x} \cdot \Delta p_x = \frac{h_U}{b \cdot \left(1 + \frac{\Delta p_x}{b}\right)} \cdot \Delta p_x \quad (\text{gilt streng wie vorhin})$$

h_g ... Flughöhe über Grund

Bei sehr kleinen Höhenunterschieden dZ ist der Quotient $\Delta p_x/b \ll 1$ und es ergibt sich folgende vereinfachte Formel:

$$dZ \approx \frac{h_g}{b} \cdot \Delta p_x \approx \frac{c \cdot m_b}{b} \cdot \Delta p_x$$

Diskussion:

- Die Näherungsformel kann nur für kleine Höhenunterschiede herangezogen werden.

$$\text{Fehler wegen Vernachlässigung Glieder höherer Ordnung} = -\frac{dZ^2}{h_g}$$

Im Falle einer genäherten Senkrechtaufnahme ist die Bezugsfläche eine Fläche 2. Ordnung (= verursacht durch die Abweichung vom Normalfall).

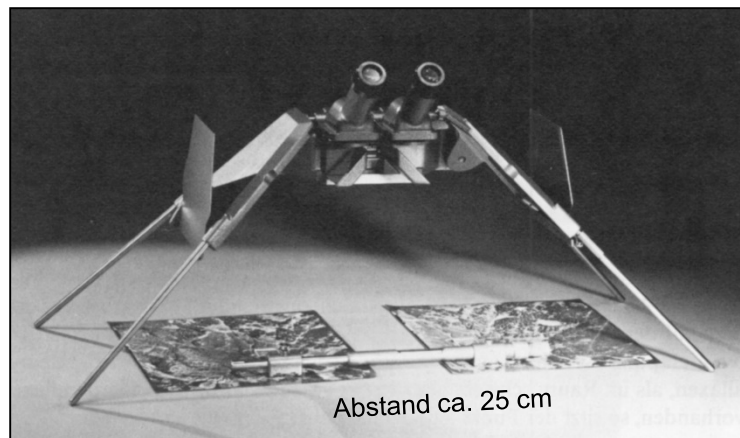
- Luftbilder können mit diesem Verfahren deshalb nur dann ausgewertet werden, wenn die beiden Punkte, deren Höhenunterschied festgestellt werden soll, so nahe bei einander liegen, dass der Einfluss der **Modelldeformation** (vgl. Abschnitt 5.4.2.1) vernachlässigt werden kann.

Mit dem Stereometer kann man daher nur *Höhen von Gebäuden, Bäumen, etc.* messen. Es ist auch die Messung von Hangneigungen möglich. Höhenunterschiede zwischen Tallagen und Bergspitzen kann man mit diesem einfachen Verfahren nicht bestimmen, da die Punkte i. Allg. weit auseinander liegen und einen großen Höhenunterschied aufweisen. Bergspitze zu Bergspitze funktioniert ebenfalls nicht!



5.3 Einfache Messung von kleinen Höhendifferenzen

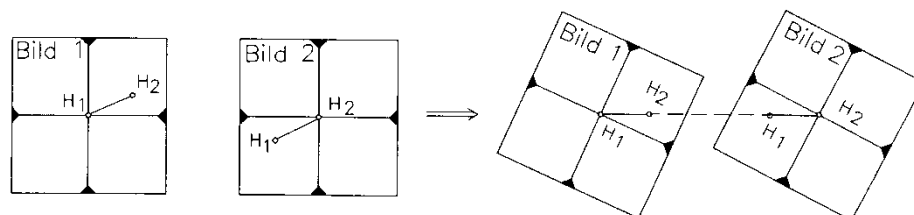
5.3.3 Praktische Durchführung



Gegeben: Stereobildpaar
(genäherte Senkrechtaufnahme)
 c , m_b bzw. h_g

Gesucht: Gebäudehöhen mit Fehlerangabe

Spiegelstereoskop
ST4 von Wild
+
Stereomikrometer
ST4S von Wild
←



Orientierung von genäherten Senkrechtaufnahmen für die Stereoskopie.

Bei der stereoskopischen Betrachtung zweier Bilder müssen die *Kernstrahlen* in der *Augenebene* liegen. Unter der Annahme es handelt sich um einen Stereonormalfall, so müssen die 4 Hauptpunkte auf einer Geraden liegen \Rightarrow 3 Freiheitsgrade bei der Stereobildorientierung: 2 Verschiebungen und 1 Verkantung (= vereinfachte relative Orientierung für den Stereonormalfall). Sodann ist das gesamte Stereomodell parallaxfrei ($p_y = 0$ in allen Punkten). Beim genäherten Normalfall gilt das nicht mehr! Es muss daher bei jeder Punktmessung lokal die vorher definierte Voraussetzung realisiert werden. Dies geschieht durch differentielles Verkanten des Spiegelstereoskopes.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.1 Motivation und Definition

Unter Orientierung zweier Bilder zueinander (= **relativ**) und gegenüber dem Landessystem oder einem lokalen Projektssystem (= **absolut**) ist jener Vorgang zu verstehen, durch welchen die für den räumlichen Vorwärtsschnitt gemäß Abschnitt 5.2.2 notwendigen Lageparameter ermittelt werden. Dies sind

$$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$$

pro Bild, also insgesamt zwölf. Für die eindeutige Orientierung eines Stereobildpaares sind demnach **12 Unbekannte** zu ermitteln. Da bekanntlich ein räumlicher Punkthaufen mit **7 Parametern (räumliche Drehstreckung)**, und zwar drei *Translationen*, drei *Rotationen* und einem *Maßstabsfaktor* mit einem übergeordneten Raumsystem zu verknüpfen ist, verbleiben **5 Parameter**, um den räumlichen Punkthaufen (= **Stereomodell**) aus den beiden Bildern herzustellen. Die beiden Parametergruppen sind die Parameter der

- | | | |
|--------------------------|---|------------------------|
| a) relative Orientierung | } | = äußere Orientierung. |
| b) absolute Orientierung | | |

Dazu kann noch die

- c) **innere Orientierung**

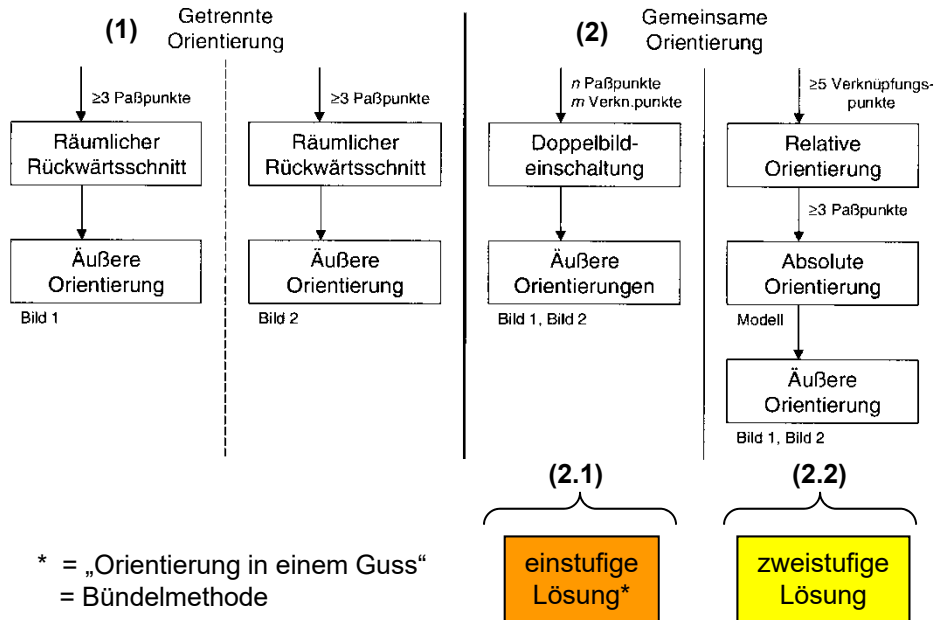
kommen, also x_0 , y_0 und c , wenn die verwendete Kamera nicht kalibriert ist oder wenn Verdacht besteht, dass sich die innere Orientierung geändert hat. Aufnahmen mit „normalen“ Kameras (= Amateur- und professionelle Kameras) sind prinzipiell als nicht kalibriert anzusehen. Solche Kameras werden als *nichtmetrisch* bezeichnet.

Zur Lösung der 12 Elemente der äußeren Orientierung sind *Passpunkte* erforderlich, deren Objektkoordinaten bekannt und die in den beiden Bildern eindeutig identifizierbar sind. Die äußere Orientierung kann mit unterschiedlichen Verfahren ermittelt werden. (Anmerkung: Einige Verfahren sind jedoch nicht mehr aktuell.)



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung



Orientierungsverfahren für Stereobilder.

Passpunkte: Dies sind meist natürliche Punkte, die a priori am Objekt vorhanden sind und in den Bildern eindeutig identifiziert werden können. Man unterscheidet zwischen *Vollpasspunkten* (X, Y, Z) , *Lagepasspunkten* (X, Y) und *Höhenpasspunkten*.

Verknüpfungspunkte: Verknüpfungspunkte sind identische (*homologe*) Objektpunkte, deren Bildkoordinaten in den einzelnen (≥ 2) Bildern gemessen werden. Sie dienen der geometrischen Verknüpfung zweier oder mehrerer Bilder und müssen keine Passpunkte sein. Eine zuverlässige Identifizierung der Verknüpfungspunkte (= homologen Punkte) erfolgt durch die stereoskopische Betrachtung (vgl. Abschnitt 5.3.1). Die monoskopische Einzelbildmessung ist bei natürlichen Verknüpfungspunkten bei weitem nicht so genau wie die stereoskopische Zweibildmessung. In der Digitalphotogrammetrie können homologe Bildpunkte durch automatische Zuordnungsverfahren (= image matching) in großer Anzahl schnell und zuverlässig bestimmt werden (vgl. Abschnitt 5.7).



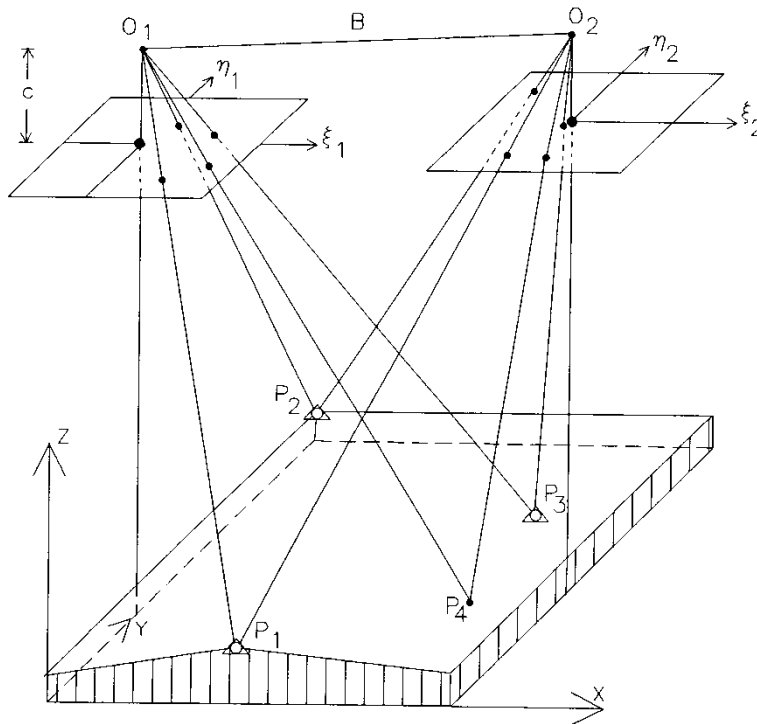
5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung

(1) Getrennte Orientierung der beiden Bilder

Die Elemente der äußeren Orientierung werden für beide Bilder getrennt durch **räumlichen Rückwärtsschnitt** (vgl. Abschnitt 4.3.1) bestimmt.

Je Bild sind mindestens 3 Passpunkte (= Vollpasspunkte) notwendig.
Die verwendeten Passpunkte können identisch sein, müssen es aber nicht.



Stereomodell mit drei Passpunkten und einem Verknüpfungspunkt.

Nachteile:

- Information, dass sich homologe Strahlen im Neupunkt, z.B. im Punkt P_4 , schneiden müssen, wird nicht ausgenutzt (= Nichtberücksichtigung der Schnittbedingung oder auch Komplanaritätsbedingung).
- Es sind i. Allg. mehr Passpunkte erforderlich als für andere Orientierungsverfahren.
- Das Problem ist nur rechnerisch lösbar (vielleicht heute kein Argument mehr!).



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung

(2) Gemeinsame Orientierung der beiden Bilder

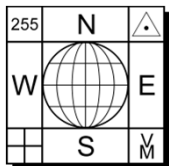
Neben den Passpunkten können bei diesem Verfahren auch solche Punkte (= Verknüpfungspunkte) verwendet werden, von denen nur die Bildkoordinaten bekannt sind, und die die Bedingung erfüllen, dass die dazugehörigen Projektionsstrahlen einander nach der Orientierung im Raum schneiden (= Schnittbedingung für homologe Strahlenbündel).

Wir unterscheiden zwischen der sogenannten „**einstufigen**“ und „**zweistufigen**“ Lösung.

(2.1) Einstufige Lösung („Orientierung in einem Guss“)

Es werden alle 12 Orientierungselemente (X'_0, R', X''_0, R'') simultan in einer vermittelnden Ausgleichung bestimmt. Dazu müssen die Abbildungsgleichungen mittels geeigneter Näherungswerte linearisiert werden (vgl. Abschnitt 4.3.1). Da die Ausgleichung mit beliebig vielen Pass- und Neupunkten (homologen Bildpunkten) durchgeführt werden kann, und aufgrund der verwendeten Abbildungsgleichungen der unmittelbare Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und den unbekanntem Orientierungselementen gegeben ist, stellt dies das *strengste Orientierungsverfahren* dar.

Bei zwei Bildern spricht man von der **Doppelbildeinschaltung**, welche selbst ein Sonderfall der **Bündelblockausgleichung** ist (vgl. Abschnitt 6.2.2).



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung

Beispiel 1: Doppelbildeinschaltung (vgl. die vorige Abbildung)

Gegeben: Elemente der inneren Orientierung (x_0, y_0, c) und 3 Vollpasspunkte P_1, P_2, P_3

Gemessen: 4 homologe Bildpunkte $P_i'(x_i', y_i'), P_i''(x_i'', y_i'')$ $i=1,4$

Gesucht: Elemente der äußeren Orientierung (X_0', R', X_0'', R'') und Neupunktskoordinaten P_4

Unbekannte: $(X_0, R) \times 2 \rightarrow 12$ U

Für jeden Passpunkt erhält man 4 Beobachtungsgleichungen. Jeder Neupunkt liefert ebenfalls 4 Beobachtungsgleichungen, jedoch kommen 3 weitere Unbekannte (X_4, Y_4, Z_4) hinzu. Daraus folgt, dass jeder Neupunkt **eine Überbestimmung (= Schnittbedingung)** in sich birgt.

Beobachtungsgleichungen: $4 \times 2 \times 2 = 16$ (n ... Anzahl der Beobachtungen)

Unbekannte: $(2 \times 6) + 3 = 15$ (u ... Anzahl der Unbekannten)

Überbestimmung (= Redundanz): $n - u = 1$

Eine Lösung ergibt sich i. Allg. dann, wenn $n - u \geq 0$.

Beispiel 2: Folgebildanschluss mit Maßstabsübertragung

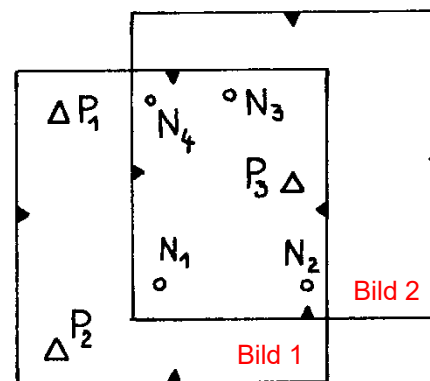
Bild 1: 3 Passpunkte P_1, P_2, P_3 + 4 Neupunkte N_i

Bild 2: Passpunkt P_3 + 4 Neupunkte N_i

$n = (7 \times 2) + (5 \times 2) = 24$

$u = (6 \times 2) + (4 \times 3) = 24$

Redundanz: $n - u = 0$



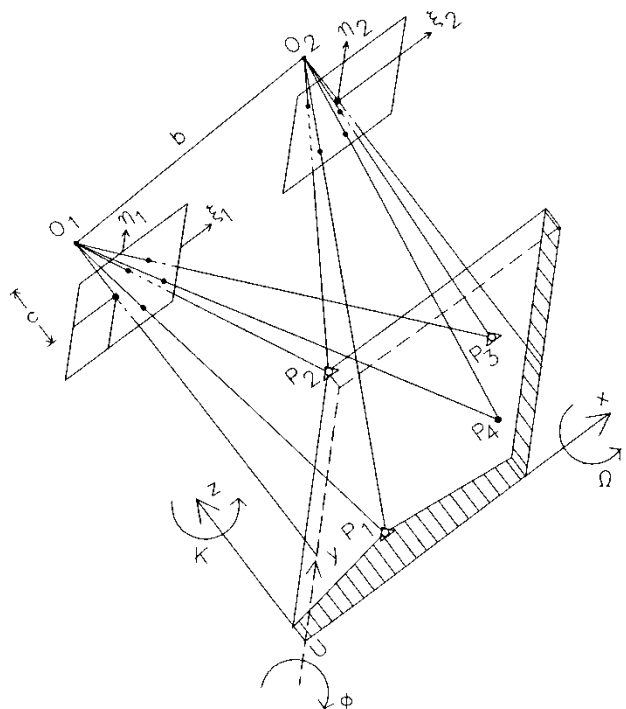
Beispiel 2



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

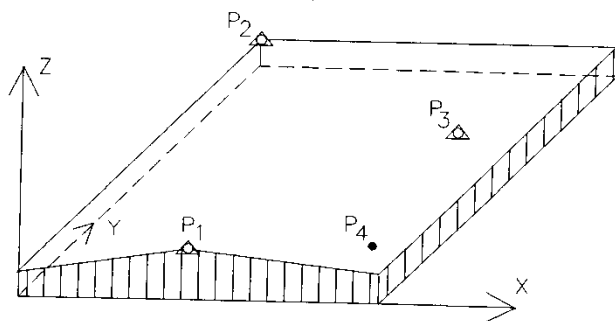
5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung

(2.2) Zweistufige Lösung



← Stereomodellbildung **relative Orientierung (5 U)**
 $(b, p', p'') = 0$

← räumliche Drehstreckung **absolute Orientierung (7 U)**



Zweistufiges Orientierungsverfahren.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung

(2.2) Zweistufige Lösung cont.

Diese Lösungsvariante arbeitet in 2 Stufen:

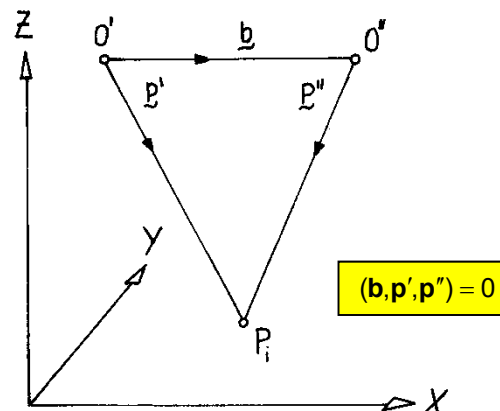
1. Stufe: **Relative Orientierung (gegenseitige Orientierung)**

In dieser Stufe wird die gegenseitige Lage der beiden Bilder zueinander bestimmt, sodass einander homologe Strahlen schneiden. Das **Stereomodell** ist dann hergestellt, wenn an mindestens **5** gut verteilten Punkten die Schnittbedingung homologer Projektionsstrahlen erfüllt ist:

$$(\mathbf{b}, \mathbf{p}'_i, \mathbf{p}''_i) = 0 \quad i = 1, \dots, 5.$$

Daraus folgt, dass für die Herstellung des Stereomodells keine Passpunkte erforderlich sind, sondern lediglich nur mind. 5 homologe Bildpunkte.

Das Stereomodell hat beliebigen Maßstab und auch beliebige Raumlage.



Schnittbedingung oder Komplanaritätsbedingung.



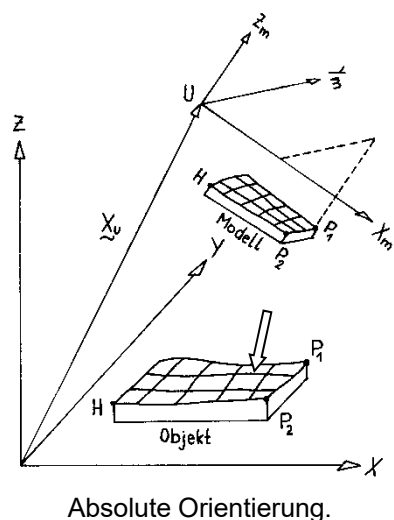
5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung

(2.2) Zweistufige Lösung cont.

2. Stufe: **Absolute Orientierung**

Hier wird das Stereomodell in das Passpunktenetz (mind. 2 Lage- und 3 Höhenpasspunkte) des übergeordneten Koordinatensystems mittels einer **räumlichen Drehstreckung (= räumliche Ähnlichkeitstransformation)** eingepasst.



$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_U + \mu \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}_m$$

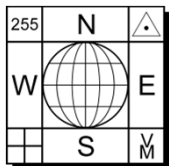
- \mathbf{X}_m ... Modellkoordinaten
- \mathbf{X} ... Objektkoordinaten (= Landeskoordinaten)
- \mathbf{X}_U ... Objektkoordinaten des Ursprungs des $X_m Y_m Z_m$ - Systems
- \mathbf{R} ... Drehmatrix
- λ ... Maßstabszahl

Elemente der räumlichen Ähnlichkeitstransformation: 7 Parameter

- X_U, Y_U, Z_U ... Verschiebung (3 U)
- Ω, Φ, K ... Drehungen (3 U)
- λ ... Maßstabszahl (1U)

Die Berechnung der 7 Unbekannten läuft auf die Lösung eines nicht linearen Systems (die Drehwinkel kommen transzendent vor) hinaus.

- Lösungsansätze:
- *simultane Berechnung* (gemeinsame Bestimmung aller 7 Unbekannten),
 - *getrennte Berechnung* für die Unbekannten der Lage (X_U, Y_U, K, λ) und die der Höhe (Z_U, Ω, Φ).
- Die getrennte Berechnung hat in der analogen Photogrammetrie eine große Rolle gespielt (= iterative Lage-Höheneinpassung).



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2 Bestimmung der äußeren Orientierung



Absolute Orientierung (cont.)

Obige Formel für die räumliche Drehstreckung liefert

- für einen Vollpasspunkt (X,Y,Z) drei Gleichungen,
- für einen Lagepasspunkt (X,Y) zwei Gleichungen und
- für einen Höhenpasspunkt (Z) eine Gleichung.

In der analytischen und digitalen Photogrammetrie spielt die **rechnerische absolute Orientierung** eine große Rolle.

Mindestanzahl an Passpunkten: a) 2 Vollpasspunkte und 1 Höhenpasspunkt
b) 2 Lagepasspunkte und 3 Höhenpasspunkte
c) ≥ 5 Vollpasspunkte (notwendig für die Fehlersuche!)

Bei Redundanz erfolgt eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Vgl. LV Bildmessung.





5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Anmerkung:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{t} = |\mathbf{s}| \cdot |\mathbf{t}| \cdot \cos(\mathbf{s}, \mathbf{t})$$

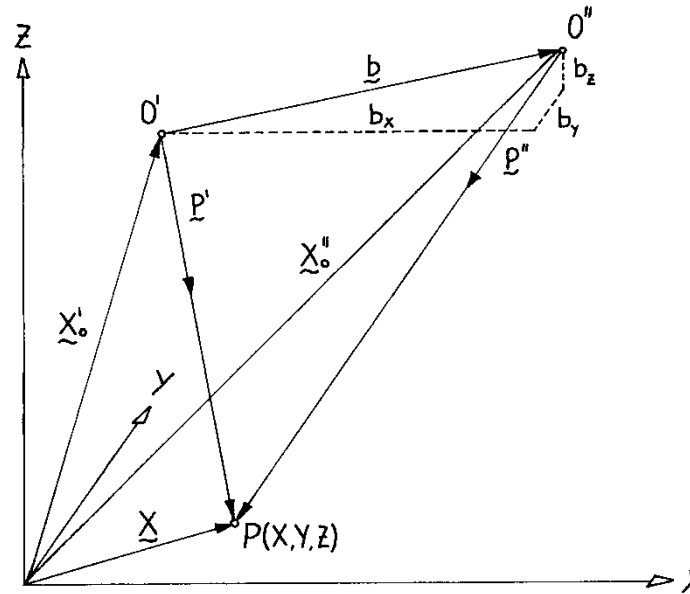
$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = s_1 t_1 + s_2 t_2 + s_3 t_3 ;$$

$$\mathbf{s} \times \mathbf{t} = \mathbf{c}$$

$$|\mathbf{c}| = |\mathbf{s}| \cdot |\mathbf{t}| \cdot \sin(\mathbf{s}, \mathbf{t})$$

$$\mathbf{c} \perp \mathbf{s}; \mathbf{c} \perp \mathbf{t}$$

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} s_2 t_3 - s_3 t_2 \\ s_3 t_1 - s_1 t_3 \\ s_1 t_2 - s_2 t_1 \end{pmatrix}$$



Zur Definition der Komplanaritätsbedingung.

Ableitung der Komplanaritätsbedingung :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}'_0 + \lambda' \cdot \mathbf{R}' \mathbf{x}' = \mathbf{X}''_0 + \lambda'' \cdot \mathbf{R}'' \mathbf{x}''$$

Daraus entsteht durch Subtraktion

$$\mathbf{b} = \lambda' \cdot \mathbf{R}' \mathbf{x}' - \lambda'' \cdot \mathbf{R}'' \mathbf{x}''$$

$$\mathbf{b} = \lambda' \cdot \mathbf{p}' - \lambda'' \cdot \mathbf{p}'' \quad | \times \mathbf{b} \quad | \cdot \mathbf{p}''$$

und nach vektorieller Multiplikation mit \mathbf{b}

und skalarer mit \mathbf{p}''

$$0 = \lambda' \cdot (\mathbf{p}' \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{p}'' - \lambda'' \cdot \underbrace{(\mathbf{p}'' \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{p}''}_{=0} = (\mathbf{p}' \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{p}''$$

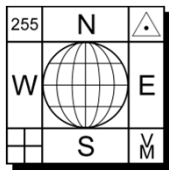
die sogenannte **Komplanaritätsbedingung**.

(Identität der beiden Rekonstruktionsgleichungen, vgl. Abschnitt 2.3.2)

$\mathbf{b} = \mathbf{X}''_0 - \mathbf{X}'_0$... Basisvektor

$\mathbf{s} \times \mathbf{t}$... Vektorprodukt (äußeres Produkt)

$\mathbf{s} \cdot \mathbf{t}$... skalares Produkt (inneres Produkt)



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Ableitung der Komplanaritätsbedingung : cont.

Ersetzt man wieder die vektorielle Multiplikation durch den schiefsymmetrischen Tensor

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{pmatrix},$$

dann lautet die Bedingung

$$\mathbf{p}'^T \mathbf{B} \mathbf{p}'' = \mathbf{x}'^T \mathbf{R}'^T \mathbf{B} \mathbf{R}'' \mathbf{x}'' = \mathbf{x}'^T \mathbf{C} \mathbf{x}'' = 0$$

mit $\mathbf{C} = \mathbf{R}'^T \mathbf{B} \mathbf{R}''$ als **Komplanaritätsmatrix**. Somit gilt :

Die Rekonstruktion des Modells aus zwei Messbildern ist dann und nur dann möglich, wenn die Komplanaritätsbedingung $\mathbf{x}'^T \mathbf{C} \mathbf{x}'' = 0$ erfüllt ist.

\mathbf{C} ... Korrelationsmatrix (→ Computer Vision: \mathbf{E} ... Essentielle Matrix (*essential matrix*))

Die Matrix \mathbf{C} hat 5 Freiheitsgrade.
 $\det(\mathbf{C})=0, r(\mathbf{C})=2$

$$(\mathbf{p}' \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{p}'' = \begin{vmatrix} p'_x & p'_y & p'_z \\ b_x & b_y & b_z \\ p''_x & p''_y & p''_z \end{vmatrix} \dots \text{Spatprodukt}$$

Geometrische Bedeutung: Das Spatprodukt ist dem absoluten Produkt nach gleich dem Volumen des von den drei Vektoren \mathbf{p}' , \mathbf{b} , \mathbf{p}'' gebildeten Prismas (Spates).

Mit anderen Worten: Die **Schnittbedingung** ist dann erfüllt, wenn die Vektoren \mathbf{p}' , \mathbf{b} , \mathbf{p}'' in einer Ebene liegen und somit das von ihnen eingeschlossene Parallelepiped das Volumen 0 hat. Das Spatprodukt der drei Vektoren muss 0 ergeben.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Die Komplanaritätsbedingung enthält insgesamt **9 Parameter**, nämlich

$$\omega', \varphi', \kappa'; b_x, b_y, b_z; \omega'', \varphi'', \kappa'',$$

von welchen zwei nicht benötigt werden, weil sie auf die relative Orientierung keinen Einfluß haben:

a) Durch Skalierung mit $1/b_x$ erhält man

$$\mathbf{b} = \frac{1}{b_x} \cdot \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ b_y/b_x \\ b_z/b_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ db_y \\ db_z \end{pmatrix}.$$

Ein homogenes Gleichungssystem kann man durch einen konstanten Wert dividieren. Daraus folgt, dass die relative Orientierung **unabhängig** ist vom gewählten **Maßstab**.

Die Länge b_x kann beliebig gewählt werden. Die beiden anderen Basiskomponenten sind i. Allg. sehr klein und als differentielle Größen db_y und db_z eingeführt.

b) Quer zur Basis beeinflusst nur eine **Querneigungsdifferenz** $\Delta\omega = \omega' - \omega''$ die Komplanarität. Das Stereomodell kann um die Basis \mathbf{b} rotiert werden, die relative Orientierung wird dadurch nicht gestört. Es kann entweder $\Delta\omega$, ω' oder ω'' als unabhängige Parameter eingeführt werden.

Somit verbleiben als Parameter der relativen Orientierung

$$\varphi', \kappa'; db_y, db_z; \omega'', \varphi'', \kappa''. \quad \omega' = 0$$

Nun wissen wir bereits, dass nur **fünf** davon notwendig sind, um alle Strahlen der beiden Aufnahmebündel zum Schnitt zu bringen.

$$p_y = y' - y'' = \frac{x'y'}{c} \cdot dA - c \cdot \left(c + \frac{y'^2}{c}\right) \cdot dB - x' \cdot dC + y' \cdot dD + dE$$

Parallaxengleichung

$$dA = d\varphi' - d\varphi'' \quad dD = \frac{k}{c \cdot b} \cdot db_z - \frac{k}{c} \cdot d\varphi''$$

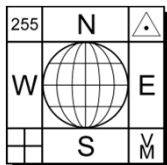
$$dB = d\omega' - d\omega'' = \Delta\omega \quad dE = \frac{k}{b} \cdot db_y - k \cdot d\kappa''$$

$$dC = d\kappa' - d\kappa'' \quad \text{es gilt: } y' \approx y'', x'' = x' + k, k = \frac{c \cdot b}{h}$$

$$b = 1 \Rightarrow$$

$$p_y = y' - y'' = \frac{c}{h} \cdot db_y + \frac{y''}{h} \cdot db_z + \frac{x'y'}{c} \cdot d\varphi' - \left(c + \frac{y'^2}{c}\right) \cdot d\omega' - x' \cdot d\kappa' - \frac{x''y''}{c} \cdot d\varphi'' + \left(c + \frac{y''^2}{c}\right) \cdot d\omega'' + x'' \cdot d\kappa''$$

(ohne Beweis)
Gleichung kann aus den
Differentialformen der Grundgleichung
(Abschnitt 2.3.4) abgeleitet werden.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Man kann also aus den sieben Parametern fünf (sinnvoll) auswählen:

- entweder $d\omega'$ oder $d\omega''$ oder $\Delta\omega$ +
- 2 Elemente aus $(d\varphi', d\varphi'', db_z)$ +
- 2 Elemente aus (dk', dk'', db_y) .

In der Praxis sind 2 Verfahren gebräuchlich:

(1) Relative Orientierung durch **Bilddrehungen**

Die Basiskomponenten werden nicht verändert. Die beiden Bilder werden nur mit den Bewegungen $\kappa', \varphi', \kappa'', \varphi''$ und ω'' gegenseitig verdreht (= relative Orientierung mit *unabhängigen Bildpaaren*).

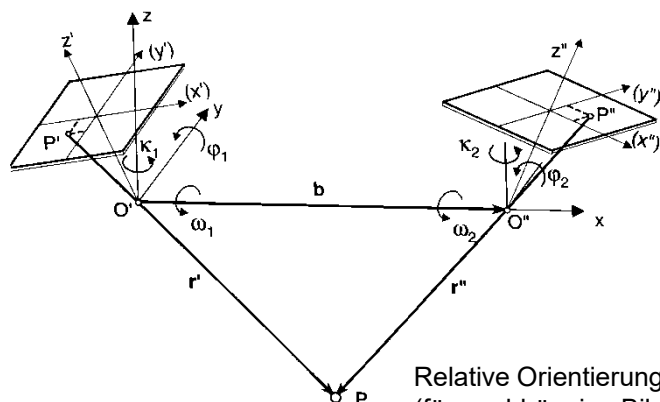
$$p_y = -x' \cdot dk' + x'' \cdot dk'' + \frac{x'y'}{c} \cdot d\varphi' - \frac{x''y''}{c} \cdot d\varphi'' + \left(c + \frac{y''^2}{c}\right) \cdot d\omega''$$

(2) Relative Orientierung durch **Folgebildanschluss**

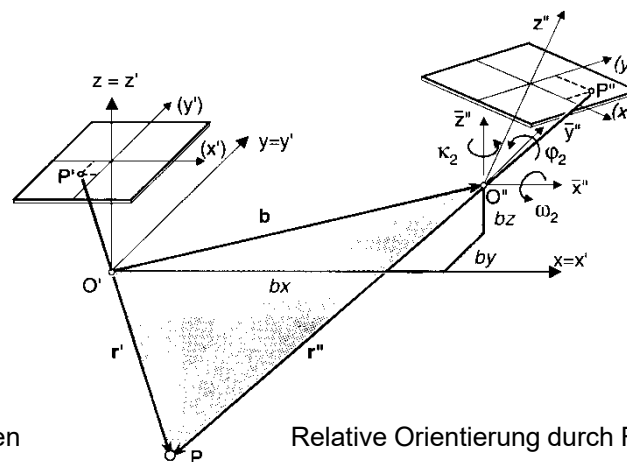
Das erste Bild bleibt unverändert. Das zweite Bild wird mit $\kappa'', \varphi'', \omega'', db_y$ und db_z verdreht und verschoben.

(Bildung eines sog. *Aeropolygons* dadurch möglich!)

$$p_y = \frac{c}{h} \cdot db_y + \frac{y''}{h} \cdot db_z - \frac{x''y''}{c} \cdot d\varphi'' + \left(c + \frac{y''^2}{c}\right) \cdot d\omega'' + x'' \cdot dk''$$



Relative Orientierung durch Bilddrehungen
(für unabhängige Bildpaare).



Relative Orientierung durch Folgebildanschluss.

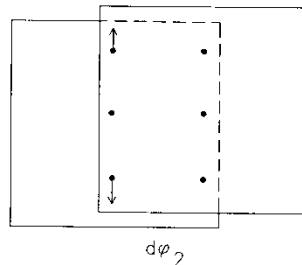
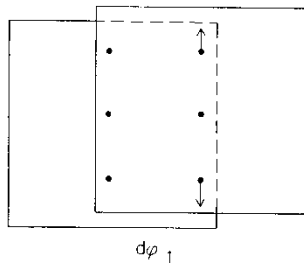
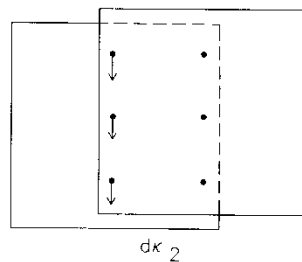
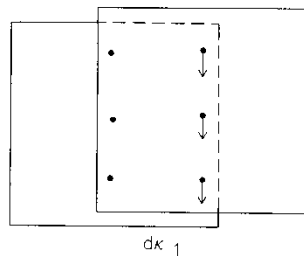


5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

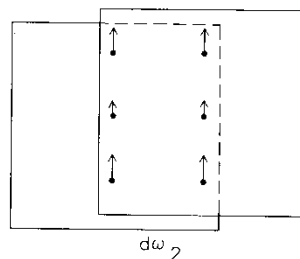
Empirische relative Orientierung am Analogauswertegerät

Dieses Verfahren hat in der praktischen Photogrammetrie keine Bedeutung mehr, es wird jedoch aus didaktischen Gründen in groben Zügen erläutert.



- ... Schemapunkte nach Otto v. Gruber (= Gruber-Punkte)

Otto von Gruber: 1884-1942, Prof., Geodät, Leiter der Entwicklung der geodätischen und photogrammetrischen Geräte bei Carl Zeiss.



Parallaxen $p_y = y' - y''$ in Abhängigkeit von den einzelnen Orientierungselementen in den sechs Schemapunkten.

Gruber-Verfahren:
Spezielles Orientierungsverfahren am Analogauswertegerät für den genäherten Normalfall und ebenes Gelände mit nur geringen Höhenunterschieden.

Am Analoggerät kann die relative Orientierung auch ohne Rechenvorgänge ermittelt werden.

(Otto v. Gruber: „Wer viel rechnet, denkt wenig.“ bzw. „Photogrammetrie ist die Kunst Rechnungen zu vermeiden.“)

Dabei wird die relative Orientierung durch „systematisches Wegstellen“ der y-Parallaxen mit den einzelnen Kammerbewegungen (vgl. Analogauswertegeräte des Institutes) erzielt.

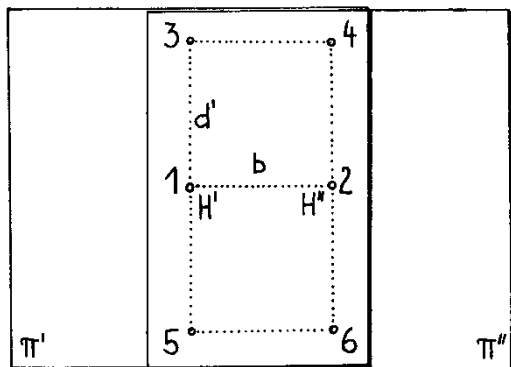
Prinzip: Die y-Parallaxe in den einzelnen Schemapunkten wird mit demjenigen Orientierungselement beseitigt, welches in dem jeweiligen Punkt die größte Auswirkung in y-Richtung hat. Die Parallaxen werden in einer Reihenfolge weggestellt, dass die in den vorangegangenen Punkten erreichte Parallaxenfreiheit nicht wieder zerstört wird. Ist an 5 gut verteilten Punkten (= Schemapunkte) Parallaxenfreiheit erzielt, so sollten im ganzen Modell keine Parallaxen mehr auftreten.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Gruber-Verfahren: cont.



(1) Relative Orientierung durch Bild Drehungen

1. Schritt: Beseitigung der Y-Parallaxe im Punkt 1 mit κ''
2. Schritt: Punkt 2 mit κ'
3. Schritt: Punkt 3 mit φ''
4. Schritt: Punkt 4 mit φ'
5. Schritt: Punkt 5 mit ω'' durch Überkorrektur mit $k = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{c^2}{d'^2}\right)$; Iteration bis Parallaxenfreiheit erzielt ist.

(2) Relative Orientierung durch Folgebildanschluss

1. Schritt: Beseitigung der Y-Parallaxe im Punkt 2 mit db_y
2. Schritt: Punkt 1 mit κ''
3. Schritt: Punkt 4 mit db_z
4. Schritt: Punkt 3 mit φ''
5. Schritt: Punkt 5 mit ω'' durch Überkorrektur mit $k = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{c^2}{d'^2}\right)$; Iteration bis Parallaxenfreiheit erzielt ist.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Rechnerische relative Orientierung

Grundlage der rechnerischen relativen Orientierung mit Bildkoordinaten ist die allgemeine Schnittbedingung (Komplanaritätsbedingung): $\mathbf{x}'\mathbf{R}'^T\mathbf{B}\mathbf{R}''\mathbf{x}'' = 0$.

Da die vorliegende Bedingung bezüglich der gesuchten 5 Orientierungsparameter hochgradig nichtlinear ist, mussten wir die Bedingungsgleichung linearisieren.

Für genäherte Senkrechtaufnahmen wurden bereits die speziellen Parallaxengleichungen für Bilddrehungen und Folgebildanschluss angegeben. Für den Allgemeinfall siehe Literatur bzw. LV Bildmessung.

Gemessen: mindestens 5 homologe Bildpunktepaare $P'_i(x'_i, y'_i)$, $P''_i(x''_i, y''_i)$

Gesucht: $\kappa', \varphi', \omega'', \varphi'', \kappa''$ bzw. $db_y, db_z, \omega'', \varphi'', \kappa''$

Die Berechnung der jeweils fünf Elemente der relativen Orientierung folgt dem schon bekannten Prinzip der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen.

Die unbekanntene Orientierungselemente können nur mit Hilfe von Näherungswerten und durch iterative Berechnung bestimmt werden.

Als Näherungswerte können im Luftbildfall (genäherter Normalfall) alle Orientierungselemente Null gesetzt werden.

Durch die Ausgleichsrechnung wird die Quadratsumme der verbleibenden Spatvolumina minimiert. Es wird so lange iteriert, bis keine nennenswerten Änderungen in den berechneten Orientierungsparametern mehr eintritt oder eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist.

Bei mehr als 5 gegebenen Verknüpfungspunkten ergeben sich aufgrund von zufälligen Messfehlern in den Bildkoordinaten entsprechende Y-Parallaxen im Modellraum.

Die Güte der relativen Orientierung kann anhand der verbleibenden Restparallaxen beschrieben werden.

Die rechnerische relative Orientierung kann auch als *Spezialfall der Bündelblockausgleichung* angesehen werden.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

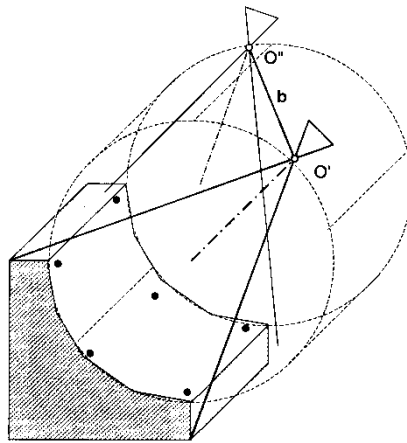
5.4.2.1 Relative Orientierung

Kritische Flächen der relativen Orientierung

Die kritische Fläche der relativen Orientierung ist immer dann gegeben, wenn die Orientierungspunkte und die Basis bzw. O' und O'' auf einer Regelfläche liegen, die nach vertikalen Kreisen geschnitten werden kann.

Solche Flächen sind *einschalige Hyperboloide, Kegel oder Zylinder*.

Die kritische Fläche tritt äußerst selten auf, kann aber auftreten.



Kritische Fläche: Kreiszyylinder mit Gruber-Punkten in den Normalschnitten.

Die kritischen Flächen können zu *kritischen Räumen* erweitert werden. Dort gibt es zwar eine Lösung, aber das Rechenergebnis ist numerisch sehr instabil (kleine Änderung \rightarrow große Auswirkung).

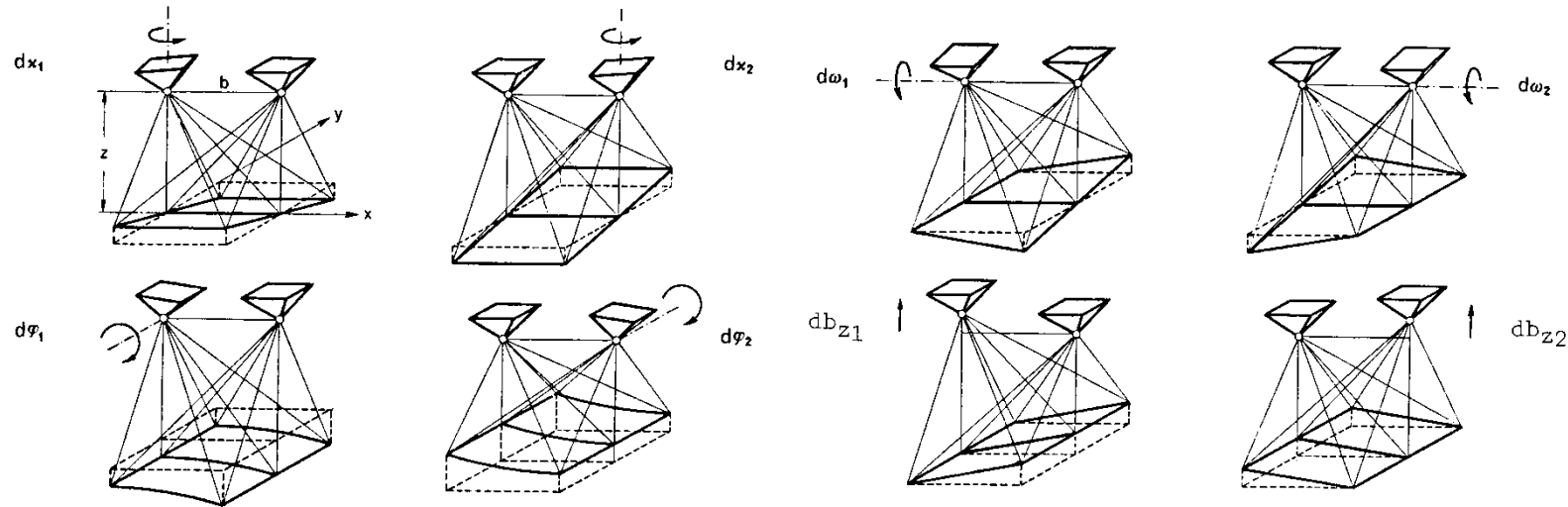
Abhilfe: - Zusätzliche Orientierungspunkte außerhalb des kritischen Raumes verwenden \rightarrow Bündeltriangulation
- Einführen von Passpunkten \rightarrow Bündeltriangulation



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Modelldeformation



Modelldeformation in der Z-Koordinate.

Restfehler in der gegenseitigen Orientierung verursachen Abweichungen der Modellpunkte von der Soll-Lage.

Ursachen: zufällige Messfehler, ungünstige Verteilung der Orientierungspunkte (bei unvollständigen Modellen), kritischer Raum, andere systematische Fehlereinflüsse (insbesondere von Objektivverzeichnung, Refraktion, Filmverzug, Stitching-Fehler bei Digitalkameras, vgl. Abschnitt 3.2.6, und Fehlern der Auswertegeräte bei analogen Verfahren, vgl. z.B. Abschnitt 5.3.3).

Die dadurch entstehende Verformung des Modells ist die sog. **Modelldeformation** bzw. **Modellverbiegung**. Die Modelldeformationen in der Höhe sind i. Allg. kritischer als die Deformationen in der Lage. Wir betrachten daher nur die Z-Koordinate.

Homologe Strahlen schneiden sich nicht in einem Punkt und dies äußert sich in entsprechenden Restparallaxen, welche als Restfehler in den Orientierungselementen interpretiert werden können.



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.1 Relative Orientierung

Modelldeformation cont.

Aus Abschnitt 5.3.3 wissen wir, dass

$$dZ = \frac{h}{b} \cdot p_x = \frac{h}{B} \cdot p_x \quad p_x = X' - X'' \quad \dots \quad X\text{-Parallaxe im Modellraum}$$

$$dZ = \left. \begin{aligned} & -\frac{h}{B} \cdot db_x - \frac{(X-B)}{B} \cdot db_z - \left(\frac{h^2}{B} + \frac{X^2}{B}\right) \cdot d\varphi' + \frac{XY}{B} \cdot d\omega' - \frac{Yh}{B} \cdot d\kappa' + \\ & + \left(\frac{h^2}{B} + \frac{(X-B)^2}{B}\right) \cdot d\varphi'' - \frac{(X-B)Y}{B} \cdot d\omega'' + \frac{Yh}{B} \cdot d\kappa'' \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{geometrische Interpretation} \\ \text{siehe Abbildung!} \end{array}$$

Obige Abbildung zeigt den Einfluss der Restfehler auf das Modell eines ebenen horizontalen Geländes hinsichtlich der Höhendeformation.

Die konstanten und linearen Anteile werden bei der absoluten Orientierung kompensiert. Letztendlich verfälschen nur die tatsächlichen Deformationen (quadratische Anteile; $d\varphi$, $d\omega$) die Höhenmessung. ($d\varphi \rightarrow$ zylindrische Verbiegung, $d\omega \rightarrow$ hyperbolische Verbiegung)



5.4 Orientierung eines Stereobildpaares

5.4.2.2 Absolute Orientierung

Passpunkte und Stützelemente

Bei Passpunkten wird nach ihrer Qualität unterschieden: **Voll-** (X,Y,Z), **Lage-** (X,Y), **Höhenpasspunkt** (Z). Sie werden meist mittels herkömmlicher terrestrischer Messung bestimmt. Die notwendigen Messungen sind eigentlich Angelegenheit der Landesvermessung, da sie weiträumig anzulegen sind und die Festpunkte der Landesnetze benutzen. Bei der Erkundung der Messpositionen muss allerdings auf photogrammetrische Bedürfnisse Rücksicht genommen werden. Diese sind:

- günstige Lage in den Stereomodellen,
- gute Identifizierbarkeit (natürliche oder signalisierte Punkte),
- möglichst quasiwahre Punkte durch höhere Messgenauigkeit.

Dazu sind die Bilder im Feld mitzuführen und möglichst in Stereobetrachtung für die Beurteilung der Sichtbarkeit zu verwenden. Die üblichen **Lageskizzen** sind so anzufertigen, dass die Punkte später für die Auswahl zweifelsfrei erkenn- und mit der Messmarke anfahrbar sind. Passpunkte sollen immer in „Nestern“ bestimmt werden, um eine Fehlersuche zu ermöglichen.

Neben konventionellen Punkten können zwischen luftsichtbaren Punkten
Strecken (für Maßstab),
Höhendifferenzen (für die Horizontierung),
Azimute (für die Nordorientierung) und
Zenitdistanzen (für die Horizontierung)
als Stützelemente gemessen werden.

Besonders Strecken (elektronisch), Höhenunterschiede (Nivellement) und Zenitdistanzen können schnell und einfach bestimmt werden. Vor allem für Bündel- und Modelltriangulation sind diese Stützelemente sehr wichtig.

- Passpunkte können inzwischen verhältnismäßig rationell mittels **GPS** bestimmt werden.

Weitere Hinweise zu den Passpunkten im Abschnitt 6 (Mehrbildauswertung).



Quelle: Vermessung AVT-ZT GmbH

Bestimmung des Passpunktes
"Weisseespitze" mittels GPS.



5.5 Stereoauswertegeräte

Stereoauswertegeräte dienen zum Kartieren räumlicher Objekte aus zwei Stereobildern. Die verschiedenen Kategorien der Auswertegeräte spiegeln die technische Entwicklung auf diesem Sektor wider. Die einzelnen Lösungen unterscheiden sich im Prinzip dadurch, wie der geometrische Zusammenhang (= Zentralprojektion) zwischen Objekt- und Bildraum bei der Rekonstruktion gelöst ist und wie die Bildinformation bei der Auswertung vorliegt, analog bzw. digital.

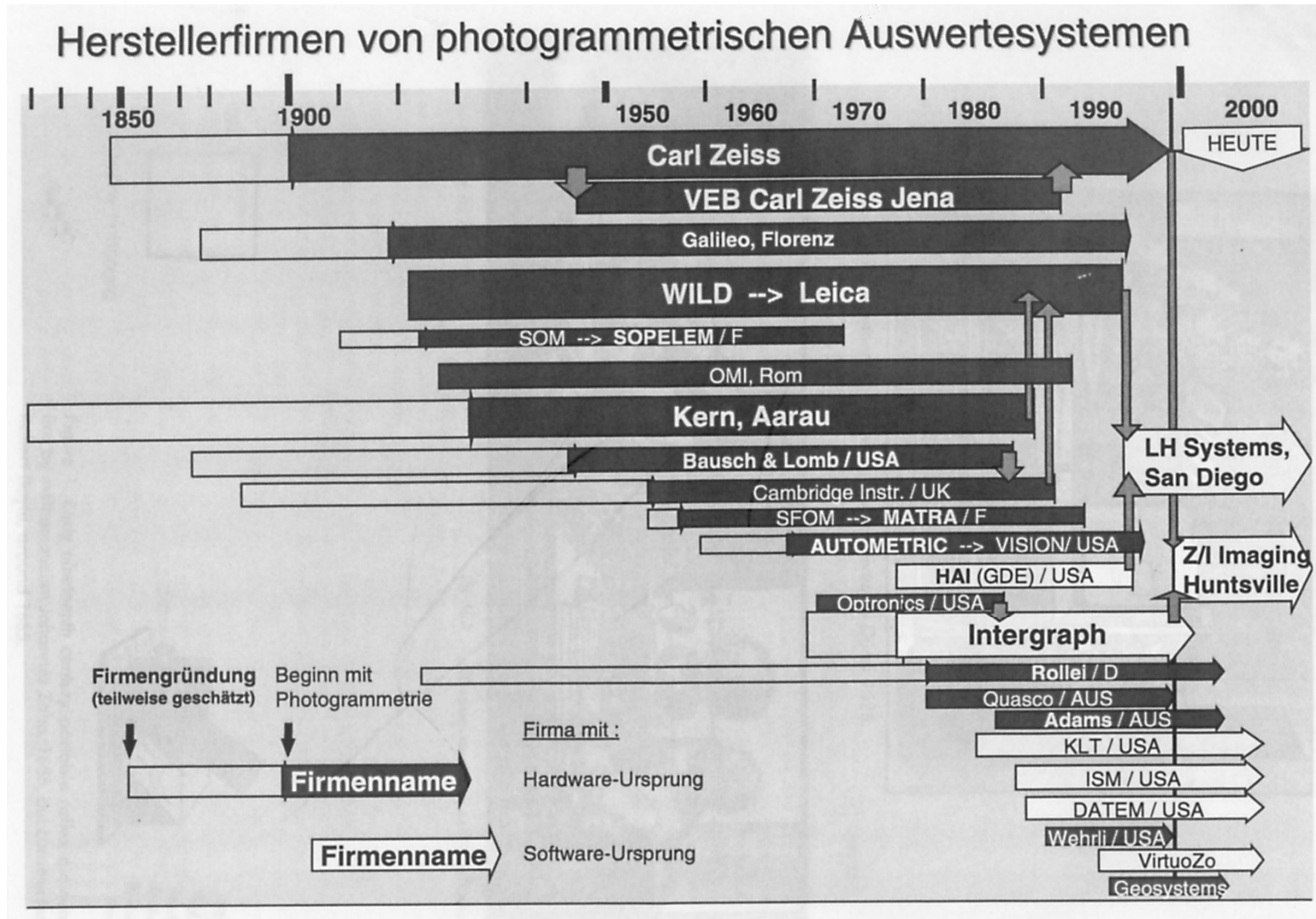
Die Ausführungen beschreiben im wesentlichen jene Geräte, die am Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie vorhanden sind (waren) und im Rahmen einer Exkursion vorgestellt werden.

Gerätetyp	Projektionssystem	Bilder
Analogauswertegeräte	analog	analog
Analytische Auswertegeräte	analytisch	analog
Digitale Auswertegeräte	analytisch	digital

Klassifizierung der Stereoauswertegeräte.



5.5 Stereoauswertegeräte



Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie (TU Graz)

Leica LPS

Intergraph ImageStation



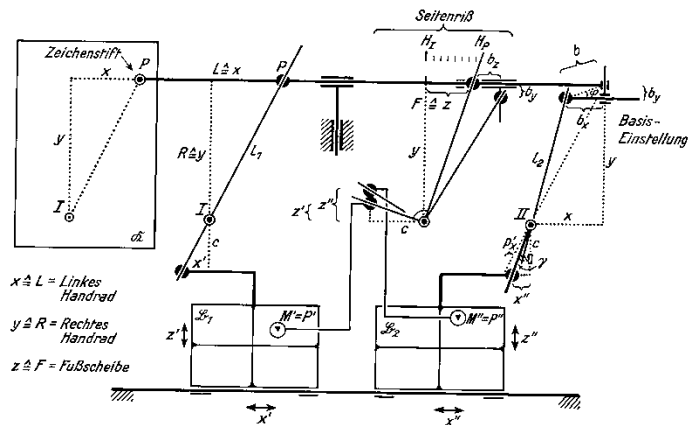
5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

Die Ära dieser Auswertegeräte begann 1911 mit dem **Stereoautographen**, welcher von Oberleutnant v. Orel am Militärgeographischen Institut in Wien entwickelt (1909, Prototyp bei R. u. A. Rost in Wien gebaut) und bei Zeiss in Jena gebaut wurde.

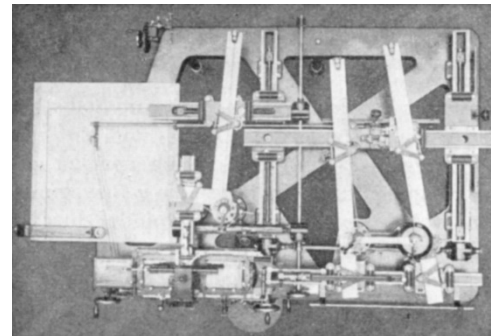
Das Gerät ist eine Weiterentwicklung des Stereokomparators von Pulfrich: Es konnte den allgemeinen Fall der terrestrischen Photogrammetrie lösen. Mit zwei Handrädern konnte die Messmarke kontinuierlich über das ganze Bild bewegt werden und mit einem Fußrad wurde die Höhe eingestellt. Es konnten Grundriss- und Höhenlinien kontinuierlich ausgewertet werden.

Das Institut für Angewandte Geodäsie besitzt einen Stereoautographen - derzeit jedoch verliehen.



$x \triangleq L = \text{Linkes Handrad}$
 $y \triangleq R = \text{Rechtes Handrad}$
 $z \triangleq F = \text{Fußscheibe}$

Aufbauskeizze des Stereoautographen.



Ansicht des Stereoautographen von oben.

Das Zeitalter der Analogauswertegeräte dauerte bis ca. 1975. Bis dahin wurden etwa 100 verschiedene Analogauswertegeräte konstruiert und gebaut.

Unterscheidung der Analoginstrumente nach der Art der Projektion:

- a) optische Projektion,
- b) optisch-mechanische Projektion,
- c) mechanische Projektion.

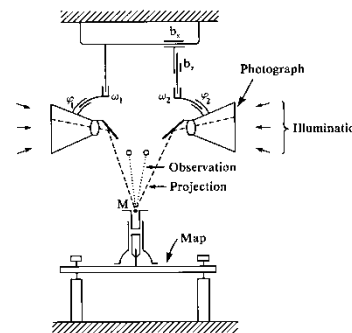


5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

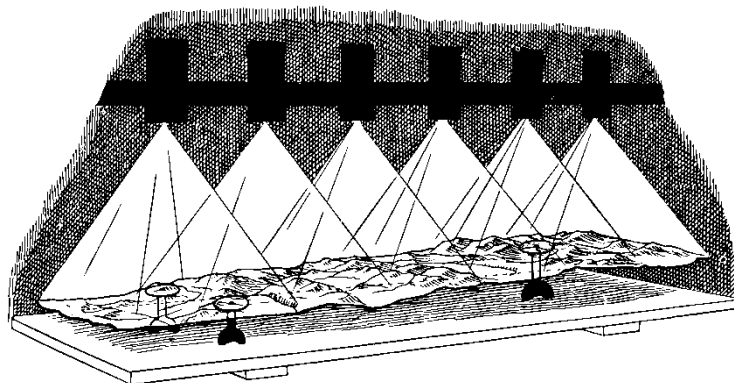
a) Analogauswertegeräte mit optischer Projektion

M. Gasser hat 1915 den ersten funktionierenden **Doppelprojektor** gebaut (von Th. Scheimpflug 1898 vorgeschlagen):



Doppelprojektor.

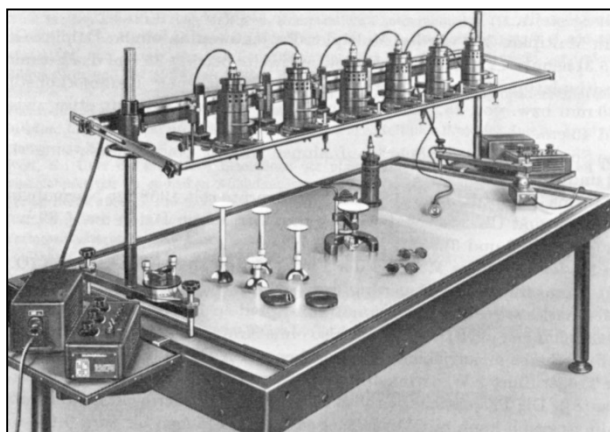
Multiplex (1933 – 1958)



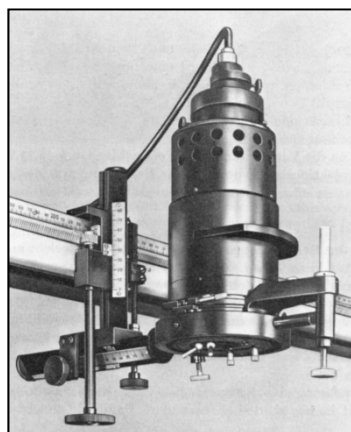
Das Prinzip der Multiplex-Geräte.



Multiplex
(TU Graz, 16. Nov. 2000)



Der ÜWW-Multiplex der Firma Jenoptik.

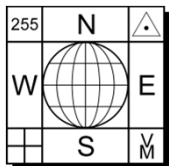


ÜWW-Projektor.

Anmerkungen:

1933 von der Firma Carl Zeiss in Jena und von der Firma Ottico Meccanica Italiana in Rom gebaut.

- verkleinerte Projektoren (Mehrfach-Projektoren)
- kleinmaßstäbige Arbeiten, geringe Genauigkeit
- Senkrechtaufnahmen → Aeropolygon
- Verkleinerungsgerät zum Umbilden ($18 \times 18 \text{ cm}^2 \rightarrow 4 \times 4 \text{ cm}^2$)
- NW-, WW-, ÜWW-Multiplex
- Projektoren besitzen 6 Freiheitsgrade ($b_x, b_y, b_z, \varphi, \omega, \kappa$)
- Scharfabbildung durch Schärfentiefe
- Betrachtungssystem durch Anaglyphenverfahren
- Absolute Orientierung durch iterative Lage- und Höheneinpassung



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

b) Auswertegeräte mit optisch-mechanischer Projektion

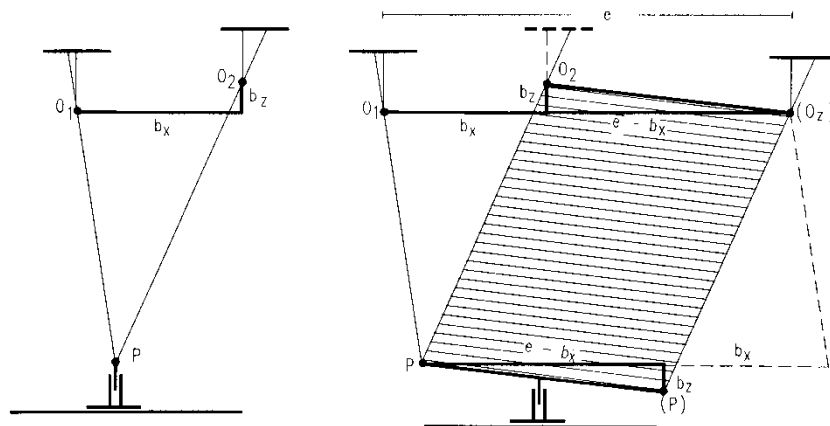
Diese haben keine besondere Wichtigkeit erlangt. Kein Instrument dieses Typs am Institut.

c) Auswertegeräte mit mechanischer Projektion

Bei der mechanischen Projektion bestehen die Verbindungsgeraden »Bildpunkt-Projektionszentrum-Modellpunkt« aus zwei um die Projektionszentren drehbaren **Raumlener** (Sonderlösung beim Topocart).

Das **Zeiss'sche Parallelogramm** ist ein wichtiges Konstruktionsmerkmal vieler Analogauswertegeräte. Dabei wird der *Aufpunkt* (= jener Punkt, in dem sich die beiden einander entsprechenden Strahlen eines orientierten Bildpaares bei der Nachbildung der Aufnahmeverhältnisse im Stereokartiergerät schneiden) in zwei getrennte Aufpunkte zerlegt.

Vorteile: Das feinmechanische Problem, die beiden Raumlener im Objektpunkt zum Schnitt zu bringen, wird umgangen. Basiskomponenten (b_x, b_y, b_z) können im Objektraum durch die beiden Aufpunkte eingestellt werden (vgl. Basiswagen beim Planimat). Projektionszentren sind fest; daher hohe Stabilität und Genauigkeit der Auswertegeräte. Aeropolygonbildung durch fortlaufenden Folgebildanschluss möglich. Änderung der Kammerkonstante ist möglich.



Auswerteprinzip ohne Zeiss'sches Parallelogramm (links) und mit Zeiss'schem Parallelogramm (rechts).

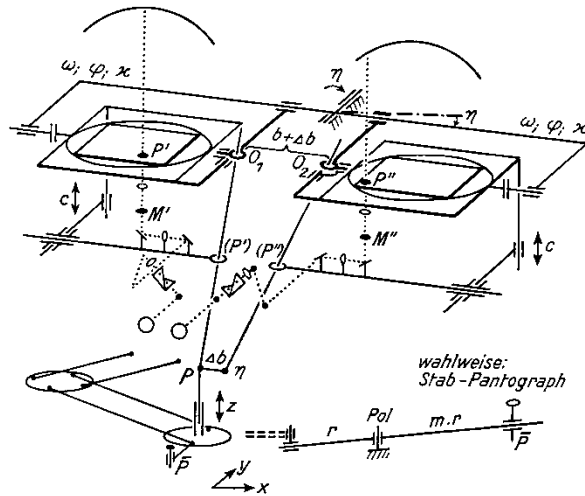
Viele Analogauswertegeräte mit mechanischer Projektion wurden durch Integration von elektronischen Komponenten (elektr. Koordinatenabgriffe, Servomotoren) zu semi-analytischen bzw. analytischen Stereoauswertegeräten auf- bzw. umgerüstet (Beispiele: Planimat D2 und Topocart).



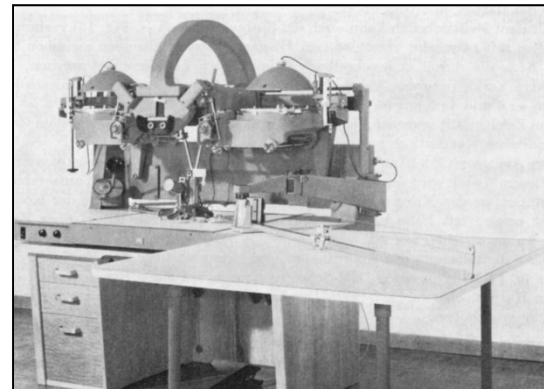
5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

WILD Aviograph B8 (1958)



Aufbauskizze des Aviograph B8.



Ansicht des Aviographen B8 mit Stabpantograph und Kartiertisch.



Wild B8
(Zimmer A 109, 8. August 2002)

Der Aviograph Wild B8 ist (war) ein Gerät für die stereoskopische Auswertung von genähert senkrechten WW- und ÜWW-Aufnahmen.

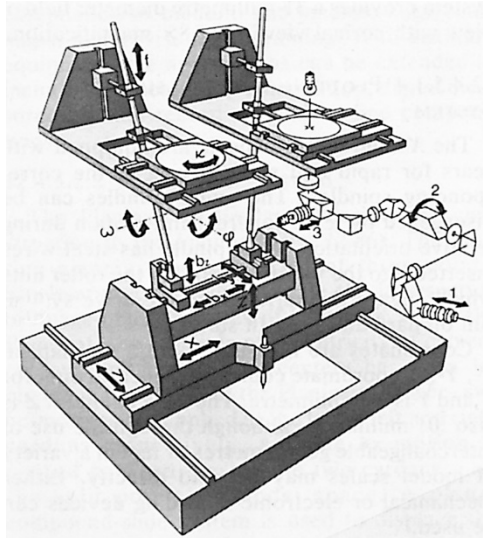
- Kartierung in kleinen und mittleren Maßstäben,
- strenge Rekonstruktion des Aufnahmestrahlenbündels nach dem **mechanischen** Prinzip,
- relative Orientierung nur durch Orientierung mit **Bilddrehungen** (unabhängige Bildpaare), da die Projektionszentren fest sind (O' und O'' fest, Kardane);
- direkte Ablesung der Geländehöhen in Metern,
- Kartierung im Modellmaßstab oder zusätzlich vergrößert oder verkleinert mit Stabpantograph auf angeschlossenem Zeichentisch (1.4–2.1-fache Modellvergrößerung vom Bildmaßstab möglich),
- 27 mm Bildausschnitt, $\varnothing 27 \mu\text{m}$ Messmarke im Bild, 6x Vergrößerung der Betrachtungsoptik.



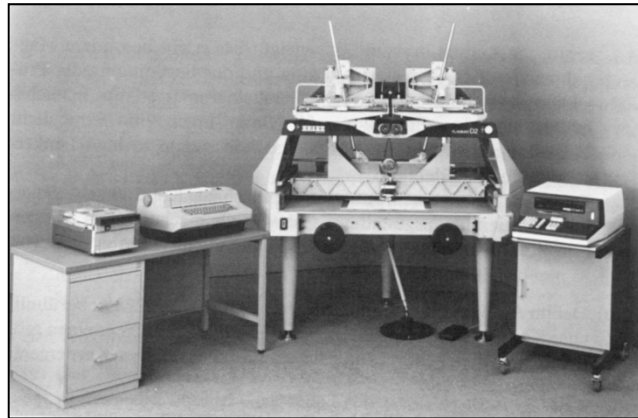
5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

Carl Zeiss Planimat D2 (1967)



Aufbauskiizze des Planimat D2.



Zeiss Planimat D2 mit digitaler Registrierung Ecomat 12.



Planimat D2
(Zimmer A 109, 12. August 2002)

Der Planimat D2 ist (war) für die graphische und koordinatenmäßige Auswertung von Senkrechtaufnahmen im Format $23 \times 23 \text{ cm}^2$ und für alle Kammerkonstanten zwischen $c=85 \text{ mm}$ und $c=310 \text{ mm}$ eingerichtet.

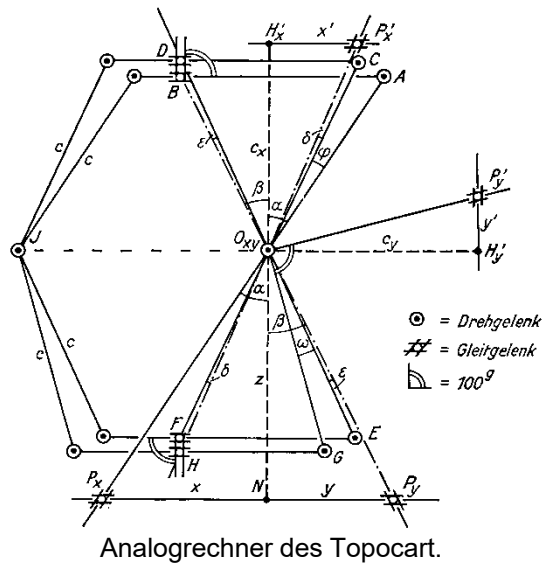
- Präzisions- und Universalauswertegerät für mittlere Maßstäbe,
- Basiseinstellungen: b_x , b_y , b_z . (**Zeiss'sches Parallelogramm**) → beliebig kleine Basis möglich,
- relative Orientierung nach beiden Methoden möglich,
- **exzentrische Lagerung** des Kardans für φ -, ω -, und κ -Achse gegenüber dem Projektionszentrum,
- bewegliche Bilder bei stationären Messmarken ($40 \mu\text{m}$ Messmarke, 8-fache Vergrößerung,
- Internzeichentisch, Externzeichentisch mit mechanischer Kuppelung,
Bildmaßstab/Modellmaßstab = 1:1.3-2.8 ($c=152 \text{ mm}$);
- Handräder und Fußscheibe für XY und Z, Koordinatenanzeige (analog bzw. digital am Interface/PC).



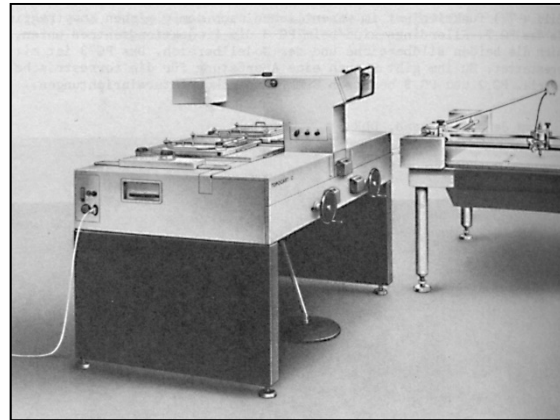
5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

Jena Topocart (1966)



Analogrechner des Topocart.



Topocart der Fa. Jenoptik.

Der Topocart besitzt keine Raumlenker!

- Strenge Lösung durch **mechanischen Analogrechner**,
- Bildformat bis 23x23cm², 50mm ≤ c ≤ 215 mm, Auswertungen im mittleren und kleinen Maßstäben,
- es lassen sich Negative, Diapositive und Papierabzüge (= im Durch- und Aufsicht) auswerten,
- Bilder liegen komplanar und bewegen sich, Ø 60µm Messmarke ist daher ortsfest.

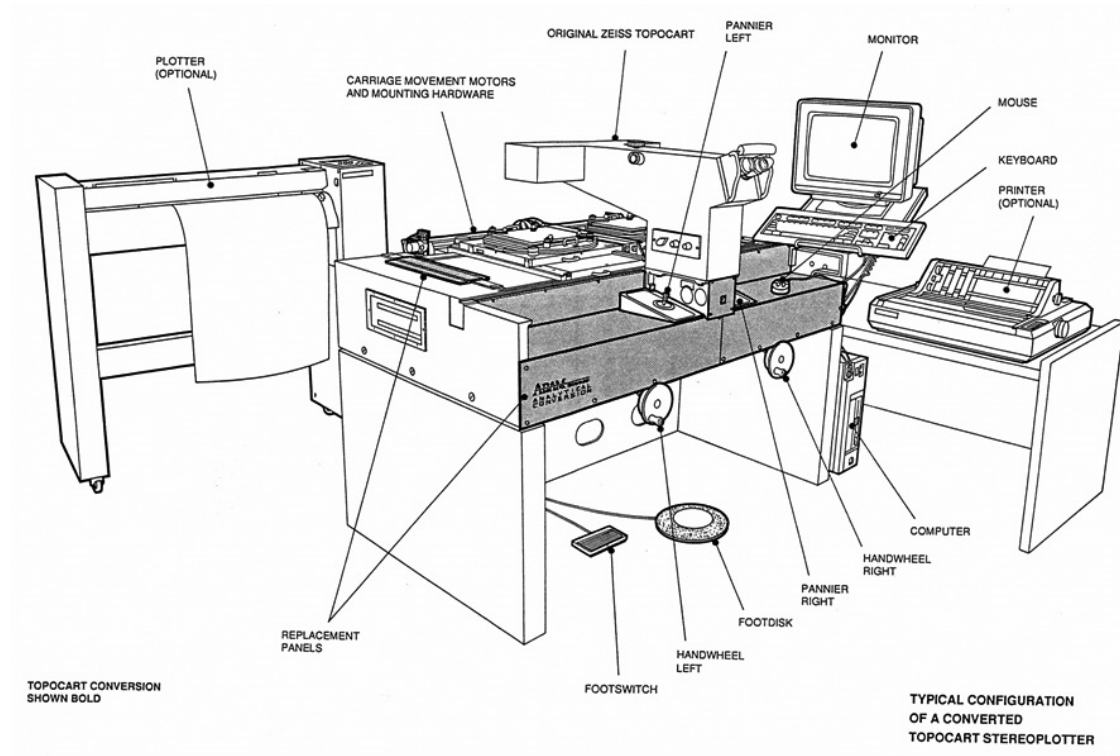
Die Firma Adam Technology bietet einen Umrüstsatz an, mit welchem man den Topocart in ein vollwertiges analytisches Auswertegerät aufwerten kann.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.1 Analogauswertegeräte

Topocart Conversion (1990) (Adam Technology, Australien)



Topocart
(Zimmer A 115, 4. März 2004)



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.2 Analytische Auswertegeräte

In einem analytischen Auswertegerät wird der perspektive Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten mathematisch-rechnerisch (= analytisch) hergestellt. Dafür wird ein **digitaler Prozessrechner** benötigt.

Wegbereiter der analytischen Formulierung photogrammetrischer Aufgabenstellungen:

S. Finsterwalder, E. Thompson, G. Shut, K. Rinner (Geodäsieprofessor TU Graz, 1912-1991; Einführung der eleganten Vektoralgebra für die Photogrammetrie), H. Schmid und D. Braun.

Erfindung des Elektronenrechners: 1941 durch Zuse (Deutschland) und 1943 durch Aitken (U.S.A.).

1957:

U. V. Helava (1923-1994) lässt sich seinen **analytischen Plotter** (engl. analytical plotter) patentieren und ein erster Prototyp wird beim National Research Council (Kanada) gebaut.

1962-1963:

Erste Bautypen in Kooperation mit den Firmen O.M.I. (Rom) und Bendix (U.S.A.). Vorerst nur für militärische Anwendungen. Anmerkung: 1968 – Für die stereoskopische Auswertung von dynamischen Panoramakameraaufnahmen (Flugzeug und Satellit; Corona-Spionagebilder) war ein analytischer Plotter unumgänglich wegen der dynamischen Maßstabsänderung und Verkantung der Bildausschnitte.

1964:

Modell AP/C von O.M.I. für zivile Zwecke.

1976-1980:

Mehrere Firmen entwickeln analytische Auswertegeräte, z.B. Zeiss den **Planicomp C100**, Matra den **Traster**, Kern den **DSR-1**, Wild den **Aviolyt AC1**, Helava Associates Inc. den **US-2**, etc.

Die Ära der analytischen Auswertegeräte – bis jetzt etwas mehr als 25 Jahre – ist noch nicht zu Ende.

2000:

LH-Systems mit Analytical Workstation SD2000/3000

Z/I-Imaging mit Analytical Plotter P3/P33

Adam Technology mit ASP 2000, u.a.

Es gibt auch *vereinfachte analytische Auswertegeräte* am Markt, jedoch mit eingeschränkter Funktionalität.



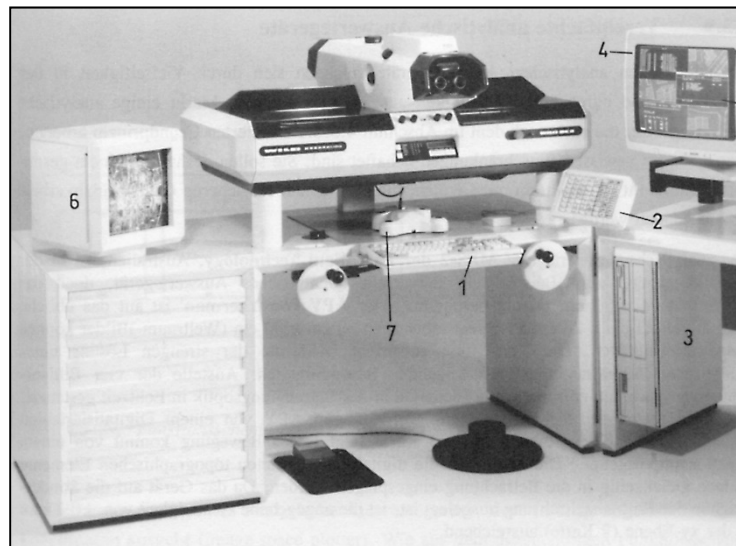
Analytischer Plotter Aviolyt BC1 von Wild.



5.5 Stereoauswertegeräte

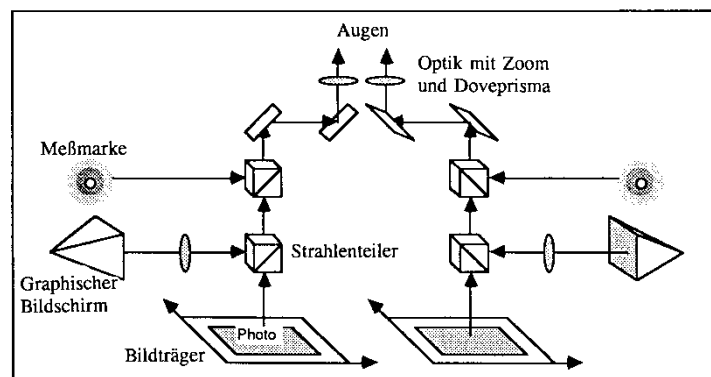
5.5.2 Analytische Auswertegeräte

Wild Aviolyt BC3 (an der TU Graz nicht vorhanden)



- 1 alphanumerische Tastatur
- 2 Funktionstastatur mit Graphik-Menü
- 3 PC
- 4 graphischer Bildschirm
- 5 emulierter alphanumerischer Bildschirm
- 6 (grobe) Messmarken-Positionsanzeige
- 7 Freihandführung

Analytisches Auswertegerät Wild Aviolyt BC3.



Stereoskopische Einspiegelung.

Einspiegelung:

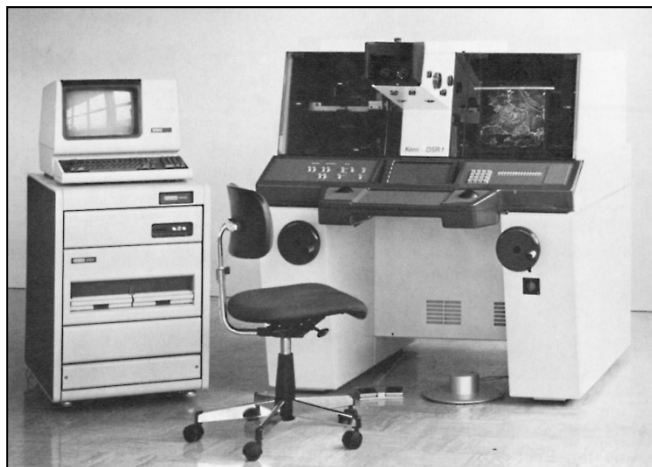
(Zusätzliche) graphische Bildschirme bieten auch die Möglichkeit der Einspiegelung der bereits ausgewerteten Punkte und Linien in das optische Objektmodell. Zu jedem Bild gehört ein graphischer Bildschirm. Der Bildschirminhalt (in der Geometrie des jeweiligen Bildes) wird in den Strahlengang eingeblendet. Punkte und Linien überlagern sich 3D dem Raumbild. An Stelle der stereoskopischen Einspiegelung ist oft nur die *monoskopische Einspiegelung* realisiert (Kostenfrage!).



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.2 Analytische Auswertegeräte

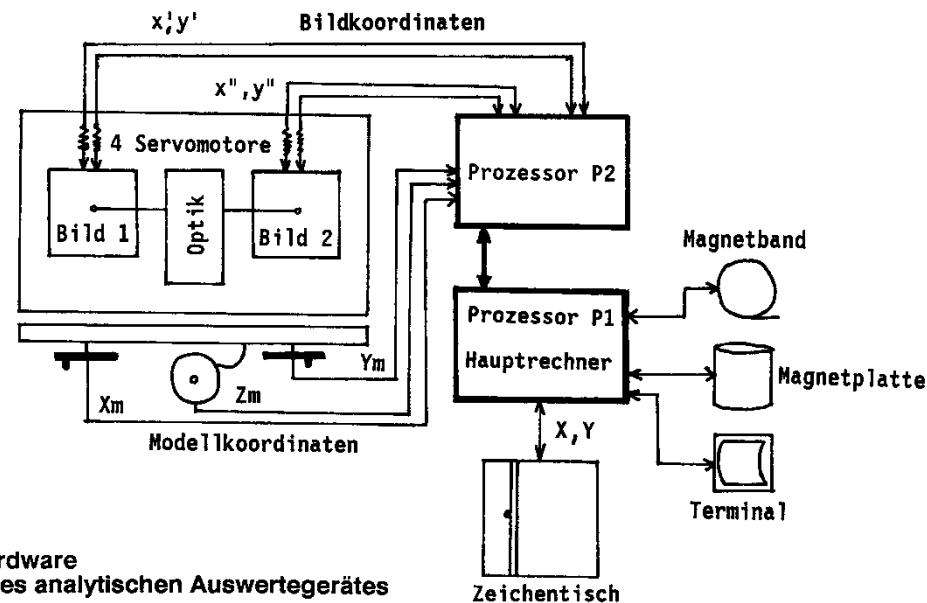
Kern DSR-1



Analytisches Auswertegerät DSR-1 von Kern.



DSR-1
(Zimmer A 115, 10. Jänner 2006)



Hardware
eines analytischen Auswertegerätes
(DSR1/KERN)

Moderne analytische Auswertegeräte (*analytical plotter*) zeichnen sich durch die Eigenschaft aus, dass die Bewegung der Bildträger von einem Computer gesteuert wird. Anstelle einer optischen oder mechanischen Rekonstruktion des Projektionsstrahles bei herkömmlichen photogrammetrischen Auswertegeräten wird die Beziehung zwischen x, y -Bildkoordinaten und kartesischen XYZ -Modellkoordinaten durch einen Rechner hergestellt. Dadurch entfällt die Beschränkung auf streng zentralperspektive Geometrien in der Aufnahme. Neben Messluftbildern können z.B. nicht-metrische Amateuraufnahmen oder Bilder mit unkonventioneller Aufnahmegeometrie (Scanner, Radar) verarbeitet werden.

Der Echtzeitprozess stellt hohe Anforderungen an den Steuermechanismus, die Rechengeschwindigkeit und Steuerprogramme. Die Schleife im Komparatormodus bzw. Modellmodus muss in etwa 50-mal in der Sekunde durchlaufen werden, sodass der Beobachter den Eindruck einer verzögerungsfreien Bewegung hat.

$$\text{Komparatormodus: } X_m, Y_m \xrightarrow{1:1} x', y', x'', y''$$

$$\text{Modellmodus: } X_m, Y_m, Z_m \xrightarrow{\text{Abbildungsgleichungen}} x', y', x'', y''$$



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

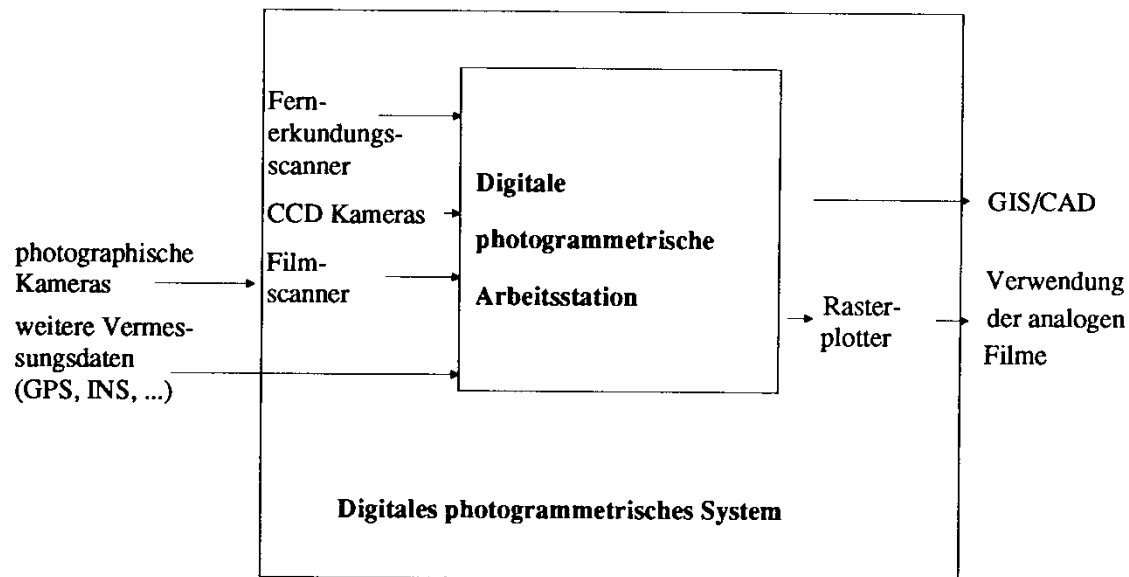
Digitale Stereoarbeitsstationen besitzen kein mechanisches Bildwagensystem mehr. Stattdessen werden digitalisierte Bilder an einem geeigneten Stereomonitor dargestellt und digital verschoben. Die Bewegung der Bilder erfolgt relativ zu einer graphisch überlagerten Messmarke. Dabei können die Messmarke, das Bild oder beide gleichzeitig bewegt werden.

Akronyme:

- DPS** ... **D**igitales **P**hotogrammetrisches **S**ystem
- DPAS** ... **D**igitale **P**hotogrammetrische **A**rbeits**S**tation
- DPWS** ... **D**igital **P**hotogrammetric **W**ork**S**tation

Digitalphotogrammetrie: engl. *digital photogrammetry* oder auch *softcopy photogrammetry*

Literaturquelle: Ch. Heipke (1995): „Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen“, DGK, Reihe C, 450



DPS und DPAS.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

Als **digitales photogrammetrisches System (DPS)** wird Hardware und Software zur Gewinnung von Eingangsdaten für GIS oder CAD Systeme sowie weiterer photogrammetrischer Produkte aus digitalen Bildern mittels *interaktiver*, *semi-automatischer* und *automatischer* Methoden bezeichnet. Eine interaktive oder manuelle Methode ist dadurch gekennzeichnet, dass der Operator wie in der analytischen Photogrammetrie die anfallenden Interpretations- und Messaufgaben selbst erledigt. Als „automatisch“ werden Methoden bezeichnet, die ohne jeglichen Eingriff des Operateurs ablaufen. Bei den semi-automatischen Methoden übernimmt der Operateur im wesentlichen die Interpretation des Bildes, während der Rechner für die eigentliche Koordinatenmessung zuständig ist.

Das Herzstück eines DPS ist die **digitale photogrammetrische Arbeitsstation (DPAS)**.

Daneben besitzt ein DPS Komponenten zur digitalen Bildaufnahme sowie zur Umwandlung analoger in digitale Bilddaten und umgekehrt. Im Gegensatz zum DPS geht DPAS von digitalen Daten aus und liefert als Ergebnis digitale Daten.

Erste Konzepte für DPAS gehen in die Jahre 1981/82 zurück. Im wesentlichen handelte es sich bei diesen Konzepten um analytische Plotter, bei denen die Bildwagen durch Monitore ersetzt wurden.

Parallele Entwicklungen im zivilen und militärischen Bereich.

1987: Context Mapper, der erste zivile DPAS-Prototyp (UNI Hannover und Firma Context Vision).

ab 1988: rasche Entwicklung auf diesem Gebiet.

Es muss davon ausgegangen werden, dass in naher und mittlerer Zukunft weiterhin photographische Luftbildkameras zur Gewinnung der Bilder eingesetzt werden. Beim nachträglichen Scannen ist darauf zu achten, dass die hohe geometrische und radiometrische Qualität nicht verloren geht.

Da sich die Hardwarekomponenten einer digitalen photogrammetrischen Arbeitsstation in einem rasanten Tempo weiterentwickeln (Geschwindigkeit, Technologie, etc.), ist es nicht sinnvoll, diese im Detail zu besprechen.

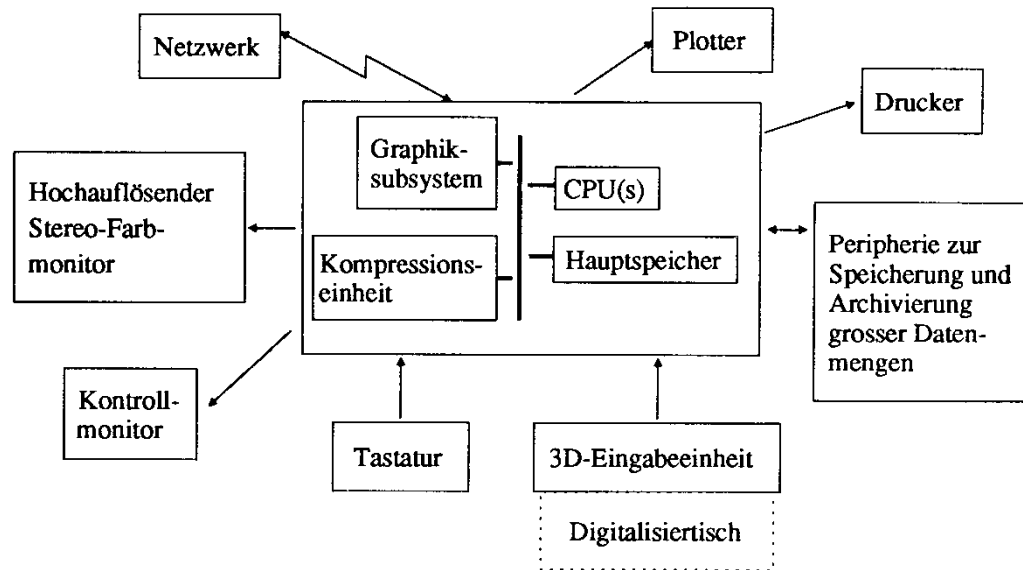
Ch. Heipke charakterisiert eine **universelle DPAS** wie folgt:

- interaktive Verarbeitung mit semi-automatischen und automatischen Modulen,
- Mono- und Stereobetrachtung,
- Mono- und Stereomessung mit Subpixelgenauigkeit,
- konsequente Mehrbildverarbeitung in allen Schritten,
- weitgehende Verwendung von Standardhardware,
- modulares Softwarekonzept.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen



Hardwarekomponenten der universellen DPAS.

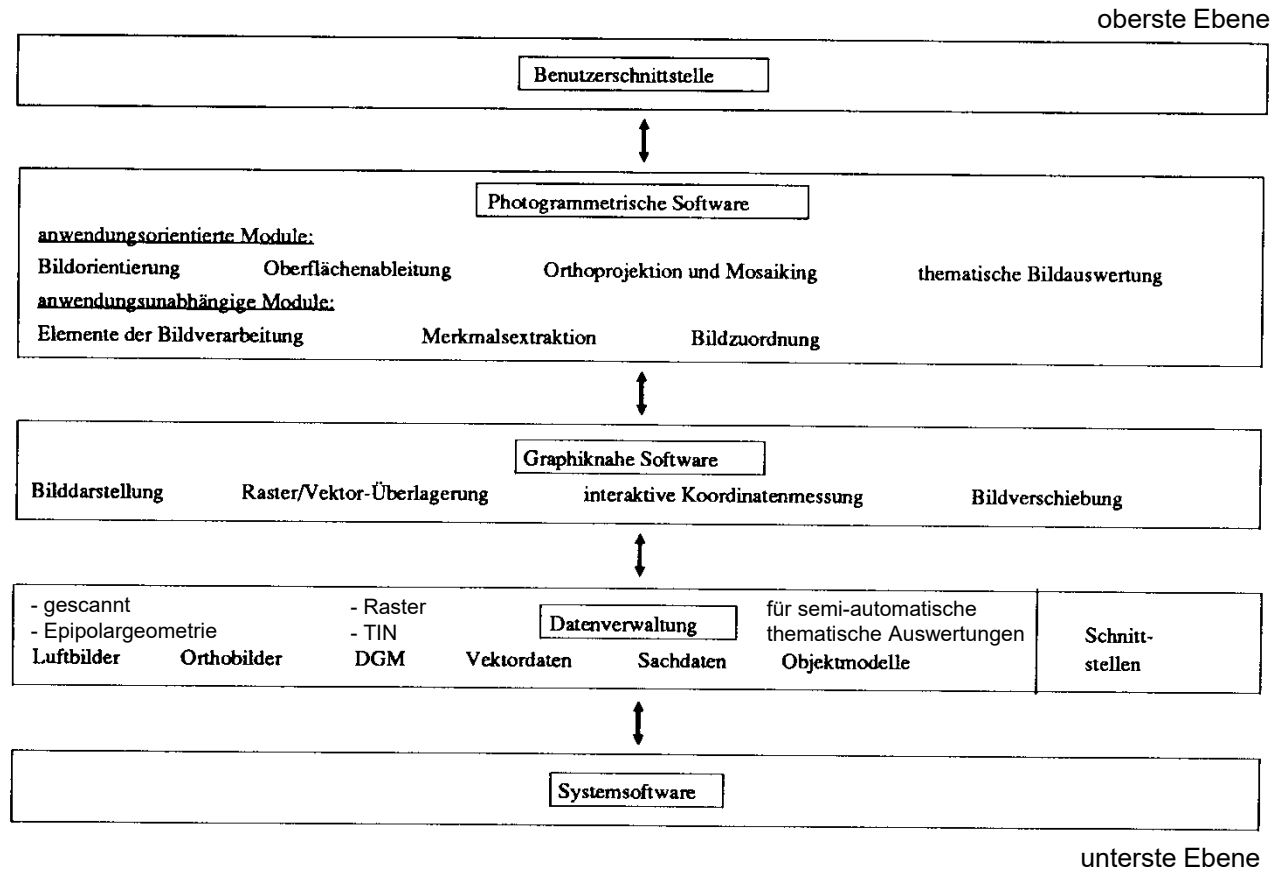
Eine DPAS sollte mit folgenden Hardwarekomponenten ausgerüstet sein (siehe obige Abb.):

- leistungsfähige CPU (eventuell auch mehrere),
- großer Hauptspeicher,
- schnelle Bussysteme,
- Graphiksubsystem mit großem Bildspeicher,
- Hardwareeinheit zur Bilddatenkompression,
- hochauflösender Farbmonitor zur Bilddarstellung und -auswertung,
- Stereobetrachtungseinheit,
- graphischer Kontrollmonitor,
- 3D-Eingabeeinheit, optional mit Digitalisiertisch,
- Tastatur,
- Peripherie zur Speicherung und Archivierung großer Datenmengen (Magnetplatten, RAID-System, magneto-optische Platten, Jukeboxes, Digital Audio Tape (DAT)- und Exabyteaufwerke usw.),
- Peripherie zur Datenausgabe (Drucker, einfacher Rasterplotter),
- Netzwerkanschluss.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen



Softwarekomponenten der universellen DPAS.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

Die Softwarestruktur ist hierarchisch (5 Ebenen, vgl. vorherige Abb.) aufgebaut. Softwarebausteine sind modular. Die Ebene der photogrammetrischen Software bildet den eigentlichen Kern der DPAS und bestimmt deren Einsatzmöglichkeit. Die anwendungsunabhängigen Module bilden zusammen mit der graphiknahen Software sowie der Datenverwaltung die Grundlage für den Arbeitsablauf, der mit Hilfe der anwendungsorientierten Module realisiert wird.

Bilddatenformate: komplette Bildpyramide, Verspeicherung in quadratischen Kacheln (tiles), JPEG-Komprimierung.

Bilddarstellung: Für jeden Bildausschnitt stufenlos regulierbar Helligkeit und Kontrast bzw. automatische Angleichung der Ausschnitte. Lösung über Look-Up-Tabellen. Geometrische Transformationen, wie Vergrößern, Verkleinern und Drehen, in Echtzeit und guter Qualität (bilineare bzw. bikubische Interpolation).

Raster/Vektor-Überlagerung: Anti-Aliasing (Vermeidung der unerwünschten Treppeneffekte bei der Aufrasterung von Vektoren) ist vorzusehen. Wechselweises Ein- und Ausblenden von Raster- bzw. Vektordaten soll auf Knopfdruck möglich sein. Linienbreite der Vektordaten in Pixeln soll sich beim Vergrößern nicht ändern.

Verarbeitungsschritt		Typ	Automation	Verifikation/Nachbearbeitung
Bildvorverarbeitung		nicht-semantisch	einfach	
Bildorien- tierung	Wiederherstellung der inneren Orientierung	semantisch	einfach	visuell / interaktiv
	Bestimmung von Verknüpfungsinformation	nicht-semantisch	möglich	robuste Ausgleichung und visuell / interaktiv
	Bestimmung von Paßinformation	semantisch (nicht-semantisch)	schwierig	robuste Ausgleichung und visuell / interaktiv
Oberflächenableitung		nicht-semantisch	möglich - schwierig (je nach Bildmaßstab)	Visualisierung von Oberflächen und Ableitung von Orthobildern / interaktiv
Orthoprojektion und Mosaiking		nicht-semantisch	einfach	visuell / interaktiv
thematische Bildauswertung		semantisch	sehr schwierig	visuell / interaktiv

Photogrammetrische Verarbeitungskette für digitale Bilder.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen



Interaktive Koordinatenmessung:

Form, Farbe, Größe und Opazität des Cursors müssen vom Operator frei wählbar sein.

2 Möglichkeiten für die Relativbewegung zwischen Cursor und dargestelltem Bildausschnitt sollten möglich sein:

- (1) Das Bild bzw. die Bilder (Stereomodus) bewegt/bewegen sich hinter einem im Zentrum des Bildschirmes platzierten Cursors.
- (2) Vor einem festen Bildschirmausschnitt wird der Cursor mit der Maus an die gewünschte Stelle gebracht.

Der photogrammetrische Auswerter bevorzugt die Methode 1 (wie beim analytischen Plotter).

Die Methode 2 ist leichter in einer DPAS zu implementieren, hat aber für den photogrammetrischen Auswerter eine Reihe von wichtigen Nachteilen:

- Stößt man an den Rand des gerade bearbeiteten Bildschirmausschnittes, so muss ein neuer Ausschnitt geladen und dargestellt werden. Dies kostet Zeit, im Stereomodus geht der Raumeindruck verloren. Störend bei der Auswertung linienhafter Objekte.
- Damit der Betrachter einen guten Stereoeindruck erhält, muss das räumliche Modell vom Betrachter aus gesehen, in oder hinter der Monitorebene liegen. Da die Horizontalparallaxen a priori nicht bekannt sind, kann nicht vorherbestimmt werden, wie das Raumbild in Bezug auf die Monitorebene zu liegen kommt → nochmaliges Laden mit veränderter x-Parallaxe verzögert und erschwert die Arbeit.
- Der menschliche Betrachter kann bei der stereoskopischen Betrachtung nur geringe y-Parallaxen tolerieren. Sind beide Bildausschnitte nicht beweglich, müssen also im gesamten Modell vorher die y-Parallaxen beseitigt sein. → Das ist nur durch Umrechnung beider Bilder in **Epipolargeometrie** erreichbar. Die Umrechnung in die Epipolargeometrie kostet Zeit und Speicherplatz.
(Anmerkung: Für Zeilenbilder (SPOT, etc.) mathematisch streng nicht möglich!)
- Für den photogrammetrischen Auswerter ist die Auswertung mit bewegtem Cursor ungewohnt.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

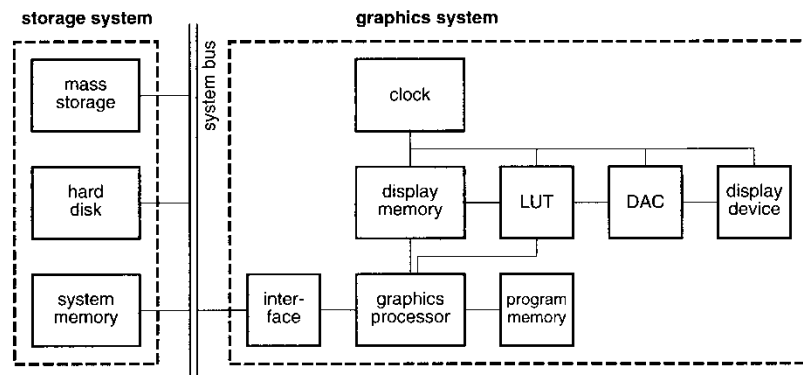
Koordinatenmessung mit Subpixelgenauigkeit:

- (1) Die Bilder können am Monitor vergrößert dargestellt werden, d.h. zu jedem Bildpixel gehören mehrere Monitorpixel. Bei 4 Monitorpixel beträgt die Messgenauigkeit bezogen auf das Bild 0.25 Pixel. Bei der Bildvergrößerung verkleinern sich allerdings die am Monitor dargestellten Bildausschnitte um denselben Faktor.
- (2) Alternativ dazu wäre die Bewegung der nicht vergrößerten Bilder relativ zum Cursor in Subpixelschritten. Resampling ist notwendig. Auch hier müssen die Pixelkoordinaten für die den Bildern überlagerte Vektorinformation mit der Bildwiederholfrequenz jeweils neu aus den Bildkoordinaten berechnet werden.

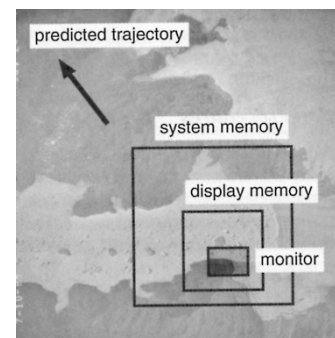
Bildverschiebung: Schnelle und ruckfreie Verschiebung der Bilder um größere Beträge sollte möglich sein, um sich im Stereomodell bewegen zu können, ohne den Stereoeindruck zu verlieren. Aufgrund der großen Datenraten ein Problem. Dafür bietet sich eine Möglichkeit an: **Real-time roaming**.

(Anforderung: In 2 Sekunden muss man den sichtbaren Bildinhalt in beliebiger Richtung um die Größe des Ausschnittes selbst kontinuierlich verschieben können.)

→ Bildspeicher sollte 4-mal so groß sein wie der Monitor eigentlich darstellen kann. → Automatisches Nachladen von Bilddaten in den Systemspeicher in jenen Randbereichen, welche dem Cursor am nächsten liegen. → Prädiktion der Bewegungsrichtung des Cursors.



Bildspeicher und graphisches System.



Schematische Darstellung der verschiedenen Fenster.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

Bemerkungen zum Farbmonitor zur Bilddarstellung und – auswertung:

Der Monitor ist das wichtigste Verbindungsglied zwischen Operateur und DPAS.
Die Leistungsdaten sind daher wesentlich für ein komfortables und ermüdungsfreies Arbeiten.

Farbmonitor: Anforderungen an Helligkeit, Kontrast, Bildschärfe, geometrische Verzerrungen,
Farbkonvergenz, Anzahl der Pixel (Monitorauflösung) und Bildwiederholffrequenz.

Um zitternde Bilder zu vermeiden (flimmern), ist eine *Bildwiederholffrequenz* von mind. 60 Hz pro Bild notwendig. Bei der Stereobetrachtung wird daher ein Monitor von mindestens 120 Hz Bildwiederholffrequenz benötigt.

Monitorauflösung: Das menschliche Auge kann in dem deutlichen Betrachtungsabstand von 25 cm 7-8 Linienpaare pro mm (lp/mm) auflösen. Die Auflösung heutiger photogrammetrischer Luftbildfilme beträgt ca. 60 lp/mm. Um die Auflösung des Films ausnutzen zu können, ist bei der Betrachtung also eine etwa 8-fache Vergrößerung des Bildes notwendig. Bei dieser Vergrößerung hat man im analytischen Auswertegerät z.B. am Planicomp P1 ein Gesichtsfeld von 25 mm im Durchmesser.

Wird ein Luftbild eingescannt, soll kein Informationsverlust eintreten. Die richtige Pixelanzahl pro Linienpaar liegt etwa 2-2.8. So ergibt sich für die 60 lp/mm des Films eine Pixelgröße von ca. 7 μm und damit ein Wert von etwa 3600 Pixel für den Durchmesser des im analytischen Auswertegerät sichtbaren Bildausschnittes. Ein vergleichbarer Monitor müsste also eine Auflösung von 3600² Pixel aufweisen.

Die heute verfügbaren Monitore kommen bei weitem nicht an die Auflösung analytischer Auswertegeräte heran.

→ Für die DPAS sollten die höchstaflösenden verfügbaren Monitore verwendet werden (z.B. 28" Panoramamonitor).

Um das Bildformat des Bildmonitors voll auszunutzen, müssen die Bedienungsoberfläche mit Menüs sowie andere Informationen auf einem separaten graphischen Kontrollmonitor dargestellt werden.



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

Vorteile für universelle DPAS gegenüber analytischen Auswertesystemen:

- Möglichkeit zur Zusammenfassung aller Arbeitsschritte in nur einem Gerät mit einheitlicher Benutzerschnittstelle (Mono- und Stereokomparator, analyt. Auswertegerät, Orthoprojektor, etc. in einem Gerät)
- Keine opto-mechanischen Teile (keine Kalibrierung notwendig, Ergebnisse sind eher reproduzierbar; bei der Bilddatengewinnung und –ausgabe werden sehr wohl opto-mechanische Teile benötigt.)
- Konstante Bildgeometrie und –radiometrie (Filmschrumpf bzw. Filmalterung der gescannten Bilder bleibt erhalten.)
- Beliebige Vervielfältigung der Bilddaten ohne Qualitätsverlust
- Integration von Bildverarbeitungsalgorithmen (schnelle, lokale Kontraständerung zur besseren Detailerkennung; Histogramm-Modifikation bei der Orthophotoherstellung insbesondere bei Orthophotomosaiken)
- Raster- und Vektorschnittstellen zu GIS und CAD; einfache farbige Raster-/Vektorüberlagerung in Stereo (Integration von GIS-Datenbanken (Vektordaten und DGM) → Lösung durch die „digitale Einspiegelung“)
- Bei der Aerotriangulation müssen keine „künstlichen“ Punkte gebohrt werden (Bildinformation wird nicht zerstört, Anzeige in der Overlayebene.)
- gewünschte Messmarke (Form, Größe, Farbe und Opazität) frei wählbar
- Direkte Verfügbarkeit von Stereomodellen ohne Notwendigkeit zur Wiederholung der inneren Orientierung
- Simultane Verarbeitung beliebig vieler Bilder; modellübergreifende Auswertung von Bildverbänden in allen überlappenden Bildern; thematische Auswertung: Erfassung von linearen Objekten über die Modellgrenzen hinweg durch automatisches Laden des Nachbarmodelles in einigen Sekunden.
- Gemeinsame Auswertung von Bildern unterschiedlicher Aufnahmegeometrien
- Stereobetrachtung bei freier Kopfbewegung; Stereobetrachtung durch mehrere Auswerter gleichzeitig; Stereobetrachtung konvergenter Aufnahmen (keine starre Haltung vor dem Okular; Lehrzwecke und Präsentation; Epipolargeometrie für Stereobetrachtung)
- Transportfähigkeit (von einem Ort zum anderen)
- Elektronische Bilddatenübertragung (Bilddaten schnell von einem Ort zum anderen übertragen; real-time photogrammetry)

(Stand 1995)



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

Nachteile für universelle DPAS gegenüber analytischen Auswertegeräten:

- Lange Rechenzeiten und große Datenmengen (Luftbild mit 15 µm Pixelgröße und 8 bit/Pixel = 250MB; pro Bildverband gibt es jedoch mehrere Hundert Bilder; viele Prozesse müssen im Hintergrund (batch) in der Nacht und am Wochenende ablaufen.)
- Notwendigkeit zum Scannen analoger Vorlagen (digitale Bildkameras sind in naher und mittlerer Zukunft nicht mit erforderlicher Auflösung verfügbar; beim Scannen ist mit einem Verlust an radiometrischer Bildqualität zu rechnen; Abhilfe durch Erweiterung des Grauwerteberreiches von 8 auf 12 bzw. 16 bit → größere Datenmengen)
- Komplizierte und teure Bildmanipulation (teure Graphiksubsysteme; Bilddrehung, -bewegung, -vergrößerung ist bei analytischen Auswertegeräten durch opto-mechanische Mittel preiswert gelöst)
- Zu kleine Monitore für die Bilddarstellung, zu geringe Bandbreite (60 Hz ist nicht ausreichend → 100 Hz besser; Monitormarkt wird vom TV (high definition television) dominiert und nicht von der Photogrammetrie)
- Qualität der Stereobetrachtung digitaler Bilder ist mit einigen Nachteilen verbunden (Auswerter kann sich nicht mit der Stirn am Okular anlehnen; es muß eine Brille, die mehr oder weniger schwer ist, getragen werden; Brille schluckt 75% des verfügbaren Lichtes; Auslöschung ist nicht perfekt → Geisterbilder; Spiegelungen am Monitor)
- Kein direkter Zugang zu digitalen Daten (man benötigt immer einen Computer, um die Bilder anschauen zu können bzw. um sie transportieren zu können)

(Stand 1995)



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen

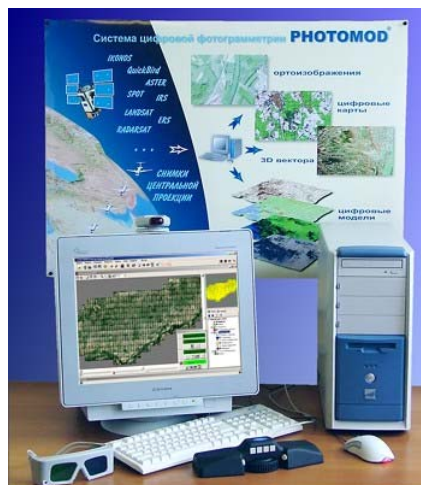
Digital photogrammetric systems (survey of system suppliers)

ImageStation
Leica Photogrammetry Suite
SOCET SET
DVP Complete W/S
ISM DiAP
DAT/EM StereoCapture
ATLAS/DSP
VirtuoZo
VR Two
DDPS
PhoTopol
PHOTOMOD
etc.

Intergraph (<http://www.intergraph.com/>)
Leica Geosystems (<http://gi.leica-geosystems.com/>)
BAE Systems (<http://socetset.com/>)
DVP Geomatic Systems (<http://www.dvp-gs.com/>)
Microsoft Vexcel (<http://www.vexcel.com/>)
DAT/EM Systems International (<http://www.datem.com/>)
KLT Associates (<http://www.kltassoc.com/>)
SUPRESOFT (<http://www.supresoft.com/>)
Cardinal Systems (<http://www.cardinalsystems.net/>)
3D Mapper (<http://www.3dmapper.com/>)
TopoL Software (<http://www.topol.cz>)
Racurs (<http://www.racurs.ru/>)



ImageStation (Intergraph)



PHOTOMOD (Racurs)

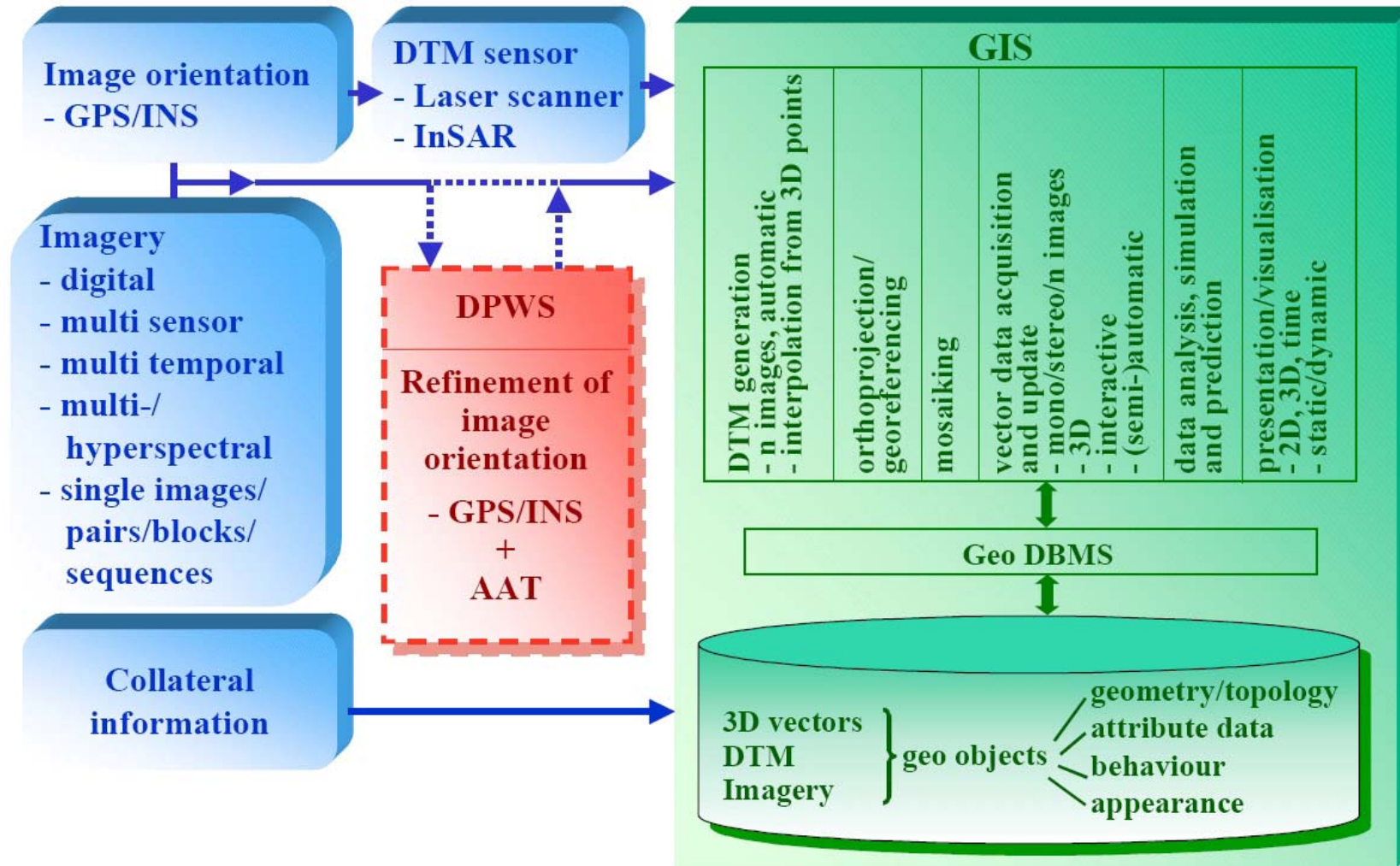


VrTwo (Cardinal Systems)



5.5 Stereoauswertegeräte

5.5.3 Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen



Conceptual design for a tight integration of DPWS and GIS. The DPWS is reduced to performing the refinement of the image orientation as an optional pre-processing step, all other functionality is part of the GIS.

(Quelle: Prof. Chr. Heipke, 2000)



5.6 Auswerteelemente und Genauigkeiten

Wir wollen die Auswerteelemente *Einzelpunkte*, *Grundrisslinien* und *Höhenlinien* betrachten.

Die stochastischen Zusammenhänge in einem orientierten Stereomodell sind sehr komplex und können nur durch ausführliche Fehlerfortpflanzungsüberlegungen erfasst werden. Die Genauigkeit, welche bei einer Stereokartierung erzielt werden kann, hängt von verschiedenen Parametern ab:

- Orientierungsverfahren,
- Anzahl der Passpunkte,
- Auswertegerät,
- Bildqualität,
- Filmverzug, Objektivverzeichnung, etc.

Annahme ist der Standardfall der Luftbildauswertung (genäherter Stereonormalfall).

Einen guten Einblick in die erzielbaren Genauigkeiten bietet die schon bekannte **Fehlertheorie des Normalfalles**.

Wir wollen hier **Faustformeln** für die **grobe Genauigkeitsabschätzung** angeben. Die Angaben stammen aus empirischen Genauigkeitsuntersuchungen und spiegeln die theoretischen Genauigkeiten sehr gut wider.

Signalisierte Punkte: (Koordinatenmessung am Präzisionskomparator oder am analytischen Auswertegerät)

Lage: $\sigma_{x,y} = \pm 6 \mu\text{m}$ im Bild

Höhe: $\sigma_z = \pm 0.06 \text{‰} \cdot h_g$ (SW – WW)

$\sigma_z = \pm 0.08 \text{‰} \cdot h_g$ (ÜWW)

h_g ... Flughöhe über Grund

Bei Bildtriangulationen mit zusätzlichen Parametern ist eine Genauigkeitssteigerung bis zu 50% möglich.

Lagegenauigkeit ist unabhängig von c .

σ_z von ÜWW-Aufnahmen ist entgegen der Theorie schlechter (zufolge größerer Verzeichnung und schlechterer Bildqualität).



5.6 Auswerteelemente und Genauigkeiten

Natürliche Punkte: (gut einstellbare Punkte wie z.B. Hausgiebel)

$$\text{Lage: } \sigma_{X,Y} = \pm \sqrt{\sigma_{X,Y(\text{sig})}^2 + \sigma_{X,Y(\text{def})}^2} \quad \sigma_{X,Y} = \sigma_X = \sigma_Y$$

$$\text{Höhe: } \sigma_Z = \pm \sqrt{\sigma_{Z(\text{sig})}^2 + \sigma_{Z(\text{def})}^2}$$

$$\text{Lage: } \sigma_{X,Y} = \pm 10 - 13 \mu\text{m im Bild}$$

$$\text{Höhe: } \sigma_Z = \pm 0.1 - 0.13 \% \cdot h_g \quad (\text{SW} - \text{WW})$$

$$\sigma_Z = \pm 0.13 - 0.15 \% \cdot h_g \quad (\text{ÜWW})$$

$$\text{Streckenfehler: } \sigma_s = \pm \sigma_{X,Y} \cdot \sqrt{2}$$

Die photogrammetrisch abgeleitete Strecke ist im wesentlichen unabhängig von der Streckenlänge.

Beispiel: Luftbild 1:30.000, $c = 152 \text{ mm}$ (WW), $l = 60\%$

$$h_g = c \cdot m_b = 4560 \text{ m}$$

$$B = 2760 \text{ m}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = \sigma_y = \pm 10 \mu\text{m} \\ \sigma_{px} = \pm 14 \mu\text{m} \end{array} \right\} \text{Messunsicherheiten}$$

↓

$$\sigma_x = \sigma_y = \pm 30 \text{ cm}$$

$$\sigma_z = \pm 46 - 59 \text{ cm} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_z = \pm m_b \cdot \frac{h_g}{B} \cdot \sigma_{px} = \pm 49.6 \cdot \sigma_{px} = \pm 69 \text{ cm} \quad (\text{vgl. Abschnitt 5.2.3})$$



5.6 Auswerteelemente und Genauigkeiten

Grundrisslinien:

$$\sigma_G = \pm 45 \mu\text{m im Bild}$$

(unabhängig vom Bildmaßstab)

$l:m_k$	m_b
1:1000	6300-9500
1:5000	14000-21000
1:10000	20000-30000
1:25000	32000-47000
1:50000	45000-67000

Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab.

(Anmerkung: Interpretierbarkeit ist bei kleinmaßstäbigen Luftbildern nicht mehr gegeben!)

Höhenlinien:

$$\sigma_H = \sigma_z + \sigma_G \cdot \tan \alpha \quad \dots \quad \text{Koppe'sche Formel}$$

σ_z ... Höhenmessfehler kontinuierlicher Linien für Messbilder mit $l = 60\%$

$$\sigma_z = \pm 0.2 \text{‰} \cdot h_g \quad (\text{SW - WW})$$

$$\sigma_z = \pm 0.25 \text{‰} \cdot h_g \quad (\text{ÜWW})$$

σ_G ... Lagemessgenauigkeit kontinuierlicher Linien

$\sigma_G = \pm 100 \mu\text{m im Bild}$ für große Maßstäbe (Höhenlinien müssen "gesucht" werden.)

$\sigma_G = \pm 0.2 \text{ mm}$ in der Karte für kleine Maßstäbe

$$\sigma_z = \pm 0.25 - 0.30 \text{‰} \cdot h_g$$

Grobe Faustformel

(Anmerkung: $\sigma_G \cdot \tan \alpha$ hat keinen wesentlichen Einfluss, abgesehen von extremen Geländeneigungen.)

Anmerkung: Der mittlere Fehler der Höhenlinien sollte $1/8$ bis $1/4$ des Höhenlinienintervalles nicht überschreiten.

Als Höhenintervall in m wählt man höchstens die Tausender der Kartenmaßstabszahl.



5.6 Auswerteelemente und Genauigkeiten

Genauigkeitsangaben für digitale photogrammetrische Auswertung

Die Bildkoordinatenmessgenauigkeit wird in erster Linie von der Bildauflösung beeinflusst.

- (i) interaktive Koordinatenmessung durch den Operateur
- (ii) semi-automatische Koordinatenmessung durch grauwertbasierte Bildzuordnung (z.B. Korrelationskoeffizient)

$\sigma_{x,y} = \sigma_x = \sigma_y$... Messgenauigkeit in Einheiten eines Pixels, z.B. 1, 1/2 - 1/10 Pixel

$\sigma_{x,y} = 0.25$ Pixel für signalisierte Punkte

$\sigma_{px} = \sigma_{x,y} \cdot \sqrt{2}$... bei monoskopischer Parallaxenmessung

$\sigma_{x,y} = 0.4$ Pixel für natürliche Punkte

Lage: $\sigma_{x,y} = \pm m_b \cdot \Delta s \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{x,y}$

Δs [μm] ... Bildelementgröße

Höhe: $\sigma_z = \pm m_b \cdot \frac{h_g}{B} \cdot \Delta s \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{px}$

Beispiel: Luftbild 1:30.000, $c = 152$ mm (WW), $l = 60\%$, Pixelgröße $15 \mu\text{m}$ (= 1693 dpi), $\sigma_{x,y} = 0.5$ Pixel

$$h_g = 4560 \text{ m}$$

$$B = 2760 \text{ m}$$

↓

$$\sigma_{x,y} = \pm 30 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5 = \pm 23 \text{ cm}$$

$$\sigma_z = \pm 30 \cdot \frac{4560}{2760} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5 \cdot \sqrt{2} = \pm 53 \text{ cm}$$



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

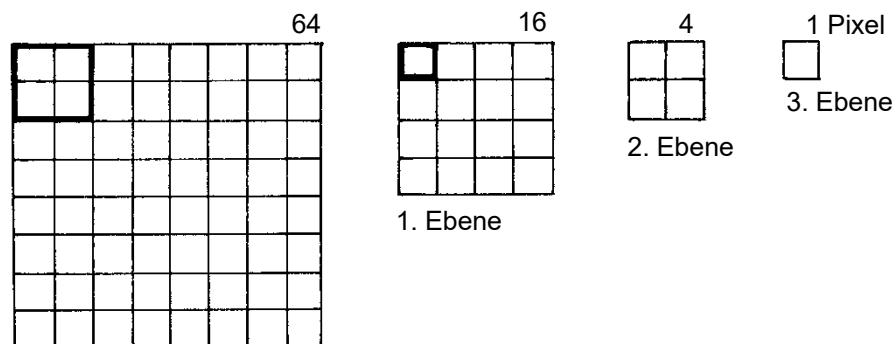
5.7.1 Bildpyramide

Definition: *Pyramidenstruktur*

Eine Pyramide entsteht, wenn digitale Bilder von immer größer werdender Auflösung so übereinander gelegt werden, dass die geometrischen Beziehungen zwischen den Bildelementen zweier übereinander liegender Bilder alle dieselben regelmäßige Struktur aufweisen. Fasst man die geometrischen Beziehungen zwischen allen aufeinander folgenden Bildpaaren zusammen, so entsteht eine **hierarchische Struktur**.

2 x 2 / 4 – Bildpyramide

2 x 2 ... Reduktionsfenster
4 Reduktionsfaktor



Original

4 Bildelemente eines 2x2-Fensters werden zu einem Bildelement der nächsthöheren Ebene zusammengefasst. Die Reduktionsfenster überlappen sich nicht. Hierbei muss ein Reduktionsoperator definiert werden:

- Elimination jeder zweiten Zeile und jeder zweiten Spalte $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$,
- einfache Mittelbildung $\frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$,
- gewichtete Mittelbildung (z.B. Gauß-Filter),
- beliebiger Faltungsoperator.



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.1 Bildpyramide

Im Falle der Reduktion um den Faktor 2 ergibt sich nach dem Gesetz der geometrischen Reihe eine Erhöhung des Speicherbedarfes gemäß

$$\text{Speicherplatz} = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{4}\right)^i = 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \dots = \frac{1}{1 - \frac{1}{4}} = 1 \frac{1}{3} \quad (\text{bei vollständiger Pyramide}).$$

Durch die Mittelbildung kommt es zu einer Bildglättung. Grauwertkanten werden unterdrückt, entsprechende Bildstrukturen verschwinden. Beim einfachen Mittel entspricht der Grauwert der obersten Pyramidenstufe dem Mittelwert aller Grauwerte des Bildes.

Anwendungen der Bildpyramide in einer DPAS:

- Schneller Bildaufbau beim interaktiven Arbeiten (Übersichtsbild, diverse Auflösungsebenen)
- Beschleunigung von Suchprozessen (Hierarchisches Suchen vom Groben ins Feine bei der automatischen Bildzuordnung: in den größeren Auflösungsebenen wird vorerst eine Näherungslösung gesucht und diese in den darunter liegenden, feineren Auflösungsebenen sukzessive verbessert, bis schließlich in der untersten Pyramidenebene (= Originalbild) die Lösung gefunden ist.)



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

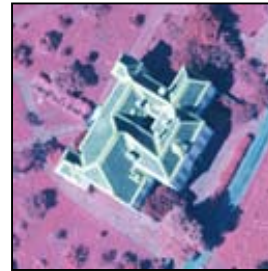
5.7.1 Bildpyramide



256 x 256



128 x 128



0.5 m

64 x 64



1 m

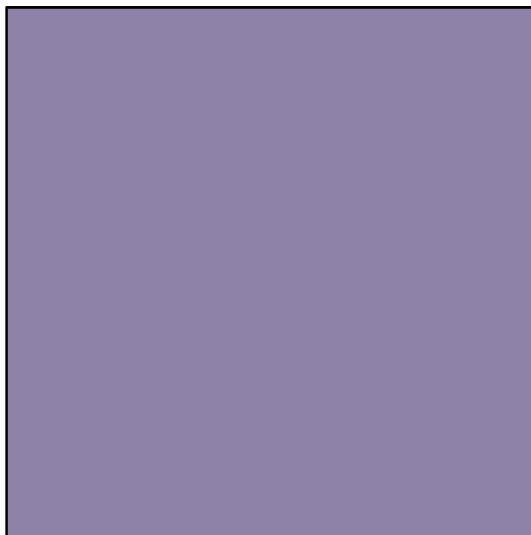


2 m



1 x 1

0.25 m



2x2/4 Pyramide

Reduktionsfenster: 2 x 2

Reduktionsfaktor: 4

Reduktionsoperator: Mittelwertbildung der Grauwerte

Zahl der Ebenen: 8 (ohne Originalbild)

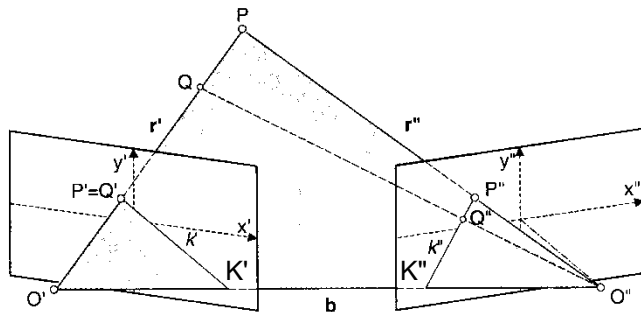
= vollständige Bildpyramide

Speicherplatz: $65536 + (16384 + 4096 + 1024 + 256 + 64 + 16 + 4 + 1) =$
 $65536 + 21845 = 87381$ Bytes/Farbe

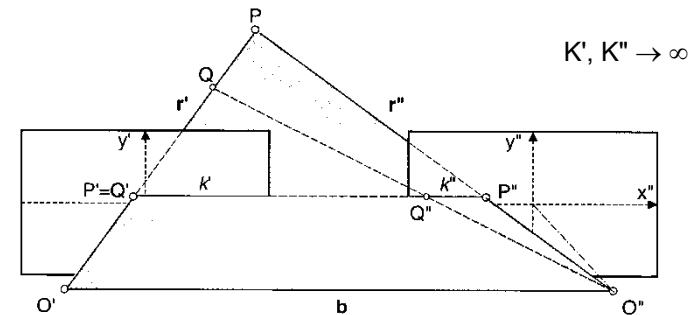


5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern



Kernebene bei konvergenten Aufnahmen.



Kernebene für den Stereonormalfall.

Kernstrahlgeometrie (epipolar geometry)

- Aufnahmebasis (air basis)
- Kernebene (epipolar plane)
- Kernstrahlen (epipolar lines)
- Kernpunkte (epipoles)

Die Kernstrahlgeometrie (= Epipolar geometrie) spielt in der digitalen Photogrammetrie eine große Rolle.

Wir gehen von einem relativ orientierten Stereobildpaar aus.

Die **Kernebene** wird durch die beiden Projektionszentren O' und O'' sowie den Objektpunkt P aufgespannt.

Diese Ebene schneidet die beiden Bildebenen in den **Kernstrahlen** k' und k'' . Alle Kernstrahlen eines Bildes schneiden einander im **Kernpunkt** K des betreffenden Bildes. Die Kernpunkte ergeben sich als Durchstoßpunkte der Verbindungsgerade der Projektionszentren (= Kernachse) mit den Bildebenen.

Im photogrammetrischen Normalfall liegen die Kernpunkte im Unendlichen und die Kernstrahlen sind kollinear und parallel zur Stereobasis.

Die Kernpunkte sind daher auch die den Projektionszentren entsprechenden Bildpunkte.



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

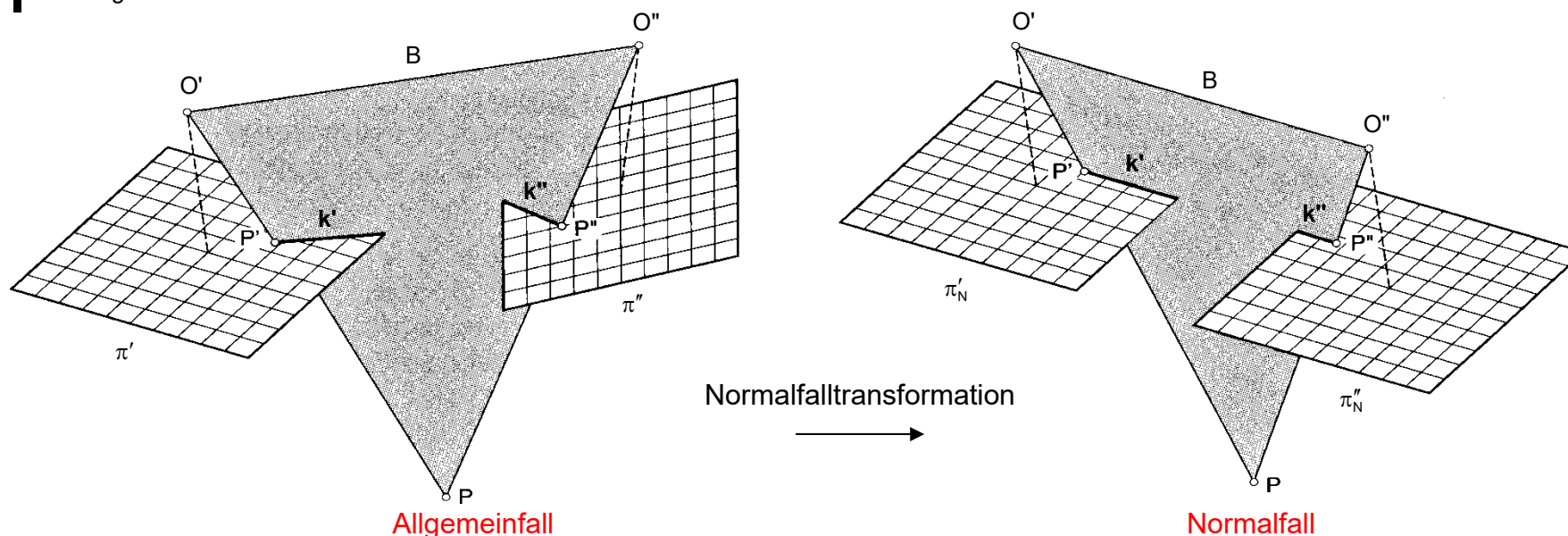
5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern

Alle **homologen Bildgeraden** gehen durch die entsprechenden Kernpunkte.

Wird z.B. im linken Bild ein Bildpunkt $P'(x',y')$ vorgegeben, so muss der dazu homologe Punkt $P''(x'',y'')$ im rechten Bild irgendwo auf dem Kernstrahl k'' liegen. Diese Überlegung gilt auch äquivalent vom rechten Bild aus gesehen. D.h. mit anderen Worten, dass ein Tiefenunterschied durch eine entsprechende Parallaxe entlang der Kernstrahlen verursacht wird.

Für eine parallaxfreie Betrachtung müssen die beiden Kernstrahlen k' und k'' in einer Geraden (kollinear) und parallel zur Betrachtungsbasis (= Augenbasis) orientiert sein. Bei einer komplanaren Anordnung der beiden Bilder, die nicht dem Stereonormalfall entsprechen, sind die Kernstrahlen nicht parallel zueinander. Es kann daher ein Raumbild nur ausschnittsweise durch fortgesetztes Verkanten der Stereobildpaare realisiert werden – im Extremfall, bei konvergenten Aufnahmen, nur punktweise.

- Für die parallaxfreie Stereobildbetrachtung am Monitor einer DPAS müssen die Bilder in der Geometrie des Stereonormalfalles vorliegen.
- Der Suchprozess bei der digitalen Bildzuordnung kann geometrisch auf eine eindimensionale Suche entlang der Kernstrahlen reduziert werden.





5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern

Nach der Ermittlung der Orientierungselemente (relativ bzw. absolut) für zwei überlappende Bilder liegen die Voraussetzungen für die Herstellung eines sogenannten **Normalbildpaares (normalized images)** vor. Jede Ebene parallel zur Basis B schneidet die beiden Strahlenbündel in **Normalbildern**.

Die neuen Bildmatrizen der Normalbilder sind durch Resampling (vgl. Entzerrung bzw. Differentialentzerrung) aus den originalen Digitalbildern abzuleiten (→ Theorie vgl. LV Bildmessung).

Sinnvollerweise wird man die neue Kammerkonstante c_N zumindest gleich groß wählen wie c – wenn nicht etwas größer, um keinen Informationsverlust vom Original- in das Normalbild zu erleiden.

Die Bildelementgröße sollte in etwa gleich bleiben!

Der geometrische Zusammenhang zwischen Original- und Normalbild ist projektiv.

ω_N kann mit $(\omega' + \omega'')/2$ (Werte aus der relativen Orientierung durch Bild Drehungen) angenommen werden.

Praktische Durchführung:

- Off-line Berechnung der Normalbilder:

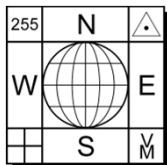
Nachteil: doppelter Speicherplatzbedarf, da die Normalbilder zusätzlich zu den Originalbildern abzuspeichern sind. Die Normalbilder ersetzen i. Allg. die Originalbilder nicht, da z.B. für die Orthophotoherstellung bzw. für andere digitale photogrammetrische Prozesse auf die Originalbilder zurückgegriffen wird (Informations- bzw. Qualitätsverlust).

- On-line Berechnung der Normalbilder:

Vorteil: Die Normalbilder brauchen nicht mehr abgespeichert werden. Für die augenblickliche Anzeige von Ausschnitten der Normalbilder am Stereobildschirm wird in Echtzeit die gewünschte Umbildung durchgeführt und am Bildschirm dargestellt. Dies stellt eine große Herausforderung an die Hard- und Software einer DPAS dar.

Die automatische Bildzuordnung ist bei Normalbildern besonders vereinfacht, da für die y_N -Bildkoordinaten $y'_N = y''_N$ gelten muss (y -Parallaxe ist Null). Die eindimensionale Suche kann auf jene Bildzeile beschränkt werden, in welcher der betrachtete Bildpunkt liegt.

Bei einem Stereotriplet müssen für das mittlere Bild im Off-line-Modus 2 Normalbilder gerechnet werden.



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern



linker Stereopartner



rechter Stereopartner

Objekt: Schloss Wildbach bei Deutschlandsberg

Aufnahmesystem: Linhof Metrika 45

Bildformat 90 x 120 mm, SW-Rollfilm

Objektiv 90 mm (Weitwinkel)

9 x 11 Reseaukreuze

Aufnahmedisposition: genäherter Normalfall



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern



linker Stereopartner



rechter Stereopartner

Normalfallbilder (Epipolarbilder)

Stereoskopische Betrachtung: Split-Screen-Methode



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.2 Berechnung von digitalen Normalfallbildern

Anaglyphenbild Schloss Wilzbach Nordost-Fassade



Stereoskopische Betrachtung: Anaglyphenverfahren



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.3 Digitale Punktübertragung

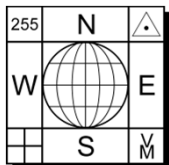


2. **halbautomatisch:** Der Operateur wählt („klickt“) am Bildschirm manuell bei monoskopischer bzw. stereoskopischer Bildbetrachtung einen Punkt in einem Ausgangsbild (= Musterbild mit Mustermatrix um den selektierten Punkt) aus. Die Bildkoordinaten aller homologen Punkte in den anderen Bildern (= Suchbilder mit Suchmatrizen) werden durch digitale Bildzuordnung (Kreuzkorrelation bzw. Least-Squares-Matching) ermittelt. Hierbei muss der Operateur meist noch eine Näherungslösung durch weiteres „Anklicken“ bzw. durch eine Schnellmessung in jedem neuen Bild vorgeben. Bei 5 oder 6 gemessenen homologen Bildpunkten innerhalb eines Modells kann eine relative Orientierung näherungsweise gerechnet werden. Der Suchraum kann dann bei weiteren Messungen innerhalb des Modells aufgrund der Kernstrahlgeometrie eingeschränkt werden.

Bewertung der Methode:

- ☺ zuverlässig und robust,
- ☺ große Genauigkeit,
- ☹ noch relativ hoher Aufwand,
- ☺ gleichzeitige Messung von mehr als 2 Bildern ist möglich (multi-image matching)

Programmsysteme: PHODIS AT (Zeiss), MATCH-AT (Inpho, Stuttgart), etc.



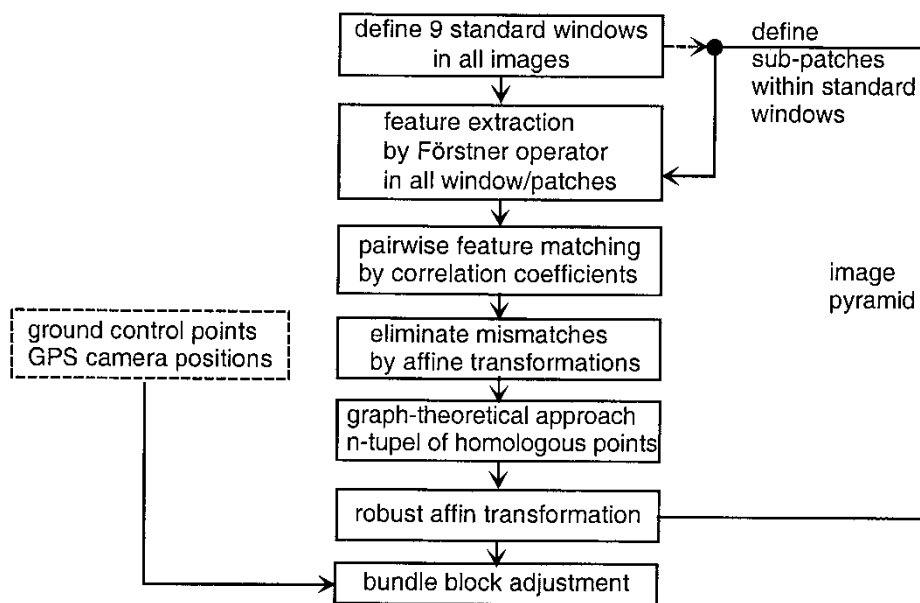
5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.3 Digitale Punktübertragung

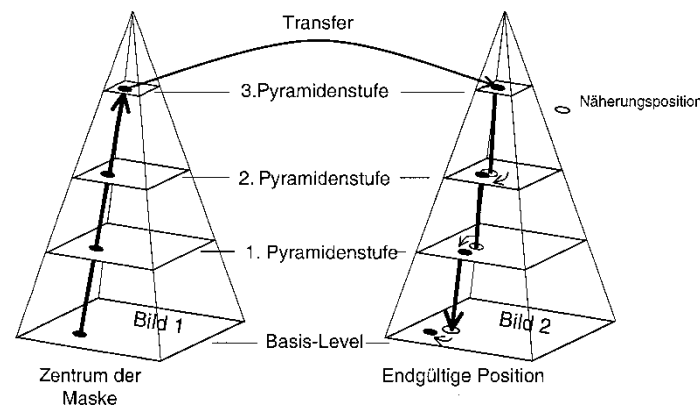
3. **vollautomatisch:** Das System startet mit *autonomer Punktübertragung* (in den 9 Standard-Bildausschnitten) der Luftbilder.
Die Bildkoordinaten werden durch digitale Bildzuordnung automatisch ermittelt

Methode: V. Tsingas (1992) als Beispiel.

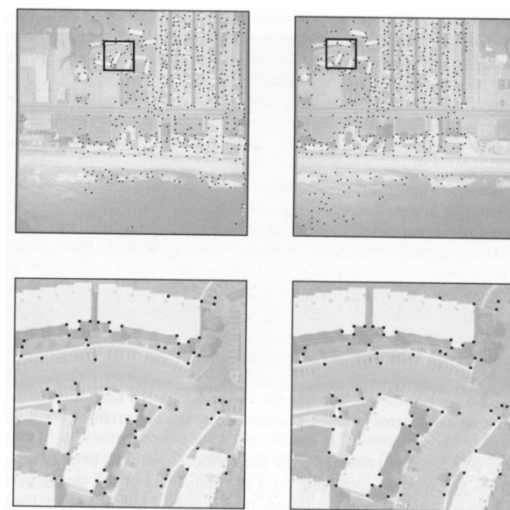
Bewertung der Methode: ☺ gleich wie bei Methode 2, jedoch viel geringerer Aufwand.



Automatische Aerotriangulation nach V. Tsingas (1992).



Hierarchische Bildzuordnung.



Automatische Detektion von markanten Punkten durch den Förstner-Operator.



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.4 Digitalisieren von analogen Bildvorlagen

Für die Digitalisierung photographischer Bilder stehen verschiedene Abtastsysteme (Bildscanner) zur Verfügung, die sich hinsichtlich Konstruktionsprinzip, Leistungsfähigkeit (geometrische und radiometrische Auflösung, Vorlagenformat, Scanzeiten) und Kosten beträchtlich unterscheiden.

■ Desktop-Scanner

- preisgünstig
- Vorlagenformat meist im A4-Format, optische Auflösung max. 2400 dpi, Quantisierung 24-bit
- meist nur für opake Vorlagen (Abzüge auf Photopapier)
- Zusatzvorrichtung für das Scannen von Kleinbildpositiven bzw. –negativen optional
- ☹ geometrisch ungenau und schlecht kalibrierbar ⇒ daher für photogrammetrische Zwecke nur bedingt einsetzbar

■ CAD-Scanner

- für die großformatige (A1, A0) Plan-Digitalisierung
- ☹ geringe geometrische Auflösung (0.1 – 0.2 mm) ⇒ für photogrammetrische Zwecke nicht einsetzbar

■ Repro-Scanner

- Einsatz im graphischen Gewerbe (Drucktechnik)
- Trommelscanner
- ☺ hohe radiometrische Auflösung
- ☹ geometrische Auflösung für photogrammetrische Anwendungen meist zu gering
- ☹ sehr teuer



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.4 Digitalisieren von analogen Bildvorlagen

Welche Eigenschaften soll ein photogrammetrischer Scanner haben?

- hohe geometrische Genauigkeit (besser als $\pm 2 \mu\text{m}$)
- hohe geometrische Auflösung (bis $5 \mu\text{m} = 5080 \text{ dpi}$)
- hohe radiometrische Genauigkeit (bis $\pm 0.3 \text{ DN}$)
- großer Dichteumfang bis 3D oder mehr (A/D-Wandlung bis 48 Bits/Pixel)
- Bildformat mindestens Luftbildgröße (23 cm x 23 cm)
- meist Durchlicht (selten Auflicht)
- gut definierte Datenschnittstelle bzw. Anbindung zur DPAS
- standardisierte Datenformate (TIFF, JPEG, RAW, etc.)
- kurze Scanzeiten
- leistungsfähige Software (Steuerung, Kalibrierung, Nachbearbeitung)
- Rollfilmeinzug optional

Um die geometrische Genauigkeit des photogrammetrischen Scanners feststellen bzw. kontrollieren zu können, werden Referenzgitter (auf Glasplatte bzw. maßhaltiger Folie) in regelmäßigen Zeitabständen eingescannt und automatisiert ausgewertet.

Das Kalibrierungsprotokoll gibt Auskunft über die geometrische Genauigkeit zum Zeitpunkt der Überprüfung.

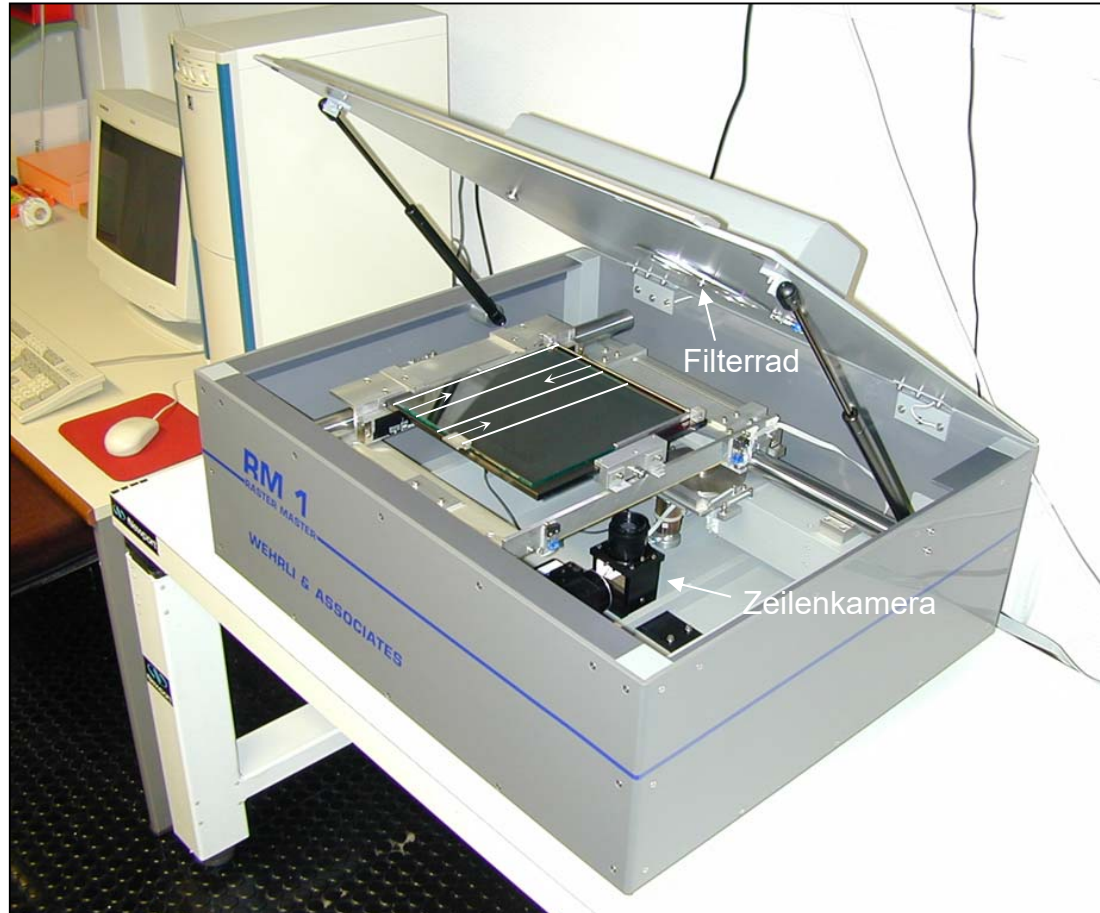
Photogrammetrische Scans können als Dienstleistung in Anspruch genommen werden.

In Graz: **ARGE Digitalplan ZT GmbH**, Münzgrabenstraße 4/I
<http://www.adp.co.at>



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.4 Digitalisieren von analogen Bildvorlagen



Farbbild-Digitalisierung:

3 Abtastungen

1 Belichtung pro Farbe

Filterwechsel (●●●) pro Farbe

⇒ sehr gute Repositionierungs-
genauigkeit erforderlich

⇒ zeitaufwendig

Optische Auflösung: 12 μm

Grauwerteumfang: 0 – 255

Datenmengen:

SW-Luftbild 12 μm -Scan

Bildgröße: 19456 x 19456

Datenmenge: 361 MB

Farbbild 12 μm -Scan

Datenmenge: 1.083 GB

RasterMaster-1 von Wehrl & Associates (Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, TU Graz)

Weitere Informationen: <http://www.wehriassoc.com>



5.7 Spezielle Themen der Digitalphotogrammetrie

5.7.4 Digitalisieren von analogen Bildvorlagen



VEXCEL UltraScan 5000
(Vexcel Imaging Austria)

Farbbild-Digitalisierung:

- 1 Abtastung
- 3 Belichtungen gleichzeitig über Strahlenteiler
- 6k Linear Array CCD (R , G , B)
- Optische Auflösung: 5 μ m
- Grauwerteumfang: 8 bzw. 16 Bits/Pixel



PhotoScan 2002
(Z/I Imaging)



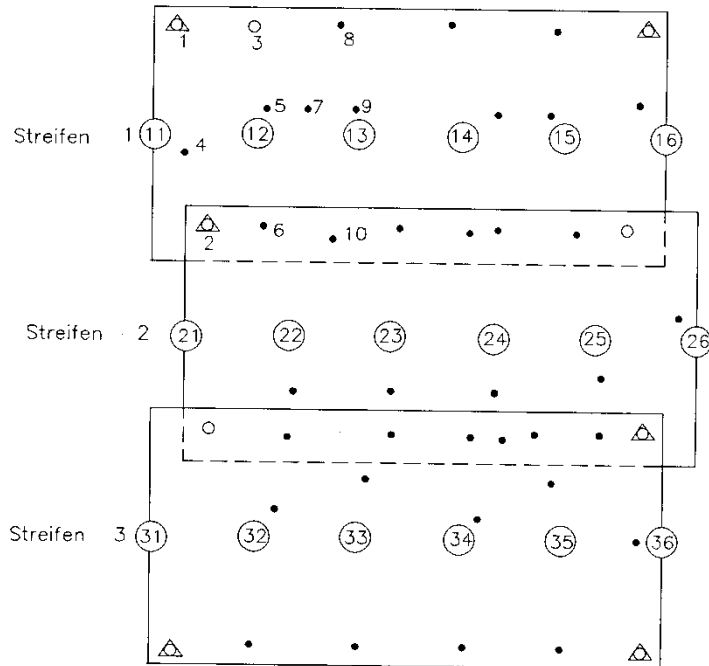
DSW600
(Leica Geosystems)

Weitere Informationen: <http://www.vexcel.com/>, <http://support.intergraph.com/>, <http://www.leica-geosystems.com/>



6. Mehrbildauswertung

6.1 Motivation und Definition



3 Flugstreifen
18 Luftbilder

Längsüberdeckung ~60%
Querüberdeckung ~30%

6 Vollpasspunkte
3 Höhenpasspunkte

Gesucht:

- Äußere Orientierung aller Luftbilder
- Landeskoordinaten aller Neupunkte

Die Neupunkte verknüpfen die Bilder innerhalb der einzelnen Streifen und sie verknüpfen auch die Bilder verschiedener Streifen.

Gruber'sche Schemalage

- △ Vollpasspunkt
- Höhenpasspunkt
- Neu- bzw. Verknuepfungspunkt
- ② Aufnahmeort mit Bildnummer

- 7 liegt in Bildern 12, 13;
- 5 liegt in Bildern 11, 12, 13;
- 6 liegt in Bildern 11, 12, 13, 21, 22, 23.

Bildverband einer Blockausgleichung.



6. Mehrbildauswertung

6.1 Motivation und Definition

Die photogrammetrische Triangulation mit Luftbildern wird Aerotriangulation genannt. Wir unterstellen Messbilder, die auf Film oder CCD-Flächensensoren festgehalten wurden.

Definition: Unter **Aerotriangulation** versteht man die **photogrammetrische Punktbestimmung** in größeren ($n \geq 3$) **Bildverbänden**. Dabei kommt es auf die **simultane Auswertung** des Bildverbandes an. Mit der Aerotriangulation können Gebiete ohne Passpunkte überbrückt werden.

Zweck: Autonome Beschaffung von Passpunkten (signalisierte Punkte, natürliche Punkte, „künstliche“ Punkte) im Bezugssystem für

- absolute Orientierung der Einzelmodelle (mindestens 3, jedoch besser 4 bzw. 6 Punkte),
- Entzerrung bzw. Differentialentzerrung (mit DGM),
- Einzelpunktbestimmung (z.B. in der Ingenieurvermessung)

bzw. die Bestimmung der Orientierungselemente aller Messbilder.

Vorteil: Punktbestimmung ohne Kontakt mit dem Objekt (echte Fernerkundung!) und daher häufig geringere Kosten und größere Geschwindigkeit, besonders unter unwirtschaftlichen Verhältnissen. Hohe Genauigkeit in der Punktbestimmung (z.B. ± 4 bis $15 \mu\text{m}$ im Bild, Bildmaßstab 1:20.000 \rightarrow 8 – 30 cm Lagegenauigkeit).

Erzielbare Genauigkeit:

- Theoretische Untersuchungen (Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes)
- Empirische Untersuchungen (Testfelder: Untersuchungen der EuroSDR, früher OEEPE, bzw. der DGPF, vgl. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html>)
EuroSDR ... European Spatial Data Research Organisation (<http://www.eurosd.net>)

Prinzip: Je nach Methode wird von **Stereomodellen** oder **Strahlenbündeln** ausgegangen. Aus diesen **photogrammetrischen Grundeinheiten** wird eine **Gesamtstruktur** gebildet, die einen großen Raum überdeckt. Diese Struktur ist in ein Passpunktnetz einzupassen. Wenn zusätzliche Informationen, wie z.B. flugzeuggestütztes GPS und INS, vorliegen, kann die Passpunktdichte geringer sein. Direkte Georeferenzierung ohne Passpunkte ist mit GPS/INS und Aerotriangulation möglich! (Beispiel: 3-Zeilenkamera; vgl. Abschnitt 3.2.6)

Methoden: (1) Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
(2) Bündelblockausgleichung



6. Mehrbildauswertung

6.1 Motivation und Definition

Geschichtliche Entwicklung der Aerotriangulation

1919: U. Nistri (1895-1962) formuliert zum erstenmal die räumliche Aerotriangulation und hat die Streifentriangulation gelöst. M. Gasser, Th. Scheimpflug und S. Finsterwalder hatten schon vorher ähnliche Vorstellungen entwickelt.

1920 – 1935: Weiterentwicklung der Streifentriangulation (durch Aschenbrenner, Santoni, Hugershoff, v. Gruber u.a.). Meist im Versuchsstadium, kaum Anwendungen in der Praxis.

1935 – 1940: W. Schermerhorn (1894-1977, Gründer des ITC) führt Aerotriangulation im großen Umfang zur Kartierung von Neu-Guinea durch.

Die Firma Hansa-Luftbild (Berlin) verwendet die Aerotriangulation als normales Arbeitsverfahren. Die „klassische“ Streifentriangulation erfährt erst nach dem 2. Weltkrieg ihre allgemeine Verbreitung und Anerkennung. Intensives Studium der Fehlertheorie zur Streifentriangulation (Aeropolygon-Methode): Systematische Streifendeformationen können erklärt werden und zwar durch die „doppelte Summation zufälliger Fehler“ (Berlin, Delft). Die Theorie der „quasisystematischen Fehler“ wird vom Grazer Professor H. Moritz mathematisch-statistisch belegt (1960)¹.

ab 1955: Streifentriangulation wird durch die Blocktriangulation abgelöst. Lösung vorerst über Analogrechner (IGN, Paris bzw. am ITC in Holland durch den Jerie Analog-Computer für Lage- und Höhenausgleich; Methode der Stereotriplets, Scher 1955).

ab 1960: Entwicklung numerischer Verfahren der Aerotriangulation (Elektronenrechner 1943/Aitken bzw. 1941/Zuse). Analytische Lösung der Aerotriangulation (Bündelblockausgleichung) durch D. Brown (1955) und H. Schmid (1958). Schmid war einer der ersten Photogrammeter, die einen Rechner verwendet haben.

1970 – 1990: Entwicklung von umfangreichen Programmpaketen für die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen und Bündelblockausgleichung (Stuttgart: PAT-M, PAT-B; Hannover: BLUH), robuste Punktbestimmung.

seit 1985: GPS für Bildflugplanung, DGPS-Passpunkte, DGPS zur Echtzeit-Kamerapositionierung (F. Ackermann), Automatisierung der Punktübertragung durch digitale Bildzuordnung (F. Ackermann/ W. Schneider, 1986; V. Tsingas, 1992).

¹http://www.helmut-moritz.at/SciencePage/FS_HannoverHomepage.pdf



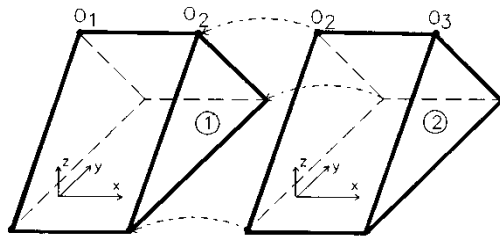
6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen



Die Modelltriangulation beruht auf der Verknüpfung unabhängiger Stereomodelle, in welchen die **Modellkoordinaten** der Pass- und Verknüpfungspunkte als auch der Projektionszentren gemessen (Analogauswertegerät) oder analytisch berechnet wurden. Im Rahmen der Blockausgleichung werden die einzelnen Modelle zu einem Modellverband verschmolzen und in das übergeordnete Objekt- bzw. Landessystem übergeführt.

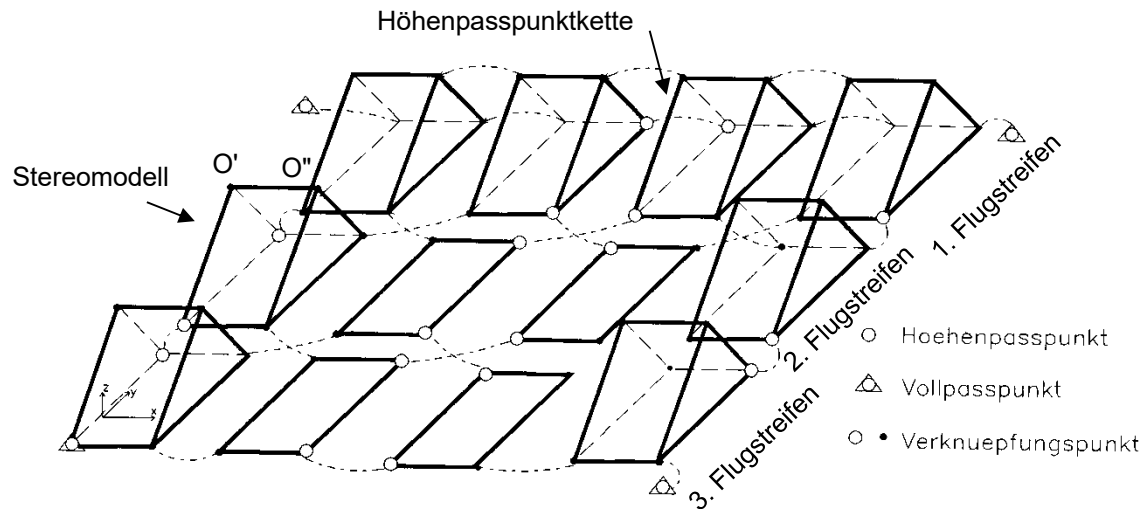
Voraussetzung: *Blockförmiger Bildverband* mit etwa 60% Längsüberdeckung innerhalb der einzelnen Streifen und etwa 20% Querüberdeckung der benachbarten Streifen.



Modellanschluss mit Projektionszentren.

→ Stereomodell als photogrammetrische Grundeinheit der Aerotriangulation.

Die Projektionszentren bewirken eine Stabilisierung der Höhe entlang der Streifen. Eine entsprechende Stabilisierung quer zu den Triangulationsstreifen ist dagegen nicht möglich. Eine Vergrößerung der Querüberdeckung auf bis zu 60% würde Abhilfe schaffen, ist jedoch nicht ökonomisch. Statt dessen muss man **Höhenpasspunktketten** quer zu den Flugstreifen vorsehen.



Räumliche Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen.



6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

Prinzip der räumlichen Blockausgleichung:

Die Modellkoordinaten aller Punkte beziehen sich jeweils auf unabhängige, räumliche Koordinatensysteme.

Die Modelle werden

- verschoben (drei Drehungen X_U, Y_U, Z_U),
- gedreht (drei Drehungen Ω, Φ, κ) und
- maßstäblich verändert (Maßstabszahl μ)

bis sie

- an den Verknüpfungspunkten (einschließlich Projektionszentren) möglichst gut zusammen und
- an den Passpunkten möglichst kleine Diskrepanzen aufweisen.

Das funktionale Modell ist die schon bekannte **räumliche Ähnlichkeitstransformation**, wie sie schon in der absoluten Orientierung eines Stereomodells (vgl. Abschnitt 5.4.2) besprochen wurde:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_U + \mu \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}_m$$

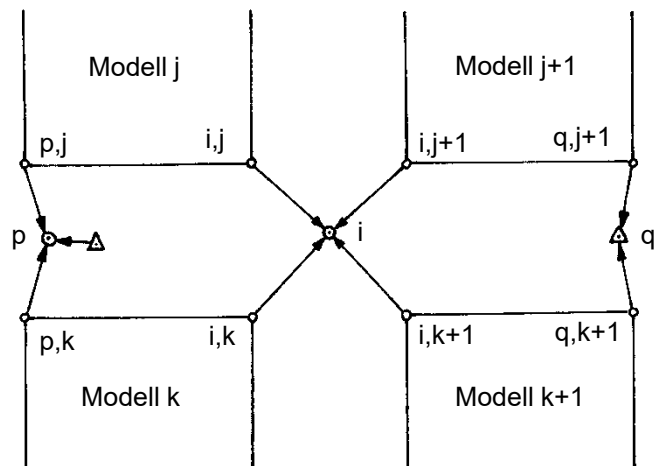
Pro Modell müssen jeweils 7 Transformationsparameter berechnet werden.

Inhalt der **verketteten räumlichen Ähnlichkeitstransformation** ist die gleichzeitige Bestimmung der gesuchten Transformationsparameter. Für die Lösung des Problems muss das gegebene Funktionalmodell linearisiert werden, wozu man geeignete Näherungswerte benötigt. Die gesuchten Transformationsparameter werden gemeinsam mit den Neupunktskoordinaten durch Ausgleichung nach der Kleinsten-Quadrate-Methode auf iterativem Wege ermittelt. Dabei wird die Quadratsumme der Klaffen in den Pass- und Verknüpfungspunkten minimiert. Die einzelnen Punktkategorien können unterschiedlich gewichtet werden.



6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen



Gauß'sches Minimumsprinzip

v_i → Klaffen

$$\sum v_i^2 \stackrel{!}{=} \text{Minimum}$$

$$\Rightarrow \sum v_i = 0 \begin{cases} \text{in jedem Punkt} \\ \text{in jedem Modell} \end{cases}$$

- i ... vierfacher Modellverknüpfungspunkt
- p ... zweifacher Modellverknüpfungspunkt und Passpunkt mit Verbesserung der terrestrischen Koordinaten (= Landeskoordinaten)
- q ... zweifacher Modellverknüpfungspunkt und Passpunkt ohne Verbesserung (= fehlerfrei bzw. quasiwahr)



6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

Lage- und Höhengenaugigkeit der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen:

Die Lage- und Höhengenaugigkeit kann getrennt voneinander behandelt werden, denn die Lagegenauigkeit wird nicht von der Genauigkeit der Modellhöhen und nicht von der Anordnung der Höhenpasspunkte beeinflusst und die Höhengenaugigkeit ist unabhängig von der Genauigkeit der Modellkoordinaten X_m , Y_m und der Anordnung der Lagepasspunkte.

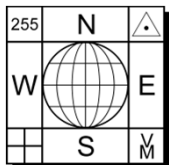
Die erzielbare Genauigkeit hängt von der Genauigkeit der Messgrößen (= Modellkoordinaten) und der Blockgeometrie ab (σ_0 ... Gewichtseinheitsfehler, Q_{LL} .. Gewichtskoeffizienten)

Die Fehlerrechnung ist integrierter Bestandteil der Ausgleichsrechnung.

(1) LAGEGENAUIGKEIT

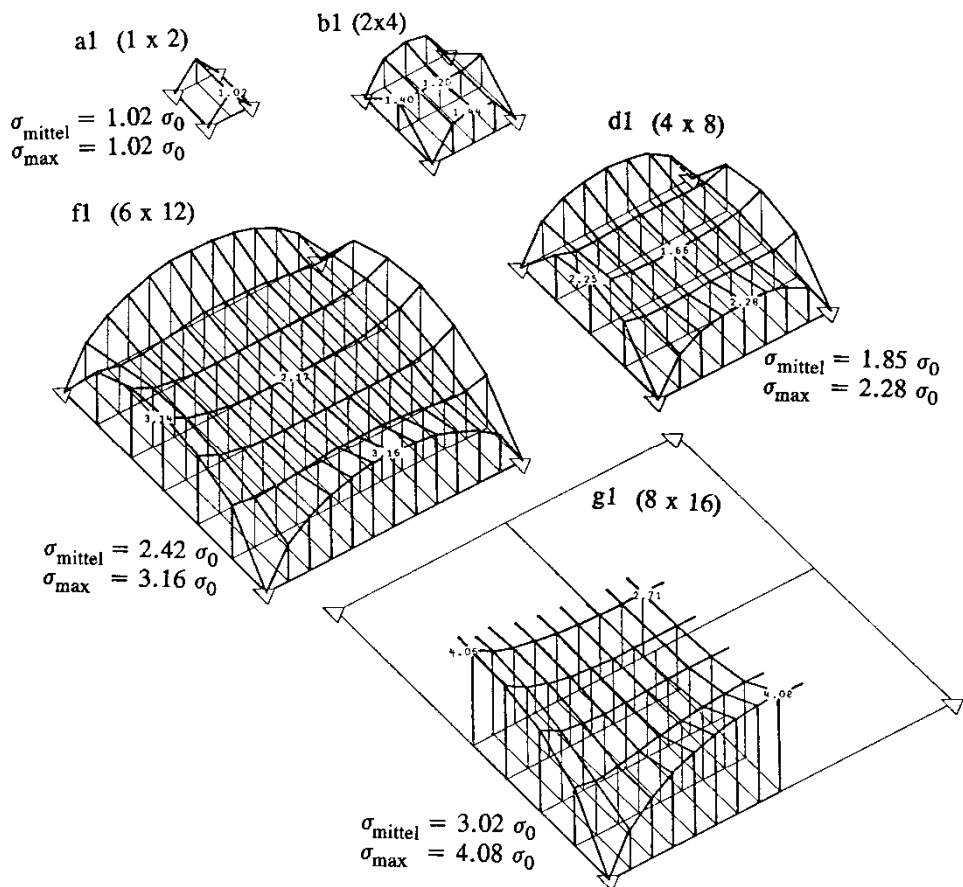
Die Genauigkeit

- ist nahezu unabhängig von der Blockgröße und
- entspricht etwa der Genauigkeit im Einzelmodell, wenn der Blockrand mit Passpunkten dicht besetzt ist.

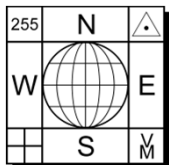


6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

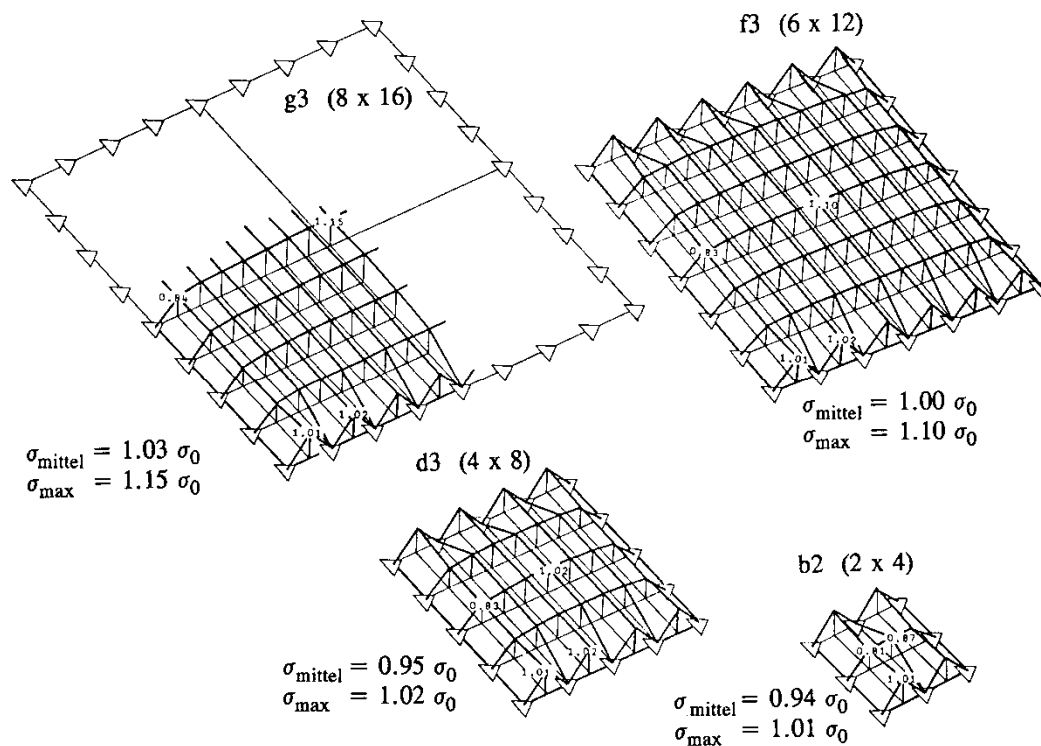


Lagegenauigkeit mit 4 Passpunkten in den Blockecken für quadratische Blöcke
 $n_s \times n_m$ (n_s = Streifenanzahl, n_m = Modellanzahl je Streifen).

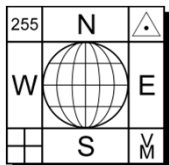


6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen



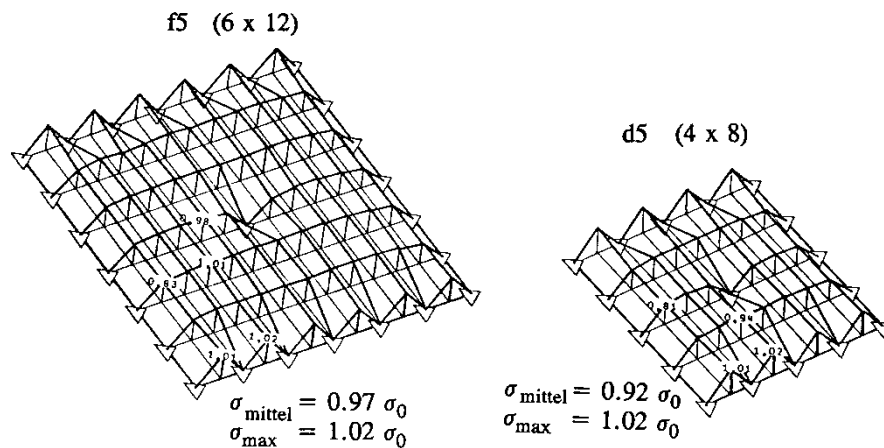
Lagegenauigkeit bei dicht mit Passpunkten besetztem Blockrand für quadratische Blöcke $n_s \times n_m$.



6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

- Passpunkte im Blockinneren bringen keine nennenswerte Genauigkeitssteigerung.



Lagegenauigkeit bei dicht mit Passpunkten besetztem Blockrand und einem Passpunkt in der Blockmitte (quadratische Blöcke $n_s \times n_m$).



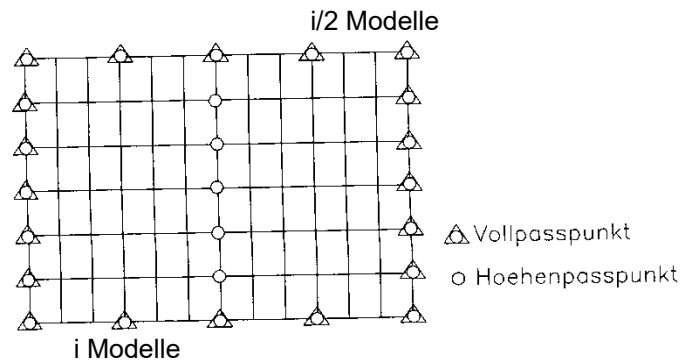
6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

(2) HÖHENGENAUGIGKEIT

- Die Höhengenaugigkeit ist in erster Linie abhängig von der Anzahl i der zwischen zwei Höhenpasspunktketten (quer zur Flugrichtung) liegenden Modelle.

Verbesserung der Höhengenaugigkeit am Blockrand durch weitere Höhenpasspunkte im Abstand $i/2$.



$$\sigma_{B,Z,mittel} \approx (0.34 + 0.22 \cdot i) \sigma_{M,Z}$$

$$\sigma_{B,Z,max} \approx (0.27 + 0.31 \cdot i) \sigma_{M,Z}$$

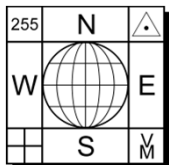
$\sigma_{M,Z}$... Höhengenaugigkeit im Einzelmodell

Ideale Höhenpasspunktanordnung.

Das Verhalten der Höhengenaugigkeit ist im wesentlichen ungünstiger im Vergleich zur Lagegenauigkeit. i sollte bei 3 oder 4 (wirtschaftlicher) liegen.

Erweiterungsmöglichkeit: Bestimmung der Projektionszentren mit GPS.

Bei GPS-gestützter Aerotriangulation kann man durch zwei zusätzliche Querstreifen am Anfang und am Ende die Anzahl der notwendigen Höhenpasspunkte auf ein Minimum (in den Blockecken) reduzieren.



6. Mehrbildauswertung

6.2.1 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

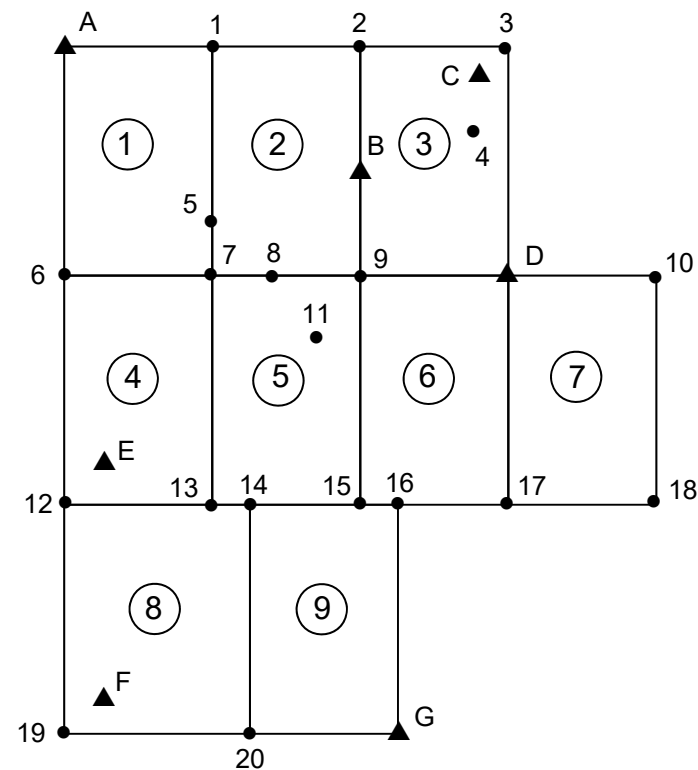


AUSGLEICHUNG mit UNABHÄNGIGEN MODELLEN

- LAGE (ANBLOCK) durch Helmerttransformation
- ITERATION LAGE und HÖHE (Helmerttransf. und Horizontierung)
- SIMULTAN LAGE und HÖHE durch räumliche Drehstreckung

Beispiel: 9 Modelle (M)
 7 Passpunkte (P) ▲
 20 Neupunkte (N) ●

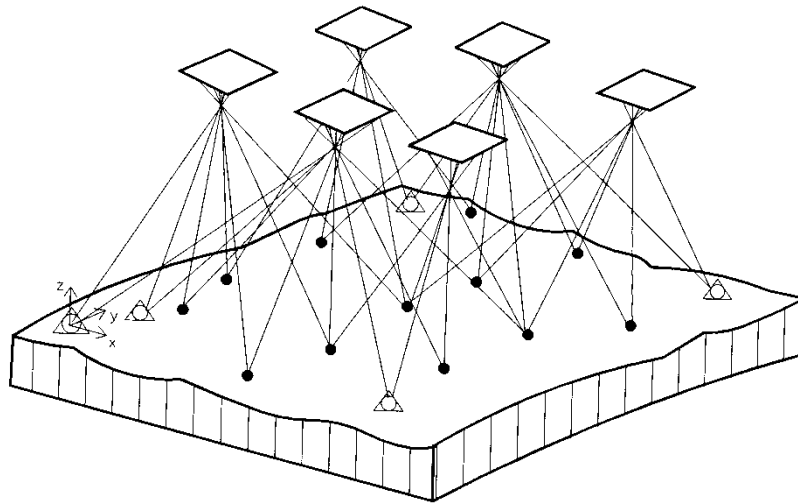
	Beobachtungsgl.	Transformationsunbek.	Koordinatenunbek.
LAGE (ANBLOCK)	10(P)*2 = 20 41(N)*2 = 82 gesamt = 102	9(N)*4 = 36	20(N)*2 = 40
		gesamt Unbek. = 76	
SIMULTAN	10(P)*3 = 30 41(N)*3 = 123 gesamt = 153	9(N)*7 = 63	20(N)*3 = 60
		gesamt Unbek. = 123	





6. Mehrbildauswertung

6.2.2 Bündelblockausgleichung



Grundprinzip der Bündelblockausgleichung.

Die photogrammetrische Grundeinheit ist das **Strahlenbündel**.

Ausgangsmaterial ist ein streifen- oder blockförmiger Bildverband mit mindestens 60% Längsüberdeckung und 20% Querüberdeckung.

Das Strahlenbündel ist mathematisch durch die photogrammetrische Abbildungsgleichung

$$x - x_0 = -c \frac{i \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}$$

$$y - y_0 = -c \frac{j \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}$$

(vgl. Abschnitt 2.3.2)

bestimmt und beschreibt die zentralprojektive Abbildung des dreidimensionalen Objektraumes in die zweidimensionale Bildebene. Mit anderen Worten: Bildpunkt, Projektionszentrum und Objektpunkt müssen auf einer Geraden liegen (= Kollineationsbeziehung).

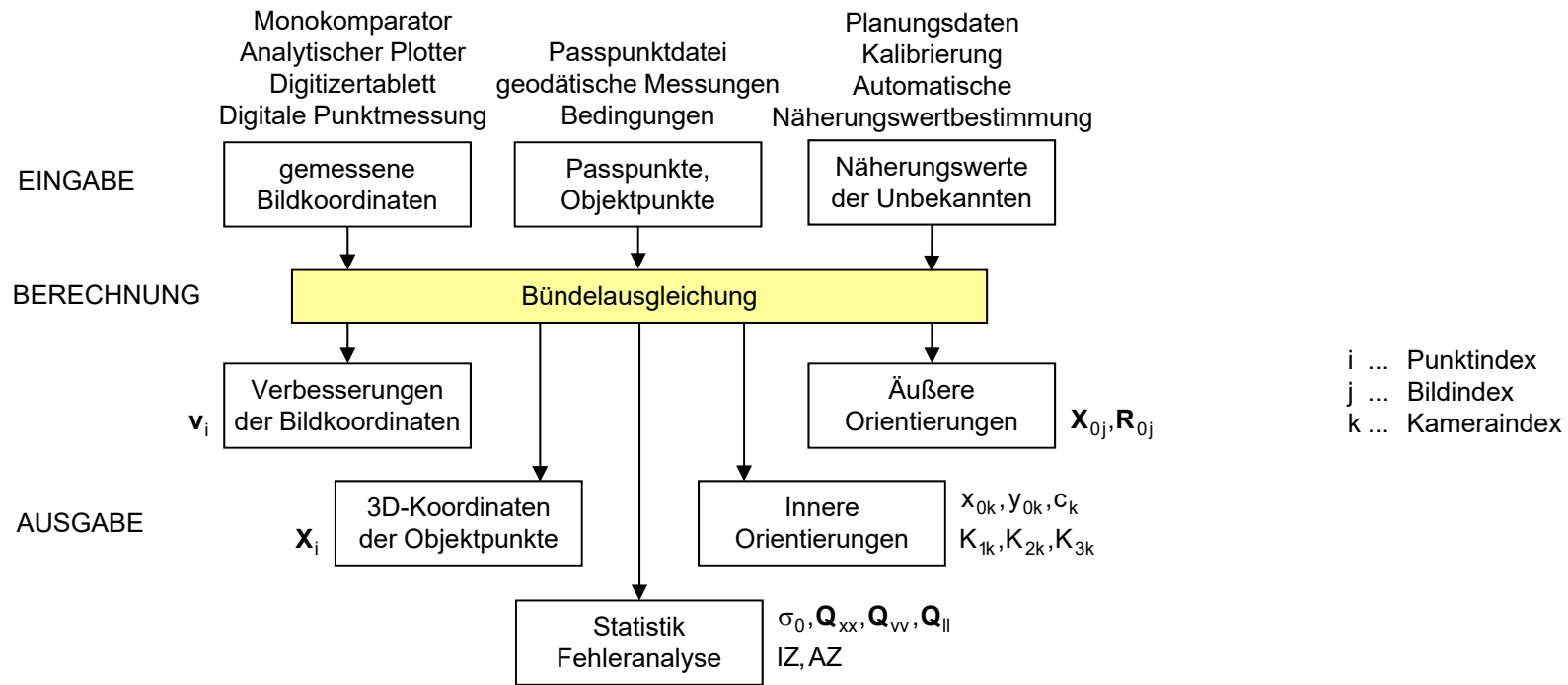
Gemessen werden die **Bildkoordinaten** der Pass- und Verknüpfungspunkte. Gesucht sind die Elemente der äußeren Orientierung für jedes Luftbild und die Koordinaten der Verknüpfungs- bzw. Neupunkte.

Die Bündelblockausgleichung (Bündeltriangulation) ist das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in der Photogrammetrie.



6. Mehrbildauswertung

6.2.2 Bündelblockausgleichung



Datenfluss für die Bündelausgleichung
 (Th. Luhmann, 2003)



6. Mehrbildauswertung

6.2.2 Bündelblockausgleichung

Anmerkungen zur vorigen Abbildung: Eingabewerte für die Bündelausgleichung sind zunächst photogrammetrische Bildkoordinaten, die einem manuellen oder automatischen (digitalen) Bildmesssystem entstammen. Bildpunkt: eindeutige Punktbezeichnung und zugehörige Bildnummer. Unter Verwendung einer kalibrierten Kamera kann die durch die Objektpunkte repräsentierte Oberfläche bereits eindeutig und formtreu rekonstruiert werden. Zur Festlegung des absoluten Maßstabes und der Lage des Objektkoordinatensystems (Datumsdefinition) werden zusätzliche Informationen zum Objektraum benötigt: z.B. gemessene Strecken, Winkel, Punkte, Gerade, Ebenen. Für die Linearisierung des funktionalen Modells sind schließlich noch Näherungswerte zu beschaffen. Sie können für einfache Aufnahmeconfigurationen zum Teil den Planungsdaten oder einer Aufnahmeskizze entnommen werden. Für komplexere Aufnahmesituationen (große Bildanzahl, beliebige Aufnahmerichtungen) erfolgt die Näherungswertbestimmung durch iterative Berechnungsverfahren. Ergebnis einer Bündelausgleichung sind vor allem die ausgeglichenen 3D-Koordinaten der Objektpunkte. Objektkoordinaten: (i) durch Passpunkte bzw. durch (ii) freie Netzausgleichung bestimmt. Weiterverwendung der äußeren Orientierung: Photogrammetrische Auswertung am analytischen Auswertegerät, Berechnung von Vorwärtsschnitten, etc. Durch die Simultankalibrierung können die Parameter der inneren Orientierung ermittelt werden. Für die statistische Qualitätsanalyse der Bündeltriangulation werden u.a. Verbesserungen (Residuen) der Bildkoordinaten, Standardabweichungen von Objektpunkten und Orientierungsdaten, Korrelationen zwischen Parametern und Zuverlässigkeiten für die Erkennung grober Datenfehler berechnet.



6. Mehrbildauswertung

6.2.2 Bündelblockausgleichung

Die Programmsysteme werden laufend weiter entwickelt, insbesondere in Hinblick auf die **automatische Aerotriangulation** in der Digitalphotogrammetrie, wo die Messung der homologen Bildpunkte durch digitale Bildzuordnungsmethoden vollautomatisch abläuft.

In die Verbesserungsgleichungen können auch die Elemente der inneren Orientierung als zusätzliche Unbekannte eingeführt werden. Weiters ist es möglich, zusätzliche Parameter zur Kompensation von systematischen Einflüssen anzusetzen. Man spricht dann von einer **Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung** (= Bestimmung von c , x_0 , y_0 , radial-symmetrischer Verzeichnung, tangential-asymmetrischer Verzeichnung, Affinität und Scherung).

In die Bündelblockausgleichung können auch zusätzliche Beobachtungen, wie z.B. Strecken, Richtungen, Winkel, Höhenunterschiede, leicht eingebracht werden.

Die Integration von GPS bzw. INS zur direkten Bestimmung der Raumlage der Luftbildmesskamera (X_0 , R) hat bereits Einzug in die Praxis der Photogrammetrie gehalten.

- ⇒ gute Näherungswerte für die Bündeltriangulation
- ⇒ passpunktlose Bündeltriangulation (Einige wenige Passpunkte sind jedoch noch immer notwendig, um systematische Fehleranteile zu kompensieren bzw. um das Ergebnis zu kontrollieren.)

Genauigkeit der Bündeltriangulation:

Die Genauigkeitsgesetze der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen gelten mehr oder weniger auch für die Bündelblockausgleichung.

Richtwerte für Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung und signalisierte Punkte:
($l = 60\%$, $q = 20\%$)

Lage: $\sigma_{x,y} = \pm 3 \mu\text{m}$ im Bild

Höhe: $\sigma_z = \pm 0.03 \text{‰} \cdot h_g$ (SW – WW)

$\sigma_z = \pm 0.04 \text{‰} \cdot h_g$ (ÜWW)

h_g ... Flughöhe über Grund



6. Mehrbildauswertung

6.2.2 Bündelblockausgleichung

AUSGLEICHUNG mit BÜNDELN

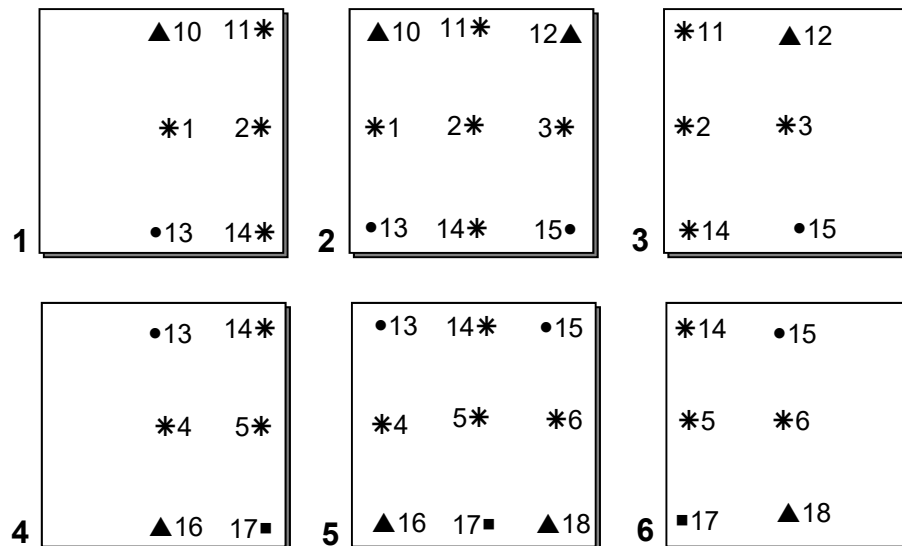
Beispiel: 6 Bilder = 4 Modelle

- ▲ 4 Vollpasspunkte
- 1 Lagepasspunkt
- 2 Höhenpasspunkte
- * 8 Verknüpfungspunkte

Unbekannte:	pro Bild 6 Orientierungsparameter	$6 \cdot 6 = 36$
	pro Verknüpfungspunkt 3 Koordinaten	$8 \cdot 3 = 24$
	pro Höhenpasspunkt 2 Koordinaten	$2 \cdot 2 = 4$
	pro Lagepasspunkt 1 Koordinate	$1 \cdot 1 = 1$
	Gesamt	65

Beobachtungsgleichungen:

Für jeden Punkt im Bild 2 Gleichungen $42 \cdot 2 = 84$





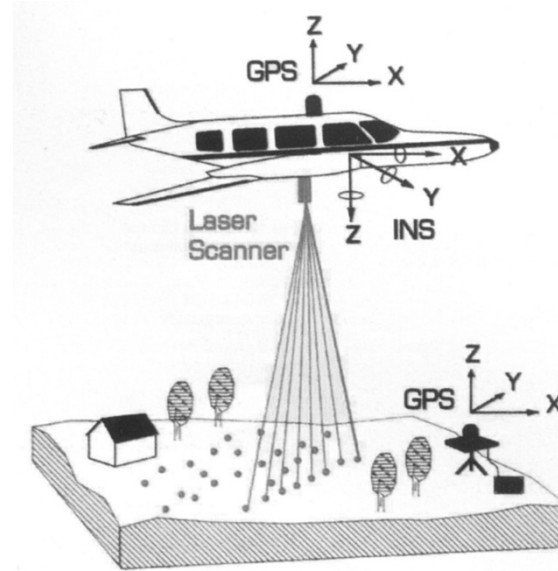
7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Airborne Laser Scanning (ALS) beruht auf dem Grundprinzip von **LIDAR (light detection and ranging)** und ist wie Radar ein aktives Fernerkundungssystem, verwendet jedoch Laser-Licht als Messmedium. Laser ist ein Akronym für "light amplification by stimulated emission of radiation".

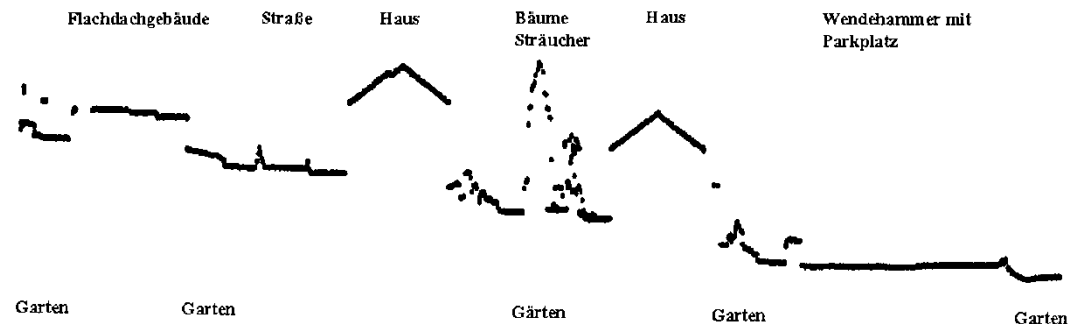
Prinzip:

Bei der Laser-Scanner-Messung tastet ein Laserstrahl nach dem Grundprinzip eines optomechanischen Abtasters (vgl. Abschnitt 3.2.6) quer zur Flugrichtung das Gelände in Streifen entlang des Flugweges ab. Der Laserstrahl wird von der Erdoberfläche, von Gebäuden, Vegetation etc. reflektiert. Laufzeitmessungen (bis zu 150000 Laufzeitmessungen/Sekunde) oder auch kontinuierliche Phasenmessungen liefern die Distanz zum Bodenpunkt. Die Position und die Lage des Sensors im Raum werden mit Hilfe von GPS (Global Positioning System) in Kombination mit einem INS (Inertialnavigationssystem) präzise vermessen. Damit lässt sich für jeden Reflexionspunkt des Laserstrahls auf der Erdoberfläche dessen Position bestimmen (1. Hauptaufgabe der Geodäsie!).



Prinzip des Laser-Scanning.

Beobachtete Bodenpunkte (laser points) entlang einer Abtastzeile (scan line).





7. Laserscanning

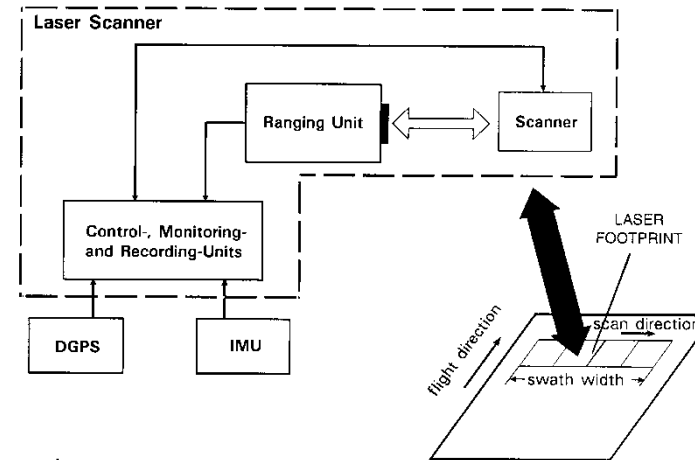
7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Ein Laser-Scanner (airborne/terrestrial) setzt sich aus folgenden Bauteilen zusammen:

- laser ranging unit,
- opto-mechanical scanner,
- control and processing unit.

WWW-Adressen:

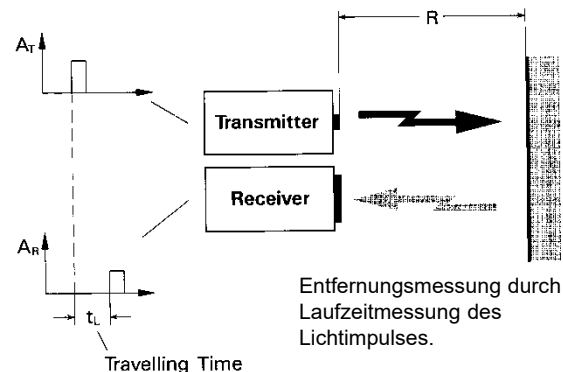
- TopoSys: <http://www.toposys.de/>
 Leica ALS50-II: <http://www.leica-geosystems.com/>
 ALTM: <http://www.optech.ca/>



The **ranging unit** comprises the emitting laser and the electro-optical receiver.
 Der Öffnungswinkel des ausgesandten Laserstrahls definiert IFOV (instaneous field of view).
 Der Öffnungswinkel der Sendeoptik ist sehr klein (0.3 – 2 mrad).

In **range measurements** with laser, two major ranging principles are applied: the **pulsed ranging principle**, and **ranging by measuring the phase difference** between the transmitted and the received signal backscattered from the object surface. The phase difference method is applied with lasers that continuously emit light. The lasers are called *continuous wave (CW) lasers*.

In current ranging laser systems, mostly **pulsed lasers** (gepulste Laser) are used.



Using pulses, the maximum range is only limited by the maximum time interval, which can be measured by the time counter of the laser. However, in practise, this time interval is large enough, so that the maximum range is rather limited due to laser energy losses during travel and other factors.

Max. Aufnahmeentfernung derzeit bei 6000 m.



7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

PRF ... pulse rate, measurement rate: 10-150kHz
 pulse width: 5-10 ns
 wave length(s): 1.064 μm, (0.810 μm or 1.56 μm)
 beam divergence: 0.2 – 3 mrad

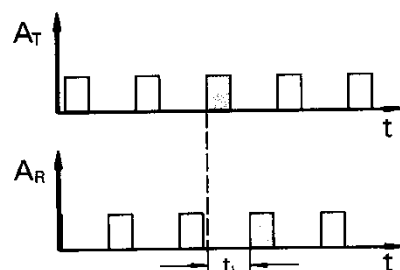
Pulse:

Range: $R = \frac{1}{2} c \cdot t_L$

Range Resolution: $\Delta R = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t_L$

Max. Range: $R_{max} = \frac{1}{2} c \cdot t_{L,max}$

Range Accuracy: $\sigma_R = \frac{c}{2} t_{rise} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}}$



Sinusoidal CW-Modulation:

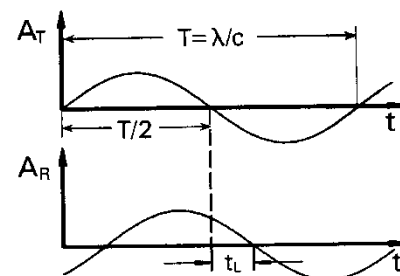
Travelling Time by Phase Difference: $T \hat{=} 2\pi$
 $t_L \hat{=} \Phi$ } $\Rightarrow t_L = \frac{\Phi}{2\pi} \cdot T$

Range: $R = \frac{1}{2} c \cdot \frac{\Phi}{2\pi} \cdot T = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Phi$

Max. Unamb. Range: $R_{max} = \frac{\lambda_{long}}{2}$

Range Resolution: $\Delta R = \frac{\lambda_{short}}{4\pi} \cdot \Delta\Phi$

Range Accuracy: $\sigma_R = \frac{\lambda_{short}}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}}$



Problem: phase ambiguities

Solution: multifrequency system

Measuring principle of pulse and CW-lasers.



7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Berechnung des DSM (digital surface model)



Perspektive Darstellung der reflektierenden Oberflächen.

Typische Zahlenangaben für
aktuelle Laserscanner-Projekte:

range resolution: 1 – 5 cm

range accuracy: 2 – 5 cm

height accuracy: < 15 cm

planimetric accuracy: < 50 cm

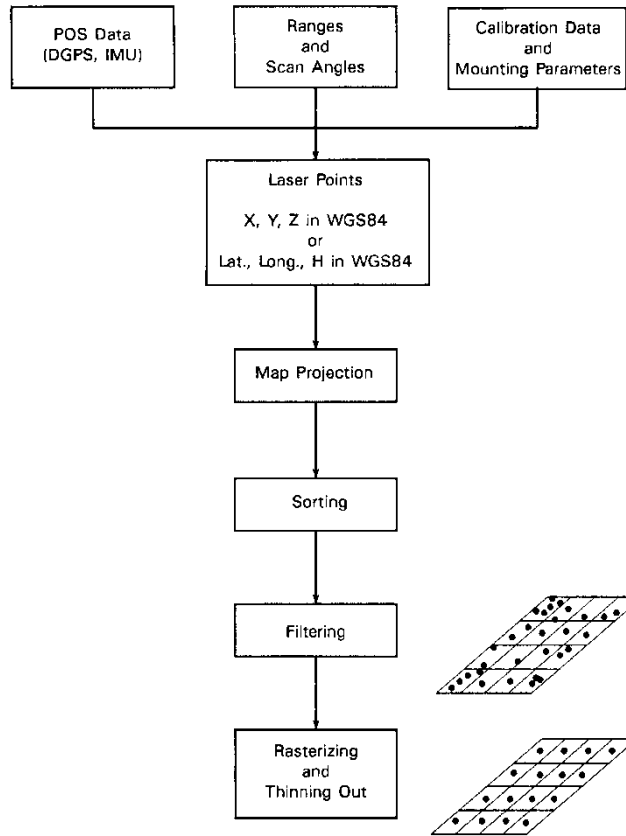
point density range: ~4-6 points/m²

Die Berechnung des DSM erfolgt in mehreren Schritten, die jeweils einer Qualitätskontrolle unterliegen. Der erste Schritt ist die Berechnung des Flugweges. Ort und Orientierung des Sensors werden mit DGPS- und INS-Daten ermittelt. Aus der Flugposition, den drei Orientierungswinkeln und den gemessenen Entfernungen werden Lage und Höhe des reflektierenden Objektpunktes berechnet. Beim Zusammenfügen der einzelnen Streifen zu einem Gesamtmodell (siehe Abb. unten) dient der Überlappungsbereich der Qualitätskontrolle der vorherigen Arbeitsschritte. Das Ergebnis sind Höhenpunkte in einem regelmäßigen Raster. Um homogene Datengenauigkeit garantieren zu können, werden über das gesamte Untersuchungsgebiet gleichmäßig verteilte Referenz- und Kontrollpunkte zu unabhängigen Qualitätskontrolle verwendet.

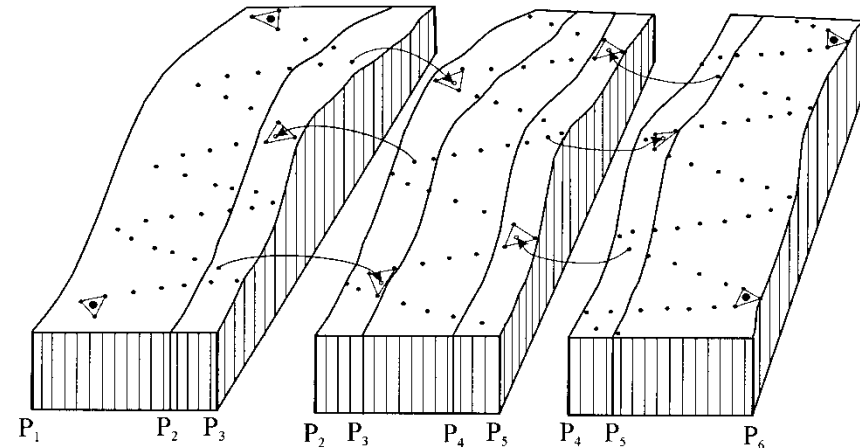
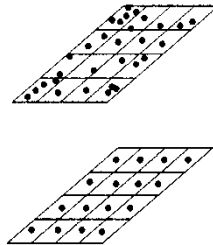


7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning



Typische Verarbeitungsschritte für Laserscanner-Daten.



- Höhenpaßpunkte
- Laser Scanner-Punkte
- P_i geradlinige Geländeprofile

Simultane Höheneinpassung von überlappenden Laserscanner-Streifen in das Landessystem.

Faustformel für die Höhengenaugkeit:

(nach Prof. Kraus)

$$\sigma_H(\text{cm}) = \pm \left(\frac{6}{\sqrt{n}} \right) + 120 \cdot \tan \alpha$$

$\tan \alpha$... Geländeneigung

n ... Punktdichte bezogen auf einen Quadratmeter



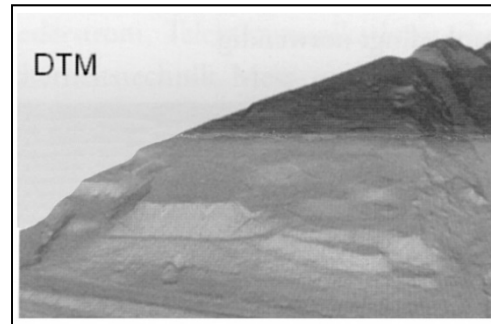
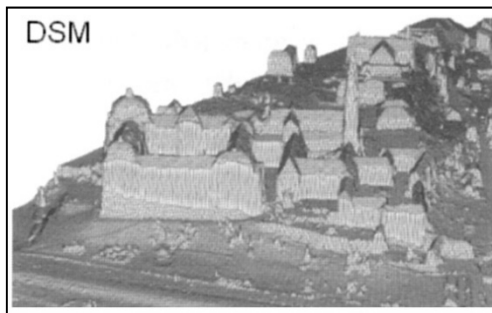
7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Berechnung des DTM (digital terrain model)

Für viele Anwendungen ist ein digitales Geländemodell (DGM), das keine Gebäude, Vegetation, Fahrzeuge etc. enthält, von primärem Interesse. Mit speziellen *Filtermethoden* können aus dem DSM sowohl ein *Bodenmodell* als auch ein *Gebäude/Vegetationsmodell* erstellt werden.

Die Ableitung von Geländekanten und Bruchlinien ist mit Schwierigkeiten verbunden.
→ teil-automatisierter Arbeitsschritt durch Interaktion mit einem Operator.



Beispiel: Klosterneuburg.



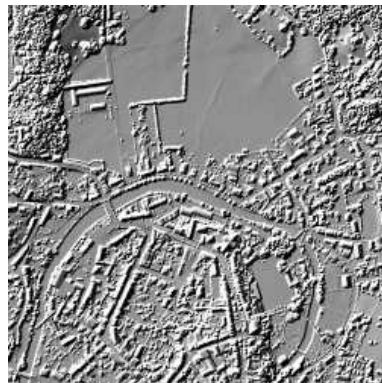
7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

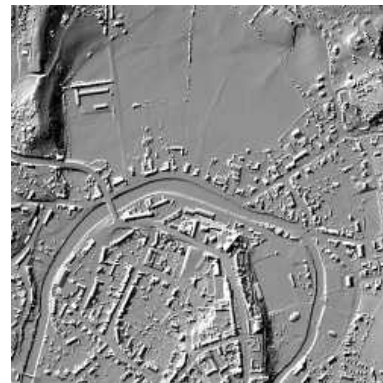
- Lasers that record only one echo, do so for the **first** or **last** one (some systems allow switching to first and last, depending on the application).
Recording of **multiple echos** can be useful, when the vertical profile of multiple objects within the laser footprint (or at least the highest and lowest object), as for example, in the case of trees, is needed.
- Some lasers can also record the intensity of the backscattered laser light.

Kommerzielle ALS-Systeme weltweit: 3 (1995), 20 (1998), 53 (2000)

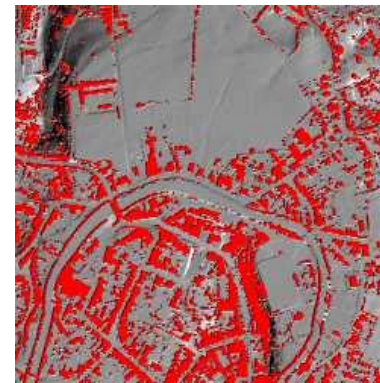
Quelle: <http://www.toposys.de/>



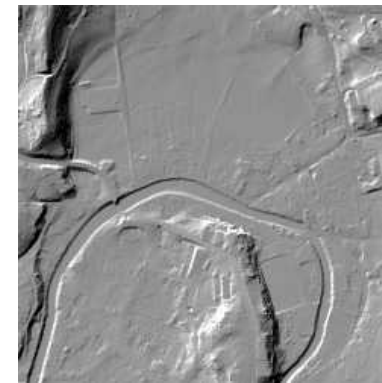
DSM (first echo)



DSM (last echo)



DTM
(Gebäude u. Vegetation maskiert)



DTM
(Höhen unter Maske interpoliert)

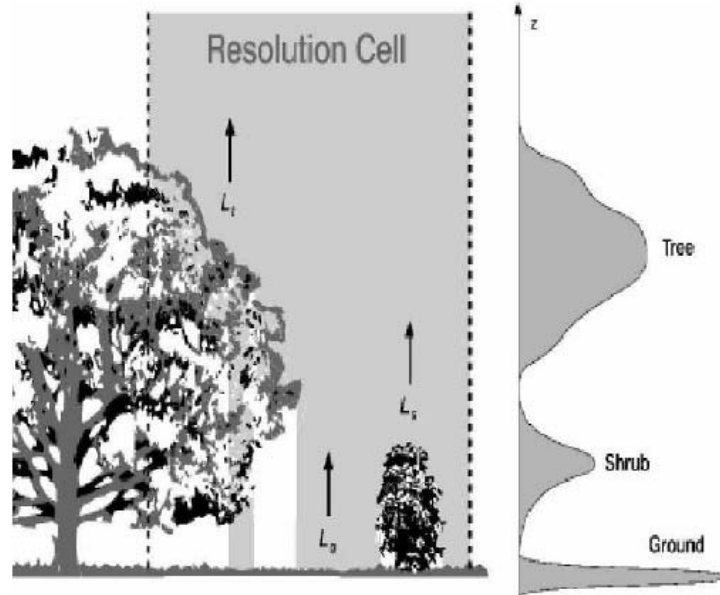


7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

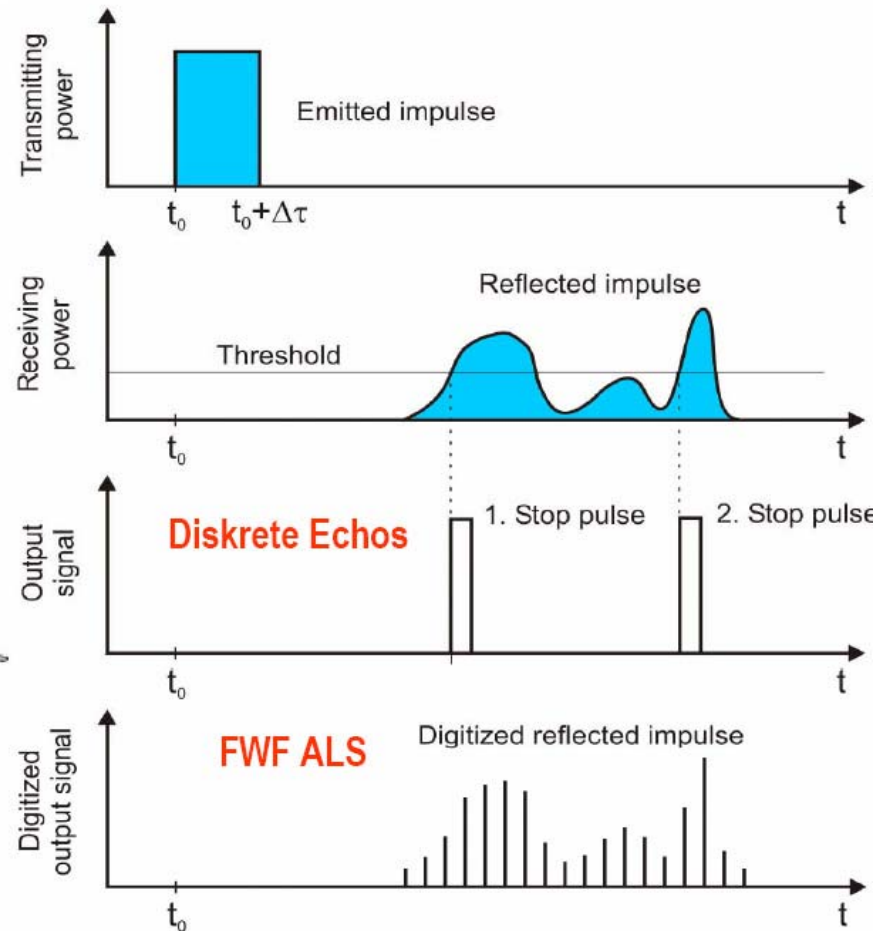


Full-Waveform ALS



Laser-Abtastfleck: $\varnothing \sim 0.2 - 3\text{m}$

Erfassung des **gesamten** Echos mit einem Digitalisierungsintervall von $\sim 1\text{ ns}$



Quelle: Camillo Ressler (TU Wien), Geoinformatik-Kolloquium, Salzburg, 13. März 2007.

Weiterführende Literatur:

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N. (2006): Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner, ISPRS International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(2), 100-112.

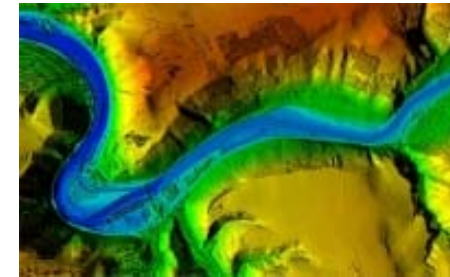


7. Laserscanning

7.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Anwendungen: → "Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie" (Kraus 2001)

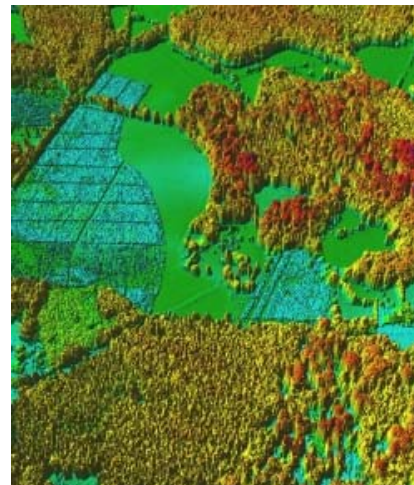
- Mapping of corridors, e.g., roads, railways tracks, pipelines, waterway landscapes
- Mapping of electrical transmission lines and towers including ground/tree clearance
- DTM generation, especially in forested areas (DGM in bewaldeten Gebieten!)
- Measurement of coastal areas, including dunes and tidal flats, determination of coastal change and erosion
- High accuracy and very dense measurements applications, e.g., flood mapping, DTM generation and volume calculation in open pit mines, road design and modelling;
- DTM and DSM generation in urban areas, automated building extraction, generation of 3-D city models for planning of relay antenna locations in wireless telecommunication, urban planning, microclimate models, propagation of noise and pollutants;
- Rapid mapping and damage assessment after natural disasters, e.g., after hurricanes, earthquakes, landslides;
- Measurement of snow- and ice-covered areas, including glacier monitoring
- Measurement of wetlands
- Derivation of vegetation parameters, e.g., tree height, crown diameter, tree density, biomass estimation, determination of forest borders;
- Hydrographic surveys in depths up to 70 m (bathymetry) etc.



großräumige DGM



3D-Ansicht der Punktwolke im Leitungskorridor



Forstinventur



Überschwemmungsgebiete



7. Laserscanning

7.2 Terrestrisches Laserscanning

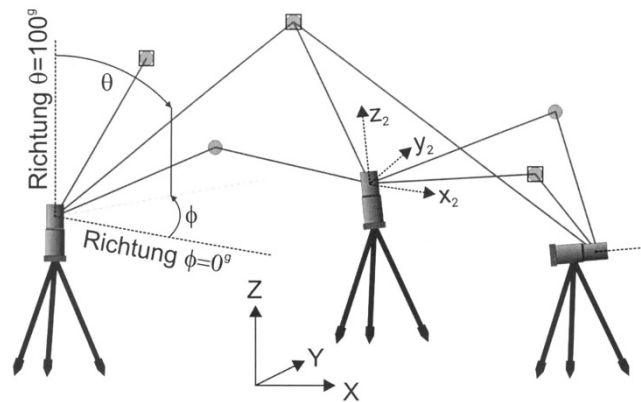
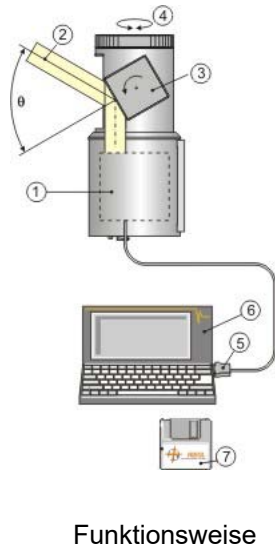
3D Oberflächenerfassung mittels reflektorloser Entfernungsmessung entlang orientierter Richtungen.
 Abtastung: (a) rotierendes Spiegelsystem oder (b) "motorisierter Theodolit"



Anwendungsbeispiele:

- Architekturvermessung (Dokumentation, Visualisierung, Animation)
- Anlagenbau (Bestandsaufnahme)
- Schneehöhenmessung
- Gletschervermessung
- Kubaturbestimmung
- Deformationsmessung
- Monitoring von Felsstürzen, etc.

Firmen: <http://www.riegl.co.at/>
<http://www.leica-geosystems.com/>



Anbringen einer retro-reflektierenden Zielmarke



7. Laserscanning

7.2 Terrestrisches Laserscanning

Zusammenführung von Laserscannerdaten und von photographischen Daten



Riegl LMS-Z420i

← z.B. **NIKON D100** 6 MegaPixel Digital Camera

Objektivtypen: $f = 14 \text{ mm}$, für Entfernungen bis 100 m
 $f = 180 \text{ mm}$, für Entfernungen 100 - 1000 m

Das Anwendungsgebiet liegt in der schnellen Herstellung von dreidimensionalen **Photomodellen**:

- ☺ Aus den Laserdaten wird die Geometrie der Objektoberfläche abgeleitet.
- ☺ Aus den digitalen photographischen Daten wird die Textur entnommen.

Die Orientierung der Digitalkamera gegenüber dem terrestrischen Laserscanner wird durch eine Kalibrierung bestimmt.

Technische Daten des terrestrischen Laserscanners LMS-Z420i

Wellenlänge/Intensität	900 nm (nahes Infrarot), die Intensität des reflektierten Echos kann registriert werden
maximale Frequenz der vertikalen Profile	20 Hz
Messrate	bis zu 12 000 Punkte/Sekunde (Normalscanning mit oszillierendem Spiegel) bis zu 8 000 Punkte/Sekunde (Feinscanning mit rotierendem Spiegel)
detektierbare Echos	erstes und/oder letztes Echo
maximale Reichweite	800 m für einen Reflexionsgrad ρ der Oberfläche von $\rho \geq 80\%$, 250 m für $\rho \geq 10\%$
minimale Entfernung	2 m
Gesamtöffnungswinkel (FOV)	$80^\circ \times 360^\circ$
Öffnungswinkel des Laserstrahles (IFOV)	0.25 mrad, d.h. der Abtastfleck (foot print) hat bei einer Entfernung von 100 m einen Durchmesser von 25 mm
Streckenmessgenauigkeit	$\pm (10 \text{ mm} + 20 \text{ ppm})$, d.h. bei einer Entfernung von 100 m $\pm 12 \text{ mm}$
minimale Schrittweite	$0.008^\circ (0.14 \text{ mrad})$ vertikal, $0.01^\circ (0.17 \text{ mrad})$ horizontal



7. Laserscanning

7.2 Terrestrisches Laserscanning



Karmeliterplatz (2005)



Laserscanning
(Firma Rost, Wien)



Leica HDS3000

► 3D phototexturierte Punktwolke
Datei: Karmeliterplatz_animation.avi



Passpunkt für Laserscanning



Geodätische Einmessung von
Objekt- und Passpunkten



projektiv verzerrte Photographie



Orthophoto



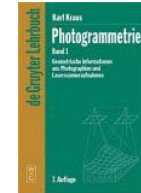
7. Laserscanning

7.3 Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie

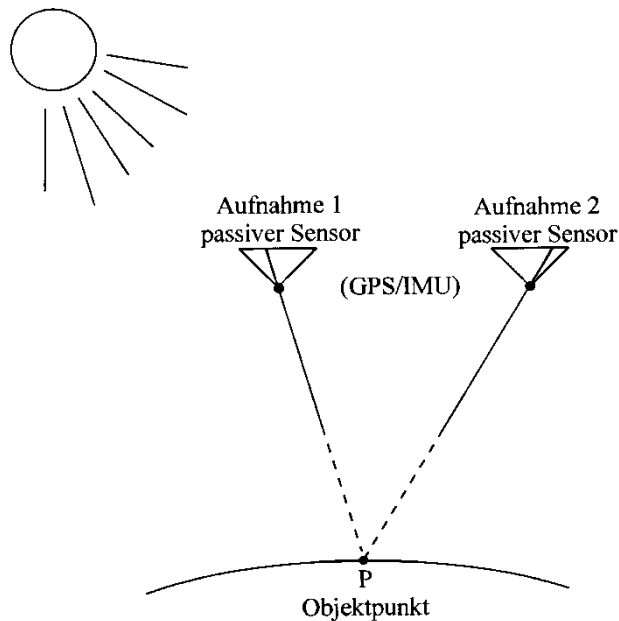


Quelle: Prof. K. Kraus, 2001: Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Publikationen der DGPF, Band 10, 2001, Seite 13 – 22.

Definition: Unter einem **Paradigma** versteht man das Denk- und Handlungsmuster, das den wesentlichen Kern eines (Fach-)Gebietes trifft.



Prof. Karl Kraus (TU Wien)
1939-2006



Paradigma der (Stereo-)Photogrammetrie

Das wesentliche der **(Stereo-)Photogrammetrie:**

Es steht die geometrische Rekonstruktion der Objekte im dreidimensionalen Raum aus mindestens zwei Aufnahmen im Mittelpunkt. Eine Aufnahme definiert ein Bündel von Richtungen, das Strahlenbündel genannt wird. Ein Objektpunkt ist im dreidimensionalen Raum rekonstruierbar, wenn er **mindestens** von **zwei Richtungen** getroffen wird. Die Richtungen bzw. Strahlen – durch das (natürliche) Licht der Sonne erzeugt – werden von passiven Sensoren registriert.



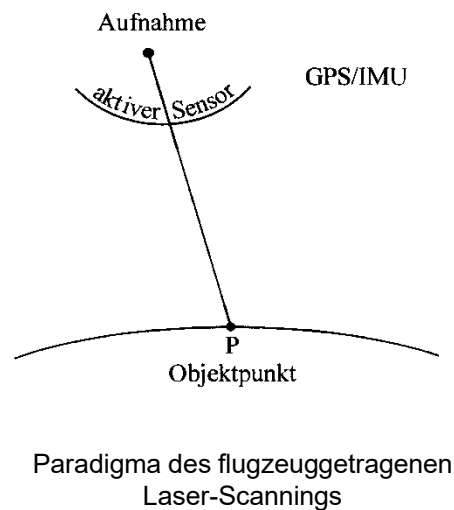
7. Laserscanning

7.3 Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie

cont.

Im Sinne eines **Paradigmas** ist es gleichgültig, ob

- die Aufnahmen auf Film oder mittels einer elektronischen Bildaufzeichnung erfolgen,
- die elektronische Bildaufzeichnung in einem zweidimensionalen Detektorfeld oder in eindimensionalen Detektorzeilen einer Dreizeilenkamera geschieht,
- die Messung der Bildpunkte stereoskopisch von einem Operator oder digital mit einem Korrelationsalgorithmus erfolgt,
- eine dritte Aufnahme und weitere Aufnahmen vom gleichen Objekt bzw. als Bildverband von einem stark ausgedehnten Objekt vorhanden sind,
- eine (kalibrierte) Messkamera oder eine (unkalibrierte) Amateurkamera eingesetzt wird,
- die Lage der Aufnahmeorte und die Stellung der Aufnahmen aus Pass- und Verknüpfungselementen oder aus GPS- und IMU-Aufzeichnung ermittelt werden.



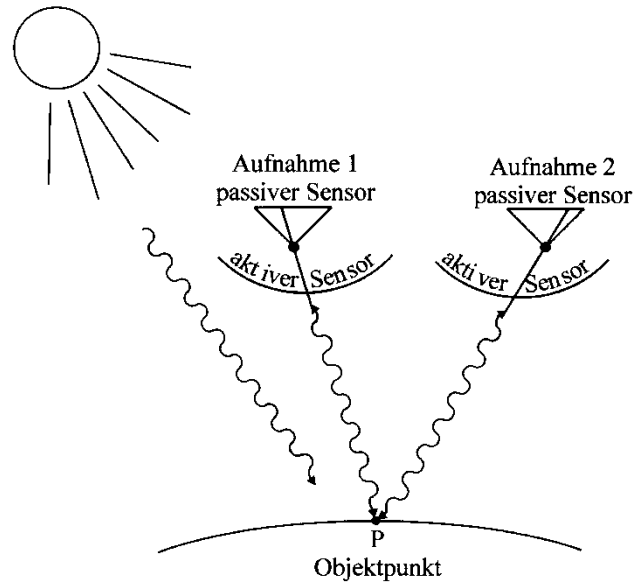
Wie bei der (Stereo-)Photogrammetrie steht auch beim Laser-Scanning die geometrische Rekonstruktion der Objekte im dreidimensionalen Raum im Vordergrund, allerdings nicht aus mindestens zwei Aufnahmen sondern nur aus mindestens **einer Aufnahme**.

An die Stelle eines Strahlenbündels tritt ein Feld von Richtungen und Entfernungen, d.h. ein **Vektorfeld**. An die Stelle passiver Sensoren treten aktive Sensoren. GPS/IMU-Informationen werden essentiell; das Verknüpfen von zwei und mehreren Aufnahmen zu einem räumlichen Netzwerk ist nur über Flächenelemente und nicht über Punkte möglich.



7. Laserscanning

7.3 Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie



Gemeinsames Paradigma aus
(Stereo-)Photogrammetrie und Laserscanning

Beispiel:

- Laserscanner + digitale photographische Kamera
(CCD-Flächenkamera,
Zeilenkamera, Drei-Zeilenkamera)

Gemeinsames Paradigma:

- Zu jedem Photogrammetrie-Pixel gibt es auch ein Spektrum von Entfernungen, das mindestens aus dem ersten und letzten Echo besteht.
- Zu jedem Laserscanning-Pixel gibt es auch ein Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, das – abhängig vom Sensor – von natürlicher und/oder künstlicher Strahlung geprägt ist.
- Zu jedem Pixel gibt es im allgemeinen auch ein zweites Pixel mit dem gleichen Informationsgehalt, aber aus einer anderen Richtung.

Literaturquellen (Arbeitsunterlagen zur Vorlesung)

Die nachfolgende Liste weist jene Literaturquellen aus, welche der Vortragende zur Vorbereitung der Lehrveranstaltung "Photogrammetrie" herangezogen hat. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Lehrbücher und Monographien:

- FAUGERAS, O. (1996): Three-dimensional Computer Vision: A geometric Viewpoint. – The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 663 p. [TU Graz I 179.237 – **CG 19**]
- FINSTERWALDER, R., HOFMANN, W. (1968): Photogrammetrie. – 3. Auflage, Walter de Gruyter & Co, Berlin, 455 S. [TU Graz – **PH 77**]
- HEIPKE, CH.(Hrsg.) (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung. – 1. Auflage, Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von W. Freeden und R. Rummel, Springer Spektrum, 839 S. [TU Graz – I 525485/P, 528.7 HEIP]
- MCGLONE, J.CH. et al. (2004): Manual of Photogrammetry. Fifth Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1151 p.
- JORDAN/EGGERT/KNEISSL (1972): Handbuch der Vermessungskunde, 10. Auflage, Band IIIa/1 bis 3: Photogrammetrie, - Autoren: Rinner, K., & Burkhardt, R., J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2321 S. [TU Graz I 53.058 – **PH 80, PH 56.1, PH 56.2**]
- KONECNY, G., & LEHMANN, G. (1984): Photogrammetrie. - Verlag Walter de Gruyter, Berlin, 399 S. [TU Graz I 140.271 – **PH 79**]
- KRAUS, K. (1993): Photogrammetry, Volume 1, Fundamentals and Standard Processes. - 4. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, 397 S. [TU Graz I 162.223 – **PH 94**]
- KRAUS, K. (1994): Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren. - 5. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, 394 S. [TU Graz I 165.036 – **PH 158**]
- KRAUS, K. (1996): Photogrammetrie, Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen. - 3. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, 488 S. [TU Graz I 161.124 2(3) – **PH 158.1**]
- KRAUS, K. (1997): Photogrammetry, Volume 2, Advanced Methods and Applications. - 4. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, 466 S. [TU Graz I 161.124 2(4) – **PH 158.2**]
- KRAUS, K. (2000): Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme. - 1. Auflage, Dümmler Verlag bzw. Verlag H. Stam, Köln, 419 S. [TU Graz I 161.124 3 – **PH 158.3**]
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. - 7. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 516 S. [GEOD 528.7 KRAU – **PH 192.1**]
- KRAUS, K. (2007): Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. - 2nd edition, de Gruyter, 459 S. [GEOD 528.7 KRAU – **PH 207**]
- LUHMANN, TH. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. - Wichmann Verlag, Heidelberg, 571 S. [TU Graz I 182.237 – **PH 182**]
- LUHMANN, TH. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. - Wichmann Verlag, Heidelberg, 586 S. [GEOD 528.7B LUHM – **PH 197**]
- LUHMANN, TH. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen – Methoden – Beispiele. - Wichmann Verlag, VDE Verlag Berlin, 783 S. [GEOD 528.7B LUHM] – I 526474]
- LUHMANN, TH., ROBSON, S., KYLE, S., HARLEY, I. (2006): Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. – Whittles Publishing, 510 S. [GEOD 528.7 LUHM – **PH 204**]
- LUHMANN, TH., ROBSON, S., KYLE, S., BOEHM, J. (2013): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. – De Gruyter Textbook, 684 p.
- MCGLONE, J.CH., MIKHAIL, E.M., BETHEL, J., MULLEN, R. (Eds.) (2004): Manual of Photogrammetry. - 5th edition, American Society of Photogrammetry, Bethesda, Maryland 2084, 1151 p. [GEOD 528.7 MCGL – **PH 196**]
- MCGLONE, J.CH. (Ed.) (2013): Manual of Photogrammetry. - 6th edition, American Society of Photogrammetry, Bethesda, Maryland 2084, 1318 p. [GEOD 528.7 MCGL]
- MIKHAIL, E.M., BETHEL, J.S., MCGLONE, J.CH. (2001): Introduction to Modern Photogrammetry – John Wiley & Sons, Inc., New York, 477 S. [GEOD 528.7 MIKH – **PH 184**]
- SCHENK, T. (1999): Digital Photogrammetry, Volume 1, Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedures. - TerraScience Verlag, Laurelville, Ohio, U.S.A., 428 S. [TU Graz I 182.329 – **PH 9**]
- SCHWIDEFSKY, K. (1976): PHOTOGRAMMETRIE: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen. – B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 384 S. [TU Graz I 58.487/b. – **PH 61**]

- SLAMA, CH.C., THEURER, CH., HENRIKSEN, S.W. (Eds.) (1980): Manual of Photogrammetry. - 4th edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA 22046, 1056 p. [Privatbibliothek von V. Kaufmann bzw. **PH 20**]
- WOLF, P.R. (1974): Elements of Photogrammetry (with Air Photo Interpretation and Remote Sensing). - International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 562 p. [TU Graz I 89.474 – **PH 85**]

Photogrammetrie:

- ALBERTZ, J., & KREILING, W., (1989): Photogrammetrisches Taschenbuch (Photogrammetric Guide, Guide Photogrammétrique, Manual Fotogramétrico). - 4. Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 292 S. [TU Graz I 148.322/b. – **PH 87**]
- EBNER, H., FRITSCH, D., HEIPKE, CH. (eds.) (1991): Digital Photogrammetric Systems. - Wichmann Verlag, Karlsruhe, 344 S. [TU Graz I 153.046. – **DP 4**]
- FRITSCH, D., SPILLER, R. (eds.) (1999): Photogrammetric Week '99. - Wichmann Verlag, Heidelberg, 380 S. [TU Graz I 181.378. – **PHP 180**]
- FRITSCH, D., SPILLER, R. (eds.) (2001): Photogrammetric Week '01. - Wichmann Verlag, Heidelberg, 341 S. [GEOD 528.7 FRIT]
- FRITSCH, D. (Ed.) (2007): Photogrammetric Week '07. - Wichmann Verlag, Heidelberg, 350 S. [GEOD 528K FRIT – **KB 106**]
- FRITSCH, D. (Ed.) (2009): Photogrammetric Week '09. - Wichmann Verlag, Heidelberg, 354 S. [GEOD 528K FRIT – **PH 213**]
- HEIPKE CH. (1995): Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Nr. 450, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 111 S.
- WARNER, W.S., GRAHAM, R.W., READ, R.E. (1996): Small Format Aerial Photogrammetry. - Whittles Publishing, Scotland, UK, 348 p. [TU Graz I 173.392 – **PH 165**]

Laserscanning:

- SHAN, J., & TOTH CH. K. (eds.) (2018): Topographic Laser Ranging and Scanning – Principles and Processing, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 637 S. [GEOD 528.8 SHAN]
- LUHMANN, TH., & MÜLLER CH., (Hrsg.) (2009): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. – Wichmann Verlag, 420 S. [GEOD 528.7 LUHM – **KB 117** (bzw. Nachfolgejahre)]
- RENSLOW, M. (ed.) (2012): Manual of Airborne Topographic LIDAR. – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, U.S.A., 504 S. [GEOD 528.4T RENS – **FE 177**]
- MAUNE, D.F. (ed.) (2007): Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd Edition. – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, U.S.A., 655 S. [GEOD 528.4B MAUN – **DH 02**]

Anwendungen in den Geowissenschaften und in der Ingenieurvermessung:

- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. - Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 249 S. [GEOD 528.8 ALBE – **FE 126**]
- FREYER, J., MITCHELL, H., CHANDLER, J. (eds.) (2007): Applications of 3D Measurement from Images. – Whittles Publishing, CRC Press, Taylor & Francis Group, 304 S. [GEOD 528.7. – **PH 208**]
- PRZYBILLA H.-J. (Hrsg.) (1996): Photogrammetrische Messtechnik in der Ingenieurvermessung: Mehrbildorientierung, digitale Aufnahme- und Auswertesysteme, Motographie; Anwendungen im Anlagen- und Wasserbau, in der Architektur und Medizin. – VDV-Schriftenreihe, Band 12, Verlag Chmielorz, Wiesbaden, 133 S. [TU Graz I 166.340/12 – **PH 166**]
- LÖFFLER, E. (1994): Geographie und Fernerkundung: eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten. - 2. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 251 S. [TU Graz I 166.717. – **FE 67**]
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie, - 1. Auflage, Wichmann Verlag, [TU Graz I 153.046. – **FE 82**]

- HUSS, J. (Hrsg.) (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. - Wichmann Verlag, Karlsruhe, 406 S. [*keine Signatur*, Privatbibliothek von V. Kaufmann]
- WEIHMANN, G. (1988): Architektur-Photogrammetrie. - Wichmann Verlag, Karlsruhe, 197 S. [TU Graz I 146.882. – FE 76]

Zur Geschichte:

- ABLASSER, W. (1995): Die Entwicklung der wissenschaftlichen Photogrammetrie an der TH/TU Graz im nationalen und internationalen Umfeld. – Diplomarbeit am Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, TU Graz, 2. überarbeitete und korrigierte Fassung, 193 S. [TU Graz II 124.794, II 209.440]
- BLACHUT, T., & BURKHARDT, R. (1989): Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments. -American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, VA 22046, U.S.A., 157 p. [TU Graz I 158.975 – PH 88]
- SCHWEIZERISCHE GESELLSCHAFT FÜR PHOTOGRAMMETRIE, BILDANALYSE UND FERNERKUNDUNG (Hrsg.) (1996): Photogrammetrie in der Schweiz: Geschichte, Entwicklung. - Dümmler Verlag, Bonn, 152 S. [TU Graz II 207.061 – PH 167]

Skripten:

- BRANDSTÄTTER, G. (2000): Digitalphotogrammetrie. - Institut für Angewandte Geodäsie, Technische Universität Graz, 76 S.
- BRANDSTÄTTER, G. (2000): Photogrammetrie und Fernerkundung. - Institut für Angewandte Geodäsie, Technische Universität Graz, 138 S.
- KAUFMANN, V. (1991): Photogrammetrie und Fernerkundung 1. – Unterstützender Lehrbehelf (Umdrucke), Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, 149 S.
- KAUFMANN, V. (1991): Photogrammetrie und Fernerkundung 2. – Unterstützender Lehrbehelf (Umdrucke), Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, 87 S.
- KAUFMANN, V. (2025): Photogrammetrie bzw. Photogrammetrie Einführung. – Unterstützender Lehrbehelf (PowerPoint-Folien), in 7 Kapiteln, Institut für Geodäsie, AG Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz.
- KAUFMANN, V. (2025): Bildmessung – Unterstützender Lehrbehelf (PowerPoint-Folien), in 7 Kapiteln, Institut für Geodäsie, AG Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz.
- KOSTKA, R. (1999): Grundzüge der Fernerkundung. – Institut für Geographie, Universität Graz, 117 S.
- LEBERL, F. (1982): Photogrammetrie 1. – Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, 235 S.
- RINNER, K., LEBERL, F. (1978): Photogrammetrie 2. – Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, 240 S.

Schriftliche Unterlagen zu Fortbildungskursen:

- FRITSCH, D., CRAMER, M., ENGLISH, M., HAALA, N., ACKERMANN, F. (1997): Tutorium „GPS/INS in der Photogrammetrie“. – 46. Photogrammetrische Woche, Stuttgart. [TU Graz II 208.052 – PH 174]
- FRITSCH, D., BRENNER, C., HAALA, N., WALTER, V. (1999): Tutorium „Algorithmen und ihre Automatisierung in der photogrammetrischen Datenauswertung“. – 47. Photogrammetrische Woche, Stuttgart.
- FRITSCH, D., CRAMER, M., HAALA, N., WALTER, V. (2001): Tutorium „Digitale Luftbilddarstellung – Realität, Erwartungen und Visionen“. – 48. Photogrammetrische Woche, Stuttgart.
- KRAUS, K., et al. (1998): Digitale Nahbereichsphotogrammetrie: Methoden und Anwendungen. – Universitätslehrgang, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, 29.9.-1.10.1998.
- KRAUS, K., et al. (1999): Geo-Basisdaten-Erfassung. – Universitätslehrgang, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, 28.9.-30.9.1999.
- TORRE, M., THOMAS, L., BALTSAVIAS, E., KERSTEN, TH. (2000): Tutorial "Overview, Evaluation and Testing of Digital Photogrammetric Stations". – 19th ISPRS Congress, Amsterdam, July 15th 2000.
- FRITSCH, D., HAALA, N., KADA, M., WALTER, V. (2003): Tutorium „Photogrammetrie und 3D-Visualisierung – Mehrwert und Visionen“. – 49. Photogrammetrische Woche, Stuttgart.

- FRITSCH, D., HAALA, N., CRAMER, M., ROTHERMEL, M., WENZEL, K., BECKER, S., TUTZAUER, P., COUGHENOUR, CH. & BALSÀ, J. (2015): Tutorial „Excellence in Photogrammetry. From UAV Data Collection and Data Processing to Advanced 3D Modelling“. – Phowo 2015, Universität Stuttgart.
- SÖRGEL, U. & HAALA, N. (2017): Tutorial „Remote Sensing – From Basics to Advanced Methods“. – Phowo 2017, Universität Stuttgart.
- KRAUS, K. et al. (2004): Universitätslehrgang „Laserscanning – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung“. – Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, 22.-24.9.2003.

Andere Quellen:

- DIN 18716-1 (November 1995): Photogrammetrie und Fernerkundung, Teil 1: Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme. – DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin. 16 S.
- DIN 18716-1 (Juli 1995): Photogrammetrie und Fernerkundung, Teil 2: Besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung.– DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin. 16 S.
- DIN 18716-1 (März 1988): Photogrammetrie und Fernerkundung, Teil 3: Fernerkundung. – DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin. 28 S.
- SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: VERSTÄNDLICHE FORSCHUNG (1986): Wahrnehmung und visuelles System. – Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 220 S.

Videofilme:

Wie entsteht eine Landkarte?

Magazin: Zukunft & Technik, T/I Imaging GmbH, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, 17:16, 1999.

Investigations on the retreat of two small cirque glaciers (Goessnitzkees and Hornkees) in the Austrian Alps.

Studio AV-Medien CIS, TU Graz, 12:30, 1999.

Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hochebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods.

Studio AV-Medien CIS, TU Graz, 5:06, 2001.

Literaturquellen, welche mit einer Signatur gekennzeichnet sind, können in der Fachbibliothek NAWI, Stremayrgasse 16 ausgeliehen werden.

Photogrammetrie, VO
Graz, im März 2025

Fachzeitschriften

- PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING (PE&RS)
(Official Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing)
12 Ausgaben/Jahr
<https://www.asprs.org/asprs-publications/pers->
- ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING
(Official Publication of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS))
6 Ausgaben/Jahr
<https://www.sciencedirect.com/journal/isprs-journal-of-photogrammetry-and-remote-sensing>
- PFG – JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND GEOINFORMATION SCIENCES
(Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V., DGPF)
6 Ausgaben/Jahr
<https://www.dgpf.de/pub/pfg.html>
- THE PHOTOGRAMMETRIC RECORD
(An International Journal of Photogrammetry, The Photogrammetric Society, London, UK)
<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/14779730>
- VGI
(Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation)
4 Ausgaben/Jahr
<https://www.ovg.at/de/bibliothek/vgi-die-zeitschrift/archiv> (3.3.2025)

Beiträge mit photogrammetrischen Themen finden sich auch in diversen Zeitschriften über Vermessungswesen und Geoinformation.

Zeitschriften mit Bezug auf Computer/Machine/Robot Vision sind hier nicht angeführt.

Mitteilungen und Schriftreihen

- Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen, TU Wien
(Veröffentlichung des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung)
- Mitteilungen des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich
- Publications of the Spatial Data Research Organisation (EuroSDR)
- Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Dissertationen

Konferenzen und Fortbildungskurse

- Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)
alle 4 Jahre, nächster Kongress: 4.-11. Juli 2026 in Toronto. (<https://www.isprs2026toronto.com/>)
Zwischen den Kongressen werden Symposien veranstaltet (vgl. <http://www.isprs.org/>).
- Photogrammetrische Woche (Photogrammetric Week) auf der UNI Stuttgart (Institut für Photogrammetrie), alle 2 Jahre im April, weitere Informationen zur PhoWo unter <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/>.
- Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, MuttENZ/Basel, 3.-5. Juni 2025,
= Dreiländertagung SGPF, DGPF & OVG
<https://www.dgpf.de/con.html> , <https://fhnw.ch/plattformen/dlt2025/>
- 22. Oldenburger 3D-Tage, 11. Oldenburger BIMTAG, Jade Hochschule, 4. Februar 2025
<https://www.jade-hs.de/unsere-hochschule/fachbereiche/bauwesen-geoinformation-gesundheitstechnologie/geoinformation/veranstaltungen/oldenburger-3d-tage/>

Photogrammetrie, VO
Graz, im März 2025

Photogrammetrie-Adressen im WWW

Universitäts- und Hochschulinstitute:

Academic Sites for Geomatic Engineering – all over the world
(Geodesy, Surveying, Photogrammetry, Cartography, GIS)
Department of Geodesy and Geoinformation, research division
Photogrammetry and Remote Sensing, TU **Wien**
Institut für Vermessungswesen, Fernerkundung und Landinformation,
Universität für Bodenkultur **Wien** (BOKU)
Institut für Geodäsie, Arbeitsgruppe Photogrammetrie und Fernerkundung,
Technische Universität **Graz**
Institut für Grundlagen der Bauingenieurwissenschaften,
Arbeitsbereich Vermessung und Geoinformation, Universität **Innsbruck**
Institut für Photogrammetrie und Kartographie,
Technische Universität **Berlin**
Institut für Photogrammetrie, Universität **Bonn**
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen,
Universität **Hannover**
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,
Universität **Karlsruhe**
Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung,
Technische Universität **München**
Institut für Photogrammetrie und Kartographie,
Universität der **Bundeswehr München**
Institut für Photogrammetrie, Universität **Stuttgart**
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU **Dresden**
Institut für Photogrammetrie und Kartographie, TU **Darmstadt**
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, TU **Braunschweig**

Institute of Photogrammetry and Remote Sensing,
Helsinki University of Technology, Finland
Dept. of Geodesy and Photogrammetry,
Royal Institute of Technology, **Stockholm**, Sweden
Laboratory of Photogrammetry, Institute of Geomatic,
Ecole Polytechnique Fédérale de **Lausanne**, Switzerland
Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of
Technology (ETH **Zürich**), Switzerland
Department of Geomatic Engineering, University College **London** (UCL)
Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The **Ohio State**
University, USA

<http://www2.unb.ca/gge/HotList.html>
<https://www.geo.tuwien.ac.at/>
<http://www.rali.boku.ac.at/ivfl.html>
<https://www.tugraz.at/institute/ifg/home/>
<http://www.uibk.ac.at/geodaesie/>
<http://www.fpk.tu-berlin.de/>
<http://www.ipb.uni-bonn.de/>
<http://www.ipi.uni-hannover.de/>
<http://www.ipf.uni-karlsruhe.de/>
<http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/>
<http://www.unibw.de/ipk/>
<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/>
<http://www.tu-dresden.de/ipf/>
<http://www.tu-darmstadt.de/fb/bi/ipk/index.htm>
http://www.tu-bs.de/institute/geodae/index_ns/index_ns.htm
<http://foto.hut.fi/>
<http://www.geomatics.kth.se/fotogram/index.html>
<http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/index.en.html>
http://www.p.igp.ethz.ch/p02/start_p02.html
<http://www.ge.ucl.ac.uk/>
<http://www-ceg.eng.ohio-state.edu/>

Organisationen und Firmen:

ISPRS (International Society for Photogrammetry & Remote Sensing)
ASPRS (American Society for Photogrammetry & Remote Sensing)
CIPA (International Committee for Architectural Photogrammetry)
EARSeL (European Association of Remote Sensing Laboratories)
IAG (International Association of Geodesy)
EuroSDR (Spatial Data Research Organization)
BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen), Wien
ÖVG (Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation)
DGPF (Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung)
The Photogrammetric Society, UK
Intergraph (ImageStation)

Leica Geosystems
Vexcel Imaging

<http://www.isprs.org/>
<http://www.asprs.org/>
<http://cipa.icomos.org/>
<http://www.earsel.org/welcome.html>
<http://www.gfy.ku.dk/~iag/>
<http://www.eurosdrr.net/2002/index.htm>
<http://www.bev.gv.at/>
<http://www.ovg.at/>
<http://www.dgpf.de/>
<http://www.rspso.org/>
<http://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/imagestation>
<http://leica-geosystems.com/>
<http://www.vexcel-imaging.com/>

Sonstiges:

Tutorials in Photogrammetry, Computer Vision, and Remote Sensing
Lecture notes on Photogrammetry
Lecture notes on Photogrammetry
Introduction to Photogrammetry

<http://www.isprs.org/links/tutorial.html>
<http://gge.unb.ca/Pubs/LectureNotes.html>
http://www.isprs.org/links/list_links.html
<http://www.univie.ac.at/Luftbildarchiv/wgv/intro.htm>

Photogrammetrie, VO
Graz, im März 2025