

A GRUNDZÜGE DER PHOTOGRAMMETRIE

1. EINLEITUNG	1
1.1 Definitionen	1
1.2 Anwendungsmöglichkeiten	2
1.3 Einige Bemerkungen zur Entwicklungsgeschichte	3
2. VORBEMERKUNGEN AUS MATHEMATIK UND DIGITALER BILDVERARBEITUNG	5
2.1 Mathematische Vorbemerkungen	5
2.1.1 Drehung sowie Affin- und Ähnlichkeitstransformation in der Ebene	5
2.1.2 Drehung sowie Affin- und Ähnlichkeitstransformation im Raum	10
2.1.3 Zentralprojektion des Raumes	16
2.1.4 Zentralprojektion und Projektivtransformation der Ebene	20
2.1.5 Zentralprojektion und Projektivtransformation der Geraden	26
2.1.6 Der Normalfall der Zweibildauswertung	28
2.1.7 Fehlertheorie des Normalfalles	30
2.2 Vorbemerkungen aus digitaler Bildverarbeitung	33
2.2.1 Digitales Bild	33
2.2.2 Digitales Messbild	36
2.2.3 Digitale Normalfallbildauswertung und digitale projektive Entzerrung	38
3. PHOTOGRAMMETRISCHE AUFNAHMESYSTEME UND IHR PRAKTISCHER EINSATZ	46
3.1 Grundsätzliches zur Messkamera	46
3.1.1 Die innere Orientierung einer Messkamera	46
3.1.2 Kalibrierung von Messkameras	55
3.1.3 Korrektur der Objektiverzeichnung	56
3.1.4 Tiefenschärfe und Schärfentiefe	58
3.1.5 Auflösungsvermögen und Kontrastübertragung	64
3.1.6 Lichtabfall von der Bildmitte zum Bildrand	73
3.2 Photochemische Bildaufzeichnung	74
3.2.1 Analoges Messbild	74
3.2.1.1 Glas versus Film als Schichtträger	74
3.2.1.2 Korrektur der Filmdeformationen	76

3.2.2	Belange der photochemischen Bildaufzeichnung	80
3.2.2.1	Farben und Filter	80
3.2.2.2	Der photochemische Prozess der Schwarzweiß-Photographie	84
3.2.2.3	Gradation	85
3.2.2.4	Allgemeinempfindlichkeit	87
3.2.2.5	Der photochemische Prozess der Farbphotographie	89
3.2.2.6	Spektrale Empfindlichkeit	92
3.2.3	Aufzeichnungsqualität photographischer Emulsionen	95
3.2.4	Kopierung mit Kontraststeuerung	97
3.2.5	Filme für die Luftbildaufnahme	98
3.3	Photoelektronische Bildaufzeichnung	100
3.3.1	Prinzip der opto-elektronischen Sensoren	100
3.3.2	Auflösungsvermögen und Kontrastübertragung	104
3.3.3	Abstände der Detektoren (Abtasttheorie)	108
3.3.4	Geometrische Aspekte von CCD-Kameras	110
3.3.5	Radiometrische Aspekte von CCD-Kameras	111
3.4	Digitalisierung analoger photographischer Bilder	115
3.4.1	Digitalisierungsintervalle	115
3.4.2	Grau- bzw. Farbwerte	116
3.4.3	Technische Lösungen	119
3.5	Verbesserung digitaler Bilder	120
3.5.1	Kontrast- und Helligkeitsveränderungen	120
3.5.1.1	Histogrammeinebnung	124
3.5.1.2	Histogrammnormalisierung	125
3.5.1.3	Korrektur des Lichtabfalls von der Bildmitte zum Bildrand	129
3.5.1.4	Histogrammnormalisierung und zusätzlich eine lokale Kontrastverstärkung	130
3.5.2	Filterungen	133
3.5.2.1	Filterungen im Ortsbereich	134
3.5.2.2	Filterungen im Frequenzbereich	138
3.6	Bildpyramiden/Datenkompression	141
3.6.1	Bildpyramiden	141
3.6.2	Bildkomprimierung	142
3.7	Luftbildkameras und ihr praktischer Einsatz	144
3.7.1	Flugplanung	144
3.7.2	Luftbildmesskameras	150
3.7.2.1	Großformatige Filmmesskameras	151
3.7.2.2	Digitale Kameras mit CCD-Flächensensoren	158
3.7.2.3	Digitale Dreizeilenkameras	160

3.7.3	Satellitenpositionierungs- und Inertialsysteme	162
3.7.3.1	GPS-Einsatz beim Bildflug und Belichtung der Aufnahmen	162
3.7.3.2	Genaue Bestimmung der äußeren Orientierungselemente mit GPS und IMU	163
3.7.3.3	Kreiselstabilisierte Plattform und Besonderheiten bei Zeilenkameras und Laserscannern	170
3.7.4	Bewegungsunschärfe und ihre Kompensation	172
3.7.5	Die wirksame Beleuchtung für Luftaufnahmen	176
3.7.6	Vermessungsflugzeuge	179
3.8	Erdbildkameras und ihr praktischer Einsatz	180
3.8.1	Normalfall der terrestrischen Photogrammetrie	181
3.8.2	Stereomesskameras	183
3.8.3	Einzelmesskameras	185
3.8.4	Teilmesskameras/Réseaukameras	187
3.8.5	Amateurlkameras/Nicht-Messkameras	189
3.8.6	Zwischenbemerkung	189
3.8.7	CCD-Kameras	191
3.8.8	Planung terrestrischer Aufnahmen	194
4.	ORIENTIERUNGSVERFAHREN UND EINIGE METHODEN DER ZWEIBILDAUSWERTUNG	201
4.1	Mit bekannter äußerer Orientierung	202
4.1.1	Zwei überlappende Messbilder	202
4.1.2	Messaufnahmen mit einer Dreizeilenkamera	205
4.2	Mit unbekannter äußerer Orientierung	206
4.2.1	Getrennte Orientierung der beiden Messbilder	207
4.2.2	Gemeinsame Orientierung der beiden Messbilder (einstufig)	210
4.2.3	Gemeinsame Orientierung der beiden Messbilder (zweistufig)	212
4.3	Relative Orientierung	215
4.3.1	Relative Orientierung genäherter Senkrechtaufnahmen	215
4.3.2	Relative Orientierung stark geneigter Messbilder und Modellbildung	221
4.3.3	Alternativer Ansatz zur relativen Orientierung	225
4.3.4	Relative Orientierung genäherter Senkrechtaufnahmen mit y-Parallaxen	229
4.3.5	Gefährliche Konstellationen der relativen Orientierung	235
4.3.6	Fehlertheorie der relativen Orientierung	239
4.3.6.1	Mittlere Fehler der Orientierungselemente	239
4.3.6.2	Deformationen der Stereomodelle	241

4.4	Absolute Orientierung	245
4.4.1	Kleinste-Quadrate-Ausgleichung	245
4.4.2	Fehlertheorie der absoluten Orientierung	251
4.4.3	Ermittlung von Näherungswerten	255
4.5	Bildkoordinatenbereinigung	256
4.5.1	Refraktionskorrektur für genäherte Senkrechtaufnahmen	257
4.5.2	Refraktions- und Erdkrümmungskorrektur für horizontale Aufnahmen	259
4.5.3	Erdkrümmungskorrektur für genäherte Senkrechtaufnahmen	262
4.5.4	Virtuelles (digitales) Korrekturbild	265
4.6	Genauigkeit der punktweisen Zweibildauswertung	266
5.	PHOTOGRAMMETRISCHE TRIANGULATION	273
5.1	Vorbemerkungen zur Aerotriangulation	273
5.2	Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen	275
5.2.1	Lageblockausgleichung	275
5.2.2	Räumliche Blockausgleichung	285
5.2.3	Lage- und Höhengengenauigkeit der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen	287
5.2.3.1	Lageengenauigkeit	288
5.2.3.2	Höhengengenauigkeit	294
5.2.3.3	Empirische Lage- und Höhengengenauigkeit	297
5.2.3.4	Lage- und Höhengengenauigkeit der Streifentriangulation	297
5.3	Bündelblockausgleichung	299
5.3.1	Grundprinzip	299
5.3.2	Verbesserungs- und Normalgleichungen eines Bildverbandes	300
5.3.3	Auflösung der Normalgleichungen	302
5.3.4	Unbekannte innere Orientierung und zusätzliche Parameter	304
5.3.5	Genauigkeit sowie Vor- und Nachteile der Bündelblockausgleichung	305
5.4	GPS- und IMU-gestützte Aerotriangulation	306
5.5	Georeferenzierung von Aufnahmen einer Dreizeilenkamera	308
5.6	Berücksichtigung der Gestalt der Erde und der Verzerrungen der Landeskoordinaten	312
5.7	Photogrammetrische Triangulation im Nahbereich	314

6.	AUSWERTEGERÄTE UND WEITERE ZWEIBILDAUSWERTEVERFAHREN	319
6.1	Stereo-Betrachtungssysteme	319
6.1.1	Natürliches räumliches Sehen	319
6.1.2	Betrachtung von analogen und digitalen Stereobildern	321
6.2	Stereoskopisches Mess- bzw. Zuordnungsprinzip	329
6.3	Analoge Zweibildauswertegeräte	331
6.4	Analytische Zweibildauswertegeräte	334
6.4.1	Stereokomparator	335
6.4.2	Elektronische Registrierung der Bildkoordinaten (Monokomparator)	336
6.4.3	Universelles analytisches Zweibildauswertegerät	339
6.5	Digitale Zweibildauswertegeräte	341
6.6	Manuelle (computergestützte) Auswertemethoden	343
6.6.1	Situationsauswertung	343
6.6.2	Höhenauswertung	346
6.6.3	Gebäudeauswertung	348
6.6.4	Übergang auf raumbezogene Informationssysteme	353
6.7	Genauigkeit manuell (computergestützt) erhaltener Auswerteergebnisse	354
6.7.1	Situationsauswertung	355
6.7.2	Höhenauswertung	357
6.7.3	Kontrolle der Auswertung	360
6.8	Automatische und halbautomatische Auswerteverfahren	361
6.8.1	Korrelationsalgorithmen	361
6.8.1.1	Korrelationskoeffizient als Ähnlichkeitsmaß	363
6.8.1.2	Korrelation im Subpixelbereich	364
6.8.1.3	Interest-Operatoren	369
6.8.1.4	Merkmalsbasierte Korrelation	370
6.8.1.5	Gleichzeitige Korrelation in mehr als zwei Bildern	371
6.8.2	Automatische innere Orientierung	373
6.8.3	Automatische relative Orientierung und automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten	375
6.8.4	Automatische Lokalisierung von Passpunkten	380
6.8.5	Einbeziehung der Kernstrahlgeometrie in die Korrelation	381
6.8.6	Automatische Erfassung von Oberflächen	392

6.8.7	Halbautomatische Situationsauswertung	394
6.8.7.1	Mit aktiven Konturlinien (<i>snakes</i>)	395
6.8.7.2	Mit sequentiellen Arbeitsabläufen	397
6.8.8	Halbautomatische Gebäudeauswertung	403
6.8.9	Genauigkeit und Zuverlässigkeit automatisch bzw. halbautomatisch erhaltener Auswerteergebnisse	407
6.8.10	Besonderheiten der Dreizeilenkamera	408
7.	ORTHOPHOTOS UND EINZELBILDAUSWERTUNG	410
7.1	Verzerrungen eines Messbildes	411
7.2	Orthophotos ebener Objekte und ihre Genauigkeit	418
7.2.1	Mit orthogonaler Aufnahmerichtung	418
7.2.2	Mit geneigter Aufnahmerichtung	421
7.2.3	Gemeinsame projektive und affine Entzerrung	424
7.3	Orthophotos gekrümmter Objekte und ihre Genauigkeit	425
7.3.1	Herstellungsprinzip	425
7.3.2	Orthophotogenauigkeit	431
7.4	Analoge, analytische und digitale Einzelbildauswertung	440
7.4.1	Analoge, analytische und digitale Orthophotoauswertung	440
7.4.2	Analytische und digitale Auswertung einer geneigten Aufnahme eines ebenen Objektes	441
7.4.3	Analytische und digitale Einzelbildauswertung gekrümmter Objekt- flächen	442
7.5	Photomodelle	445
7.6	Statische und dynamische Visualisierungen	448
8.	LASERSCANNING	449
8.1	Flugzeuggetragenes Laserscanning	449
8.1.1	Aufnahmeprinzip	449
8.1.2	Auswertung	454
8.1.2.1	Georeferenzierung	454
8.1.2.2	Ableitung von Geländemodellen	458
8.1.2.3	Ableitung von Gebäudemodellen	463
8.1.3	Gegenüberstellung von zwei Paradigmen und weitere Leistungsparameter zum Laserscanning	465

8.2	Terrestrisches Laserscanning	471
8.2.1	Aufnahmeprinzip	471
8.2.2	Georeferenzierung	473
8.2.3	Verknüpfung von Punktwolken	476
8.2.4	Strategien zur Objektmodellierung	477
8.2.5	Zusammenführung von Laserdaten und von photographischen Daten	481
8.3	Laserscanning im extremen Nahbereich	483
Anhang 2.1-1:	Räumliche Drehmatrix	487
Anhang 2.1-2:	Mathematischer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten (Kollinearitätsbeziehung)	492
Anhang 2.1-3:	Differentiale der Kollinearitätsbeziehung	494
Anhang 2.2-1:	Ableitung der Formel (2.2-5) mit homogenen Koordinaten	496
Anhang 4.1-1:	Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate	497
Anhang 4.2-1:	Direkte lineare Transformation (DLT) mit homogenen Koordinaten	501
Anhang 4.3-1:	Differentiale der Koplanaritätsbedingung	501
Anhang 4.6-1:	Die empirische Bestimmung von Standardabweichungen und Toleranzen	503
	Vervollständigung der Literaturhinweise	505
	SACHREGISTER	506