

## A GRUNDZÜGE DER PHOTOGRAMMETRIE

<b>1. EINLEITUNG</b>	1
1.1 Definitionen	1
1.2 Anwendungsmöglichkeiten	2
1.3 Einige Bemerkungen zur Entwicklungsgeschichte	3
<b>2. VORBEMERKUNGEN AUS MATHEMATIK UND DIGITALER BILDVERARBEITUNG</b>	5
<b>2.1 Mathematische Vorbemerkungen</b>	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
<b>2.2 Vorbemerkungen aus digitaler Bildverarbeitung</b>	33
2.2.1 Digitales Bild	33
2.2.2 Digitales Messbild	36
2.2.3 Digitale Normalfallbildauswertung und digitale projektive Entzerrung	38
<b>3. PHOTOGRAMMETRISCHE AUFNAHMESYSTEME UND IHR PRAKTISCHER EINSATZ</b>	46
<b>3.1 Grundsätzliches zur Messkamera</b>	46
3.1.1 Die innere Orientierung einer Messkamera	46
3.1.2 Kalibrierung von Messkameras	55
3.1.3 Korrektur der Objektivverzeichnung	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
<b>3.2 Photochemische Bildaufzeichnung</b>	74
<b>3.2.1 Analoges Messbild</b>	74
3.2.1.1 Glas versus Film als Schichtträger	74
3.2.1.2 Korrektur der Filmdeformationen	76

<b>3.2.2</b>	<b>Belange der photochemischen Bildaufzeichnung</b>	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
<b>3.2.3</b>	<b>Aufzeichnungsqualität photographischer Emulsionen</b>	95
<b>3.2.4</b>	<b>Kopierung mit Kontraststeuerung</b>	97
<b>3.2.5</b>	<b>Filme für die Luftbildaufnahme</b>	98
<b>3.3</b>	<b>Photoelektronische Bildaufzeichnung</b>	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
<b>3.4</b>	<b>Digitalisierung analoger photographischer Bilder</b>	115
3.4.1	Digitalisierungsintervalle	115
3.4.2	Grau- bzw. Farbwerte	116
3.4.3	Technische Lösungen	119
<b>3.5</b>	<b>Verbesserung digitaler Bilder</b>	120
<b>3.5.1</b>	<b>Kontrast- und Helligkeitsveränderungen</b>	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
<b>3.5.2</b>	<b>Filterungen</b>	133
3.5.2.1	Filterungen im Ortsbereich	134
3.5.2.2	Filterungen im Frequenzbereich	138
<b>3.6</b>	<b>Bildpyramiden/Datenkompression</b>	141
3.6.1	Bildpyramiden	141
3.6.2	Bildkomprimierung	142
<b>3.7</b>	<b>Luftbildkameras und ihr praktischer Einsatz</b>	144
<b>3.7.1</b>	<b>Flugplanung</b>	144
<b>3.7.2</b>	<b>Luftbildmesskameras</b>	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

<b>3.7.3</b>	<b>Satellitenpositionierungs- und Inertialsysteme</b>	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
<b>3.7.4</b>	<b>Bewegungsunschärfe und ihre Kompensation</b>	172
<b>3.7.5</b>	<b>Die wirksame Beleuchtung für Luftaufnahmen</b>	176
<b>3.7.6</b>	<b>Vermessungsflugzeuge</b>	179
<b>3.8</b>	<b>Erdbildkameras und ihr praktischer Einsatz</b>	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	Amateurkameras/Nicht-Messkameras	189
3.8.6	Zwischenbemerkung	189
3.8.7	CCD-Kameras	191
3.8.8	Planung terrestrischer Aufnahmen	194
<b>4.</b>	<b>ORIENTIERUNGSVERFAHREN UND EINIGE METHODEN DER ZWEIBILDAUSWERTUNG</b>	201
<b>4.1</b>	<b>Mit bekannter äußerer Orientierung</b>	202
4.1.1	Zwei überlappende Messbilder	202
4.1.2	Messaufnahmen mit einer Dreizeilenkamera	205
<b>4.2</b>	<b>Mit unbekannter äußerer Orientierung</b>	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
<b>4.3</b>	<b>Relative Orientierung</b>	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

<b>4.4 Absolute Orientierung</b>	245
4.4.1 Kleinste-Quadrat-Ausgleichung	245
4.4.2 Fehlertheorie der absoluten Orientierung	251
4.4.3 Ermittlung von Näherungswerten	255
<b>4.5 Bildkoordinatenbereinigung</b>	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
<b>4.6 Genauigkeit der punktweisen Zweibildauswertung</b>	266
<b>5. PHOTOGRAMMETRISCHE TRIANGULATION</b>	273
<b>5.1 Vorbemerkungen zur Aerotriangulation</b>	273
<b>5.2 Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen</b>	275
5.2.1 Lageblockausgleichung	275
5.2.2 Räumliche Blockausgleichung	285
5.2.3 Lage- und Höhengenauigkeit der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen	287
5.2.3.1 Lagegenauigkeit	288
5.2.3.2 Höhengenauigkeit	294
5.2.3.3 Empirische Lage- und Höhengenauigkeit	297
5.2.3.4 Lage- und Höhengenauigkeit der Streifentriangulation	297
<b>5.3 Bündelblockausgleichung</b>	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
<b>5.4 GPS- und IMU-gestützte Aerotriangulation</b>	306
<b>5.5 Georeferenzierung von Aufnahmen einer Dreizeilenkamera</b>	308
<b>5.6 Berücksichtigung der Gestalt der Erde und der     Verzerrungen der Landeskoordinaten</b>	312
<b>5.7 Photogrammetrische Triangulation im Nahbereich</b>	314

<b>6. AUSWERTEGERÄTE UND WEITERE ZWEIBILDAUSWERTEVERFAHREN</b>	319
<b>6.1 Stereo-Betrachtungssysteme</b>	319
6.1.1 Natürliches räumliches Sehen	319
6.1.2 Betrachtung von analogen und digitalen Stereobildern	321
<b>6.2 Stereoskopisches Mess- bzw. Zuordnungsprinzip</b>	329
<b>6.3 Analoge Zweibildauswertegeräte</b>	331
<b>6.4 Analytische Zweibildauswertegeräte</b>	334
6.4.1 Stereokomparator	335
6.4.2 Elektronische Registrierung der Bildkoordinaten (Monokomparator)	336
6.4.3 Universelles analytisches Zweibildauswertegerät	339
<b>6.5 Digitale Zweibildauswertegeräte</b>	341
<b>6.6 Manuelle (computergestützte) Auswertemethoden</b>	343
6.6.1 Situationsauswertung	343
6.6.2 Höhenauswertung	346
6.6.3 Gebäudeauswertung	348
6.6.4 Übergang auf raumbezogene Informationssysteme	353
<b>6.7 Genauigkeit manuell (computergestützt) erhaltener Auswerteergebnisse</b>	354
6.7.1 Situationsauswertung	355
6.7.2 Höhenauswertung	357
6.7.3 Kontrolle der Auswertung	360
<b>6.8 Automatische und halbautomatische Auswerteverfahren</b>	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

<b>6.8.7</b>	<b>Halbautomatische Situationsauswertung</b>	394
6.8.7.1	Mit aktiven Konturlinien ( <i>snakes</i> )	395
6.8.7.2	Mit sequentiellen Arbeitsabläufen	397
<b>6.8.8</b>	<b>Halbautomatische Gebäudeauswertung</b>	403
<b>6.8.9</b>	<b>Genauigkeit und Zuverlässigkeit automatisch bzw. halbautomatisch erhaltener Auswerteergebnisse</b>	407
<b>6.8.10</b>	<b>Besonderheiten der Dreizeilenkamera</b>	408
<b>7.</b>	<b>ORTHOPHOTOS UND EINZELBILDAUSWERTUNG</b>	410
<b>7.1</b>	<b>Verzerrungen eines Messbildes</b>	411
<b>7.2</b>	<b>Orthophotos ebener Objekte und ihre Genauigkeit</b>	418
7.2.1	Mit orthogonaler Aufnahmerichtung	418
7.2.2	Mit geneigter Aufnahmerichtung	421
7.2.3	Gemeinsame projektive und affine Entzerrung	424
<b>7.3</b>	<b>Orthophotos gekrümmter Objekte und ihre Genauigkeit</b>	425
7.3.1	Herstellungsprinzip	425
7.3.2	Orthophotogenauigkeit	431
<b>7.4</b>	<b>Analoge, analytische und digitale Einzelbildauswertung</b>	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 Objektoberflächen	442
<b>7.5</b>	<b>Photomodelle</b>	445
<b>7.6</b>	<b>Statische und dynamische Visualisierungen</b>	448
<b>8.</b>	<b>LASERSCANNING</b>	449
<b>8.1</b>	<b>Flugzeuggetragenes Laserscanning</b>	449
8.1.1	<b>Aufnahmeprinzip</b>	449
8.1.2	<b>Auswertung</b>	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	<b>Gegenüberstellung von zwei Paradigmen und weitere Leistungsparameter zum Laserscanning</b>	465

<b>8.2 Terrestrisches Laserscanning</b>	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
<b>8.3 Laserscanning im extremen Nahbereich</b>	483
<b>Anhang 2.1-1: Räumliche Drehmatrix</b>	487
<b>Anhang 2.1-2: Mathematischer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten (Kollinearitätsbeziehung)</b>	492
<b>Anhang 2.1-3: Differentiale der Kollinearitätsbeziehung</b>	494
<b>Anhang 2.2-1: Ableitung der Formel (2.2-5) mit homogenen Koordinaten</b>	496
<b>Anhang 4.1-1: Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate</b>	497
<b>Anhang 4.2-1: Direkte lineare Transformation (DLT) mit homogenen Koordinaten</b>	501
<b>Anhang 4.3-1: Differentiale der Koplanaritätsbedingung</b>	501
<b>Anhang 4.6-1: Die empirische Bestimmung von Standardabweichungen und Toleranzen</b>	503
<b>Vervollständigung der Literaturhinweise</b>	505
<b>SACHREGISTER</b>	506