

1	Einführung	1
1.1	Übersicht	1
1.1.1	Inhalt	1
1.1.2	Literatur	2
1.2	Prinzipielle Methoden	3
1.2.1	Der photogrammetrische Prozeß	3
1.2.2	Einteilungen der Photogrammetrie	5
1.2.3	Abbildungsmodell	8
1.2.4	Photogrammetrische Systeme	10
1.2.4.1	Analoges System	10
1.2.4.2	Digitales System	11
1.2.4.3	Aufnahme- und Auswerteprozess	12
1.2.5	Photogrammetrische Produkte	14
1.3	Anwendungsbereiche	15
1.4	Geschichtliche Entwicklung	18
2	Mathematische Grundlagen	26
2.1	Koordinatensysteme	26
2.1.1	Bildkoordinatensystem	26
2.1.2	Komparatorkoordinatensystem	27
2.1.3	Modellkoordinatensystem	27
2.1.4	Objektkoordinatensystem	28
2.2	Koordinatentransformationen	29
2.2.1	Ebene Transformationen	29
2.2.1.1	Ähnlichkeitstransformation	29
2.2.1.2	Affintransformation	30
2.2.1.3	Polynomtransformation	32
2.2.1.4	Bilineare Transformation	32
2.2.1.5	Projektivtransformation	33
2.2.2	Räumliche Transformationen	35
2.2.2.1	Räumliche Drehungen	35
2.2.2.2	Räumliche Ähnlichkeitstransformation	41
2.2.2.3	Grafische Transformationen	45
2.3	Ausgleichungsverfahren	50
2.3.1	Problemstellung	50
2.3.1.1	Funktionales Modell	50
2.3.1.2	Stochastisches Modell	52
2.3.2	Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell)	53
2.3.2.1	Ausgleichung direkter Beobachtungen	54
2.3.2.2	Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen	55
2.3.2.3	Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten	57
2.3.3	Qualitätsmaße	58
2.3.3.1	Genauigkeitsmaße	58
2.3.3.2	Vertrauensbereiche	59
2.3.3.3	Korrelationen	62
2.3.3.4	Zuverlässigkeit	62
2.3.4	Erkennung von Ausreißern	66
2.3.4.1	Fehlersuche ohne Ausgleichung	67

2.3.4.2	Data Snooping	67
2.3.4.3	Varianzkomponentenschätzung	67
2.3.4.4	Robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen.....	68
2.3.4.5	Robuste Schätzung nach der L1-Norm	69
2.3.5	Hinweise zur Rechentechnik.....	70
2.3.5.1	Linearisierung	70
2.3.5.2	Normalgleichungssysteme	71
2.3.5.3	Profilspeichertechnik und Optimierung	72
2.4	Geometrische Elemente	73
2.4.1	Analytische Geometrie der Ebene.....	74
2.4.1.1	Gerade	74
2.4.1.2	Kreis.....	77
2.4.1.3	Ellipse	78
2.4.1.4	Kurvendarstellung	81
2.4.2	Analytische Geometrie des Raumes.....	85
2.4.2.1	Gerade	85
2.4.2.2	Ebene	88
2.4.2.3	Rotationskörper.....	90
2.4.3	Oberflächen.....	95
2.4.3.1	Digitales Oberflächenmodell	95
2.4.3.2	B-Spline- und Bezier-Flächen.....	97
2.4.3.3	Sonstige Flächenbeschreibungen	98
2.4.4	Funktionsgerechte Elemente	100
3	Aufnahmetechnik.....	101
3.1	Aufnahmekonzepte	101
3.1.1	Methoden der Bilderfassung	101
3.1.2	Aufnahmekonfigurationen	102
3.1.2.1	Einzelbildaufnahme	102
3.1.2.2	Stereobildaufnahme	102
3.1.2.3	Mehrbildaufnahme	103
3.2	Geometrische Grundlagen	104
3.2.1	Abbildungsmaßstab und Genauigkeit	104
3.2.1.1	Bildmaßstab	104
3.2.1.2	Genauigkeitsabschätzung.....	106
3.2.2	Optische Abbildung	109
3.2.2.1	Konstruktion der optischen Abbildung	109
3.2.2.2	Brechung und Reflexion	110
3.2.2.3	Beugung	111
3.2.2.4	Projektionszentrum und Verzeichnung	112
3.2.2.5	Scharfabbildung	115
3.2.2.6	Lichtabfall und Vignettierung.....	117
3.2.3	Innere Orientierung einer Aufnahmekamera.....	117
3.2.3.1	Parameter der inneren Orientierung	117
3.2.3.2	Bildfehler beschreibende Funktionen.....	118
3.2.3.3	Verkörperung des Bildkoordinatensystems.....	126
3.2.3.4	Transformationen für die innere Orientierung	128
3.2.3.5	Meß- und Teilmeßkamera	129

3.2.3.6	Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung)	130
3.2.4	Auflösungsvermögen	132
3.2.4.2	Geometrisches Auflösungsvermögen.....	132
3.2.4.3	Kontrast- oder Modulationsübertragung	134
3.2.5	Grundlagen der Abtasttheorie	135
3.2.5.2	Abtasttheorem	135
3.2.5.3	Detektoreigenschaften.....	137
3.3	Aufnahmesysteme.....	139
3.3.1	Analoge Aufnahmesysteme	139
3.3.1.1	Fotografische Grundlagen.....	139
3.3.1.2	Kameratechnik	143
3.3.1.3	Kameras mit mechanischer Bildverebnung (Meßkameras).....	149
3.3.1.4	Kameras mit optisch-numerischer Bildverebnung (Réseaukameras).....	151
3.3.1.5	Sonstige Aufnahmesysteme	157
3.3.2	Digitale Aufnahmesysteme.....	161
3.3.2.1	Systemkomponenten	161
3.3.2.2	Opto-elektronische Bildsensoren	162
3.3.2.3	CCD-Videokameras	170
3.3.2.4	Hochauflösende Digitalkameras	178
3.3.2.5	Scanning-Kameras	181
3.3.2.6	Panoramakameras	185
3.3.2.7	Farbkameras	186
3.3.2.8	Hochfrequenzkameras.....	188
3.3.2.9	Weitere Methoden zur elektronischen Bildaufzeichnung	189
3.3.2.10	Ausblick	189
3.3.3	Hybride Bilderfassung	191
3.3.3.1	Abtastrate	191
3.3.3.2	Quantisierung.....	194
3.3.3.3	Gerätetypen	195
3.3.3.4	Geometrische Korrektur von Bildscannern.....	198
3.3.4	Abbildende Laser-Scanner.....	201
3.3.4.1	Funktionsprinzip	201
3.3.4.2	Laser-Scanning für den Nahbereich.....	202
3.3.5	Selbstmessende Aufnahmesysteme.....	204
3.3.5.1	Videotheodolit.....	204
3.3.5.2	Schwenk-Neige-Kamera	205
3.3.5.3	Kameras mit Positionsbestimmung	206
3.4	Signalisierung und Beleuchtung	207
3.4.1	Objektsignalisierung	207
3.4.1.1	Kreisförmige Zielmarken.....	207
3.4.1.2	Linienhafte Zielmarken.....	212
3.4.1.3	Marken mit codierter Punktnummer	213
3.4.1.4	Exzentrische Signalisierungsmittel	214
3.4.2	Beleuchtungstechniken	216
3.4.2.1	Blitzgeräte	216
3.4.2.2	Projektoren.....	217
3.4.2.3	Laser.....	219
3.4.2.4	Gerichtete Beleuchtung	221

4	Analytische Auswerteverfahren	222
4.1	Übersicht	222
4.2	Orientierungsverfahren	224
4.2.1	Äußere Orientierung	224
4.2.1.1	Standardfall	224
4.2.1.2	Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie	225
4.2.2	Kollinearitätsgleichungen	226
4.2.3	Orientierung eines Einzelbildes	228
4.2.3.1	Räumlicher Rückwärtsschnitt	228
4.2.3.2	Direkte Lineare Transformation (DLT)	235
4.2.4	Orientierung eines Stereobildpaares	238
4.2.4.1	Verknüpfungspunkte	238
4.2.4.2	Kern- oder Epipolargeometrie	239
4.2.4.3	Relative Orientierung	241
4.2.4.4	Absolute Orientierung	252
4.3	Bündeltriangulation	255
4.3.1	Allgemeines	255
4.3.1.1	Zielsetzung	255
4.3.1.2	Entwicklung	256
4.3.1.3	Datenfluß	258
4.3.2	Mathematisches Modell	260
4.3.2.1	Ausgleichungsansatz	260
4.3.2.2	Normalgleichungen	262
4.3.2.3	Kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen	265
4.3.2.4	Ausgleichung zusätzlicher Parameter	269
4.3.3	Objektkoordinatensystem (Datumsfestlegung)	272
4.3.3.1	Rang- und Datumsdefekt	272
4.3.3.2	Paßpunkte	273
4.3.3.3	Freie Netzausgleichung	276
4.3.4	Beschaffung von Näherungswerten	280
4.3.4.1	Strategien zur automatischen Berechnung von Näherungswerten	282
4.3.4.2	Näherungswertbestimmung mit automatischer Punktmessung	287
4.3.4.3	Sonstige Verfahren	288
4.3.4.4	Praktische Aspekte bei der Näherungswertbeschaffung	290
4.3.5	Qualitätsmaße und Ergebnisanalyse	291
4.3.5.1	Ausgabeprotokoll	291
4.3.5.2	Genauigkeit der Bildkoordinaten	292
4.3.5.3	Genauigkeit der Objektkoordinaten	293
4.3.5.4	Genauigkeit der Simultankalibrierung	294
4.3.6	Strategien zur Bündelausgleichung	296
4.3.6.1	Simulation	296
4.3.6.2	Divergenz	297
4.3.6.3	Elimination grober Datenfehler	298
4.4	Objektrekonstruktion	299
4.4.1	Einzelbildauswertung	299
4.4.1.1	Projektive Transformation	299

4.4.1.2	Auswertung mit dreidimensionalen Objektmodellen	304
4.4.2	Stereoskopische Auswertung	309
4.4.2.1	Prinzip der Stereobildmessung	309
4.4.2.2	Punktbestimmung mit Bildkoordinaten	310
4.4.2.3	Punktbestimmung mit räumlicher Meßmarke	316
4.4.3	Mehrbildauswertung	318
4.4.3.1	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt	318
4.4.3.2	Direkte Bestimmung geometrischer Elemente	320
4.4.3.3	Bestimmung räumlicher Kurven (Snakes)	328
4.5	Linienphotogrammetrie	330
4.5.1	Rückwärtsschnitt mit parallelen Objektgeraden	330
4.5.2	Kollinearitätsgleichungen für Geraden	333
4.5.3	Relative Orientierung mit Geraden	335
4.5.4	3D-Ähnlichkeitstransformation mit Geraden	337
4.5.5	Bündelausgleichung mit Geraden	338
4.6	Mehrmedienphotogrammetrie	340
4.6.1	Lichtbrechung an Trennflächen	340
4.6.1.1	Trennflächen	340
4.6.1.2	Parallele ebene Trennflächen	340
4.6.1.3	Strahlverfolgung durch lichtbrechende Flächen	343
4.6.2	Erweitertes Modell der Bündeltriangulation	345
4.6.2.1	Objektinvariante Trennflächen	345
4.6.2.2	Bündelinvariante Trennflächen	346
5	Digitale Bildverarbeitung	347
5.1	Grundlagen	347
5.1.1	Bildverarbeitungsprozeß	347
5.1.2	Pixelkoordinatensystem	349
5.1.3	Bilddatenverwaltung	350
5.1.3.1	Bildpyramiden	350
5.1.3.2	Datenformate	352
5.1.3.3	Bildkompression	353
5.2	Bildvorverarbeitung	356
5.2.1	Punktoperationen	356
5.2.1.1	Histogramm	356
5.2.1.2	Lookup-Tabellen	357
5.2.1.3	Kontrastverarbeitung	358
5.2.1.4	Schwellwertoperationen	360
5.2.1.5	Verknüpfungen von Bildern	362
5.2.2	Filterverfahren	363
5.2.2.1	Orts- und Frequenzraum	363
5.2.2.2	Glättungsfiler	366
5.2.2.3	Morphologische Operationen	368
5.2.3	Kantenextraktion	370
5.2.3.1	Ableitungsfiler 1. Ordnung	371
5.2.3.2	Ableitungsfiler 2. Ordnung	373
5.2.3.3	Laplace-of-Gaussian Filter	375
5.2.3.4	Hough-Transformation	376

5.2.3.5	Erweiterte Kanten-Operatoren	377
5.2.3.6	Subpixel-Interpolation	379
5.3	Geometrische Umbildung	383
5.3.1	Grundlagen der Entzerrung	384
5.3.2	Grauwertinterpolation	385
5.3.3	3D-Visualisierung	387
5.3.3.1	Übersicht	387
5.3.3.2	Reflexion und Beleuchtung	389
5.3.3.3	Texturprojektion	393
5.4	Digitale Einzelbildauswertung	396
5.4.1	Näherungswerte	396
5.4.1.1	Möglichkeiten	396
5.4.1.2	Segmentierung punktförmiger Muster	396
5.4.2	Messung punktförmiger Merkmale	399
5.4.2.1	Bildschirmmessung	399
5.4.2.2	Schwerpunktverfahren	400
5.4.2.3	Korrelationsverfahren	401
5.4.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung	403
5.4.2.5	Strukturelle Meßverfahren	408
5.4.2.6	Genauigkeitsbetrachtungen	411
5.4.3	Konturverfolgung	414
5.4.3.1	Profilgesteuerte Konturverfolgung	414
5.4.3.2	Konturverfolgung mit Gradientenanalyse	415
5.5	Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion	416
5.5.1	Übersicht	416
5.5.2	Merkmalgestützte Zuordnungsverfahren	419
5.5.2.1	Interest-Operatoren	419
5.5.2.2	Korrespondenzanalyse	423
5.5.3	Korrespondenzanalyse mit Epipolargeometrie	424
5.5.3.1	Zuordnung im Bildpaar	425
5.5.3.2	Zuordnung im Bildtripel	426
5.5.3.3	Zuordnung in beliebig vielen Bildern	427
5.5.4	Flächenbasierte Mehrbildzuordnung	428
5.5.4.1	Mehrbildzuordnung	428
5.5.4.2	Geometrische Bedingungen	429
5.5.5	Zuordnungsverfahren mit Objektmodellen	433
5.5.5.1	Objektgestützte Mehrbildzuordnung	433
5.5.5.2	Mehrbildzuordnung mit Oberflächenrastern	437
6	Photogrammetrische Meßsysteme	440
6.1	Komparatoren	440
6.1.1	Prinzipieller Aufbau	440
6.1.2	Analoge Bildkomparatoren	441
6.1.3	Digitale Bildkomparatoren	441
6.1.3.1	Komparator mit mechanischer Sensororientierung	442
6.1.3.2	Komparator mit optisch-numerischer Sensororientierung	442
6.2	Stereoskopische Auswertesysteme	444
6.2.1	Analytische Stereoauswertegeräte	444

6.2.1.1	Prinzip des Analytischen Plotters.....	444
6.2.1.2	Orientierungsvorgänge.....	445
6.2.1.3	Objektauswertung	446
6.2.2	Digitale Stereoauswertesysteme.....	447
6.2.3	Stereovisionsysteme.....	449
6.3	Mehrbildmeßsysteme.....	450
6.3.1	Interaktive Auswertesysteme	450
6.3.1.1	Auswertesysteme mit Digitizertablett.....	450
6.3.1.2	Digitale Auswertesysteme.....	451
6.3.2	Mobile industrielle Punktmeßsysteme	453
6.3.2.1	Offline-Photogrammetriesysteme	453
6.3.2.2	Online-Photogrammetriesysteme	455
6.3.3	Stationäre industrielle Online-Meßsysteme	458
6.3.3.1	Mehrbildsysteme zur Produktionskontrolle	458
6.3.3.2	Mehrbildsystem mit Rundtisch	461
6.3.4	Selbstorientierende Meßsysteme.....	463
6.3.4.1	Selbstorientierender Meßtaster.....	463
6.3.4.2	Kamerasystem zur Roboterkalibrierung.....	464
6.4	Systeme zur Oberflächenmessung	465
6.4.1	Aktive Musterprojektion.....	466
6.4.1.1	Statische Streifenprojektion	466
6.4.1.2	Dynamische Streifenprojektion (Phasen-Schiebe-Verfahren).....	467
6.4.1.3	Codiertes Lichtschnittverfahren	468
6.4.1.4	Mehrkamerasysteme mit Streifenprojektion	469
6.4.2	Passive Musterprojektion.....	471
6.4.2.1	Mehrkamerasystem mit Punktprojektion	471
6.4.2.2	Mehrkamerasysteme mit Rasterprojektion.....	472
6.4.2.3	Mehrkamerasysteme mit Zufallsmusterprojektion.....	472
6.5	Abnahme und Überwachung von Meßsystemen.....	474
6.5.1	Begriffsdefinitionen	474
6.5.2	Abgrenzung zu Koordinatenmeßgeräten.....	475
6.5.3	Längenmeßunsicherheit	477
7	Meßanordnungen und Lösungskonzepte	479
7.1	Projektplanung	479
7.1.1	Planungskriterien	479
7.1.2	Genauigkeitsfragen	480
7.1.3	Restriktionen der Aufnahmeconfiguration	481
7.1.4	Rechnergestützte Aufnahmeplanung	483
7.1.4.1	Optimierung.....	484
7.1.4.2	Berechnung von Aufnahmeparametern.....	487
7.1.5	Beispiel für ein Kostenmodell.....	487
7.2	Anordnungen zur Kalibrierung	490
7.2.1	Kalibrierungsmethoden.....	490
7.2.1.1	Laborkalibrierung.....	490
7.2.1.2	Testfeldkalibrierung	491
7.2.1.3	Plumbline-Kalibrierung.....	492
7.2.1.4	On-the-job-Kalibrierung	493

7.2.1.5	Simultankalibrierung.....	494
7.2.1.6	Systemkalibrierung	494
7.2.2	Aufnahmekonfigurationen	495
7.2.2.1	Kalibrierung mit ebenem Punktfeld	495
7.2.2.2	Kalibrierung mit räumlichem Punktfeld	496
7.2.2.3	Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung	498
7.2.2.4	Kalibrierung mit erweiterter Einzelbildorientierung.....	499
7.2.2.5	Probleme bei der Simultankalibrierung.....	500
7.3	Dynamische Photogrammetrie.....	502
7.3.1	Relativbewegungen zwischen Objekt und Aufnahmesystem.....	502
7.3.1.1	Ruhendes Objekt.....	502
7.3.1.1	Bewegtes Objekt	503
7.3.2	Aufnahme von kinematischen Vorgängen.....	505
7.3.2.1	Bildfolgen	505
7.3.2.2	Zeitfolgen, Motografie	507
7.4	Luftbildaufnahmen im Nahbereich	508
8	Anwendungsbeispiele	511
8.1	Architektur und Denkmalpflege.....	511
8.1.1	Photogrammetrische Bauaufnahme	511
8.1.1.1	Dom von Siena.....	512
8.1.1.2	Pulverturm Oldenburg.....	514
8.1.2	3D-Modelle.....	516
8.1.2.1	Visualisierung von Gebäuden.....	516
8.1.2.2	Stadtmodelle	517
8.1.3	Freiformflächen.....	518
8.2	Ingenieurvermessung, Bauwesen.....	520
8.2.1	Deformationsmessungen.....	520
8.2.1.1	Formerfassung großer Stahlkonverter.....	520
8.2.1.2	St. Michaeliskirche Lüneburg	522
8.2.2	Tunnelaufnahmen	524
8.3	Industrielle Anwendungen.....	525
8.3.1	Kraftwerks- und Anlagenbau	525
8.3.2	Luft- und Raumfahrtindustrie	526
8.3.3	Automobilindustrie	529
8.3.4	Schiffbau.....	531
8.4	Forensische Anwendungen	532
8.5	Medizin.....	533
8.5.1	Flächenhafte Objekterfassung.....	533
8.5.2	Online-Meßsysteme	535
9	Literatur	536
	Abkürzungen.....	553
	Bildnachweis.....	556
	Sachwortregister	559