

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	23
1.1	Übersicht.....	23
1.1.1	Inhalt	23
1.1.2	Literatur.....	24
1.2	Prinzipielle Methoden.....	24
1.2.1	Der photogrammetrische Prozess.....	24
1.2.2	Einteilungen der Photogrammetrie.....	26
1.2.3	Abbildungsmodell.....	29
1.2.4	Photogrammetrische Systeme und Prozesse	32
1.2.4.1	Digitales System.....	32
1.2.4.2	Aufnahme- und Auswerteprozess.....	33
1.2.5	Photogrammetrische Produkte	35
1.3	Anwendungsbereiche.....	36
1.4	Geschichtliche Entwicklung	39
2	Mathematische Grundlagen	49
2.1	Koordinatensysteme	49
2.1.1	Pixel- und Sensorkoordinatensystem	49
2.1.2	Bildkoordinatensystem.....	49
2.1.3	Modellkoordinatensystem	51
2.1.4	Objektkoordinatensystem.....	51
2.2	Koordinatentransformationen	53
2.2.1	Ebene Transformationen	53
2.2.1.1	Homogene Koordinaten	53
2.2.1.2	Ähnlichkeitstransformation	53
2.2.1.3	Affintransformation.....	55
2.2.1.4	Polynomtransformation	56
2.2.1.5	Bilineare Transformation	57
2.2.1.6	Projektivtransformation.....	57
2.2.2	Drehungen im 3D-Raum	60
2.2.2.1	Drehmatrix mit trigonometrischen Funktionen	60
2.2.2.2	Drehmatrix mit Quaternionen.....	64
2.2.2.3	Drehmatrix nach Rodrigues.....	66
2.2.2.4	Drehmatrix mit Richtungskosinus	67
2.2.2.5	Normalisierung von Rotationsmatrizen	67
2.2.2.6	Koeffizientenvergleich	68
2.2.3	Räumliche Transformationen.....	69
2.2.3.1	Allgemeine Transformationen.....	69
2.2.3.2	Zentralprojektion.....	71
2.2.3.3	Räumliche Affintransformation.....	72
2.2.4	Räumliche Ähnlichkeitstransformation.....	73
2.2.4.1	Mathematisches Modell	73
2.2.4.2	Näherungswerte.....	75
2.2.4.3	Berechnung mit Eigenwerten und Quaternionen.....	78
2.2.5	Weitere Koordinatentransformationen	80

2.2.5.1	Räumliche Polarkoordinaten	80
2.2.5.2	Zylinderkoordinaten	80
2.3	Geometrische Elemente	81
2.3.1	Analytische Geometrie der Ebene	82
2.3.1.1	Gerade	82
2.3.1.2	Kreis	85
2.3.1.3	Ellipse	86
2.3.1.4	Kurvendarstellung	90
2.3.2	Analytische Geometrie des Raumes	94
2.3.2.1	Gerade	94
2.3.2.2	Ebene	97
2.3.2.3	Rotationskörper	99
2.3.3	Oberflächen	104
2.3.3.1	Digitales Oberflächenmodell	105
2.3.3.2	Digitales Volumenmodell (Voxel)	107
2.3.3.3	Distanzbilder	107
2.3.3.4	B-Spline- und Bézier-Flächen	109
2.4	Ausgleichungsverfahren	109
2.4.1	Problemstellung	109
2.4.1.1	Funktionales Modell	109
2.4.1.2	Stochastisches Modell	111
2.4.2	Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell)	113
2.4.2.1	Ausgleichung direkter Beobachtungen	113
2.4.2.2	Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen	114
2.4.2.3	Levenberg-Marquardt-Algorithmus	116
2.4.2.4	Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten	117
2.4.3	Qualitätsmaße	118
2.4.3.1	Genauigkeitsmaße	119
2.4.3.2	Vertrauensbereiche	121
2.4.3.3	Korrelationen	124
2.4.3.4	Zuverlässigkeit	124
2.4.3.5	Präzision berechneter Koordinaten	128
2.4.4	Erkennung von Ausreißern	130
2.4.4.1	Fehlersuche ohne Ausgleichung	131
2.4.4.2	Data Snooping	131
2.4.4.3	Varianzkomponentenschätzung	132
2.4.4.4	Robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen	132
2.4.4.5	Robuste Schätzung nach der L1-Norm	134
2.4.4.6	RANSAC	134
2.4.5	Hinweise zur Rechentechnik	135
2.4.5.1	Linearisierung	135
2.4.5.2	Normalgleichungssysteme	136
2.4.5.3	Profilspeichertechnik und Optimierung	137
3	Aufnahmetechnik	138
3.1	Physikalische Grundlagen	138
3.1.1	Wellenoptik	138
3.1.1.1	Elektromagnetisches Spektrum	138

3.1.1.2	Strahlungsleistung	139
3.1.1.3	Brechung und Reflexion.....	140
3.1.1.4	Beugung	142
3.1.1.5	Polarisation.....	144
3.1.2	Optische Abbildung	145
3.1.2.1	Konstruktion der optischen Abbildung.....	145
3.1.2.2	Bündelbegrenzung.....	147
3.1.2.3	Scharfabbildung	148
3.1.2.4	Scheimpflug-Bedingung.....	151
3.1.3	Abbildungsfehler.....	152
3.1.3.1	Verzeichnung	152
3.1.3.2	Chromatische Aberration	154
3.1.3.3	Sphärische Aberration	155
3.1.3.4	Astigmatismus und Bildfeldwölbung.....	155
3.1.3.5	Lichtabfall und Vignettierung	156
3.1.4	Asphärische Linsen	157
3.1.5	Auflösungsvermögen	159
3.1.5.1	Auflösungsvermögen von Objektiven	159
3.1.5.2	Geometrisches Auflösungsvermögen.....	160
3.1.5.3	Kontrast- und Modulationsübertragung.....	161
3.1.6	Grundlagen der Abtasttheorie	163
3.1.6.1	Abtasttheorem	163
3.1.6.2	Detektoreigenschaften.....	165
3.2	Aufnahmekonzepte.....	167
3.2.1	Offline- und Online-Systeme	167
3.2.1.1	Offline-Photogrammetrie	167
3.2.1.2	Online-Photogrammetrie.....	168
3.2.2	Aufnahmekonfigurationen	168
3.2.2.1	Einzelbildaufnahme.....	168
3.2.2.2	Stereobildaufnahme.....	169
3.2.2.3	Mehrbildaufnahme	170
3.3	Geometrische Grundlagen	171
3.3.1	Abbildungsmaßstab und Genauigkeit	171
3.3.1.1	Bildmaßstab.....	171
3.3.1.2	Genauigkeitsabschätzung.....	173
3.3.2	Innere Orientierung einer Aufnahmekamera.....	175
3.3.2.1	Verkörperung des Bildkoordinatensystems.....	175
3.3.2.2	Projektionszentrum und Verzeichnung	176
3.3.2.3	Parameter der inneren Orientierung	179
3.3.2.4	Mess- und Teilmesskamera	180
3.3.2.5	Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung)	181
3.3.3	Standardisierte Korrekturfunktionen.....	183
3.3.3.1	Radial-symmetrische Verzeichnung.....	183
3.3.3.2	Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung.....	188
3.3.3.3	Affinität und Scherung	189
3.3.3.4	Gesamtkorrektur.....	189
3.3.4	Alternative Korrekturansätze	191
3.3.4.1	Vereinfachte Ansätze	191

3.3.4.2	Erweiterte Funktionen	191
3.3.4.3	Entfernungsabhängige Verzeichnungskorrektur	193
3.3.4.4	Bildvariante Kalibrierung.....	195
3.3.4.5	Korrektur lokaler Bilddeformationen	196
3.3.4.6	Chromatische Aberration	198
3.3.5	Iterative Korrektur von Abbildungsfehlern.....	199
3.3.6	Umrechnungen der inneren Orientierung.....	201
3.3.7	Fisheye-Projektionen.....	202
3.4	Komponenten zur Bilderfassung	204
3.4.1	Optoelektronische Bildsensoren.....	205
3.4.1.1	CCD-Sensorprinzip	205
3.4.1.2	CCD-Flächensensoren.....	207
3.4.1.3	CMOS-Bildsensoren	209
3.4.1.4	Sensorformate.....	210
3.4.1.5	Mikrolinsen	212
3.4.1.6	Farbsensoren.....	213
3.4.1.7	Gesamtaufbau.....	216
3.4.1.8	Geometrische Eigenschaften	216
3.4.1.9	Radiometrische Eigenschaften	219
3.4.2	Kameratechnik	222
3.4.2.1	Kameratypen	222
3.4.2.2	Verschluss	223
3.4.2.3	Bildstabilisation und Sensorreinigung.....	226
3.4.2.4	Auflagemaß	227
3.4.3	Objektive.....	227
3.4.3.1	Lichtstärke und Blendenzahl.....	227
3.4.3.2	Öffnungswinkel und Formatwinkel.....	228
3.4.3.3	Bildkreis und Sensorformat.....	229
3.4.3.4	Überweitwinkel- und Fisheye-Objektive.....	230
3.4.3.5	Vario-Objektive.....	231
3.4.3.6	Shift-Tilt-Objektive	232
3.4.3.7	Telezentrische Objektive	234
3.4.3.8	Reflektive Optiken	235
3.4.3.9	Stereostrahlteilung.....	235
3.4.4	Filter.....	237
3.5	Aufnahmesysteme	238
3.5.1	Industriekameras	238
3.5.2	Digitalkameras	239
3.5.3	Highspeedkameras	243
3.5.4	Stereo- und Multikamerasysteme.....	246
3.5.5	Scanning-Kameras	247
3.5.5.1	Micro-Scanning.....	247
3.5.5.2	Macro-Scanning	248
3.5.6	Panoramakameras	250
3.5.6.1	Zeilenscanner	250
3.5.6.2	Panorama-Stitching	250
3.5.6.3	Panoramen mit Fisheye-Objektiven	252
3.5.7	Endoskope.....	254

3.5.8	Thermographiekameras.....	255
3.5.9	Multi- und Hyperspektralkameras.....	256
3.5.9.1	Multispektralkameras.....	256
3.5.9.2	Hyperspektralkameras.....	257
3.6	Reflexion und Beleuchtung.....	258
3.6.1	Reflexionsmodelle.....	258
3.6.1.1	Reflexionsarten.....	258
3.6.1.2	Retroreflexion.....	260
3.6.2	Photogrammetrische Signalisierung.....	261
3.6.2.1	Retro-reflektierende Zielmarken.....	261
3.6.2.2	Sonstige Materialien.....	263
3.6.3	Beleuchtungs- und Projektionstechniken.....	265
3.6.3.1	Blitzgeräte.....	265
3.6.3.2	Projektoren.....	266
3.6.3.3	Laser.....	267
3.6.3.4	Gerichtete Beleuchtung.....	268
3.6.3.5	Reflectance Transformation Imaging.....	269
4	Analytische Auswerteverfahren.....	271
4.1	Übersicht.....	271
4.2	Auswertung von Einzelbildern.....	273
4.2.1	Äußere Orientierung.....	273
4.2.1.1	Standardfall.....	273
4.2.1.2	Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie.....	275
4.2.2	Kollinearitätsgleichungen.....	276
4.2.3	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	280
4.2.3.1	Rückwärtsschnitt bei bekannter innerer Orientierung.....	280
4.2.3.2	Rückwärtsschnitt bei unbekannter innerer Orientierung.....	283
4.2.3.3	Näherungswerte für den Rückwärtsschnitt.....	284
4.2.3.4	Rückwärtsschnitt mit minimaler Objektinformation.....	284
4.2.3.5	Gütekriterien.....	287
4.2.4	Lineare Orientierungsverfahren.....	287
4.2.4.1	Direkte Lineare Transformation (DLT).....	287
4.2.4.2	Perspektive Projektionsmatrix.....	290
4.2.5	Inverser räumlicher Rückwärtsschnitt.....	291
4.2.5.1	Position und Orientierung eines Objektes relativ zur Kamera.....	291
4.2.5.2	Relative Position und Orientierung von Objekten.....	292
4.2.6	Ebene projektive Transformation.....	295
4.2.6.1	Mathematisches Modell.....	295
4.2.6.2	Einfluss der inneren Orientierung.....	297
4.2.6.3	Einfluss nicht ebener Objektpunkte.....	298
4.2.6.4	Vermessung ebener Objekte.....	299
4.2.7	Monoplotting.....	300
4.2.7.1	Regelkörper.....	300
4.2.7.2	Digitale Oberflächenmodelle.....	301
4.2.8	Entzerrung.....	302
4.2.8.1	Ebene Entzerrung.....	302
4.2.8.2	Differenzielle Entzerrung (Orthophoto).....	304

4.2.8.3	Bildmosaike.....	308
4.3	Auswertung von Stereobildern	310
4.3.1	Stereoskopisches Verfahren.....	310
4.3.1.1	Stereoskopische Zuordnung	310
4.3.1.2	Verknüpfungspunkte	311
4.3.1.3	Orientierungsverfahren.....	312
4.3.1.4	Stereonormalfall	313
4.3.2	Epipolargeometrie	313
4.3.3	Relative Orientierung	315
4.3.3.1	Koplanaritätsbedingung.....	318
4.3.3.2	Berechnung.....	319
4.3.3.3	Modellkoordinaten	320
4.3.3.4	Berechnung der Epipolarlinien.....	321
4.3.3.5	Berechnung von Normalbildern (Epipolarbilder).....	322
4.3.3.6	Qualitätskriterien	323
4.3.3.7	Besondere Fälle der relativen Orientierung.....	326
4.3.4	Fundamentalmatrix und Essentielle Matrix	328
4.3.5	Absolute Orientierung.....	329
4.3.5.1	Mathematisches Modell	329
4.3.5.2	Datumsfestlegung.....	331
4.3.5.3	Berechnung der äußeren Orientierungen.....	331
4.3.5.4	Berechnung der relativen Orientierung aus äußeren Orientierungen.....	332
4.3.6	Stereoskopische Auswertung	333
4.3.6.1	Prinzip der Stereobildmessung	333
4.3.6.2	Punktbestimmung mit Bildkoordinaten.....	334
4.3.6.3	Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke	340
4.4	Mehrbildauswertung und Bündeltriangulation	343
4.4.1	Allgemeines	343
4.4.1.1	Zielsetzung	343
4.4.1.2	Entwicklung	344
4.4.1.3	Datenfluss.....	346
4.4.2	Mathematisches Modell	347
4.4.2.1	Ausgleichungsansatz	347
4.4.2.2	Normalgleichungen	349
4.4.2.3	Kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen.....	353
4.4.2.4	Ausgleichung zusätzlicher Parameter (Kalibrierung).....	357
4.4.3	Objektkoordinatensystem (Datumsfestlegung)	360
4.4.3.1	Rang- und Datumsdefekt.....	360
4.4.3.2	Passpunkte	361
4.4.3.3	Direkte Georeferenzierung	364
4.4.3.4	Freie Netzausgleichung	364
4.4.4	Beschaffung von Näherungswerten	368
4.4.4.1	Strategien zur automatischen Berechnung von Näherungswerten....	370
4.4.4.2	Näherungswertbestimmung mit automatischer Punktmessung	374
4.4.4.3	Praktische Aspekte bei der Näherungswertbeschaffung.....	376
4.4.5	Qualitätsmaße und Ergebnisanalyse.....	377
4.4.5.1	Ausgabeprotokoll	377

4.4.5.2	Sigma 0 und Rückprojektionsfehler	378
4.4.5.3	Genauigkeit der Bildkoordinaten	378
4.4.5.4	Genauigkeit der Objektkoordinaten.....	379
4.4.5.5	Genauigkeit der Simultankalibrierung.....	380
4.4.6	Strategien zur Bündelausgleichung	382
4.4.6.1	Simulation	382
4.4.6.2	Divergenz	383
4.4.6.3	Elimination grober Datenfehler	384
4.4.7	Mehrbildmessung.....	385
4.4.7.1	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt	385
4.4.7.2	Direkte Bestimmung geometrischer Elemente	387
4.5	Panoramaphotogrammetrie.....	388
4.5.1	Abbildungsmodell für zylindrische Panoramabilder.....	388
4.5.2	Orientierung von Panoramabildern	391
4.5.2.1	Näherungswerte.....	391
4.5.2.2	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	392
4.5.2.3	Bündelausgleichung	392
4.5.3	Epipolarometrie	393
4.5.4	Räumlicher Vorwärtsschnitt.....	395
4.5.5	Entzerrung von Panoramabildern.....	396
4.5.5.1	Orthogonale Bildentzerrung	396
4.5.5.2	Tangentialbilder	396
4.6	Mehrmedienphotogrammetrie	397
4.6.1	Lichtbrechung an Trennflächen	397
4.6.1.1	Trennflächen.....	397
4.6.1.2	Parallele ebene Trennflächen	398
4.6.1.3	Sphärische Trennflächen	401
4.6.1.4	Strahlverfolgung durch beliebige lichtbrechende Flächen	402
4.6.2	Erweitertes Modell der Bündeltriangulation	404
4.6.2.1	Objektinvariante Trennflächen	404
4.6.2.2	Bündelinvariante Trennflächen	405
4.6.3	Spezielle Aspekte der Unterwasserphotogrammetrie.....	406
5	Digitale Bildanalyse.....	408
5.1	Grundlagen	408
5.1.1	Bildanalyseprozess.....	408
5.1.2	Pixelkoordinatensystem	409
5.1.3	Bilddatenverwaltung	411
5.1.3.1	Bildpyramiden.....	411
5.1.3.2	Datenformate.....	412
5.1.3.3	Bildkompression.....	414
5.1.3.4	Videoformate.....	416
5.1.3.5	Integralbilder	417
5.2	Bildvorverarbeitung.....	418
5.2.1	Punktoperationen	418
5.2.1.1	Histogramm.....	418
5.2.1.2	Lookup-Tabellen	420
5.2.1.3	Kontrastverarbeitung.....	420

5.2.1.4	Schwellwertoperationen	423
5.2.1.5	Verknüpfungen von Bildern	425
5.2.2	Farbverarbeitung	425
5.2.2.1	Farbräume.....	425
5.2.2.2	Farbtransformationen	428
5.2.2.3	Farbkalibrierung	431
5.2.2.4	Farbkombinationen.....	432
5.2.3	Filterverfahren.....	434
5.2.3.1	Orts- und Frequenzraum.....	434
5.2.3.2	Glättungsfilter.....	437
5.2.3.3	Morphologische Operationen	439
5.2.3.4	Wallis-Filter	441
5.2.4	Kantenextraktion	443
5.2.4.1	Ableitungsfilter 1. Ordnung.....	443
5.2.4.2	Ableitungsfilter 2. Ordnung.....	445
5.2.4.3	Laplace-of-Gaussian-Filter	447
5.2.4.4	Schärfefilter.....	448
5.2.4.5	Hough-Transformation	449
5.2.4.6	Erweiterte Kanten-Operatoren.....	450
5.2.4.7	Subpixel-Interpolation.....	452
5.3	Geometrische Umbildung	455
5.3.1	Grundlagen der Umbildung.....	456
5.3.2	Grauwertinterpolation	457
5.3.3	Texturierte Darstellungen.....	460
5.3.3.1	Texturprojektion.....	460
5.3.3.2	Synthetische Bilder.....	462
5.4	Digitale Einzelbildauswertung.....	462
5.4.1	Näherungswerte für Zielmarken.....	462
5.4.1.1	Möglichkeiten.....	462
5.4.1.2	Segmentierung punktförmiger Muster.....	463
5.4.2	Messung punktförmiger Merkmale	465
5.4.2.1	Bildschirmmessung	465
5.4.2.2	Schwerpunktverfahren.....	465
5.4.2.3	Korrelationsverfahren.....	467
5.4.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung.....	469
5.4.2.5	Strukturelle Messverfahren	474
5.4.2.6	Genauigkeitsbetrachtungen	477
5.4.3	Merkmalsextraktion	478
5.4.3.1	Interest-Operatoren.....	478
5.4.3.2	Förstner-Operator	480
5.4.3.3	SUSAN-Operator	482
5.4.3.4	FAST-Operator.....	483
5.4.3.5	SIFT-Operator	484
5.4.3.6	SURF-Operator	486
5.4.3.7	ORB-Operator	487
5.5	Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion	488
5.5.1	Übersicht	488
5.5.2	Strategien zur Zuordnung nicht orientierter Bilder	492

5.5.2.1	Codierte Zielmarken.....	492
5.5.2.2	Structure-from-Motion	492
5.5.2.3	Maskierung.....	494
5.5.3	Ähnlichkeitsmaße.....	495
5.5.3.1	Summen von Differenzen.....	495
5.5.3.2	Census und Hamming-Distanz	496
5.5.3.3	Hashing	496
5.5.3.4	Normierte Kreuzkorrelation	497
5.5.3.5	Least-squares matching	498
5.5.3.6	Euklidische Distanz von Merkmalsvektoren.....	498
5.5.4	Zuordnungsverfahren im Stereobildpaar.....	499
5.5.4.1	Zuordnung mit Epipolarbedingungen.....	499
5.5.4.2	Semi-globales Matching.....	501
5.5.5	Mehrbildzuordnung.....	504
5.5.5.1	Multi-view Stereo.....	505
5.5.5.2	Zuordnung im orientierten Bildtripel	505
5.5.5.3	Zuordnung in beliebig vielen Bildern.....	507
5.5.5.4	Mehrbildzuordnung nach kleinsten Quadraten.....	508
5.5.6	Objektraumbasierte Zuordnungsverfahren.....	512
5.5.6.1	Objektgestützte Mehrbildzuordnung	513
5.5.6.2	Mehrbildzuordnung mit Oberflächenrastern	516
5.5.6.3	Objektbasiertes semi-globales Mehrbildmatching (OSGM)	519
5.5.6.4	Weitere objektbasierte Zuordnungsverfahren.....	521
5.5.7	Zuordnung in Bildsequenzen	524
5.5.7.1	2D-Objektverfolgung in Einzelbildsequenzen	525
5.5.7.2	3D-Objektrekonstruktion aus Einzelbildsequenzen	529
5.5.7.3	Objektverfolgung in Mehrkamera-Bildsequenzen	529
5.5.7.4	Prädiktion von Folgepunkten (Kalman-Filter)	530
5.5.7.5	Simultaneous Localization and Mapping (SLAM).....	532
6	Messaufgaben und Messsysteme.....	535
6.1	Übersicht.....	535
6.2	Zielmarken.....	535
6.2.1	Zielmarkentypen	535
6.2.1.1	Kreisförmige Zielmarken	535
6.2.1.2	Kugelförmige Zielmarken	538
6.2.1.3	Linienhafte Zielmarken	540
6.2.1.4	Marken mit codierter Punktnummer.....	540
6.2.2	Zielmarkensysteme	542
6.2.2.1	Zentrierbare Zielmarken.....	542
6.2.2.2	Signalisierte Handtaster.....	542
6.2.2.3	Messadapter.....	543
6.2.2.4	6DOF-Zielmarken	545
6.3	Realisierung von Referenzsystemen	546
6.3.1	Bezugssysteme	546
6.3.1.1	Maßstabsdefinition	546
6.3.1.2	Definition von Referenzkoordinatensystemen	547
6.3.2	Messsysteme	548

6.3.2.1	Videotachymeter und Multistationen	548
6.3.2.2	Lasertracker	549
6.4	Interaktive Mess- und Auswertesysteme	551
6.4.1	Programme mit CAD-Funktionen	551
6.4.2	Structure-from-Motion-Programme	553
6.4.3	Industrielle Offline-Auswertesysteme	554
6.4.4	Programme für Ausbildungszwecke	555
6.5	Taktil antastende Systeme	557
6.5.1	Messprinzip	557
6.5.2	Einkamerasysteme	558
6.5.2.1	Einkamerasysteme mit Handtaster	558
6.5.2.2	Messtaster mit integrierter Kamera	559
6.5.3	Zwei- und Mehrkamerasysteme	560
6.6	Industrielle Systeme zur Messung punktförmiger Merkmale	562
6.6.1	Mobile industrielle Punktmesssysteme	562
6.6.1.1	Offline-Photogrammetriesysteme	562
6.6.1.2	Online-Photogrammetriesysteme	564
6.6.1.3	Stereokamerasysteme	567
6.6.2	Stationäre industrielle Online-Messsysteme	568
6.6.2.1	System zur Vermessung von Rohrleitungen	569
6.6.2.2	Positioniersystem für Stahlplatten	570
6.6.2.3	Mehrkamerasystem mit Punktprojektion	570
6.7	Systeme zur Oberflächenmessung	571
6.7.1	Überblick	571
6.7.1.1	Aktive und passive Systeme	571
6.7.1.2	Oberflächentexturen	573
6.7.2	Lasertriangulation	574
6.7.3	Streifenprojektionssysteme	575
6.7.3.1	Statische Streifenprojektion	575
6.7.3.2	Dynamische Streifenprojektion (Phasen-Schiebe-Verfahren)	576
6.7.3.3	Codiertes Lichtschnittverfahren	577
6.7.3.4	Aperiodische Streifenprojektion	578
6.7.3.5	Einkamerasysteme mit Streifenprojektion	579
6.7.3.6	Mehrkamerasysteme mit Streifenprojektion	581
6.7.4	Systeme mit punkt- und gitterförmigen Mustern	583
6.7.4.1	Mehrkamerasysteme mit Rasterprojektion	583
6.7.4.2	Mehrkamerasystem mit Gitterprojektion	584
6.7.4.3	Mehrkamerasysteme mit Mustergravur	584
6.7.5	Systeme mit stochastischen Mustern	585
6.7.5.1	Zweikamerasysteme mit Zufallsmusterprojektion	585
6.7.5.2	Oberflächenerfassung mit Texturfolien	586
6.7.5.3	Messung dynamischer Oberflächenänderungen	587
6.7.6	3D-Kameras (Range Cameras)	589
6.7.6.1	Kinect	590
6.7.6.2	Neue Entwicklungen von 3D-Kameras	591
6.7.6.3	Lichtfeldkameras	592
6.8	Laserscanning-Systeme	593
6.8.1	3D-Laserscanner	593

6.8.2	2D- und 1D-Laserscanning	599
6.8.3	Panoramasysteme mit Laserdistanzmessung.....	600
6.9	Registrierung und Orientierung von Bildern und Scans	602
6.9.1	Mehrbildphotogrammetrie	602
6.9.2	Orientierungsmessung mit Objektpunkten.....	604
6.9.2.1	Orientierung mit unbekanntem Referenzpunkten.....	604
6.9.2.2	Orientierung mit bekannten Referenzpunkten.....	604
6.9.2.3	Orientierung mit Oberflächenmerkmalen.....	605
6.9.3	Orientierungsmessung mit externem Kamerasystem	606
6.9.4	Orientierungsmessung mit mechanischen Systemen.....	607
6.9.5	Orientierungsmessung mit externen Systemen und Passpunkten.....	608
6.9.6	Verknüpfung von Punktwolken (Registrierung)	609
6.9.6.1	Registrierung mit signalisierten 3D-Punkten.....	609
6.9.6.2	Iterative Closest Point (ICP).....	610
6.9.7	ICP-basierte Scanner	611
6.10	Systeme zur Messung dynamischer Vorgänge	612
6.10.1	Relativbewegungen zwischen Objekt und Aufnahmesystem.....	613
6.10.1.1	Ruhendes Objekt	613
6.10.1.2	Bewegtes Objekt	614
6.10.2	Aufnahme von kinematischen Vorgängen	615
6.10.2.1	Kamerasystem zur Roboterkalibrierung	615
6.10.2.2	Highspeed-6DOF-System	617
6.10.2.3	Aufnahme mit Highspeedkameras.....	617
6.10.2.4	Particle Image Velocimetry	618
6.10.3	Bewegungsanalyse	619
6.11	Messsysteme auf mobilen Plattformen	620
6.11.1	Mobile-Mapping-Systeme.....	620
6.11.1.1	Mobile Mapping im Außenbereich	620
6.11.1.2	Mobile Mapping im Innenbereich	623
6.11.2	Luftbilddaufnahmen im Nahbereich	623
6.11.2.1	Flugsysteme.....	623
6.11.2.2	Sensortechnik	625
6.11.2.3	Flugplanung.....	627
6.11.2.4	Photogrammetrische Auswertung	630
6.12	Visualisierungssysteme.....	632
6.12.1	Digitale Stereoauswertesysteme.....	632
6.12.2	AR/VR-Systeme.....	633
6.12.2.1	VR-Systeme	634
6.12.2.2	AR/MR-Systeme	635
6.12.3	Industrielle 3D-Projektionssysteme	635
7	Projektplanung und Optimierung	637
7.1	Projektplanung.....	637
7.1.1	Planungskriterien	637
7.1.2	Genauigkeitsfragen	638
7.1.3	Restriktionen der Aufnahmekonfiguration.....	639
7.1.4	Genauigkeitsabschätzung durch Simulation	642
7.1.4.1	Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung.....	642

7.1.4.2	Monte-Carlo-Simulation	644
7.1.4.3	Unscented Transformation	646
7.1.4.4	Bootstrap-Simulation.....	647
7.1.5	Design der Aufnahmeanordnung	648
7.1.5.1	Netzdesign.....	648
7.1.5.2	Maßstab	651
7.2	Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalyse	653
7.2.1	Statistische Kenngrößen.....	653
7.2.1.1	Innere Genauigkeit	653
7.2.1.2	Äußere Genauigkeit.....	654
7.2.1.3	Relative Genauigkeit	655
7.2.2	Messtechnische Kenngrößen.....	656
7.2.2.1	Messunsicherheit	656
7.2.2.2	Messabweichung	657
7.2.2.3	Referenzwert, richtiger Wert und wahrer Wert	657
7.2.2.4	Genauigkeit	657
7.2.2.5	Präzision	658
7.2.2.6	Toleranz.....	658
7.2.2.7	Auflösung.....	658
7.2.3	Prüfung optischer 3D-Messsysteme	659
7.2.3.1	Begriffsdefinitionen.....	659
7.2.3.2	Abgrenzung zu mechanischen Koordinatenmessgeräten	661
7.2.3.3	Prüfkörper.....	662
7.2.3.4	Prüfung punktförmig antastender Systeme.....	664
7.2.3.5	Prüfung flächenhaft antastender Systeme.....	668
7.3	Strategien zur Kamerakalibrierung.....	671
7.3.1	Kalibrierverfahren	671
7.3.1.1	Testfeldkalibrierung	673
7.3.1.2	Plumblinien-Kalibrierung.....	675
7.3.1.3	Simultankalibrierung.....	676
7.3.1.4	Systemkalibrierung.....	677
7.3.2	Aufnahmekonfigurationen	677
7.3.2.1	Kalibrierung mit ebenem Punktfeld	677
7.3.2.2	Kalibrierung mit räumlichem Punktfeld.....	678
7.3.2.3	Kalibrierung mit bewegtem Maßstab	679
7.3.3	Kalibrierung spezieller Aufnahmesysteme	680
7.3.3.1	Kalibrierung von Stereo- und Mehrkameranensystemen	680
7.3.3.2	Kalibrierung von Fisheye-Kameras.....	681
7.3.3.3	Kalibrierung von Unterwasser-Kameras	682
7.3.4	Qualitätskriterien für die Kamerakalibrierung	683
7.3.5	Probleme bei der Simultankalibrierung.....	684
8	Anwendungsbeispiele	688
8.1	Architektur, Archäologie und Denkmalpflege.....	688
8.1.1	Photogrammetrische Bauaufnahme.....	688
8.1.1.1	Zeichnungen	690
8.1.1.2	3D-Gebäudemodelle.....	690
8.1.1.3	Bildpläne und Orthophotos.....	691

8.1.2	Beispiele photogrammetrischer Objektrekonstruktionen	692
8.1.2.1	Torhaus Seedorf	692
8.1.2.2	Mailänder Dom	693
8.1.2.3	Kloster Lurdji	695
8.2	Objekte des Kulturerbes	696
8.2.1	Kunstgegenstände und Museumsobjekte	696
8.2.1.1	Statuen und Skulpturen	697
8.2.1.2	Totenmaske des Tutanchamun	698
8.2.1.3	Sarkophag der Eheleute	698
8.2.1.4	Goethe-Elefantenschädel	699
8.2.2	Archäologische Ausgrabungen	700
8.2.2.1	3D-Dokumentation von Pompeji	700
8.2.2.2	Hadrianstempel	701
8.2.2.3	Grabkammer Otzing	702
8.2.2.4	Vermessung der Bremer Kogge	704
8.2.2.5	Großsteingrab Kleinenkneten	705
8.3	3D-Stadt- und Landschaftsmodelle	707
8.3.1	Stadtmodelle	707
8.3.2	Ableitung von Geländemodellen aus multispektralen Bilddaten	708
8.3.3	Landschaftsmodell aus Laserscanning und Photogrammetrie	710
8.4	Ingenieurvermessung und Bauwesen	711
8.4.1	3D-Erfassung komplexer Objekte	711
8.4.1.1	As-Built-Dokumentation	711
8.4.1.2	Building Information Modeling	712
8.4.1.3	Treppenvermessung	714
8.4.2	Deformationsmessungen	714
8.4.2.1	Deformationsmessungen an Betonwannen	715
8.4.2.2	Erfassung von Rotorblättern an Windenergieanlagen	716
8.4.3	Materialprüfung	718
8.4.3.1	Oberflächenmessung an Mauerfugen	718
8.4.3.2	Bauphysikalische Belastungsversuche	719
8.4.4	Dach- und Fassadenvermessung	720
8.5	Industrielle Messtechnik	721
8.5.1	Kraftwerks- und Anlagenbau	722
8.5.1.1	Windkraftanlagen	722
8.5.1.2	Teilchenbeschleuniger	724
8.5.2	Luft- und Raumfahrtindustrie	725
8.5.2.1	Vorrichtungsbau	725
8.5.2.2	Fertigungskontrolle	726
8.5.2.3	Antennenvermessung	727
8.5.3	Automobil- und Fahrzeugbau	728
8.5.3.1	Rapid Prototyping und Reverse Engineering	729
8.5.3.2	Fahrzeugsicherheitsversuch	730
8.5.3.3	Fahrzeugdeformationen	732
8.5.4	Schiffbau	732
8.6	Unterwasserphotogrammetrie	734
8.6.1	Vermessung von Wasseroberflächen	734
8.6.2	Unterwasser-Schweißnahtmessung	735

8.6.3	Unterwasserphotogrammetrie am Wrack der Costa Concordia	737
8.7	Medizin.....	738
8.7.1	Flächenhafte Objekterfassung.....	739
8.7.2	Navigationssysteme.....	740
8.8	Sonstige Anwendungsbereiche.....	742
8.8.1	Forensische Anwendungen	742
8.8.1.1	Unfallvermessung.....	742
8.8.1.2	Tatrekonstruktion	743
8.8.1.3	Anthropologische Ansätze.....	745
8.8.2	Naturwissenschaftliche Anwendungen	745
8.8.2.1	Beobachtung von Gletscherbewegungen.....	746
8.8.2.2	Erdwissenschaften	747
8.8.2.3	Entomologie (Insektenkunde)	749
8.8.2.4	Vermessung einer Seifenblase.....	750
9	Literaturverzeichnis.....	751
9.0	Lehrbücher und Monographien	751
9.0.1	Photogrammetrie.....	751
9.0.2	Optik, Kamera- und Aufnahmetechnik	751
9.0.3	Digitale Bildverarbeitung, Computer Vision und Mustererkennung	752
9.0.4	Mathematik und 3D-Computergrafik.....	752
9.0.5	Ausgleichsrechnung und Statistik	753
9.0.6	Industriemesstechnik, Optische 3D-Messtechnik, Qualitätskontrolle...	753
9.0.7	Anwendungen	754
9.1	Kap. 1 Einführung	754
9.2	Kap. 2 Mathematische Grundlagen	757
9.2.1	Transformationen und Geometrie	757
9.2.2	Ausgleichsrechnung.....	757
9.3	Kap. 3 Aufnahmetechnik	758
9.3.1	Optik und Abtastung.....	758
9.3.2	Modellierung und Kalibrierung.....	758
9.3.3	Sensoren und Kameras.....	761
9.3.4	Signalisierung und Beleuchtung.....	762
9.4	Kap. 4 Analytische Auswerteverfahren	763
9.4.1	Analytische Photogrammetrie	763
9.4.2	Bündelausgleichung	764
9.4.3	Mehrmedienphotogrammetrie.....	766
9.4.4	Panoramaphotogrammetrie	767
9.5	Kap. 5 Digitale Bildanalyse.....	767
9.5.1	Grundlagen und Bildverarbeitung.....	767
9.5.2	Mustererkennung und Bildzuordnung.....	768
9.6	Kap. 6 Messaufgaben und Messsysteme	772
9.6.1	Zielmarken- und Referenzsysteme.....	772
9.6.2	Interaktive Mess- und Auswertesysteme.....	773
9.6.3	Messung von Punkten und Konturen	774
9.6.4	Laserbasierte und geodätische Messsysteme.....	774
9.6.5	Messung von Oberflächen.....	775
9.6.6	3D-Kameras	776

9.6.7	Registrierung und Orientierung.....	776
9.6.8	Dynamische und mobile Systeme	777
9.7	Kap. 7 Projektplanung und Optimierung.....	778
9.7.1	Projektplanung und Simulation.....	778
9.7.2	Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalyse	779
9.7.3	Kamerakalibrierung.....	780
9.8	Kap. 8 Anwendungsbeispiele	781
9.8.1	Architektur, Archäologie, Stadtmodelle.....	781
9.8.2	Ingenieur- und Industrieranwendungen.....	783
9.8.3	Unterwasserphotogrammetrie	785
9.8.4	Medizin, Forensik, Naturwissenschaften	786
9.9	Sonstige Informationsquellen	787
9.9.1	Normen und Richtlinien.....	787
9.9.2	Arbeitsgruppen und Konferenzen	788
Abkürzungsverzeichnis		790
Bildnachweis.....		794
Stichwortverzeichnis.....		798