

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.....	31
1.2.4.1	Digitales System	31
1.2.4.2	Aufnahme- und Auswerteprozess.....	32
1.2.5	Photogrammetrische Produkte.....	34
1.3	Anwendungsbereiche	35
1.4	Geschichtliche Entwicklung	39
2	Mathematische Grundlagen	48
2.1	Koordinatensysteme	48
2.1.1	Pixel- und Sensorkoordinatensystem.....	48
2.1.2	Bildkoordinatensystem.....	48
2.1.3	Modellkoordinatensystem	50
2.1.4	Objektkoordinatensystem.....	50
2.2	Koordinatentransformationen.....	52
2.2.1	Ebene Transformationen	52
2.2.1.1	Homogene Koordinaten.....	52
2.2.1.2	Ähnlichkeitstransformation	52
2.2.1.3	Affintransformation	54
2.2.1.4	Polynomtransformation	55
2.2.1.5	Bilineare Transformation.....	56
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.....	63
2.2.2.3	Drehmatrix nach Rodrigues.....	66
2.2.2.4	Drehmatrix mit Richtungskosinus	66
2.2.2.5	Normalisierung von Rotationsmatrizen	67
2.2.2.6	Koeffizientenvergleich	68
2.2.3	Räumliche Transformationen	68
2.2.3.1	Allgemeine Transformationen.....	68
2.2.3.2	Zentralprojektion	70
2.2.4	Räumliche Ähnlichkeitstransformation	71
2.2.4.1	Mathematisches Modell.....	71
2.2.4.2	Näherungswerte	74
2.2.4.3	Berechnung mit Eigenwerten und Quaternionen.....	76
2.3	Geometrische Elemente.....	78
2.3.1	Analytische Geometrie der Ebene	79

2.3.1.1	Gerade	79
2.3.1.2	Kreis	82
2.3.1.3	Ellipse	83
2.3.1.4	Kurvendarstellung	87
2.3.2	Analytische Geometrie des Raumes	91
2.3.2.1	Gerade	91
2.3.2.2	Ebene	94
2.3.2.3	Rotationskörper	96
2.3.3	Oberflächen	101
2.3.3.1	Digitales Oberflächenmodell	102
2.3.3.2	Digitales Volumenmodell (Voxel)	105
2.3.3.3	Distanzbilder	105
2.3.3.4	B-Spline- und Bézier-Flächen	106
2.4	Ausgleichungsverfahren	107
2.4.1	Problemstellung	107
2.4.1.1	Funktionales Modell	107
2.4.1.2	Stochastisches Modell	109
2.4.2	Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell)	110
2.4.2.1	Ausgleichung direkter Beobachtungen	111
2.4.2.2	Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen	112
2.4.2.3	Levenberg-Marquardt-Algorithmus	113
2.4.2.4	Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten	114
2.4.3	Qualitätsmaße	116
2.4.3.1	Genauigkeitsmaße	116
2.4.3.2	Vertrauensbereiche	118
2.4.3.3	Korrelationen	121
2.4.3.4	Zuverlässigkeit	121
2.4.3.5	Präzision berechneter Koordinaten	125
2.4.4	Erkennung von Ausreißern	127
2.4.4.1	Fehlersuche ohne Ausgleichung	128
2.4.4.2	Data Snooping	128
2.4.4.3	Varianzkomponentenschätzung	129
2.4.4.4	Robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen	129
2.4.4.5	Robuste Schätzung nach der L1-Norm	131
2.4.4.6	RANSAC	131
2.4.5	Hinweise zur Rechentechnik	132
2.4.5.1	Linearisierung	132
2.4.5.2	Normalgleichungssysteme	133
2.4.5.3	Profilspeichertechnik und Optimierung	134
3	Aufnahmetechnik	135
3.1	Physikalische Grundlagen	135
3.1.1	Wellenoptik	135
3.1.1.1	Elektromagnetisches Spektrum	135
3.1.1.2	Strahlungsleistung	136
3.1.1.3	Brechung und Reflexion	137
3.1.1.4	Beugung	139
3.1.1.5	Polarisation	141

3.1.2	Optische Abbildung.....	142
3.1.2.1	Konstruktion der optischen Abbildung.....	142
3.1.2.2	Bündelbegrenzung.....	143
3.1.2.3	Scharabbildung.....	144
3.1.2.4	Scheimpflug-Bedingung.....	147
3.1.3	Abbildungsfehler.....	148
3.1.3.1	Verzeichnung.....	149
3.1.3.2	Chromatische Aberration.....	150
3.1.3.3	Sphärische Aberration.....	151
3.1.3.4	Astigmatismus und Bildfeldwölbung.....	152
3.1.3.5	Lichtabfall und Vignettierung.....	153
3.1.4	Auflösungsvermögen.....	154
3.1.4.1	Auflösungsvermögen von Objektiven.....	154
3.1.4.2	Geometrisches Auflösungsvermögen.....	155
3.1.4.3	Kontrast- und Modulationsübertragung.....	157
3.1.5	Grundlagen der Abtasttheorie.....	159
3.1.5.1	Abtasttheorem.....	159
3.1.5.2	Detektoreigenschaften.....	161
3.2	Aufnahmekonzepte.....	162
3.2.1	Offline- und Online-Systeme.....	162
3.2.1.1	Offline-Photogrammetrie.....	163
3.2.1.2	Online-Photogrammetrie.....	163
3.2.2	Aufnahmekonfigurationen.....	164
3.2.2.1	Einzelbildaufnahme.....	164
3.2.2.2	Stereobildaufnahme.....	164
3.2.2.3	Mehrbildaufnahme.....	165
3.3	Geometrische Grundlagen.....	166
3.3.1	Abbildungsmaßstab und Genauigkeit.....	166
3.3.1.1	Bildmaßstab.....	166
3.3.1.2	Genauigkeitsabschätzung.....	168
3.3.2	Innere Orientierung einer Aufnahmekamera.....	170
3.3.2.1	Verkörperung des Bildkoordinatensystems.....	171
3.3.2.2	Projektionszentrum und Verzeichnung.....	172
3.3.2.3	Parameter der inneren Orientierung.....	175
3.3.2.4	Mess- und Teilmesskamera.....	176
3.3.2.5	Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung).....	178
3.3.3	Standardisierte Korrekturfunktionen.....	179
3.3.3.1	Radial-symmetrische Verzeichnung.....	179
3.3.3.2	Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung.....	184
3.3.3.3	Affinität und Scherung.....	185
3.3.3.4	Gesamtkorrektur.....	186
3.3.4	Alternative Korrekturansätze.....	187
3.3.4.1	Vereinfachte Ansätze.....	187
3.3.4.2	Erweiterte Funktionen.....	187
3.3.4.3	Entfernungsabhängige Verzeichnungskorrektur.....	189
3.3.4.4	Bildvariante Kalibrierung.....	191
3.3.4.5	Korrektur lokaler Bilddeformationen.....	192
3.3.4.6	Chromatische Aberration.....	194

3.3.5	Iterative Korrektur von Abbildungsfehlern	195
3.3.6	Umrechnungen der inneren Orientierung	197
3.3.7	Fisheye-Projektionen.....	198
3.4	Komponenten zur Bilderfassung	199
3.4.1	Optoelektronische Bildsensoren.....	201
3.4.1.1	CCD-Sensorprinzip	201
3.4.1.2	CCD-Flächensensoren.....	203
3.4.1.3	CMOS-Bildsensoren.....	205
3.4.1.4	Sensorformate.....	206
3.4.1.5	Mikrolinsen	208
3.4.1.6	Farbsensoren.....	208
3.4.1.7	Gesamtaufbau	211
3.4.1.8	Geometrische Eigenschaften	212
3.4.1.9	Radiometrische Eigenschaften	215
3.4.2	Kameratechnik	217
3.4.2.1	Kameratypen	217
3.4.2.2	Verschluss	219
3.4.2.3	Bildstabilisation.....	222
3.4.2.4	Auflagemaß	222
3.4.3	Objektive	223
3.4.3.1	Lichtstärke und Blendenzahl	223
3.4.3.2	Öffnungswinkel und Formatwinkel.....	224
3.4.3.3	Bildkreis und Sensorformat.....	225
3.4.3.4	Überweitwinkel- und Fisheye-Objektive.....	225
3.4.3.5	Vario-Objektive.....	226
3.4.3.6	Shift-Tilt-Objektive	228
3.4.3.7	Telezentrische Objektive	230
3.4.3.8	Reflektive Optiken.....	230
3.4.3.9	Stereostrahlteilung.....	231
3.4.4	Filter	232
3.5	Aufnahmesysteme	234
3.5.1	Industriekameras	234
3.5.2	Digitalkameras	235
3.5.3	Hochfrequenzkameras	238
3.5.4	Stereo- und Multikamerasysteme	241
3.5.5	Scanning-Kameras.....	243
3.5.5.1	Micro-Scanning	243
3.5.5.2	Macro-Scanning	243
3.5.6	Panoramakameras.....	245
3.5.6.1	Zeilenscanner.....	245
3.5.6.2	Panorama-Stitching	246
3.5.6.3	Panoramen mit Fisheye-Objektiven	247
3.5.7	Thermographiekameras	249
3.5.8	3D-Kameras	250
3.5.8.1	Time-of-Flight-Kameras.....	250
3.5.8.2	Lichtfeld-Kameras.....	250
3.6	Signalisierung und Beleuchtung.....	252
3.6.1	Objektsignalisierung.....	252

3.6.1.1	Signalisierungsmaterial	252
3.6.1.2	Kreisförmige Zielmarken	255
3.6.1.3	Kugelförmige Zielmarken	258
3.6.1.4	Linienhafte Zielmarken	260
3.6.1.5	Marken mit codierter Punktnummer.....	260
3.6.1.6	Exzentrische Signalisierungsmittel.....	261
3.6.2	Beleuchtungs- und Projektionstechniken	264
3.6.2.1	Blitzgeräte	264
3.6.2.2	Projektoren	265
3.6.2.3	Laser	266
3.6.2.4	Gerichtete Beleuchtung	268
4	Analytische Auswerteverfahren	269
4.1	Übersicht	269
4.2	Auswertung von Einzelbildern	271
4.2.1	Äußere Orientierung	271
4.2.1.1	Standardfall	271
4.2.1.2	Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie	273
4.2.2	Kollinearitätsgleichungen.....	274
4.2.3	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	277
4.2.3.1	Rückwärtsschnitt bei bekannter innerer Orientierung	278
4.2.3.2	Rückwärtsschnitt bei unbekannter innerer Orientierung	280
4.2.3.3	Näherungswerte für den Rückwärtsschnitt	281
4.2.3.4	Rückwärtsschnitt mit minimaler Objektinformation	281
4.2.3.5	Gütekriterien.....	284
4.2.4	Lineare Orientierungsverfahren.....	285
4.2.4.1	Direkte Lineare Transformation (DLT).....	285
4.2.4.2	Perspektive Projektionsmatrix	287
4.2.5	Inverser räumlicher Rückwärtsschnitt	289
4.2.5.1	Position und Orientierung eines Objektes relativ zur Kamera.....	289
4.2.5.2	Relative Position und Orientierung von Objekten	289
4.2.6	Ebene projektive Transformation	292
4.2.6.1	Mathematisches Modell.....	292
4.2.6.2	Einfluss der inneren Orientierung.....	295
4.2.6.3	Einfluss nicht ebener Objektpunkte.....	295
4.2.6.4	Vermessung ebener Objekte	296
4.2.7	Monoplotting	297
4.2.7.1	Regelkörper	297
4.2.7.2	Digitale Oberflächenmodelle.....	298
4.2.8	Entzerrung	300
4.2.8.1	Ebene Entzerrung	300
4.2.8.2	Differenzielle Entzerrung (Orthophoto)	302
4.2.8.3	Bildmosaike.....	306
4.3	Auswertung von Stereobildern	307
4.3.1	Stereoskopisches Verfahren	307
4.3.1.1	Stereoskopische Zuordnung	307
4.3.1.2	Verknüpfungspunkte	308
4.3.1.3	Orientierungsverfahren.....	309

4.3.1.4	Stereonormalfall	310
4.3.2	Epipolargeometrie	311
4.3.3	Relative Orientierung	312
4.3.3.1	Koplanaritätsbedingung	315
4.3.3.2	Berechnung	316
4.3.3.3	Modellkoordinaten	318
4.3.3.4	Berechnung der Epipolarlinien	319
4.3.3.5	Berechnung von Normalbildern	320
4.3.3.6	Qualitätskriterien	321
4.3.3.7	Besondere Fälle der relativen Orientierung	324
4.3.4	Fundamentalmatrix und Essentielle Matrix	326
4.3.5	Absolute Orientierung	327
4.3.5.1	Mathematisches Modell	327
4.3.5.2	Datumsfestlegung	328
4.3.5.3	Berechnung der äußeren Orientierungen	329
4.3.5.4	Berechnung der relativen Orientierung aus äußeren Orientierungen	329
4.3.6	Stereoskopische Auswertung	330
4.3.6.1	Prinzip der Stereobildmessung	330
4.3.6.2	Punktbestimmung mit Bildkoordinaten	332
4.3.6.3	Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke	338
4.4	Mehrbildauswertung und Bündeltriangulation	340
4.4.1	Allgemeines	340
4.4.1.1	Zielsetzung	340
4.4.1.2	Entwicklung	341
4.4.1.3	Datenfluss	343
4.4.2	Mathematisches Modell	345
4.4.2.1	Ausgleichungsansatz	345
4.4.2.2	Normalgleichungen	347
4.4.2.3	Kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen	350
4.4.2.4	Ausgleichung zusätzlicher Parameter (Kalibrierung)	355
4.4.3	Objektkoordinatensystem (Datumsfestlegung)	357
4.4.3.1	Rang- und Datumsdefekt	357
4.4.3.2	Passpunkte	358
4.4.3.3	Direkte Georeferenzierung	361
4.4.3.4	Freie Netzausgleichung	362
4.4.4	Beschaffung von Näherungswerten	365
4.4.4.1	Strategien zur automatischen Berechnung von Näherungswerten	367
4.4.4.2	Näherungswertbestimmung mit automatischer Punktmessung	371
4.4.4.3	Praktische Aspekte bei der Näherungswertbeschaffung	373
4.4.5	Qualitätsmaße und Ergebnisanalyse	374
4.4.5.1	Ausgabeprotokoll	374
4.4.5.2	Sigma 0 und Rückprojektionsfehler	375
4.4.5.3	Genauigkeit der Bildkoordinaten	375
4.4.5.4	Genauigkeit der Objektkoordinaten	376
4.4.5.5	Genauigkeit der Simultankalibrierung	378
4.4.6	Strategien zur Bündelausgleichung	379
4.4.6.1	Simulation	379

4.4.6.2	Divergenz	380
4.4.6.3	Elimination grober Datenfehler	381
4.4.7	Mehrbildauswertung	382
4.4.7.1	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt	382
4.4.7.2	Direkte Bestimmung geometrischer Elemente	385
4.4.7.3	Bestimmung räumlicher Kurven (Snakes).....	392
4.5	Panoramaphotogrammetrie	394
4.5.1	Abbildungsmodell für zylindrische Panoramabilder	394
4.5.2	Orientierung von Panoramabildern	396
4.5.2.1	Näherungswerte	396
4.5.2.2	Räumlicher Rückwärtsschnitt	397
4.5.2.3	Bündelausgleichung	397
4.5.3	Epipolargeometrie	399
4.5.4	Räumlicher Vorwärtsschnitt	400
4.5.5	Entzerrung von Panoramabildern	401
4.5.5.1	Orthogonale Bildentzerrung	401
4.5.5.2	Tangentialbilder	401
4.6	Mehrmedienphotogrammetrie	402
4.6.1	Lichtbrechung an Trennflächen	402
4.6.1.1	Trennflächen	402
4.6.1.2	Parallele ebene Trennflächen	403
4.6.1.3	Sphärische Trennflächen	406
4.6.1.4	Strahlverfolgung durch beliebige lichtbrechende Flächen	407
4.6.2	Erweitertes Modell der Bündeltriangulation	409
4.6.2.1	Objektinvariante Trennflächen	409
4.6.2.2	Bündelinvariante Trennflächen	410
5	Digitale Bildanalyse	411
5.1	Grundlagen	411
5.1.1	Bildanalyseprozess	411
5.1.2	Pixelkoordinatensystem	413
5.1.3	Bilddatenverwaltung	414
5.1.3.1	Bildpyramiden	414
5.1.3.2	Datenformate	415
5.1.3.3	Bildkompression	417
5.1.3.4	Integralbilder	419
5.2	Bildvorverarbeitung	420
5.2.1	Punktoperationen	420
5.2.1.1	Histogramm	420
5.2.1.2	Lookup-Tabellen	421
5.2.1.3	Kontrastverarbeitung	422
5.2.1.4	Schwellwertoperationen	424
5.2.1.5	Verknüpfungen von Bildern	426
5.2.2	Farbverarbeitung	427
5.2.2.1	Farbräume	427
5.2.2.2	Farbtransformationen	429
5.2.2.3	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	442
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	448
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.....	459
5.3.3.1	Texturprojektion	459
5.3.3.2	Synthetische Bilder.....	461
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.....	466
5.4.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung	469
5.4.2.5	Strukturelle Messverfahren.....	473
5.4.2.6	Genauigkeitsbetrachtungen	477
5.4.3	Merkmalsextraktion.....	478
5.4.3.1	Interest-Operatoren.....	478
5.4.3.2	Förstner-Operator	479
5.4.3.3	SUSAN-Operator	481
5.4.3.4	FAST-Operator.....	482
5.4.3.5	SIFT-Operator	483
5.4.3.6	Affine invariant SIFT (ASIFT).....	485
5.4.3.7	SURF-Operator.....	486
5.5	Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion.....	487
5.5.1	Übersicht	487
5.5.2	Strategien zur Zuordnung nicht orientierter Bilder	491
5.5.2.1	Codierte Messmarken.....	491
5.5.2.2	Structure-from-Motion	491
5.5.3	Ähnlichkeitsmaße.....	492
5.5.3.1	Summen von Differenzen.....	492
5.5.3.2	Census und Hamming-Distanz	493
5.5.3.3	Hashing.....	493
5.5.3.4	Normierte Kreuzkorrelation	494
5.5.3.5	Least-squares matching	495

5.5.3.6	Euklidische Distanz von Merkmalsvektoren	495
5.5.4	Zuordnungsverfahren im Stereobildpaar	496
5.5.4.1	Zuordnung mit Epipolarbedingungen	496
5.5.4.2	Semi-globales Matching	498
5.5.5	Mehrbildzuordnung	501
5.5.5.1	Multi-view Stereo	502
5.5.5.2	Zuordnung im orientierten Bildtripel.....	502
5.5.5.3	Zuordnung in beliebig vielen Bildern.....	504
5.5.5.4	Mehrbildzuordnung nach kleinsten Quadraten.....	505
5.5.6	Objektraumbasierte Zuordnungsverfahren	509
5.5.6.1	Objektgestützte Mehrbildzuordnung	510
5.5.6.2	Mehrbildzuordnung mit Oberflächenrastern	514
5.5.6.3	Objektbasiertes semi-globales Mehrbildmatching (OSGM).....	516
5.5.6.4	Weitere objektbasierte Zuordnungsverfahren.....	518
5.5.7	Zuordnung in Bildsequenzen.....	521
5.5.7.1	2D-Objektverfolgung in Einzelbildsequenzen.....	523
5.5.7.2	3D-Objektrekonstruktion aus Einzelbildsequenzen.....	526
5.5.7.3	Objektverfolgung in Mehrkamera-Bildsequenzen.....	527
5.5.7.4	Prädiktion von Folgepunkten (Kalman-Filter)	528
5.5.7.5	Simultaneous Localization and Mapping (SLAM).....	530
6	Messaufgaben und Messsysteme	532
6.1	Übersicht	532
6.2	Interaktive Mess- und Auswertesysteme	532
6.2.1	Stereoskopische Messsysteme.....	532
6.2.1.1	Digitale Stereoauswertegeräte	532
6.2.1.2	Digitale Stereobetrachtungssysteme	535
6.2.2	Interaktive Mehrbildauswertesysteme.....	537
6.2.2.1	Programme mit CAD-Funktionen	537
6.2.2.2	Structure-from-Motion-Programme	539
6.2.2.3	Industrielle Offline-Auswertesysteme	540
6.2.2.4	E-Learning-Programme	541
6.3	Taktil antastende Systeme	543
6.3.1	Messprinzip	543
6.3.2	Einkamerasysteme	544
6.3.2.1	Einkamerasysteme mit Handtaster	544
6.3.2.2	Messtaster mit integrierter Kamera	545
6.3.3	Zwei- und Mehrkamerasysteme	546
6.4	Laserbasierte Messsysteme	548
6.4.1	Lasertriangulation.....	548
6.4.2	3D-Laserscanner.....	548
6.4.3	2D- und 1D-Laserscanning.....	553
6.4.4	Videotachymeter und Multistationen	554
6.4.5	Lasertracker.....	555
6.4.6	Panoramasysteme mit Laserdistanzmessung	557
6.5	Industrielle Systeme zur Messung punktförmiger Merkmale.....	558
6.5.1	Mobile industrielle Punktmesssysteme	558
6.5.1.1	Offline-Photogrammetriesysteme.....	558

6.5.1.2	Online-Photogrammetriesysteme	561
6.5.1.3	Stereokamerasysteme	563
6.5.2	Stationäre industrielle Online-Messsysteme.....	565
6.5.2.1	System zur Vermessung von Rohrleitungen.....	565
6.5.2.2	Positioniersystem für Stahlplatten	566
6.5.2.3	Mehrkamerasystem mit Punktprojektion.....	567
6.6	Industrielle Systeme zur Oberflächenmessung.....	568
6.6.1	Überblick	568
6.6.1.1	Aktive und passive Systeme	568
6.6.1.2	Oberflächenstrukturen	569
6.6.2	Streifenprojektionssysteme.....	570
6.6.2.1	Statische Streifenprojektion.....	570
6.6.2.2	Dynamische Streifenprojektion (Phasen-Schiebe-Verfahren)	571
6.6.2.3	Codiertes Lichtschnittverfahren	573
6.6.2.4	Aperiodische Streifenprojektion.....	574
6.6.2.5	Einkamerasysteme mit Streifenprojektion.....	575
6.6.2.6	Mehrkamerasysteme mit Streifenprojektion.....	576
6.6.2.7	Phasogrammetrische Systeme	579
6.6.3	Systeme mit punktförmigen Mustern	581
6.6.3.1	Mehrkamerasysteme mit Rasterprojektion	581
6.6.3.2	Mehrkamerasystem mit Gitterprojektion.....	581
6.6.3.3	Mehrkamerasysteme mit Mustergravur	582
6.6.4	Systeme mit stochastischen Mustern.....	583
6.6.4.1	Zweikamerasysteme mit Zufallsmusterprojektion.....	583
6.6.4.2	Oberflächenerfassung mit Texturfolien.....	583
6.6.4.3	Messung dynamischer Oberflächenänderungen	584
6.6.5	3D-Projektionssysteme.....	587
6.7	Erfassung komplexer Oberflächen	588
6.7.1	Orientierungsmessung mit Objektpunkten	588
6.7.2	Orientierungsmessung mit externem Kamerasystem	589
6.7.3	Orientierungsmessung mit mechanischen Systemen.....	589
6.7.4	Orientierungsmessung mit mechanischen Systemen und Passpunkten	590
6.7.5	Verknüpfung von Punktwolken.....	592
6.8	Low-Cost-3D-Sensoren.....	594
6.8.1	Messsystem zur Gestenerkennung	594
6.8.2	3D-Handscanner.....	595
6.8.3	Messsysteme in mobilen Endgeräten	595
6.9	Systeme zur Messung dynamischer Vorgänge	596
6.9.1	Relativbewegungen zwischen Objekt und Aufnahmesystem.....	597
6.9.1.1	Ruhendes Objekt	597
6.9.1.2	Bewegtes Objekt.....	599
6.9.2	Aufnahme von kinematischen Vorgängen	600
6.9.2.1	Kamerasystem zur Roboterkalibrierung	600
6.9.2.2	Highspeed-6DOF-System.....	601
6.9.2.3	Aufnahme mit Highspeedkameras.....	602
6.9.2.4	Particle Image Velocimetry	603
6.9.3	Bewegungsanalyse	604
6.10	Messsysteme auf mobilen Plattformen.....	605

6.10.1	Mobile-Mapping-Systeme.....	605
6.10.2	Luftbildaufnahmen im Nahbereich.....	606
6.10.2.1	Flugsysteme.....	606
6.10.2.2	Sensortechnik.....	608
6.10.2.3	Flugplanung.....	609
6.10.2.4	Photogrammetrische Auswertung.....	611
7	Projektplanung und Optimierung.....	613
7.1	Projektplanung.....	613
7.1.1	Planungskriterien.....	613
7.1.2	Genauigkeitsfragen.....	614
7.1.3	Restriktionen der Aufnahmeconfiguration.....	615
7.1.4	Genauigkeitsabschätzung durch Simulation.....	618
7.1.4.1	Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung.....	618
7.1.4.2	Monte-Carlo-Simulation.....	620
7.1.4.3	Unscented Transformation.....	622
7.1.4.4	Bootstrap-Simulation.....	623
7.1.5	Design der Aufnahmeanordnung.....	624
7.1.5.1	Netzoptimierung.....	624
7.1.5.2	Maßstab.....	627
7.2	Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalyse.....	629
7.2.1	Statistische Kenngrößen.....	629
7.2.1.1	Innere Genauigkeit.....	629
7.2.1.2	Äußere Genauigkeit.....	630
7.2.1.3	Relative Genauigkeit.....	631
7.2.2	Messtechnische Kenngrößen.....	632
7.2.2.1	Messunsicherheit.....	632
7.2.2.2	Messabweichung.....	632
7.2.2.3	Referenzwert, richtiger Wert und wahrer Wert.....	633
7.2.2.4	Genauigkeit.....	633
7.2.2.5	Präzision.....	633
7.2.2.6	Toleranz.....	634
7.2.2.7	Auflösung.....	634
7.2.3	Prüfung optischer 3D-Messsysteme.....	635
7.2.3.1	Begriffsdefinitionen.....	635
7.2.3.2	Abgrenzung zu mechanischen Koordinatenmessgeräten.....	637
7.2.3.3	Prüfkörper.....	638
7.2.3.4	Prüfung punktförmig antastender Systeme.....	640
7.2.3.5	Prüfung flächenhaft antastender Systeme.....	644
7.3	Strategien zur Kamerakalibrierung.....	647
7.3.1	Kalibrierverfahren.....	647
7.3.1.1	Testfeldkalibrierung.....	648
7.3.1.2	Plumbline-Kalibrierung.....	650
7.3.1.3	Simultankalibrierung.....	651
7.3.1.4	Systemkalibrierung.....	652
7.3.2	Aufnahmeconfigurationen.....	652
7.3.2.1	Kalibrierung mit ebenem Punktfeld.....	653
7.3.2.2	Kalibrierung mit räumlichem Punktfeld.....	653

7.3.2.3	Kalibrierung mit bewegtem Maßstab	654
7.3.3	Kalibrierung spezieller Aufnahmesysteme.....	655
7.3.3.1	Kalibrierung von Stereo- und Mehrkamarasystemen	655
7.3.3.2	Kalibrierung von Fisheye-Kameras.....	656
7.3.3.3	Kalibrierung von Unterwasser-Kameras	657
7.3.4	Qualitätskriterien für die Kamerakalibrierung.....	658
7.3.5	Probleme bei der Simultankalibrierung.....	659
8	Anwendungsbeispiele	662
8.1	Architektur, Archäologie und Denkmalpflege	662
8.1.1	Photogrammetrische Bauaufnahme.....	662
8.1.1.1	Strichzeichnungen	663
8.1.1.2	3D-Gebäudemodelle.....	664
8.1.1.3	Bildpläne und Orthophotos.....	665
8.1.2	3D-Stadt- und Landschaftsmodelle	666
8.1.2.1	Stadtmodelle.....	666
8.1.2.2	Ableitung von Geländemodellen aus multispektralen Bilddaten.....	667
8.1.2.3	Landschaftsmodell aus Laserscanning und Photogrammetrie	669
8.1.3	Skulpturen und Museumsobjekte	670
8.1.3.1	Statuen und Skulpturen.....	671
8.1.3.2	Vermessung der Bremer Hanse-Kogge	674
8.1.4	Archäologische Ausgrabungen.....	676
8.1.4.1	3D-Dokumentation von Pompeji.....	676
8.1.4.2	Hadrianstempel.....	677
8.1.4.3	Grabkammer Otzing	678
8.1.5	Bildmosaike.....	679
8.1.5.1	Bildmosaike zur Kartierung von Dinosaurierspuren	679
8.1.5.2	Zentralperspektive Bildmosaike	680
8.2	Ingenieurvermessung und Bauwesen	681
8.2.1	3D-Erfassung komplexer Objekte	681
8.2.1.1	As-Built-Dokumentation	681
8.2.1.2	Building Information Modeling.....	682
8.2.1.3	Treppenvermessung.....	683
8.2.2	Deformationsmessungen	684
8.2.2.1	Deformationsmessungen an Betonwannen.....	685
8.2.2.2	Erfassung von Rotorblättern an Windenergieanlagen	686
8.2.3	Materialprüfung.....	688
8.2.3.1	Oberflächenmessung an Mauerfugen	688
8.2.3.2	Bauphysikalische Belastungsversuche	689
8.2.4	Dach- und Fassadenvermessung.....	690
8.3	Industrielle Messtechnik.....	691
8.3.1	Kraftwerks- und Anlagenbau	691
8.3.1.1	Windkraftanlagen	691
8.3.1.2	Teilchenbeschleuniger.....	693
8.3.2	Luft- und Raumfahrtindustrie.....	694
8.3.2.1	Vorrichtungsbau	694
8.3.2.2	Fertigungskontrolle.....	695
8.3.2.3	Antennenvermessung	695

8.3.3	Automobil- und Fahrzeugbau.....	697
8.3.3.1	Rapid Prototyping und Reverse Engineering.....	697
8.3.3.2	Fahrzeugsicherheitsversuch.....	698
8.3.3.3	Fahrzeugdeformationen.....	701
8.3.4	Schiffbau.....	701
8.4	Mehrmedienphotogrammetrie.....	702
8.4.1	Vermessung von Wasseroberflächen.....	702
8.4.2	Unterwasser-Schweißnahtmessung.....	704
8.5	Medizin.....	705
8.5.1	Flächenhafte Objekterfassung.....	706
8.5.2	Navigationssysteme.....	707
8.6	Sonstige Anwendungsbereiche.....	709
8.6.1	Forensische Anwendungen.....	709
8.6.1.1	Unfallvermessung.....	709
8.6.1.2	Tatrekonstruktion.....	711
8.6.2	Naturwissenschaftliche Anwendungen.....	711
8.6.2.1	Beobachtung von Gletscherbewegungen.....	712
8.6.2.2	Erdwissenschaften.....	713
8.6.2.3	Entomologie (Insektenkunde).....	715
8.6.2.4	Vermessung einer Seifenblase.....	717
9	Literaturverzeichnis.....	718
9.0	Lehrbücher und Monographien.....	718
9.0.1	Photogrammetrie.....	718
9.0.2	Optik, Kamera- und Aufnahmetechnik.....	718
9.0.3	Digitale Bildverarbeitung, Computer Vision und Mustererkennung.....	719
9.0.4	Mathematik und 3D-Computergrafik.....	720
9.0.5	Ausgleichsrechnung und Statistik.....	721
9.0.6	Industriemesstechnik, Optische 3D-Messtechnik, Qualitätssicherung.....	721
9.0.7	Anwendungen.....	722
9.1	Kap. 1 Einführung.....	722
9.2	Kap. 2 Mathematische Grundlagen.....	724
9.2.1	Transformationen und Geometrie.....	724
9.2.2	Ausgleichsrechnung.....	725
9.3	Kap. 3 Aufnahmetechnik.....	726
9.3.1	Optik und Abtastung.....	726
9.3.2	Modellierung und Kalibrierung.....	726
9.3.3	Sensoren und Kameras.....	730
9.3.4	Signalisierung und Beleuchtung.....	732
9.4	Kap. 4 Analytische Auswertverfahren.....	733
9.4.1	Analytische Photogrammetrie.....	733
9.4.2	Bündelausgleichung.....	735
9.4.3	Mehrmedienphotogrammetrie.....	737
9.4.4	Panoramaphotogrammetrie.....	737
9.5	Kap. 5 Digitale Bildanalyse.....	738
9.5.1	Grundlagen und Bildverarbeitung.....	738
9.5.2	Mustererkennung und Bildzuordnung.....	739
9.6	Kap. 6 Messaufgaben und Messsysteme.....	743

9.6.1	Interaktive Mess- und Auswertesysteme	743
9.6.2	Messung von Punkten und Konturen.....	744
9.6.3	Laserbasierte Messsysteme	745
9.6.4	Messung von Oberflächen	746
9.6.5	Low-Cost-3D-Systeme	748
9.6.6	Dynamische und mobile Systeme	748
9.7	Kap. 7 Projektplanung und Optimierung.....	750
9.7.1	Projektplanung und Simulation	750
9.7.2	Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalyse	751
9.7.3	Kamerakalibrierung	752
9.8	Kap. 8 Anwendungsbeispiele	753
9.8.1	Architektur, Archäologie, Stadtmodelle	753
9.8.2	Ingenieur- und Industrieanwendungen	755
9.8.3	Medizin, Forensik, Naturwissenschaften.....	757
9.9	Sonstige Informationsquellen.....	758
9.9.1	Normen und Richtlinien	758
9.9.2	Arbeitsgruppen und Konferenzen.....	758
	Abkürzungsverzeichnis	760
	Bildnachweis	763
	Stichwortverzeichnis	766