

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	1
1.1 Übersicht	1
1.1.1 Inhalt	1
1.1.2 Literatur	2
1.2 Prinzipielle Methoden	2
1.2.1 Der photogrammetrische Prozess	2
1.2.2 Einteilungen der Photogrammetrie	4
1.2.3 Abbildungsmodell	7
1.2.4 Photogrammetrische Prozesse	9
1.2.4.1 Digitales System	9
1.2.4.2 Aufnahme- und Auswerteprozess	11
1.2.5 Photogrammetrische Produkte	12
1.3 Anwendungsbereiche	13
1.4 Geschichtliche Entwicklung	16
<b>2 Mathematische Grundlagen</b>	24
2.1 Koordinatensysteme	24
2.1.1 Pixelkoordinatensystem	24
2.1.2 Bildkoordinatensystem	24
2.1.3 Modellkoordinatensystem	25
2.1.4 Objektkoordinatensystem	26
2.2 Koordinatentransformationen	27
2.2.1 Ebene Transformationen	27
2.2.1.1 Ähnlichkeitstransformation	27
2.2.1.2 Affintransformation	29
2.2.1.3 Polynomtransformation	30
2.2.1.4 Bilineare Transformation	31
2.2.1.5 Projektivtransformation	32
2.2.2 Räumliche Transformationen	35
2.2.2.1 Räumliche Drehungen	35
2.2.2.2 Räumliche Ähnlichkeitstransformation	42
2.2.3 Grafische Transformationen	46
2.2.3.1 Homogene Koordinaten	46
2.2.3.2 Allgemeine Transformationen	47
2.2.3.3 Projektionen	49
2.3 Geometrische Elemente	51
2.3.1 Analytische Geometrie der Ebene	52
2.3.1.1 Gerade	52
2.3.1.2 Kreis	56
2.3.1.3 Ellipse	57
2.3.1.4 Kurvendarstellung	59
2.3.2 Analytische Geometrie des Raumes	63
2.3.2.1 Gerade	63
2.3.2.2 Ebene	67
2.3.2.3 Rotationskörper	69

2.3.3	Oberflächen .....	74
2.3.3.1	Digitales Oberflächenmodell .....	75
2.3.3.2	B-Spline- und Bézier-Flächen .....	77
2.3.4	Funktionsgerechte Elemente .....	77
2.4	Ausgleichungsverfahren .....	78
2.4.1	Problemstellung .....	78
2.4.1.1	Funktionales Modell .....	79
2.4.1.2	Stochastisches Modell .....	80
2.4.2	Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell) .....	82
2.4.2.1	Ausgleichung direkter Beobachtungen .....	82
2.4.2.2	Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen .....	83
2.4.2.3	Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten .....	85
2.4.3	Qualitätsmaße .....	87
2.4.3.1	Genauigkeitsmaße .....	87
2.4.3.2	Vertrauensbereiche .....	89
2.4.3.3	Korrelationen .....	92
2.4.3.4	Zuverlässigkeit .....	92
2.4.4	Erkennung von Ausreißern .....	96
2.4.4.1	Fehlersuche ohne Ausgleichung .....	97
2.4.4.2	Data Snooping .....	97
2.4.4.3	Varianzkomponentenschätzung .....	97
2.4.4.4	Robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen .....	98
2.4.4.5	Robuste Schätzung nach der L1-Norm .....	99
2.4.5	Hinweise zur Rechentechnik .....	100
2.4.5.1	Linearisierung .....	100
2.4.5.2	Normalgleichungssysteme .....	101
2.4.5.3	Profilspeichertechnik und Optimierung .....	102
<b>3</b>	<b>Aufnahmetechnik .....</b>	<b>103</b>
3.1	Physikalische Grundlagen .....	103
3.1.1	Wellenoptik .....	103
3.1.1.1	Elektromagnetisches Spektrum .....	103
3.1.1.2	Strahlungsleistung .....	104
3.1.1.3	Brechung und Reflexion .....	105
3.1.1.4	Beugung .....	107
3.1.2	Optische Abbildung .....	108
3.1.2.1	Konstruktion der optischen Abbildung .....	108
3.1.2.2	Bündelbegrenzung .....	110
3.1.2.3	Scharfabbildung .....	111
3.1.2.4	Scheimpflug-Bedingung .....	114
3.1.3	Abbildungsfehler .....	115
3.1.3.1	Verzeichnung .....	115
3.1.3.2	Chromatische Aberration .....	117
3.1.3.3	Sphärische Aberration .....	118
3.1.3.4	Astigmatismus und Bildfeldwölbung .....	118
3.1.3.5	Koma .....	119
3.1.3.6	Lichtabfall und Vignettierung .....	120

3.1.4	Auflösungsvermögen.....	121
3.1.4.1	Auflösungsvermögen von Objektiven .....	121
3.1.4.2	Geometrisches Auflösungsvermögen .....	122
3.1.4.3	Kontrast- und Modulationsübertragung.....	124
3.1.5	Grundlagen der Abtasttheorie.....	126
3.1.5.1	Abtasttheorem .....	126
3.1.5.2	Detektoreigenschaften .....	128
3.2	Aufnahmekonzepte.....	130
3.2.1	Offline- und Online-Systeme .....	130
3.2.1.1	Offline-Photogrammetrie .....	130
3.2.1.2	Online-Photogrammetrie .....	131
3.2.2	Aufnahmekonfigurationen.....	131
3.2.2.1	Einzelbildaufnahme .....	131
3.2.2.2	Stereobildaufnahme .....	132
3.2.2.3	Mehrbildaufnahme .....	133
3.3	Geometrische Grundlagen.....	134
3.3.1	Abbildungsmaßstab und Genauigkeit.....	134
3.3.1.1	Bildmaßstab .....	134
3.3.1.2	Genauigkeitsabschätzung .....	136
3.3.2	Innere Orientierung einer Aufnahmekamera .....	138
3.3.2.1	Verkörperung des Bildkoordinatensystems .....	139
3.3.2.2	Projektionszentrum und Verzeichnung.....	141
3.3.2.3	Parameter der inneren Orientierung.....	143
3.3.2.4	Mess- und Teilmesskamera .....	145
3.3.2.5	Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung) .....	146
3.3.3	Standardisierte Korrekturfunktionen .....	147
3.3.3.1	Radial-symmetrische Verzeichnung .....	148
3.3.3.2	Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung .....	153
3.3.3.3	Affinität und Scherung .....	153
3.3.3.4	Gesamtkorrektur .....	153
3.3.4	Alternative Korrekturansätze.....	154
3.3.4.1	Vereinfachte Ansätze .....	154
3.3.4.2	Erweiterte Funktionen .....	155
3.3.4.3	Entfernungsabhängige Verzeichnungskorrektur .....	157
3.3.4.4	Bildvariante Kalibrierung .....	158
3.3.4.5	Korrektur lokaler Bilddeformationen .....	159
3.3.5	Iterative Korrektur von Abbildungsfehlern .....	162
3.4	Komponenten zur Bilderfassung .....	164
3.4.1	Optoelektronische Bildsensoren .....	166
3.4.1.1	CCD-Sensorprinzip .....	166
3.4.1.2	CCD-Flächensensoren .....	168
3.4.1.3	CMOS-Bildsensoren .....	171
3.4.1.4	Farbsensoren .....	173
3.4.1.5	Geometrische Eigenschaften .....	175
3.4.1.6	Radiometrische Eigenschaften .....	178

3.4.2	Kamer 技术 .....	180
3.4.2.1	Kameratypen .....	180
3.4.2.2	Verschluss .....	182
3.4.2.3	Bildstabilisation .....	182
3.4.3	Objektive .....	183
3.4.3.1	Lichtstärke und Blendenzahl .....	183
3.4.3.2	Öffnungswinkel und Formatwinkel .....	184
3.4.3.3	berweitwinkel- und Fisheye-Objektive .....	185
3.4.3.4	Vario-Objektive .....	186
3.4.3.5	Shift-Tilt-Objektive .....	187
3.4.3.6	Telezentrische Objektive .....	188
3.4.3.7	Stereostrahlteilung .....	189
3.4.4	Filter .....	190
3.5	Aufnahmesysteme .....	191
3.5.1	Videokameras .....	191
3.5.1.1	Videonormen .....	191
3.5.1.2	Komponenten einer CCD-Videokamera .....	194
3.5.1.3	Digitalisierung analoger Videosignale .....	196
3.5.2	Digitalkameras .....	199
3.5.3	Hochfrequenzkameras .....	202
3.5.4	Stereo- und Multikamerasysteme .....	206
3.5.5	Scanning-Kameras .....	207
3.5.5.1	Micro-Scanning .....	207
3.5.5.2	Macro-Scanning .....	208
3.5.6	Panoramakameras .....	209
3.5.6.1	Zeilenscanner .....	209
3.5.6.2	Panorama-Stitching .....	210
3.5.6.3	Panoramen mit Fisheye-Objektiven .....	212
3.5.6.4	Videoteodolit und -tachymeter .....	213
3.5.7	Thermographiekameras .....	214
3.6	Signalisierung und Beleuchtung .....	216
3.6.1	Objektsignalisierung .....	216
3.6.1.1	Signalisierungsmaterial .....	216
3.6.1.2	Kreisförmige Zielmarken .....	219
3.6.1.3	Kugelförmige Zielmarken .....	222
3.6.1.4	Linienhafte Zielmarken .....	224
3.6.1.5	Marken mit codierter Punktnummer .....	224
3.6.1.6	Exzentrische Signalisierungsmittel .....	225
3.6.2	Beleuchtungs- und Projektionstechniken .....	228
3.6.2.1	Blitzgeräte .....	228
3.6.2.2	Projektoren .....	229
3.6.2.3	Laser .....	231
3.6.2.4	Gerichtete Beleuchtung .....	232
4	Analytische Auswerteverfahren .....	234
4.1	Übersicht .....	234
4.2	Auswertung von Einzelbildern .....	236

4.2.1	Äußere Orientierung.....	236
4.2.1.1	Standardfall .....	236
4.2.1.2	Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie.....	238
4.2.2	Kollinearitätsgleichungen.....	239
4.2.3	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	242
4.2.3.1	Rückwärtsschnitt bei bekannter innerer Orientierung .....	243
4.2.3.2	Rückwärtsschnitt bei unbekannter innerer Orientierung .....	245
4.2.3.3	Näherungswerte für den Rückwärtsschnitt.....	246
4.2.3.4	Rückwärtsschnitt mit minimaler Objektinformation .....	246
4.2.3.5	Gütekriterien.....	250
4.2.4	Lineare Orientierungsverfahren.....	250
4.2.4.1	Direkte Lineare Transformation (DLT).....	250
4.2.4.2	Perspektive Projektionsmatrix.....	253
4.2.5	Inverser räumlicher Rückwärtsschnitt .....	254
4.2.5.1	Position und Orientierung eines Objektes relativ zur Kamera.....	254
4.2.5.2	Relative Position und Orientierung von Objekten.....	255
4.2.6	Ebene projektive Transformation .....	258
4.2.6.1	Mathematisches Modell.....	258
4.2.6.2	Einfluss der inneren Orientierung.....	260
4.2.6.3	Einfluss nicht ebener Objektpunkte.....	261
4.2.6.4	Ebene Entzerrung .....	262
4.2.6.5	Vermessung ebener Objekte .....	263
4.2.7	Auswertung mit dreidimensionalen Objektmodellen .....	263
4.2.7.1	Objektebenen.....	264
4.2.7.2	Digitale Oberflächenmodelle.....	264
4.2.7.3	Differenzielle Entzerrung .....	266
4.3	Auswertung von Stereobildern .....	269
4.3.1	Stereoskopisches Verfahren .....	269
4.3.1.1	Stereoskopische Zuordnung .....	269
4.3.1.2	Verknüpfungspunkte .....	271
4.3.1.3	Orientierungsverfahren.....	272
4.3.1.4	Stereonormalfall .....	273
4.3.2	Kern- oder Epipolargeometrie.....	273
4.3.3	Relative Orientierung .....	275
4.3.3.1	Koplanaritätsbedingung.....	277
4.3.3.2	Berechnung.....	279
4.3.3.3	Modellkoordinaten .....	280
4.3.3.4	Berechnung der Epipolarlinien .....	281
4.3.3.5	Berechnung von Normalbildern .....	282
4.3.3.6	Qualitätskriterien .....	283
4.3.3.7	Besondere Fälle der relativen Orientierung .....	285
4.3.4	Fundamentalmatrix und Essentielle Matrix.....	287
4.3.5	Absolute Orientierung .....	289
4.3.5.1	Mathematisches Modell.....	289
4.3.5.2	Datumsfestlegung.....	290
4.3.5.3	Berechnung der äußeren Orientierungen .....	291
4.3.5.4	Berechnung der relativen Orientierung aus äußeren Orientierungen..	291

4.3.6	Stereoskopische Auswertung.....	292
4.3.6.1	Prinzip der Stereobildmessung .....	292
4.3.6.2	Punktbestimmung mit Bildkoordinaten.....	294
4.3.6.3	Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke .....	300
4.4	Mehrbildauswertung und Bündeltriangulation.....	301
4.4.1	Allgemeines.....	301
4.4.1.1	Zielsetzung .....	301
4.4.1.2	Entwicklung.....	303
4.4.1.3	Datenfluss.....	305
4.4.2	Mathematisches Modell .....	307
4.4.2.1	Ausgleichungsansatz .....	307
4.4.2.2	Normalgleichungen .....	309
4.4.2.3	Kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen .....	312
4.4.2.4	Ausgleichung zusätzlicher Parameter.....	317
4.4.3	Objektkoordinatensystem (Datumsfestlegung) .....	319
4.4.3.1	Rang- und Datumsdefekt.....	319
4.4.3.2	Passpunkte .....	320
4.4.3.3	Freie Netzausgleichung .....	323
4.4.4	Beschaffung von Näherungswerten.....	327
4.4.4.1	Strategien zur automatischen Berechnung von Näherungswerten.....	329
4.4.4.2	Näherungswertbestimmung mit automatischer Punktmeßung .....	333
4.4.4.3	Praktische Aspekte bei der Näherungswertbeschaffung.....	335
4.4.5	Qualitätsmaße und Ergebnisanalyse .....	337
4.4.5.1	Ausgabeprotokoll .....	337
4.4.5.2	Genaugkeit der Bildkoordinaten.....	337
4.4.5.3	Genaugigkeit der Objektkoordinaten.....	338
4.4.5.4	Genaugigkeit der Simultankalibrierung.....	340
4.4.6	Strategien zur Bündelausgleichung .....	341
4.4.6.1	Simulation .....	341
4.4.6.2	Divergenz .....	342
4.4.6.3	Elimination grober Datenfehler .....	343
4.4.7	Mehrbildauswertung.....	344
4.4.7.1	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt .....	344
4.4.7.2	Direkte Bestimmung geometrischer Elemente .....	346
4.4.7.3	Bestimmung räumlicher Kurven (Snakes).....	354
4.5	Panoramaphotogrammetrie .....	356
4.5.1	Abbildungsmodell für zylindrische Panoramabilder .....	356
4.5.2	Orientierung von Panoramabildern .....	358
4.5.2.1	Näherungswerte .....	358
4.5.2.2	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	359
4.5.2.3	Bündelausgleichung .....	360
4.5.3	Epipolareometrie .....	361
4.5.4	Räumlicher Vorwärtsschnitt.....	362
4.5.5	Entzerrung von Panoramabildern .....	363
4.5.5.1	Orthogonale Bildentzerrung .....	363
4.5.5.2	Tangentialbilder.....	364

4.6 Mehrmedienphotogrammetrie .....	364
4.6.1 Lichtbrechung an Trennflächen.....	364
4.6.1.1 Trennflächen.....	364
4.6.1.2 Parallele ebene Trennflächen.....	365
4.6.1.3 Strahlverfolgung durch lichtbrechende Flächen .....	368
4.6.2 Erweitertes Modell der Bündeltriangulation .....	370
4.6.2.1 Objektinvariante Trennflächen .....	370
4.6.2.2 Bündelinvariante Trennflächen .....	371
4.7 Phasenbasierte Messverfahren .....	372
4.7.1 Statische Streifenprojektion.....	372
4.7.2 Dynamische Streifenprojektion (Phasen-Schiebe-Verfahren).....	373
4.7.3 Codiertes Lichtschnittverfahren .....	374
4.7.4 Phasogrammetrie.....	375
<b>5 Digitale Bildverarbeitung .....</b>	<b>377</b>
5.1 Grundlagen.....	377
5.1.1 Bildverarbeitungsprozess .....	377
5.1.2 Pixelkoordinatensystem.....	379
5.1.3 Bilddatenverwaltung .....	380
5.1.3.1 Bildpyramiden .....	380
5.1.3.2 Datenformate .....	381
5.1.3.3 Bildkompression.....	383
5.2 Bildvorverarbeitung .....	386
5.2.1 Punktoperationen.....	386
5.2.1.1 Histogramm.....	386
5.2.1.2 Lookup-Tabellen .....	387
5.2.1.3 Kontrastverarbeitung .....	388
5.2.1.4 Schwellwertoperationen .....	391
5.2.1.5 Verknüpfungen von Bildern .....	392
5.2.2 Farbverarbeitung .....	393
5.2.2.1 Farbräume .....	393
5.2.2.2 Farbtransformationen .....	396
5.2.2.3 Farbkombinationen.....	398
5.2.3 Filterverfahren .....	400
5.2.3.1 Orts- und Frequenzraum.....	400
5.2.3.2 Glättungsfilter .....	403
5.2.3.3 Morphologische Operationen .....	405
5.2.3.4 Wallis-Filter.....	407
5.2.4 Kantenextraktion .....	408
5.2.4.1 Ableitungsfilter 1. Ordnung.....	409
5.2.4.2 Ableitungsfilter 2. Ordnung.....	411
5.2.4.3 Laplace-of-Gaussian-Filter .....	413
5.2.4.4 Schärfefilter .....	414
5.2.4.5 Hough-Transformation .....	415
5.2.4.6 Erweiterte Kanten-Operatoren.....	416
5.2.4.7 Subpixel-Interpolation .....	418
5.3 Geometrische Umbildung.....	421
5.3.1 Grundlagen der Umbildung.....	422

5.3.2	Grauwertinterpolation .....	423
5.3.3	3D-Visualisierung.....	425
5.3.3.1	Übersicht .....	425
5.3.3.2	Reflexion und Beleuchtung.....	427
5.3.3.3	Texturprojektion.....	431
5.4	Digitale Einzelbildauswertung .....	433
5.4.1	Näherungswerte.....	434
5.4.1.1	Möglichkeiten.....	434
5.4.1.2	Segmentierung punktförmiger Muster.....	434
5.4.2	Messung punktförmiger Merkmale .....	436
5.4.2.1	Bildschirmmessung .....	437
5.4.2.2	Schwerpunktverfahren.....	437
5.4.2.3	Korrelationsverfahren.....	438
5.4.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung.....	440
5.4.2.5	Strukturelle Messverfahren.....	445
5.4.2.6	Genauigkeitsbetrachtungen .....	448
5.4.3	Konturverfolgung .....	450
5.4.3.1	Profilgesteuerte Konturverfolgung .....	451
5.4.3.2	Konturverfolgung mit Gradientenanalyse .....	451
5.5	Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion.....	453
5.5.1	Übersicht .....	453
5.5.2	Merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren .....	455
5.5.2.1	Interest-Operatoren.....	455
5.5.2.2	Korrespondenzanalyse.....	461
5.5.3	Korrespondenzanalyse mit Epipolareometrie.....	463
5.5.3.1	Zuordnung im Bildpaar .....	463
5.5.3.2	Zuordnung im Bildtripel.....	464
5.5.3.3	Zuordnung in beliebig vielen Bildern .....	465
5.5.4	Flächenbasierte Mehrbildzuordnung .....	466
5.5.4.1	Mehr bildzuordnung .....	466
5.5.4.2	Geometrische Bedingungen.....	467
5.5.5	Zuordnungsverfahren mit Objektmodellen .....	471
5.5.5.1	Objektgestützte Mehrbildzuordnung .....	472
5.5.5.2	Mehr bildzuordnung mit Oberflächenrastern .....	475
<b>6</b>	<b>Messaufgaben und Messsysteme .....</b>	<b>478</b>
6.1	Übersicht .....	478
6.2	Einkamerasysteme.....	478
6.2.1	Einkamerasysteme mit Handtaster .....	478
6.2.2	Selbstorientierendes Einkamera-Messsystem.....	479
6.2.3	Kamerasytem zur Roboterkalibrierung.....	480
6.3	Stereoskopische Messsysteme.....	481
6.3.1	Analytische Stereoauswertegeräte .....	481
6.3.1.1	Prinzip des Analytischen Plotters .....	481
6.3.1.2	Orientierungsvorgänge .....	483
6.3.1.3	Objektauswertung.....	483
6.3.2	Digitale Stereoauswertesysteme .....	484
6.3.3	Stereokamerasyteme .....	486

<b>6.4 Mehrbildmesssysteme .....</b>	<b>488</b>
6.4.1 Interaktive Auswertesysteme.....	488
6.4.2 Mobile industrielle Punktmesssysteme .....	490
6.4.2.1 Offline-Photogrammetriesysteme.....	491
6.4.2.2 Online-Photogrammetriesysteme .....	493
6.4.3 Stationäre industrielle Online-Messsysteme .....	496
6.4.3.1 System zur Vermessung von Bremsleitungen .....	496
6.4.3.2 Positioniersystem für Stahlplatten .....	498
6.4.3.3 Mehrbildsystem mit Rundtisch.....	498
<b>6.5 Systeme zur Oberflächenmessung.....</b>	<b>500</b>
6.5.1 Streifenprojektionssysteme .....	500
6.5.1.1 Einkamerasyteme mit Streifenprojektion.....	500
6.5.1.2 Mehrkamerasyteme mit Streifenprojektion.....	501
6.5.1.3 Phasogrammetrische Systeme .....	503
6.5.2 Systeme mit Projektion von punktförmigen Mustern.....	504
6.5.2.1 Mehrkamerasytem mit Punktprojektion.....	504
6.5.2.2 Mehrkamerasyteme mit Rasterprojektion .....	505
6.5.2.3 Mehrkamerasytem mit Gitterprojektion.....	505
6.5.3 Systeme mit stochastischen Mustern .....	506
6.5.3.1 Mehrkamerasyteme mit Zufallsmusterprojektion .....	506
6.5.3.2 Oberflächenerfassung mit Textursfolien.....	507
6.5.4 Erfassung komplexer Oberflächen .....	507
6.5.4.1 Orientierungsmessung mit Objektpunkten .....	507
6.5.4.2 Orientierungsmessung mit Navigationssystem.....	508
6.5.4.3 Orientierungsmessung mit mechanischen Systemen .....	509
6.5.4.4 Verknüpfung von Punktfolgen.....	510
<b>6.6 Systeme zur Messung dynamischer Vorgänge .....</b>	<b>511</b>
6.6.1 Relativbewegungen zwischen Objekt und Aufnahmesystem .....	511
6.6.1.1 Ruhendes Objekt .....	511
6.6.1.2 Bewegtes Objekt.....	513
6.6.2 Aufnahme von kinematischen Vorgängen .....	514
6.6.3 Bewegungsanalyse .....	516
6.6.4 Dynamische Oberflächenerfassung .....	517
<b>6.7 Messsysteme auf mobilen Plattformen.....</b>	<b>519</b>
6.7.1 Mobile-Mapping-Systeme .....	519
6.7.2 Luftbildaufnahmen im Nahbereich .....	520
<b>6.8 Lasermesssysteme .....</b>	<b>523</b>
6.8.1 3D-Laserscanner.....	523
6.8.2 Lasertracker.....	527
<b>7 Projektplanung und Optimierung .....</b>	<b>529</b>
<b>7.1 Projektplanung .....</b>	<b>529</b>
7.1.1 Planungskriterien.....	529
7.1.2 Genauigkeitsfragen.....	530
7.1.3 Restriktionen der Aufnahmekonfiguration.....	531
<b>7.2 Qualitätskriterien.....</b>	<b>534</b>
7.2.1 Statistische Kenngrößen.....	534
7.2.1.1 Innere Genauigkeit .....	534

7.2.1.2	Äußere Genauigkeit.....	535
7.2.1.3	Relative Genauigkeit .....	536
7.2.2	Messtechnische Kenngrößen .....	537
7.2.2.1	Messunsicherheit .....	537
7.2.2.2	Messabweichung .....	537
7.2.2.3	Referenzwert, richtiger Wert und wahrer Wert .....	538
7.2.2.4	Genauigkeit .....	538
7.2.2.5	Präzision .....	538
7.2.2.6	Toleranz.....	539
7.2.2.7	Auflösung .....	539
7.2.3	Prüfung optischer 3D-Messsysteme .....	540
7.2.3.1	Begriffsdefinitionen.....	540
7.2.3.2	Abgrenzung zu mechanischen Koordinatenmessgeräten.....	542
7.2.3.3	Prüfkörper.....	543
7.2.3.4	Prüfung punktförmig antastender Systeme.....	545
7.2.3.5	Prüfung flächenhaft antastender Systeme.....	547
7.3	Optimierung der Aufnahmekonfiguration .....	549
7.3.1	Monte-Carlo-Simulation .....	549
7.3.2	Optimierung der Bündelausgleichung .....	551
7.4	Strategien zur Kamerakalibrierung .....	554
7.4.1	Kalibrierverfahren .....	555
7.4.1.1	Laborkalibrierung .....	555
7.4.1.2	Testfeldkalibrierung .....	555
7.4.1.3	Plumbline-Kalibrierung .....	558
7.4.1.4	Simultankalibrierung .....	558
7.4.1.5	Systemkalibrierung .....	559
7.4.2	Aufnahmekonfigurationen .....	560
7.4.2.1	Kalibrierung mit ebenem Punktfeld .....	560
7.4.2.2	Kalibrierung mit räumlichem Punktfeld .....	561
7.4.2.3	Kalibrierung mit bewegtem Maßstab .....	562
7.4.3	Probleme bei der Simultankalibrierung .....	562
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>566</b>
8.1	Architektur, Archäologie und Denkmalpflege .....	566
8.1.1	Photogrammetrische Bauaufnahme .....	566
8.1.1.1	Dom von Siena .....	567
8.1.1.2	Pulverturm Oldenburg .....	569
8.1.1.3	Haderburg .....	570
8.1.2	3D-Stadt- und Landschaftsmodelle .....	571
8.1.2.1	Visualisierung von Gebäuden .....	571
8.1.2.2	Stadtmodelle .....	572
8.1.2.3	3D-Dokumentation von Pompeji .....	573
8.1.3	Freiformflächen .....	575
8.1.3.1	Statuen und Skulpturen .....	575
8.1.3.2	Große Freiformflächen .....	577
8.1.3.3	Vermessung der Bremer Hanse-Kogge .....	578

8.1.4 Bildmosaike.....	579
8.1.4.1 Bildmosaike zur Kartierung von Dinosaurierspuren .....	579
8.1.4.2 Zentralperspektive Bildmosaike.....	580
8.2 Ingenieurvermessung und Bauwesen .....	582
8.2.1 3D-Erfassung komplexer Objekte .....	582
8.2.1.1 As-Built-Dokumentation .....	582
8.2.1.2 Treppenvermessung.....	583
8.2.2 Deformationsmessungen .....	584
8.2.2.1 Formerfassung großer Stahlkonverter .....	584
8.2.2.2 Deformationsmessungen an Betonwannen.....	585
8.2.3 Materialprüfung.....	587
8.2.3.1 Oberflächenmessung an Mauerfugen .....	587
8.2.3.2 Bauphysikalische Belastungsversuche .....	588
8.2.4 Dach- und Fassadenvermessung.....	589
8.3 Industrielle Messtechnik.....	590
8.3.1 Kraftwerks- und Anlagenbau .....	590
8.3.1.1 Windkraftanlagen .....	590
8.3.1.2 Teilchenbeschleuniger .....	592
8.3.2 Luft- und Raumfahrtindustrie.....	593
8.3.2.1 Vorrichtungsbau .....	593
8.3.2.2 Fertigungskontrolle.....	594
8.3.2.3 Antennenvermessung .....	595
8.3.3 Automobil- und Fahrzeugbau.....	597
8.3.3.1 Rapid Prototyping und Reverse Engineering.....	598
8.3.3.2 Fahrzeugsicherheitsversuch.....	599
8.3.3.3 Fahrzeugdeformationen.....	601
8.3.4 Schiffbau .....	602
8.4 Medizin .....	603
8.4.1 Flächenhafte Objekterfassung .....	604
8.4.2 Navigationssysteme.....	605
8.5 Sonstige Anwendungsbereiche.....	607
8.5.1 Forensische Anwendungen.....	607
8.5.1.1 Unfallvermessung.....	607
8.5.1.2 Tatrekonstruktion .....	609
8.5.2 Naturwissenschaftliche Anwendungen.....	609
8.5.2.1 3D-Rekonstruktion von Spinnennetzen.....	610
8.5.2.2 Beobachtung von Gletscherbewegungen.....	611
8.5.2.3 Erdwissenschaften .....	613
<b>9 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>615</b>
9.1 Lehrbücher und Monographien .....	615
9.1.1 Photogrammetrie .....	615
9.1.2 Optik, Kamera- und Aufnahmetechnik .....	616
9.1.3 Digitale Bildverarbeitung, Computer Vision und Mustererkennung.....	616
9.1.4 Mathematik und 3D-Computergrafik .....	617
9.1.5 Ausgleichungsrechnung und Statistik .....	618
9.1.6 Industriemesstechnik, Optische 3D-Messtechnik, Qualitätssicherung .....	618
9.2 Einführung und geschichtliche Entwicklung.....	619

9.3	Mathematische Grundlagen.....	621
9.3.1	Transformationen und Geometrie.....	621
9.3.2	Ausgleichungsrechnung .....	622
9.4	Aufnahmetechnik .....	622
9.4.1	Optik und Abtastung .....	622
9.4.2	Modellierung und Kalibrierung.....	623
9.4.3	Sensoren und Kameras .....	625
9.4.4	Signalisierung und Beleuchtung.....	627
9.5	Analytische Auswerteverfahren .....	627
9.5.1	Analytische Photogrammetrie .....	627
9.5.2	Bündelausgleichung .....	629
9.5.3	Mehrmedienphotogrammetrie .....	630
9.5.4	Panoramaphotogrammetrie.....	631
9.5.5	Phasenbasierte Messverfahren.....	631
9.6	Digitale Bildverarbeitung.....	632
9.6.1	Grundlagen und Bildverarbeitung .....	632
9.6.2	Mustererkennung und Bildzuordnung .....	632
9.7	Messaufgaben und Messsysteme.....	634
9.7.1	Übersichten.....	634
9.7.2	Messung von Punkten und Konturen.....	635
9.7.3	Messung von Oberflächen.....	635
9.7.4	Dynamische und mobile Systeme .....	637
9.7.5	Laser.....	637
9.8	Projektplanung und Optimierung .....	638
9.8.1	Projektplanung und Simulation .....	638
9.8.2	Qualitätskriterien.....	639
9.8.3	Kamerakalibrierung.....	639
9.9	Anwendungsbeispiele.....	640
9.9.1	Architektur, Archäologie, Stadtmodelle.....	640
9.9.2	Ingenieur- und Industrieanwendungen .....	641
9.9.3	Medizin, Forensik, Naturwissenschaften.....	643
9.10	Sonstige Informationsquellen.....	644
9.10.1	Normen und Richtlinien .....	644
9.10.2	Arbeitsgruppen und Konferenzen.....	645
<b>Abkürzungen</b>		646
<b>Bildnachweis</b>		649
<b>Stichwortverzeichnis</b>		653