

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ingenieurvermessung und industrielle Messtechnik – Einführung</b> .....	17
1.1	Aufgabe der industriellen Messtechnik .....	17
1.2	Messgenauigkeit .....	19
1.2.1	Mittelwert, Standardabweichung und Vertrauensbereiche .....	19
1.2.2	Messunsicherheit .....	24
1.2.3	Vektorielle Messgrößen .....	27
1.3	Toleranzen .....	31
1.3.1	Toleranzen für Längenmaße .....	31
1.3.2	Form- und Lagetoleranzen .....	34
1.3.3	Messtoleranz .....	36
1.3.3.1	Messunsicherheit und Fertigungstoleranz .....	36
1.3.3.2	Überlagerung von Toleranzen .....	37
1.3.3.3	Gesamt toleranz, Messtoleranz, Messgenauigkeit .....	40
1.4	Literaturverzeichnis .....	44
<b>2</b>	<b>Messverfahren und Geräte</b> .....	45
2.1	Längenmessungen .....	45
2.1.1	Abstandsmessungen im Nahbereich bis 1 m .....	45
2.1.2	Längenmessungen im Bereich bis zu 40 m .....	50
2.1.2.1	Interferometrische Längenmessungen .....	50
2.1.2.2	Zur Genauigkeit der interferometrischen Längenmessung .....	52
2.1.2.2.1	Ermittlung der aktuellen Laserwellenlänge .....	53
2.1.2.2.2	Weitere Fehlerquellen .....	58
2.1.2.2.3	Genauigkeitsabschätzung für ein Präzisions-Messsystem .....	63
2.1.2.3	Messung mit Invarbändern oder Drähten .....	66
2.1.2.4	Elektrooptische Distanzmessung .....	70
2.1.3	Literaturhinweise .....	75

2.2	Winkelmessungen .....	76
2.2.1	Winkelmessung mit dem Theodolit.....	76
2.2.2	Winkelmessung mit Laserinterferometer .....	78
2.2.2.1	Winkelinterferometer .....	78
2.2.2.2	Winkelmessung mit Mehrachs-Interferometer-Systemen .....	80
2.2.2.2.1	System aus mehreren Planspiegel-Interferometern .....	80
2.2.2.2.2	Differenzial-Interferometer .....	81
2.2.2.2.3	Dreiachs-Interferometer .....	83
2.2.3	Literaturhinweise.....	85
2.3	Neigungsmessung.....	86
2.3.1	Definition .....	86
2.3.2	Neigungssensoren.....	87
2.3.2.1	Maschinenwasserwaagen .....	87
2.3.2.2	Elektronische Neigungsmesser.....	88
2.3.2.3	Prüfung von Neigungsmessern.....	91
2.3.3	Literaturhinweise.....	95
2.4	Präzisionshöhenmessungen .....	96
2.4.1	Geometrisches Nivellement.....	96
2.4.1.1	Nivelliere mit Röhrenlibelle .....	97
2.4.1.2	Kompensatornivelliere .....	97
2.4.1.3	Digitale Nivelliere .....	98
2.4.1.4	Allgemeines.....	99
2.4.2	Trigonometrische Höhenmessung .....	100
2.4.2.1	Genauigkeit der Trigonometrischen Höhenmessung.....	102
2.4.2.2	Einfluss von Refraktion und Erdkrümmung.....	103
2.4.3	Hydrostatische Höhenmessung .....	105
2.4.3.1	Einflüsse von Luftdruck, Schwere und Temperatur .....	106
2.4.3.2	Weitere Fehlerquellen .....	111
2.4.3.2.1	Einfluss von Luftblasen im Verbindungsschlauch .....	111
2.4.3.2.2	Schwingung der Wassersäulen in vertikaler Richtung und Einwirkung von Kapillarkräften.....	112
2.4.3.3	Hydrostatische Messsysteme und ihre Kalibrierung .....	113
2.4.4	Literaturhinweise.....	116

2.5	Fluchtungsmessungen .....	117
2.5.1	Alignement mit optischen Systemen .....	117
2.5.1.1	Das Fluchtfernrohr .....	117
2.5.1.2	Einfluchten mit dem Theodolit.....	118
2.5.1.3	Fluchten mit Autokollimation .....	121
2.5.1.4	Gerademessung mit Interferometer .....	126
2.5.1.5	Gerademessung mit Laser.....	130
2.5.2	Alignement mit gespannten Drähten .....	132
2.5.2.1	Ein Draht als Referenz .....	132
2.5.2.2	Drahtmessmonitore .....	135
2.5.3	Literaturhinweise.....	136
2.6	Punktmarkierung und Zentriereinrichtungen.....	137
<b>3</b>	<b>Dreidimensionale Koordinatenbestimmung .....</b>	<b>142</b>
3.1	Vorbemerkungen.....	142
3.2	Theodolitmesssysteme.....	143
3.2.1	Grundprinzip .....	143
3.2.2	3-D-Industriemesssysteme .....	145
3.2.3	Anwendersoftware .....	146
3.2.4	Genauigkeit eines Theodolitmesssystems .....	153
3.2.5	Literaturhinweise.....	155
3.3	Polare Messungen .....	156
3.3.1	Elektronische Präzisionstachymeter .....	156
3.3.1.1	Grundlagen.....	156
3.3.1.2	Prinzip der Winkelmessung.....	157
3.3.1.3	Genauigkeit der Winkelmessung.....	158
3.3.1.4	Prinzip der Distanzmessung .....	158
3.3.1.5	Distanzmessung auf retro-reflektierende Folien.....	160
3.3.1.6	Korrekturen und Genauigkeit der Distanzmessung .....	161
3.3.1.7	Mechanischer Aufbau.....	163
3.3.1.8	System Software und Applikationen .....	165
3.3.1.9	Automatische Zielerfassung .....	166
3.3.1.10	Mess-Systeme .....	168

3.3.2	Lasertracker.....	169
3.3.2.1	Grundprinzip und Systemaufbau.....	170
3.3.2.2	Kalibrierung und Systemparameter.....	172
3.3.2.3	Reflektoren.....	174
3.3.2.4	Die wichtigsten Spezifikationen des Lasertrackers LTD500.....	176
3.3.2.5	Messaufgaben, Anwendungen und spezielles Zubehör.....	178
3.3.2.6	Vorteile gegenüber Tachymetern.....	182
3.4	Industriephotogrammetrie.....	183
3.4.1	Grundlagen.....	183
3.4.1.1	Prinzipielle Methoden.....	183
3.4.1.2	Anwendungsbereiche.....	184
3.4.1.3	Verfahrensablauf.....	185
3.4.1.3.1	Aufnahmeplanung.....	186
3.4.1.3.1.1	Genauigkeit.....	186
3.4.1.3.1.2	Aufnahmekonfigurationen.....	189
3.4.1.3.2	Aufnahme- und Auswerteprozess.....	191
3.4.2	Aufnahmetechnik.....	192
3.4.2.1	Aufnahmeprinzipien.....	192
3.4.2.2	Geometrische Grundlagen.....	193
3.4.2.2.1	Innere Orientierung.....	193
3.4.2.2.2	Definition des Bildkoordinatensystems.....	194
3.4.2.2.3	Verzeichnungsparameter.....	195
3.4.2.2.4	Mess- und Teilmesskamera.....	198
3.4.2.2.5	Kalibrierung von Aufnahmesystemen.....	199
3.4.2.3	Aufnahmesysteme.....	201
3.4.2.3.1	Analoge Aufnahmekameras.....	201
3.4.2.3.2	Digitale Aufnahmekameras.....	204
3.4.2.3.2.1	CCD-Videokameras.....	205
3.4.2.3.2.2	Hochauflösende Digitalkameras.....	206
3.4.2.3.2.3	Scanning-Kameras.....	208
3.4.2.4	Praktische Objektaufnahme.....	208
3.4.2.4.1	Auswahlkriterien.....	208
3.4.2.4.2	Objektsignalisierung.....	210
3.4.2.4.2.1	Retro-reflektierende Zielmarken.....	211

3.4.2.4.2.2	Marken mit codierter Punktnummer .....	212
3.4.2.4.2.3	Exzentrische Signalisierungsmittel .....	212
3.4.2.4.3	Beleuchtungstechniken.....	213
3.4.2.4.3.1	Blitzgeräte .....	213
3.4.2.4.3.2	Projektoren .....	214
3.4.3	Analytische Auswerteverfahren .....	215
3.4.3.1	Übersicht .....	215
3.4.3.2	Orientierungsverfahren.....	216
3.4.3.2.1	Äußere Orientierung.....	216
3.4.3.2.2	Kollinearitätsgleichungen.....	216
3.4.3.2.3	Orientierung eines Einzelbildes.....	218
3.4.3.2.3.1	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	218
3.4.3.2.3.2	Direkte Lineare Transformation (DLT).....	219
3.4.3.2.4	Orientierung eines Stereobildpaares.....	219
3.4.3.2.4.1	Relative Orientierung .....	220
3.4.3.2.4.2	Absolute Orientierung .....	220
3.4.3.2.5	Bündeltriangulation .....	221
3.4.3.2.5.1	Allgemeines.....	221
3.4.3.2.5.2	Passpunkte und Strecken .....	223
3.4.3.2.5.3	Berechnung von Näherungswerten.....	224
3.4.3.2.5.4	Selbstkalibrierung.....	225
3.4.3.3	Einzelbildauswertung .....	225
3.4.3.3.1	Auswertung in Objektebenen .....	225
3.4.3.3.2	Projektive Entzerrung.....	226
3.4.3.4	Stereoskopische Auswertung .....	227
3.4.3.4.1	Prinzip der Stereobildmessung .....	227
3.4.3.4.2	Punktbestimmung im Stereonormalfall .....	227
3.4.3.4.3	Punktbestimmung bei allgemeiner Stereoanordnung .....	228
3.4.3.5	Mehrbildauswertung.....	229
3.4.3.5.1	Räumlicher Vorwärtsschnitt.....	229
3.4.3.5.2	Messung geometrischer Elemente .....	230
3.4.3.6	Überprüfung der Messgenauigkeit .....	231
3.4.3.6.1	Messgenauigkeit der Bildkoordinaten .....	232
3.4.3.6.2	Genauigkeit der Inneren Orientierung.....	233
3.4.3.6.3	Genauigkeit der Objektkoordinaten .....	233
3.4.3.6.4	Längenmessunsicherheit .....	234

3.4.4	Photogrammetrische Messsysteme.....	236
3.4.4.1	Messung von Bildkoordinaten.....	236
3.4.4.1.1	Komparatoren.....	236
3.4.4.1.1.1	Prinzipieller Aufbau .....	236
3.4.4.1.1.2	Digitale Bildkomparatoren .....	237
3.4.4.1.2	Digitale Punktmessung.....	239
3.4.4.1.2.1	Bildschirmmessung .....	239
3.4.4.1.2.2	Schwerpunktverfahren .....	240
3.4.4.1.2.3	Korrelationsverfahren.....	240
3.4.4.1.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung.....	241
3.4.4.1.2.5	Kantenorientierte Messverfahren .....	243
3.4.4.2	Stereoskopische Auswertesysteme .....	245
3.4.4.2.1	Prinzip des Analytischen Plotters.....	245
3.4.4.2.2	Objektauswertung.....	246
3.4.4.3	Digitale Mehrbildmesssysteme .....	247
3.4.4.3.1	Interaktive Auswertesysteme .....	247
3.4.4.3.2	Mobile Punktmesssysteme .....	248
3.4.4.3.3	Stationäre industrielle Online-Messsysteme .....	251
3.4.4.3.4	Systeme zur Oberflächenmessung.....	252
3.4.5	Industrielle photogrammetrische Anwendungsbeispiele .....	253
3.4.5.1	Anwendungen im Automobilbau .....	254
3.4.5.2	Anwendungen in Luft- und Raumfahrt .....	256
3.4.5.3	As-Built-Dokumentation im Anlagenbau.....	259
3.4.5.4	Photogrammetrische Aufnahme von Großbauwerken.....	260
3.4.5.5	Photogrammetrie im Schiffbau.....	262
3.4.6	Literatur.....	263
3.5	Koordinatenmessgeräte .....	269
3.5.1	Einführung.....	269
3.5.2	Prinzipieller Aufbau .....	269
3.5.3	Verschiedene Bauformen von KMG und ihre typischen Anwendungen .....	271
3.5.4	Punktweises Messen durch Antasten.....	273
3.5.5	Genauigkeit .....	273
3.5.6	Software .....	274
3.5.7	Literaturhinweis .....	275

<b>4</b>	<b>Beispiele aus der Praxis</b> .....	276
4.1	Messungen an Beschleunigeranlagen .....	276
4.1.1	Einführung .....	276
4.1.2	Aufbau und Wirkungsweise von Teilchenbeschleunigern .....	277
4.1.2.1	Grundprinzip .....	277
4.1.2.2	Speicherringanlagen .....	278
4.1.3	Geodätische Aufgaben bei der Beschleunigervermessung .....	282
4.1.3.1	Einleitung .....	282
4.1.3.2	Forderungen an die Aufstellgenauigkeit der Komponenten .....	283
4.1.3.3	Festpunktfeld .....	286
4.1.3.4	Grundjustierung der Beschleunigerkomponenten .....	289
4.1.3.5	Feinjustierung der Beschleunigerkomponenten .....	290
4.1.3.5.1	Gesamtvermessung des Beschleunigers .....	291
4.1.3.5.2	Reduktion der Messungen auf das Bezugskordinaten- system .....	297
4.1.3.5.2.1	Reduktion der gemessenen Schrägstrecken .....	298
4.1.3.5.2.2	Reduktion der Horizontalrichtungen .....	298
4.1.3.5.2.3	Reduktion der Zenitwinkel .....	299
4.1.3.5.2.4	Umrechnung nivellitisch bestimmter Höhen .....	299
4.1.3.5.2.5	Reduktion der gemessenen Neigungen .....	301
4.1.3.5.3	Auswertung der Messungen auf dem Beschleunigerumfang .....	301
4.1.3.5.4	Kontrolle von Beschleunigern mit dynamischen Messsys- temen .....	304
4.1.3.5.5	Aufbau und Überwachung der Detektoren in den Wechsel- wirkungszonen .....	306
4.1.4	Literaturhinweise .....	309
4.2	Messungen in der Automobilindustrie .....	311
4.2.1	Bedeutung der Messungen .....	311
4.2.2	Automobilentwicklung mit Hilfe von Simultaneous En- gineering .....	312
4.2.3	Messungen in der Konzeptphase .....	314
4.2.4	Messungen in der Entwurfs- und Detaillierungsphase .....	316
4.2.5	Messungen in Serienreifmachung und Serie .....	319

4.2.6	Literaturhinweise.....	324
4.3	Messungen im Flugzeugbau .....	326
4.3.1	Kombination von Messmaschine und Theodolitsystem .....	326
4.3.1.1	Einleitung .....	326
4.3.1.2	Messaufgabe.....	326
4.3.1.3	Genauigkeitsbetrachtung .....	328
4.3.1.4	Messaufbau .....	330
4.3.1.5	Messanordnung für die Theodolite.....	331
4.3.1.6	Messung mit dem optischen System .....	332
4.3.1.7	Messung mit der Messmaschine.....	334
4.3.1.8	Auswertung der Messung.....	335
4.3.1.8.1	Aufbereitung der Messergebnisse des optischen Systems.....	335
4.3.1.8.2	Verknüpfung von Messmaschine und optischem System .....	336
4.3.1.8.3	Darstellung der Ergebnisse.....	337
4.3.1.9	Zusammenfassung .....	338
4.3.2	Vermessung des Airbus A319 .....	338
4.3.2.1	Einleitung .....	338
4.3.2.2	Grundprinzip der Untersuchung .....	339
4.3.2.3	Planung und Durchführung der Vermessung .....	341
4.3.2.4	Auswertung .....	344
4.3.2.5	Zusammenfassung .....	346
4.3.3	Lasertracking als elektronische Lehre .....	347
4.3.3.1	Einleitung .....	347
4.3.3.2	Messaufgabe.....	347
4.3.3.3	Abnahmelehre .....	348
4.3.3.4	Lasertracker.....	349
4.3.3.4.1	Prinzip der 3-D-Laserinterferometrie .....	349
4.3.3.4.2	Reflektoren für die Messung .....	350
4.3.3.4.3	Auflösung und Genauigkeit des Lasertrackers .....	351
4.3.3.4.4	Messaufbau .....	351
4.3.3.4.5	Messung des Seitenruders .....	352
4.3.3.4.6	Zusammenfassung .....	354
4.3.4	Literaturverzeichnis.....	354
4.4	Anwendungen im Schiffbau .....	355
4.4.1	Einleitung .....	355



4.4.2	Erfassung von Deformationen und Schrumpfungen von Decksektionen .....	356
4.4.2.1	Aufmessen von Oberflächen von Decksektionen mittels Laser-scanner .....	357
4.4.2.1.1	Anforderungen an die Messeinrichtung .....	357
4.4.2.1.2	Auswahl des Messsystems .....	358
4.4.2.1.3	Ausführung.....	358
4.4.2.1.4	Auswertung der Messdaten .....	360
4.4.2.1.5	Analyse der Messgenauigkeit.....	362
4.4.2.2	Photogrammetrische Vermessung von Wärmeeinwirkungen an einer Decksektion.....	363
4.4.2.2.1	Anforderungen .....	364
4.4.2.2.2	Durchführung der Messung.....	365
4.4.2.2.3	Auswertung der Daten.....	367
4.4.2.2.4	Analyse der Messgenauigkeit.....	369
4.4.3	Montageunterstützende Messung von Sektionen und Groß-sektionen .....	370
4.4.3.1	Anforderungen an das Messsystem .....	371
4.4.3.2	Aufbau des Messsystems.....	372
4.4.3.3	Software zur Erfassung und Verarbeitung von 3-D-Koordinaten.....	374
4.4.3.3.1	Aufnahme der Messwerte.....	374
4.4.3.3.2	Darstellung der Messung und deren Auswertung.....	378
4.4.3.3.3	Transformation und weitere Berechnungen .....	379
4.4.3.4	Analyse der Messgenauigkeit.....	381
4.4.3.5	Beispiel - Montage von Wellenbockarmen .....	385
4.4.4	Ausblick .....	387
4.4.5	Literaturverzeichnis.....	387
4.5	Kontrolle von NC-Maschinen mit dem Lasertracker .....	388
4.5.1	Einleitung .....	388
4.5.1.1	Leistungsfähigkeit von NC-gesteuerten großen Bohrwerken .....	389
4.5.1.2	Positionierung des Bohrers mit dem Lasertracker .....	389
4.5.2	Bohrwerksteuerung mit Lasertracker bei Boeing .....	392
4.5.2.1	Verfahrensweise .....	392

4.5.2.1.1	Anwendungen und Zeitaufwand.....	393
4.5.2.1.2	Systemaufbau .....	393
4.5.2.1.3	Der Arbeitsprozess .....	394
4.5.2.1.4	Ergebnisse .....	396
4.5.2.2	Testmessungen .....	396
4.5.2.2.1	Kontrolle der Maschineneinstellungen.....	396
4.5.2.2.2	Bohrtests.....	397
4.5.2.2.3	Zusammenfassung .....	399
4.5.2.3	Weiterentwicklung des SOMaC-Systems .....	399
4.5.2.3.1	Verbesserung der Messsysteme.....	400
4.5.2.3.2	Verbesserung der Messverfahren .....	401
4.5.2.3.2.1	Vielfach-Messsysteme.....	401
4.5.2.3.2.2	Automatische Teile - Orientierung.....	401
4.5.2.3.2.3	Fünf-Achsen-Kontrolle .....	401
4.5.2.3.2.4	Kontrolle von Industrie-Robotern .....	403
4.5.2.3.2.5	Steuerrechner mit offener Architektur.....	403
4.5.2.3.2.6	Dynamische Kontrollen.....	403
4.5.2.4	Schlussfolgerungen .....	403
4.5.3	Literaturhinweise.....	404
4.6	Anwendungen von polaren Messsystemen – Verfahrens- technischer Anlagenbau in der chemischen Industrie.....	405
4.6.1	Messaufgaben im verfahrenstechnischen Anlagenbau .....	405
4.6.2	Adaptierung eines Polarmesssystems an die Messaufgaben im verfahrenstechnischen Anlagenbau .....	408
4.6.2.1	Messhilfsmittel .....	409
4.6.2.2	Systemsoftware .....	410
4.6.3	Erfahrungen, Nutzen, Ausblick .....	412
4.6.4	Literaturangaben .....	413
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>415</b>