

# HANSER



Inhaltsverzeichnis

Wirtschaftliche Mikrobearbeitung

Wege zur Perfektion mit Luftlagertechnik und optischer Messtechnik

Herausgegeben von Peter Langenbeck

ISBN: 978-3-446-41340-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41340-5>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Danksagung .....	VII
Einleitung .....	XXIII
Literatur .....	XXIX
<b>Teil 1 – Luftlagerung – ein Weg zur störungsfreien Bewegungsgeometrie.....</b>	<b>1</b>
1.1 Was heißt hier störungsfrei bzw. störungsarm? Der typische Fall:.....	5
1.1.1 Lastverschiebung auf $\mu\text{m}$ -dünnem Luftfilm .....	5
1.2 Luftdruck-Schmiermittel, erläutert durch simple Modelle .....	6
1.2.1 Luftlagerfunktion durch Einlassdrosselung (Unterbergers Weg).....	7
1.2.2 Luftlagerfunktion durch Auslassdrosselung (Adams Weg) .....	9
1.2.3 Luftlager mit Auslassdrosselung; qualitative Abschätzungen von Belastbarkeit, Wirkungsgrad und Steife .....	10
1.3 Planarführung mittels Luftlagerfüßen auf ebenen Flächen .....	13
1.3.1 Bekannte Luftlagerfüße für nahezu ideale Bewegungsgeometrie .....	13
1.3.2 Gute Lager – schlecht durch schwache Abstützung .....	14
1.3.3 Ringförmige Druckversorgung bei Füßen und Spindelspurscheiben.....	16
1.4 Schräge ersetzt Stufe (= AD-Keiltechnik) .....	18
1.4.1 In der Keiltechnik versteckte Fehler .....	19
1.5 Vielseitig verwendbare Lagerungsgeometrie durch Stufe-/Keil-Technik.....	19
1.6 Luftlagerspindeln mit mehrteiligem Rotor.....	20
1.6.1 Die „Professional Instruments“ Block-Head-Spindel.....	20
1.6.2 Die Spindellösung nach Watt (General Utility Hydrostatic Spindle).....	21
1.6.2.1 Watt-Intop-Luftlagerspindel, in beiden Achsrichtungen selbstkompensierend.....	23
1.6.2.2 AD-Lager mit selbstregelnden Eigenschaften – flexible Membranen.....	24
1.6.2.3 Typische Anwendung der selbstkompensierenden Watt-Intop-Spindel .....	25
1.6.3 Stand der Technik i. S. stationäre Position trotz variabler Last durch selbstregelnde Planlager.....	25
1.6.4 Was tun gegen die Taumelneigung und die radiale Schwäche der Wattschen Spindel? .....	27
1.6.5 Klonen .....	28

<b>1.7</b>	<b>Vielseitige Verwendung der Lagerung „Kugel in Kalotte“</b> .....	29
1.7.1	Doppel-Kalotten-Lagerspindeln.....	29
1.7.2	... als luftgelagerte „Spitzen“ .....	30
1.7.3	Sheltons „Veritas“-Linearitäts-Messung .....	31
1.7.4	Die luftgelagerte Kugel, in „Vollform“ .....	32
1.7.5	... als kardanisches Kreiselager .....	32
1.7.6	Kugelkalotte zur Zentrier-Einstellung ( $\alpha$ , $\beta$ , X, Y) auf Drehtischen .....	33
<b>1.8</b>	<b>ADL durch Furchentechnik in Spindeln und Linearführungen</b> .....	33
1.8.1	„Grooved bearing“ – Lagerflächen mit Furchen.....	33
1.8.1.1	Flächen und Furchen in gleicher Aufspannung mit gleichem Werkzeug .....	34
1.8.1.2	Wirkung der Furchen in aerostatischen Lagern .....	36
1.8.2	Preiswerte Herstellung der Furchen – Hülsen auf Stangen auch bei Unikaten.....	37
1.8.3	AD-Furchen, flächenkonform auf sphärischen Flächen.....	38
1.8.4	Gleichheit der Furchen untereinander .....	39
<b>1.9</b>	<b>Konstruktionsvorteile durch ADL</b> .....	40
1.9.1	AD-Lagerung in Linear- und Planarführungen.....	40
1.9.2	Vorspannung durch Unterdruck .....	40
1.9.3	Zylinder- bzw. Stangenlager für Linearführungen.....	40
1.9.4	AD-Zylinderlagerungen mit axialer pneumatischer Vorspannung: Einteiliger Rotor mit zwei Durchmessern.....	42
1.9.5	Vorschubbewegung mittels pneumatischer Vorspannung des Rotors nach Abschnitt 1.9.4 .....	44
1.9.6	Die pneumatische Vorspannung von Spindeln – Alternativen .....	45
1.9.6.1	Typische Anwendung eines AD-Zylinderluftlagers: Luftlagerbohrspindel.....	45
1.9.6.2	Longitudinal pendelnde Schleifspindel .....	47
<b>1.10</b>	<b>Der Zwang zur Wirtschaftlichkeit, Luftlagerspindeln mit einteiligem Rotor</b> .....	48
1.10.1	Disc Drives – Ultragenauigkeit im Alltag zu Wegwerfpreisen.....	48
1.10.2	Einteiliger Rotor für Axial- und Radiallagerung.....	48
1.10.3	Einteiliger Rotor – Forderungen an seine Herstellung.....	48
<b>1.11</b>	<b>Die Toroidspindel: Nur ein Bauteil für radiale und axiale Last</b> .....	49
1.11.1	Weitgehende Erfüllung der Wunschliste .....	49
1.11.2	Herstellung des Toroids.....	53
1.11.3	„Dünnring“-Toroidlager .....	55
1.11.4	Zahlreiche Anwendungen für „Dünnring-Toroid-Luftlager“(DTL) .....	56
1.11.5	Optische Prüfung des Toroids?.....	56
1.11.6	Motorisierung der Toroidspindel .....	56
<b>1.12</b>	<b>Allgemeine Eigenschaften der Luftlagerungen</b> .....	56
1.12.1	Two in One – konstruktive Vorteile .....	56
1.12.2	Luftlager verhalten sich wie Federn .....	59
1.12.2.1	Reihenschaltung.....	59
1.12.2.2	Parallelschaltung.....	60

1.12.2.3	Gute Luftlagerspindeln schlecht gemacht .....	62
1.12.4.1	Ein Beispiel aus der Mikrobearbeitung .....	63
1.12.4.2	Das Gleiche auch im „Schwermaschinenbau“ .....	63
1.12.4.3	Ideal ungünstige Antriebe .....	64
1.13	Literatur und Adressen für weiterführende Informationen .....	65
<b>Teil 2 – Produktionsverfahren für Luftlagerungen.....</b>		<b>69</b>
2.1	Oberflächen wie in der Optik = Oberflächen für Luftlagerungen .....	71
2.1.1	Läppen – eine Hinterhoftechnik? .....	71
2.1.2	Stamperplatten für CDs – genauer als Optikflächen .....	73
2.2	Läppen von Planscheiben .....	74
2.2.1	Messung der Abtragsrate beim Läppen .....	76
2.2.2	Formeinhaltung der Planläppscheibe .....	76
2.2.3	Wissenswertes Details zum Läppen/Polieren .....	79
2.2.4	Zwei markante Läppzustände .....	79
2.2.5	Körnungen .....	80
2.2.5.1	Homogenisieren eines Schleifbelags – eine Projektskizze.....	81
2.2.5.2	Homogene Körnung beim Läppen – Problemlösung Mikrobearbeitung.....	85
2.2.6	Sünden beim Läppen .....	85
2.3	Reinigen (ausführlich auch bei „Abformen“) .....	85
2.4	Läppen von Harteloxal/Aluminium: bevorzugt für Luftlagerungen.....	85
2.5	Bewertung des Läppergebnisses – was man visuell sofort erkennt (Abb. 2.7) .....	87
2.5.1	Messen der Planflächenabweichungen mit dem Interferometer .....	88
2.5.1.1	Gebrauch des Sphärometers (Abb. 2.20).....	89
2.6	Stufen und Taschen für Luftlagerungen in Harteloxal .....	90
2.6.1	ADL-Kreisbahnen in Planscheiben läppen.....	90
2.7	Hilfsmittel zum Korrigier-/Plan-Läppen in Handarbeit.....	91
2.8	Läppen von Kugelabschnitten .....	91
2.8.1	Kugelflächengenerator (Läppen mit loser Körnung) .....	91
2.8.2	Kugelflächengenerator (Läppen mit gebundener Körnung).....	95
2.8.3	Mögliche Fehler im Sphärengenerator.....	96
2.8.4	Erfolgreiche Spindelzucht .....	97
2.9	Lose oder gebundene Körnung? .....	97
2.9.1	Vom Läppen zum Schleifen und umgekehrt .....	97

2.9.2	Gebundene Körnung in Hausmacher-Schleifscheiben .....	98
2.9.3	Wo lohnt das Schleifen? .....	98
2.9.4	Festeinstellung (Schleifring) ersetzt Selbsteinstellung (Läppring) .....	99
2.10	Der entartete Sphären-Generator .....	100
2.11	Reinigung – Befreiung vom Lappschlamm.....	103
2.12	Das Sphärometer .....	104
2.13	Kugelfertigung – immer bei Null anfangen?.....	104
2.14	Literatur und Adressen für weiterführende Informationen.....	104
<b>Teil 3 – Abformtechnik.....</b>		<b>107</b>
3.1	Einführung.....	109
3.2	Sicherstellung von Haftung und Trennung der ausgehärteten Gleitbelagschicht.....	109
3.2.1	Trennen der Abformschicht.....	111
3.2.2	Vorbereitung des Haftgrundes – Entfetten, Reinigen.....	112
3.2.3	Vorbereitung der Abformung .....	114
3.2.4	Mischen der Komponenten und Extrudieren/Intrudieren in das Abformobjekt .....	116
3.2.5	Vorrichtung vereinfacht Komponentenmischung.....	117
3.2.6	Zwischenschichten, entfernbar und andere.....	117
3.2.6.1	Trennschichten alternativ zu Nickel?.....	118
3.2.6.2	Abzuraten: Luftspalt durch Lappen „Rotor / Stator“ .....	118
3.2.7	„Taschen“ für Luftlager mit Einlassdrosselung.....	119
3.2.8	Einbau von Einlassdrosseln, Düsen.....	119
3.2.8.1	Die rudimentäre handwerkliche Ausführung ausgedehnter Lagerflächen.....	121
3.3	Läppen und Polieren der Moglice-Schichten .....	122
3.4	Stufen und Taschen für AD-Luftlagerungen .....	124
3.4.1	Abformung Planlager (AD) – Problem Kante.....	125
3.4.2	Zylinderlager in AD-Technik (Abformen von Zylindern).....	125
3.4.2.1	Kalkül mit Ausdehnungskoeffizienten und Wettlauf gegen die Zeit.....	126
3.4.2.2	Preiswerte AD-Lagerung von Zylindern und Wellen (Halbschalen).....	127
3.4.2.3	Planung von Versorgungs-Nuten in Luftlager Flächenpaarungen .....	127
3.5	Moglice in Linearführungen – EDL oder ADL? .....	128
3.6	Läppen mit in Moglice gebundener Körnung (Hausmacher-Schleifscheiben) .....	128

3.7	Die Suspension.....	129
3.8	Moglice als Fugenfüller.....	129
3.9	Moglice-artiger abformbarer Bremsbelag.....	129
3.10	Havarie.....	130
3.11	Reinigung von Moglice-Schichten.....	130
3.12	Andere Abformmaterialien .....	130
3.13	Abschließende Empfehlung .....	130
3.14	Literatur und Adressen für weiterführende Informationen.....	131
<b>Teil 4 – Rigorose messtechnische Prüfung von Luftlagerspindeln vor ihrem Einsatz .....</b>		<b>135</b>
4.1	<b>Einführung.....</b>	<b>137</b>
4.1.1	Messtechnische Untersuchung der ED-Luftlagerspindel vom Typ Watt-Intop.....	137
4.1.2	Statisches Verhalten der Spindel, Steife und Messungen.....	138
4.1.3	Prüfstand .....	139
4.1.4	Messaufbau für axiale Belastung.....	139
4.1.4.1	Messaufbau für radiale Belastung .....	140
4.1.5	Kalibrierung der Belastungseinrichtung .....	141
4.1.5.1	Kalibrierung der Messtaster .....	141
4.1.6	Versuchsdurchführung.....	142
4.1.6.1	Tragfähigkeitsgrenzen .....	142
4.1.7	Ergebnisse bei radialer Belastung .....	144
4.1.8	Zusammenfassung des statischen Verhaltens.....	145
4.2	<b>Über synchrone Abweichungen von Rund- und Planlauf.....</b>	<b>145</b>
4.2.1	Einführung - Luftlagerspindel = Rundlaufreferenz .....	145
4.2.2	Die gleichförmige Abweichung vom Rundlauf der Drehachse (GAR).....	149
4.2.3	Die Rundlauffalle.....	149
4.2.4	Messung der gleichförmigen Abweichung vom Rundlauf (GAR) .....	151
4.2.4.1	Messung der lokalen Abweichung des Kugelradius mit dem Interferometer .....	154
4.2.5	GAR und uGAR bei höheren Drehzahlen.....	155
4.2.6	Andere Messmöglichkeiten der GAR .....	155
4.3	<b>Messung der uGAR, Modellbetrachtung.....</b>	<b>157</b>
4.3.1	Fazit nach der Modellbetrachtung .....	158
4.3.2	Anmerkungen zur Überarbeitung eines Rotors auf der Spindel .....	159

4.3.3	Wesentliches Ergebnis: Klonen .....	160
4.3.4.	Gestaltung einer Werkstückspindel für „Normal-“ bzw. „Referenz“-Fertigung .....	160
4.3.5	Zylinder-Rohr: perfekt konzentrische Zylinderflächen.....	162
<b>4.4</b>	<b>Abweichung vom Planlauf.....</b>	<b>162</b>
<b>4.5</b>	<b>Die Taumelbewegung (GAW und uGAW) .....</b>	<b>164</b>
4.5.1	Wo stört die gleichförmige Taumelabweichung? .....	165
<b>4.6</b>	<b>Messung der GAW/interferometrische Beobachtung .....</b>	<b>166</b>
4.6.1	Die messtechnische Erwartung.....	167
4.6.2	Justage von Interferometer und Referenzspiegel .....	169
4.6.3	Bewertung der GAW- und uGAW-Interferogramme .....	169
4.6.3.1	Bessere Empfindlichkeit der Streifenablesung.....	170
<b>4.7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>173</b>
<b>4.8</b>	<b>Literatur und Adressen für weiterführende Informationen.....</b>	<b>173</b>
<b>Teil 5</b>	<b>Planung einer luftgelagerten, hoctourigen Spindel für optische Scanner .....</b>	<b>175</b>
<b>5.1</b>	<b>Genauigkeitsforderungen.....</b>	<b>177</b>
5.1.1	Planflächen mit Spezifikation wie für Optik .....	177
5.1.2	Lagertyp .....	178
5.1.2.1	Die Steife .....	178
<b>5.2</b>	<b>Funktion der Radiallagerung.....</b>	<b>179</b>
<b>5.3</b>	<b>Reibleistung .....</b>	<b>181</b>
<b>5.4</b>	<b>Die Strömung durch den Zylinderspalt.....</b>	<b>182</b>
<b>5.5</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse.....</b>	<b>183</b>
<b>5.6</b>	<b>Zentralscanner, aerodynamische Ausführung .....</b>	<b>183</b>
<b>5.7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>184</b>
<b>5.8</b>	<b>Literatur und Adressen für weiterführende Informationen.....</b>	<b>184</b>

<b>Teil 6 – Mikrobearbeitung – Spiegeloberflächen durch spanende Bearbeitung</b> .....	187
<b>6.1 Bekanntes Objekt Zylindertrommel, Spezifikationen</b> .....	191
6.1.1    Procedere.....	191
6.1.2    Erster Kontakt mit dem Werkzeug aus Naturdiamant.....	192
6.1.3    Die Linearführung.....	193
6.1.4    Der Vorschub.....	194
6.1.5    Einrichten – Messen.....	194
6.1.6    Die Produktion beginnt.....	195
<b>6.2 Die Zylinderfertigung begleitende Messtechnik</b> .....	198
6.2.1    Messsonden.....	198
6.2.1.1    Absoluter Durchmesser.....	198
6.2.2    Interferometrisch.....	198
6.2.3    In-Process-Beobachtung der durch die gedrehte Gitterstruktur bewirkten Lichtbeugung.....	199
6.2.4    Die Kosmetik.....	201
<b>6.3 Schnellprüfung der Werkzeugschneide, Eintauchschnitt</b> .....	201
<b>6.4 Unwuchtüberwachung</b> .....	202
<b>6.5 Werkzeug-Justage – Rauheit</b> .....	202
6.5.1    Abschluss: Messung des Durchmessers der Walzen – Abspannen, Verpacken.....	202
<b>6.6 Andere ultragenauere Walzen</b> .....	203
6.6.1    Megawalzen für die grafische Industrie.....	203
6.6.2    Ultragenauere Walzen im Alltag.....	203
6.6.2.1    Dünne Folien.....	203
6.6.2.2    Briefumschläge mit Fenster.....	204
6.6.3    Innenzylinder – ein anspruchsvolles Werkstück.....	205
<b>6.7 Das Einzahn-Diamantwerkzeug – was der Nutzer vorab wissen sollte</b> .....	206
6.7.1    Schnittkräfte am Diamantwerkzeug.....	208
6.7.2    Werkzeugradien, Nasenradius und Kanten-Rundungsradius.....	209
<b>6.8 Zylinder aus nicht mit Einkorndiamant zerspanbarem Material</b> .....	210
6.8.1    Zylinder-Normale.....	211
6.8.2    Eine Herausforderung: Zylinder-Normal aus Zerodur.....	212
6.8.2.1    Projektplanung.....	213
6.8.2.2    Experimentelles Vorgehen.....	214
6.8.3    Der Zerodur-Ring.....	216
6.8.3.1    Innenzylinder: Außenzylinder dient als Hilfsluftlager.....	216
6.8.4    Bedeutung der in Kap. 6.8 berichteten Ergebnisse.....	217



<b>6.9</b>	<b>Kontinuierlicher Schnitt mit Einzahn-Diamant, variable Schnittgeschwindigkeit, duktiles Metall</b> .....	217
6.9.1	Diamantgedrehte Spiegelflächen zur Inspektion von Bewegungsfehlern .....	217
6.9.1.1	Planung der interferometrischen Messung.....	217
6.9.1.2	Versuchsdurchführung.....	218
6.9.1.3	Weitere Untersuchung der Komponenten einer Drehvorrichtung .....	220
6.9.1.4	Orthogonalität Schlittenachse (X) – Spindelachse (Z).....	221
6.9.2	Motorauswahl .....	221
6.9.2.1	Historisches – gut zu wissen.....	221
6.9.2.2	Glockenanker, Disc Drives.....	222
6.9.2.3	Kollektorloser, elektronisch kommutierter DC-Scheiben-Motor .....	223
6.9.3	Planung einer ultrapräzisen Drehmaschine für Substratplatten – Vergleich zweier Konzepte ....	224
6.9.3.1	Gewöhnliches Maschinenkonzept.....	224
6.9.3.2	Dünne Substratscheiben drehen – oder: „Schlechtes Drehergebnis auf guter Spindel“ .....	224
6.9.3.3	Ungewöhnliches Maschinenkonzept.....	228
6.9.4	Mit dem Diamantwerkzeug schneiden – oder drücken.....	228
<b>6.10</b>	<b>Mikrobearbeitung – Planfräsen mit unterbrochenem Schnitt</b> .....	229
6.10.1	Drehvorrichtung fräst .....	229
6.10.2	Planflächen (Spiegel) fräsen.....	231
6.10.3	Wahl und Einstellung des Werkzeuges .....	231
6.10.3.1	Der Eintauchschnitt .....	232
6.10.4	Wie „gut“ muss ein Diamantwerkzeug sein?.....	234
6.10.5	Eigene Späne beschädigen die Spiegelfläche.....	237
6.10.6	Optimale Schnitttiefe .....	238
6.10.7	Einfache Ermittlung von $R_a$ (roof edge test) .....	238
6.10.8	Die Antwort des Materials .....	240
6.10.9	Luftlager Frässpindel – steif genug? .....	243
<b>6.11</b>	<b>Orthogonalitäts-Einstellung für plane Flächen</b> .....	244
6.11.1	Linearitätsabweichung der Schlittenführung und deren Orthogonalität zur Achse der Frässpindel .....	244
6.11.2	Linearitäts-Normal – hausgemacht .....	245
6.11.3	Zu beachtende Details zum Planfräsen.....	249
6.11.3.1	Nachschneiden – Kreuzschnitt .....	249
6.11.3.2	Einfluss der Aufspannung.....	250
<b>6.12</b>	<b>Werkstücke, die unter den Flugkreis passen</b> .....	251
6.12.1	Planflächen-Interferometer umrüsten – vorab .....	251
6.12.2	Laserspiegel (Plan).....	252
6.12.3	Polygonspiegel – gewöhnlicher Bauart.....	254
6.12.3.1	Aufspannung des Polygons;/Pyramidalwinkelfehler .....	255
6.12.3.2	Feineinstellung des Teilungswinkels .....	255
6.12.3.3	Klemmen, Fixieren.....	256

6.12.3.4	Pyramidalwinkel einrichten .....	257
6.12.4	Polygonspiegel – eher ungewöhnlicher Bauart .....	257
<b>6.13</b>	<b>Fehlerbewegungen und Schnittparameter mit Interferometer messen .....</b>	<b>258</b>
6.13.1	Aufbau der Maschine und des Interferometers zur In-situ-Messung .....	258
6.13.2	Steife des Schlittens – mit dem Interferometer messen .....	260
6.13.3	Steife der Spindel .....	260
6.13.4	Die Rollbewegung, $\Delta A$ = Kippung um X-Achse (= Vorschubachse).....	261
6.13.5	Der Pseudo-Rolleffekt – Einfluss der Schnittkraft .....	263
6.13.6	Einfluss der Spantiefe.....	264
6.13.7	Stützung der interferometrischen Analyse .....	264
6.13.8	Verifizierung der Linearität einer neuen Führung – Neueinrichten des Linearitäts-Normals .....	265
6.13.9	Schlittenfehler oder Vorschubfehler? Fehlersuche .....	265
6.13.10	Justage Spindelachse (X) = Schlittenachse (X) .....	266
6.13.11	Zwei Spindelachsen orthogonal und koplanar.....	267
<b>6.14</b>	<b>Stabile Lage, thermisches Wachstum .....</b>	<b>267</b>
6.14.1	Dreh-Fräsen: Aufgaben und Lösungen.....	269
6.14.1.1	Werkzeug aufsetzen – abheben.....	269
6.14.1.2	„ $\Delta Z$ “ – Anforderungen .....	270
6.14.1.3	Primitive und robuste Z-Feinstzustellung.....	270
6.14.1.4	Der Nano-Pusher .....	271
6.14.1.5	Nano-Pusher beim Drehfräsen – Nützliches Nebenergebnis – Ergänzung zu „ADL in Keiltechnik“ .....	271
6.14.1.6	Repeated Machining .....	272
6.14.1.7	Reflexionsverluste – geringer durch Repeated Machining? .....	275
6.14.1.8	Über ein „not to do“ .....	275
6.14.1.9	Zusammenfassung Repeated Machining.....	276
<b>6.15</b>	<b>Vorschubsysteme.....</b>	<b>277</b>
6.15.1	Untersuchung des Status quo.....	277
6.15.2	Reibrad-Vorschübe .....	278
6.15.2.1	CUPE System .....	278
6.15.2.2	Der Twist-Roller.....	279
6.15.3	Nano-Drive-Getriebe – ultragenau, gleichmäßige Drehbewegung.....	280
6.15.4	Nano-Drive-Motor.....	283
6.15.5	Weitere Reduktion des Untersetzungsverhältnisses T.....	285
6.15.5.1	Winkelschritte von 0,1 Bog.sek. einstellen – ganz primitiv .....	285
6.15.6	Nano-Drive-Umsetzung in Linearbewegung.....	286
6.15.6.1	Nano-Drive für Riemenantrieb .....	286
<b>6.16</b>	<b>Der Sphären-Generator (SG) .....</b>	<b>287</b>
6.16.1	Maschinenkonzeption.....	287
6.16.2	Sphärische Spiegeloberflächen durch Mikrozerspanung .....	287

6.16.2.1	Kurze Radien .....	289
6.16.2.2	Längere Radien .....	289
6.16.2.3	Interferometer auf der Maschine .....	290
6.16.3	Maschinenbauliche Toleranzen im „Sphären-Generator“ (SG).....	291
6.16.3.1	SG - Maschinen-integriertes Interferometer möglich? .....	292
6.16.3.2	Bezugsflächen an sphärischen Bauteilen .....	293
6.16.3.3	Vor der Fertigung Justieren und Fixieren .....	293
6.16.3.4	Einrichten der Spindeln .....	293
6.17	Erzielbare Oberflächen .....	294
6.18	Literatur und Adressen für weiterführende Informationen .....	294
<b>Teil 7</b>	<b>Mechanisch-optische Messungen mittels Interferenz (Interferometer = Stethoskop des Precision Engineers).....</b>	<b>311</b>
7.1	Planflächen (PF), ein Dauerbrenner .....	315
7.1.1.	Bekannte Methode nach Newton und Fizeau - eine Bewertung des Standes der Technik .....	315
7.1.2	Oft wird der Lichteinfallswinkel zur Probe vernachlässigt .....	319
7.1.3	Zunehmender Abstand zwischen Referenz und Probe.....	322
7.2	Übergang vom „Lichthimmel“ zu kollimierter Beleuchtung.....	324
7.2.1	Technische Bedeutung der Schrägen Beleuchtung .....	324
7.2.2	Interferenzkontrast .....	325
7.2.2.1	Wahl der Beschichtung bestimmt Kontrastverlauf .....	326
7.3	Darstellung der Zwei- und Mehrstrahlinterferenz im Vektordiagramm .....	327
7.3.1	Das Fizeau-Mehrstrahl-Interferometer .....	327
7.3.2	Nutzen und Schaden der Vielstrahlinterferenz .....	330
7.3.3	Phasendefekt durch Strahlabwanderung im Fizeau-Interferometer .....	331
7.3.4	Einstellung von $t$ und $\alpha$ (Autolevel).....	333
7.4	Übergang zu HeNe-Laser-Beleuchtung – schärfere Forderungen an die Kollimation .....	334
7.4.1	Akzeptabel gleichförmige Lichtintensität im Bildfeld .....	335
7.5	Kollimation – Autokollimation .....	336
7.5.1	Der Autokollimator .....	336
7.5.2	Zusammenfassung – Einrichten der Kollimation .....	338
7.6	Eine preiswerte, nicht ganz korrekte Lösung für Interferenzprüfung nach Fizeau.....	339
7.7	Die Prüfung der Kollimationsgüte.....	339
7.7.1	Ein brauchbares robustes Prüfgerät.....	343

<b>7.8</b>	<b>Die Prüfung von 90°-Winkeln</b> .....	344
7.8.1	Reversion von Wellenflächen .....	345
7.8.2	Winkelmessung mittels „gerader“ Interferenzstreifen .....	346
7.8.3	Doppelte Empfindlichkeit der Winkelmessung bei Dachkantprismen und Spiegeln .....	347
7.8.4	Plus- oder Minus-Winkelabweichung, Hoch oder Tief bei Flächenfehlern? .....	347
7.8.5	Einfluss der Polarisisation .....	349
<b>7.9</b>	<b>Funktion des Retroreflektors – der „Würfecke“</b> .....	351
7.9.1	Illustratives CCR-Projekt aus der Mikrobearbeitung .....	353
7.9.1.1	CCR – ohne ihn keine Längenmessung/Kalibrierung denkbar .....	353
7.9.1.2	CCR – noch eine messtechnisch hilfreiche Eigenschaft .....	353
7.9.1.3	CCR im Alltag .....	354
7.9.2	Qualitätssicherung der Würfecke bzw. des Retroreflektors (kurz: CCR) .....	355
7.9.3	Noch einmal zur Kollimationsprüfung .....	356
7.9.4	Noch einmal zur Retroreflexion – Kugellinsen.....	358
7.9.4.1	Anwendungen des Kugel-Retroreflektors.....	359
7.9.5	Kollimationsprüfung zur Serienkontrolle der Gleichheit von Radien.....	360
7.9.6	Trennung der Winkelfehler von Flächenfehlern .....	360
7.9.7	Parallelität der Stirnflächen von transparenten Laserkristallstäben .....	361
7.9.8	Kalibrierwürfel .....	364
<b>7.10</b>	<b>Polygonspiegel</b> .....	364
7.10.1	Pyramidalwinkel bei Polygon-Spiegelrädern .....	366
<b>7.11</b>	<b>Interferometrisch kalibrierbare Winkelnormale</b> .....	367
7.11.1	0,1 Bog.sek. Auflösung im Bereich $\pm 15^\circ$ .....	368
<b>7.12</b>	<b>Zentrierung von Mikrolinsen mittels Interferometer</b> .....	368
7.12.1	Zentrier-Interferometrie .....	369
7.12.1.1	Steigerung der Messempfindlichkeit .....	370
7.12.1.2	Feineinstellung mit bloßem Auge .....	371
7.12.1.3	Weitere Steigerung der Messempfindlichkeit beim Zentrieren.....	371
7.12.2	Zentrierung ohne Linsendrehung? .....	372
<b>7.13</b>	<b>Optische Homogenitätsmessung</b> .....	372
7.13.1	Verfahren der Homogenitätsmessung.....	373
7.13.2	Schnelle, qualitative Prüfung der Homogenität .....	375
<b>7.14</b>	<b>Spiegelnde, grob nicht plane Oberflächen</b> .....	376
7.14.1	Quantitative Schlierenverfahren? .....	378
7.14.2	Untersuchung der Schlieren-Interferenz .....	379
7.14.3	Kennzeichnung von Fehlerzonen durch Farben .....	380
7.14.4	Wie und warum funktioniert das Schlieren-Interferometer? .....	381

7.15	<b>Das Einarm-Interferometer</b> .....	383
7.15.1	Entfernung der Trägerfrequenz.....	385
7.16	<b>Eine entartete Form des Einarm-Interferometers, das Lloyd-Interferometer</b> .....	386
7.16.1	Das Lloyd Interferometer höherer Ordnung.....	388
7.16.2	Messung von Maschinen-Führungsbahnen aus Granit .....	390
7.16.3	„Hoch oder tief?“ .....	391
7.17	<b>Flächeninterferometrie bei reduzierter Empfindlichkeit durch schräge Beleuchtung. Einsatzmöglichkeiten, Fehlerquellen</b> .....	392
7.17.1	Das Schema .....	392
7.17.2	Fehlerbetrachtungen – Ungenauigkeiten.....	392
7.17.3	( $\Delta P/P$ ) Messung – wie genau?.....	396
7.17.3.1	Instrumentelle Prüfanordnungen .....	397
7.17.4	Optisch problemarme Lösungen .....	398
7.17.4.1	Das Zeilen-Interferometer.....	398
7.17.4.2	Das Scatter-Flatest.....	400
7.18	<b>Flächen-Interferometrie mit gesteigerter Empfindlichkeit durch Mehrfachreflexion</b> .....	401
7.18.1	Lohnt sich das Verfahren dieser „Multipass-Interferometrie? .....	402
7.18.2	Anwendungen der Multipass-Interferometrie .....	403
7.19	<b>Literatur und Adressen für weiterführende Informationen</b> .....	405
 <b>Teil 8 – Großflächige Ultrapräzisionsbearbeitung</b> .....		409
8.1	Einleitung.....	411
8.2	Diamant als Werkstoff für die bestimmte Schneide.....	412
8.3	Maschinensysteme.....	414
8.4	Großspiegelfertigung .....	417
8.5	Walzenstrukturierung .....	418
8.6	Danksagung .....	422
8.7	Literatur.....	422
 <b>Teil 9 – Das TRIROTA-Verfahren für optische Präzisionsasphären</b> .....		425
9.1	Einführung.....	427

9.2	Das TRIROTA-Verfahren.....	427
9.2.1	Die Grundlagen des Bearbeitungsprozesses.....	427
9.2.1.1	Konzeptionelle Vermeidung schädlicher Einflüsse.....	427
9.2.1.2	Die Bewegungen des TRIROTA-Verfahrens.....	429
9.2.1.3	Die Realisierung der TRIROTA-Bewegungen.....	430
9.2.1.4	Der Arbeitsablauf beim Schleifen eines Werkstücks.....	431
9.2.2	Die Realisierung des Verfahrens mit TRIROTA-Maschinen.....	431
9.2.2.1	Die TRIROTA-Labormaschine.....	431
9.2.2.2	Die TRIROTA-Fertigungsmaschinen bis 100 mm Durchmesser.....	432
9.2.2.3	TRIROTA-Maschinen für große Werkstücke.....	432
9.2.2.4	Technische Daten von TRIROTA-Maschinen.....	433
9.3	Besonderheiten bei der Realisierung des TRIROTA-Verfahrens.....	433
9.3.1	Präzisionsforderungen in der Zuordnung der Maschinenkomponenten.....	433
9.3.2	Umsetzung der Präzisionsforderungen.....	434
9.3.2.1	Präzision der Bearbeitungsbewegungen.....	434
9.3.2.2	Die Steuerung.....	435
9.3.2.3	Die Justierungsanforderungen.....	436
9.3.2.4	Die TRIROTA-Justiermethode.....	437
9.3.2.5	Präzisionskomponenten.....	439
9.3.2.6	Präzisionseigenschaften der Maschinenkomponenten.....	440
9.4	Ergebnisse.....	440
9.5	Zusammenfassung.....	441
9.6	Literatur.....	442
<b>Teil 10 – Piezoelektrische Feinstantriebe im UP-Maschinenbau und deren Steuerung.....</b>		<b>445</b>
10.1	Piezoelektrische Motoren.....	447
10.1.1	Wirkungsweise des Piezo-Resonanzmotors.....	447
10.1.2	Motorverhalten.....	448
10.2	Konstruktive Richtlinien.....	450
10.2.1	Vorspannung und Struktursteifigkeit.....	450
10.2.2	Steifigkeit und Systemresonanz.....	451
10.2.3	Rotatorische Konfigurationen.....	451
10.2.4	Vertikale Anordnungen.....	452
10.2.5	Das Einlaufen.....	453
10.3	Regelung und Messsysteme.....	453

10.4	<b>Spezielle Aspekte beim Einsatz der Piezomotoren an luftgelagerten Achsen</b> .....	454
10.4.1	Anwendungen an luftgelagerten Rotationsachsen.....	455
10.4.2	Anwendungen an luftgelagerten Linearachsen.....	456
10.5	<b>Literatur</b> .....	458
 <b>Teil 11 – Verschleiß von einkristallinen Diamantwerkzeugen</b> .....		459
11.1	<b>Verschleiß-Prinzipien</b> .....	461
11.2	<b>Einige verschleißrelevante Eigenschaften von Diamant</b> .....	461
11.3	<b>Werkstofferzeugter Verschleiß</b> .....	462
11.3.1	Gut bearbeitbare Werkstoffe.....	462
11.3.2	Mäßig gut bearbeitbare Werkstoffe .....	463
11.3.3	Noch bearbeitbare Werkstoffe .....	463
11.3.4	Nicht (mit vertretbarem Aufwand) bearbeitbare Werkstoffe.....	464
11.4	<b>Formen von Verschleiß</b> .....	464
11.4.1	Schneidenverschleiß.....	464
11.4.2	Kolkverschleiß .....	464
11.4.3	Spanflächenverschleiß.....	464
11.4.4	Tribo-elektrischer Verschleiß .....	464
11.4.5	Ermüdung.....	465
11.4.6	Bruch .....	465
11.5	<b>Ursachen, Deutung und Beeinflussung von Verschleiß</b> .....	466
11.5.1	Adhäsion .....	466
11.5.2	Mikro- und Makro-Chipping.....	466
11.5.3	Nano-Chipping und Ermüdung .....	466
11.5.4	Tribo-Thermik.....	467
11.5.5	Tribo-Chemie .....	467
11.5.6	Tribo-Elektrik .....	467
11.6	<b>Messung und Prüfung von Diamantwerkzeugen auf Verschleiß und Defekte</b> .....	467
11.6.1	Mikroskop .....	467
11.6.2	REM, STM.....	468
11.6.3	Optische Schneidkantenschärfe-Messung.....	468
11.6.4	Optische Politurbeurteilung .....	469
11.6.5	Probeschnitt .....	469
11.7	<b>Literatur</b> .....	470
 <b>Sachregister</b> .....		471