

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Zusatzmaterial</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 Die Entwicklung des Glases und der Optikfertigung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Optik</b> .....	<b>11</b>
2.1 Brechung, Reflexion und Totalreflexion .....	11
2.2 Polarisierung, Interferenz und Beugung .....	12
2.3 Doppelbrechung und Pleochroismus .....	18
2.4 Abbildende optische Bauelemente .....	19
2.4.1 Transmittierende optische Bauelemente .....	20
2.4.2 Reflektierende optische Bauelemente .....	26
2.4.3 Teildurchlässige optische Bauelemente .....	28
2.4.4 Diffraktive optische Elemente .....	29
2.4.5 Sonderformen optischer Bauelemente .....	30
2.5 Abbildungsfehler .....	36
2.6 Bewertung der Abbildungsleistung eines optischen Systems .....	42
2.7 Kennzeichnung optischer Bauelemente .....	44
2.7.1 Materialangaben .....	45
2.7.2 Formangaben und Oberflächenformtoleranzen .....	46
2.7.3 Oberflächenangaben .....	50
2.7.4 Beschichtungen und Zerstörschwellen .....	53
2.7.5 Allgemeine Beschreibung von Oberflächen und Komponenten .....	53
2.8 Übungsaufgaben .....	56

<b>3</b>	<b>Optische Werkstoffe</b>	<b>57</b>
3.1	Einteilung der optischen Werkstoffe	57
3.2	Anorganische Gläser	59
3.2.1	Definition und Struktur	59
3.2.2	Herstellung anorganischer Gläser	59
3.2.3	Anorganische Glasarten für optische Anwendungen	62
3.2.4	Eigenschaften anorganischer Gläser	65
3.2.4.1	Mechanische Eigenschaften	66
3.2.4.2	Optische Eigenschaften	70
3.2.4.3	Chemische Eigenschaften	72
3.2.5	Auswahlparameter optischer Gläser	73
3.2.6	Lieferformen anorganischer Gläser	76
3.3	Organische Gläser	78
3.3.1	Definition und Struktur	78
3.3.2	Ausgewählte Eigenschaften	81
3.3.3	Anwendungsbereiche und Lieferformen	83
3.4	Kristallwerkstoffe	84
3.4.1	Aufbau und Struktur	84
3.4.2	Ausgewählte Eigenschaften	86
3.5	Übungsaufgaben	88
<b>4</b>	<b>Grundlagen des Fertigungsprozesses</b>	<b>89</b>
4.1	Entwicklungs- und Herstellungsprozess	89
4.1.1	Entwicklungsstufen	89
4.1.2	Entwicklungsablauf	91
4.2	Fertigungsarten	93
4.3	Fertigungsprinzipien	94
4.4	Einteilung der Fertigungsverfahren	96
4.5	Technologische Unterlagen	98
4.6	Simulationstechniken und Datengenerierung für den Produktentwicklungs- und Fertigungsprozess	108
4.7	Virtualisierung und Monitoring des Fertigungsprozesses	114
4.8	Übungsaufgaben	119
<b>5</b>	<b>Urformen von optischem Glas</b>	<b>121</b>
5.1	Urformende Verfahren für anorganische Gläser	122
5.1.1	Herstellung von Gobs und Presslingen	122

5.1.2	Herstellung von Rohgläsern .....	123
5.1.2.1	Glasblöcke .....	123
5.1.2.2	Barrengläser und optische Glasstäbe .....	127
5.1.3	Herstellung von Flachglas .....	129
5.1.3.1	Gussverfahren .....	129
5.1.3.2	Ziehverfahren .....	130
5.1.3.3	Floatverfahren .....	131
5.1.3.4	Dünnglas und Glasfolien .....	133
5.1.4	Herstellung von Quarzglas .....	135
5.1.5	Ausgewählte Glasfehler/Materialunvollkommenheiten .....	137
5.1.6	Angabe der Materialeigenschaften .....	141
5.2	Urformende Verfahren für organische Gläser .....	143
5.2.1	Gießen .....	144
5.2.1.1	Reaktionsgießen .....	145
5.2.1.2	Vakuumgießen .....	145
5.2.2	Spritzgießen .....	149
5.2.2.1	Mikrospritzgießen .....	160
5.2.2.2	Mehrkomponentenspritzguss .....	163
5.2.3	Heißprägen .....	164
5.2.3.1	Werkzeugherstellung .....	165
5.2.3.2	Heißprägeprozess .....	167
5.2.4	Spritzprägen .....	170
5.2.5	Übungsaufgaben .....	173
5.3	Urformende Verfahren für Kristallwerkstoffe .....	174
5.3.1	Züchtung aus der Gasphase .....	175
5.3.2	Kristallzüchtung aus der Lösung .....	176
5.3.3	Züchtung aus der Schmelze .....	178
5.3.4	Übungsaufgaben .....	184
5.4	Urformen mittels additiver Verfahren .....	185
5.4.1	Verfahrensgrundlagen .....	186
5.4.2	Verfahrenseinteilung mit Bezug zu Anwendungsbereichen der optischen Technologien .....	187
5.4.3	Additive Verfahren für die Verarbeitung von Kunststoffen .....	188
5.4.4	Additive Verfahren für die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen .....	201
5.4.5	Additive Verfahren für die Verarbeitung von anorganischen Gläsern .....	204
5.4.6	Additive Verfahren für die Verarbeitung von keramischen Werkstoffen .....	208

<b>6</b>	<b>Umformen von optischem Glas</b> .....	<b>213</b>
6.1	Grundlagen .....	214
6.2	Pressen .....	220
6.2.1	Gläser für das Pressen .....	220
6.2.2	Werkzeugform – Herstellung und Anforderungen .....	222
6.2.3	Pressverfahren .....	225
6.2.3.1	Nicht-isothermisches Blankpressen .....	225
6.2.3.2	Isothermisches Präzisionsblankpressen .....	229
6.2.4	Anwendungsgebiete .....	231
6.3	Senken .....	234
6.3.1	Schwerkraftsenken .....	235
6.3.2	Senken mit Vakuumunterstützung .....	237
6.3.3	Laserstrahlunterstütztes Senken .....	238
6.3.4	Hybrides Senkverfahren .....	242
6.4	Ziehen .....	243
6.4.1	Preformherstellung .....	243
6.4.2	Glasfaserziehen .....	246
6.5	Übungsaufgaben .....	249
<b>7</b>	<b>Trennen</b> .....	<b>251</b>
7.1	Zerteilen .....	252
7.1.1	Mechanisches Brechen .....	252
7.1.2	Sonderverfahren zum Zurichten .....	260
7.1.2.1	Mechanisches Trennen durch Sägen .....	260
7.1.2.2	Thermisches Laserstrahlseparieren .....	263
7.1.2.3	Wasserstrahlabrasivschneiden .....	264
7.2	Schleifen .....	268
7.2.1	Verfahrensgrundlagen .....	269
7.2.1.1	Wechselwirkungen im oberflächennahen Bereich .....	270
7.2.1.2	Kinematische Verhältnisse und Arbeitsparameter .....	275
7.2.2	Werkzeuge und Maschinen .....	284
7.2.2.1	Werkzeuge .....	284
7.2.2.2	Schleifmaschinen .....	288
7.2.2.3	Schleifmaschinen mit Ultraschallunterstützung .....	291
7.2.3	Schleifverfahren .....	293
7.2.3.1	Trennschleifen .....	293
7.2.3.2	Formschleifen .....	298

7.2.3.3	Rundschleifen (Rundieren) . . . . .	298
7.2.3.4	Flachschleifen . . . . .	300
7.2.3.5	Schleifen sphärischer Flächen . . . . .	303
7.2.3.6	Schleifen asphärischer Flächen . . . . .	312
7.2.3.7	Schleifen von Freiformflächen . . . . .	317
7.2.3.8	Schleifen monolithischer und multifunktionaler Bauelemente . . . . .	323
7.2.3.9	Schleifverfahren – Sonderverfahren . . . . .	326
7.2.4	Übungsaufgaben . . . . .	330
7.3	Bohren . . . . .	331
7.3.1	Übungsaufgaben . . . . .	341
7.4	Läppen . . . . .	341
7.4.1	Verfahrensgrundlagen . . . . .	343
7.4.2	Maschinen und Werkzeuge . . . . .	346
7.4.3	Betriebs- und Hilfsstoffe für das Läppen . . . . .	347
7.4.4	Einflussgrößen . . . . .	349
7.4.5	Läppverfahren . . . . .	351
7.4.5.1	Planläppen . . . . .	351
7.4.5.2	Läppen sphärischer Flächen . . . . .	354
7.4.5.3	Feinschleifen mit Läppkinematik . . . . .	357
7.4.5.4	Ultraschallschwingläppen . . . . .	358
7.4.5.5	Leistung und Genauigkeit . . . . .	359
7.4.6	Übungsaufgaben . . . . .	363
7.5	Polieren . . . . .	364
7.5.1	Verfahrensgrundlagen . . . . .	365
7.5.2	Maschinen und Werkzeuge . . . . .	376
7.5.3	Betriebs- und Hilfsstoffe für das Polieren . . . . .	380
7.5.4	Einflussgrößen . . . . .	383
7.5.5	Polierverfahren . . . . .	385
7.5.5.1	Polieren mit flächenförmigem Werkzeugeingriff . . . . .	386
7.5.5.2	Polieren mit punkt- oder linienförmigem Werkzeugeingriff (zonale Politur) . . . . .	401
7.5.5.3	Interferometrische Prüfung von Asphärenoberflächen mittels computergenerierter Hologramme . . . . .	413
7.5.6	Korrekturverfahren . . . . .	416
7.5.6.1	CCP-Verfahren . . . . .	416
7.5.6.2	IBF – Ion Beam Figuring (Ionenstrahlbearbeitung) . . . . .	419
7.5.6.3	Spezialverfahren . . . . .	428

7.5.7	Leistung und Genauigkeit .....	442
7.5.8	Übungsaufgaben .....	447
7.6	Zentrieren .....	448
7.6.1	Zentrierverfahren .....	451
7.6.1.1	Steckzentrieren .....	451
7.6.1.2	Spannzentrieren .....	451
7.6.2	Zentriermaschinen und Werkzeuge .....	453
7.6.3	Bearbeitungsprozess .....	456
7.6.4	Übungsaufgaben .....	457
7.7	Ultrapräzisionszerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide .....	458
7.7.1	Verfahrensgrundlagen .....	459
7.7.2	Verfahrenseinteilung .....	466
7.7.3	Drehverfahren .....	467
7.7.3.1	Drehen rotationssymmetrischer Geometrien .....	468
7.7.3.2	Drehen nichtrotationssymmetrischer Geometrien .....	473
7.7.4	Fräsen .....	474
7.7.5	Ausgewählte Verfahrensvarianten der UP-Bearbeitung .....	478
7.7.6	Leistung und Genauigkeit .....	482
7.7.7	Übungsaufgaben .....	485
7.8	Strukturieren und Abtragen .....	486
7.8.1	Abtragen .....	487
7.8.2	Fotolithografisches Strukturieren .....	491
7.8.3	Strukturieren aufgetragener Metall- und Lackschichten .....	495
7.8.4	Partieller Schichtauftrag .....	496
7.8.5	Übungsaufgaben .....	497
7.9	Reinigen .....	498
7.9.1	Manuelles Reinigen .....	499
7.9.2	Maschinelles Reinigen .....	501
7.9.3	Strahlreinigung .....	504
7.9.4	Ausheizen .....	504
7.9.5	Reinigungsfehler .....	505
7.9.6	Übungsaufgaben .....	506
<b>8</b>	<b>Beschichten .....</b>	<b>507</b>
8.1	Schutzschichten .....	508
8.1.1	Lackieren .....	508
8.1.2	Oberflächenhärtung .....	510

8.2	Optische Schichten	512
8.2.1	Schichtarten	513
8.2.2	Schichtherstellung	514
8.2.2.1	Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)	515
8.2.2.2	Optisches Monitoring	522
8.2.2.3	Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	523
8.2.2.4	Nasschemische Verfahren	525
8.2.3	Anwendungen	527
8.2.3.1	Entspiegelungsschichten	527
8.2.3.2	Vorder- und Oberflächenspiegelschichten	531
8.2.3.3	Teilerspiegelschichten	533
8.2.3.4	Kaltlichtspiegelschichten	534
8.2.3.5	Elektrisch leitfähige Schichten	534
8.2.4	Schichtcharakterisierung	535
8.3	Übungsaufgaben	538
<b>9</b>	<b>Stoffeigenschaftsändern</b>	<b>539</b>
9.1	Entspannungskühlen	539
9.2	Verfestigen	542
9.3	Altern	548
9.4	Färben	548
9.5	Fototrope Gläser	550
9.6	Übungsaufgaben	551
<b>10</b>	<b>Fügen</b>	<b>553</b>
10.1	Fügen im technologischen Prozess	554
10.1.1	Blocken	555
10.1.2	Kitten	556
10.1.2.1	Provisorisches Kitten	557
10.1.2.2	Reguläres Kitten	559
10.1.2.3	Block- und Streifenkittung	562
10.1.2.4	Kitten von prismatischen Teilen	563
10.1.2.5	Kittwerkstoffe	564
10.1.3	Kleben	566
10.1.4	Gipsen	566
10.1.5	Ansprengen	567
10.1.6	Spannen	572
10.1.6.1	Mechanisches Spannen	572
10.1.6.2	Pneumatisches Spannen	574

10.2	Fügen von optischen Bauelementen/Montageprozess	576
10.2.1	Zentrieren, Richten, Justieren	577
10.2.2	Feinkitten	586
10.2.3	Kleben	588
10.2.4	Löten	594
10.2.5	Versprengen	597
10.2.6	Fassen von Optiken	598
10.2.6.1	Fassen von Rundoptiken	598
10.2.6.2	Fassen von Prismen	603
10.2.7	Diffusionsschweißen	604
10.2.8	Endmontage	607
10.2.8.1	Optische Baugruppen	608
10.2.8.2	Montageverfahren	611
10.2.9	Mikromontage	617
10.3	Übungsaufgaben	623
<b>11</b>	<b>Ausgewählte Fertigungstechnologien</b>	<b>625</b>
11.1	Prismenfertigung	625
11.2	Dachkantelemente	630
11.3	Tripelspiegel	636
11.3.1	Prinzip des Strahlengangs einer Tripelspiegelanordnung	637
11.3.2	Designanforderungen an einen Tripelspiegel	638
11.3.2.1	Randscharfe Kantenübergänge	638
11.3.2.2	Winkelfehler der optischen Flächen	640
11.3.3	Fertigung eines Tripelspiegels	643
11.4	Messung von Winkelabweichungen	645
11.5	Linsenfertigung	648
11.5.1	Linsenfertigung mit CNC-Technik	648
11.5.2	Messung des Linsenradius	650
11.5.3	LED-Lupenfertigung	650
11.5.3.1	Konstruktive Lösung	651
11.5.3.2	Fertigung der Linsen	652
11.5.3.3	Optoelektronische Komponenten	655
11.6	Fertigung asphärischer Bauteile	657
11.7	Fertigung eines Gleitsichtbrillenglases	669
11.8	Stablinsen	673
11.9	Axicon	677



11.10	Freiformoptik .....	683
11.10.1	Herstellung freiformoptischer Bauelemente durch Schleifen und Polieren .....	684
11.10.2	Herstellung freiformoptischer Bauelemente durch UP-Bearbeitung und Abformung .....	688
11.10.3	Charakterisierung von freiformoptischen Bauelementen .....	690
11.11	Montage eines Flucht- und Autokollimationsfernrohrs .....	692
11.11.1	Anwendungsbereich .....	692
11.11.2	Aufbau und Funktion .....	693
11.11.3	Montage und Anordnung der Systemeinheiten .....	694
11.12	Montage eines Objektivs .....	696
11.12.1	Fügen der Einzellinsen und Kittglieder .....	697
11.12.1.1	Gerichtetes Kleben (Richtkitten) .....	697
11.12.1.2	Ungerichtetes Kleben .....	699
11.12.2	Justierdrehen .....	700
11.12.3	Teilmontage .....	701
11.12.4	Endmontage .....	702
11.13	Übungsaufgaben .....	704
<b>12</b>	<b>Auslegung und Optimierung von Fertigungsprozessen .....</b>	<b>707</b>
12.1	Systemtolerierung .....	707
12.1.1	Toleranzanalyse .....	710
12.1.2	Temperaturanalyse (Thermal Expansion) .....	718
12.1.3	Ghost-Images- und Streulichtanalysen .....	721
12.2	Optikfertigungsdesign .....	721
12.3	Prozessoptimierung in der Produktion .....	725
12.4	Design optischer Vielschichtstrukturen .....	730
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>739</b>
	<b>Index .....</b>	<b>761</b>