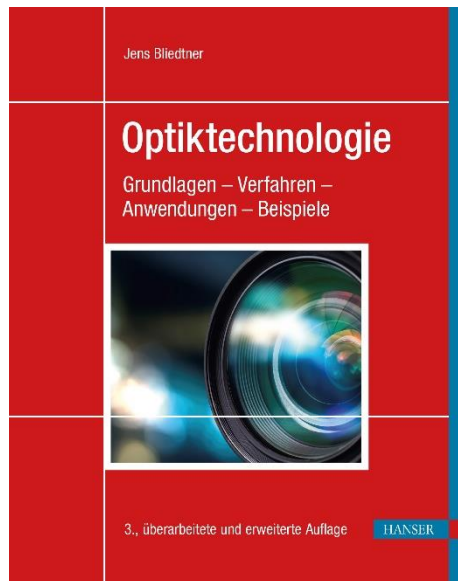


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Optiktechnologie

von Jens Bliedtner

Print-ISBN 978-3-446-45850-5  
E-Book-ISBN 978-3-446-46055-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446458505>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Der Begriff **Technologie** (griechisch technologia) beschreibt im klassischen Sinne die Herstellungs- bzw. Verarbeitungslehre. Im deutschen Sprachraum wurde durch JOHANN BECKMANN im Jahre 1777 in seiner Schrift „Gedanken zur Begründung einer Technologie als Wissenschaft“ der Grundstein für eine moderne Wissenschaftsdisziplin gelegt. Im heutigen Sprachgebrauch hat sich der Begriff Technologie, auch im Sinne des englischen Begriffes **technology**, inhaltlich wesentlich erweitert. Das Bedeutungsspektrum technology reicht von der Technik, der Anlage, dem Werkzeug, dem Computerprogramm bis hin zu Systemen und Verfahren einer oder mehrerer Fachdisziplinen, so auch zutreffend für die **Optiktechnologie**.

Ein faszinierender Aspekt der Optiktechnologie sind die Anforderungen und Genauigkeiten, die man im Bearbeitungsprozess erreichen muss bzw. kann. Bereits in der Vergangenheit konnten Römer und Wikinger Glasoberflächen mit Rauheiten kleiner als ein Mikrometer polieren, was vergleichsweise für kein anderes Handwerksverfahren möglich war. Im heutigen Herstellungsprozess lassen sich optische Materialien mithilfe hochspezialisierter Verfahren noch um Größenordnungen genauer fertigen. Dies setzt jedoch die Beherrschung eines sehr komplex gewordenen Entwicklungs- und Herstellungsprozesses und das Zusammenwirken verschiedener Fachdisziplinen voraus.

Vielfältige interessante Entwicklungen im letzten Jahrhundert haben die Optiktechnologie zu einer Querschnittstechnologie werden lassen, die heute sehr komplex wirkend mit einer Vielzahl von Fachdisziplinen, insbesondere der Elektronik, der Informationstechnik und der Messtechnik, verbunden ist. Die Optiktechnologie wird auch als eine sogenannte **Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert** angesehen, ihr wird ein enormes Wachstumspotenzial prognostiziert. Insbesondere am Standort Deutschland existiert eine ausgezeichnete wissenschaftliche Landschaft, deren Ideen und Leistungen in den kommenden Jahren in neue Produkte und Industrielösungen umgesetzt werden müssen. Dazu bedarf es gut ausgebildeter Fachkräfte, die diese Herausforderung annehmen und umsetzen können.

Das vorliegende Lehrbuch richtet sich insbesondere an Studierende der Ingenieurwissenschaften, aber auch an Diplomingenieure, Wirtschaftsingenieure und Physiker, die einen Einblick in die moderne Optiktechnologie erfahren möchten. Es werden neben den Grundlagen ausführlich wichtige Verfahren zur Herstellung von optischen Bauteilen und Systemen behandelt, Anwendungen exemplarisch vorgestellt und praktische Hinweise gegeben, die auf langjährigen eigenen Berufserfahrungen und dem recherchierten Wissen von vielen Fachexperten basieren. Die Technik lebt von den Ideen und der Vorstellungskraft, von Methoden und Verfahren. Aus diesem Grund wurden ausgewählte Bearbeitungsprozesse in bewegten Bildern als Begleitmaterial online zur Verfügung gestellt.

## Vorwort zur dritten Auflage

Die optischen Technologien und deren Fertigungsmethoden haben sich in den letzten zehn Jahren rasant weiterentwickelt und zählen zu einer wichtigen Querschnittsdisziplin, die in nahezu allen industriellen und privaten Bereichen zum Einsatz kommt. Diese dynamische Entwicklung wurde insbesondere durch die EUV-Lithografie, das Bestreben hin zu komplexeren optischen Bauelementen und Systemen sowie den Anwendungen der Informations- und Kommunikationstechnik geprägt. Moderne Fertigungsprozesse zeichnen sich zunehmend durch die Bearbeitung von kleineren Losgrößen sowie gestiegenen Anforderungen an die Bauteilform (Asphären und Freiformen) sowie -qualität aus. Gleichzeitig werden Prozessabläufe stärker digitalisiert, sensorisch überwacht und automatisiert. Auf diese geänderten Anforderungen wird in der dritten Auflage direkt Bezug genommen.

**Günter Gräfe** (gestorben im Jahr 2018) konnte leider nicht mehr an der 3. Auflage mitarbeiten. Wir werden Günter Gräfe stets als einen hochgeschätzten Fachkollegen, großen Ratgeber, Weggefährten und Freund in Erinnerung behalten. Er hat als Haupttechnologe der Firma Carl Zeiss am Standort Jena viele Jahrzehnte die Optikfertigung geprägt und mitgestaltet. Seine Optikkompetenz und sein sehr großes Fachwissen konnte Günter Gräfe stets in der Praxis wirkungsvoll einsetzen. Dies führte zu vielen Technologieentwicklungen und Erfindungen sowie effizienten Fertigungsmethoden für anspruchsvolle optische Bauelemente.

Mit der dritten Auflage werden auch verstärkt die digitalen Möglichkeiten der Wissensvermittlung genutzt. Die durch den Verlag zur Verfügung gestellte Online-Plattform *plus.hanserfachbuch.de* bietet die Möglichkeit zusätzliche Inhalte digital abrufen zu können. So werden Videos und die Lösungen zu den Übungsaufgaben digital zur Verfügung stehen. Zusätzlich ist geplant, dieses digitale Medium aktiv zu nutzen, um sehr schnell aktuelle Informationen, ergänzende Lehrinhalte, Fachartikel, zusätzliche Übungen oder auch kleinere Softwareprogramme und Videosequenzen zur Verfügung zu stellen.

Ein großes Dankeschön gilt allen Unterstützern der dritten Auflage der „Optiktechnologie“. Zahlreiche Firmen und Institutionen sowie Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe „Bliedtner“ an der EAH Jena haben zum Gelingen des Buches beigetragen. Stellvertretend für alle Unterstützer sei an dieser Stelle ganz herzlich Herrn Sebastian Henkel, Herrn Samson Frank, Herrn Tobias Pelgen, Herrn Dr. Dirk Dobermann und Herrn Dr. Oliver Fähnle gedankt.

Ein ganz großer Dank gelten Frau Manuela Lohse von der Firma ml-Verlagswesen und Frau Dr. Andrea Barz von der Ernst-Abbe-Hochschule Jena für die Korrekturarbeiten und wertvollen Hinweise.

Die erfolgreiche Umsetzung eines Buchprojektes hängt im entscheidenden Maße von einer konstruktiven Zusammenarbeit mit dem Verlag ab. Ein besonderer Dank gebührt wiederum den Mitarbeiterinnen des Carl Hanser Verlages, insbesondere der Lektorin Frau Natalia Silakova-Herzberg für die sehr konstruktive und engagierte Zusammenarbeit.

*Jena, im November 2021*

*Jens Bliedtner*

# 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 Polarisation, 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>



# 1

## Die Entwicklung des Glases und der Optikfertigung

Bereits um 3000 v. Christi begann in Ägypten und in Mesopotamien die Kunst des Glasschmelzens, was entsprechende Funde beweisen. Vorwiegend kleinere Glasstücke und Perlen minderer Qualität dienten der Herstellung von Schmuckgegenständen. Interessant für diese Entwicklung war das Geheimnis der Ägypter, den wichtigen Rohstoff Soda zu gewinnen, das sie über 3000 Jahre bewahren konnten. Sie gewannen das Soda aus der Asche bestimmter Pflanzen. Um 1500 v. Christi entstand mit der Anwendung der Sandform- und -kerntechnik die Herstellung von Glasstücken, insbesondere auch von **Glashohlkörpern**.

Um 500 v. Christi wurde die **Glasmacherpeife**, sehr wahrscheinlich in Phönizien, erfunden. Dies war eine sehr bedeutsame Erfindung für die Glasherstellung überhaupt. Mit ihr konnten dünnwandige Gläser hergestellt werden und sie stellte in der weiteren Entwicklung eine wesentliche Grundlage für die Fertigung von Glaserzeugnissen in einem breiteren Umfang dar. Über Nordägypten kam die Kunst des Glashandwerks nach Venedig und Mitteleuropa. Bekannt aus dieser Zeitepoche ist auch, dass die Römer farblose Fensterscheiben bereits 795 n. Christi und wenig später auch farbiges Fensterglas erzeugen konnten */Rast2006/*.

Die bewusste Nutzung des Werkstoffes Glas für optische Anwendungen erfolgte erst wesentlich später. Welche Funde für diese Entwicklung den Ausschlag gaben, bleibt umstritten. So konnten beispielsweise die Wikinger erstaunlich perfekte Linsen aus Bergkristall schleifen, die sie zum Ausbrennen von Wunden und zum Entfachen von Feuer verwendeten. Wenig später wurden zum Schleifen und Polieren der Linsen erste Schleifbänke, die mit dem Fuß angetrieben werden konnten, verwendet. Unumstritten ist jedoch, dass die Erfindung von Brillen einen wichtigen Schritt für die Entwicklung aller nachfolgenden optischen Instrumente, wie Fernrohre und Mikroskope, darstellt.

Die Brille entwickelte sich im 13. Jahrhundert aus dem Lesestein und dem Einglas */Beez1998/*. Unter **Lesesteinen** versteht man halbkugelige plankonvexe Linsen, meist hergestellt aus Beryll, Quarz oder Bergkristall, die mit der planen Seite auf das Schriftstück aufgesetzt werden (siehe Bild 1.1). Im Laufe der Zeit wurden die Lesegläser flacher und zur bequemeren Handhabung fasste man das Glas. Es entstand das sogenannte **Einglas**. Mit der Verbindung zweier Eingläser durch einen Niet wurde die erste **Nietbrille** entwickelt, die vermutlich ihren Ursprung in Venedig um 1285 hatte.



Bild 1.1

Nachbildung eines Lesesteines /Humb2006/

Im 18. Jahrhundert wurde erstmals aus Steinsalz Soda hergestellt. Das so entstandene **Soda-Glas** konnte jetzt für allgemeine Gebrauchsgegenstände verwendet werden, was die Möglichkeiten der Glasherstellung deutlich erweiterte.

Wesentliche Meilensteine der Entwicklung optischer Geräte waren die Erfindung des **Mikroskops** und des **Fernrohres** (siehe Bild 1.2). Durch die Kombination von Linsen erreichte man eine Steigerung der normalen Sehfähigkeit. Auch der Zeitpunkt dieser Erfindungen ist nicht genau nachweisbar. Vermutlich hatten um 1590 Niederländer ein einfaches Mikroskop aus zwei zusammengesetzten Linsen gebaut. Den Durchbruch bei der Verwendung des nachfolgenden zusammengesetzten Mikroskops erreichte man jedoch erst mit der **Achromatisierung** der Mikroskopobjektive im Jahre 1830. Bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts wurden diese optischen Bauelemente meist labormäßig von Physikern, Astronomen oder Biologen gefertigt. Die verwendete Fertigungsmethode bestand im „Pröbeln“ und Probieren bei der entsprechenden Auswahl und dem Zusammensetzen der Mikroskopobjektive.



Bild 1.2

Beispiele aus dem Beginn des Baus optischer Instrumente: links) Mikroskop mit kippbarer Säule, 1705, rechts) Auszugsfernrohre aus dem 18. und 19. Jahrhundert /Beez1998/

Nahezu parallel zu den Mikroskopen verlief die Entwicklung der **Fernrohre**, die aufgrund der Anwendung in der Seefahrt und Astronomie sehr schnell ihre Verbreitung fanden. Die ersten Linsenfernrohre, sogenannte **holländische** oder **galileische Fernrohre**, stammen aus dem 17. und 18. Jahrhundert und bestehen aus einer Sammellinse als Objektiv und einer Zerstreuungslinse als Okular /Beez1998/.

Im anschließenden 19. Jahrhundert wurde das Linsenfernrohr entscheidend durch JOSEPH VON FRAUNHOFER geprägt bzw. weiterentwickelt. Gleichzeitig leitete er eine neue Epoche der Glasherstellung und -bearbeitung ein. Wesentliche Verdienste erlangte er durch die wissenschaftliche Berechnung der Gläser und seine Bemühungen den Herstellungsprozess von optischem Glas entscheidend zu verbessern. Die Entwicklung von Messverfahren zur Prüfung der Oberflächenqualitäten (Probeglas) oder die Bestimmung der Dispersion in Gläsern dokumentieren u. a. die wissenschaftlichen Arbeiten des Physikers. Es gelang ihm insbesondere, auch die Glasqualität hinsichtlich Schlieren und Blasen zu verbessern und durch gezielte Veränderungen des Rohstoffgemenges neue Glassorten zu erschmelzen. Darüber hinaus entwickelte FRAUNHOFER Maschinen zur Bearbeitung von Rohgläsern mit größerem Durchmesser und gab somit Impulse für die industrielle Fertigung von Gläsern, die bis zu dieser Zeit eher ein handwerklicher Prozess war. Mit seinen wissenschaftlichen Arbeiten konnte FRAUNHOFER wesentliche Grundlagen für die Entwicklung der **Optiktechnologie** schaffen.

ERNST ABBE gelang es im Jahr 1870 die Theorie für die mikroskopische Abbildung zu entwickeln. Insbesondere seine Arbeiten zur Beugungstheorie der mikroskopischen Abbildung stellten damit auch die Mikroskopherstellung auf eine wissenschaftliche Basis. Die von ABBE aufgestellte Gleichung zur Auflösungsgrenze  $d$  für die Lichtmikroskopie ergibt sich in ihrer bekanntesten Form zu:

$$d = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin \alpha} \quad (1.1)$$

$\lambda$  Wellenlänge,  $n$  Brechzahl,  $\alpha$  halber Öffnungswinkel des Objektivs

Moderne mikroskopische Ansätze, oft als supraauflösende Mikroskopie bezeichnet, erlauben heute jedoch auch Auflösungsvermögen z. T. deutlich unter dieser Grenze. Eine weitere wichtige Grundlage zur Charakterisierung der optisch dispersiven Eigenschaften von Gläsern stellt die nach ABBE benannte ABBESche Zahl dar. Sie gibt Auskunft darüber, wie stark sich der Brechungsindex eines Glases in Abhängigkeit von der Wellenlänge ändert.

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1.2)$$

$\nu_d$  ABBESche Zahl für die d-Linie,  $n_{d,F,C}$  Brechzahl für die d-, F- und C-Linie

Insbesondere für die Auslegung optischer Baugruppen, z. B. Linsensysteme, war und ist die Kenntnis der ABBESchen Zahl  $\nu$  wichtig.

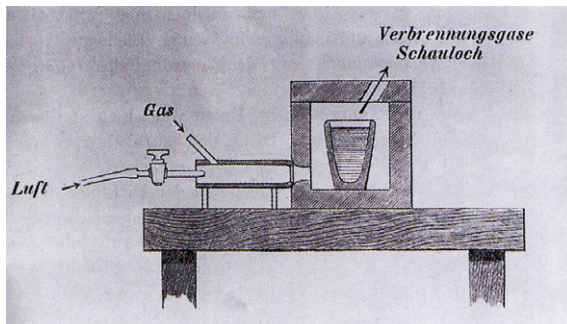
Als ein Wegbereiter bzw. Gründer der optischen Industrie ist JOHANN HEINRICH AUGUST DUNCKER zu nennen. Er gründete 1801 die **Königlich privilegierte optische Industrie-Anstalt** in Rathenow und stellte als erster Brillengläser industriell her. Sein Verdienst ist u. a. auch die effizientere Bearbeitung von Brillengläsern auf einer patentierten Vierspindelschleifmaschine.

Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung der optischen Industrie wurde am Ende des 19. Jahrhunderts in Jena gelegt. Die Ursache für eine raschere Entwicklung der optischen Industrie lag in der Zusammenarbeit von CARL ZEISS, ERNST ABBE und OTTO SCHOTT begründet. Diese ideale Voraussetzung der Zusammenarbeit des Mechanikers, des Wissenschaftlers und des Glaschemikers führte zu neuen Impulsen für die Fertigung optischer Komponenten und Systeme. Die von ZEISS ständig vergrößerte optische Werkstätte hatte bald den handwerklichen Charakter der Glasbearbeitung gänzlich verloren.

Es ist unumstritten der Verdienst von ZEISS, ABBE und SCHOTT, dass fortan in den meisten feinmechanisch-optischen Betrieben der Welt, die Wissenschaft zur Grundlage der technischen Arbeit und der ständigen Weiterentwicklung von optischen Geräten wurde.



Im Jahre 1879 entwickelte OTTO SCHOTT mit dem **Lithiumglas** eine neue Glassorte, die sich durch eine bisher nicht erreichbar hohe Homogenität auszeichnete und es ermöglichte, spektrometrische Messungen durchzuführen. Es gelang ihm insbesondere, Gläser mit feingestuft optischen Konstanten herzustellen, die eine Entwicklung leistungsfähiger Mikroskope und Teleskope ermöglichte. Neben einer Vielzahl neuentwickelter Gläser ist die Erfindung des hitzebeständigen **Borosilicatglases** im Jahre 1887 durch den Jenaer Glaschemiker besonders zu erwähnen. Einen patentierten Glasschmelzofen von OTTO SCHOTT aus dem Jahr 1881 illustriert Bild 1.3.

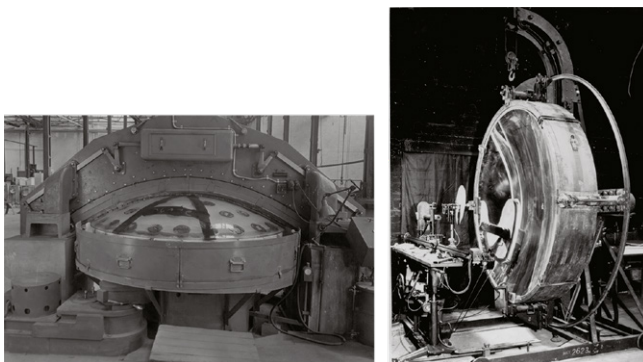


**Bild 1.3**

Glasschmelzofen von Otto Schott /Beez1998/

Etwa zu Beginn des 20. Jahrhunderts setzte mit der maschinellen Glaserzeugung und der Glasbearbeitung sowie den wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Struktur- und Eigenschaftsbeziehungen silicatischer Werkstoffe ein Aufschwung in der optischen Industrie ein, der bis zur Gegenwart reicht. Es gab eine Vielzahl von herausragenden Entwicklungen im Bereich der optischen Technologien, die ganz entscheidend die Optikfertigung prägten. Im Folgenden können nur wenige ausgewählte Entwicklungen kurz vorgestellt werden.

Bereits 1926 war man in der Lage, großflächige **asphärisch geformte Spiegel** herzustellen. Diese bis zu sechs Meter im Durchmesser reichenden optischen Bauelemente wurden mit speziell entwickelten mechanischen Aufbauten durch die Firma Carl Zeiss Jena in Kleinserien hergestellt. Bild 1.4 links veranschaulicht die kinematische Anordnung mit einer Drehbewegung des Spiegelhalbbeuges und dem asphärisch ausgelegten Werkzeugarm mit aufgespannten Diamantsegmenten. Um diese Bauelemente nach dem Schleifen und Polieren messtechnisch bewerten zu können, musste eine spezielle Prüfvorrichtung entwickelt werden (siehe Bild 1.4 rechts). Für den gesamten Fertigungsprozess eines solchen Spiegels waren ca. 35 technologische Prozessstufen und eine Bearbeitungszeit von rund 400 Stunden erforderlich.

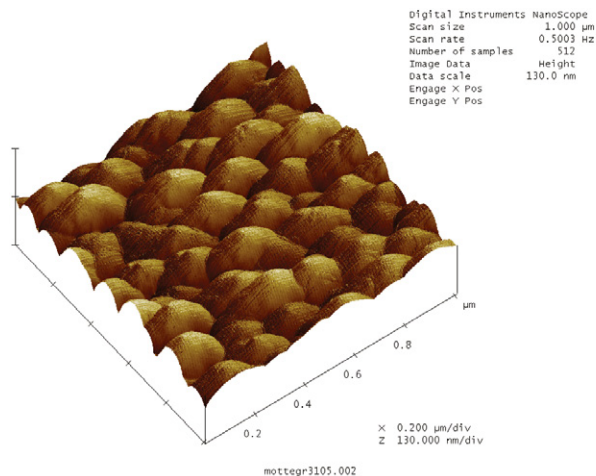


**Bild 1.4**

Fertigung eines asphärischen Hohlspiegels /Zeis1926/: (links) vor der Schleifbearbeitung, (rechts) Prüfvorrichtung

Die wissenschaftlichen Arbeiten von ALBERT EINSTEIN aus dem Jahre 1917 stellten eine Grundlage für den Bau des ersten Lasers im Jahr 1960 dar. Den US-amerikanischen Wissenschaftler THEODORE MAIMAN gelang es, den ersten funktionsfähigen **Rubinlaser** zu bauen. Seit dieser Erfindung hat sich die Lasertechnik zu einem wichtigen Sektor der optischen Technologien entwickelt. So führte die Lasertechnik zu einer weiteren Verbreitung der Optik in andere Fachdisziplinen, z.B. die Halbleitertechnik, Medizin, Biologie oder Kommunikationstechnik. 1971 konnte das erste Laserdisc-System als Prototyp gebaut werden.

Mit der Kombination von mehreren optischen Bauelementen und der Vergrößerung der Anzahl von Linsen und Prismen in einem optischen Gerät steigen auch die Strahlverluste durch Reflexionen an den Grenzflächen. Diese Erkenntnis trieb die Wissenschaftler zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu Untersuchungen zur Reflexminderung an. Im Jahr 1935 ließ sich die Firma Zeiss den reflexmindernden **T-Belag** patentieren. Diese Entspiegelungsschicht der an Luft grenzenden Glasoberflächen steigerte die Lichtdurchlässigkeit der Ferngläser um 50%. Die Entwicklung von **Schichtsystemen** mit teilweise sehr unterschiedlichen Funktionen entwickelte sich fortan sehr dynamisch. Beschichtungen im Hochvakuum und Sputtertechnologien wurden stetig optimiert und ermöglichen heute das hochgenaue Aufbringen von Mehrfachschichten und komplizierten Schichtsystemen. Durch die Integration von Effekten aus der Natur (z.B. Lotuseffekt oder Mottenaugenstrukturen) konnten zu Beginn des 21. Jahrhunderts Schichteigenschaften weiter verbessert werden. In Bild 1.5 ist eine Mottenaugenstruktur auf der Oberfläche einer Kunststoffoptik zur Reflexminderung messtechnisch erfasst. Die Phänomene der Natur waren und wurden somit auch Vorbild für viele optische Entwicklungen.



**Bild 1.5**

Mottenaugenstruktur auf der Oberfläche einer Kunststofflinse (AFM-Aufnahme; EAH Jena)

Ein wesentlicher Meilenstein in der Optikfertigung war die Entwicklung der LIGA-Technik (**Lithografie, Galvanik und Abformung**) mit optisch abbildenden Systemen, die optische **Lithografie**. Mit ihr konnten die erreichbaren minimalen Strukturgrößen wesentlich verbessert werden, was die Entwicklung von leistungsfähigen Computern erlaubte. Bei der optischen Lithografie wird die Struktur einer Fotomaske mittels Projektion in einen lichtempfindlichen Fotolack übertragen. Die erreichbare Auflösung wird im Wesentlichen durch die verwendete Wellenlänge bestimmt. Moderne Laserstrahlungsquellen im UV-Bereich erlaubten die Erzeugung von Strukturen im Bereich von 65 nm. Für diese hohen optischen Anforderungen an das optisch abbildende System entwickelte sich das Gebiet der Hochleistungsoptik, mit teilweise neuen Polier- und Schleiftechnologien für die Bearbeitung der optischen Komponenten und speziell entwickelten Montagetechnologien dieser Objektive.

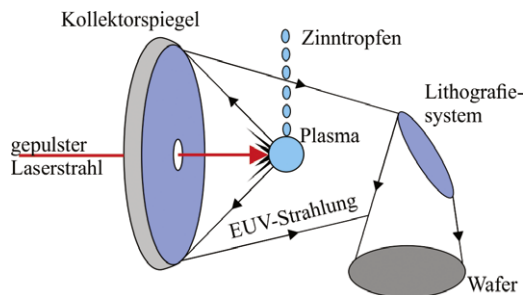
Darüber hinaus war die Entwicklung von sehr homogenen Kristallwerkstoffen durch verbesserte Verfahrenstechnologien eine wichtige Voraussetzung, um Materialien mit hohen Transmissionsgraden und sehr homogenen Materialeigenschaften zu erzeugen. Die Anforderungen an die Formgenauigkeit und Oberflächenrauigkeit dieser optischen Bauelemente sind extrem hoch.



**Bild 1.6**

Hochleistungsobjektiv für einen Waferstepper /Zeis2004/

Die Leistungsfähigkeit von Computerchips wird im wesentlichen Maße durch das Auflösungsvermögen seiner kleinsten Strukturen vorgegeben. Hierbei stößt der Einsatz von Excimer-Laserstrahlung zunehmend an Grenzen. Kleinste Strukturgrößen im Bereich von weniger als zehn Nanometern lassen sich nur noch mit Belichtungswellenlängen im extremen ultravioletten Bereich, dem sogenannten EUV, erreichen. Eine große Herausforderung ist, diese Strahlung mit einer Wellenlänge von 13,5 nm zu erzeugen. Ein durch Laserstrahlung erzeugtes leuchtendes Plasma, das diese extrem kurzwellige Strahlung liefert, ist aktuell die Lösung, um entsprechende Strahlleistungen bereitstellen zu können. Bei dem von der Firma Trumpf entwickelten Verfahren werden Zinntropfen von einem Generator in eine Vakuumkammer transportiert, wobei ein gepulster Hochleistungslaser mit den Zinntropfen ca. 50 000 Mal pro Sekunde wechselwirkt. Dadurch werden die Zinnatome ionisiert und erzeugen ein intensives Plasma. Ein hochpräziser Kollektorspiegel bündelt die emittierte EUV-Strahlung und führt diese über weitere optische Komponenten dem Lithographiesystem zur Belichtung des Wafers zu. /Trum2019/

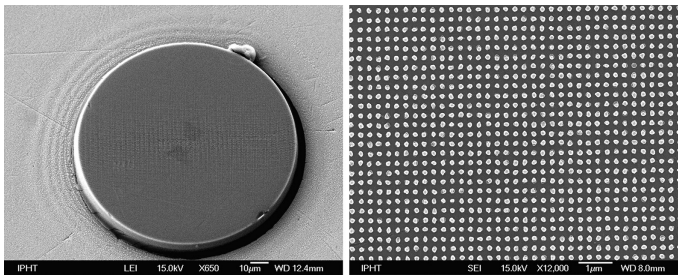


**Bild 1.7**

Vereinfachte Prinzipdarstellung des EUV-Lithografieverfahrens nach /Trum2019/

Mit der Entwicklung der optischen Bauelemente für die **EUV-Lithografie** wurden noch höhere Anforderungen an die Präzision und Beschichtung der ausschließlich reflektiv arbeitenden Optiken notwendig.

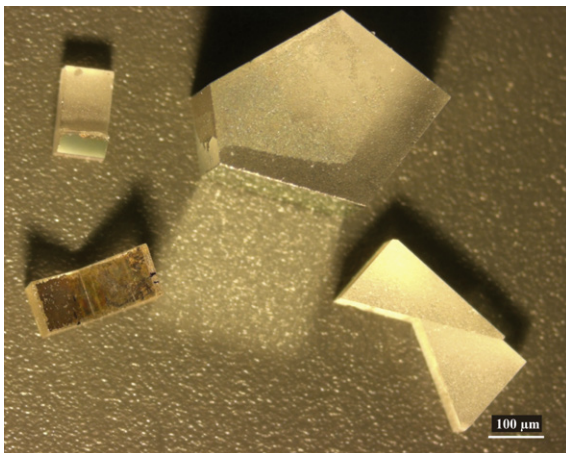
Die **LIGA-Technik** ermöglichte des Weiteren auch die Erzeugung von Formwerkzeugen für Heißpräge- oder Spritzgussprozesse, als Voraussetzung zur Herstellung von Mikrostrukturen in Kunststoffoptiken. Das große Potenzial dieser Technik illustriert Bild 1.8 am Beispiel einer strukturierten optischen Glasfaser.



**Bild 1.8**  
REM-Aufnahmen eines mittels Interferenzlithografie erzeugten Kreuzgitters mit einer Periode von 280 nm: links) Faserstirinfläche, rechts) Ausschnitt im Kernbereich /Jaue2007/

Das Strukturieren von optischen Fasern ermöglicht die gezielte Beeinflussung von optischen Eigenschaften, die z. B. sensorische Anwendungen oder strahlteilende Funktionen ermöglichen.

Der generelle Trend zur Miniaturisierung von Bauteilen am Ende des 20. Jahrhunderts führte auch zur Entwicklung der **Mikrooptik** mit unterschiedlichen mikrooptischen Bauteilen. In der Regel sind es klassische Bauteile der Optik, deren geometrische Dimensionen jedoch nur wenige Größenordnungen über der verwendeten Wellenlänge des Lichtes liegen. In Bild 1.9 sind mikrooptische Komponenten aus dem Bereich der Kommunikationstechnik dargestellt.

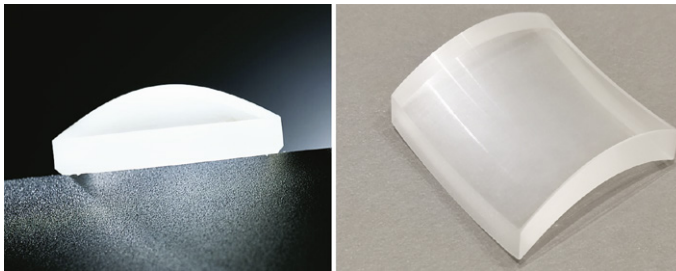


**Bild 1.9**  
Mikrobauelemente der Kommunikationstechnik

Zum Ende des 20. Jahrhunderts und zu Beginn des 21. Jahrhunderts entwickelte sich die Optikfertigung in einzelnen Bereichen auch immer stärker in Richtung der **Nanotechnologie**. Ein Beleg hierfür sind die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der photonischen Kristalle. In **photonischen Kristallen** kann aufgrund einer durch Mikro- und Nanostrukturierung erzeugbaren Bandstruktur Licht auf

kleinstem Raum modifiziert und übertragen werden. Ein gezielter Einbau von Fehlstellen in eine periodische Brechungsindexstruktur ermöglicht die Realisierung von wellenlängenselektiven Wellenleitern, Strahlteilern und -kopplern, Wellenmulti- und -demultiplexern sowie schwellenlosen Lasern auf kleinstem Raum.

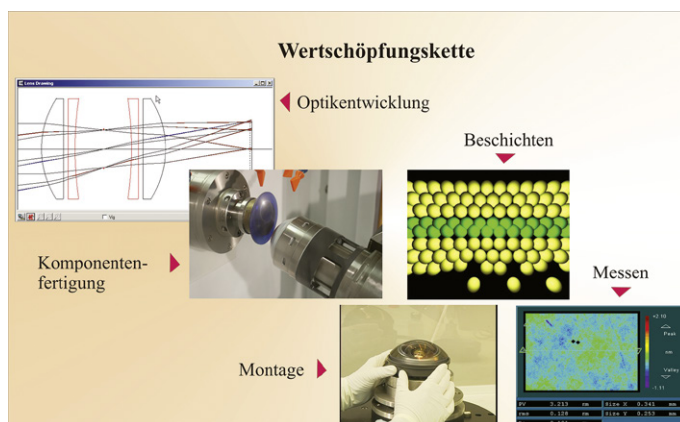
Mit der weiteren Optimierung von Strahlengängen und der Verbesserung von Abbildungsleistungen optischer Systeme fand immer stärker die Bearbeitung von **asphärischen Flächen** sowie **Freiformflächen** Einzug in die Optikfertigung. Insbesondere zum Ende des 20. Jahrhunderts konnte durch die Maschinen- und Technologieentwicklung ein wesentlicher Sprung zur kostenoptimierten Fertigung solcher anspruchsvollen optischen Oberflächen getan werden. Es wurden beispielweise die verschiedenen Verfahren der **Ultrapräzisionsbearbeitung** entwickelt sowie unterschiedliche Kinematiken von Schleif- und Poliermaschinen zur Bearbeitung asphärischer und freiformoptischer Oberflächen (siehe Bild 1.10) z. T. neu erforscht und in Technologien überführt.



**Bild 1.10**

Optische Bauelemente: links) asphärisches Bauelement /*Opto2007*/, rechts) freiformoptisches Bauelement

Besonders das Systemdenken hat sich im Bereich der optischen Technologien verstärkt durchgesetzt. Es werden dabei insbesondere integrale Ansätze von Simulation, Konstruktion, Materialauswahl, Beschichtungen, Fertigung, Justage, Montage, Messtechnik und Prototypenentwicklung verstanden. Bild 1.11 illustriert eine Wertschöpfungskette, die Bereiche des Entwicklungs- und Fertigungsprozesses miteinander verknüpft und verzahnt.



**Bild 1.11**

Wertschöpfungskette im Entwicklungs- und Fertigungsprozess eines optischen Systems

In der nachfolgenden Tabelle sind einige ausgewählte Meilensteine in der Entwicklung des Glases und der Optikfertigung zusammengestellt.

**Tabelle 1.1** Ausgewählte Meilensteine der Entwicklung des Glases und der Optikfertigung

Jahr	Entwicklung	Ort, Erfinder/Firma
ca. 3000 v. Chr.	Gegenstände aus Glas	Ägypten, Mesopotamien
ca. 1500 v. Chr.	Anwendung von Sandformen für die Glasformung	Ägypten
ca. 500 v. Chr.	Glasmacherpfeife	Phönizien
795	Fensterscheiben	Rom
1285	Nietbrille	Venedig
1590	Einfaches Mikroskop	Niederlande
17. Jahrhundert	Galileisches Fernrohr	Niederlande
um 1800	Verspindelschleifmaschine	Rathenow, H. A. DUNCKER
1872	Erste Fertigung gerechneter Mikroskopoptik	Jena, E. ABBE/C. ZEISS
1913	Kleinbildkamera	Wetzlar, O. BARNACK
1923	Planetariumsprojektor	Jena, Firma Carl Zeiss Jena
1935	Reflexmindernde Vergütung (T-Belag)	Jena, A. SCHMAKULA
1938	Asphärische Hohlspiegelfertigung mit 6 m Spiegel-durchmesser	Jena, Firma Carl Zeiss Jena
1959	Fertigung von Asphären für abbildende Systeme	Wetzlar, Firma Leica
1960	Rubinlaser	Los Angeles, T. MAIMAN
1966	Floatglasanlage für Flachglas	England, Firma Pilkington
1968	Erste Flüssigkristalldisplays (bei Raumtemperatur)	USA, G. HEILMEIER
1971	Laser-Disc/Spritzgussprozesse	Niederlande, Firma Philips
1976	Industrielle Herstellung optischer Fasern	Norcross, Firma OFS
1990	CCP (Computer Controlled Polishing)	Jena, Firma Carl Zeiss Jena
2000	Individuelle Gleitsichtgläser	München, Firma Rodenstock; Oberkochen, Firma Carl Zeiss AG
2005	Displayglastechnologie – Alumosilicatglas (Gorilla)	New York, Firma Corning
2006	Industrielle Nutzung des Blankpressens für DOE	Mainz, Firma Schott AG
2019	EUV-Lithografie geht in die Serienproduktion	Veldhoven, Firma ASML; Oberkochen, Firma Carl Zeiss SMT; Ditzingen, Firma Trumpf



# Index

## Symbole

2K-Verbundtechnik 163  
3-Achs-Fräsmaschine 460  
3C-Schleiftechnologie 311  
3D-Druck 185  
3D-Thermoforming 233  
3D-Volumenmodelle 106  
3K-Verbundtechnik 163  
4-Achs-Drehmaschine 460  
4K-Verbundtechnik 163  
90°-Axicon 325  
90°-Prisma 27  
(UP)-Schleifen 289  
 $\lambda/4$ -Schichten 15, 513  
 $\mu$ -LAM-Verfahren 481

## A

Abbe 3  
Abbesche Zahl 3, 58  
Abbildungsfehler 36, 89  
Abbildungsgleichung 21  
Abbildungsleistung 42  
Abbildungsmaßstab 21  
Aberration, sphärische (Öffnungsfehler) 37  
Abformprozess 144  
Abformungen 148  
Abkühlen  
– temperatur-zeit-gesteuertes 124  
Ablenkwinkel 24  
Abrasivmittel 264*f.*  
Abrichten 287  
Abschrecken 542  
Absorption 71  
Abstände  
– axiale 610

Abstehen 61  
Abtragen 252, 486*f.*  
Abtragsarbeit 373  
Abtragshöhe  
– zeitbezogene 344  
Abtragsrate 251, 281, 374  
Abtragstiefe 372*f.*  
Abtragsvolumen 281  
Abtragungsprozess 72  
Abziehstreifen 570  
Achromate 39  
Additive Fertigung 185  
– keramischer Werkstoffe 208  
– Kunststoffverarbeitung 188  
– metallischer Formkörper 201  
– mineralischer Gläser 204  
Additive Verfahren 185, 188  
Aktiv-Fluid-Jet-Polierv Verfahren 409  
Akzeptanzwinkel 24  
Alfa-Montage 612  
Alloy 555  
Altern 548  
Alterungsfaktoren 81  
Alumosilikatgläser 64  
amorph 59  
Amplitudenbedingung 15  
Amplitudengitter 29  
Anreiben 564  
Anriss 252  
ANSI 348  
Ansprengen 567  
Ansprengflächen 568  
Ansprengstreifen 568  
Ansprengwerkzeug 569  
Antireflexbeschichtungen 513  
Antireflexionsschicht (AR-Schicht) 528  
Apertur, numerische 25



- Arbeitsplan 107
  - AR-hard-Schichten 510, 529
  - Aspektprüfung 672
  - Asphärenbeispiel 663
  - Asphärenfertigung 312, 657
  - Asphären-generator 472
  - Asphären-gleichung 53
  - Asphären-oberfläche 312
  - Asphären-politur 376
  - Asphärische deterministische adaptive Polier-Technologie 113
  - Astigmatismus 37
  - Ätzen 494
    - chemisches 494
  - Ätzrateprofil 423
  - Aufdampfen 515
  - Auflösungsvermögen 30, 710
  - Aufmaß 449
  - Augmented Reality 114
  - Ausarbeitungsphase 92
  - Ausbohren 331
    - helikal 334
  - Ausheizen 504
  - Auslaufstein 129
  - Auslaugungsprozess 72
  - Ausmuschelungen 255
  - Außenbordtrennschleifen 295
  - Außenrundscheifen 298
  - Außenrund-Umfangslängsschleifen 300
  - Autokollimationsfernrohr
    - Montage 692
  - Autokollimator 646
  - Axicon 33
    - Fertigung 677
- B**
- Badseite des Glases 131
  - Bandpassfilter 513
  - Bandsägen 261
  - Barrengläser 127
  - Basistoleranzen 712
  - Bauelemente
    - freiformoptische 34
    - Fügen 576
    - monolithische 323
    - Montieren 576
    - multifunktionale 323
  - Bauelemente, abbildende optische 19
    - diffraktive optische 29
    - reflektierende optische 26
    - Sonderformen 30
    - teildurchlässige optische 28
    - transmittierende optische 20
  - Baugruppe 77
    - Endmontage 608
    - fertig bearbeitet 83
    - montiert 83
  - Baustrategie 192
  - Bauteil
    - fertig bearbeitet 83
    - fertig gearbeitet 77
  - Bearbeitungsaufmaß 360
  - Benetzungsverhalten 590
  - Beschaffungsphase 92
  - Beschichten 97, 507
  - Beschichtung
    - nasschemische 525
    - plasma-ionengestützte (IAD) 517
    - von DKE 633
  - Beschichtungsrate 516
  - Beschichtungsverfahren 507
  - Beschlag 441
  - Best-Fit-Radius 314, 401
  - Beugung 12
    - am Spalt 17
  - Bildfeldwölbung 38
  - Bildweite 21
  - Blank 555
  - Blankpressen 213, 225, 229
  - Blankpressverfahren 214, 220
  - Blasen 138
  - Blazegitter 29
  - Bleistift-Test 537
  - Blocken 555
  - Blockgläser 76
  - Blockglasfertigung 123
  - Blockkittung 562
  - Blockprozess 555
  - Blockverfahren 136
  - Bohren 331
    - mit Ultraschallunterstützung 333
  - Bohrvarianten 331
  - Bördeln 598, 601
  - Borosilikatglas 4, 133
  - Bottom Side 131
  - Bowtie 248
  - Brechen 252
    - manuelles 252
    - mechanisches 252

- Brechung 11, 70
- Brechungsgesetz von Snellius 11
- Brechungswinkel 20
- Brechzahl 70
- Brechzahlhomogenitätsverlauf 125
- Brechzahlschwankungen 125
- Breitbandfilter 513
- Brennweite 21
- Bridgman-Stockberger-Senkverfahren 182
- Brillenglasbeschichtung 518
  
- C**
- CAD-CAM-Module 99
- CAD-CAM-Software 112
- CCP-Maschine 379
- CCP-Verfahren (Computer-Controlled Polishing) 416
- Chalkogenidgläser 221
- Chemical Vapour Deposition 523
- Chemisch-mechanisches Polieren (CMP) 368
- Chemosynthese 523
- chipping 255
- clocking 697
- Cloud Computing 116
- CNC-Bonnet-Politur 668
- CNC-Poliermaschine 379
- CNC-Poliertechnik 311
- CNC-Schleifmaschinen 308
- CNC-Technik 648
- CNC-Zentriermaschinen 456
- Colorationsstufe 672
- Combinerdesign 688
- ComputerGeneriertes Hologramm 313
- Condition Monitoring 117
- Contour-Boring 478
- CVD-Verfahren 136, 244, 510
- Cyber Physical System 117
- Czochralski-Verfahren 179
  
- D**
- Dachkantelementfertigung 630
- Dachkantelement 630
- Dampfabscheidung
  - chemische 523
- Datengenerierung 108
- Defekte
  - strukturelle 85
- Definitionsphase 91
- Dehydration Bake 504
- DEMO-Technik 164
- Desensitivierung 708
- Designs of Experiments 726
- Dezentrierungen 617
- D-Form 248
- Diamant 284
  - synthetischer 461
- Diamantanteil im Schleifbelag 285
- Diamantdrahtsägen 260
- Diamanthohlbohrverfahren 331
- Diamantkonzentration 284
- Diamantkorngröße 284
- Diamantsuspension 348
- Diamant-Trennscheibe 295
- Dichroismus 19
- Dichte
  - optische 11
- Differenzierungsprinzip 96
- Diffusionskoeffizienten 605
- Diffusionsschweißen 604
- Digitaler Zwilling 118
- Digitalisierung 116
- Dipcoating 526f.
- Dipcoating-Verfahren 510
- Dispersion 24, 70
- Dispersionsformel nach Sellmeier 70
- Dispersionsfunktion 70
- Displaygläser 233
- Disproportionierung 524
- DLP-Druckverfahren 190
- DLP-Photopolymerisation 207
- DMAIC-Cycle 726
- DMD-Einheit 190
- Doppelbrechung 18
- Doppel-clad-Fasern 248
- Doppel-Gauss-Kleinformat-Kerasysteme 711
- Doppelkernfaser 249
- Doppelspindeltechnik 289
- Down-Draw-Verfahren 131, 134
- Drahtfeldbreite 262
- Drahtgeometrien 262
- Drahtgeschwindigkeiten 262
- Drahtsägen 260
- Drehbearbeitung 461
- Drehen
  - nichtrotationssymmetrischer Geometrien 473
  - rotationssymmetrischer Geometrien 468
- Dreiwaggonmethode 726
- Druckfestigkeit 67

Duktilschliff 326  
 – Optimierung 728  
 Duncker 3  
 Dunkelfeldanordnung 435  
 Dünnglas 133, 239  
 Durchlässigkeitsvermögen 71  
 Durchpolieren 393  
 Durchsetzen 557  
 Duroplaststoffe 79

## E

Eindruckhärte 69  
 Einfachkühlung 218  
 Einfachschicht 529  
 Einfallswinkel 20  
 Einfärben  
 – von Kunststofflinsen 548  
 Einfriertemperaturbereich 81  
 Einglas 1  
 Einhärtetiefe 189  
 Einlacken 564  
 Einlegeschale 558  
 Einlegeverfahren 558  
 Einreibverfahren 558  
 Einscheibensicherheitsglas 547  
 Einschlüsse 138  
 Einsinkpunkt 215  
 Einstein 5  
 Einzeldrahtsägen 261  
 Einzelfertigung 93  
 Einzelschnitt 294  
 Einzeltragkörper 557  
 Elementarzelle 84  
 Ellipsoidspiegel 27  
 ElsO-Montage 612  
 Empfindlichkeit 708  
 Endlos-Fasern 246  
 Endmontage 607  
 – Baugruppe 608  
 – Verfahren 611  
 Endprodukte 121  
 Entbinderung 211  
 Enterprise-Resource-Planning 116  
 Entspannungskühlen 539  
 Entspiegelung 14, 513  
 Entspiegelungsschichten 527  
 Entwicklungsablauf 91  
 Entwicklungsphasen 91  
 Entwicklungsstufen 89

Entwurfsphase 91  
 Entwurfszeichnung  
 – optische 99  
 Erweichungsbereich 81  
 Erzeugnisprinzip 95  
 Etching 494  
 Extreme Ultra Violet (EUV) 365

## F

Facettieren 455  
 Facettierscheibe 455  
 Fachzahl 155  
 Fanta-Objektiv 696  
 Färben 548  
 Farbfehler 38  
 – Farblängsfehler 38  
 – Farbquerfehler 38  
 Farbvorhalt 549  
 Faser  
 – optische 7, 24, 243  
 Fasercoating 247  
 Faserlaser 248  
 Faserquerschnitt 248  
 Fassen 598  
 – mittelbares 592  
 – von Optiken 598  
 – von Prismen 603  
 – von Rundoptik 598  
 Fassung 598  
 – additiv gefertigt 198  
 Fassungsentspannen 583  
 Fassungslose 617  
 Fast-Axis-Collimation-Linse (FAC) 233  
 Fast Tool Servo (FTS) 473  
 FDM-Technologie 204  
 FDM-Verfahren 209  
 Feinbearbeitungsverfahren 364  
 Feinkitten 586  
 – Prozess 588  
 Feinkühlen 218  
 Feinlappen 342  
 Feinpolieren 385  
 Feinschleifen 357  
 – Läppkinematik 342, 357  
 – ultraschallunterstütztes 328  
 Feinschleifprozess 303  
 Feinschnitt 266  
 Feinstbearbeitungsverfahren 364  
 Feinstschleifen 327

- Feinstschleifprozess 664
- FEM-Simulation 109
- FEPA-Norm 348
- FEPA-Standard 284
- Fernrohr 1 f.
- Fertigung
  - asphärische Bauteile 657
  - Axicon 677
  - Bikonvexlinse 653
  - Freiformoptik 683
  - Gleitsichtbrillenglas 669
  - Konvexkonkavlinse 654
  - optoelektronische Baugruppe 655
  - Stablinsen 673
  - Systemmontage 692
- Fertigungsarten 93
  - Einteilung 93
- Fertigungsinseln 96
- Fertigungsprinzip 94
  - Prozessprinzip (Erzeugnisprinzip) 95
  - Verfahrensprinzip (Werkstattprinzip) 95
- Fertigungsprozess
  - Auslegung 707
  - Grundlagen 89
  - Optimierung 707
- Fertigungstechnologien 625
- Fertigungsverfahren 96
  - Einteilung 96
- Fertigungsvorbereitung 108
- Fertigungszellen 96
- Festigkeit 67
- FFS (Flexible Fertigungs-Systeme) 96
- Ficksches Gesetz 544
- Filter 512
  - rugate 513
- Fischen 499
- Fizeau-Streifen 15
- Fläche
  - asphärische 21, 312
  - sphärische 21
- Flächendefekte 86
- Flächenkippwinkel 449
- Flachglas 129
- Flachglaszurichten 259
- Flachschleifen 300
  - mit Ringwerkzeug 280
  - Ringwerkzeug 301
- Flammenschmelzen 135
- Flammenschmelzverfahren (Verneuil-Verfahren) 183
- Fließen 548
- Fließfertigung 95
- Fließstraßen
  - flexible 95
- Fließtemperatur 81
- Floatglas 133
- Floatverfahren 131
- Float-Zoning-Verfahren 181
- Fluid-Jet-Polieren (FJP) 407
- Flycutting 475
- Flycutting-3-Achs-Fräsen 475
- Folien
  - optische 195
- Folienpolierschalen 392
- Footprint 278, 313, 318 f., 403 f., 408, 423, 491
- Formangaben 46
- Formgenauigkeit (Passe) 307
- Formmasse 149
- Formmaterialien 144
- Formschienenkittung 564
- Formschleifen 298, 303
  - mit Pelletwerkzeug 304, 307
  - mit Ringwerkzeug 304 ff.
  - sphärischer Flächen 306
- Formschluss 553
- Formstempel 223
- Fotolack 492
- Fotopolymerisation 524
- Fototropie 550
- Fourcault-Verfahren 130
- Fräsbearbeitung 474
- Fräsen 474
- Fraunhofer 3
- Fraunhofer-Beugung 17
- Fraunhofer-Linien 24
- Freiform 683
- Freiformflächen
  - Schleifen 317
- Freiformflächencombiner 688
- Freiformoptik
  - Fertigung 683
- Freiform-Raster-Fräsen 476
- Freiformschleifen 317
- Freigabeschritte 92
- Freiheitsgrade 709
  - sensitive 708
- Fresnel-Beugung 17
- Fresnel-Linse 33
- Fresnel-Optik 29
- Fresnel-Strahlteiler 29

Fügen 97, 553  
 - einer Linse 573  
 - mechanisches 572  
 - mittelbares 592  
 - pneumatisches 574  
 - provisorisches 557  
 - reguläres 559  
 - von optischen Bauelementen 576  
 - von prismatischen Teilen 563  
 - von Prismen 603  
 - von Rundoptik 598  
 Fügeverfahren 553  
 Füllfassungsprinzip 614  
 Füllstoffkitte 565  
 Füllzyklus (Schuss) 149  
 Funktionsbauteile 77  
 Funktionselemente  
 - binäre 491  
 Funktionsfläche  
 - asphärische 657  
 Fused-Deposition-Modeling-Verfahren 199

## G

Gangunterschied  
 - optischer 13  
 Gasphasenabscheidung  
 - physikalische 515  
 Gegenlauf 277  
 Gehäuseteil  
 - additiv gefertigt 199  
 Gel 178  
 Gelschicht 366  
 Gemengeaufbereitung 61  
 Geradenkinematik 280  
 Ghost Calculation 709  
 Ghost-Images-Analyse 721  
 Gießen 144, 173  
 Gießform 144  
 Gießharze 144, 147  
 Gießkopierv Verfahren 144  
 Gipsen 566  
 Gipskörper 566  
 Gittergleichung 29  
 Gitterkonstante 29, 84  
 Gitterperiode 493  
 Gitterteilmaschinen 487  
 Glas  
 - abgelagertes 548  
 - anorganische 57ff.

- fototropes 550  
 - organisches 57, 78  
 - zugerichtetes 129  
 Glasarten 58  
 Glasband (Ribbon) 132  
 Glasbeschriftung 497  
 Glasblöcke 123  
 Glasfaserziehen 246  
 Glasfehler 137, 141  
 Glasfestigkeit 542  
 Glasfolien 133  
 Glasgemenge 60  
 Glaskeramik 64  
 Glaskohlenstoff 222  
 Glasmacherpfeife 1  
 Glasmarkierung 497  
 Glasparameter 142  
 Glaspressen 222  
 Glasruß 245  
 Glasschmelzofen 4  
 Glass Manager 100  
 Glasstäbe 127  
 Glasstrukturieren 488  
 Glasumformprozess 213  
 Glaszertifikat 137  
 Gleichlauf 277  
 Gleitsichtbrillenglas  
 - Fertigung 669  
 Gobs 121f.  
 - Herstellung 122  
 Gradientenindex-Faser 25  
 Gratfassen 598  
 Grauschleier 441  
 Grauwertstrukturen 491  
 Gravieren 487  
 Grenzwinkel 12  
 Griffigkeit 395  
 Groove Etching 423  
 Großserien 93  
 Gussverfahren 129  
 Gyroskop 338

## H

Haftfestigkeit 536, 588  
 Halbzeug (Preform) 77, 83, 121, 243  
 Haltern 554  
 Halterung  
 - optischer Bauelemente 600  
 Halterungsverfahren 554

Hardbake-Prozess 527  
 Härte 69, 86  
 Härteverfahren 70  
 Hartlöten 594  
 Härtung  
 – Licht- 591  
 – lichtaktivierbare 591  
 – UV- 591  
 Hauptbrechzahl 58  
 Hauptpunkte 21  
 Heat-Molding-Verfahren 602  
 Hebelbewegung 395  
 Hebelmaschine 379  
 Heißformgebung 226  
 Heißkanaltechnik 162  
 Heißprägemaschinen 169  
 Heißprägen 164, 167, 173  
 Heißprägeprozess 167  
 Hellfeldanordnung 435  
 Herstellungsprozess 89  
 High-End-Funktionalitäten 512  
 Hilfsplatten 294  
 HL-Optiken (Hochleistungs-Optiken) 417  
 Hochdruckwasserstrahl 264  
 Hochleistungsoptik 5  
 Hohlbohrwerkzeug 331  
 Homogenität 125  
 Hotplate 504  
 Hotspots 153  
 HSC-Fräsen 222  
 HT-SLS-Verfahren 205  
 Huygenssches Prinzip 17  
 HydroSpeed-Polieren 575  
 Hydrothermalzüchtung 177  
 Hyperboloidspiegel 27

## I

IBF-Polieren (Ionenstrahlbearbeitung) 419  
 Impfkristall 176  
 – gekühlter 179  
 Ingot 180  
 Inhomogenität 125  
 Innenbordtrennschleifen 294*f.*  
 Innenrundscheifen 298  
 In-situ-Ätzratebestimmung 423  
 Integratorspiegel 478  
 Intensitätsverlust 527  
 Interferenz 12*f.*  
 – destruktive 14

– konstruktive 14  
 Interferenzfilter 513  
 Interferometer 16, 413  
 Inversionen 85  
 Ionenbeschuss 517  
 Ionenplattieren 520*f.*  
 Ionenstrahlätzen 494  
 Ionenstrahlbearbeitung 419  
 Ionenstrahlspattern 520  
 IR-Germaniumoptik 472  
 Isochromate 126  
 Isoklinen 126  
 IT-Qualität 467  
 IVPO (Inside Vapour Phase Oxidation) 244

## J

JIS 348  
 Josephson-Effekt 507  
 Justierdrehen 582  
 Justieren 577  
 Justierfutter 584  
 Justierkleben 592  
 Justierung  
 – aktive 618

## K

Kalotte 561  
 Kalottenjustierdrehfutter 585  
 Kaltlichtspiegelschichten 534  
 Kantenauflage 560  
 Kantenfilter 513  
 Kegelschnittkurve 22  
 Keilfehler 448  
 Keime 176  
 Kennzeichnung  
 – optischer Bauelemente 44  
 Kerbspannung 350  
 Kieselgelschicht 343  
 Kieselglas 63  
 Kinematische Wirkprinzipien 251, 280  
 Kitt  
 – UV-härtender 698  
 – zeithärtender 698  
 Kitten 556  
 – Auflagearten 560  
 – provisorisches 557  
 – reguläres 559  
 – von prismatischen Teilen 563

- Kittglieder 697
  - Kittkeil 617
  - Kittklotz 557
  - Kittlinsengruppe 699
  - Kittstationen 587
  - Kittwerkstoffe 564
  - Klasse
    - hydrolytische 73
  - Klebekitte 565
  - Kleben 566, 588
    - gerichtetes 592
    - Prozess 591
    - Schrumpfverhalten 588
    - ungerichtetes 592
  - Klebeverhalten
    - Glasschmelzen 231
  - Klebverbindung 589
  - Kleinserien 93
  - Koma (Asymmetriefehler) 37
  - Koma-Schieber 697
  - Kombiwerkzeug 454
  - Kompensatoren 708
  - Komponenten
    - optoelektronische 655
  - Konstantabtrag 375, 388
  - Kontaktlinsen 83
  - Kontaktlinsenfertigung 472
  - Konturabweichungen 224
  - Konturfräsen 475
  - Konvektionsofen 504
  - Konzentration 385, 455
  - Konzentrationsprinzip 96
  - Kopierkörper 628
  - Korndurchmessertoleranz 265
  - Kornform 284
  - Kornmaterial 265
  - Kornschnneiden 268
  - Körnung 284
  - Kornwerkstoff 348
  - Korrekturpolieren 376, 385
  - Kraftschluss 553
  - Kratzer 441
  - Kreiskinematik 280
  - Kreuzgitter 7
  - Kristalle
    - einachsige 19
    - photonische 7
    - zweiachsige 19
  - Kristallflächen 87
  - Kristallgitterstrukturen 84
  - Kristallisationstemperatur 81
  - Kristallkeim 178
  - Kristallklassen 85
  - Kristallwerkstoffe 58, 84
  - Kristallzüchtungsverfahren 174
    - aus dem eigenen Dampf 175
    - aus der Gasphase 175
    - aus der Lösung 176
  - KSS (Kühlschmierstoff)Zuführung 295
  - Kühlbahnen 542
  - Kühlen 540
    - Glasmaterial 61
  - Kühlgeschwindigkeit 218
  - Kühlöfen 542
  - Kühlpunkt
    - oberer 215
    - unterer 214
  - Kühltemperatur 218
  - Kühlungszüchtung 176
  - Kühlzeit 149
  - Kunstharzklebkitt 565
  - Kunststoffe 79
  - Kupfer-Keramik-Leichtgewichtsspiegel 477
  - Kurzpassfilter 514
  - KVP (Kontinuierlicher Verbesserungsprozess) 92
- L**
- Lacke 509
  - Lackieren 508
  - Lagefehler 38
  - Lagetoleranzen 449
  - Langkühlung 218
  - Langpassfilter 513
  - Längspendelschleifen 294
  - Längstiefschleifen 294
  - Langzeit-UV-Beständigkeit 147
  - Läppen 341
    - Maschinen 346
    - sphärischer Flächen 342, 354
    - Werkzeuge 346
  - Läppkäfige 347
  - Läppkinematik 357
  - Läppkoeffizient 349
  - Läppmaschinen 346
  - Läppmittel 343, 347
  - Läppmittelsuspension 361
  - Läppstufen 342
  - Läppsuspension 344 ff.
  - Läppverfahren 351

Läppwerkzeug 343  
Laserbelichter 493  
Laserdirektschreiben 491  
Laser-LIGA-Verfahren 164  
Laser-Reflow-Löttechnik 620  
Lasersinteranlage 201  
Laserspiegelschichten 532  
Laserstrahl-Absprengverfahren 263  
Laserstrahlbohren 339  
Laserstrahllöten 596  
Laserstrahlpolieren 430  
Laserstrahlseparieren  
- thermisches 263  
Laserstrahlsintern 201  
Laserstrahlverfahren 487  
Laugenklasse 73  
Läuterungsmittel 61  
Läuterungsprozess 61  
LED-Lupenfertigung 650  
Leichtbauspiegel 203  
Leichtgewichtspiegel 477  
Leistungsdichtespektrum (PSD) 51  
Lesesteine 1  
Leuchtdichte 43  
Libbey-Owens-Verfahren 130  
Lichtbogenverfahren 136  
Lichtdurchlässigkeit 71  
Lift-Out-Roller 132  
LIGA-Technik 5, 145, 165  
Liniendefekte 86  
Linienfilter 513  
Linse 21  
- asphärische 23  
- bikonvexe 23, 653  
- getragene 612  
- neutrale 21  
- plankonkave 23  
- randscharfe 457  
- Zylinderlinse 23  
Linsenfertigung 648, 652  
- mit CNC-Technik 648  
Linsenformen 23  
Linsenkeilfehler 450  
Linsenmittendicke 610  
Linsenradius  
- Messung 650  
Lithiumglas 4  
Lithografie  
- optische 5  
Lithografieprozess 492

Littleton-Punkt 215  
Löcher 441  
Lochgeometrien 331  
Los 94  
Lösen 82  
Losfertigung 94  
Losgröße 94  
Losgröße 1 185  
Lot 594  
- Glas 595  
- metallisch 595  
Lotauftrag 596  
Löten 594  
Lotwerkstoff 595  
Low-Cost-Bereich 143  
Low-Cost-Optikkonzepte 603  
Low-T<sub>G</sub>-Gläser 220  
Lupenlinsen 653

## M

Magneto-Rheologisches Finishing (MRF) 228  
Magnetronentladung 519  
Magnetron-Sputtern 520  
Maiman 5  
Manufacturing Execution System 116  
Markteintritt (time to market) 91  
Maschinenstein 129  
Massenproduktion 93  
Master 145  
Materialangaben 45  
Materialeigenschaften  
- Angabe 141  
Materialtraganteil 361  
Materialunvollkommenheiten 137  
MCVD-Verfahren (Modified Chemical Vapour  
Deposition) 244  
Mechanisch-abrasives Polieren (MAP) 368  
Mehrfachdrahtsägen 261  
Mehrfachschnitt 294  
Mehrfachtragkörper 352, 557  
Mehrkomponentendruck 200  
Mehrkomponentenspritzgießen 163  
Mehrmaschinenbedienung 96  
Meißner-Falle 420  
Membranfutter 575  
Meniskuslinse 23  
Messung  
- Linsenradius 650  
MICRO 348



Mikroabformung 160  
 Mikrohärte 69  
 Mikrolinsenarray 32, 167  
 Mikromontage 617  
 Mikromontagespritzgießen 162  
 Mikrooptik 7  
 Mikrorisse 69  
 Mikroskop 1  
 Mikrospritzgießen 155, 160  
 Mikrotopografie 157  
 Mikrozerspanung 459  
 Mindestspannungsdicke 464f.  
 Mittelläppen 342  
 Mittelserien 93  
 Mittendicke 21  
 Mittenrauwert  
 - arithmetischer 51  
 - quadratischer 51  
 MKD 156  
 MKS-Kitte 565  
 Modulation 43  
 Modulationsübertragungsfaktor 43  
 Modulationsübertragungsfunktion (MTF) 43  
 Monitoring 114  
 - optisches 522  
 Monomode-Faser 25  
 Montage 576  
 - von Hochleistungsoptiken 582  
 Montagekonzept  
 - modulares 621  
 Montageprozess 576  
 - mehrstufiger 614  
 Moth Eye Structure 5, 530  
 Mottenaugenstruktur 5, 530  
 MRF-Polieren (MagnetoRheological Finishing) 402  
 MRF-Verfahren 313, 662  
 Multi-Jet-Printing 191  
 Multi-Configuration-Editor 718  
 Multilayerlösungen 734  
 Multilens-Messung 582  
 Multimode-Faser 25  
 Multischichtspiegel 533

## N

Nacken-Kyropoulos-Verfahren 179  
 Nanokomposit 511  
 Nanokompositlacke 510  
 Nanotechnologie 7

Naturdiamant 461  
 Needle Design 510  
 Negativlack 492  
 Newtonsche Ringe 15  
 Niederschmelze 61  
 Nietbrille 1  
 Null-Fehlerproduktion 99  
 Nyquist-Frequenz 710

## O

Oberflächen  
 - nanostrukturierte 530  
 Oberflächenangaben 50  
 Oberflächendefekte 435  
 Oberflächenfehler 50  
 Oberflächenformtoleranzen 46  
 Oberflächengüte 50  
 Oberflächengütecharakteristik 51  
 Oberflächenhärtung 510  
 - nasschemische 510  
 Oberflächenspiegelschichten 531  
 Oberflächenunvollkommenheit 50, 434  
 Objektiv  
 - Montage 696  
 Objektivmontage 615  
 OPC UA 116  
 Optiken  
 - fliegende 477  
 Optikfertigung 1  
 - Entwicklung 8  
 Optikfertigungsdesign 721  
 Optikfertigungsdesigner 707  
 Optikkettenfertigungsdesign 725  
 Optiklack 509  
 Optikschutzlack 509  
 Optiksimation 109  
 Optiksystemdesigner 707  
 Orthotest 352  
 Outsert-Technologie 621  
 OVD (Outside Vapour Deposition) 244  
 Overflow-Fusion-Verfahren 134  
 OVPO (Outside Vapour Phase Oxidation) 244

## P

Panda 248  
 PanDao-Softwareprojekt 675, 722, 753  
 Parabolspiegel 27  
 Parallelansprengkörper 569

- Parallelversatz 617
- Passe 15
- Passeprüfung 15
- Passspiel-Montage 611
- PCVD (Plasma Chemical Vapour Deposition) 244
- Pellets 287
- Pelletwerkzeug 287
- Pentagonprisma 27, 628
- Percussionsbohren 339
- Phasenbedingung 15
- Phasendifferenz 13
- Phasengitter 29
- Phasenmatrix 734
- Physical Vapour Deposition (PVD) 515
- Pinselschmierung 346
- Pittsburgh-Verfahren 130
- Plananschlag 617
- Planläppen 342, 351
  - mehrere Werkstücke 353
- Planplatte 20, 28
- Planspiegel 26
- Plasma-CVD-Verfahren (PECVD, Plasma Enhanced CVD) 524
- Plasma-Impuls-CVD-Verfahren (PICVD) 524
- Plasmapolymerisationsverfahren 510
- Plasmaschmelzverfahren 243
- Plasmastrahlpolieren 429
- Plastics Wafer Technology (PWT) 161
- Pleochroismus 18
- Polarisation 12
- Polarisator 12
- Polierbonnet 411
- Polierdauer 365
- Polieren 364
  - aktiv-adaptives 428
  - flächenförmiger Werkzeugeingriff 386
  - Hebelmaschinen 387
  - Korrekturverfahren 416
  - linienförmiger Werkzeugeingriff 386, 401
  - lokales 444
  - Maschinenanordnungen 379
  - punktförmiger Werkzeugeingriff 386, 401
  - roboterunterstütztes 411
  - Spezialverfahren 428
  - Werkzeugformen 376
- Polierfehler 441
- Poliergrad 52
- Polierhypothese 366
  - Abtraghypothese 366
  - chemische Hypothese 366
  - Fließhypothese 366
  - Reib-Verschleiß-Hypothese 366
- Polierkonstante 373
- Polierkruste 381
- Poliermembran 575
- Poliermittel 365, 380
- Poliermittelrückstände 381
- Poliermittelträger 376, 381
- Polierprozess
  - verweilzeitgesteuerter 375
- Polierschale
  - viskoelastische 376, 386
- Polierverfahren 385
- Polierwerkzeug 366
- Polierwerkzeugkorrektur 399
- Polyaddition 78
- Polygonnetze 55
- Polykondensation 78
- Polymerisation 78, 189, 591
- Polyreaktionen 78
- Porroprisma 27
- Positionieren 577
- Positionierung
  - passive 618
- Prägeweg 171
- Prägewerkzeuge 164
- Präzisionsasphäre 54
- Präzisionsblankpressen 213, 220, 229
- Präzisionsblankpressverfahren 225
- Präzisionseinzeltraggkörper 451
- Präzisionsgobs 229
- Präzisionsschleifmaschine 288
- Precision Gobs 123
- Precision Molding 220
- Preformherstellung 243
- Preformpräparation 248
- Pressen 220
- Presshaut 231
- Presslinge 121
  - Herstellung 122
- Pressschweißen 604
- Pressverfahren 225
- Preston-Koeffizient 373
- Preston-Theorie 387
- Printoptical Technology 196
- Printverfahren
  - direkte 496
- Prisma 24
  - Fügen 603
- Prismenfertigung 625

- Prismenwinkel 24
  - Probeglas 15
  - Produkte
    - endformnahe 121
  - Produktentwicklung 89
  - Produktion
    - Prozessoptimierung 725
  - Produktionsmanager 707
  - Produktionsplanungsphase 92
  - Produktionsplattformen 116
  - Prototypen 147
  - Prototypenphase 91
  - Prozessführung
    - variotherme 168
  - Prozessintegration
    - horizontale 117
    - vertikale 116
  - Prozesskette 98
  - Prozessprinzip 95
  - Pulvertransportsystem 201
  - Punktdefekte 86
  - Punktewolken 55
  - PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) 510
  - Pyrolyse 523
- Q**
- Qualitätsschnitt 266
  - Quarzglas 63, 135, 243
    - Herstellung 135
  - Quarzgut 136
  - Quellen 82
  - Quereinsteichschleifen 294
- R**
- Radienabweichung 16
  - Radiergummi-Test 537
  - Radpolieren 410
  - Randauflage 560
  - Randmattieren 508
  - Randschwärzen 508
  - Rasterfräsens 475
  - Rauschmelze 61
  - Rautiefe
    - theoretische 465
  - Raytracing 101
  - Reaktionsgießen (RIM) 145
  - Reaktionsgießverfahren
    - lichtinduziertes 145
  - Realstruktur 181
  - Reflexbildgerät 451
  - Reflexbildverfahren 578
  - Reflexion 11, 71
  - Reflexionsgesetz 11
  - Reflexionsgitter 29
  - Reflexionsgrad 528, 732
  - Reflexionskoeffizient 71, 732
  - Reflexionsprismen 27
  - Reflexionsverlust 528
  - Reihenfertigung 95
  - Reinigen 252, 498
    - Kunststoffoptiken 502
    - manuelles 499
    - maschinelles 501
  - Reinigungsfehler 505
  - Reinigungshilfsmittel 500
  - Relaxationszeit 217
  - Remelting 128
  - Replikation 165
  - Resist 166, 491
  - Restspannungen 126, 217
  - Richten 577
  - Ringschneidenklebung 592
  - Ringsphärometer 355
  - Ringwerkzeug 286
  - Risikoanalyse (FMEA) 92
  - Rissmorphologie 272
  - Risstypen 273
  - Rissverläufe 269
  - Risszonen 269
  - Ritzen 253
  - Ritzhärte 69
  - RMS-Wellenfront-Fehler 712
  - Robuste Designoptimierung 112
  - Rohglas 76, 121
    - Herstellung 123
  - Rohkitte 564
  - Rohkitten 556
  - Rohlinge 77, 121
    - mit vor- bzw. angearbeiteten Flächen 77
  - Röntgen-LIGA 166
  - Rotation 85
  - Rubinlaser 5
  - Rückflächenspiegel 26
  - Rundieren 298
  - Rundoptik
    - Fügen 598
  - Rundscheifen 298

**S**

- Sägen 260
- Sammellinse
  - Fertigung 649
- Saphir
  - synthetischer 184
- Sauberkeitsklasse 435
- Sauberkeitsschutzzonen 571
- Säureklasse 73
- Säurepolitur 546
- Scanning-Scratch-Test 537
- Schalenpolitur 376
- Schalenwerkzeug 376
- Schärfefehler 37
- Scheibenschleifmodus 315
- Scheitelpunkt 21
- Schichtarten 513
- Schichtauftrag
  - partieller 496
- Schichtcharakterisierung 535
  - kalorimetrische 535
- Schichtdesign 731
- Schichtdickenverhältnis 533
- Schichten
  - optische 512
- Schichtherstellung 514
- Schichtsysteme 5, 734
- Schichtsystemtolerierung 737
- Schiebelinse 697
- Schleifbarkeitsklasse 283
- Schleifbearbeitung
  - sphärischer Linsen 310
- Schleifdruck 350
- Schleifen 268
  - asphärische Fläche 312
  - Bauelemente 323
  - Freiformflächen 317
  - Kombiwerkzeug 287
  - Sonderverfahren 326
  - sphärischer Flächen 303
  - ultraschallunterstütztes 291
  - Vorhersagemodelle 272
  - Werkzeuge 284
- Schleifhärte 69, 282, 350
- Schleifmaschinen 288
  - Ultraschallunterstützung 291
- Schleifverfahren 268, 293
- Schleifwerkzeuge 287
  - diamantgebundene 284
- Schleifzentrum
  - präzisionsoptisches 317
- Schlieren 138
- Schlierendichte 139
- Schlierenklassen 139
- Schlittschuheffekt 442
- Schmalbandfilter 513
- Schmelzen
  - elektrisches 135
  - kontinuierliches 136
- Schmelzprozess 62
- Schmelztiegel 123
- Schneide
  - geometrisch unbestimmte 268, 341
- Schneidenwinkel 254
- Schnittgeschwindigkeit 281, 350
- Schnittkanten 256
- Schott 3
- Schrumpf 224
- Schrumpfmaß 224
- Schutzfasen 46
- Schutzlack 508
- Schutzschichten 508
- Schwarzlackstruktur 496
- Schwerkraftsenken 235
- seed 181
- Seidelsche Aberrationen 40
- Selbstschärfungseffekt 278
- Selektives Laserstrahlschmelzen 201
- Senken 234
  - hybrides 242
  - laserstrahlunterstütztes 238
  - mit Vakuumunterstützung 237
- Senkwerkzeug 236
- Sensitivität 102, 708
- Sensitivitätsanalyse 714
- Serienfertigung 93
- Servo-Tool-Anwendungen 473
- Siebdruck 496
- Siegelpunkt 150
- Silikonformen 147
- Simulation
  - grafische 113
  - multiphysikalische 110
- Simulationsprogramme 108
- Simulationstechniken 108
- Sinterung 211
- SIRD (Scanning Infrared Depolarization) 181
- Six Sigma 726
- Slicen 186

- Slow Tool Servo (STS) 473
- Slurry 260
- SMT (Surface Mounted Technology) 655
- Snap-In-Technologie 602
- Soda-Glas 2
- Softbake 526
- Softbake-Prozess 527
- Sol 178
- Sol-Gel-Verfahren 178, 510
- Solidustemperatur 594
- Sonotrode 358
- Sonotrodenbewegung 358
- Soot-Verfahren 137
- Spaltbarkeit 86
- Spanen
  - geometrisch bestimmte Schneide 252
  - geometrisch unbestimmte Schneide 252
- Spannen 572
  - mechanisches 572
  - pneumatisches 574
- Spannglocken 451
- Spannungen
  - mechanische 539
  - permanente 540
  - temporäre 540
- Spannungsdoppelbrechung 68
- Spannungsprüfer 13
- Spannungstrajektorien 126
- Spannungszone 68
- Spannungszustand 68
- Spannzangen 572
- Spannzangengeometrie 573
- Spannzentrieren 451
- Spanzipfel 464
- Spanzipfel-Theorie 464
- Spektrale Leistungsdichtefunktion 370
- Spektralfilter 513
- Spezialisierungsgrad 93
- Spiegel 26, 512
  - adaptiver 478
  - asphärischer 26
  - konkav sphärischer 27
  - sphärischer 26
- Spiegelformen 27
- Spiegelschichten
  - elektrisch leitfähige 534
  - EUV-Bereich 532
- Spiegelträgermaterial 211
- Spiegelungen 85
- Spincoating 526
- Spincoating-Verfahren 510
- Spindeldrehzahl 350
- Spraycoating 526
- Spritzgießen 149, 173
- Spritzgießzyklus 149
- Spritzprägen 170, 173
- Sprödschliff 270
- Sputterausbeute 519
- Sputtern 518
- Stablinsen
  - Fertigung 673
- Stabrohrmethode 244
- Stabziehverfahren 129
- Stacked Tube Technique 248
- Stammakte 92
- Standardgobs 122
- Standzeiten
  - Werkzeuge 223
- Stangenpressverfahren 226
- Stapelmontage 702
- Stapelprinzip 615
- Steckzentrieren 451
- Stereolithografie 188
- Stift-Schraubverbindung 613
- STL-Datei 186
- Stoffeigenschaftsändern 97, 539
- Stoffschluss 553
- Strahlenversatz 20
- Strahlhomogenisierung 32
- Strahlreinigung 504
- Strahlteiler 28, 512
- Streifenkittung 562
- Streulichtanalyse 721
- Strukturieren 486
  - fotolithografisches 491
  - Metall- und Lackschichten 495
- Strukturierungsverfahren 486
- Stufenindex-Faser 25
- Subaperturwerkzeug 376, 409
- Sublimationsschneidverfahren 264
- Subsurface Damage 270
  - Messmethoden 274
- Surface-Sag 104
- Surface-Slope-Deviation 104
- Suspensionswasserstrahlverfahren 267
- Synchro-Speed-Polieren 397
- System
  - mehrspindlige 309
- Systemleistung
  - reale optische 708

Systemmontage 692  
Systemtolerierung 707

## T

Tageswannen 123  
Taktstraßen 95  
Talbot-Interferometer 493  
Tape-Test 536  
Target 518  
Tastschnittmessverfahren 356  
T-Belag 5, 528  
Teiler  
– dichroitische 513  
Teilerschichten 513  
Teilerspiegelschichten 533  
Teilerwürfel 28  
Temperaturanalyse 718  
Temperaturdifferenzverfahren 176  
Thermal Expansion 709  
Thermoplaste 79  
– amorphe 81  
– teilkristalline 81  
Thermoplaststoffe 79  
Tiefschleifen 300  
Tiegel 179  
Toleranzanalyse 708 ff.  
Toleranzanpassung 716  
Toleranzkriterium 712  
Toleranzoperanden 712  
Tolerierung 710  
Tool Center Point 318  
Topcoating 537  
Topfschleifmodus 315  
Topfwerkzeuge  
– diamantgebundene 314  
Top-Roller 131  
Top Side 132  
Totalreflexion 11  
Touch Control Panels 534  
Touch-Setting-Verfahren 400  
Tragkörper 557  
Transferstraßen 95  
Transformationsbereich 60  
Transformationspunkt 60  
Transformationstemperatur 594  
Translation 85  
Transmissionscharakteristik 72  
Transmissionsgitter 29  
Transmissionsgrad 71, 528

Transmissionskoeffizienten 732  
Trennen 97, 251  
Trenngeschwindigkeit 262  
Trennschärfe 348  
Trennschleifen 293  
Trennschleifscheiben 295  
Trennschnitt 266  
TRIMO-SMD 620  
Tripelspiegel 636  
– Fertigung 643  
Tripelspiegelanordnung 637

## U

Übergangslote 595  
Übergangsmatrix 734  
UKP-Laserstrahlung 488  
ULE-Gläser 63  
Ultrakurzpuls laserstrahlung 488  
Ultrapräzisionsbearbeitung 458, 482  
Ultrapräzisionsdrehen 467  
Ultrapräzisionsschleifmaschine 289  
Ultrapräzisionszerspanung 458  
Ultraschall-Kunststoffbördeln 601  
Ultraschallreinigung 499 ff.  
Ultraschallreinigungsanlagen 502  
Ultraschallschwingläppen 358  
Ultrasonic 480  
Ultrasonic-Prozess 481  
Ultrasonic-Technologie 333  
Umformen 97, 213  
Umformtemperatur 214  
Umlaufschmierung 346  
Umschmelzen 123  
Unifärbetechnik 548  
Universalfeinkitt 586  
Unterlagen  
– technologische 98  
Untersuchung  
– spannungsoptische 13  
Unvollkommenheiten  
– bei Oberflächen 50  
UP-Bearbeitung 478  
Up-Draw-Verfahren 131  
UP-Drehen 466 f.  
UP-Fräsen 475  
UP-Maschine 460  
UP-Zerspanung 458 f.  
Urformen 97, 121  
– endformnahes 185

Urformerzeugnisse 121  
 Urmodel 145  
 US-Schwinglappmaschine 358  
 UV-Kante 72

## V

VAD (Vapour Axial Deposition) 244  
 Vakuum 516  
 Vakuumbdampfung 515  
 Vakuumgießen 145  
 Vakuumspannen 574  
 Vakuumspannfutter 575  
 Van-Der-Waals-Bindungskräfte 606  
 Verändern  
 – plastisches 213  
 Verbinden 553  
 Verdampfungszüchtung 176  
 Verfahrensprinzip 95  
 Verfestigen 542  
 – chemisches 543  
 – thermisches 542  
 – Verfahren 546  
 Verformungsverhalten 81  
 Verlaufsfärbetechnik 548  
 Vernetzung 116  
 Versetzungen 86  
 Versiegelung 171  
 Verspiegelungen 513  
 Verspiegelungsschichten  
 – dielektrische 15  
 Versprengen 597  
 Verwitterungsklasse 73  
 Verzeichnung 38  
 Vielschichtstrukturen  
 – Design von 730  
 Virtualisierung 114  
 Virtual Reality 114  
 Viskosität 66  
 Viskositätskurve 214  
 Viskosität-Temperatur-Kurve 66, 215  
 Vollauflage 560  
 Vollkittung 557  
 Volumenabsorption 20  
 Volumendefekte 86  
 Volumenmodell 186  
 Volumenoptik 93  
 Vorderflächenspiegel 26  
 Vorderspiegelschichten 531

Vorlappen 342  
 Vorpolieren 385  
 Vorserienphase 92  
 Voxel 197  
 VR-Technologien 115

## W

Wannenschmelze 123  
 Wärmebehandlung 539  
 Wärmebehandlungsprozesse 539  
 Wärmekammer 237  
 Wärmeschutzfilter 513  
 Warmkitt 586  
 Wasser-Abrasivgemisch 264  
 Wasserstrahlabrasivschneiden 264  
 Wasserstrahlschneidtechnik 340  
 Wechselspindelsysteme 451  
 Weichlöten 594  
 Wellenfrontdeformation 48  
 Werkstattprinzip 95  
 Werkstoffe  
 – Gläser 57  
 – glaskeramische 64  
 – Kristalle 57  
 – optische 57  
 Werkzeugeingriff 386  
 Werkzeugformenherstellung 222  
 Werkzeugkorrektur 224  
 Werkzeugmittelpunkt 318  
 Werkzeug (Sonotrode)  
 – formübertragendes 346  
 Werkzeugverschleiß 399  
 Wiedergrau 442  
 Winkelabweichungen  
 – Messung 645  
 Wirkungsgrad  
 – optischer 43  
 Wirtschaftsglas 62  
 Wischer 441

## Z

Zeichnungsangaben 141 ff.  
 Zeiss 3  
 Zeitspannungsvolumen 251, 281, 344, 350,  
 361, 374  
 Zentriermaß 450  
 Zentrierautomat 453