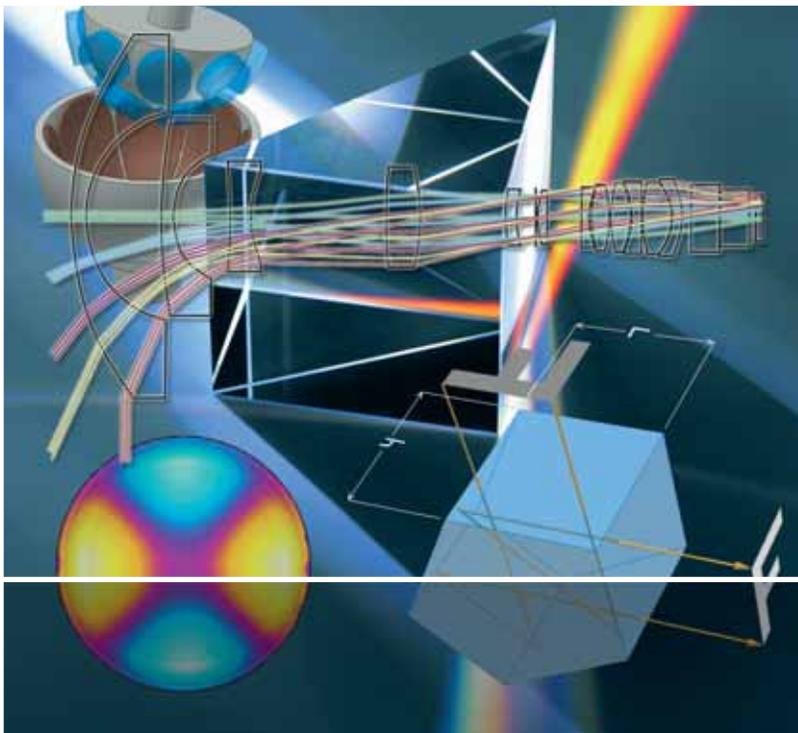


Jens Bliedtner
Günter Gräfe

Mit Videos und
Übungsaufgaben
auf DVD

Optiktechnologie

Grundlagen – Verfahren –
Anwendungen – Beispiele



HANSER

Inhalt

	Vorwort	5	5	Urformen von optischem Glas	75
1	Die Entwicklung des Glases und der Optikfertigung	11	5.1	Urformende Verfahren für mineralische Gläser	75
2	Grundlagen der Optik	17	5.1.1	Herstellung von Gobs und Presslingen ..	75
2.1	Brechung, Reflexion und Totalreflexion .	17	5.1.2	Herstellung von Glasblöcken	76
2.2	Polarisation, Interferenz und Beugung ..	18	5.1.3	Herstellung von Flachglas	79
2.3	Doppelbrechung und Pleochroismus	22	5.2	Urformende Verfahren für organische Gläser	82
2.4	Abbildende optische Bauelemente	23	5.2.1	Gießen	83
2.4.1	Transmittierende optische Bauelemente .	23	5.2.2	Spritzgießen	87
2.4.2	Reflektierende optische Bauelemente ...	27	5.2.3	Heißprägen	92
2.4.3	Teildurchlässige optische Bauelemente ..	29	5.2.4	Spritzprägen	96
2.4.4	Diffraktive optische Bauelemente	30	5.3	Urformende Verfahren für Kristallwerkstoffe	99
2.5	Abbildungsfehler	31	5.3.1	Züchtung aus der Gasphase	99
2.6	Bewertung der Abbildungsleistung eines optischen Systems	34	5.3.2	Kristallzüchtung aus der Lösung	101
2.7	Kennzeichnung optischer Bauelemente .	35	5.3.3	Züchtung aus der Schmelze	103
2.7.1	Materialangaben	36	6	Umformen von optischem Glas	109
2.7.2	Formangaben	36	6.1	Grundlagen	109
2.7.3	Oberflächenangaben	37	6.2	Pressen	114
3	Optische Werkstoffe	41	6.2.1	Verfahrensprinzip	114
3.1	Einteilung der optischen Werkstoffe	41	6.2.2	Werkzeugform – Herstellung und Anforderungen	115
3.2	Mineralische Gläser	41	6.2.3	Pressprozess	117
3.2.1	Definition und Struktur	41	6.2.4	Anwendungsgebiete	118
3.2.2	Herstellung mineralischer Gläser	42	6.3	Senken	119
3.2.3	Eigenschaften mineralischer Gläser	45	6.4	Ziehen	120
3.2.3.1	Mechanische Eigenschaften	45	7	Trennen	127
3.2.3.2	Optische Eigenschaften	49	7.1	Zerteilen	128
3.2.3.3	Chemische Eigenschaften	50	7.1.1	Mechanisches Brechen	128
3.2.4	Lieferformen mineralischer Gläser	51	7.1.2	Sonderverfahren zum Zurichten	129
3.3	Organische Gläser	53	7.1.2.1	Mechanisches Trennen durch Sägen	130
3.3.1	Definition und Struktur	53	7.1.2.2	Thermisches Laserstrahlseparieren	132
3.3.2	Ausgewählte Eigenschaften	55	7.1.2.3	Wasserstrahlabrasivschneiden	133
3.3.3	Anwendungsbereiche und Lieferformen .	56	7.2	Schleifen	136
3.4	Kristallwerkstoffe	57	7.2.1	Verfahrensgrundlagen	137
3.4.1	Aufbau und Struktur	57	7.2.2	Werkzeuge und Maschinen	139
3.4.2	Ausgewählte Eigenschaften	59	7.2.3	Trennschleifen	143
4	Grundlagen des Fertigungsprozesses .	63	7.2.4	Formschleifen	147
4.1	Entwicklungs- und Herstellungsprozess	63	7.2.4.1	Rundschleifen (Rundieren)	147
4.1.1	Entwicklungsstufen	63	7.2.4.2	Flachschleifen	149
4.1.2	Entwicklungsablauf	64	7.2.4.3	Schleifen sphärischer Flächen	152
4.2	Fertigungsarten	66	7.2.4.4	Schleifen asphärischer Flächen	159
4.3	Fertigungsprinzipien	67	7.3	Bohren	165
4.4	Einteilung der Fertigungsverfahren	69	7.4	Läppen	169
4.5	Technologische Unterlagen	70	7.4.1	Verfahrensgrundlagen	170
			7.4.2	Maschinen und Werkzeuge	171

7.4.3	Betriebs- und Hilfsstoffe für das Läppen	172	8	Beschichten	271
7.4.4	Einflussgrößen	174	8.1	Schutzschichten	272
7.4.5	Läppverfahren	176	8.1.1	Lackieren	272
7.4.5.1	Planläppen	176	8.1.2	Oberflächenhärtung	273
7.4.5.2	Läppen sphärischer Flächen	178	8.2	Optische Schichten	275
7.4.5.3	Feinschleifen mit Läppkinematik	180	8.2.1	Schichtarten	275
7.4.5.4	Ultraschallschwingläppen	181	8.2.2	Schichtherstellung	277
7.4.5.5	Leistung und Genauigkeit	182	8.2.2.1	Physikalische Dampfabscheidung (PVD)	277
7.5	Polieren	186	8.2.2.2	Chemische Dampfabscheidung (CVD)	282
7.5.1	Verfahrensgrundlagen	186	8.2.2.3	Nasschemische Verfahren	283
7.5.2	Maschinen und Werkzeuge	191	8.2.3	Anwendungen	285
7.5.3	Betriebs- und Hilfsstoffe für das Polieren	193	8.2.3.1	Entspiegelungsschichten	285
7.5.4	Einflussgrößen	196	8.2.3.2	Vorder- und Oberflächenspiegelschichten	287
7.5.5	Polierverfahren	198	8.2.3.3	Teilerspiegelschichten	290
7.5.5.1	Polieren mit flächenförmigem Werkzeugeingriff	199	8.2.3.4	Kaltlichtspiegelschichten	290
7.5.5.2	Polieren mit punkt- oder linienförmigem Werkzeugeingriff (zonale Politur)	208	8.2.3.5	Elektrisch leitfähige Schichten	290
7.5.5.3	Korrekturpolieren	213	9	Stoffeigenschaftsändern	295
7.5.6	Polierfehler	217	9.1	Entspannungskühlen	295
7.5.7	Leistung und Genauigkeit	220	9.2	Verfestigen	297
7.6	Zentrieren	225	9.3	Altern	300
7.6.1	Zentrierverfahren	226	9.4	Färben	300
7.6.1.1	Steckzentrieren	227	9.5	Fototrope Gläser	302
7.6.1.2	Spannzentrieren	227	10	Fügen	305
7.6.2	Zentriermaschinen und Werkzeuge	228	10.1	Fügen im technologischen Prozess	306
7.6.3	Bearbeitungsprozess	231	10.1.1	Blocken	306
7.7	Ultrapräzisionszerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide	233	10.1.2	Kitten	307
7.7.1	Verfahrensgrundlagen	234	10.1.2.1	Provisorisches Kitten	308
7.7.2	Verfahrenseinteilung	240	10.1.2.2	Reguläres Kitten	310
7.7.3	Drehverfahren	240	10.1.2.3	Block- und Streifenkittung	312
7.7.3.1	Drehen rotationssymmetrischer Geometrien	241	10.1.2.4	Kitten von prismatischen Teilen	313
7.7.3.2	Drehen nichtrotationssymmetrischer Geometrien	246	10.1.2.5	Kittwerkstoffe	314
7.7.4	Fräsen	247	10.1.3	Kleben	315
7.7.5	Ultraschall-unterstütztes Mikrospanen	251	10.1.4	Gipsen	315
7.7.6	Leistung und Genauigkeit	253	10.1.5	Ansprengen	316
7.8	Strukturieren	256	10.1.6	Spannen	320
7.8.1	Gravieren (Abtragen)	257	10.1.6.1	Mechanisches Spannen	321
7.8.2	Fotolithografisches Strukturieren	258	10.1.6.2	Pneumatisches Spannen	322
7.8.3	Strukturieren auftragener Metall- und Lackschichten	261	10.2	Fügen von optischen Bauelementen/ Montageprozess	323
7.8.4	Partieller Schichtauftrag	262	10.2.1	Zentrieren, Richten, Justieren	325
7.9	Reinigen	263	10.2.2	Feinkitten	329
7.9.1	Manuelles Reinigen	264	10.2.3	Kleben	331
7.9.2	Maschinelles Reinigen	264	10.2.4	Löten	336
7.9.3	Strahlreinigung	267	10.2.5	Versprengen	339
7.9.4	Ausheizen	267	10.2.6	Fassen von Optiken	339
7.9.5	Reinigungsfehler	268	10.2.6.1	Fassen von Rundoptik	340
			10.2.6.2	Fassen von Prismen	344
			10.2.7	Diffusionsschweißen	345
			10.2.8	Endmontage	348
			10.2.8.1	Optische Baugruppen	348

10.2.8.2	Montageverfahren	350	11.4	Fertigung eines Gleitsichtbrillenglases	380
10.2.9	Mikromontage	356	11.5	Montage eines Objektivs	384
11	Ausgewählte Fertigungstechnologien	363	11.5.1	Fügen der Einzellinsen und Kittglieder	385
11.1	Prismenfertigung	363	11.5.1.1	Gerichtetes Kleben (Richtkitten)	385
11.2	Linsenfertigung	368	11.5.1.2	Ungerichtetes Kleben	387
11.2.1	Linsenfertigung mit CNC-Technik	368	11.5.2	Justierdrehen	388
11.2.2	LED-Lupenfertigung	370	11.5.3	Teilmontage	389
11.2.2.1	Konstruktive Lösung	370	11.5.4	Endmontage	390
11.2.2.2	Fertigung der Linsen	372		Literaturverzeichnis	393
11.2.2.3	Optoelektronische Komponenten	374		Hinweise zur beigefügten DVD	403
11.2.2.4	Montage	374		Sachwortverzeichnis	409
11.3	Fertigung asphärischer Bauteile	375			

1 Die Entwicklung des Glases und der Optikfertigung

Bereits um 3000 v. Chr. entwickelte sich 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. Chr. entstand mit der Anwendung der Sandform- und -kerntechnik die Herstellung von Glasstücken, insbesondere auch von **Glashohlkörpern**. Um 500 v. Chr. wurde die **Glasmacherpfeife** erfunden, sehr wahrscheinlich in Phönizien. 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 Herstellung 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. Chr. und wenig später auch farbiges Fensterglas erzeugen konnten */Rast06/*.

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 z. B. 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 ein wichtiger 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 */Beez98/*. Unter

Lesesteinen versteht man halbkugelige plankonvexe Linsen, meist hergestellt aus Beryll, Quarz oder Bergkristall, die mit der planen Seite auf das Schriftstück aufgesetzt werden. 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.



Abb. 1.1: Nachbildung eines Lesesteines */humb06/*

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**. 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.



a)

b)

Abb. 1.2: Beispiele aus dem Beginn des Baus optischer Instrumente /Beez98/.

a) Mikroskop mit kippbarer Säule, 1705,

b) Auszugsfernrohre aus dem 18. und 19. Jahrhundert

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 /Beez98/.

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.

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 CARL 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

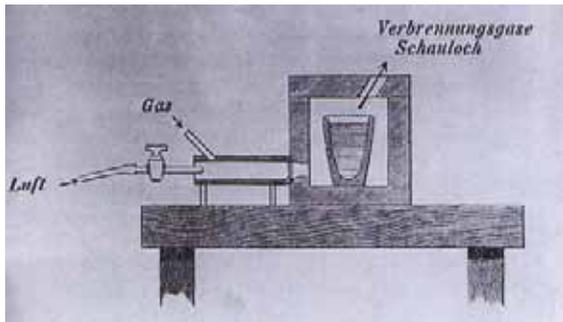


Abb. 1.3: Glasschmelzofen von OTTO SCHOTT, Witten 1881 /Beez98/

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 **Borosilikatglases** im Jahre 1887 durch den Jenaer Glaschemiker besonders zu erwähnen.

Etwa zu Beginn des 20. Jahrhunderts setzte mit der maschinellen Glaserzeugung und der Glasbearbeitung sowie den wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Struktur- und Eigenschaftsbeziehungen silikatischer 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.

Die wissenschaftlichen Arbeiten von ALBERT EINSTEIN aus dem Jahre 1917 stellten eine Grundlage für den Bau des ersten Lasers im Jahr 1960 dar. Dem 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 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 Mehrschichten und komplizierten Schichtsystemen. Durch die Integration von Effekten aus der Natur (z. B. Lotusblüteneffekt oder Mottenaugenstrukturen) konnten zu Beginn des 21. Jahrhunderts die Schichteigenschaften weiter verbessert werden. In der Abbildung 1.4 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.

Ein wesentlicher Meilenstein in der Optikfertigung war die Entwicklung der LIGA-Technik (**Lithografie, Galvanik und Abformung**) mit optisch abbildenden

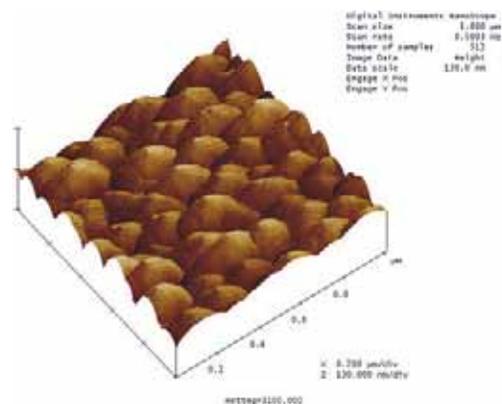


Abb. 1.4: Mottenaugenstruktur auf der Oberfläche einer Kunststofflinse (AFM-Aufnahme; FH Jena)

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 erlauben gegenwärtig die Erzeugung von Strukturen im Bereich von 65 nm. Mit diesen hohen 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.



Abb. 1.5: Hochleistungsobjektiv für einen Wafer-Stepper /Zeiss04/

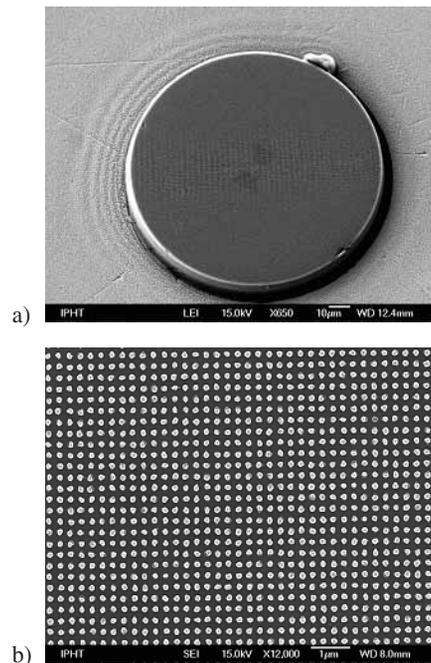


Abb. 1.6: REM-Aufnahmen eines mittels Interferenzlithografie erzeugten Kreuzgitters mit einer Periode von 280 nm /Jaue07/. a) Faserstirnfläche, b) Ausschnitt im Kernbereich

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 auch für zukünftige Aufgabenstellungen illustriert exemplarisch die Abbildung 1.6 zur Strukturierung einer optischen Glasfaser.

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

Der 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 der Abbildung 1.7 a sind mikrooptische Komponenten aus dem Bereich der Kommunikationstechnik dargestellt.

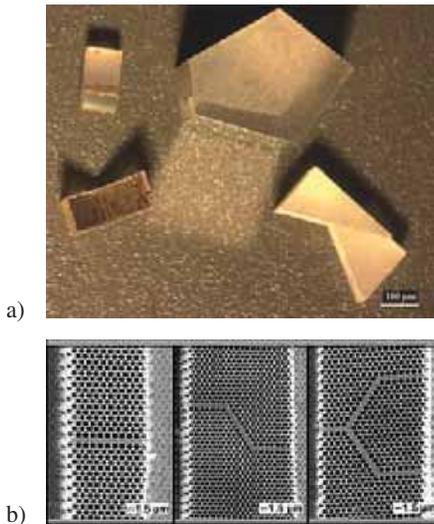


Abb. 1.7: Ausgewählte Beispiele der mikrooptischen Anwendung. a) Mikrobauelemente der Kommunikationstechnik, b) Photonische Kristalle mit Nanometer-Strukturen /kie107/

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



Abb. 1.8: Asphärisch gefertigtes Bauelement /Opto07/

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 stand immer stärker die Forderung des Bearbeitens von asphärischen Flächen sowie Freiformflächen in der Optikfertigung. Insbesondere zum Ende des 20. Jahrhunderts konnte durch die Maschi-

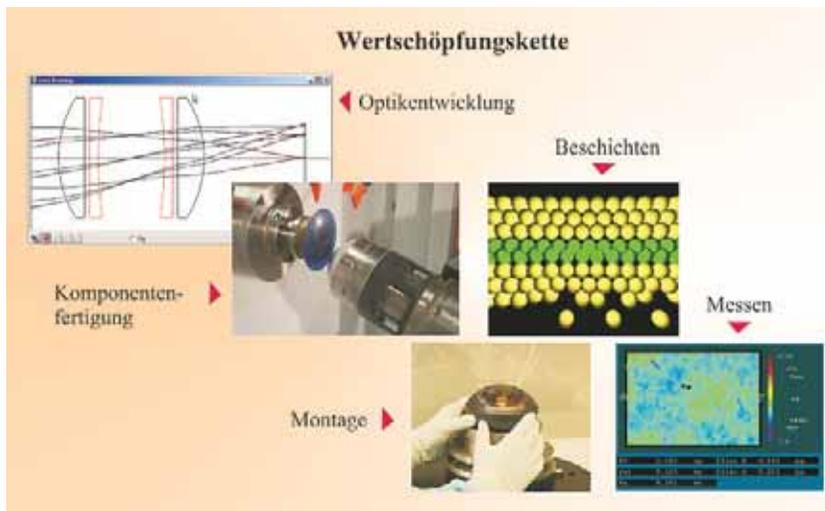


Abb. 1.9: Wertschöpfungskette im Entwicklungs- und Fertigungsprozess eines optischen Systems

Sachwortverzeichnis

- 2K-Verbundtechnik 91
- 3-Achs-Fräsen 248
- 3-Achs-Fräsmaschine 235
- 3C-Schleiftechnologie 158
- 3D-Volumenmodelle 73
- 3K-Verbundtechnik 91
- 4-Achs-Drehmaschine 235
- 4-Achs-Kinematik 143
- 4K-Verbundtechnik 91
- 90°-Prisma 28

- ABBE 12
- ABBESche Zahl 41
- Abbildungsfehler 31, 33, 63
- Abbildungsgleichung 24
- Abbildungsleistung 34, 204
- Abbildungsmaßstab 24
- Aberation, sphärische (Öffnungsfehler) 32, 33
- Abformprozess 83
- Abformungen 86
- Abkühlen, temperatur-zeit-gesteuertes 77
- Abkühlprozess 88
- Ablenkwinkel 26
- Abrasivmittel 134
- Abrichten (Justieren) 142, 171, 206
- Abrichtwerkzeug 172
- Abscheideprozess 123
- Abschrecken 298
- Absorption 49
- Abstände, axiale 349
- Abstehen 43
- Abtrag, kontinuierlicher 212
- Abtragen 127
- Abtraghypothese 187
- Abtragsarbeit 190
- Abtragshöhe, zeitbezogene 171, 177
- Abtragsrate 127, 138, 189, 209, 220
- Abtragstiefe 189
- Abtragsvolumen 138
- Abtragsprozess 50
- Abziehstreifen 318
- Achromate 32
- Achsanordnungen 193
- Acoustic Control (ACC) 252

- Adaptivregelung (ADR) 252
- ADP 101
- AFM-Darstellung 223
- AFM-Rauigkeit 222
- AFM-Vermessung 242
- Akzeptanzwinkel 26
- Alfa-Montage 351
- Alloy 306
- Altern 300
- Alterungsfaktoren 56
- Aluminiumoxid 173
- amorph 41
- Amplitudenbedingung 20
- Amplitudengitter 30
- Anreiben 313
- ANSI 174
- Ansprengen 316, 319
- Ansprengeflächen 317
- Ansprengstreifen 317
- Ansprengewerkzeug 318, 320
- Antireflexbeschichtungen 275
- Antireflexionsschicht (AR-Schicht) 286
- Apertur, numerische 26
- Arbeitsgang 68
- Arbeitsplan 74
- Arbeitsstufen 68
- AR-hard-Schichten 273, 286
- AR-Schicht 287
- Aspektprüfung 383
- Asphären 159
- Asphärenfertigung 69, 160
- Asphärenform 161
- Asphären-generator 246
- Asphären-gleichung 38
- Asphären-oberfläche 160
- Asphären-politur 191
- Astigmatismus 33
- Astrospiegel 216
- ATOM-Konzept 357
- ATOM-Verfahren 359
- Ätzen 260
- , chemisches 260
- Aufdampfen 277
- Auflagearten 311
- Auflösungsvermögen 31
- Aufmaß 225

- Auftrennen 144
- Ausarbeitungsphase 65
- Ausbohren 165, 168
- Aushärten 333
- Ausheizen 267
- Auslaufstein 79
- Auslaugungsprozess 50
- Auspolieren 209
- Außenbordtrennschleifen 145
- Außenrundscheifen 147, 148
- Außenrund-Umfangslängsscheifen 149
- Aussprungsgefahr 179

- Badseite des Glases 80
- Bahn, zyklodische 178
- Bandpassfilter 276
- Bandsägen 131
- Basismodule, strukturierte 357
- Bauelemente, abbildende optische 23
- , diffraktive optische 30
- , monolithische 163, 164
- , optische 349
- , reflektierende optische 27
- , teildurchlässige optische 29
- , transmittierende optische 23
- Baugruppe 52
- , optische 73, 348
- Bauteile, fertiggearbeitete 52
- Bearbeitungsaufmaß 183
- Bearbeitungsprozess 231
- Bearbeitungsverhältnisse, kinematische 212
- Belegung 204
- Belichtung, gekreuzte 261
- Benetzungsverhalten 332
- Beschaffungsphase 65
- Beschichten 70, 271, 299
- Beschichtung von Kunststoffoptiken 283
- Beschichtung, plasma-ionengestützte (IAD) 278
- Beschichtungsprozess 384
- Beschichtungsrate 278
- Beschichtungsverfahren 271
- Beschlag 219

- Best-Fit-Radius 161, 207
 Beugung 18, 21
 Beugung am Spalt 21
 Bewegungsbilder 201
 Bikonvexlinse 372
 Bildfeldwölbung 33
 Bildweite 24
 Bindemittel 140
 BK 7 41
 Blank 306, 312, 381
 Blankpressen 76, 109, 115, 119
 Blankpressprozess 115
 Blankpressverfahren 109, 114
 Blazegitter 31, 257
 Bleistift-Test 293
 Blockautomat 307
 Blocken 306
 Blockgläser 51
 Blockglasfertigung 77
 Blockkittung 312
 Blockprozess 306
 Bohren 165
 Bohren mit Ultraschallunterstützung 166
 Bohrgeschwindigkeiten 166
 Bohrtiefen 166
 Bohrungsgeometrie 168
 Bohrungslängen 166
 Bohrvarianten 165
 Bördeln 340, 342
 Borkarbid 173
 Borosilikatglas 13, 81
 Bottom Side 80
 Bowtie 125
 Brechen, manuelles 128
 –, mechanisches 128
 Brechung 17, 49
 Brechung von SNELLIUS 17
 Brechungswinkel 24
 Brechzahl 49
 Brechzahlhomogenitätsverlauf 78
 Brechzahlchwankungen 77
 Breitbandfilter 276
 Brennweite 24
 BRIDGMAN-STOCKBERGER 106
 Brillenglasbeschichtung 279

 CAD-CAM-Module 71
 CaF₂-Bearbeitung 136
 Calciumfluorid 106
 CAM-Lösungen 156

 CCP-Feinkorrektur 214
 CCP-Maschine 192
 CCP-Verfahren (Computer-Controlled Polishing) 213
 CGH (computergeneriertes Hologramm) 379
 Chemical Vapour Deposition) 282
 Chemisch-mechanisches Polieren (CMP) 189
 Chemosynthese 282
 clocking 385
 CNC-Bearbeitungsmaschinen 159
 CNC-Maschine 133
 –, mehrachsige 163
 CNC-Poliermaschine 192
 CNC-Poliertechnik 158
 CNC-Schleifmaschinen 156, 157
 CNC-Zentriermaschinen 232
 Colorationsstufe 383
 CTR 100
 CuproNickel 254
 CVD 100
 CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition) 121, 273
 CZOCHRALSKI-Verfahren 103, 104

 Dampfabscheidung, chemische (CVD) 282
 –, physikalische (PVD) 277
 Darstellung, interferometrische 203
 Defekte, strukturelle 59
 Definitionsphase 64
 Deformierung 202
 Dehydration Bake 267
 DEMO-Technik 93
 Dezentrierungen 355
 D-Form 125
 Diamant 140, 173
 –, monokristalliner 236
 –, synthetischer 236
 Diamantanteil im Schleifbelag 140
 Diamantdrahtsäge 130, 131
 Diamanthohlbohrer 166
 Diamanthohlbohrverfahren 165
 Diamanthohlbohrwerkzeuge 166
 Diamantkalotte 147
 Diamantkonzentration 140
 Diamantkorngröße 140
 Diamantpelletwerkzeuge 181
 Diamantsägen 132
 Diamantsuspension 173

 Dichroismus 23
 Dichte, optische 17
 Differenzierungsprinzip 69
 Diffusion 345
 Diffusionsschweißanlage 346
 Diffusionsschweißen 345, 347
 Dipcoating 284
 Dipcoating-Verfahren 273
 Dispersion 26, 49
 Dispersionsformel nach SELLMIEER 49
 Disproportionierung 282
 DOE 30
 Dokumentation 65
 Doppelbrechung 22, 23, 87
 Doppel-clad-Fasern 125
 Doppelkernfaser 126
 Doppelspindeltechnik 143
 Dosieren/Auftragen 333
 Down-draw-Verfahren 80
 Drahtfeldbreite 131
 Drahtgeometrien 130
 Drahtgeschwindigkeiten 131
 Drahtsägen 130
 Drehbearbeitung 235
 Drehen 238
 – mit Servo-Tool 247
 – nichtrotationssymmetrischer Geometrien 246
 – rotationssymmetrischer Geometrien 241
 Drehverfahren 240
 Druckfestigkeit 47
 DUNCKER 12
 Dunkelfeldanordnung 217
 Durchlässigkeitsvermögen 49
 Durchpolieren 201, 205
 Durchsetzen 308
 Duroplaststoffe 54
 DUV-Interferenzbelichter 260

 Edelkorund 140
 Eigenschaften, chemische 50
 –, optische 49
 –, physikalisch-chemische 82
 Eindruckhärte 48
 Einfachkühlung 111
 Einfachschicht 286
 Einfallswinkel 24
 Einfärben von Kunststofflinsen 300
 Einfriertemperaturbereich 55

- Einglas 11
Eingriffsverhältnisse 199, 238
–, kinematische 150, 170
Einlacken 313
Einlegeschale 309
Einlegeverfahren 309, 310
Einreibverfahren 309
Einscheibensicherheitsglas 299
Einsinkpunkt 110, 119
EINSTEIN 13
Einstellungsverhältnisse für das
 Formschleifen 155
Einteilung der Fertigungsarten 66
Einzeldrahtsägen 131
Einzelfertigung 66
Einzelschnitt 143
Einzeltragkörper 308
Elementarzelle 58
Elemente, diffraktive optische 119
Ellipsoidspiegel 28
ElsO-Montage 351
Endbearbeitung, nachgelagerte 89
Endlos-Fasern 123
Endmontage 348, 390
Endprodukte 75
Entformungstemperatur 95
Entspannungskühlen 295
Entspiegelung 19, 275
Entspiegelungsschichten 285
Entwicklungsphasen 64
Entwicklungsprozess 64
Entwicklungsstufen 63
Entwicklungsverlauf 73
Entwurfsphase 64
Entwurfszeichnung, optische 71
Erweichungsbereich 55
Erweichungstemperatur 94
Etching 260
EUV-Bereich 289
Extreme Ultra Violet (EUV) 186
- Facettieren 230
Facettierscheibe 230
Fanta-Objektiv 385, 390, 391
Färben 300
Farbfehler 33
Farblängsfehler 32, 33
Farbquerfehler 32, 33
Farbvorhalt 301
Faser, optische 14
Faseroating 124
Faserlaser 125
Fasern, optische 26, 120
Faserquerschnitt 125
Fassen 340
– von Optiken 339
– von Prismen 344
–, mittelbares 334
Fassung 339, 341
– von Rundoptik 340
Fassungsentspannen 327
Fassungslose 355
Fasszylinder 387
Fast Tool Servo (FTS) 246
Fast-Axis-Collimation-Linse (FAC)
 119
Feinbearbeitungsverfahren 186
Feinkitten 329, 331
Feinkühlen 111
Feinläppen 169, 170
Feinläppverfahren 179
Feinpolieren 198
Feinschleifen 143, 150, 154, 155,
 157, 180, 369
– mit Läppkinematik 169, 180
Feinschleifprozess 139, 152
Feinschleifstufen 142
Feinschnitt 135
Feinstbearbeitungsverfahren 186
FEM (Finite-Elemente-Methode) 129
Fender-Verfahren 81
FEPA-Norm 173
FEPA-Standard 140
Fernrohr 11, 12
–, galileisches 12
–, holländisches 12
Fertigung asphärischer Bauteile 375
Fertigungsart 66
Fertigungsinseln 68
Fertigungsprinzip 67
Fertigungsprozess 63
Fertigungstechnologien 363
Fertigungsverfahren 69, 70
Fertigungsvorbereitung 67, 74
Fertigungszellen 68
Festigkeit 46
FFS (Flexible Fertigungs-Systeme)
 68
Filter 275
–, rugate 276
Finishpolitur 195
Fischen 264
FIZEAU-Streifen 20
FJP-Verfahren 210
Fläche, doppelt-torische 253
–, asphärische 159, 207
Flächendefekte 59
Flächenkippwinkel 226
Flächenpolitur 193
Flachglas 79
Flachglasschneiden 129
Flachschleifbearbeitung 149
Flachschleifen 149
– mit Ringwerkzeug 138, 150
Flammenschmelzen 107
Flammenschmelzverfahren
 (VERNEUIL-Verfahren) 106, 107
Flammhydrolyse 100
Fließen 300
Fließfertigung 68
Fließhypothese 188
Fließstraßen, flexible 68
Fließtemperatur 55
Floatglas 82, 300
Floatverfahren 79, 80, 81
Float-Zoning-Verfahren 105
Fluid-Jet-Polieren (FJP) 209
Flycutting 248
Folienpolierschalen 200
Footprint 160, 208, 209
Form, blockig scharfkantige 174
Formabweichung 244, 254
–, maximale 151
Formangaben 36
Formeinsatz, mikrostrukturierter 249
Formeinsatzherstellung 93
Formgenauigkeit (Passe) 155, 202,
 204, 221
Formkorrigieren 209
Formlinge 114
Formmasse 87
Formmaterialien 83
Formschienenkittung 314
Formschleifen 147, 152, 154, 251
– asphärischer Flächen 161
– mit Pelletwerkzeug 153, 155
– mit Ringwerkzeug 153
– sphärischer Flächen 153
Formschluss 305
Formstempel 116
Formteil mit Angussystem 90
Formtoleranzen 226
Formwerkzeug 160, 182

- Fotolacke 258
 Fotopolymerisation 282
 FOURCAULT-Verfahren 80
 Fräsbearbeitung 248
 Fräsen 247
 FRAUNHOFER 12
 FRAUNHOFER-Beugung 21, 22
 FRAUNHOFER-Linien 26
 Freiform-Raster-Fräsen 249
 Freigabeschritte 65
 FRESNEL-Beugung 21
 FRESNEL-Linsen 96
 FRESNEL-Optik 30, 278
 FRESNEL-Strahlteiler 30
 FRESNEL-Zonenlinsen 119
 FST (Fast Servo Tool) 241, 247
 Fügen 70, 305
 – der Einzellinsen 385
 – von optischen Bauelementen 323
 Fügeverfahren 305
 Füllfassungsprinzip 352, 353
 Füllstoffkitt 314
 Füllzeit 87
 Füllzyklus (Schuss) 87
 Funktionsbauteile 52
 Funktionsfläche, asphärische 375

 Gangunterschied 19
 –, optischer 19
 Gegenstandsweite 24
 Gegenstück, formübertragendes 169
 Gel 102
 Gelschicht 187
 Gemengeaufbereitung 43
 Gießen 83, 98
 Gießform 83
 Gießharze 83, 86
 Gießharzkomponenten 86
 Gießkopierverfahren 83
 Gipsen 315
 Gipskörper 315, 316
 Gittergleichung 30
 Gitterkonstante 30, 58
 Gitterperiode 86, 260
 Gitterstruktur 59, 86
 Gitterteilmaschinen 257
 Glas 11
 –, abgelagertes 300
 –, fototropes 302
 –, mineralisches 41, 44, 51, 75
 –, optisches 44
 –, organisches 54
 Glasarten 41
 Glasband (Ribbon) 80
 Glasbeschriftung 263
 Glasbeschriftungsverfahren, indirekte 262
 Glasblöcke 76
 Glasdicke 81
 Glasfaser 123
 Glasfaserziehen 123
 Glasfestigkeit 297
 Glasgemenge 42, 43
 Glaskeramik 44, 45, 50
 Glaslote 337
 Glasmacherpeife 11
 Glasmarkierung 263
 Glasmaßstab 256
 Glaspressen 116
 Glasruß 122
 Glass Manager 73
 Glasschmelzofen 13
 Glasstrukturieren 258
 Gleitsichtbrillenglas 380
 Gleitsichtglas 381
 Gobs 75, 109, 114
 Gradientenindex-Faser 26, 27
 Granat 173
 Gratfassen 340
 Gratfassungen 340
 Grauschleier 219
 Grauwertstrukturen 258
 Gravieren (Abtragen) 257
 Grenzwinkel 17
 Griffigkeit 202
 Großserien 66
 Grundlagen der Optik 17
 Gussverfahren 79

 Haftfestigkeit 292, 332
 Halbzeug (Preform) 52, 57, 75, 120
 Haltern 306
 Halterung optischer Bauelemente 341
 Halterungsverfahren 306
 Handlappverfahren 176
 Handlungseinrichtungen 88
 Hardbake-Prozess 285
 Hartbeschichtung 384
 Härte 48, 59
 Härteverfahren 48
 Hartlötten 336

 Härtung, lichtaktivierbare 333
 Hauptbrechzahl 41
 Hauptkristallarten 104, 106
 Hauptkristalle 106
 Hauptpunkte 24
 Heat-Molding-Verfahren 343
 Hebelbewegung 202
 Hebelmaschine 176, 192, 199
 Heißformgebung 115
 Heißkanaltechnik 90, 91
 Heißprägemaschinen 96
 Heißprägen 92, 94, 95, 96, 98
 Heißprägeprozess 94
 Hellfeldanordnung 217
 Herstellungsprozess 63
 High-End-Funktionalitäten 275
 Hilfsplatten 144
 HL-Optiken (Hochleistungs-Optiken) 213
 Hochdruckwasserstrahl 133
 Hochleistungsoptik 14, 221
 Hohlbohrwerkzeug 165
 Hologramm, computergeneriertes (CGH) 208
 Homogenität 77
 Hotplate 267
 Hotspots 88
 HSC-Fräsen 116
 HUYGENSSches Prinzip 21
 HydroSpeed-Polieren 323
 Hydrothermalverfahren 102
 Hydrothermalzuchtung 101
 Hyperboloidspiegel 28
 Hypothese, chemische 188
 IBF-Anlage 215
 IBF-Polieren (Ionenstrahl-Bearbeitung) 215, 221, 223

 Impfkristall 101
 –, gekühlter 103
 Ingot 100, 104, 121
 Inhomogenität 77
 Innenbordtrennschleifen 144, 145
 Innenrundscheiben 147
 Integratorspiegel 250
 Intensitätsverlust 285
 Interferenz 18, 19
 –, destruktive 19
 –, konstruktive 19
 Interferenzfilter 276
 Interferogramm 159

- Interferometer 20
 Interferometermessplatz 379
 Inversionen 58
 IOL (Intraokularlinse) 233
 Ionenbeschuss 279
 Ionenplattieren 277, 281
 Ionenstrahlätzen 260
 IR-Germaniumoptik 245
 Isochromate 78
 Isoklinen 78
 IT-Qualitäten 240
 IVPO (Inside Vapour Phase Oxidation) 121

 JIS 174
 Justage 359
 –, optische 351
 Justierdrehen 326, 327, 328, 388
 Justieren 70, 325
 Justierfutter 327
 Justierkleben 335
 Justierung, aktive 356

 Kalotte 312
 Kalottenjustierdrehfutter 328
 Kalottenwerkzeug 152
 Kaltlichtspiegelschichten 290
 Kantenauflage 310
 Kantenfilter 276
 KDP 101
 Keilfehler 225
 Keimen 101
 Kenngröße des Polierprozesses 196
 Kenngröße des Schleifprozesses 139
 Kennzeichnung optischer Bauelemente 35
 Kerbspannung 175
 Kerbspannungsvektoren 175
 Kettenreaktion 334
 Kieselgelschicht 170
 Kitt, UV-härtender 386
 –, zeithärtender 386
 Kitten 307
 – eines Achromaten 386
 – von prismatischen Teilen 313
 –, provisorisches 308
 –, reguläres 310
 Kittglieder 385
 Kittkeil 355
 Kittklotz 308
 Kittlinsengruppe 387

 Kittstationen 330
 Kittwerkstoffe 314
 Klasse, hydrolytische 51
 Klebekitte 315
 Kleben 315, 331, 333
 Kleben, gerichtetes 334, 335
 –, gerichtetes (Richtkitten) 385
 –, ungerichtetes 334, 335, 387
 Klebeverhalten von Glasschmelzen 118
 Klebverbindung 332
 Kleinserien 66
 Koma (Asymmetriefehler) 33
 Koma-Schiebelinse 389
 Koma-Schieber 385
 Kombiwerkzeug 142, 229
 Komplettbearbeitung 157
 Komplexität der Läppprozesse 174
 Komponenten, optoelektronische 374
 Konstruktion, optisch-mechanische 74
 Kontaktlinsen 57
 Kontaktlinsenblanks 312
 Kontaktlinsenfertigung 246
 Kontaktzone 162
 Konturfräsen 248
 Konvektionsofen 268
 Konkavkonvexlinse 373
 Konzentration 197, 230
 – der Läppmittelsuspension 183
 Konzentrationsprinzip 68
 Kopierkörper 366
 Korndurchmessertoleranz 134
 Kornform 140, 174
 Korngröße 140
 Kornmaterial 134
 Kornschneiden, unregelmäßig verteilte 136
 Körnung 140
 Kornverteilung 134
 Kornwerkstoff 173
 Korrekturpolieren 191, 198, 208, 213
 Kraftschluss 305
 Kratzer 219
 Kreuzgitter 14
 Kristalle 99
 –, einachsige 22
 –, optisch isotrope 60
 –, photonische 15
 –, zweiachsige 22
 Kristallflächen 59

 Kristallgitter 58
 Kristallgitterstrukturen 57
 Kristallisationstemperatur 55
 Kristallkeim 103
 Kristallklassen 58
 Kristallwachstum 102
 Kristallwerkstoffe 57, 99
 Kristallzüchtung aus der Lösung 101
 Kristallzüchtungsverfahren 99
 KSS (Kühlschmierstoff)-Zuführung 145
 Kühlbahnen 297
 Kühlen 43, 295
 Kühlgeschwindigkeit 111
 Kühlöfen 297
 Kühlpunkt, oberer 110
 –, unterer 110
 Kühlschmierstoff 231
 Kühltemperatur 111
 Kühlungszüchtung 101
 Kühlzeit 87
 Kunstharzklebkitt 314
 Kunststoffe 54
 Kunststoffgläser 55
 Kupfer-Keramik-Leichtgewichtsspiegel 250
 Kurzpassfilter 276
 KVP (Kontinuierlicher Verbesserungsprozess) 65

 $\lambda/4$ -Schichten 20, 276
 Labor-Ziehturmeinrichtung 124
 Lacke 272
 Lackieren 272
 Ladestation 371
 Lagefehler 32, 33
 Lagetoleranzen 226
 Langkühlung 111
 Langpassfilter 276
 Längspendelschleifen 144
 Längstiefschleifen 144
 Langzeit-UV-Beständigkeiten 85
 Läppbahn 176
 Läppdruck 172
 Läppen 169, 178, 184
 – sphärischer Flächen 169, 178
 Läppkäfige 171, 172, 176, 180
 Läppkinematik 180
 Läppkoeffizient 174
 Läppkornfraktion 179
 Läppmaschinen 172

- Lämpfmittel 170
 Lämpfmittelarten 172, 173
 Lämpfprozess 174
 Lämpfschalen 171
 Lämpfscheiben, konvexe 176
 Lämpfstufen 169
 Lämpfsuspension 171, 172
 Lämpfverfahren 169, 176
 Lämpfvorgang 170
 Lämpfwerkzeug 170, 172, 176, 178
 Laserbearbeitungskopf 35
 Laserbelichter 260
 Laserdirektschreiben 258
 Laser-LIGA-Verfahren 93
 Laser-Reflow-Löttechnik 358
 Laserspiegelschichten 288
 Laserstrahl-Absprengeverfahren 132
 Laserstrahlbohren 167
 Laserstrahllöten 338
 Laserstrahlseparieren 132
 –, thermisches 132
 Laserstrahlverfahren 257
 Laugenklasse 51
 Läuterungsmittel 43
 Läuterungsprozess 43
 Läuterungsprozessschritt 77
 LED-Lupe 374
 LED-Lupenfertigung 370
 Leichtgewichtspiegel 250, 251
 Leistungsdichte-Funktionen (PSD
 Power Spectral Density) 255
 Leistungsdichtespektrum (PSD) 37
 Lesesteine 11
 Leuchtdichte 34
 LIBBEY-OWENS-Verfahren 80
 Lichtbogenschmelzverfahren 107
 Lichtdurchlässigkeit 49
 Licht-Härtung 333
 Lichtschutzgläser 301
 Lieferformen 56, 75
 – organischer Gläser 57
 Lift-Out-Roller 80
 LIGA-Technik 13, 14, 83, 93
 Liniendefekte 59
 Linienfilter 276
 Linse 24
 –, asphärische 25
 –, bikonvexe 25, 369
 –, getragene 351
 –, neutrale 24
 –, plankonkave 25
 –, randscharfe 179, 232
 Linsenfertigung 368, 372
 Linsenformen 25
 Linsenkeilfehler 226
 Linsen kittung 312
 Lithiumglas 12
 Lithografie, optische 14
 Lithografieprozesse 259
 LITTLETON-Punkt 110
 Löcher 219
 Los 67
 Lösen 56
 Losgröße 67
 Lösungsmittel 102
 Lotauftrag 338
 Lote, metallische 337
 Löten 336
 Lotwerkstoff 337
 Low-Cost-Bereich 82
 Low-Cost-Optikkonzepte 343
 Low-T_g-Gläser 117
 LTCC-Modul 360
 Lupenlinsen 372
 Lupenmontage 374
 Magneto-Rheologisches Finishing
 (MRF) 115
 Magnetronentladung 281
 Magnetron-Sputtern 281
 MAIMAN 13
 MAP-Verfahren 189
 Markteintritt (time to market) 64
 Maschinenanordnungen 192
 Maschinenstein 79
 Masken, strukturierte 258
 Maßabweichungen 113
 Massenfertigung 66
 Massenproduktion 66
 Master 84
 Material, monokristallines 105
 Materialangaben 36
 Materialtraganteil 151, 185
 MCVD-Verfahren (Modified
 Chemical Vapour Deposition) 121,
 122
 Mechanisch-abrasives Polieren
 (MAP) 189
 Mehrfachdrahtsägen 131
 Mehrfachschnitt 143
 Mehrfachtragkörper 172, 177, 180,
 203, 308, 309, 313
 Mehrkomponentenspritzgießen 91
 Mehrmaschinenbedienung 69
 Mehrteilebearbeitung 171
 Membranfutter 322
 Membranspannfutter 323
 Meniskuslinse 25
 Messmethode, kalorimetrische 291
 MICRO 174
 MID-Verfahren 357
 Mikroabformung 90
 Mikrobrüche 137
 Mikrohärtprobe 48
 Mikro-Jet-Poliervorgang (MJP)
 210
 Mikrolinsenarray 94
 Mikromontage 356
 Mikrooptik 14, 357
 Mikroprismen 250
 Mikrorisse 48, 170
 Mikroskop 11
 Mikrospannen, ultraschall-unterstütztes
 251
 Mikrospritzgießen 90, 91
 Mikrostrukturen 84, 233
 –, diffraktive 96
 Mikrotopografie 89
 Mikrozerspannung 234, 238
 Mindestspannungsdicke 239, 240
 MiniProd 360
 Mittelläppen 169, 170
 Mittelserien 66
 Mittendicke 24
 Mittenrauwert (RMS) 89
 –, quadratischer 37
 MKD 88
 MKS-Kitt 314
 Modulation 34
 Modulationsübertragungsfaktor 34
 Modulationsübertragungsfunktion
 (MTF) 34
 Montage 323, 374
 Montage eines Objektivs 384
 Montage von Hochleistungsoptiken
 326
 Montageaufbau, modularer 357
 Montagekonzept, funktionsintegriertes
 357
 –, modulares 359
 Montageprozess 324
 Montageverfahren 350
 Montieren 70

- Moth Eye Structure 287
Mottenaugenstruktur 13
MRF-Polieren (Magneto-Rheological Finishing) 208, 209, 221, 222
MRF-Verfahren 160, 380
MTF-Messung 35, 204
Multimode-Faser 26
Multischicht 289
Multischichtspiegel 290
- NACKEN-KYROPOULOS-Verfahren 103
Nanokomposit 274
Nanokompositlacke 273
Nanotechnologie 15
Natriumsilikatglas 42
Naturdiamant 236
Needle Design 273
Negativlack 259
NEWTONsche Ringe 20
Niederschmelze 43
Nietbrille 11
Null-Fehlerproduktion 71
- Oberflächen, nanostrukturierte 286
Oberflächenangaben 37
Oberflächendefekte 217
Oberflächenfehler 36, 217
Oberflächengeometrie, torische 253
Oberflächengüte 37, 217
Oberflächengütecharakteristik 37
Oberflächenhärtung 273
Oberflächenqualität 158
Oberflächenrauheit 183, 254
Oberflächenpiegelschichten 287
Oberflächenstruktur 220
Oberflächentopografie 116, 220
Oberflächenvergütung 383
Oberflächenzustände 218
Objektivmontage 353, 354
OLED-Baugruppe 333
Optical SMD 357
Optiken, fliegende 250
Optikfertigung 11, 16
Optiklack 272
Optikrechner 63
Optikschutzlack 272
Orthotest 177
Outsert-Technologie 359
OVD (Outside Vapour Deposition) 121
- OVPO (Outside Vapour Phase Oxidation) 121
- Panda 125
Parabolspiegel 28
Parallelansprengkörper 317
Parallelversatz 355
Partikelabscheidung 215
Passe 20, 214
Passeprüfung 20
Passfehler 36, 202
Passgenauigkeit 352
Passspiel-Montage 350
PCVD (Plasma Chemical Vapour Deposition) 121
Pechpolitur 202
Pellets 141, 154
Pelletwerkzeug 141, 152, 158
Pentagonprisma 28, 29, 364, 367
Percussionsbohrverfahren 167
Phasenbedingung 20
Phasendifferenz 19
Phasengitter 30
Physical Vapour Deposition (PVD) 277
Pinselschmierung 172
PITTSBURGH-Verfahren 80
Plananschlag 355
Planfeldlinsen (f-theta-Optik) 249
Planläppen 169, 176, 177, 178, 183
Planläppwerkzeug 172
Planplatte 23, 29
Planschleifmaschine 205
Planspiegel 27
Plasma-CVD-Verfahren (PECVD, Plasma Enhanced CVD) 282
Plasma-Impuls-CVD-Verfahren (PICVD) 282
Plasmapolymerisationsverfahren 273
Plasmaschmelzverfahren 121
Plastics Wafer Technology (PWT) 90, 91
Plattformen 356
Pleochroismus 22, 23
Plug-and-produce 360
PMMA 41, 253
PMMA-Linse 246
Polarisation 18
Polarisatoren 18
Polierbonnet 211
Polierdauer 186
- Polieren 186, 187, 199
– auf Hebelmaschinen 200
–, lokales 221
–, roboterunterstütztes 211
Polierergebnisse 221
Polierfehler 217, 219
Polierfehlerkorrektur 215
Polierfolien 201
Poliergrad 38
Polierhypothese 187
Polierkonstante 190
Polierkorn 195
Polierkruste 194
Poliermembran 322
Poliermittel 187, 193, 194
Poliermittelrückstände 194
Poliermittelsuspension 197, 199, 214
Poliermittelträger 191, 194, 200
Poliermittelträgerstrukturen 205
Polierprozess 196
Polierroboter 160
Polierschale, visko-elastische 199
Polierschalen 191
Poliersuspension 189, 214
Polierverfahren 198, 221
Poliervorgang 200
Polierwerkzeug 187, 200
Polierwerkzeugkorrektur 206
Polierwerkzeugkorrekturverfahren 206
Polierzeit 200, 220, 221
Politur, zonale 208
Polyaddition 53
Polycarbonat 53
Polykondensation 53
Polymerisation 53, 334
Polymethylmethacrylat 53
Polyreaktionen 53
Polystyrol 53
Porroprisma 29
Positionieren 325
Positionierung, passive 356
Positivlack 259
Prägen 97
Prägeweg 97
Prägewerzeuge 92
Präzisionsasphäre 39
Präzisionsblankpressen 109, 114
Präzisionseinzeltraggkörper 227
Präzisionsplanoptiken 318
Präzisionsschneiden 227

- Precision Gobs 76
 Precision Molding 117
 Precussionsbohren 167
 Preform 121
 Preformen 123
 Preformherstellung 120, 122
 Preformpräparation 125
 Pressen 114
 Presshaut 117
 Presslinge 75, 112
 Pressprozess 117
 Pressschweißen 345
 PRESTON 205
 PRESTON-Koeffizient 190
 PRESTON-Theorie 199
 Printverfahren, direkte 262
 Prisma 26
 Prismenfertigung 363
 Prismenwinkel 26
 Probeglas 20
 Produkte, endformnahe 75
 Produktentwicklung 63
 Produktionsplanungsphase 65
 Prototypen 85
 Prototypenphase 64
 Prozessführung, variotherme 94
 Prozessketten 70
 Prozessprinzip (Erzeugnisprinzip) 67
 Prozessschritte des Pressens 118
 Prozessstufe 72, 121
 Prüfen 70
 PSD-Funktion 222, 223
 Punktdefekte 59
 PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) 273
 Pyrolyse 282

 Qualitätsschnitt 135
 Quarzglas 42, 100, 106, 120, 300
 Quarzglasproben 136
 Quarzkristallherstellung 102
 Quellen 56
 Quereinsteichschleifen 144

 Radienabweichung 20
 Radiergummi-Test 293
 Radpolieren 211
 Randauflage 310
 Randbearbeitung 225
 Raddickendifferenz 231
 Randmattieren 272

 Randschwärzen 272
 Rasterfräsen (Fly cutting) 235, 241, 248, 253
 Raster-Fräsen 254
 Rasterverfahren 211
 Rauheit 221
 Rauheitsprofil 151
 Rauschmelze 43
 Rauschmelzprozessschritt 77
 Rautiefe 138
 –, theoretische 239
 Reaktionsgießen (RIM) 83
 Reaktionsgießverfahren, lichtinduzierte 84
 Realstruktur 105
 Referenzfläche 179
 Reflexbildgerät 227, 327
 Reflexbildverfahren 326
 Reflexion 17, 20, 49
 Reflexionsgesetz 17
 Reflexionsgitter 30
 Reflexionsgrad 286, 289
 –, spektraler 288
 Reflexionskoeffizient 49
 Reflexionsprismen 28, 29
 Reflexionsverlust 285
 Reib-Verschleiß-Hypothese 188
 Reihenfertigung 68
 Reinigen 70, 127, 263
 –, manuelles 264
 –, maschinelles 264
 Reinigung von Kunststoffoptiken 265
 Reinigungsfehler 268
 REM-Darstellung 174
 Replikation 92, 93
 Resist 93, 258
 Restspannungen 78, 111
 Richten 325
 Richtlinsen 179
 RIM-Technik 84
 Ringschneide 387
 Ringschneidenklebung 334
 Ringsphärometer 179
 Ringwerkzeug 141, 147, 149, 152, 158
 Risikoanalyse (FMEA) 65
 Rissverläufe 137
 Risszonen 137
 Ritzhärte 48
 Roboterpolieren 212

 Rohglas 52, 75
 Rohkitte 314
 Rohkitten 307
 Rohlinge 52
 – mit vor- bzw. angearbeiteten Flächen 75
 Röntgen-LIGA 93
 Rotation 58
 Rubinlaser 13
 Rückflächenbearbeitung 382
 Rückflächenspiegel 27, 28
 Rundieren 147
 Rundschleifen 147, 149

 Sägen 130
 Sammellinse 369
 Saphir, synthetischer 106
 Sauberkeitsklasse 217
 Sauberkeitsschutzzonen 319
 Säureklasse 51
 Säurepolitur 299
 Scanning-Scratch-Test 293
 Schalenwerkzeug 192
 Schärfefehler 32, 33
 Scheitelpunkt 24
 Schichtarten 275
 Schichtauftrag, partieller 257, 262
 Schichtcharakterisierung 291
 Schichtdickenverhältnis 290
 Schichten, elektrisch leitfähige 290
 –, optische 275
 Schichtherstellung 277
 Schichtsysteme 13
 Schiebelinse 385
 Schleifbarkeitsklasse 139
 Schleifbearbeitung 252
 – sphärischer Linsen 158
 Schleifdruck 175
 Schleifen 136, 137
 – asphärischer Flächen 159
 – sphärischer Flächen 152
 Schleifhärte 48, 139, 175
 Schleiflängen 148
 Schleifprozess 138, 139
 Schleifscheibenmodus 161, 162
 Schleifverfahren 136, 137
 Schleifwerkzeuge 139, 142
 –, diamantgebundene 140
 Schleifzentrum, präzisionsoptisches 164

- Schlichtbearbeitung 242, 243
 Schlittschuheffekt 219
 Schmalbandfilter 276
 Schmelzen, elektrisches 107
 Schmelzprozess 44
 Schmelzpunkt 42
 Schmelztiegel 76
 Schneide, geometrisch unbestimmte
 136, 169
 Schneideneingriff 240
 Schneidkopf 134
 Schnittgeschwindigkeit 138, 175
 SCHOTT 12
 Schrumpf 117
 Schrumpfmaß 117
 Schrubbearbeitung 243
 Schutzfasen 36
 Schutzlack 272
 Schutzschichten 272
 Schwarzlackstruktur 261
 seed 105
 Selbstschärfeffekt 140, 141, 231
 Senkanlage 120
 Senken 119
 Senkverfahren 119
 Serienfertigung 66, 68
 Servo-Tool-Anwendungen 246
 Siebdruck 262
 Silikonformen 85
 Silizium-Ingots 105
 Siliziumkarbid 140, 173
 Simulation von
 Temperaturverteilungen 88
 Simulationsansicht 157
 SIRD (Scanning Infrared
 Depolarization) 105
 Slow Tool Servo (STS) 246
 Slurry 130
 SMT (Surface Mounted Technology)
 374
 Snap-In 342
 Snap-In-Technologie 343
 Soda-Glas 11
 Softbake 284
 Softbake-Prozess 285
 Sol 102
 Sol-Gel-Chemie 274
 Sol-Gel-Methode 103
 Sol-Gel-Verfahren 102, 273
 Sonotrode 182
 Sonotrodenbewegung 181
 Spaltbarkeit 59
 Spanen mit geometrisch bestimmter
 Schneide 127
 Spanen mit geometrisch unbestimmter
 Schneide 127
 Spannen 320
 – einer Linse 321
 –, mechanisches 321
 –, pneumatisches 322
 Spannglocken 227, 228, 229
 Spannungen 296
 Spannungsbild 203
 Spannungsdoppelbrechung 36, 47,
 78, 111, 112
 Spannungsprüfer 19
 Spannungstrajektorien 78
 Spannungsverlauf der Bruchkante
 129
 Spannungszone 47
 Spannungszustand 47, 298
 Spannzanzen 320
 Spannangengeometrie 321
 Spannzentrieren 227, 228
 Spannungsverhalten 137
 Spanzipfel 239
 Spanzipfel-Theorie 238
 Spektralfilter 276
 Spezialisierungsgrad 66
 Spiegel 27, 275
 –, adaptiver 250
 –, konkaver sphärischer 28
 Spiegelungen 58
 Spincoating 259, 284
 Spincoating-Verfahren 273, 274
 Spraycoating 284
 Spraycoating Verfahren 259
 Spritzeinheiten 92
 Spritzgießen 87, 98
 Spritzgießzyklus 87
 Spritzgussverfahren 89
 Spritzprägen 96, 97, 98
 Sputerausbeute 280
 Sputtern 277, 280
 Stabrohrmethode 121
 Stacked Tube Technique 125
 Stammakte 65
 Standardgobs 76
 Standzeiten der Werkzeuge 116
 Stapelmontage 390
 Stapelprinzip 353
 Startreaktion 334
 Steckzentrieren 227
 Stift-Schraubverbindung 352
 Stoffeigenschaftsändern 70, 295
 Stoffschluss 305
 Stoßjustierung 386
 Strahlenversatz 24
 Strahlreinigung 267
 Strahlteiler 29, 30, 275
 StrainMatic-Polarimetersystem 78
 Streifenkittung 312
 Struktur, plättchenförmige 174
 Strukturieren 256
 – aufgetragener Metall- und
 Lackschichten 261
 –, fotolithografisches 257, 258
 Strukturierungsbeispiele 261
 STS 241, 247
 STS-Drehen 253, 254
 Stufen des Läppens 170
 Stufenindex-Faser 26, 27
 Styrol 53
 Subaperturwerkzeug 192, 193, 210
 Sublimationsschneidverfahren 133
 Suspensionswasserstrahlverfahren
 135, 136
 Synchro-Speed-Planpoliermaschine
 205
 Synchro-Speed-Polieren (Synchro
 Speed Polishing) 205, 206
 Systeme, mehrspindlige 157
 –, miniaturisierte optische 356
 Tageswannen 76
 Taktstraßen 68
 Talbot-Interferometer 260
 Talysurf-Messgerät 379
 Tape-Test 293
 Target 280
 Tastschnittmessverfahren 180
 Tauchverfahren (Dipcoating) 285
 T-Belag 13, 286
 TCS 104
 –, hyper pure 104
 Teiler, dichroitische 276
 Teilerschichten 275
 Teilerspiegelschichten 290
 Teilerwürfel 30
 Teilmontage 389
 Teilungsbilder 256
 Temperaturdifferenzverfahren 101
 Temperaturgradient 88

- Temperatur-Zeit-Kurve 79
 Thermoplasten 54
 –, amorphe 55
 –, teilkristalline 55
 Thermoplaststoffe 54
 Tiefenfilter 215
 Tiefschleifen 149
 Tiegel 104
 Toleranzen 113
 Top Side 80
 Topcoating 293
 Topfschleifmodus 161, 162, 163
 Topfwerkzeuge, diamantgebundene 161
 Top-Roller 80
 Top-Rolling 81
 Totalreflexion 17
 Touch Control Panels 290
 Touch-Setting-Verfahren 207
 Träger-Linse 351
 Tragkörper 308
 Transferstraßen 68
 Transformationsbereich 42
 Transformationspunkt 42
 Translation 58
 Transmissionsbildverfahren 326
 Transmissionscharakteristik 50
 Transmissionsgitter 30
 Transmissionsgrad 49, 60, 286
 Transportreaktion 100
 Trennen 70, 127, 240
 – von Glasblöcken 143
 Trenngeschwindigkeit 131, 133
 Trennschärfe 174
 Trennschleifen 143
 Trennschleifscheiben 145
 Trennschleifverfahren 144
 Trennschnitt 135
 TRIMO-SMD 358

 Übergangslote 338
 Ultrapräzisionsbearbeitung 16, 233, 253, 255
 Ultrapräzisionsdrehen 240, 245
 Ultrapräzisionszerspanung 233, 236
 Ultraschall-Kunststoffbördeln 342
 Ultraschallreinigung 264
 Ultraschallreinigungsanlagen 265, 266
 Ultraschallschwingläppen 181
 Ultrasonic-Prozess 251

 Ultrasonic-Technologie 166
 Umformen 70, 109
 Umformtemperatur 109
 Umlaufschmierung 172
 Umschmelzen 77
 Unifärbetechnik 300
 Universalfeinkitt 330
 Unterlagen, technologische 70, 71, 74
 Untersuchungen, spannungsoptische 19
 Up-draw-Verfahren 80
 UP-Drehen 240
 UP-Fräsen 248, 249, 250
 UP-Maschine 235
 UP-Zerspanung 234
 Urformen 70, 75
 Urformerzeugnisse 75
 Urmodell 84
 US-Schwingläppen 182
 US-Schwingläppmaschine 181, 182
 UV-Härtung 333
 UV-Kante 50
 UV-Strahlungsquelle 84

 VAD (Vapour Axial Deposition) 121
 Vakuum 278
 Vakuumgießen 84
 Vakuumgießverfahren 85
 Vakuumspannfutter 322
 Verändern, plastisches 109
 Verbinden 305
 Verdampfungsmaterial 277
 Verfahren, nasschemische 273, 283, 284
 –, urformende 82
 Verfahrensprinzip (Werkstattprinzip) 67
 Verfahrensschritte 83
 Verfestigen 297
 –, thermisches 298
 Verfestigung von Glasoberflächen 299
 Verfestigung, chemische 299
 –, thermische 299
 Verfestigungsverfahren, chemische 298
 Verformung 175
 Verlaufs färbetachnik 300
 Versetzungen 59
 Versiegelung 97
 Verspiegelungen 275

 Verspiegelungsschichten, dielektrische 20
 Versprengen 330, 339
 Verweilzeitmethode 216
 Verwitterungsklasse 51
 Verzeichnung 33
 Viskosität 45
 Viskositätskurve 46, 110
 Viskosität-Temperatur-Kurve 45, 110, 117
 Vollaufflage 310
 Vollkittung 308
 Volumenabsorption 23
 Volumenberechnung 112
 – des Presslings 113
 Volumendefekte 59
 Volumenoptik 66
 Vorderflächenspiegel 27, 28, 288
 Vorläppen 169, 170
 Vorpolieren 198, 213
 Vorschleifen 143, 150, 154, 157
 Vorserienphase 65

 Wachstumsprozess 99
 Waferdurchmesser 104
 Wannenschmelze 76
 Wärmebehandlung 295
 Wärmekammer 120
 Wärmeschutzfilter 276
 Warmkitt 330
 Wasser-Abrasivgemisch 133
 Wasserabrasivstrahl 168
 Wasserstrahlabrasivschneiden 133, 134, 135
 Wasserstrahl-schneidtechnik 167
 Wechselspindelssysteme 227
 Weichlöten 336
 Werkstoffe, glaskeramische 44
 –, optische 41
 Werkzeug (Sonotrode) 181
 –, formübertragendes 171
 Werkzeugbeschichtung 88
 Werkzeugeingriff 198
 Werkzeugformen 192
 Werkzeugformenherstellung 115
 Werkzeugherstellung 93
 Werkzeugkorrektur 117
 Werkzeugverschleiß 161, 205
 Werkzeug-Werkstück-Anordnung 171
 Wertschöpfungsprozess 75

- Wiedergrau 219
Winkelfehler 318
Wirkungsgrad, optischer 34
Wirtschaftsglas 44
Wischer 219
- ZEISS 12
Zeitspannungsvolumen 127, 138, 150, 171, 175, 185, 191, 220
Zentrieraufmaß 226
Zentrierautomaten 228
Zentrierbund 389
Zentrieren 225, 230, 325
Zentrieren/Fügen 333
Zentrierfehler 36, 225, 229, 325
Zentriergenauigkeiten 229
Zentriermaschinen 228, 229
Zentrierscheibe 230
Zentrierschleifen 148
- Zentriertoleranzen 72, 232
Zentrierverfahren 226, 232
Zeonex 253
Zerlegen 127
Zerodur 45
Zersetzungstemperaturbereich 55
Zersetzungsverfahren, thermisches 282
Zerspanbarkeit 237
Zerspankraft 237
Zerspanprozess 237
Zerspannung 149
Zerteilen 127, 128, 130
Ziehen 120
Ziehgeschwindigkeit 124
Ziehprozess 121
Ziehverfahren 79, 103, 104
Zirkularfräsen 241
ZnSe 41
- Zonenschmelzen, tiegelfreies 105
Züchtung 99
– aus dem eigenen Dampf 100
– aus der Schmelze 103
– durch chemische Transportreaktion 100
Züchtungsprozess 107
Züchtungsverfahren 99
Zugfestigkeit 47
Zurichtaufmaße 128, 129
Zurichten 128, 129
Zuschnitt prismatischer Teile 144
Zweikomponentensysteme 84
Zweischeibenlappverfahren 172
Zweistrahlinterferenz 19
Zykluszeit 87
Zylinderlinse 25