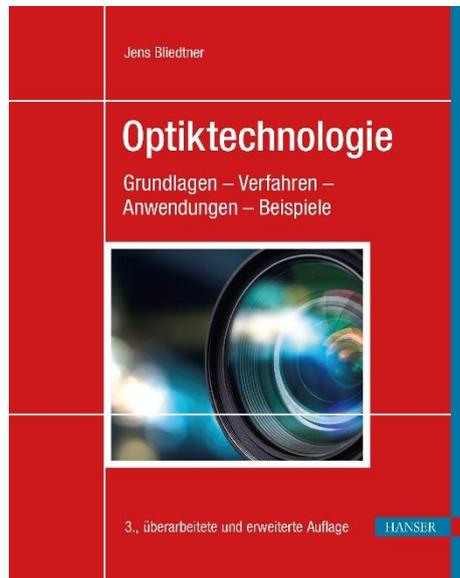


HANSER



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

Vorwort	V
Zusatzmaterial	XVII
1 Die Entwicklung des Glases und der Optikfertigung	1
2 Grundlagen der Optik	11
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

3	Optische Werkstoffe	57
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
4	Grundlagen des Fertigungsprozesses	89
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
5	Urformen von optischem Glas	121
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

6	Umformen von optischem Glas	213
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
7	Trennen	251
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
8	Beschichten	507
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
9	Stoffeigenschaftsändern	539
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
10	Fügen	553
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
11	Ausgewählte Fertigungstechnologien	625
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
12	Auslegung und Optimierung von Fertigungsprozessen	707
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
	Literaturverzeichnis	739
	Index	761

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:

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

λ Wellenlänge, n Brechzahl, α 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.

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

ν_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 ν 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.

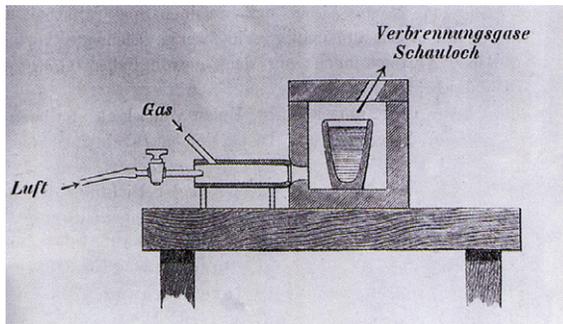


Bild 1.3

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.

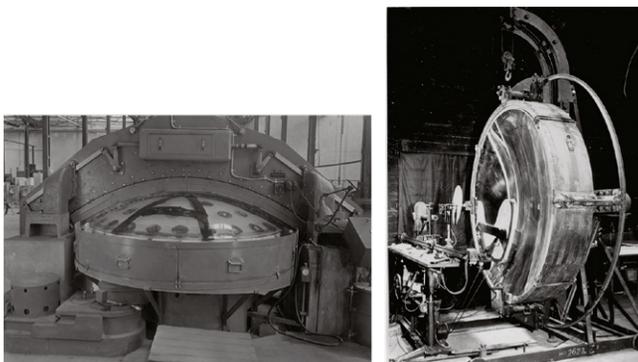


Bild 1.4

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.

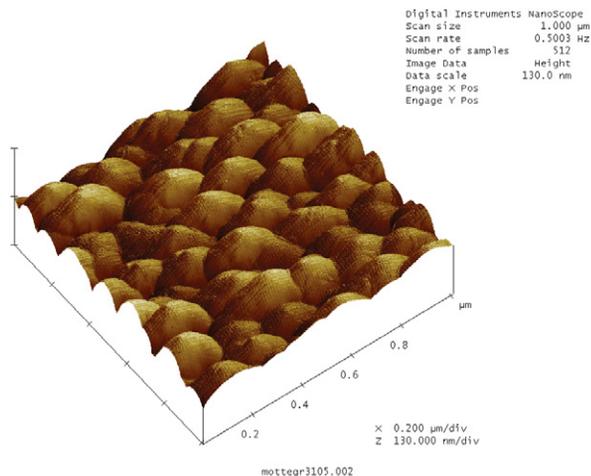


Bild 1.5

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/

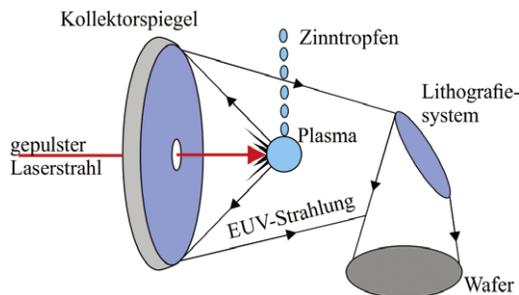


Bild 1.7

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.

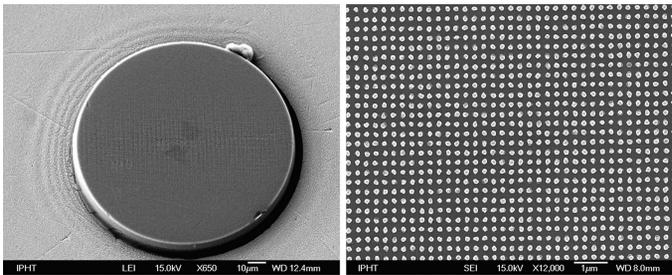


Bild 1.8
REM-Aufnahmen eines mittels Interferenzlithografie erzeugten Kreuzgitters mit einer Periode von 280 nm: links) Faserstirinfläche, rechts) Ausschnitt im Kernbereich /Jaue2007/

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.

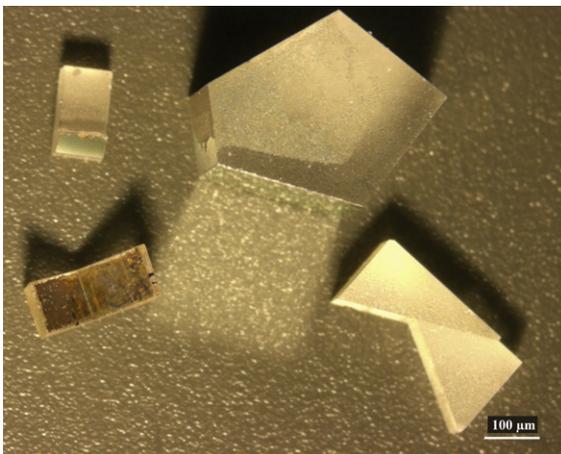


Bild 1.9
Mikrobauelemente der Kommunikationstechnik

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.

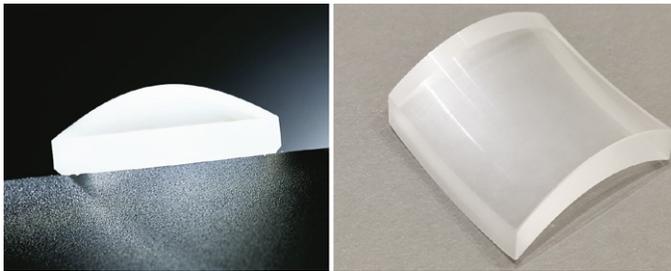


Bild 1.10

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.

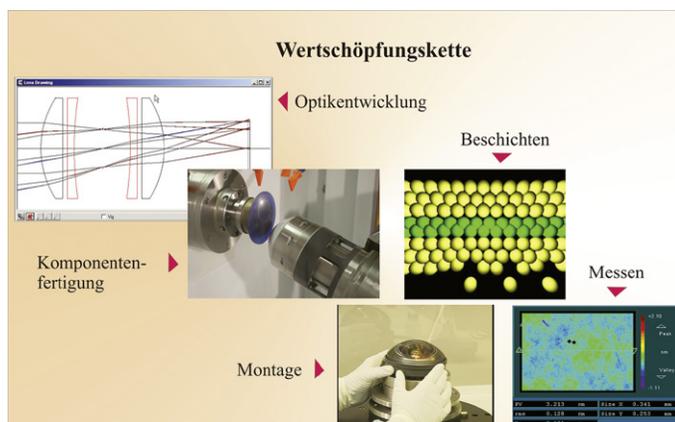


Bild 1.11

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	Rubinelaser	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
 μ -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 526*f.*
- 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-Kamerasysteme 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
 - Konkavkonkavlinse 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_G-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
 Optiksimitation 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