

Jens Bliedtner

Optiktechnologie

Grundlagen – Verfahren –
Anwendungen – Beispiele



3., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf HanserPLUS finden Sie zu diesem Titel kostenloses digitales Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-w2dsi-7fchm

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Jens Bliedtner

Optiktechnologie

Grundlagen – Verfahren – Anwendungen – Beispiele

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner, FB SciTec, Ernst-Abbe-Hochschule Jena



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelbild: © gettyimages.de/scyther5

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Altusried-Krugzel

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-45850-5

E-Book-ISBN 978-3-446-46055-3

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

Putting optics into focus for over 60 years

Die FISBA Gruppe zählt zu den weltweit führenden Anbietern in der Optikindustrie. Sie vertreibt massgefertigte optische Komponenten, Systeme und Mikrosysteme. Neben dem Hauptsitz in St.Gallen gibt es weitere Standorte in Deutschland, USA und China.



Follow us on [in](#)

FISBA AG
9016 St.Gallen, Switzerland

FISBA Photonics GmbH
12489 Berlin, Germany

FISBA LLC
Tucson, AZ 85712, United States

FISBA (Shanghai) Co., Ltd.
Shanghai City, 200120 China

info@fisba.com
www.fisba.com



Testen von optischen Komponenten

- Visuelle optische Testgeräte
OptiTest®
- Elektronische Autokollimatoren
TriAngle
- Goniometer für Winkelmessung an
Prismen, Polygonen und Keilen
PrismMaster®
- Goniometer-Spektrometer zur
Bestimmung des Brechungsindex
SpectroMaster®
- Interferometer
μPhase®
- Radiusmessung von Linsen
Sphärometer



Ausrichten und Testen von Linsen und Linsensystemen

- Testsysteme für sphärische Linsen
OptiSpheric®
- Wellenfrontmesssysteme für
asphärische und sphärische Linsen
WaveSensor® / WaveMaster®
- Justierdrehmaschinen
ATS
- Zentriermessung, Linsenausrichtung
und -montage
OptiCentric®
- Messung von Mittendicken und
Luftabständen
OptiSurf®



Testen der Abbildungsqualität

- MTF Messung
ImageMaster® HR/Uni
ImageMaster® PRO
ImageMaster® VR/AR
ImageMaster® Afocal
ImageMaster® ENDO PRO
- On-Axis MTF Messung
OptiSpheric®
- MTF-Optimierung in Echtzeit
ImageMaster® Cine
- Wellenfrontmessung
WaveMaster®



Ausrichten und Testen von Kameramodulen

- Testen von Kameramodulen
CamTest
- Aktives Ausrichten, Montieren
und Prüfen
ProCam®

Verändere die Welt mit
gigantischen Ideen.
Become a JENIUS.



MORE LIGHT



Werde Teil der Jenoptik-Familie.
www.jenoptik.de/karriere

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

Zusatzmaterial

Auf der Online-Plattform *plus.hanserfachbuch.de* können weitere Inhalte digital abgerufen werden. Den Zugangscode finden Sie auf S. I des Buches.

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.

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 superaauflösende 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.

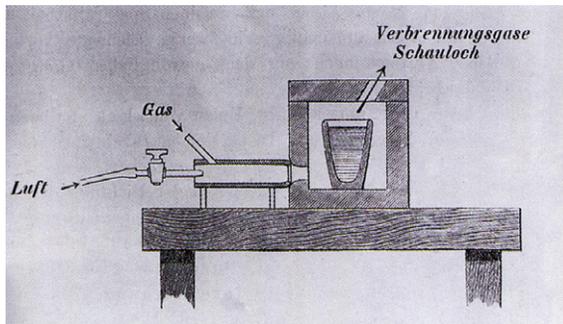


Bild 1.3

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.

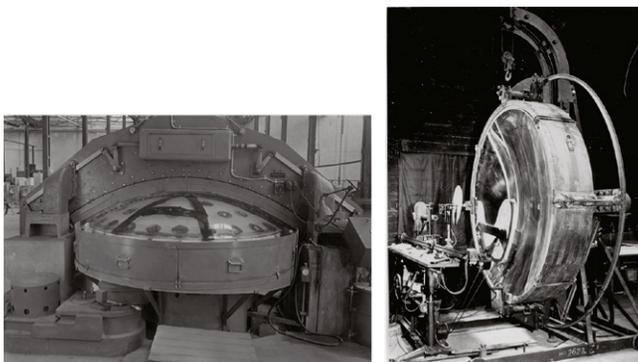


Bild 1.4

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.

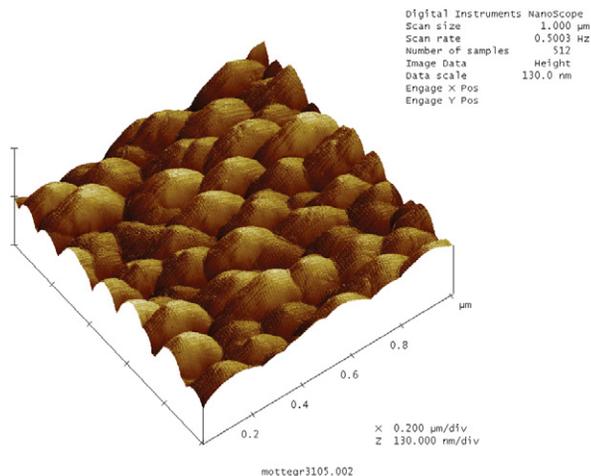


Bild 1.5

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/

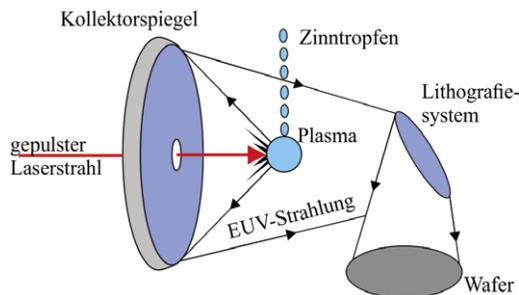


Bild 1.7

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.

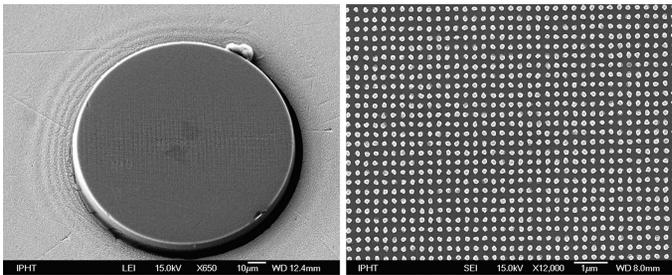


Bild 1.8
REM-Aufnahmen eines mittels Interferenzlithografie erzeugten Kreuzgitters mit einer Periode von 280 nm: links) Faserstirinfläche, rechts) Ausschnitt im Kernbereich /Jaue2007/

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.

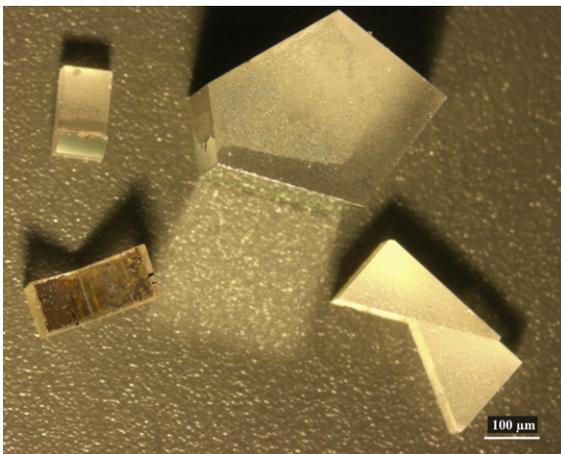


Bild 1.9
Mikrobauelemente der Kommunikationstechnik

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.

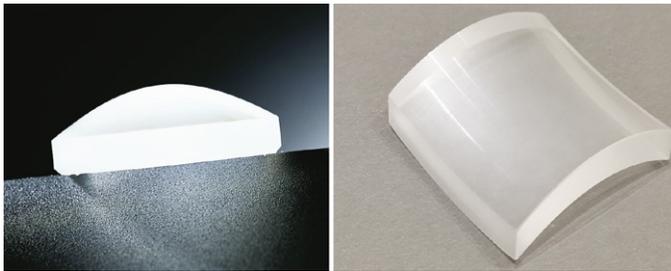


Bild 1.10

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.

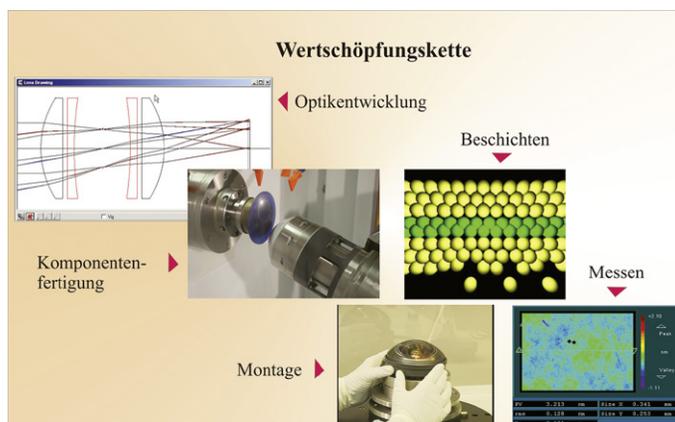


Bild 1.11

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.