

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 superaflösende 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.

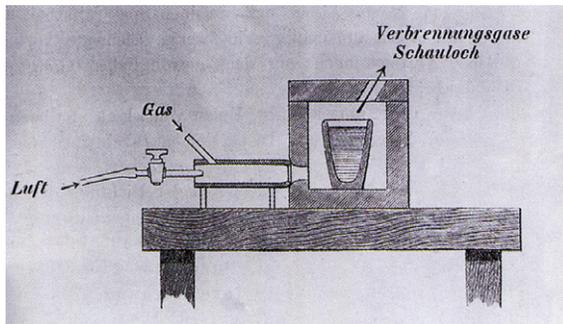


Bild 1.3

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.

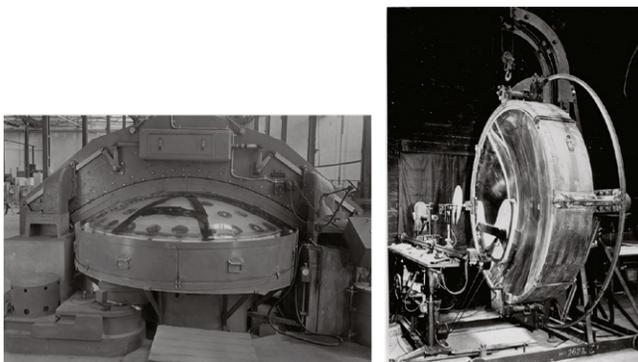


Bild 1.4

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 Mehrschichten 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.

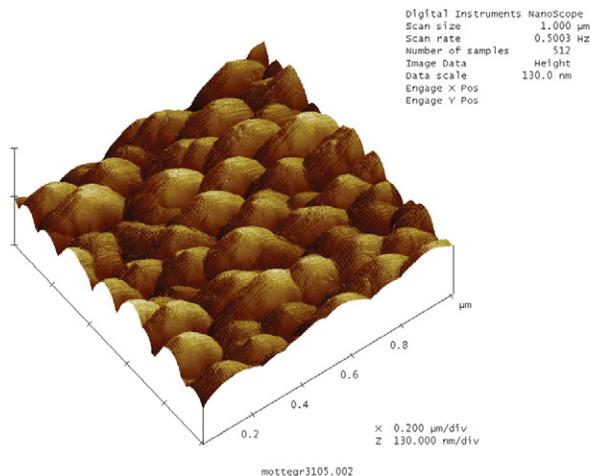


Bild 1.5

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/

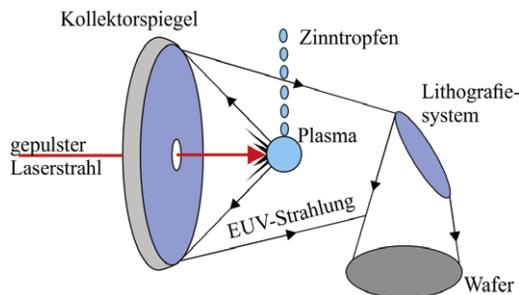


Bild 1.7

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.

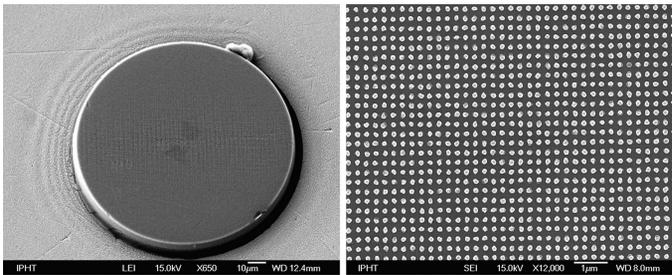


Bild 1.8
REM-Aufnahmen eines mittels Interferenzlithografie erzeugten Kreuzgitters mit einer Periode von 280 nm: links) Faserstirnfläche, rechts) Ausschnitt im Kernbereich /Jaue2007/

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.

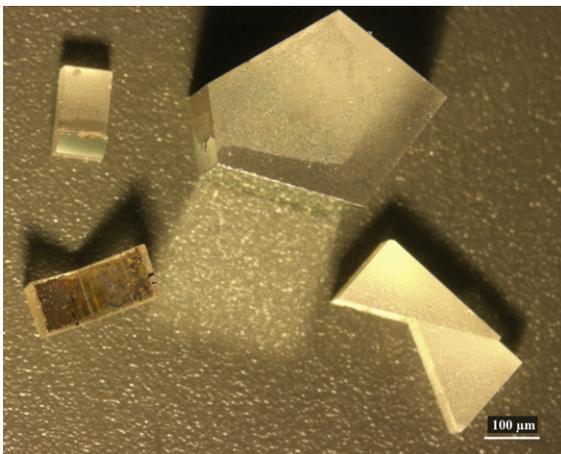


Bild 1.9
Mikrobauelemente der Kommunikationstechnik

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.

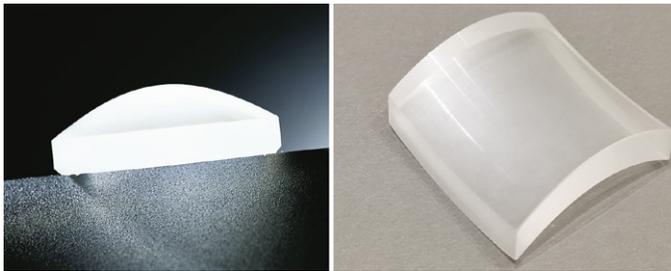


Bild 1.10

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.

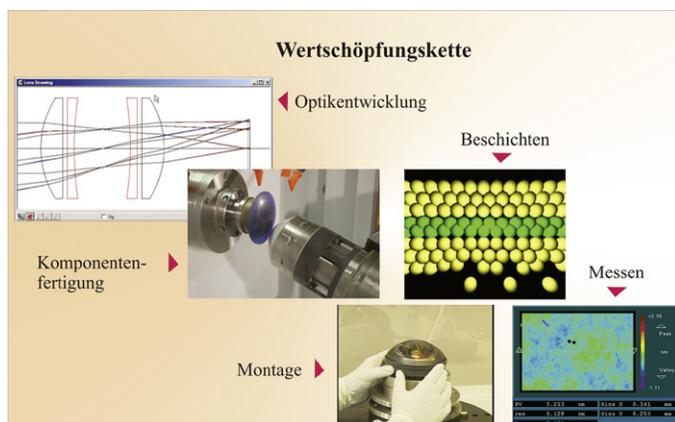


Bild 1.11

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