

# Miniaturisierte Hoch-Präzisionsoptik – stößt die klassische Bearbeitung an ihre Grenzen?

Sandra Caspar, Klaus Mlejnek, Mikrop AG, Wittenbach, Schweiz

**Optische Linsen werden heute entweder mit Hilfe der klassischen Oberflächenbearbeitung erzeugt oder durch verschiedene replikative Verfahren. Im Folgenden vergleichen wir Herstellungsverfahren und beschreiben die Besonderheiten in der klassischen Miniaturfertigung sowie ihre Möglichkeiten in der stabilen Serienproduktion.**

Wenn miniaturisierte Hoch-Präzisionsoptiken mit schwierigen Geometrien und engsten Toleranzen gefragt sind, erweist sich trotz großer Anstrengungen in der Weiterentwicklung der replikativen Verfahren immer noch die klassische Herstellung als die Methode der Wahl, wenn es nicht um sehr große Stückzahlen geht.

## “Small Is Beautiful”

So lautet das Motto eines der Megatrends der aktuellen Technologieentwicklung. In Abgrenzung zu herkömmlichen Dimensionen einerseits und den Größenverhältnis-

sen in der Nanotechnologie andererseits weisen die funktionsbestimmenden Strukturen in der Mikrotechnologie Abmessungen im Mikrometerbereich auf. Auch in der Optik ist eine zunehmende Miniaturisierung mit der damit verbundenen Gewichtsreduzierung erkennbar. Mikrooptische Bauelemente mit Abmessungen von wenigen Mikrometern werden ganz oder überwiegend durch Mikrotechniken hergestellt. Davon abzugrenzen sind optische Bauelemente mit Dimensionen zwischen ca. 200  $\mu\text{m}$  und einigen Millimetern, die oft auch als Mikrooptik bezeichnet werden. Zur Vermeidung von Verwechslungen wird

im Folgenden die zuletzt genannte Gruppe mit „miniaturisierter Optik“ bezeichnet. Eine der Vorreiter-Anwendungen für miniaturisierte Hoch-Präzisionsoptik ist die Endoskopie, wo die Miniaturisierung seit mehr als 40 Jahren konsequent vorangetrieben wird (**Bild 1**).

Rundoptische Bauelemente lassen sich mit unterschiedlichen Verfahren herstellen:

- die klassischen Methoden (Schleifen, Läppen, Polieren),
- das Glaspressen (Blankpressen),
- das Herstellen von Linsen mittels Kunststoffabformung,
- Hybridverfahren, bei dem konventionelle, sphärische Glasachromate mit einer Polymerschicht asphärisiert werden.

Für miniaturisierte Hoch-Präzisionsoptiken, wie sie z.B. für Spezialkameras oder in der Medizintechnik benötigt werden, muss die Abbildungsqualität trotz der kleinen Dimensionen höchsten Ansprüchen genügen.

## Bewertung einzelner Herstellungsverfahren

### Glas oder Kunststoff

Die bei der Kunststoffabformung eingesetzten Polymere unterscheiden sich in ihren Eigenschaften deutlich von Gläsern, die in anderen Verfahren verwendet werden. Ein Vorteil von Kunststoff gegenüber Glas ist die Möglichkeit, Großserien zu einem sehr günstigen Preis herzustellen. Außerdem weisen Kunststoffoptiken Designfreiheiten auf, welche man schon aus wirtschaftlichen Gründen mit Glas nicht erreichen kann, wodurch Asphären, Fresnel-Optiken, diffraktive Oberflächen und integrierte Baugruppen leichter her-



**Bild 1: Beispiele für miniaturisierte Hoch-Präzisionsoptik in der Endoskopie**

stellbar sind. Kunststoff ist zudem bis zu fünf Mal leichter als Glas. Glas ist dagegen nicht nur härter und damit kratzfester als Kunststoff, sondern auch über einen weiteren Temperatur- und Feuchtigkeitsbereich beständig und stabil. Bei Kunststoffen liegt der Arbeitstemperaturbereich zwischen  $-40^{\circ}\text{C}$  und  $130^{\circ}\text{C}$ . Außerhalb dieser Temperaturen kann sich die Form z.B. einer Linse stark verändern. Auch Feuchtigkeit kann bei Kunststoffen zur Veränderung der Form und des Brechungsindex der Linse führen. Gläser stehen außerdem mit einem höheren Brechungsindex (z.B. LASF-Gläser  $> 1,8$ ) als Kunststoffe (max bis 1,7) [1] zur Verfügung und bieten damit eine größere Auswahlmöglichkeit. In der Regel eignen sich daher Kunststofflinsen lediglich bei geringeren Qualitätsanforderungen und für den Massenmarkt. Eine Übersicht zum Vergleich der Materialien ist in **Tabelle 1** zusammengestellt.

### Blankpressen

Für dickwandige Formteile wird hauptsächlich das Blankpressen eingesetzt. Der

	Kunststoff	Glas
Herstellkosten für Großserien ( $> 10^6$ )	+	-
Herstellkosten für Kleinserien ( $< 10^4$ )	-	+
Materialhärte (Kratzfestigkeit)	-	+
Stabilität über breiten Temperaturbereich	-	+
Stabilität über breiten Feuchtigkeitsbereich	-	+
Brechungsindexbereich	-	+
Gewicht	+	-
Designfreiheiten	+	-

**Tabelle 1: Wesentliche Vor- und Nachteile [1]**

größte Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass der Fertigungsprozess in nur einem Schritt erfolgt, sobald eine präzise Masterform vorliegt. Nachteilig sind vor allem die hohen Einstiegskosten aufgrund der erforderlichen Werkzeugentwicklung. Da die meisten Glasmaterialien beim Abkühlen schrumpfen, ist die Herstellung der keramischen Masterpressform

durch mehrere Iterationen sehr zeit- und kostenaufwendig. Der Glasrohling muss zudem sehr genau portioniert sein, Größe und Gewicht dürfen nicht verändert werden. Ist die Pressform in der gewünschten Qualität erstellt, können die Linsen bei geringen Instandhaltungskosten des Werkzeugs gefertigt werden.

Für Präzisionsoptiken werden die Linsen

	Glaspressen	Kunststoffabformung	Klassische Bearbeitung
Verfahren	Blankpressen oder Heißprägen	Spritzgießen, Spritzprägen, Heißprägen	Drehen, Schleifen, Läppen, Polieren
Werkstoff	Glas	Kunststoff	Glas
Arbeitstemperatur	bis $250^{\circ}\text{C}$ (für Blankpressen)	meist bis $800^{\circ}\text{C}$ (für Quarzglas bei ca. $1400^{\circ}\text{C}$ )	Raumtemperatur
Typische Durchmesser	$< 30$ mm	Einige mm bis 100 mm	Einige mm bis 100 mm
Typische Formabweichung der Oberfläche	Einige $\mu\text{m}$	Einige $\mu\text{m}$	Einige $\mu\text{m}$
Geringe Brechzahlsschwankungen im Material	Gut	Mittel (Schlierenbildung)	Sehr gut
Typische Stückzahlen	$> 10^5$	$> 10^5$	$< 10^4$
Herstellkosten bei Stückzahlen $> 10^5$	++	+++	+
Materialbeständigkeit	+++	+	+++
Materialvielfalt	++	+	+++
Kurze Erstlieferzeiten durch geringe Vorlaufzeiten	+	+	+++
Miniaturisierbarkeit für Hochpräzisionsanforderungen	+	+	+++
Typische Einsatzfelder	Gebrauchsoptik, z.B. in CD- & DVD-Laufwerken, Digitalkameras, Autoscheinwerfern, Barcode-Lesern, optischen Maschinensensoren		Optische Präzisionsgeräte, Fotoobjektive, Masterformen für Glaspressen und Kunststoffabformung

**Tabelle 2: Merkmale der drei Haupt Herstellverfahren für Hoch-Präzisionsoptik**



**Bild 2: Typische Arbeitsplätze bei der Herstellung im klassischen Verfahren (v.l.o.n.r.u.): Linsenfertigung, Zentrieren, Montage und Kontrolle**

meist noch innerhalb des Formwerkzeugs abgekühlt, um ein Verziehen oder Schrumpfen der abgeformten Teile zu verhindern. Blankpressen ist daher erst ab großen Stückzahlen, in der Regel  $10^5$  bis  $10^6$ , wirtschaftlich. Zudem können beim Glaspressen im Gegensatz zum klassischen Verfahren weniger Glassorten bearbeitet werden, da man hierbei auf möglichst niedrige Transformationstemperaturen (Low-Tg-Gläser) angewiesen ist [2-4].

### **Kunststoffabformung**

Im Gegensatz zu den keramischen Masterformen für Gläser sind die metallischen Masterformen für Kunststoffe etwas

schneller herzustellen und leichter korrigierbar. Beim Kunststoff-Spritzgießen oder -Spritzprägen in eine geschlossene Form erreicht man allerdings nur eine begrenzte Abbildungsqualität durch Brechzahlsschwankungen (Schlierenbildungen) im Material. Diesen Effekt kann man beim Kunststoff-Heißprägen durch den geringeren Materialtransport in der Prägeform reduzieren, aber nicht komplett vermeiden. Die Kunststoffabformung ist daher nur bei geringen Qualitätsanforderungen geeignet und lohnt sich erst ab Stückzahlen von mehr als  $10^5$ , meist sogar erst im Millionenbereich, da der Prozess zur Herstellung des Abformkörpers immer noch sehr aufwendig ist [1,2,4].

### **Klassische Bearbeitung**

Bei sehr hohen Ansprüchen an die Oberflächenqualität ebener oder paralleler Flächen und Stückzahlen unter  $10^5$  ist immer noch die klassische Bearbeitung der optischen Komponenten am geeignetsten.

Neben dem besseren Preis/Leistungsverhältnis ist ein weiterer, für die Qualität des Endproduktes möglicherweise entscheidender Vorteil, dass eine Vielzahl von Glassorten zur Verfügung steht und so die Vorzüge des Mediums Glas voll ausgeschöpft werden können. Für die Endkorrektur von Hoch-Präzisionsoptiken über 5-10 mm Durchmesser können lokale Polierverfahren wie CCP (computergesteuertes Polieren), MRF (magnetorheologische Endbearbeitung), Wasserstrahl-Polieren und Ionenstrahl-Formgebung eingesetzt werden; damit sind Endgenauigkeiten unter 10 nm Restabweichungen von der Sollfläche möglich. Anspruchsvolle Asphären sind ab Durchmessern von ca. 5 mm herstellbar [2-5].

Die Nachteile auf der technischen Seite fallen mit zunehmendem Miniaturisierungsgrad immer stärker ins Gewicht. Aus diesem Grund bleibt trotz aller Fortschritte bei den replikativen Verfahren immer noch die klassische Oberflächenbearbeitung die Methode der Wahl, wenn miniaturisierte Hoch-Präzisionsoptik in kleineren und mittleren Stückzahlen hergestellt werden soll [2,6]. Einen Vergleich der Verfahren erleichtert **Tabelle 2**.

### **Spezielle Herausforderungen bei der klassischen Bearbeitung**

Der Mensch ist im Vergleich zu Maschinen bei der Fertigung von Hochpräzisionsoptiken mit 0,2-5 mm Durchmesser immer noch viel präziser (**Bild 2**). Das liegt zum Einen daran, dass die aktuell auf dem Markt verfügbaren Bearbeitungsmaschinen oftmals Probleme haben, die Miniatur-Werkstücke zu halten oder mit der erforderlichen Präzision zu bearbeiten. Außerdem kommen bei der Bearbeitung kleinster Dimensionen negative Einflüsse stärker zum Tragen. So können z.B. kleinste Veränderungen von pH-Wert, Temperatur oder Dichte der Poliermittelsuspension sowie des Werkzeug-Verschleißzustandes schon im Produktionsprozess großen Einfluss auf die Produktqualität haben.

Im Gegensatz zur Maschine kann der Mensch aufgrund seiner Beobachtungsgabe, Erfahrung und Vernunft schnell auf solche Veränderungen reagieren, die Bearbeitungsparameter flexibel anpassen und somit für eine hohe Prozessstabilität sorgen. Neben erfahrenen Mitarbeitern



**Bild 3: Ungefasste und gefasste Objektiv mit Durchmessern zwischen 0,9 und 5 mm**

mit hoher Prozesskompetenz und präziser Messtechnik werden bei der Herstellung von Miniaturoptik oft selbst entwickelte Maschinen eingesetzt, die z.B. spezielle Lager enthalten, um so die hohen Zentrieranforderungen zu erreichen.

Auch die enge Verzahnung der Optikrechnung mit der Fertigung, Montage und Prüfung der Miniaturlinse hat einen großen Einfluss auf die Prozessstabilität und damit auf Produktqualität und -preis. Dazu kommen Spezialkenntnisse und -ausstattung, etwa für die konische Randbearbeitung oder Beschichtung. Selbst gefertigte Werkzeuge mit kleinsten Dimensionen und Radiengenauigkeiten im Bereich von 1 µm sowie Spezialhalter und -vorrichtungen runden die Basiskompetenzen eines Herstellers von Hochpräzisions-Miniaturlinsen ab.

Die Grenzen der Machbarkeit sind durch die ständige Weiterentwicklung permanent hin zu noch kleineren, noch genaueren Optikkomponenten verschoben worden. Die mit herkömmlichen Verfahren in einer stabilen Serienproduktion erzielten Genauigkeiten genügen selbst bei Durchmessern unter 1 mm höchsten Qualitätsanforderungen. Durchmesser- und Mittendickentoleranzen von  $\pm 5 \mu\text{m}$ , Passfehler von  $\lambda/4$  und eine Oberflächen-güte von 5/1x0,006 (nach ISO 10110) sind unter normalen Serienbedingungen stabil und reproduzierbar erreichbar. Auch noch höhere Anforderungen können mit einem gewissen Mehraufwand, vor allem durch zusätzliche Kontroll- und Korrekturschritte, erfüllt werden.

Abhängig von den Glassorten und geometrischen Anforderungen können Achromate mit Durchmessern ab 0,35 mm und hochpräzise Kompaktobjektive mit einem Durchmesser von 0,9 mm, bestehend aus mehreren Einzel-linsen und einer Prismengruppe (**Bild 3**), in Serie gefertigt werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Beim Blankpressen sind der Umformprozess, die Herstellung der Abformwerkzeuge sowie die Abstimmung der einzelnen Materialien und Prozessschritte sehr schwierig. Das EU-Projekt "Production 4µ – Empowering Europe for the µ-Century" [7] soll die gesamte Prozesskette optimieren, um es so auch Herstellern von Kleinserien künftig zu ermöglichen, kostengünstig miniaturisierte Präzisionsoptiken zu pressen. Erklärtes Ziel ist es, damit eine zuverlässige und wirtschaftliche Produktion von hochpräzisen Optikkomponenten zu erreichen [8].

Auf der anderen Seite entwickeln auch die klassischen Miniaturoptikhersteller ihre Technologien permanent weiter, mit dem Ziel der Kostensenkung einerseits und des Erreichens noch kleinerer Dimensionen bzw. noch höherer Genauigkeiten andererseits.

Wachstumsmärkte wie Lithographie, Informationstechnik, Telekommunikation, Gesundheitswesen, Biotechnologie, Beleuchtungstechnik sowie Luft- und Raumfahrt verlangen nach immer preiswerteren Präzisionsoptiken. Zusätzlich erfordern einige dieser Anwendungen immer kleinere, sogenannte miniaturisierte Optikkomponenten mit Durchmessern unter 5 mm bei höchsten Qualitätsanforderungen. Die derzeit verwendeten replikativen Verfahren liefern für sehr hohe Qualitätsanforderungen und bei Stückzahlen unter  $10^5$  keine rentablen und zufriedenstellenden Lösungen. Die minimalen Losgrößen ergeben sich dabei aus der aufwendigen Herstellung der Formwerkzeuge. Eine weitere Einschränkung für den Entwickler stellt sicherlich auch das gegenüber der Materialvielfalt bei der klassischen Bearbeitung noch relativ kleine Angebot an Low-Tg-Gläsern dar.

Für die Herstellung miniaturisierter Hochpräzisionsoptiken in kleineren und mittleren Stückzahlbereichen ist daher die

klassische Bearbeitung nach wie vor das genaueste, zuverlässigste und kosteneffizienteste Verfahren.

## Literaturhinweise

- [1] A. Maahs, *Plastic optics lower mass manufacturing price tag*, Optics & Laser Europe, Dezember 2007
- [2] E. Hering, R. Martin (Hrsg.), *Photonik; Grundlagen, Technologie und Anwendung*, Springer 2006
- [3] A. Kalweit, Ch. Paul, S. Peters, R. Wallbaum (Hrsg.), *Handbuch für Technisches Produktdesign*, Springer 2006
- [4] M. Katsuko, *Glass Molding and Mold Machining for Optical Elements*, iMOC 2007
- [5] G. Litfin, *Technische Optik in der Praxis*, Springer 2005
- [6] Fraunhofer IPT, Pressemitteilung vom 06.04.2006
- [7] [www.production4micro.net](http://www.production4micro.net)
- [8] M. Weiner, *Neue Optik für Europa*, Werkstatttechnik online, Ausgabe 5 2008

## Ansprechpartner:

Sandra Caspar  
 Prozessmanagerin  
[sandra.caspar@mikrop.ch](mailto:sandra.caspar@mikrop.ch)  
 Mikrop AG  
 Industriestr. 22  
 9301 Wittenbach,  
 Schweiz  
 Tel. +41 71 292 1080  
 Fax +41 71 292 1089  
[www.mikrop.ch](http://www.mikrop.ch)



Dr. Klaus Mlejnek  
 Geschäftsführer  
[klaus.mlejnek@mikrop.ch](mailto:klaus.mlejnek@mikrop.ch)  
 Mikrop AG  
 Industriestr. 22  
 9301 Wittenbach,  
 Schweiz  
 Tel. +41 71 292 1080  
 Fax +41 71 292 1089  
[www.mikrop.ch](http://www.mikrop.ch)



[www.photonik.de](http://www.photonik.de) ▶ Webcode 4001