

**Glas schmelzen**

Beim Schmelzen des optischen Glases ist Vorsicht geboten, kühlt es zu schnell ab, können sich die optischen Eigenschaften ändern.

**Rohling pressen**



Die meisten Linsen kommen beim Objektivhersteller als Pressling an. Nur selten werden sie noch aus einem Glasblock geschnitten.

**Linsen polieren**



Die Presslinge sind zunächst matt. Erst durch Polieren der Oberflächen entwickeln sie sich zu klaren Linsen.

**Linsen prüfen**



Die Qualitätskontrolle ist noch heute zum großen Teil Handarbeit. Kleinste Fehler lassen sich nur mit geübtem Auge erkennen.

**Feinbearbeitung**



Der Linsenmantel muss die richtige Rauheit aufweisen, damit der Lack haftet und sich so verteilt, dass zwischen Lack und Glas keine Luft bleibt.

**Lack auftragen**



Der schwarze Lack soll verhindern, dass die Mantelfläche das Licht reflektiert. Jeder Optikerhersteller hat für den Schutzlack seine eigene Rezeptur.

Vom rohen Glas zur fertigen Linse

# Eine Kunst für sich

Bis aus rohem, optischem Glas eine Objektivlinse wird, bedarf es einer Menge Arbeit, Wissen und Fingerspitzengefühl. Werfen Sie mit uns einen Blick in die Fertigungshallen des deutschen Objektivherstellers Carl Zeiss.

Mit den optischen Linsen steht und fällt die Leistung eines Objektivs. Von ihnen, ihrer Qualität, ihrem Zusammenspiel hängen nicht nur grundlegende Eigenschaften wie Brennweite und Lichtstärke ab, sondern auch wesentliche Qualitätsmerkmale wie die Korrektur von Verzeichnung, Vignettierung und chromatischer Abberation. Natürlich kommt dem Optikdesign dabei eine besonders wichtige Rolle zu; nur wenn die Linsen mit ihren unterschiedlichen Glassorten, Dicken und Oberflächenformen optimal aufeinander abgestimmt sind, funktioniert das optische Gesamtsystem. Mit einem guten Optikdesign allein ist es allerdings nicht getan. Für eine gute Abbildungsleistung muss jede einzelne Linse strengsten Richtlinien entsprechen und minimale Toleranzgrenzen einhalten. Andererseits darf die Fertigung in aller Regel nicht allzu viel kosten, wenn das Objektiv als Ganzes noch erschwinglich bleiben soll. Eine Herausforderung und Gratwanderung, die in den letzten zehn Jahren zum grundlegenden Wandel der Linsenfertigung und Beschichtungsverfahren geführt hat. Lesen Sie, wie beim Objektivhersteller Carl Zeiss Linsen heutzutage entstehen.

**Linsen formen**

Mitte der achtziger Jahre brachte man die Linsen noch vorwiegend

mit der so genannten Tragkörperfertigung in Form. Dabei wurden mehrere Linsen auf einen Tragkörper aufgebracht und beispielsweise mithilfe von Diamantstaub per Dreh- und Kippbewegungen passend geschliffen – eine langwierige, teure Angelegenheit, schließlich brauchte man für jeden Linsenradius spezielles Werkzeug. Heute setzen die Hersteller deshalb fast ausschließlich auf press- und computergesteuerte CNC-Fräsverfahren. Besonders günstig fahren sie mit Presslingen, die der Glashersteller schon mit einem bestimmten „Normradius“ liefert und die lediglich ein Feintuning erfordern. Einige Gläser, vor allem die mit niedriger Dispersion, eignen sich jedoch aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften und ihres Fließverhaltens nicht zum Pressen. Da man solche Gläser jedoch speziell zur anspruchsvollen Farbkorrektur unbedingt braucht, schneidet man in solchen Fällen die Glasblöcke zunächst mit der Bandsäge in Scheiben und bringt sie danach per CNC-Maschinen in Form. Für hochwertige SLR- und besonders kleine Handy-Kameraobjektive verwenden die Hersteller oft asphärische Linsen, deren Oberfläche von der Kugelform abweicht, um die Abbildungsleistung zu erhöhen. Bei kleinen Linsen mit Durchmessern von maximal 3 cm lässt sich die asphärische Form

relativ einfach mittels Pressverfahren umsetzen. Nicht so bei größeren Linsen, wie sie etwa im vorderen Bereich von SLR-Objektiven zu finden sind. Hier muss man entweder auf das schwierigere, teurere computergesteuerte Schleifen oder auf die Hybridtechnologie ausweichen. Letztere funktioniert ausschließlich bei Linsen, deren asphärische Form nur geringfügig von der sphärischen abweicht; sie nutzt eine normale Sphäre als Trägerlinse, auf die man eine Kunststoffschicht mit entsprechend asphärischer Oberfläche aufbringt.

**Polieren und Lackieren**

Die Linsenrohlinge sind zunächst matt und werden erst nach einem aufwändigen Poliervorgang durchsichtig. Das Ziel: Alle Unebenheiten der beiden wirksamen Linsenoberflächen eliminieren, damit sich das Licht daran nicht streut. Im Gegensatz dazu muss die Mantelfläche des Linsenzylinders eine gewisse Rauheit aufweisen, damit später der schwarze Lack hält. Dieser hat die Aufgabe, die von den Linsen reflektierten und auf der Mantelfläche auftreffenden Lichtwellen aufzunehmen, sprich zu absorbieren, damit sie nicht zurück in den Strahlengang und schließlich als Störsignal auf den Sensor gelangen. Grundsätzlich wird umso mehr Licht an einer Grenzfläche reflektiert (also nicht absorbiert),

je größer der Brechzahlssprung zwischen den beiden angrenzenden Medien. Daher gilt es, die Brechzahl des Lacks an die des Linsenglases anzupassen. Wie beziehungsweise mit welchen Bestandteilen die Hersteller die Brechzahl des Lacks variieren und gleichzeitig das tiefe Schwarz sowie die optimalen Hafteigenschaften erreichen, das gehört zu den wohl gehüteten Geheimnissen der Entwickler. Auch Dr. Hubert Nasse, Senior Scientist bei der Camera Lens Division von Carl Zeiss, will uns dazu keine Einzelheiten verraten.

**Linsenoberflächen beschichten**

An den Linsenoberflächen lässt sich ein gewisser Brechzahlssprung kaum vermeiden: Die Brechzahl von Luft beträgt auf Meeresspiegel etwa 1,0, die der verwendeten optischen Glassorten etwa 1,41 bis 2. Nimmt man beispielsweise ein normales Fensterglas mit Brechzahl 1,5, so reflektiert eine einzige Oberfläche etwa 4 % des auftreffenden Lichts. Bei hochbrechendem Glas kann der Reflexionsgrad auf 9 % steigen. In einem Objektiv, in dem das Licht meist mehrere Luft/Glas-Übergänge zu überwinden hat, summiert sich der Streu- und Störlichtanteil schnell und lässt das Bild flau und kraftlos erscheinen. Eine Antireflexbeschichtung ist daher unabdingbar. Früher musste eine Oberflächenschicht

## Beschichtung



Damit die Linsenoberflächen möglichst wenig Licht reflektieren, müssen sie „veredelt“, respektive beschichtet werden.

## Zusammensetzung



Wenn die Linsen bei der Montage nicht exakt zusammengesetzt werden, ist die Optik dezentriert und erreicht keine konstant gute Abbildungsleistung.

## Der Härtestest



Zeiss prüft und testet seine neu konstruierten Objektive. Dieses Exemplar musste eisige Kälte bei hoher Luftfeuchtigkeit überstehen.

und entspiegelter Kittfläche. Das Reflexionsverhalten hängt auch von Parametern ab, die Sie als Fotograf selbst beeinflussen können. Unter anderem spielt die Position der Lichtquelle eine entscheidende Rolle. Geisterbilder, die beispielsweise beim Fotografieren eines Sonnenuntergangs am Horizont auftreten, verschwinden womöglich, wenn Sie die Sonne seitlich statt mittig im Bild platzieren. Außerdem nehmen abgesehen von wenigen Ausnahmen Geisterbildeffekte mit dem Abblenden zu. Grund: Achsnah verlaufende Lichtstrahlen werden stärker reflektiert, und die gewinnen mit Schließen der Blendenöffnung an Bedeutung. *Annette Kniffler*

reichen. Die bewirkte allerdings nur in einem relativ schmalen Frequenzbereich das, was man von ihr erwartete. Ob sie die Reflexion nun etwa im Blau, Grün oder Rot auf unter 1% senkte, regulierten die Entwickler damals über die Schichtdicke (siehe Grafik).

Heute lässt sich die Reflexion mithilfe von Mehrschichtsystemen im gesamten sichtbaren Spektralbereich auf unter 0,5% drücken. In der Regel bestehen sie je nach Glasart aus drei bis elf übereinander liegenden, hauchdünnen Lagen. Die Kunst besteht darin, jede einzelne davon gleichmäßig über die gesamte Linsenoberfläche zu verteilen. Hierfür nutzt man unter anderem das Verfahren des thermischen Aufdampfens, bei dem das Beschichtungsmaterial (transparente Metallverbindungen) in einer Vakuumkammer auf bis zu 280 Grad Celsius erhitzt wird. Die zu beschichtende Linse befindet sich dabei in der Kammer, damit sich auf ihrer Oberfläche der Dampf ablegt. Häufiger kommen mittlerweile die „kalten“ Verfahren zum Einsatz, bei denen die Temperatur der Linse weniger stark steigt – beispielsweise die plasmaunterstützte Beschichtung, bei der Argon-Ionen das Schichtmaterial bombardieren. Sie setzen dabei Atome frei, welche auf dem Substrat abgesetzt die Schicht bilden. Mehrschichtsysteme wirken im sichtbaren Spektralbereich deut-

lich effektiver als eine Einzelschicht. Im nahen Infrarot steigt der Reflexionsgrad dann allerdings oft steil an, was bei stark gekrümmten Linsen zu Problemen führen kann. Durch die Krümmung verschiebt sich nämlich der steile Reflexionsanstieg unter Umständen vom Infrarot in den sichtbaren Bereich und verursacht orangefarbene Reflexe. Um dies zu vermeiden, bedampft Zeiss solche Linsen nicht als Ganzes, sondern partiell und sorgt dafür, dass die Schichtrezeptur auf der Oberfläche so variiert, dass sich die starke Reflexion im unsichtbaren Bereich hält.

### Kittlemente

Vor allem früher, als die Hersteller das Entspiegeln ihrer Linsen noch nicht perfektioniert hatten, verwendeten sie verkittete Linsen, um die Anzahl der Glas-Luft-Übergänge im Objektiv zu minimieren. Wenn die Brechzahlen der beiden Glassorten nahe beieinander liegen, ist die Reflexion an der Kittfläche relativ moderat. Aufgrund von Interferenzen treten allerdings im sichtbaren Spektralbereich viele Minima und Maxima auf (siehe Diagramm), wodurch die Reflexion im Durchschnitt über 0,5%, also über dem Niveau einer guten Mehrschichtschicht liegt. In einigen aktuellen Objektiven findet man trotzdem noch Kittglieder, allerdings meist mit größerem Brechzahlssprung

## Labortest: Streulicht

Wichtiger noch als Härtestests sind die Messungen, mit denen Zeiss die Abbildungseigenschaften der Objektive prüft. Dank ihnen haben die Entwickler die Möglichkeit, falls nötig Optikdesign und Beschichtung nochmals zu modifizieren. Unter anderem ermitteln die Ingenieure mithilfe eines Monochromator-Messgeräts, wie stark die Objektive das auftreffende Licht in bestimmten Wellenlängenbereichen reflektieren. Dieses Diagramm zeigt den Reflexionsgrad einer nicht entspiegelten Linse mit Brechzahl 1,52 (Normalglas) bzw. mit höherer Brechzahl 1,88. Man erkennt, dass eine Luft/Glas-Grenzschicht umso stärker reflektiert, je höher brechend das Glas. Zudem hängt der Reflexionsgrad nicht oder nur schwach von der Frequenz ab. Anders bei den beschichteten

Linsen, hier bunt dargestellt: Eine Schicht (blau) minimiert die Reflexion für einen Frequenzbereich – in diesem Fall für Grün (um 550 nm). Daher ist man dazu übergegangen, mehrere Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften auf die Oberflächen optischer Linsen aufzubringen. Wie effektiv eine solche Mehrschicht entspiegelt, beweist die rote Linie, die Minima bei 410 nm (Violett), 490 nm (Blau) und 650 nm (Orange) aufweist. Erst im Infrarot über 750 nm steigt die Reflexionsflanke bei der Mehrschicht steiler an. Interessant auch der von vielen Minima und Maxima geprägte Kurvenverlauf einer nicht entspiegelten Kittfläche, bei der zwei Glaslinsen direkt aneinander grenzen. Die Größe des Brechzahlssprungs beeinflusst die Modulation, die Dicke des Kittglieds deren Frequenz.

Typische Reflexion von Linsenoberflächen

