

Wahre Boliden

Die Konstruktion von Teleobjektiven



Nicht allein die lange Brennweite macht ein Objektiv zum Tele, sondern auch die asymmetrische Konstruktion. Sie ermöglicht eine kompakte Bauweise, erschwert aber die Korrektur von Farbfehlern.

Der Preis für Canons EF 5,6/800 mm L IS USM erreicht mit 11 000 Euro solides Kleinwagen-Niveau. Außerdem wiegt das erlesene Stück ganze 4,5 kg, misst fast 50 cm in der Länge und 16 cm im Durchmesser. Ein wahrer Bolide, und trotzdem sind einige andere lichtstarke Teleobjektive mit extremer Brennweite sogar noch teurer, schwerer und größer. Ein Blick auf ihre Konstruktion erklärt warum.

Große Linsen für mehr Lichtstärke

Ein Teleobjektiv braucht grundsätzlich mehr Wirkungsfläche, sprich größere Linsendurchmesser, als eine Standardbrennweite,

um die gleiche Lichtstärke zu erzielen. Der Grund: Teleoptiken bilden eine kleinere Fläche ab, statt der kompletten Kirche beispielsweise nur deren Portal. Letzteres strahlt jedoch insgesamt weniger Licht ab als die vollständige Kirche, weshalb das Objektiv mehr davon einfangen muss, damit es schließlich die gleiche Lichtstrahlung abbekommt. Formal lässt sich der Zusammenhang zwischen Durchmesser D , Lichtstärke (Blendenzahl B) und Brennweite f so beschreiben: $D=f/B$ (Abb. 1)

Wenn die Lichtstärke beziehungsweise die Blendenzahl konstant bleiben soll, nimmt der Durchmesser demnach zwangsläufig mit der Brennweite zu.

Kompakt dank Telekonstruktion

Dass neben dem Linsendurchmesser auch die Länge des Objektivs mit der Brennweite wächst, wird am Beispiel einer symmetrischen Standardkonstruktion besonders deutlich. Hier muss die Optik nämlich systembedingt immer länger als die Brennweite sein (Abb. 1a). Bei einem 800-mm-Exemplar ergäbe sich daraus eine Baulänge von mehr als 80 cm. Doch wie erwähnt kommt selbst der Titan von Canon mit knapp 50 cm aus. Die Hersteller verzichten hier also auf den symmetrischen Aufbau und bedienen sich eines konstruktiven Tricks, um die Baulänge zu reduzieren: Sie verbauen eine Hauptlinsen-

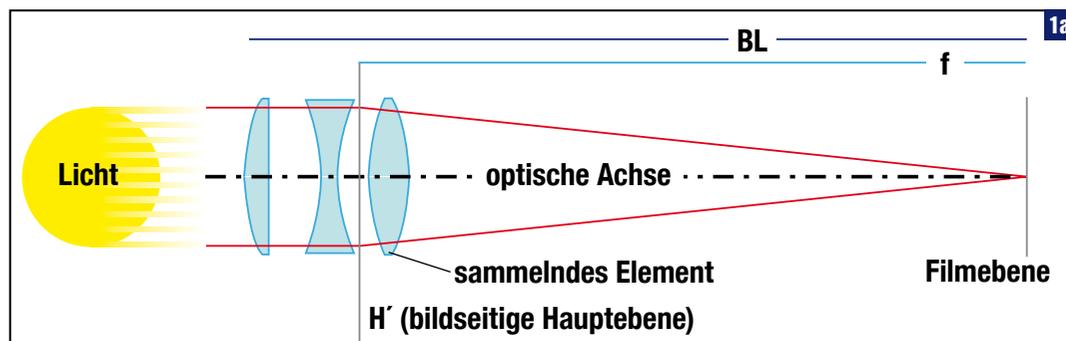
gruppe, welche das eintreffende Licht zunächst sammelt, bevor es eine Einheit mit insgesamt streuender Wirkung durchläuft. Dadurch schrumpft die Baulänge BL bei konstanter Brennweite f . Teleobjektive werden dadurch sogar kürzer als f (Abb. 1b).

Das Verhältnis von BL zu f wird Verkürzungs- oder Telefaktor genannt und liegt beim handelsüblichen SLR-Tele meist zwischen 0,6 und 0,9. Demnach lässt sich ein 300-mm- ζ , über den Daumen gepeilt auf 18 bis 27 cm, ein 800-mm-Exemplar auf 48 bis 72 cm stauchen. In diesem Punkt unterscheiden sich Tele-übrigens von Fernobjektiven, bei denen die Baulänge ungefähr der Brennweite entspricht (Telefaktor=1).

Kurz und preisgünstig: Spiegel-Teleobjektiv

Manchmal reicht der Verkürzungsfaktor, den der Teleafbau ermöglicht, nicht aus. Vor allem bei extremen Brennweiten greifen die Hersteller deshalb hin und wieder zu einem anderen Mittel: zu Spiegeln, die den Strahlengang im Linsensystem zusammenfallen (Abb. 2). Während sich das Licht im Standardobjektiv nur in eine Richtung, nämlich zum Sensor hin bewegt, wird es in Spiegelobjektiven meist zweifach hin- und hergelenkt – ein Konzept, das dem des astronomischen Fernrohrs gleicht. Auf diese Weise können die Hersteller Baulängen realisieren, die nur noch ein Drittel oder gar ein Viertel der Brennweite betragen. Das historische Zeiss Mirotar 5,6/1000 mm misst dadurch beispielsweise nur zirka 33 cm, was einem Verkürzungsfaktor von etwa 0,3 gleichkommt. Ähnliches gilt für das aktuelle Sony SAL-500F80 mit 500 mm Brennweite und einer Baulänge von knapp 12 cm. Obwohl sich Spiegelobjektive vergleichsweise günstig produzieren lassen, sind sie selten – zum einen weil sie nur eine Blendeneinstellung bieten. Zum anderen entstehen ringförmige Unschärfekreise aufgrund des Spiegels, der mittig auf der Rückseite der Frontlinse sitzt, um das Licht wieder in Richtung Kamera umzulenken.

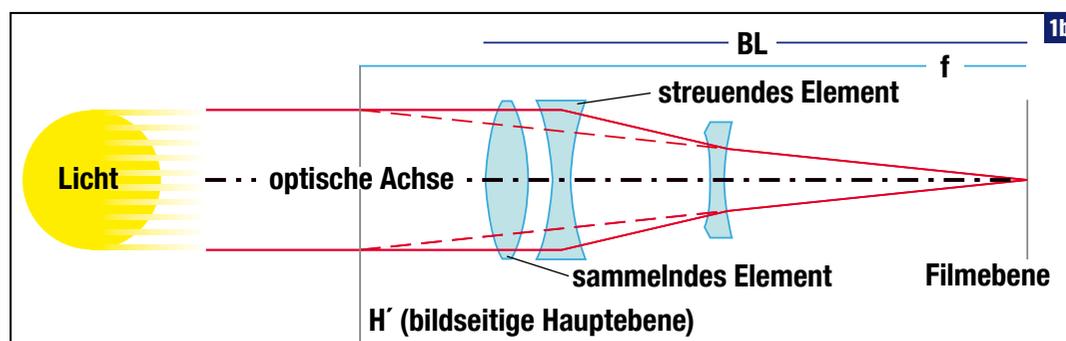
Symmetrische Basiskonstruktion von Normalobjektiven



Viele Standardobjektive zeigen einen weitgehend symmetrischen Aufbau, damit die Abbildungsfehler der beiden symmetrischen Gruppen in etwa entgegengesetzt zueinander gerichtet sind und sich gegenseitig aufheben. Die bildseitige Hauptebene H' , die bei

großen Motiventfernungen (unendlich) genau um die Brennweite von der Filmebene entfernt liegt, befindet sich nahe der Systemmitte. Folglich muss die Baulänge des Objektivs BL (Abstand Frontlinse – Filmebene) die Brennweite f deutlich überschreiten.

Asymmetrische Konstruktion von Teleobjektiven



Langbrennweitige Optiken basieren meist auf der Tele-Konstruktion: Eine sammelnde Linseneinheit bricht das Licht zur optischen Achse hin. Darauf folgt eine streuende Gruppe. Durch diese Asymmetrie verschiebt sich die bildseitige Hauptebene H' in Richtung

Frontlinse, bis außerhalb des Linsenkonstrukts. Der Abstand zwischen H' und Filmebene ändert sich dabei nicht, die Brennweite f bleibt konstant. Dementsprechend wird die Baulänge BL bei Teleobjektiven kürzer als f , der Telefaktor ($= BL/f$) also kleiner als 1.

Abbildungsfehler korrigieren

Zurück zum klassischen Teleafbau. Wegen der hochgradigen Asymmetrie lassen sich hier die Abbildungsfehler (Aberrationen) generell nur mit großem finanziellen und rechnerischen Aufwand ausmerzen. Einige Aberrationen werden zwar automatisch schwächer, wenn der wirksame Linsendurchmesser beim Abblenden abnimmt – so etwa die Randabblende, die bei Weitwinkeloptiken zusammen mit der Verzeichnung im Vordergrund steht (\rightarrow Artikel „Weitsicht, die Konstruktion von Weitwinkelobjektiven“ unter www.colorfoto.de). Bei lichtstarken Objektiven hilft dieses probate Mittel aber ohnehin nur wenig. Außerdem lassen gerade die Farbfehler (chromatische Aberration), die im Telebereich das Hauptproblem dar-

stellen, mit dem Abblenden kaum nach.

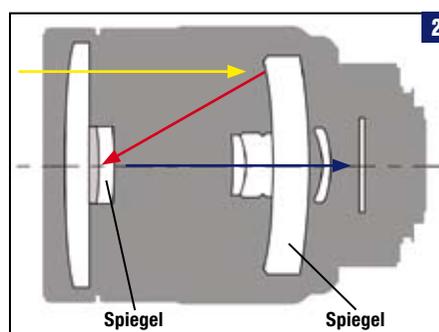
Die chromatische Aberration entsteht durch die Abhängigkeit der Lichtbrechung von der Wellenlänge. Aufgrund dieser sogenannten Dispersion läuft etwa der blaue Lichtanteil näher an der Linse auf der optischen Achse

zusammen als der rote. Die Abweichung verursacht im Bild farbige Linien entlang der Kanten (Farbsäume) und Unschärfe (Abb. 3a).

Der Schlüssel: optisches Glas

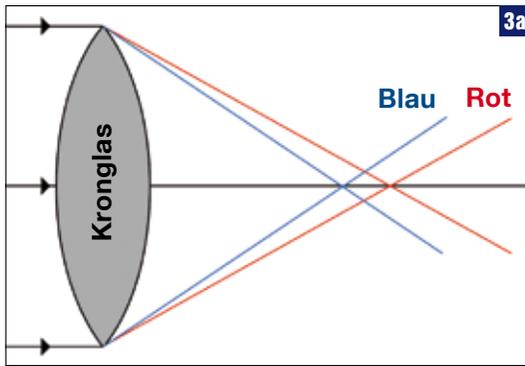
Wie stark eine Linse das Licht infolge der chromatischen Aber-

Spiegel-Teleobjektiv Sony SAL-500F80



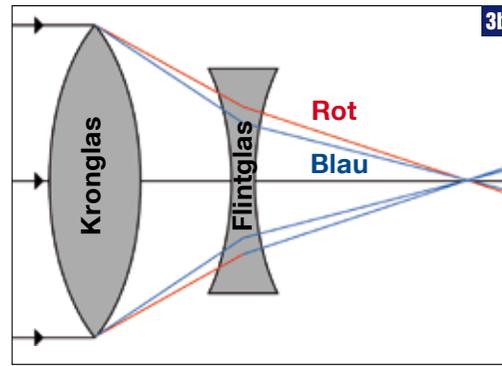
Sonys 500-mm-Spiegelobjektiv verfügt über einen sammelnden Hauptspiegel mit zentraler Durchbohrung. Ein weiterer Spiegel auf der Rückseite der Frontlinse lenkt den Lichtstrahl wieder zurück in Richtung Sensor oder Film.

Chromatische Aberration



3a Standardlinsen lenken in der Regel den blauen Lichtanteil stärker ab als den roten. Da die Farben dadurch nicht auf demselben Bildpunkt zusammentreffen, werden sie im Abbild unterschiedlich stark vergrößert. Es ergeben sich unschöne Farbsäume und Unschärfen. Diese chromatische Aberration wirkt sich vor allem bei langen Brennweiten aus.

Prinzip des Achromaten



3b Eine sammelnde Kronglas-Linse mit geringer und ein streuendes Flintglas-Element mit hoher Dispersion können zusammen zwei Farben in einem Bildpunkt zur Deckung bringen.

ration in seine Einzelfarben aufzuehert, hängt maßgeblich von den verwendeten Glastypen ab, genauer gesagt von deren individuellen Dispersionsverhalten. Es gibt mittlerweile ungefähr 200 optische Glassorten mit den unterschiedlichsten Eigenschaften. Als Maß für die Gesamtzerstreuung beziehungsweise Dispersion einer Glassorte dient die Abbezahl, die sich aus der Brechung bei drei Wellenlängen des Lichts ergibt, nämlich Blau, Gelb und Rot. Je größer die Abbezahl, desto kleiner die Dispersion und schwächer

cher die unerwünschten Farbabweichungen. Gläser mit einer Abbezahl unter 50 (hohe Dispersion) gelten traditionsgemäß als Flint-, die mit einer Abbezahl über 55 (niedrige Dispersion) als Kron- und die mit noch höherer Abbezahl als Neu-Krongläser. Im Prinzip läge es also nahe, einfach statt Flint- nur Krongläser zu verbauen, um die Farbfehler möglichst gering zu halten – wäre da nicht der eine entscheidende Haken: Es gibt keine einzige Glassorte, welche eine schwache Dispersion mit einer starken Brech-

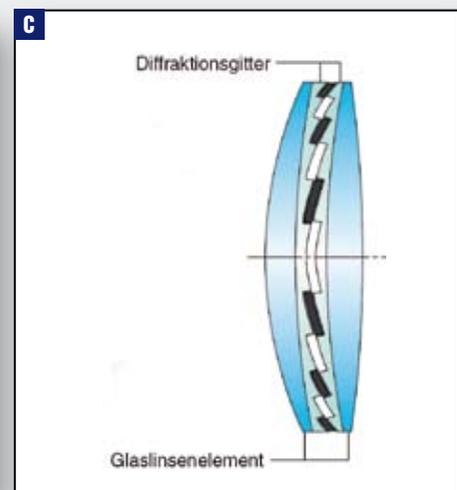
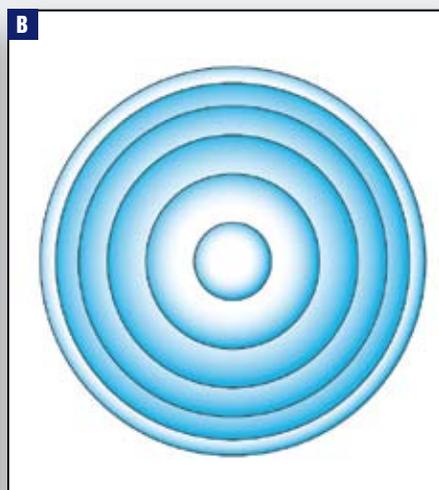
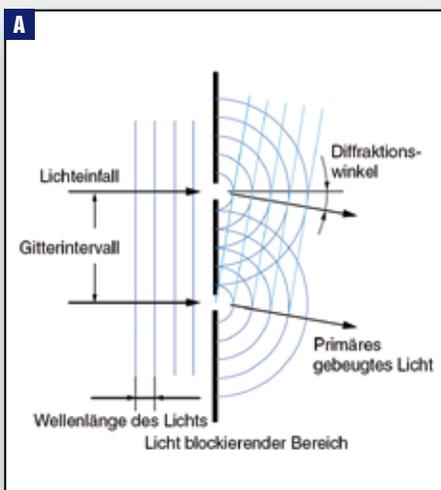
kraft verbindet. Und auf die kann der Objektivkonstrukteur aus verschiedenen Gründen nicht gänzlich verzichten.

Farbfehler heben sich auf

Eine gebräuchliche Methode, um die Farbabweichungen aufgrund der chromatischen Aberration zu reduzieren, basiert auf mehreren Linsen aus unterschiedlichen Kron- und Flint-Glaskombis. Dabei muss der Optikentwickler dafür sorgen, dass die chromatischen Abweichungen der einzelnen Glieder entgegengesetzt gerichtet

sind und sich dadurch gegenseitig aufheben. Mit einem zweilinsigen System, z. B. einem normalen, verkitteten Flint/Kronglas-Paar, lassen sich allerdings gerade einmal zwei Farben in einem Fokuspunkt auf der optischen Achse zur Deckung bringen (Abb. 3b). Alle anderen Farben, etwa Grün und Purpur, bleiben nach wie vor unscharf und bilden zusammen das sogenannte sekundäre Spektrum. Gemeinhin heißen Objektive, die für zwei Farben einen geringen chromatischen Fehler aufweisen, Achromat.

DO-Linsen korrigieren die chromatische Aberration



Canon setzt bei einigen kompakten Teleobjektiven statt diverser teurer Spezialgläser DO-Linsen (diffraktive optische Elemente) zur Korrektur der chromatischen Aberration ein. Die Technik nutzt das Phänomen, dass Beugungsgitter das Licht ablenken (A).

Ein DO-Element besteht aus Glaslinsen mit kugelförmigen Oberflächen und Beugungsgittern in Form konzentrischer Kreise gleicher Fläche, die abwechselnd lichtdurchlässig und lichtundurchlässig sind (B).

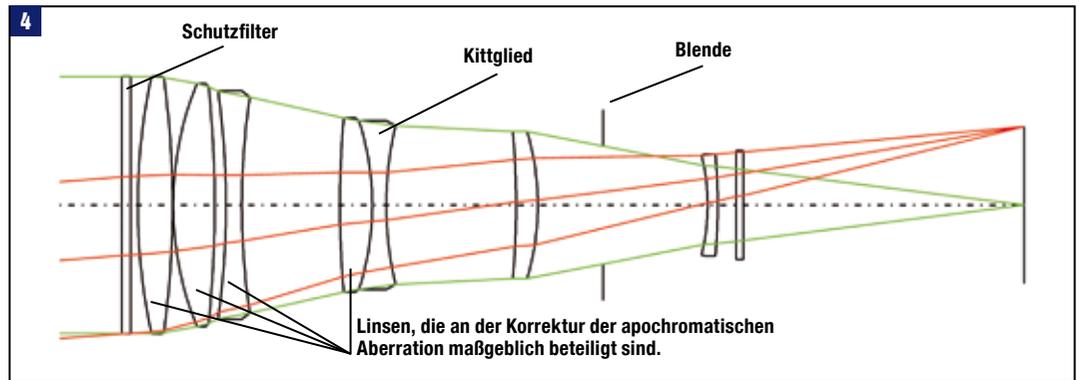
Beim Canon EF 400 mm 1:4 DO IS USM enthält das DO-Element beispielsweise zwei entsprechende Beugungsgitter, die einander zugewandt angeordnet sind (C).

Eine Verbesserung demgegenüber stellt der mindestens dreilinsige Apochromat dar, bei dem definitionsgemäß immerhin drei Wellenlängen des Lichts dieselbe Fokusebene haben. Entsprechend korrigierte Objektive tragen einen Namen mit dem Zusatz „APO“, der als Gütesiegel gilt und nur zu oft als ebenso wirksames wie zweifelhaftes Marketing-Instrument dient. Schließlich fehlt eine genaue Vorgabe, ab welchem Restfehler man ein Objektiv als Apochromaten ausgeben darf. Außerdem ist damit keineswegs festgelegt, wie und mit welchen Materialien die Hersteller die apochromatische Korrektur umsetzen.

Bessere Abbildungsleistung durch Spezialgläser

Insbesondere die hochwertigen Modelle verwenden bei der apochromatischen Korrektur Spezialglas, mit dem sich neben den drei Grundfarben auch Teile des sekundären Spektrums (Restfehler) bereinigen lassen. Da dieses Spezialglas aber oft um das 13- bis 16-fache teurer, deutlich weicher, empfindlicher und schwieriger zu Polieren ist, verzichten die Her-

Apochromat: Leica APO Telyt R 280 mm



Das 280-mm-Teleobjektiv von Leica minimiert die chromatische Aberration für drei Wellenlängen bzw. Farben des sichtbaren Spektralbereichs. Im Grunde tragen dazu zwar alle Linsen bei. Eine besonders wichtige Rolle spielen in diesem Zusammenhang

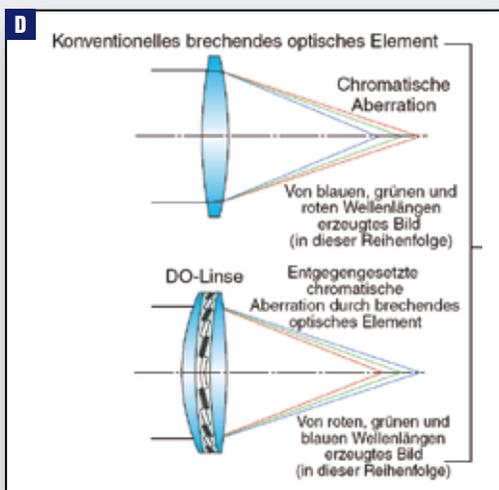
aber die ersten drei Elemente (ohne Schutzfilter) und das Kittglied – sie bestehen aus optischen Spezialgläsern mit hoher anomaler Teildispersion. Das Kittglied hat vor allem die Aufgabe, die drei Farben auch bei Naheinstellung zur Deckung zu bringen.

steller bei vielen kostenoptimierten Objektiven auf diesen Luxus und beschränken sich stattdessen auf eine weniger leistungsfähige Methode mit Normalgläsern.

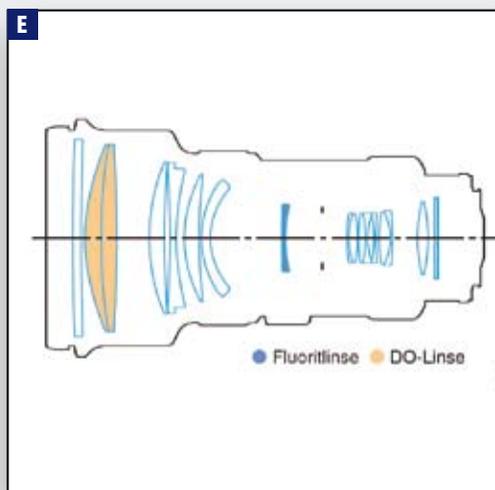
Was die Spezialgläser so interessant macht, ist ihr von der Norm abweichender Brechzahl-Dispersions-Verlauf. In diesem Zusammenhang fällt einem Begriff besondere Bedeutung zu: der Teildispersion, die sich im Gegensatz

zur Abbezahl nicht auf Blau, Gelb und Rot bezieht, sondern nur auf einen Teil des Spektrums. Die Teildispersion gibt also Aufschluss darüber, wie stark die jeweilige Glassorte einen bestimmten Wellenlängenbereich des Lichts, etwa den blauen, zerstreut. Erwartungsgemäß zeigt die Teildispersion im Normalfall die gleiche Tendenz wie die Gesamtzerstreuung. Das heißt, dass Standard-Krongläser (geringe Dis-

persion) auch den blauen Lichtanteil für sich betrachtet vergleichsweise schwach auffächern, wohingegen „normale“ Flintgläser (hohe Dispersion) konsequent auch das Blau relativ stark zerlegen. Tatsächlich gibt es aber einige wenige optische Glassorten, die sich anders verhalten, die etwa eine geringe Gesamt-, aber hohe Teildispersion aufweisen oder umgekehrt. Und genau diese sogenannte anomale Teildispersion eröffnet dem Objektiventwickler ungeahnte Möglichkeiten. Kombiniert man beispielsweise Fluorit, das sich durch eine anomale Teildispersion, eine extrem niedrige Zerstreuung bei sehr geringer Brechung auszeichnet, mit den passenden optischen Glassorten, kann man damit die chromatische Aberration beinahe gänzlich ausgleichen. Auch UD-Glas (Ultraniedrige Dispersion) wird gerne in Superteleobjektiven verbaut, da das Dispersionsverhalten dem des Fluorit ähnelt.



Der Beugungswinkel ist abhängig von der Wellenlänge. Daher fächert das Beugungsgitter eines DO-Elements den Lichtstrahl in seine Farben auf – wie die Brechung (Dispersion), nur in entgegengesetzter Richtung (D).



Canon verbaut im EF 400 mm 1:4 DO IS USM ein brechendes Element aus vorwiegend normalen Glaslinsen, die das Licht gemäß ihrer Dispersionseigenschaften auffächern. Dazu kommt ein beugendes DO-Element an der Front (E). Die Zerstreuung durch Brechung und Beugung heben sich auf.

Sonderfall: Linsen mit Beugungsgitter

Canon geht allerdings bei einigen Teleobjektiven einen anderen Weg, verzichtet weitestgehend auf Fluorit- und UD-Linsen und verwendet stattdessen ein DO-Element. Dabei steht DO für mehrschichtiges, diffraktives, optisches Element oder kurz optisches Diffraktionselement – erstmals eingesetzt im Canon EF 400 mm 1:4 DO IS USM. Mit einer DO-Linse lässt sich die chroma-

tische Aberration vergleichsweise kostengünstig korrigieren und gleichzeitig die Baulänge kompakt und das Gewicht in Grenzen halten.

Die DO-Technik basiert auf Glaslinsen mit konzentrischen, kreisförmigen Beugungsgittern (Abb. Seite 60/61) und macht sich zunutze, dass diese Beugungsgitter das Licht ablenken. Entscheidend dabei ist, dass der Beugungswinkel von der Wellenlänge abhängt und das Gitter den Lichtstrahl ebenso in seine einzelnen Farben auffächert wie die Dispersion – allerdings in entgegengesetzter Richtung: Die langen Wellenlängen (Rot) werden hier stärker gebeugt als die kurzen (Blau). Die Dispersion sorgt dagegen dafür, dass der blaue Lichtanteil stärker gebrochen wird als der rote. Spielen nun ein beugendes Element und eine normal brechende Einheit optimal zusammen, heben sich deren Farbfehler zumindest für bestimmte Wellenlängen auf.

Allerdings ist auch diese Korrektur alles andere als simpel. Vor allem die Nichtlinearität der Dispersion macht die Sache äußerst kompliziert: Im Fall eines DO-Elements liegen nämlich die Bildebenen von Blau (400 nm), Blaugrün (500 nm) und Orange (600 nm) in recht gleichmäßigen Abständen zueinander. Bei Licht, das durch das nichtlineare Dispersionsverhalten zerstreut wurde, sind die Bildebenen der entsprechenden Wellenlängen in der Regel anders zueinander angeordnet. Besonders problematisch wird diese Diskrepanz bei der Konstruktion kompakter Teleoptiken, in denen aufgrund der geringeren Baulänge stärker brechende Linsen zum Einsatz kommen, die dann dichter gedrängt platziert werden. Denn mit der starken Brechkraft ist unweigerlich eine ausgeprägtere Dispersion verbunden, welche die Korrektur weiter erschwert. Um in einem solchen Fall die Farbfehler unter die Toleranzgrenze zu senken, müssen die übrigen Brechlinsen unbedingt so aufeinander abgestimmt werden, dass ihre chromatische Aberration dem Beugungsverhalten bestmöglich entgegenkommt und die Reihen-

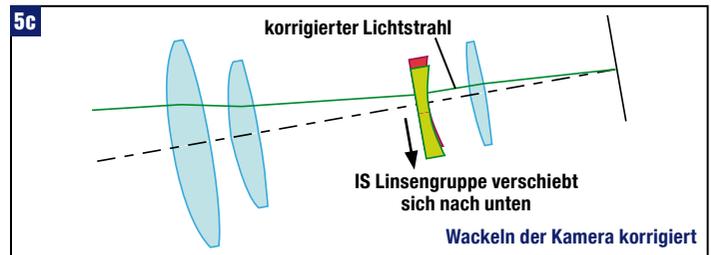
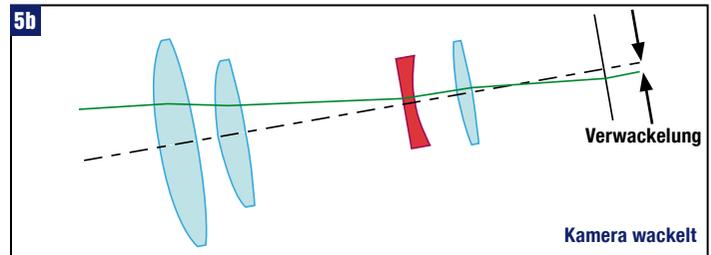
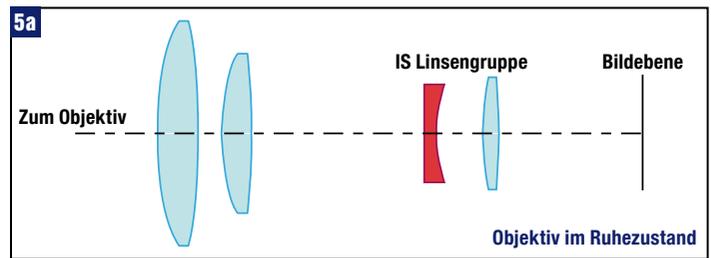
folge der Wellenlängen einhält. Dies gelingt mit vergleichsweise günstigen Normalgläsern leichter als mit teuren Spezialmaterialien wie Fluorit oder UD-Glas, die mit ihrer anormalen Teildispersion die Nichtlinearität der Dispersion verstärken. Das fügt sich gut, denn der Verzicht auf Spezialglas schafft einen wesentlichen Kostenvorteil! In den COLORFOTO-Tests erreichen die DOs allerdings meist nicht die Top-Ergebnisse der L-Objektive.

Optischer Bildstabilisator mit beweglichen Linsen

Neben der Baulänge und den Farbfehlern hat die Tele-Fotografie noch ein drittes ernstes Problem: Verwacklungsunschärfe (Abb. 5b). Eine grobe Regel besagt, dass man bei einer Verschlusszeit, die in etwa dem Kehrwert der Brennweite entspricht, aus der Hand fotografieren kann. Bei 200 mm Brennweite entspräche das etwa einer Verschlusszeit von $1/200$ Sekunde. Sobald aber die Lichtbedingungen schlechter und die nötigen Verschlusszeiten länger werden, ist die Gefahr von Verwacklungsunschärfe groß. Damit auch in solchen Fällen noch Aufnahmen ohne Stativ gelingen, verfügen zahlreiche Tele von Canon, Nikon, Sigma, Tamron und Leica über einen integrierten optischen Bildstabilisator. Seine Wirkung kommt ungefähr der eines Einbeinstativs oder je nach Ausführung einer um zwei bis vier Schritte verlängerten Verschlusszeit gleich. Bei einem 300-mm-Tele sollen so beispielsweise Fotos bis zu einer Belichtungszeit von $1/60$ Sekunde ohne Stativ möglich sein.

Der optische Bildstabilisator beruht auf Linsenelementen, die sich bei Bedarf quer zur optischen Achse verschieben. Dadurch brechen sie die eintreffenden Lichtstrahlen auf eine andere Weise als sonst, und das Objektiv wird dezentriert – im Normalfall ein Makel. Passt man diese Linsenverschiebung aber genau an die ungewollte Bewegung der Kamera an, kompensieren sich die beiden Störfaktoren, wodurch das Abbild letztlich stabil bleibt (Abb. 5c).

Optischer Bildstabilisator



Der optische Bildstabilisator gleicht Vibrationen der Kamera durch Linsen aus, die sich quer zur optischen Achse bewegen. Abbildung (a) zeigt das System im Ruhezustand. Die Lichtstrahlen treffen wie gewollt auf der Bildebene ein. In Abbildung (b) bewegt sich die Kamera nach unten, wie etwa

bei einer unbeabsichtigten Erschütterung. Das Foto ist unscharf, da verwackelt. Abbildung (c) verdeutlicht die Funktionsweise des Bildstabilisators. Hier verschiebt sich eine Linsengruppe genau so, dass sie die Verwacklung ausgleicht und das Bild auf dem Sensor konstant hält.

Damit Kamera- und Linsenbewegung exakt aufeinander abgestimmt werden können, stellen zwei gyroskopische Sensoren den Winkel und die Geschwindigkeit der Verwacklung fest – einer ist dabei für die Längs- und einer für die Querachse zuständig. Daraus berechnet ein Mikrocomputer, wie sich die Linsen verschieben müssen, um das Bild auf dem Sensor konstant zu halten. Er gibt diese Info an den Steuerkreis für das optische Stabilisierungssystem weiter, und eine Spule treibt die beweglichen Linsen entsprechend an. Damit der Fotograf den Bildstabilisator deaktivieren kann, gibt's zusätzlich einen Sperrmechanismus, der die bewegliche Linsengruppe zentriert fixiert.

FAZIT

»Annette Kniffler



Die Abbildungsleistung von Teleobjektiven hat sich in den letzten Jahrzehnten erheblich verbessert – nicht zuletzt wegen der wachsenden Vielfalt an optischen Glassorten und der immer leistungsfähigeren Optikkrechner. Die Maschinen ermitteln so lange den Strahlenverlauf durch unterschiedlichste Linsenkombinationen, bis sie den besten Kompromiss zwischen Restfehler, Baugröße, Material- und Produktionskosten gefunden haben. Welcher das ist, hängt wie üblich maßgeblich vom Budget ab. Doch eines ist klar: Bei einem Teleobjektiv mit extremer Brennweite wird eine gute Abbildungsleistung erheblich kostspieliger als bei Standardbrennweiten.