



Die Konstruktion von Weitwinkelobjektiven

# Weitsicht

**Das perfekte Weitwinkel ist frei von Abbildungsfehlern, kompakt, leicht und preiswert. Hier ein Exkurs in die hohe Kunst der Optikentwicklung, die noch immer an diverse Grenzen stößt.**

Jedes Fotoobjektiv ist ein Kompromiss, der die Wirklichkeit allenfalls annähernd darstellen kann – ganz besonders Weitwinkeloptiken, bei denen Abbildungsfehler wie die Verzeichnung und Randabschattung aufgrund des großen Bildwinkels extreme Ausmaße annehmen können. Wie stark oder schwach die verbleibenden Fehler ausfallen und ob sie den Bildeindruck stören, hängt maßgeblich von der optischen Konstruktion ab, oft von winzigsten Details.

**Die Basiskonstruktion**

Jedes Objektiv basiert auf einer Grundkonstruktion, die der Entwickler an seine Vorgaben individuell anpasst. Bei Weitwinkeloptiken kommen primär zwei Basisvarianten zum Einsatz: eine für Systeme ohne Klappspiegel, etwa Messsucherkameras, und eine für SLR-Kameras. Im erstgenannten Fall erfreut sich der symmetrische Aufbau besonderer Beliebtheit, also eine Linsenkonstellation mit symmetrisch angeordneten Elementen. Ihr Vor-

teil: Sie erlaubt eine besonders einfache und wirkungsvolle Korrektur von Abbildungsfehlern wie der Verzeichnung (Korrektion). Grob gesagt heben hier die Fehler, welche die eine Linsengruppe verursacht, die entgegengerichteten Fehler (Aberrationen) der anderen auf. Das Zeiss Biogon T\* 4,5/38 beispielsweise basiert auf einem symmetrischen Konzept, weist aber trotzdem nur einen ansatzweise gespiegelten Linsenquerschnitt auf (Abb. 1). Ein vollständig symmetrisches System ist tatsächlich nur bei 1:1-Abbildungen realisierbar. Da dies jedoch auf Weitwinkelobjektive nicht zutrifft, werden diese letztlich immer eine leichte Asymmetrie aufweisen. Dennoch spricht man auch bei ihnen von „symme-

trisch“, da letztlich die Blende von vorne betrachtet fast genauso groß wirkt wie von hinten. Die Brechkraft der Linsen vor der Blende stimmt also etwa mit der Brechkraft der dahinter platzierten Glieder überein. Bei Weitwinkelobjektiven für SLR-Kameras funktioniert solch ein symmetrischer Aufbau allerdings nicht.

**Retrofokus-Aufbau**

Der Klappspiegel einer SLR-Kamera braucht zwischen Objektiv und Sensor je nach Kameramodell etwa 44 bis 47 mm, um sich ungestört bewegen zu können. Ein Blick auf die schematische Darstellung eines fast symmetrischen Systems (Abb. 1) zeigt, dass sich diese Vorgabe bei Brennweiten unter 45 mm zum ernstlichen Problem mausert – zumindest

solange der optische Mittelpunkt (H') im Zentrum des Objektivs liegt: In diesem Fall müsste die hinterste Linse des Weitwinkelobjektivs mitten im Spiegelkasten sitzen, damit auf dem Sensor ein scharfes Bild entsteht. Es bleibt also keine andere Wahl, als auf einen komplett asymmetrischen Linsenaufbau umzusteigen, der H' bzw. den Brennpunkt vom Objektiv in Richtung Bildebene wegverlagert, ohne dabei die Brennweite zu verändern (Abb. 2). Die entsprechende Konstruktion wird Retrofokus genannt. Sie basiert auf der Kombination eines Elements mit negativer, streuender Brechkraft und eines positiven Elements, das den aufgefächerten Lichtstrahl wieder sammelt und zu einem Bild formt.

Retrofokus-Objektive erkennen Sie daran, dass die Blendenöffnung von vorne betrachtet deutlich kleiner wirkt als von hinten. Wegen der Asymmetrie gestaltet sich die Korrektur deutlich aufwendiger. Unter Umständen bedarf es besonders vieler Einzelinsen, teurer optischer Glassorten oder schwer herstellbarer Linsenoberflächen, um zu erreichen, was bei Normalbrennweiten die simpel gespiegelte Linsengruppe schafft. Die Retrofokus-Objektive werden folglich größer, schwerer, empfindlicher und vor allem teurer.

**Abbildungsfehler minimieren**

Ist eine Basiskonstruktion gewählt, geht es an die Korrektur – eine unüberschaubar komplexe Aufgabe, da jedes optische Element für sich eine Vielzahl von Fehlern verursacht und diese unzähligen Einzelaberrationen innerhalb eines Objektivs so aufeinander abgestimmt werden müssen, dass sie sich gegenseitig möglichst wirksam kompensieren. Das Licht muss dazu durch mehrere Linsen laufen, die sich etwa in Form, Krümmung, Dicke und Glastype, genauer gesagt in dessen optischen Eigenschaften, voneinander unterscheiden. Da jedoch die Korrektur eines jeden Bildfehlers neue, andersgeartete Aberrationen hervorruft, ist es unmöglich, eine vollständig fehlerfreie Lösung zu finden.

Bei Weitwinkelobjektiven treten neben der Verzeichnung und Randabschattung auch sphärische und chromatische Abweichungen sowie andere Aberrationen auf, die beim fertigen Objektiv alle unter einer Tole-

ranzgrenze liegen müssen (siehe Kasten „Abbildungsfehler“).

**Der Weg zum Kompromiss**

Obwohl der Basisaufbau die Möglichkeiten bereits deutlich eingrenzt, bleiben noch unüber-

schaubar viele Konstruktionsvarianten übrig. Welche von ihnen liefert nun das gewünschte Weitwinkelobjektiv? Um das zu klären, muss der Hersteller zuerst die Randbedingungen festlegen: Lichtstärke, Bildwinkel, maximal

**Die Retrofokus-Konstruktion**

Weitwinkelobjektive für SLR-Kameras sind für gewöhnlich nach dem Retrofokus-Schema aufgebaut: Zunächst durchquert der eintreffende Lichtstrahl eine streuende Linse, die ihn auffächert. Danach passiert er eine sammelnde Linse, die ihn wiederum zum Bild zusammenführt. Dadurch verschiebt sich der Brennpunkt und damit die Bildebene vom Linsensystem weg und schafft Platz für den Klappspiegel.

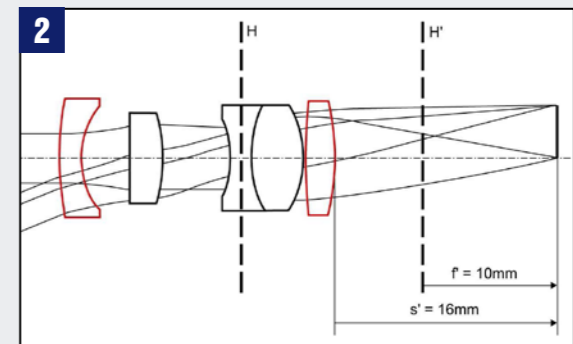
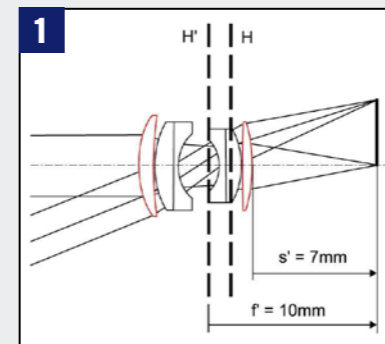
Um die Zusammenhänge der Retrofokus-Konstruktion zu verstehen, hier ein kurzer Abstecher in die Lehre der Optik:

H' steht für den zweiten Hauptpunkt auf der optischen Achse, vereinfacht ausgedrückt für den bildseitigen optischen Mittelpunkt des Linsensystems. Er definiert sich als der Punkt, der bei parallel eintreffenden Lichtstrahlen genau eine

dem Sensor. Wenn nun bei Weitwinkelobjektiven die Brennweite kürzer als der Spiegelkasten tief ist, muss H' im Spiegelkasten außerhalb des Objektivs liegen.

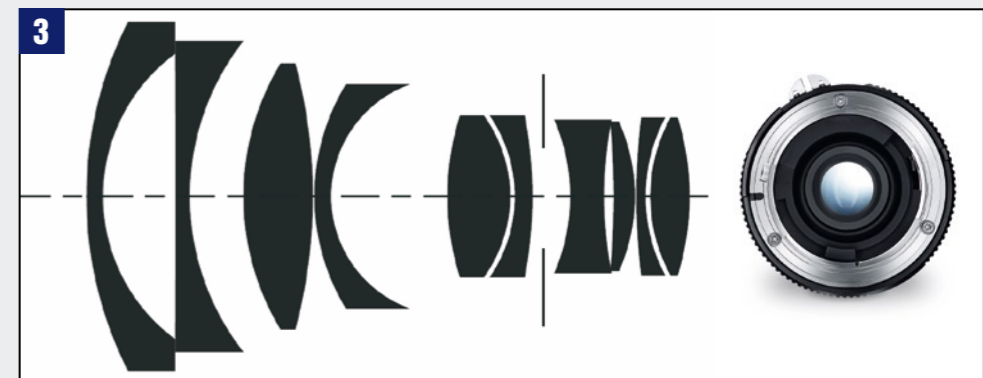
Bei einem eingliedrigen System befindet sich H' innerhalb der Linse, bei symmetrischen Objektiven innerhalb der Linsengruppe. Dass im Fall eines Weitwinkels unter diesen Voraussetzungen der Raum für den Klappspiegel zu knapp wird, verwundert angesichts der kurzen Brennweiten nicht (Abb. 1). Die streuende Linse vor dem sammelnden Glied des Retrofokus-Konstrukts verschiebt deshalb H' wie gewünscht in Richtung Sensor, und zwar bis außerhalb des Objektivs, ohne dabei die Brennweite zu verändern (Abb. 2).

In der Realität steht oft jede der beiden Linsen für eine ganze Gruppe unterschiedlichster Elemente,

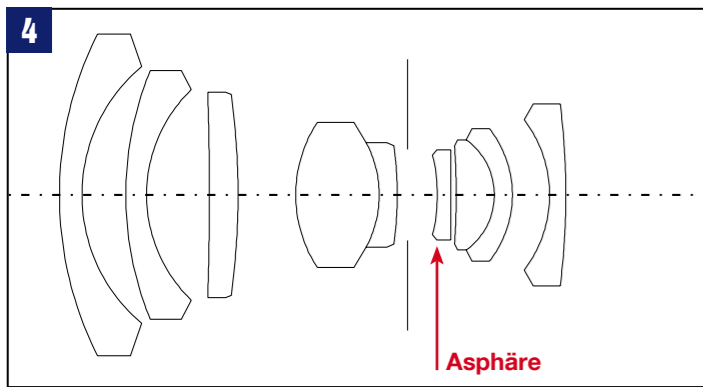


Brennweite (f) vom Brennpunkt entfernt liegt. Für jede Abbildung gilt:  $1/f = 1/g + 1/b$  mit  $f$  = Brennweite,  $g$  = Gegenstandsweite und  $b$  = Bildweite. Die Gegenstandsweite entspricht vereinfacht dem Abstand Objektiv zu Motiv, genau genommen jedoch dem Abstand der vorderen Hauptebene H zum Motiv. Bei der Bildweite gilt analog:  $b$  = Abstand hintere Hauptebene H' zur Bildebene, also

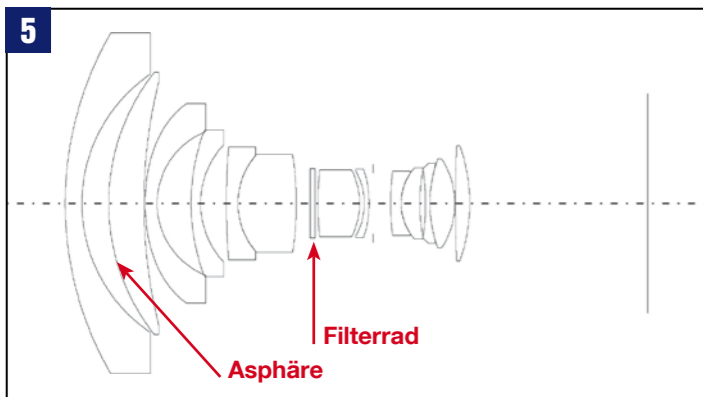
die insgesamt eben entweder streuenden (negativ) oder sammelnden Charakter (positiv) hat. Dabei muss die Wirkung der positiven Gruppe grundsätzlich die der negativen überwiegen, damit letztlich ein korrektes Bild auf dem Sensor ankommt. Beim Querschnitt des Zeiss Distagon T\* 2,8/25 mm ZF sehen Sie links von der Blende die streuende, rechts davon die sammelnde Gruppe (Abb. 3).







4 Leica verbaut im Elmarit-M 1:2,8/21 mm AS eine Asphäre in unmittelbarer Nähe zur Blende, wo sie insbesondere Fehler wie die sphärische Aberration reduzieren kann.



5 Hinter der großen Frontlinse des Retrofokus-Objektivs Leica Super-Elmarit-R 1:2,8/15 mm sitzt eine Asphäre, deren Oberfläche nur minimal und in diesem Maßstab nicht sichtbar von der Kugelform abweicht. Zusammen haben sie die Aufgabe, die Verzeichnung bestmöglich zu korrigieren. Nicht weit vor der Blende befindet sich zudem das Filterrad.

## Abbildungsfehler

### Verzeichnung

Die Verzeichnung äußert sich in gekrümmten Formen an den Bildrändern und entsteht dadurch, dass sich die Vergrößerung bzw. die Brechung mit zunehmendem Abstand des Bildpunktes von der optischen Achse ändert.

### Vignettierung/Randabschattung

Man unterscheidet zwischen der künstlichen Vignettierung und dem natürlichen Randlichtabfall (Cosinus-hoch-vier-Gesetz). Beides führt dazu, dass die Bildecken schwächer ausgeleuchtet und dunkler erscheinen. Die künstliche Vignettierung geht darauf zurück, dass die Lichtstrahlen, die vom äußersten Bildbereich auf die Linse fallen, an den Fassungs-rändern und der Blende beschnitten werden. Bei der natürlichen Vignettierung sind

die schrägen Randstrahlen das Problem: Mit dem multiplizierten Quadrat des Cosinus von Einfallswinkel und Ausfallswinkel dunkeln die Ecken ab.

### Chromatische Aberration

Die chromatische Aberration führt zu Farbfehlern, insbesondere Farbsäumen, und beruht auf der Abhängigkeit des Brechungsverhaltens einer Linse von der Wellenlänge. Deshalb trifft beispielsweise blaues Licht an einem anderen Punkt auf die optische Achse als rotes (Dispersion) ein.

### Sphärische Aberration

Die sphärische Abweichung lässt das Abbild weich und etwas verschwommen erscheinen. Grund: Parallele Lichtstrahlen, die unterschiedlich weit von der optischen Achse entfernt einfallen, gelangen wegen der kugelförmigen Linsenform nicht im gleichen Punkt zur optischen Achse.

tolerierte Verzeichnung und Randabschattung, angestrebte Baulänge und exakte Schnittweite zwischen hinterstem Linsenscheitel und Bildsensor ( $s'$  in Abb. 1 und 2). Objektive wie das Leica Super-Elmarit-R 1:2,8/15 mm verfügen zudem über ein integriertes Filterrad (Abb. 5); solche Besonderheiten müssen ebenfalls gleich zu Anfang feststehen. Jetzt kommen die Optiker ins Spiel: Die hochleistungsfähigen Computer berechnen aufgrund der Vorgaben den genauen Strahlengang durch unzählige Linsensysteme und bestimmen so deren Abbildungsleistung. Sie variieren die verfügbaren Parameter, bis die Bildfehler unter der Toleranzgrenze liegen. Das hört sich nach Try-and-error-Verfahren an, ist es aber nur zum Teil. Denn die Objektivdesigner müssen dabei stets die Richtung vorgeben. Welche der über hundert verfügbaren Glassorten kommen in Frage, passen ins Budget? Wie viele Elemente darf das System enthalten, damit es nicht zu unhandlich und schwer wird? Leistet man sich eine teure Asphäre, um die Zahl der Linsen oder die sphärische Aberration effektiv zu reduzieren? Wenn schließlich die alles überlagernden Abweichungen minimiert sind, tauchen Fehler höherer Ordnung auf. Sie müssen ebenfalls angegangen werden, bevor der Optiker die Restfehler so aufeinander abstimmt, dass das Foto passt.

### Problem Vignettierung

Bei der Korrektur der Vignettierung, also abgedunkelter Bildecken, stößt man schnell an baulich bedingte Grenzen. Deshalb kommt hier kamerainternen Korrekturalgorithmen, der Software-Nachbearbeitung und Filtern, welche die Helligkeit in der Bildmitte herabsetzen, eine besonders bedeutsame Rolle zu.

Die Randabschattung ergibt sich aus zwei Teilen: dem Cosinus des Einfallswinkels zum Quadrat und dem des Ausfallswinkels zum Quadrat. Es ist also von entscheidender Bedeutung, in welchem Winkel der Lichtstrahl vorne ein- bzw. hinten austritt. Zumindest Letzteres lässt sich beeinflussen: Legt man nämlich die Austrittspupille (Bild der Blende, das die Linsen hinter der Blende erzeugen) Richtung Unendlich (telezentrisch), verlässt das Licht das Objektiv in beinahe parallelen Strahlen. Dadurch verschwindet ihr Anteil an der Gesamt vignettierung fast vollständig ( $\cos 90^\circ = 0$ ). Dieser Trick ist allerdings baulich begrenzt und klappt nur bei einem im Vergleich zum Sensor großen Bajonett. Ein typisches Beispiel für eine entsprechende Lösung liefert Olympus: Bei seinen Four-Thirds-Systemen ist der Sensor nur halb so groß wie das Bajonett, so dass sich die Austrittspupille mit den geeigneten Linsen relativ weit vom Sensor weg legen und die natürliche Randabschattung auf der Sensorseite minimieren lässt. Keinen Einfluss hat dies natürlich auf die Vignettierung der Einfallsseite.

### Die große Frontlinse korrigiert die Verzeichnung

Zu den markantesten Merkmalen gehört die große Frontlinse, die den riesigen Bildwinkel in kleine überführt. Sie zählt zu den Schlüsselinstrumenten, wenn es um die Korrektur der Verzeichnung (krumme Linien am Bildrand) geht – nach dem Motto: die Fehler korrigieren, wo sie entstehen. In der Regel teilt sie sich diese Aufgabe mit ihren unmittelbaren Nachbarn: Besonders gebräuchlich sind in diesem Zusammenhang Kombinationen von Plus- und Minusgliedern (Abb. 7). Bei Retrofokuskonstruktionen liegt dann zwar eine positive Sammellinse innerhalb der streuenden

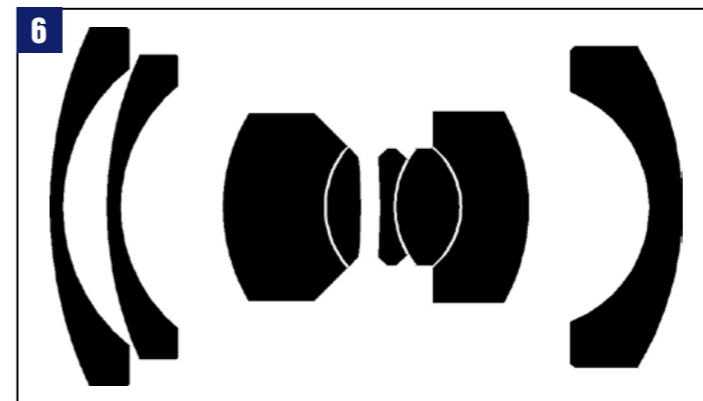
Gruppe, da es jedoch letztlich auf deren Gesamtwirkung ankommt, stört sie dort nicht. Zuweilen ersetzen die Hersteller das Plus-/Minus-Konstrukt an der Front durch eine Negativlinse (streuend) mit aufgesetzter Asphäre, also einer Oberfläche, die von der Kugelform in der Regel so abweicht, dass sie die Brechung zum Rand hin reduziert (Abb. 5).

### Problem Vignettierung

Bei der Korrektur der Vignettierung, also abgedunkelter Bildecken, stößt man schnell an baulich bedingte Grenzen. Deshalb kommt hier kamerainternen Korrekturalgorithmen, der Software-Nachbearbeitung und Filtern, welche die Helligkeit in der Bildmitte herabsetzen, eine besonders bedeutsame Rolle zu.

Die Randabschattung ergibt sich aus zwei Teilen: dem Cosinus des Einfallswinkels zum Quadrat und dem des Ausfallswinkels zum Quadrat. Es ist also von entscheidender Bedeutung, in welchem Winkel der Lichtstrahl vorne ein- bzw. hinten austritt. Zumindest Letzteres lässt sich beeinflussen: Legt man nämlich die Austrittspupille (Bild der Blende, das die Linsen hinter der Blende erzeugen) Richtung Unendlich (telezentrisch), verlässt das Licht das Objektiv in beinahe parallelen Strahlen. Dadurch verschwindet ihr Anteil an der Gesamt vignettierung fast vollständig ( $\cos 90^\circ = 0$ ). Dieser Trick ist allerdings baulich begrenzt und klappt nur bei einem im Vergleich zum Sensor großen Bajonett. Ein typisches Beispiel für eine entsprechende Lösung liefert Olympus: Bei seinen Four-Thirds-Systemen ist der Sensor nur halb so groß wie das Bajonett, so dass sich die Austrittspupille mit den geeigneten Linsen relativ weit vom Sensor weg legen und die natürliche Randabschattung auf der Sensorseite minimieren lässt. Keinen Einfluss hat dies natürlich auf die Vignettierung der Einfallsseite.

Abschattungen an Linsenrändern und Blenden lassen sich gut durch Abblenden in den Griff bekommen. Daher sind viele preisgünstige Weitwinkelobjektive relativ lichtschwach. Bei hochwer-



6 Das Zeiss Biogon T\* 4,5/38 mm ist für Mittelformatkameras ohne Schwingspiegel gedacht. Deshalb konnten die Konstrukteure hier als Basis den symmetrischen Aufbau heranziehen.

tigen Optiken müssen dagegen oft Linsen mit großem Durchmesser im vorderen und hinteren Bereich des Objektivs die Korrektur der Vignettierung übernehmen. Andererseits machen sie das Objektiv groß und unhandlich. Die Entwickler müssen sich auch hier wieder für einen Mittelweg zwischen Baugröße und Fehler-toleranz entscheiden.

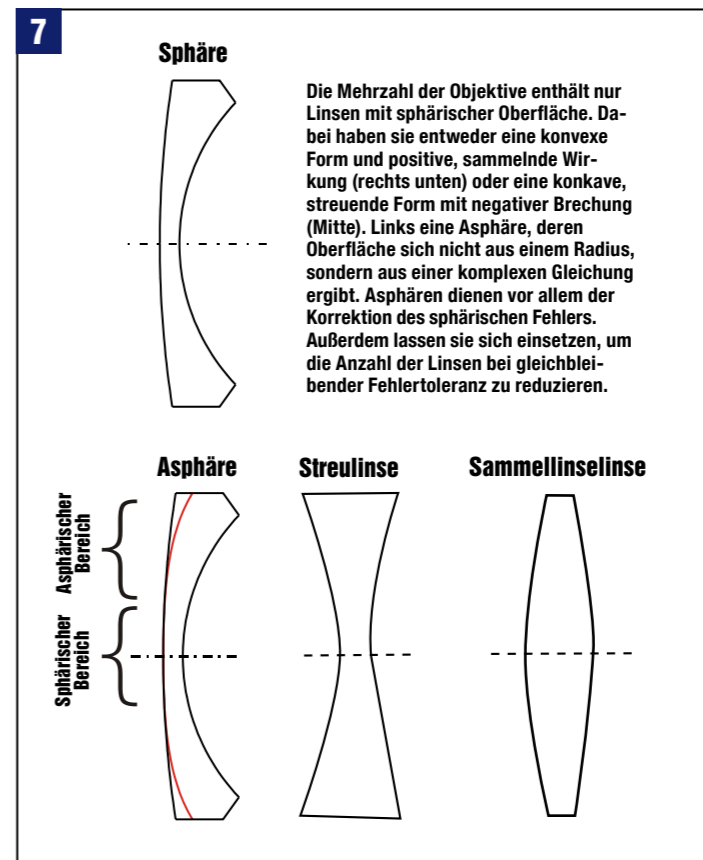
### Asphärische Linsen

Die meisten Objektive enthalten ausschließlich sphärische Linsen, deren kugelförmige Oberfläche mit einem Radius ausreichend beschrieben ist. Sowohl die sammelnden als auch die streuenden Varianten erzeugen allerdings aufgrund ihrer Form den sogenannten sphärischen Fehler, der die Bilder weich und verwaschen aussehen lässt (siehe Kasten „Abbildungsfehler“). Wer nur eine sehr geringe sphärische Aberration zulassen und zugleich die Anzahl der Linsen im Objektiv begrenzen will, setzt häufig eine Asphäre in der Nähe der Blende ein – etwa mit parabelförmigem Querschnitt. Aber auch hier sind dem Konstrukteur die Hände gebunden. Je ausgeprägter die Asphärenform, desto empfindlicher wird die Linse jedoch gegenüber Fertigungsungenauigkeiten, die die Produktionskosten ohnehin schon in die Höhe treiben. Meist kommen daher nur Asphären zum Einsatz, deren Oberfläche minimal und für das bloße Auge kaum wahrnehmbar von der sphärischen abweicht. Selbstverständlich gibt es noch

andere Möglichkeiten, um u. a. die chromatischen Aberrationen auszugleichen. Details dazu finden Sie im nächsten Heft.

### Mehr Linsen – bessere Bildqualität?

Landläufig gilt eine hohe Anzahl an Linsen und Asphären im Objektiv als Gütesiegel. Aber schließlich gehört auch ein Fahrrad, das 21 Gänge und eine Scheibenbrem-



se besitzt, nicht automatisch zur Elite. Wie beim Rad kommt es auch beim Objektiv wesentlich darauf an, ob die vielen und hochwertigen Elemente tatsächlich optimal miteinander zusammenspielen. Zudem bewirken teure Glassorten mit außergewöhnlichen optischen Eigenschaften, die exakt ins Konzept passen, oft mehr als zusätzliche Glieder. Trotzdem steckt etwas Wahres in der Forderung nach vielen Linsen und Asphären: je mehr Elemente, desto mehr Parameter bzw. Eigenschaften (Freiheitsgrade) hat der Optiker zur Verfügung, um sie auf der Suche nach der idealen Lösung zu variieren. Theoretisch lässt sich jeder Freiheitsgrad dazu nutzen, einen bestimmten Bildfehler zu kontrollieren. Das heißt etwa, dass die Korrektur von sieben Aberrationen mindestens acht unabhängige Systemparameter erfordert. Die Anzahl der Freiheitsgrade wächst mit den verwendeten Gliedern rasant. Nehmen wir beispielsweise ein Triplet, ein dreilinsiges System mit insgesamt sechs Linsenflä-

chen, also sechs Radien, zwei Abständen, drei Dicken und drei Glasarten mit jeweils einem Brechungsindex und einer Dispersionsnummer. Daraus ergeben sich 17 Parameter. Bei sechslinsigen Systemen mit zwei Kitt-Gliedern (verkittetes Linsenpaar) und zwei Einzelelementen stehen bereits deutlich über 30 Parameter zur Verfügung. Sie sind jedoch erkauft durch ein höheres Gewicht und größere Abmessungen. Deshalb gilt der Einsatz einer Asphäre als besonders elegant, da sie ohne zusätzliches Glied einen weiteren Freiheitsgrad schafft: die komplexe Gleichung, welche die Asphärenform beschreibt.

### Letzte Hürde: Streulicht

Angenommen, wir haben nun eine Linsenkonstruktion gefunden, bei der alle Abbildungsfehler unter unserer Toleranzgrenze bleiben. Dann stehen wir gleich vor dem nächsten Problem: der Reflexion an den Linsenoberflächen und Objektivfassungen. Wenn das dadurch verursachte Streulicht nämlich bis zum Sensor durchdringt, macht es das Foto flau und kontrastarm. Das Ziel lautet also, die reflektierten Strahlen so schwach wie möglich zu halten und so zu lenken, dass sie möglichst nach vorne Richtung Motiv und nicht auf den Sensor fallen. Zum einen müssen die Innenflächen des Objektivs dazu entsprechend geformt sein. Zum anderen bringen die Hersteller mattschwarze Lacke oder ähnliche Materialien auf, die einen großen Teil des einfallenden Lichtes absorbieren und wenig reflektieren. Jeder Hersteller hat dafür seine individuelle Rezeptur.

Die Reflexionen, die am Übergang von der Luft zum Glas entstehen, lassen sich mit mehrfach beschichteten Linsen beachtlich reduzieren: von 4 bis 7 Prozent auf nur noch 0,5 Prozent. Je nach Glasart und deren Brechungsindex braucht es dazu zwischen drei und elf Einzelschichten. Doch auch hier bleibt wieder ein kleiner Rest an störendem Streulicht übrig, egal, welchen Aufwand der Objektiventwickler betreibt, und egal, welches Budget er zur Verfügung hat.

Annette Kniffler