

Lichtverlust in Objektiven

Das Objektiv als Hindernis

Wer ein lichtstarkes Objektiv sucht, orientiert sich in aller Regel an der Blendenzahl. Doch die gilt weder für den Nahbereich, noch liefert sie ein einheitliches Maß dafür, wie viel Licht nach Durchlaufen der Optik übrig bleibt und tatsächlich am Kamerasensor ankommt.

Eine kleine Blendenzahl steht allgemein für Lichtstärke. Umgekehrt bedeutet eine große Blendenzahl, dass das Objektiv das eintreffende Licht deutlich beschneidet und die Bildhelligkeit schwächt. An sich also eine recht übersichtliche Angelegenheit, wären da nicht so manche Einschränkungen: Beispielsweise degradiert Blende 2,8 bei Nahauf-

nahmen womöglich zu Blende 5,6. Außerdem berücksichtigt die Blendenzahl nicht, dass noch andere Faktoren zum Lichtverlust im Objektiv beitragen, etwa die Reflexion und Absorption. Was bitte sagt sie dann tatsächlich aus? Und wo bleibt schließlich der Lichtanteil, der zwar vorne am Objektiv eintrifft, den Sensor aber nicht erreicht? Um diese Fragen

zu klären, werfen wir einen Blick in die (Un)tiefen der Physik.

Die Blendenzahl als Maß für die Lichtstärke

Sobald Licht ein Fotoobjektiv durchlaufen muss, stehen unweigerlich Fassungsränder, diverse reflektierende Oberflächen und absorbierende Barrieren im Weg. All das wirkt sich letztlich auf die

Bildhelligkeit aus. Vor allem beschneidet aber die Blende das einfallende Licht: Umso kleiner ihr Durchmesser, desto weniger Strahlen passen durch die Öffnung, desto dunkler das Bild (Abb. 1). Als Maß dafür dient die Blendenzahl k_v , wobei kleine Werte einer großen wirksamen Öffnung d_{ep} entsprechen. Außerdem nimmt k_v mit der Brennweite f' zu. Im Fall eines unendlich weit entfernten Objekts ergibt sich k_v aus:

$$k_v = \frac{f'}{d_{ep}} = \frac{1}{\text{Lichtstärke des Objektivs}}$$

(Gleichung 1)

Bei 35 mm Brennweite und 12,5 mm wirksamer Blendenöffnung

beträgt k_{∞} also 2,8. Die Blendenzahlen sind dabei so genormt, dass sich beim Abblenden um eine Stufe, etwa von 1,4 auf 2, die durchtretende Lichtmenge halbiert, umgekehrt verdoppelt.

Der Einfachheit halber gehen wir vorerst davon aus, dass ausschließlich die Blende als begrenzender Faktor im Objektiv wirkt. Unter dieser Voraussetzung verliert die Beleuchtungsstärke in der Sensorebene E_{∞} gegenüber der ursprünglichen Leuchtdichte L des eintreffenden Lichts mit $1/k_{\infty}^2$, bei Blende 1,4 beispielsweise um den Faktor 0,5:

$$E_{\infty} = L \times \left(\frac{1}{k_{\infty}^2}\right) \times \left(\frac{\pi}{4}\right)$$

(Gleichung 2)

π steht dabei für die Konstante, die das Verhältnis vom Umfang eines beliebigen Kreises zu dessen Durchmesser beschreibt ($\pi = 3,14159$).

Lichtverlust bei Nahaufnahmen

Die Blendenzahl gilt nur für unendlich weit entfernte Motive. Bei Nahaufnahmen nimmt die Lichtstärke ab. Die kleinstmögliche Blendenzahl k_{∞} befindet sich prominent eingraviert auf nahezu jedem Objektiv – jeweils für Weitwinkel und Tele. Allerdings setzen die Hersteller dabei grundsätzlich voraus, dass das abgelichtete Motiv unendlich weit entfernt liegt, sprich die Lichtstrahlen parallel zur optischen Achse einfallen, also Gleichung 1 ihre Gültigkeit hat. Bei Nahaufnahmen ist das allerdings nicht einmal annähernd der Fall. Inwieweit sich dadurch die reale von der angegebenen Blendenzahl unterscheidet, hängt maßgeblich vom Abbildungsmaßstab β' ab (Abb. 2):

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} \times (1 + |\beta'|)$$

(Gleichung 3)

Die effektive Blendenzahl ist demzufolge im Nahbereich größer als die vom Hersteller ausgezeichnete für „unendlich“, die Lichtstärke schwächer. Nehmen wir zum Beispiel ein Objektiv mit der Blendenzahl $k_{\infty} = 2,8$ an einer Kamera mit einem rund 36×24 mm großen Vollformatsensor (43 mm Bilddiagonale). Dann wird der Abbildungsmaßstab beim Fotografieren eines entsprechend etwa 24 mm hohen Objekts annähernd zu $\beta' = -1$, und die effektive Blendenzahl k_{eff} zu 5,6. Aus der Abhängigkeit der Blende vom Abbildungsmaß-

stab (Gleichung 4) folgt ein entsprechender Verlust der Beleuchtungsstärke von E_{∞} auf E_{nah} :

$$E_{\text{nah}} = \frac{E_{\infty}}{(1 + |\beta'|)^2}$$

(Gleichung 4)

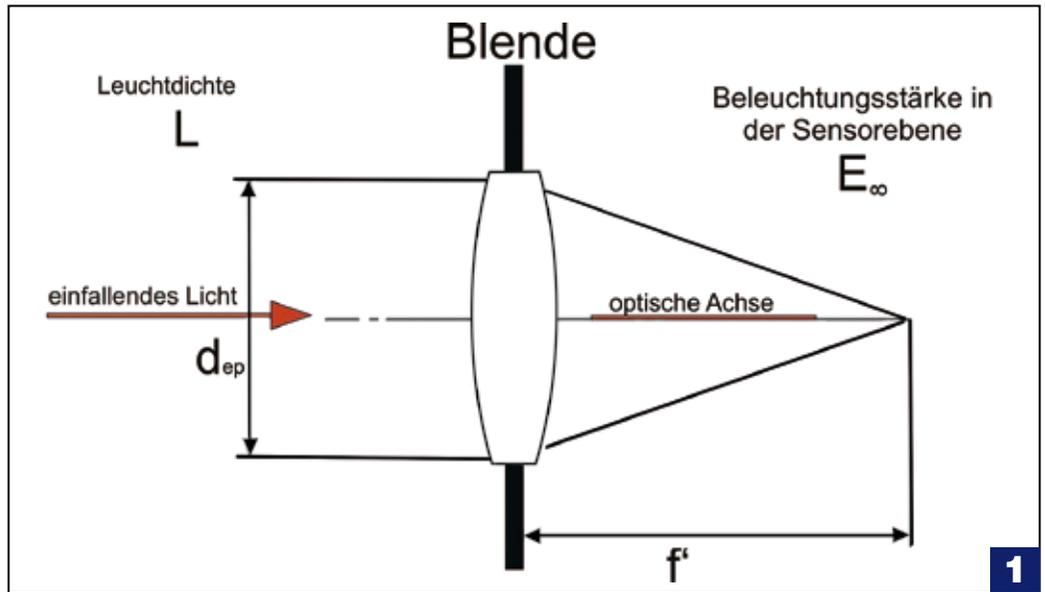
Im oben genannten Beispiel würde die Beleuchtungsstärke also auf ein Viertel absacken, was nach

Norm zwei Blendenstufen entspricht. In der Regel macht sich dieser Beleuchtungsstärkeverlust ab einem Abbildungsmaßstab von circa 1:5 bemerkbar.

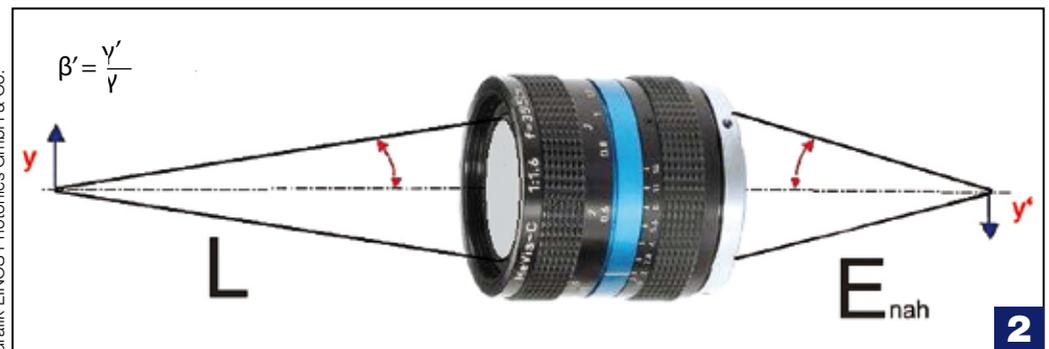
Lichtverlust an den Bildrändern

Die Blendenzahl bezieht sich nur auf die Bildmitte. An den Rändern nimmt

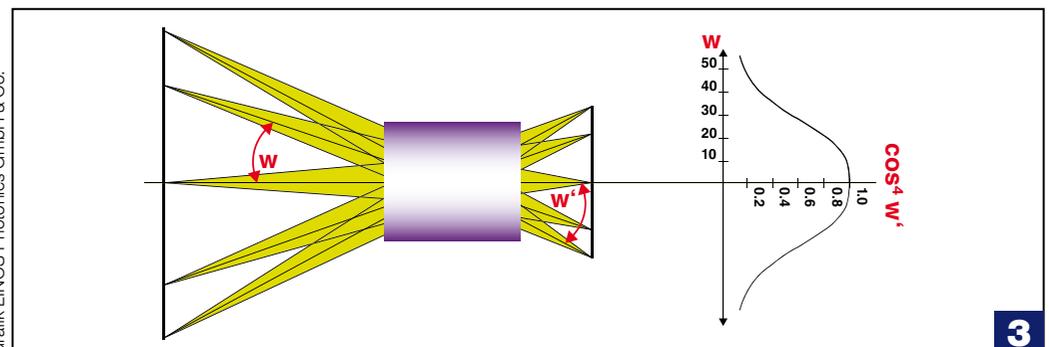
die Bildhelligkeit ab. Die von den Herstellern angegebene Blendenzahl k_{∞} setzt also ein unendlich weit entferntes Motiv voraus. Damit aber noch nicht genug. Sie ist auch auf die Bildmitte normiert. Das heißt, dass das Foto nur auf einer relativ kleinen Fläche um die optische Achse die



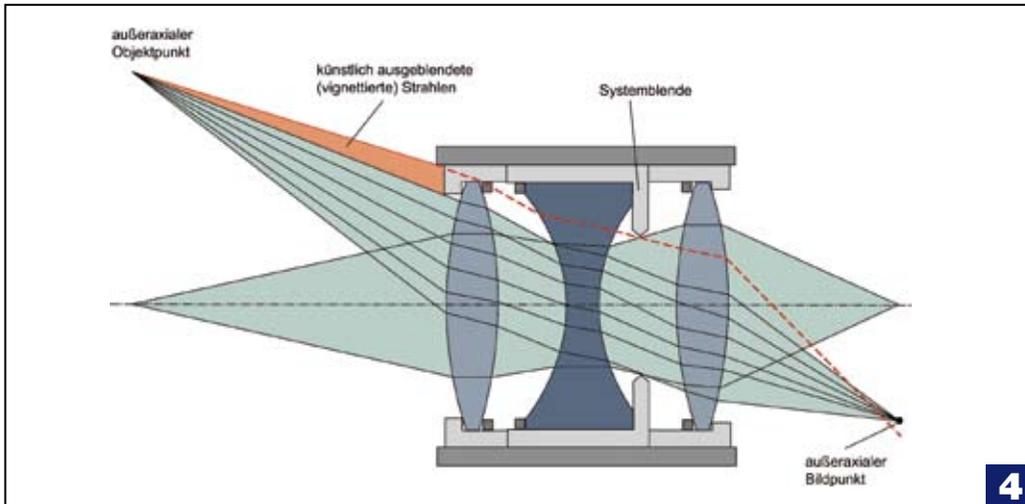
Nur ein Teil des Lichts (Leuchtdichte L), das vom fotografierten Objekt ausgeht und ins Objektiv einfällt, erreicht auch tatsächlich den Kamerasensor. E_{∞} steht für die Beleuchtungsstärke in der Sensorebene und nimmt mit $1/k_{\infty}^2$ ab. Hier ein als einfache Linse dargestelltes Fotoobjektiv.



Die Lichtstärke des Objektivs beziehungsweise die Beleuchtungsstärke in der Sensorebene lässt bei Nahaufnahmen nach wie stark, das hängt vom Abbildungsmaßstab β' ab.

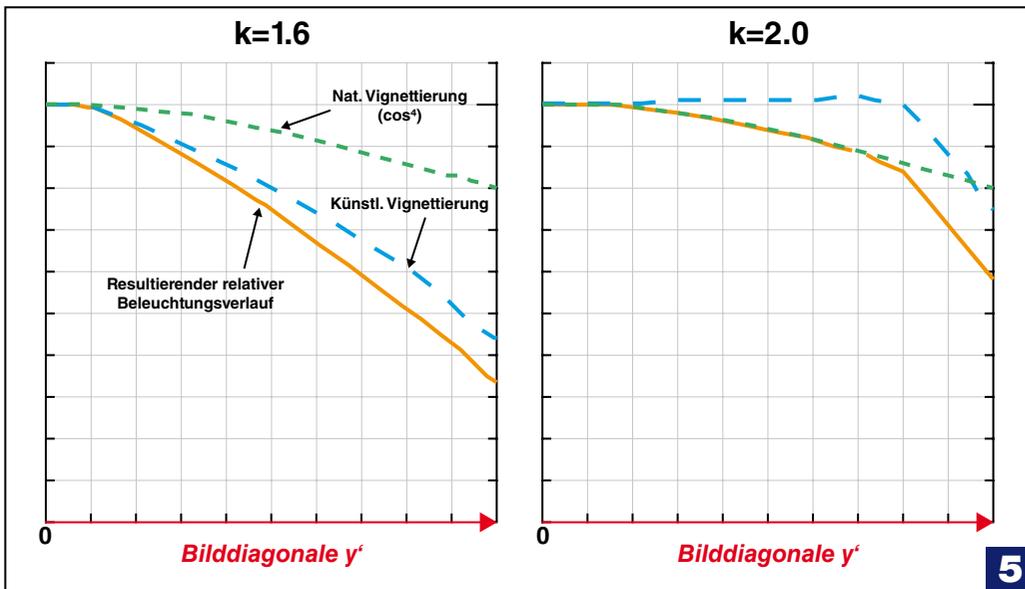


Natürliche Randabschattung: Die Helligkeit nimmt zum Bildrand hin mit $E = E_0 \times \cos^4 w$ ab. Dabei steht w für den Winkel, in dem das Licht zur optischen Achse einfällt.



4

Künstliche Vignettierung: Linsenfassungen beschneiden die einfallenden Lichtstrahlen und verstärken dadurch den Effekt der natürlichen Randabschattung.



5

Während sich die künstliche Vignettierung gut durch Abblenden von 1,6 auf 2,0 eliminieren lässt, bleibt die natürliche Randabschattung davon weitestgehend unberührt.

Helligkeit erreicht, die man bei der verwendeten Blendenzahl erwarten dürfte. Die Beleuchtungsstärke auf der Sensorebene nimmt grundsätzlich aufgrund natürlicher und künstlicher Abschattung zum Bildrand hin ab.

Natürliche Randabschattung

Der natürliche Helligkeitsabfall im Randbereich geht auf mehrere Gesetzmäßigkeiten zurück: Zum einen treffen weitere entfernte Lichtstrahlen vom Motivrand in einem engeren Winkel auf das Objektiv und sind entsprechend schwächer. Zum anderen bildet die Blende für schräg auftreffende

Lichtstrahlen eine Ellipse, deren effektive Fläche kleiner als die Kreisfläche für senkrecht auftreffende Strahlen ist. Beide Effekte reduzieren zudem gleich zweimal die Helligkeit in den Bildecken, da sie sowohl für das vom Motiv ins Objektiv fallende Licht gelten, als auch beim zweiten Teil des Strahlengangs vom Objektiv auf den Sensor wirksam sind. Bei der digitalen Fotografie kommt noch dazu, dass der Sensor schräg auftreffende Lichtstrahlen teilweise abschattet.

Die durch die natürliche Randabschattung verursachte Abnahme der Beleuchtungsstärke auf

der Sensorebene in den Ecken gegenüber der Mitte von E_{∞} ist also umso größer, je weiter der entsprechende Punkt von der optischen Achse entfernt liegt (Abb. 3):

$$E = E_{\infty} \times \cos^4 w$$

(Gleichung 6)

Da der Cosinus zwischen 0 und 90 Grad kontinuierlich von 1 auf 0 fällt, nimmt auch die Beleuchtungsstärke mit steigendem Feldwinkel (w) ab. Dieses so genannte \cos^4 -Gesetz erklärt, warum die Randabschattung vor allem im Weitwinkel zum vorherrschenden, kaum lösbaren Problem wird.

Quellen

- Technische Fotografie, Prof. Gottfried Schröder
- Photographische Geräte- und Beleuchtungstechnik, Prof. Dr. Josef Decker
- EL Lens Work III, The Eyes of EOS, Canon
- Objektive in der industriellen Bildbearbeitung, Thomas Thönig, LINOS Photonics GmbH & Co.KG
- Tailored properties of optical glasses, Ralf Jedamzik

Streng genommen gilt es übrigens nur für Optiken, bei denen das Linsenkonstrukt vor der Blende in etwa der gespiegelten Linsengruppe hinter der Blende entspricht, Einfalls- also gleich Ausfallswinkel (symmetrischer Aufbau). Bei asymmetrischen Systemen setzt sich der Lichtverlust aus dem \cos^2 des Einfallswinkels und dem des Ausfallswinkels zusammen.

Um den Fehler zu korrigieren, legen viele Hersteller die Austrittspupille (Bild der Blende von hinten betrachtet) ihrer Weitwinkelobjektive soweit möglich gegen unendlich: Die Strahlen sollen das Objektiv annähernd achsparallel verlassen, damit immerhin der Ausfallswinkel verschwindet und mit ihm sein Anteil an der Randabdunklung ($\cos^2 w' = 1$). Allerdings sind dem baulich bedingt Grenzen gesetzt – der Trick funktioniert nur bei großem Bajonett und kleinem Sensor.

Ansonsten lässt sich gegen den natürlichen Helligkeitsabfall nur wenig ausrichten. Einige Hersteller setzen deshalb Zentralfilter ein, welche die Helligkeit in der Bildmitte künstlich auf das Niveau an den Rändern senken.

Lichtverlust durch künstliche Vignettierung

Bei unseren bisherigen Überlegungen sind wir davon ausgegangen, dass ausschließlich die Blende die Lichtstrahlen im Objektiv begrenzt und keine weiteren Hindernisse existieren – de facto ein recht unrealistisches Szenario. Vor allem bei Fotoobjektiven mit mehreren Gliedern kommt oft noch ein anderes Phänomen dazu: die künstliche Vi-

gnettierung – hervorgerufen durch Linsenfassungen, die die wirksame Blendenöffnung (Eintrittspupille) und damit vor allem Lichtstrahlen von achsfernen Punkten am Motivrand beschneiden (Abb. 4). Im Gegensatz zur natürlichen Abschattung lässt sich die künstliche Vignettierung durch Abblenden effektiv und einfach eliminieren (Abb. 5).

Lichtverlust durch Reflexion

Reflexion schwächt die Bildhelligkeit und den Kontrast.

Neben Blende und Vignettierung tragen immer auch Reflexionen zum Lichtverlust im Objektiv bei. Insbesondere die Linsenoberflächen werfen einen Teil des auftretenden Lichts wieder zurück und damit von der Sensorebene weg (Abb. 6). Die Reflexion R ist dabei umso ausgeprägter, je stärker sich der Brechungsindex der Luft (n) von dem der Linse (n') unterscheidet. Beim Eintreten des Lichts in die Linse gilt:

$$R = \frac{(n' - n)^2}{(n' + n)^2}$$

(Gleichung 7)

Mit einer Brechzahl $n = 1$ für Luft und $n' = 1,5$ für das optische Glas beträgt die Reflexion demnach 0,04, was einem Verlust von 4 % und umgekehrt einer Durchlässigkeit (Transmission) von 0,96 entspricht. Bei hochbrechenden Gläsern ($n' > 1,83$) kann sich der reflektierte Anteil sogar durchaus verdoppeln. Ein ernstes Problem, zumal Fotoobjektive in der Regel mehrere Linsen enthalten: In einer fünfgliedrigen Optik muss der Strahl beispielsweise zehn Oberflächen durchlaufen. Bei einer durchschnittlichen Reflexion von 4 % (Transmission=0,96) ergibt sich ein Lichtdurchlass von gerade noch 66 % (= $0,96 \times 10$) – und das nur aufgrund der Reflexion! Die restlichen 34 % nehmen zunächst wieder den Weg zurück zur Frontlinse, treffen dabei jedoch womöglich wieder auf reflektierende Hindernisse und stellen den Objektivkonstrukteur vor die nächste Schwierigkeit: Wenn die mehrfach reflektierten Strahlen doch noch bis zum Sensor vordringen, vernebeln sie das Bild und mindern den Kontrast. Eine der wichtigsten Grundregeln des Objektivbaus lautet daher: Reflexionen eliminieren! Mit

breitbandiger Antireflex-Linsenbeschichtung lässt sich der Reflexionsgrad mittlerweile im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 350 und 700 nm auf unter 0,2 bis 0,3 % senken. Außerdem sollten die Fassungen und Innenwände des Objektivtubus mit einer schwarzen, möglichst schwach reflektierenden Lackschicht überzogen und geometrisch so gelagert sein, dass das Streulicht über die Frontlinse austritt und sicher nicht die Filmebene erreicht.

Lichtverlust durch Absorption

Nach der Reflexion stößt der Lichtstrahl gleich auf die nächste Hürde, die wellenlängenabhängige Absorption innerhalb der Linse: Das Licht gibt an das Glas Energie ab, die sich in Wärme umwandelt. Dabei nimmt die Lichtintensität je nach Linsendicke und Wellenlänge mehr oder weniger stark ab. Besonders kritisch ist der blau/violette Spektralbereich zwischen 350 und 470 nm (UV-Kante). Hier absorbieren sogar viele optische Glassorten, die sich ansonsten durch eine hohe Durchlässigkeit auszeichnen, recht stark. Insbesondere Gläser mit hohem Brechungsindex neigen zu einer höheren Absorption an der UV-Kante, was im schlechtesten Fall sogar zum gelbstichigen Abbild führen kann.

Die Glashersteller führen deshalb heutzutage spezielle Glassorten mit optimierter Absorptionscharakteristik, die den Anforderungen der Fotoobjektiventwickler entgegenkommen. Entscheidend dabei sind die Bestandteile und die Reinheit des Glases sowie der Produktionsprozess: Erfahrungsgemäß schneiden bleihaltige Gläser in diesem Zusammenhang besser ab als die entsprechenden Varianten, bei denen Titanium oder Niobium das Blei ersetzen. Andererseits schwächen Rückstände, wie sie platinumhaltige Komponenten des Schmelztanks im darin verarbeiteten Glas hinterlassen, die Durchlässigkeit an der UV-Kante deutlich.

Schott verwendet daher beispielsweise bei der Produktion seiner optimierten HT- und HHT-Gäser besonders reine Rohstoffe und spezielle Schmelzverfahren, die den Glas/Platinum-Kontakt mei-

den (Abb. 7). Einige bleifreie, hochbrechende Flintgläser zeigen durch solche Maßnahmen sogar eine höhere Durchlässigkeit an der UV-Kante als ihre bleihaltigen Pendanten.

Als Maß für die Absorption verwendet man in der Regel die Reintransmission. Sie beschreibt den Anteil der durchgelassenen an der eingestrahelten Lichtmenge nach Abzug des absorbierten Anteils.

Der Lichtverlust durch Reflexion und Absorption liegt in modernen Objektiven bei etwa einem Prozent und geht dann mit dem Transmissionsgrad (= 0,9) als Korrekturfaktor in die Berechnung

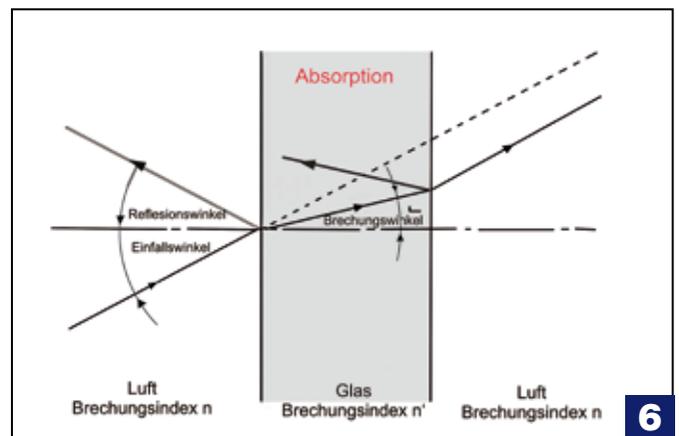
der Beleuchtungsstärke auf der Sensorebene (Gleichung 4) ein.

FAZIT

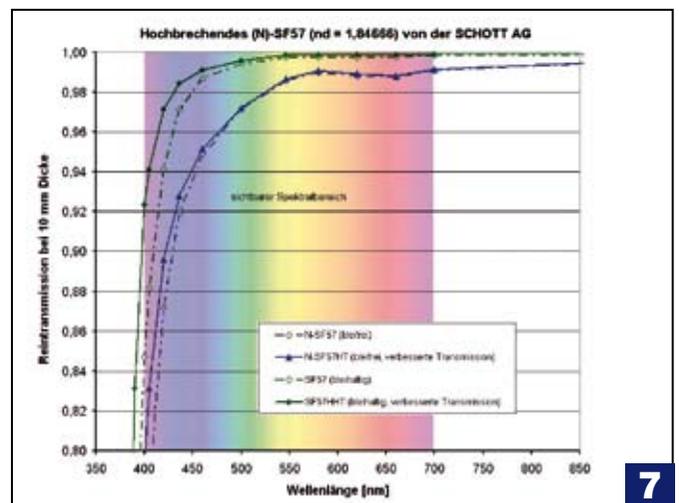
► Annette Kniffler



Wer ein lichtstarkes Objektiv sucht, bekommt mit der Blendenzahl einen zuverlässigen Anhaltspunkt für die Lichtleistung eines Objektivs. Trotzdem sollte er sich darüber im Klaren sein, dass es sich hier um eine normierte Größe handelt, die nur eingeschränkt für die Bildecken und den Nahbereich gilt. Zudem lässt sie Faktoren wie die Reflexion und Absorption außer Acht.



Reflexion: Ein Teil des Lichts wird an den Linsenoberflächen reflektiert – bei Gläsern mit einem Brechungsindex von 1,5 sind davon etwa 4 % betroffen. Dank breitbandiger Linsenvergütung lässt sich die Reflexion aber heutzutage auf unter 0,3 % senken.



Absorption: Hochbrechende optische Gläser wie das SF57 und das N-SF57 ($n'=1,84666$) neigen zu einer relativ hohen Absorption im blau/violetten Spektralbereich (UV-Kante). Bei den entsprechenden HT- und HHT-Varianten hat Schott das Absorptionsverhalten mithilfe besonders reiner Bestandteile und eines speziellen Schmelzverfahrens optimiert, ohne dabei das Brechverhalten zu verändern.