

Ein Blick auf die Schärfentiefe

Oliver Jennrich

Version 0.2

22. November 1999

1 Einführung

Einige Zeit der „Mitgliedschaft“ in der Newsgroup `de.rec.fotografie` hat dazu geführt, daß ich eine ganze Reihe von Diskussionen um die Schärfentiefe¹ verfolgen konnte. Dabei hat sich gezeigt, daß häufig genug immer wieder die selben Irrtümer kolportiert werden. Daher wuchs in mir der Entschluß, eine möglichst einfache, verständliche und richtige Herleitung der wesentlichen Formeln zur Verfügung zu stellen. Ob die Kriterien „einfach“ und „verständlich“ erfüllt sind, möge der Leser entscheiden, für die Richtigkeit gilt ohnehin, nie zu glauben, was man nicht selbst nachgerechnet hat.

Zum Thema Schärfentiefe gibt es bereits einige Formelsammlungen auf dem Netz [Reea, Reeb, Jac], die allerdings meist auf englisch. Ebenso gibt es mehrere Online-Rechner zur Ermittlung der Schärfentiefe und der hyperfokalen Entfernung [Gila, Stra, Klu] sowie handliche Rechenscheiben für Kleinbild-Kameras [Strb]. Die angegebene Literatur erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, ebensowenig kann ich dafür garantieren, daß die Links noch funktionieren.

2 Die hyperfokale Entfernung

Eine Größe, die einem bei der Betrachtung der Schärfentiefe immer wieder begegnet, ist die sogenannte *hyperfokale Entfernung*.

Betrachtet man die Bildentstehung an einer dünnen Linse², so wird ein der Punkt P auf den Punkt P' abgebildet (siehe Abb. 1). Die Gegenstandsweite g , (die Entfernung des Punktes P

¹Oder auch Tiefenschärfe. Das Sprachgefühl gibt mir keinen Hinweis darauf, welche der beiden Versionen zu bevorzugen ist. Diese Fußnote hat zu einiger Diskussion in `de.rec.fotografie` geführt. Die herrschende Meinung (siehe dazu auch [Hot]) empfindet die Verwendung von „Schärfentiefe“ als korrekt, gesteht aber den Gebrauch von „Tiefenschärfe“ quasi gewohnheitsrechtlich zu. Ein schöner Kompromiß wurde von Benedikt Hotze gefunden: Tärfenschiefe.

²Die Beschränkung auf eine dünne Linse erfolgt der Einfachheit halber. Komplizierte Linsensysteme lassen sich ähnlich betrachten, wenn man das Konzept der *Hauptebenen* verwendet.

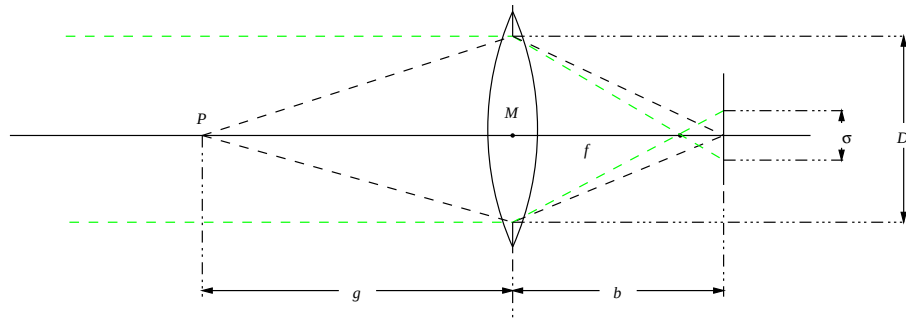


Abbildung 1: Prinzipskizze zur hyperfokalen Entfernung

vom Linsenmittelpunkt M) und die Bildweite b (die Entfernung von M zum Punkt P') hängen über die sogenannte Linsengleichung [EG88] miteinander zusammen.

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet f die Brennweite der Linse, d. h. den Abstand des Brennpunktes vom Linsenmittelpunkt. Gleichung (1) bedeutet, daß ein Gegenstand in der Entfernung g genau dann scharf auf der Filmebene abgebildet wird, wenn das Objektiv den Abstand b von der Filmebene hat.

Abstände vom Linsenmittelpunkt zu messen, ist in der Optik durchaus üblich, kann jedoch bei Fotografen zu Verwirrung führen, da in der Fotografie alle Entfernungen von der Filmebene gemessen werden. Um dieser Verwirrung zu begegnen³, sollen alle Entfernungen von der Linsenmitte mit normalen Buchstaben bezeichnet werden (g, b usw.), Entfernungen von der Filmebene jedoch mit Symbolen, die eine Tilde tragen ($\tilde{g}$). Verwendet man Gl. (1), so ergibt sich z. B.

$$\tilde{g} = g + b = g + \frac{gf}{g - f} = \frac{g^2}{g - f} \quad (2)$$

Der Unterschied zwischen $\tilde{g}$ und g wird im weiteren keine große Rolle spielen. Zum Einen ist die Bildweite b , um die sich die beiden Größen unterscheiden, meist vergleichsweise klein, zum anderen ist natürlich die Differenz zweier Entfernungen unabhängig von dem Punkt von dem aus sie gemessen werden:

$$g_1 - g_2 = \tilde{g}_1 - \tilde{g}_2 \quad (3)$$

Was passiert aber mit Punkten, die sich in einer anderen Entfernung als g befinden? Betrachtet man z. B. parallele Lichtstrahlen, so werden diese auf den Brennpunkt fokussiert und erzeugen auf der Filmebene einen Kreis mit dem Durchmesser σ , den *Unschärfekreis*. Wenn man akzeptiert, daß sehr kleine Kreise vom menschlichen Auge nicht von Punkten zu unterscheiden sind [Loc], so kann man sich folgende Frage stellen:

³... oder sie zu steigern

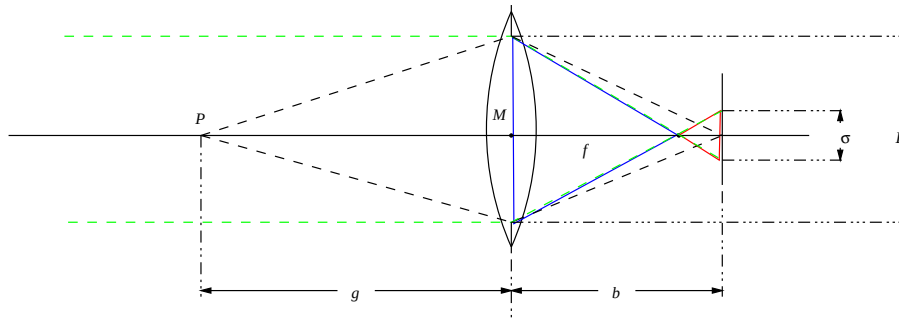


Abbildung 2: Der Strahlensatz führt zu Beziehungen zwischen dem blauen und dem roten Dreieck

FRAGE 1

Auf welche Entfernung g_h muß das Objektiv scharfgestellt werden, damit Objekte die sehr weit entfernt sind, noch immer scharf erscheinen?

Die Antwort darauf hängt sicher davon ab, wie klein σ sein muß, damit der Unschärfekreis noch als Punkt wahrgenommen wird⁴. In Abb. 2 sind die beiden Dreiecke hervorgehoben, die im weiteren benötigt werden. Da die Filmebene und die Linsenebene parallel sind, sind sich das blaue und das rote Dreieck geometrisch ähnlich, d. h. unter anderem, daß das Verhältnis ihrer Seitenlängen gleich ist. Es ist also:

$$\frac{D}{f} = \frac{\sigma}{b - f} \quad . \quad (4)$$

Dabei beschreibt die linke Seite der Gleichung das blaue Dreieck, die rechte Seite das grüne Dreieck.

An dieser Stelle ist es günstig, die Blendenzahl κ einzuführen, die sich aus dem Verhältnis der Brennweite f zum Durchmesser der Blende D ergibt.

$$\kappa = \frac{f}{D} \quad (5)$$

Löst man Gl. (1) nach b auf, erhält man

$$b = \frac{gf}{g - f} \quad . \quad (6)$$

Setzt man dies in Gl. (4) ein, bekommt man einen Ausdruck für die gesuchte Entfernung g_h :

$$g_h = \frac{f^2}{\kappa \sigma} + f \quad . \quad (7)$$

⁴Man kann sich fragen, ob die Auflösungsbegrenzung des Auges auf etwa 1 Bogenminute zur Definition der Unschärfekreise beigetragen hat. Bei der „Normalbrennweite“ (50mm) des Kleinbildformats entsprechen etwa 0.015mm einer Bogenminute, also etwa dem halben Durchmesser des üblichen Unschärfekreises.

Tabelle 1: Durchmesser der Unschärfekreise für verschiedene Filmformate. Die mit einem * gekennzeichneten Formate sind in Zoll. Die Werte der zweiten Spalte sind [Gilb] entnommen. Nach Hinweisen in der Newsgroup sind zusätzliche, von den angegebenen Richtwerten abweichende Werte. aufgenommen

Filmformat	σ [mm]	
35 mm	0.03	
6×4.5	0.05	
6×6	0.06	
6×7	0.065	
6×9	0.075	
4×5 *	0.15	0.1
5×7 *	0.20	
8×10 *	0.30	

Diese Gleichung liefert genau die Antwort auf die Frage 1. Der erste Term aus Gl. (7) wird als hyperfokale Entfernung d_h bezeichnet

$$d_h = \frac{f^2}{\kappa \sigma} \quad , \quad (8)$$

und ist für alle praktischen Zwecke sehr groß gegenüber der Brennweite f . Beispielsweise ist für $f = 50$ mm und Blende $\kappa = 8$ und dem für das Kleinbildformat angemessenen Unschärfekreisdurchmesser $\sigma = 0.03$ mm ist $d_h \approx 10.42$ m.

Verwenden wir Gl. (2), so erhalten wir für die hyperfokale Entfernung von der Filmebene $\tilde{g}_h$ folgenden Ausdruck

$$\tilde{g}_h = d_h + 2f + \kappa \sigma = g_h + f + \kappa \sigma \quad , \quad (9)$$

der sich für alle praktischen Zwecke nicht wesentlich von g_h bzw. d_h unterscheidet⁵. Man kann daher feststellen:

MERKSATZ 1

In guter Näherung erzeugt ein Objektiv, das auf die hyperfokale Entfernung fokussiert ist, für alle Entfernungen, die größer sind als die hyperfokale Entfernung, ein scharfes Bild.

Der Durchmesser des Unschärfekreises hängt vom verwendeten Filmformat ab, eine Zusammenstellung [Gila] für die gängigsten Formate findet man in Tabelle 1, zusammen mit einigen anderen Werten für die Durchmesser der Unschärfekreise. Die Problematik der Unschärfekreise wird noch einmal genauer in Abschnitt 5 betrachtet.

Wie weit erstreckt sich die Schärfentiefe in diesem Fall nach vorne? Um diese Frage zu beantworten, soll in Abschnitt 3 der allgemeine Fall betrachtet werden.

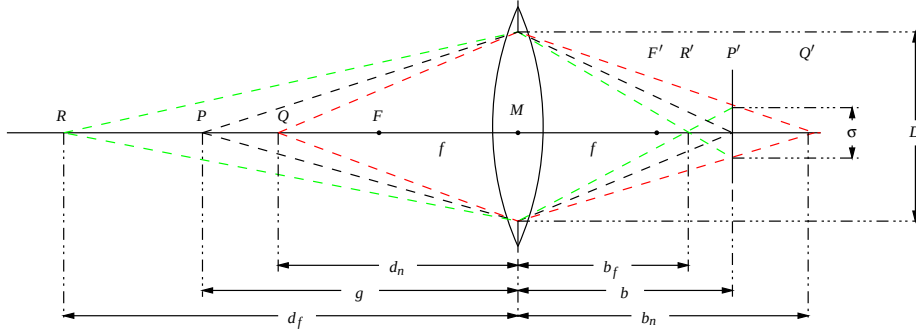


Abbildung 3: Prinzipskizze zur Schärfentiefe

3 Schärfentiefe

In Abb. 3 sind drei Punkte (P, Q, R) angedeutet, die von der Linse auf ihre entsprechenden Bilder P', Q', R' abgebildet werden. Der Punkt P wird *scharf* abgebildet, d. h. der Punkt P' liegt in der Filmebene (schwarzer Strahlengang). Der Punkt Q liegt näher an der Linse als P , demzufolge erscheint das Bild Q' *hinter* der Filmebene (roter Strahlengang). In der Filmebene erscheint Q als Unschärfekreis mit dem Durchmesser σ_Q . Der Punkt R hat einen größeren Abstand zur Linse als der Punkt P , demzufolge liegt sein Bild R' *vor* der Filmebene (grüner Strahlengang) und R erscheint in der Filmebene ebenfalls als Unschärfekreis mit Durchmesser σ_R . Wenn man die Abstände von Q zu M und R zu M so wählen kann, daß die jeweiligen Unschärfekreise von Q und R gleichgroß sind (also $\sigma_R = \sigma_Q = \sigma$ gilt), dann ist Q der *Nahpunkt* der Schärfentiefe mit dem Abstand d_n zur Linse und R der *Fernpunkt* der Schärfentiefe mit dem Abstand d_f zur Linse. Wie in Abschnitt 2 kann man nun über die Betrachtung von ähnlichen Dreiecken zu folgenden Beziehungen gelangen:

$$\frac{D}{b_f} = \frac{\sigma}{b - b_f} \quad \text{grüner Strahlengang} \quad (10)$$

$$\frac{D}{b_n} = \frac{\sigma}{b_n - b} \quad \text{roter Strahlengang} \quad (11)$$

Damit erhält man zunächst den Zusammenhang zwischen der *bildseitigen* Schärfentiefe und der Bildweite b

$$\frac{1}{b_n} = \frac{1}{b} \frac{D - \sigma}{D} \quad (12)$$

$$\frac{1}{b_f} = \frac{1}{b} \frac{D + \sigma}{D} \quad (13)$$

Die Schreibweise mit den Kehrwerten der entsprechenden Bildweiten ist sehr nützlich, wenn man als nächstes Gl. (1) benutzt um die Bildweiten b , b_n und b_f durch ihre Gegenstandsweite

⁵Die Invarianz aus Gl. (3) kann dazu verwendet werden zu zeigen, daß $\tilde{d}_h = \tilde{g}_h - f$ ist

g , d_n und d_f sowie die Brennweite f zu ersetzen:

$$\frac{1}{d_n} = \frac{1}{f} - \frac{D - \sigma}{D} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{g} \right) \quad (14)$$

$$= \frac{1}{f} \frac{\sigma}{D} - \frac{1}{g} \frac{\sigma}{D} + \frac{1}{g} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{d_h} \left(1 - \frac{f}{g} \right) + \frac{1}{g} \quad (16)$$

$$= \frac{d_h + (g - f)}{gd_h} \quad (17)$$

Für d_f folgt entsprechend:

$$\frac{1}{d_f} = \frac{1}{f} - \frac{D + \sigma}{D} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{g} \right) \quad (18)$$

$$\vdots$$

$$= \frac{d_h - (g - f)}{gd_h} \quad (19)$$

Die gewohnte Form erhält man natürlich einfach durch die Kehrwerte

$$d_n = \frac{gd_h}{d_h + (g - f)} \quad (20)$$

$$d_f = \frac{gd_h}{d_h - (g - f)} \quad , \quad (21)$$

die entsprechenden Ausdrücke für die Größen $\tilde{d}_n$ und $\tilde{d}_f$ sind einfach auszurechnen, bringen aber wenig neue Erkenntnisse.

Entsprechend dem in Abschnitt 2 gefundenen Zusammenhang, verschiebt sich d_f nach Unendlich, wenn man für die Gegenstandsweite g den Ausdruck aus Gl. (7) einsetzt.

$$g \rightarrow g_h = d_h + f \Rightarrow \begin{cases} d_f & \rightarrow \infty \\ d_n & \rightarrow \frac{g_h}{2} \end{cases} \quad (22)$$

Auch hier ist für alle praktischen Zwecke $g_h \approx d_h$, so daß folgender Satz gilt:

MERKSATZ 2

Die Schärfentiefe erstreckt sich von der halben hyperfokalen Entfernung bis Unendlich, wenn das Objektiv auf die hyperfokale Entfernung fokussiert ist.

Ein weiterer interessanter Zusammenhang erschließt sich, wenn man nicht den Nah- bzw. Fernpunkt betrachtet, sondern die Ausdehnung der Schärfentiefe nach vorne bzw. hinten, also $g - d_n$ und $d_f - g$

$$g - d_n = \frac{g(g - f)}{d_h + (g - f)} \quad (23)$$

$$d_f - g = \frac{g(g - f)}{d_h - (g - f)} \quad (24)$$

oder anders geschrieben

$$\frac{g - d_n}{d_f - g} = \frac{d_n}{d_f} \quad . \quad (25)$$

MERKSATZ 3

Das Verhältnis der Entfernung des Nahpunkts zu der Entfernung des Fernpunkts entspricht dem Verhältnis der Ausdehnung der Schärfentiefe nach vorne zu der Ausdehnung der Schärfentiefe nach hinten.

Hierbei ist es natürlich unerheblich, ob die Entfernungen ab der Linsenmitte oder ab der Filmebene gemessen werden.

Die gesamte Ausdehnung der Schärfentiefe erhält man, wenn man die Differenz zwischen d_f und d_n bildet.

$$d_f - d_n = 2 \frac{g(g - f)d_h}{d_h^2 - (g - f)^2} \quad (26)$$

4 Abbildungsmaßstab

Es bietet sich oft an, statt der Gegenstandsweite g den Abbildungsmaßstab m zu verwenden. Dieser ist durch das Verhältnis der Bildgröße zur Gegenstandsgröße definiert, welches nach dem Strahlensatz dem Verhältnis von Bildweite b zu Gegenstandsweite g entspricht.

$$m = \frac{b}{g} = \frac{f}{g - f} \quad \text{wegen Gl. (6)} \quad (27)$$

Löst man Gl. (27) nach g auf, so erhält man

$$g = f \frac{m + 1}{m} \quad (28)$$

sowie

$$g - f = \frac{f}{m} \quad (29)$$

Nun kann man die Gleichungen (20), (21) sowie (23), (24) und (26) auf den Abbildungsmaß-

stab m umschreiben.

$$d_n = \frac{f^2(m+1)}{fm + \kappa\sigma} \quad (30)$$

$$d_f = \frac{f^2(m+1)}{fm - \kappa\sigma} \quad (31)$$

$$g - d_n = f \frac{m+1}{m} \frac{\kappa\sigma}{fm + \kappa\sigma} \quad (32)$$

$$d_f - g = f \frac{m+1}{m} \frac{\kappa\sigma}{fm - \kappa\sigma} \quad (33)$$

$$d_f - d_n = 2f^2(m+1) \frac{\kappa\sigma}{(fm)^2 - (\kappa\sigma)^2} \quad (34)$$

Die Gleichungen (30)–(34) vereinfachen sich stark, wenn der Abbildungsmaßstab m sehr groß gegenüber der Größe $\kappa\sigma/f$ ist (Makronäherung)

$$m \gg \frac{\kappa\sigma}{f} = \frac{f}{d_h} \quad (35)$$

Dann werden nämlich die Gleichungen (32)–(34) zu

$$g - d_n \approx \kappa\sigma \frac{m+1}{m^2} \quad (36)$$

$$d_f - g \approx \kappa\sigma \frac{m+1}{m^2} \quad (37)$$

$$d_f - d_n \approx 2\kappa\sigma \frac{m+1}{m^2} \quad (38)$$

was bedeutet, daß *in dieser Näherung* die Ausdehnung der Schärfentiefe unabhängig von der Brennweite wird. In Tafel 2 ist aufgeführt, bis zu welchem Abbildungsmaßstab bzw. bis zu welcher Gegenstandsweite die Näherung gerechtfertigt ist.

5 Unschärfekreis

In Abschnitt 2 wurde bereits auf den Durchmesser des Unschärfekreises eingegangen. Es muß jedoch betont werden, daß trotz eines möglichen Zusammenhanges mit dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges die Größe des Unschärfekreises, der gerade noch als Punkt wahrgenommen wird, stark vom Betrachter und dem Bildformat abhängt.

Um dies zu veranschaulichen, betrachten wir das Kleinbildformat mit den Negativmaßen $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$ und dem „zulässigen“ Durchmesser des Unschärfekreises $\sigma = 0.03\text{ mm}$. Blenden wir das Objektiv auf $\kappa = 8$ ab, so beträgt die hyperfokale Entfernung $d_h = 10.42\text{ m}$ und eine Punktlichtquelle im unendlichen wird auf eine Kreisscheibe mit eben dem Durchmesser $\sigma = 0.03\text{ mm}$ abgebildet, wenn wir das Objektiv auf eine Entfernung d_h scharfstellen.

Tabelle 2: Gültigkeitsbereich der Makronäherung für verschiedene Brennweiten (Zeilen) und Blenden (Spalten) . Die Tabelleneinträge geben den kleinsten möglichen Abbildungsmaßstab und die größtmögliche Gegenstandsweite an, für die die Bedingung $m > 10 \kappa \sigma / f$ erfüllt ist.

$f \quad \kappa$	2.8	4	5.6	8	11	16	22
24	1:28.6 0.71 m	1:20 0.5 m	1:14.3 0.37 m	1:10 0.26 m	1:7.3 0.2 m	1:5 0.14 m	1:3.6 0.11 m
35	1:41.7 1.49 m	1:29.2 1.06 m	1:20.8 0.76 m	1:14.6 0.55 m	1:10.6 0.41 m	1:7.3 0.29 m	1:5.3 0.22 m
50	1:59.5 3.03 m	1:41.7 2.14 m	1:29.8 1.54 m	1:20.8 1.09 m	1:15.2 0.81 m	1:10.4 0.57 m	1:7.6 0.43 m
70	1:83.3 5.9 m	1:58.3 4.15 m	1:41.7 2.99 m	1:29.2 2.11 m	1:21.2 1.55 m	1:14.6 1.09 m	1:10.6 0.81 m
85	1:101.2 8.69 m	1:70.8 6.1 m	1:50.6 4.39 m	1:35.4 3.09 m	1:25.8 2.28 m	1:17.7 1.59 m	1:12.9 1.18 m
105	1:125 13.23 m	1:87.5 9.29 m	1:62.5 6.67 m	1:43.8 4.7 m	1:31.8 3.44 m	1:21.9 2.4 m	1:15.9 1.77 m
135	1:160.7 21.83 m	1:112.5 15.32 m	1:80.4 10.99 m	1:56.3 7.74 m	1:40.9 5.66 m	1:28.1 3.93 m	1:20.5 2.9 m
185	1:220.2 40.92 m	1:154.2 28.71 m	1:110.1 20.55 m	1:77.1 14.45 m	1:56.1 10.56 m	1:38.5 7.31 m	1:28 5.37 m
200	1:238.1 47.82 m	1:166.7 33.54 m	1:119 24 m	1:83.3 16.86 m	1:60.6 12.32 m	1:41.7 8.54 m	1:30.3 6.26 m
300	1:357.1 107.43 m	1:250 75.3 m	1:178.6 53.88 m	1:125 37.8 m	1:90.9 27.57 m	1:62.5 19.05 m	1:45.5 13.95 m
400	1:476.2 190.88 m	1:333.3 133.72 m	1:238.1 95.64 m	1:166.7 67.08 m	1:121.2 48.88 m	1:83.3 33.72 m	1:60.6 24.64 m
500	1:595.2 298.1 m	1:416.7 208.85 m	1:297.6 149.3 m	1:208.3 104.65 m	1:151.5 76.25 m	1:104.2 52.6 m	1:75.8 38.4 m

Nun ist es allerdings selten so, daß Negative direkt betrachtet werden, in den allermeisten Fällen werden davon Abzüge angefertigt⁶. Denken wir uns einen Abzug der Größe 10 cm × 15 cm, so besitzen die Unschärfekreise einen Durchmesser von 0.125 mm. Geht man von einem typischen Betrachtungsabstand von etwa 20 cm für einen solchen Abzug aus, so erscheint der Unschärfekreis unter einem Winkel von etwa 2 Bogenminuten, kann also vom Auge gerade eben als Kreis wahrgenommen werden.

Verwenden wir stattdessen einen Abzug der Größe 40 cm × 60 cm, so besitzt der Unschärfekreis einen Durchmesser von 0.5 mm und wird bei genügend kleinem Betrachtungsabstand (z.B. 20 cm) deutlich als Kreis und damit als „unscharf“ wahrgenommen. Das Argument, der „normale“ Betrachtungsabstand für ein solches Format sei auch nicht 20 cm sondern eher 80 cm ist nicht wirklich stichhaltig, es sei denn man spannt z. B. bei einer Ausstellung Absperroleinen in gebührendem Abstand vor den Bildern.

Mit anderen Worten: Die Ausdehnung der Schärfentiefe auf möglichen Abzügen hängt auch vom Verhältnis des Betrachtungsabstands zum Vergrößerungsmaßstab ab; Gegenstände, die auf 9 cm × 13 cm Abzügen noch gestochen scharf wirken, können auf 20 cm × 30 cm Abzügen bereits als unscharf zu erkennen sein. Vorsicht also beim gedankenlosen Verwenden von Schärfentiefenskalen, Abblendtasten oder errechneten Schärfentiefen.

Glücklicherweise geht in die Formeln stets nur das Produkt aus Blendenzahl und Unschärfekreisdurchmesser ein, so daß die Schärfentiefe einfach „konservativ“ abgeschätzt werden kann. So kann man z. B. einfach die Schärfentiefe für Blende 8 verwenden, wenn man mit Blende 11 fotografiert und bekommt auf diese Weise etwas „Reserve“.

6 Beugung

Die Frage liegt nahe, ob man nicht einfach immer die Blende soweit wie möglich schließen sollte, schließlich scheint dies zu einer immer größeren Ausdehnung der Schärfentiefe zu führen.

Neben kompositorischen Gesichtspunkten wie z.B. der Wunsch nach einem unscharfen Hintergrund bei Portraits gibt es auch ein physikalisches Argument gegen allzugroße Blendenzahlen: Das Phänomen der Beugung.

Die Beugung hat ihre Ursache in der Wellennatur des Lichts und führt dazu, daß auch bei einem „perfekten“ Objektiv eine Punktlichtquelle nicht auf einen echten Punkt abgebildet wird, sondern auf einen Kreis, das sogenannte Beugungsscheibchen. Der Durchmesser σ_B des Beugungsscheibchens auf der Filmebene ist

$$\sigma_B = 2.44\lambda \frac{b}{D} \quad (39)$$

wobei λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts ist. Ersetzt man in Gl. (39) die Bildweite b durch den Abbildungsmaßstab und die Brennweite ($b = f(m+1)$) dann erhält man

$$\sigma_B = 2.44\lambda \kappa(m+1) \quad (40)$$

⁶Das gilt im wesentlichen auch für Dias, nur ersetzt hier die Projektion die Abzüge. Alle Aussagen, die sich auf die Größe der Abzüge und den Betrachtungsabstand beziehen, gelten sinngemäß auch für das Verwenden von Projektionsobjektiven unterschiedlicher Brennweite und den Abstand des Betrachters zur Leinwand.

Die Frage, welche Wellenlänge λ verwendet werden muß, mag naheliegen, ist aber letztlich von wenig Bedeutung: Die Wellenlänge sichtbaren Lichts variiert nur um etwa einen Faktor 2.

Wenn man den maximalen Effekt abschätzen will, so kann man einfach die längste Wellenlänge verwenden, die der Film noch registrieren kann. Am Beispiel des KODAK PORTRA 100T [Kod] findet man, daß die Empfindlichkeit des Films um etwa 650 nm bereits stark abgenommen hat. Eine weitere typische Wellenlänge ist 550 nm, die in etwa dem Strahlungsmaximum der Sonne entspricht, also der Wellenlänge, die bei Tageslicht am häufigsten vertreten ist.

In jedem Falle erreichen bereits bei etwa $\kappa = 22$ die Beugungsscheibchen den Durchmesser des Unschärfekreises für das Kleinbildformat, ein weiteres Abblenden um eine höhere Schärfentiefe zu erhalten, ist also wenig sinnvoll.

Während $\kappa = 22$ für die meisten Objektive im „Normaleinsatz“ ohnehin die maximal erreichbare Blende angibt (aus gutem Grund!), muß man bei Aufnahmen im Makrobereich etwas vorsichtig sein. Da der Durchmesser des Beugungsscheibchens neben κ auch noch vom Abbildungsmaßstab m abhängt, findet man häufig die Definition der *effektiven* Blende κ' :

$$\kappa' = \kappa(m + 1) \quad . \quad (41)$$

Da im Makrobereich der Abbildungsmaßstab durchaus größer werden kann als eins, müssen hier Beugungseffekte auch bei eigentlich „unkritischen“ Blenden berücksichtigt werden.

An dieser Stelle mag es interessant sein, noch einmal die Gl. (42)–(44) zu betrachten, diese lassen sich mit der effektiven Blende etwas einfacher schreiben:

$$g - d_n \approx \frac{\kappa' \sigma}{m^2} \quad (42)$$

$$d_f - g \approx \frac{\kappa' \sigma}{m^2} \quad (43)$$

$$d_f - d_n \approx 2 \frac{\kappa' \sigma}{m^2} \quad (44)$$

Die Überlegungen in Abschnitt 5 gelten natürlich auch in diesem Fall. Wenn ein größerer „Betrachtungsmaßstab“ gewünscht wird, so beginnen Beugungseffekte bereits bei kleineren Blendenzahlen sichtbar zu werden.

7 Die Schärfentiefeskala auf dem Objektiv

Man kann sich die Frage, warum eigentlich die Schärfentiefeskala auf dem Objektiv, so sie denn vorhanden ist, für alle Entfernungseinstellungen funktioniert und zudem noch symmetrisch zu sein scheint.

Dies scheint zunächst den Ergebnissen in Abschnitt 4 zu widersprechen, hängt doch die Ausdehnung der Schärfentiefe vom Abbildungsmaßstab und damit von der Gegenstandsweite ab.

Die Lösung dieses Problems findet man, wenn man sich klarmacht, daß die Markierungen auf dem Objektiv angeben, welche Ausdehnung die Schärfentiefe im *Bildraum* hat. Der

Schnecken gang des Objektivs sorgt dafür, daß die Änderung der Bildweite proportional zum Drehwinkel des Scharfstellrings ist⁷. Die symmetrische Lage der Schärfentiefenmarkierungen auf dem Objektiv läßt also vermuten, daß die entsprechenden Bildweiten b_f und b_n symmetrisch um die Bildweite b liegen.

Wenn man die Gleichungen (12) und (13) benutzt, um die bildseitigen Ausdehnungen zu berechnen, so erhält man

$$b_n - b = b \left(\frac{D}{D - \sigma} - 1 \right) \quad (45)$$

$$b - b_f = b \left(1 - \frac{D}{D + \sigma} \right) \quad (46)$$

Nun ist σ sehr viel kleiner als D , so daß in sehr guter Näherung gilt:

$$b_n - b = b - b_f = b \frac{\sigma}{D} \quad (47)$$

$$= \kappa \sigma \frac{g}{g - f} \approx \kappa \sigma \quad \text{weil } g \gg f \quad (48)$$

Tatsächlich liegt also die bildseitige Schärfentiefe symmetrisch um b . Betrachtet man zudem Gegenstandsweiten g , die sehr viel größer sind, als die Brennweite f ($g \gg f$), so ist die Ausdehnung der bildseitigen Schärfentiefe in sehr guter Näherung nur von der Blendenzahl κ abhängig.

8 Häufige Irrtümer

Im Lauf der Zeit haben sich durch Nachlässigkeiten Unwahrheiten und falsche „Faustformeln“ verbreitet. Die nachfolgende Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, wohl aber auf Richtigkeit

- Die häufig gehörte Feststellung, die Ausdehnung der Schärfentiefe sei grundsätzlich unabhängig von der Brennweite ist *falsch*. Einzig in der Makronäherung ist die Aussage richtig.
- Die Faustregel, ein Drittel der Schärfentiefe liege vor der eingestellten Entfernung, zwei Drittel dahinter, ist *falsch*.

Symbolverzeichnis

κ	Blendenzahl, Verhältnis von f zu D
σ	Durchmesser des Unschärfekreises
b	Bildweite

⁷vergleichbar mit einem einfachen Gewinde.

b_f	Entfernung von R' zur Linse
b_n	Entfernung von Q' zur Linse
D	Durchmesser der Blendenöffnung
d_f	Entfernung des Fernpunkts der Schärfentiefezone zur Linse
$d_f - d_n$	Ausdehnung der Schärfentiefezone
d_h	hyperfokale Entfernung, siehe auch g_h
d_n	Entfernung des Nahpunkts der Schärfentiefezone zur Linse
f	Brennweite
g	Gegenstandsweite
g_h	„echte“ hyperfokale Entfernung, im Unterschied zu d_h
P', Q', R'	Punkte im Bildraum
P, Q, R	Punkte im Gegenstandsraum
m	Abbildungsmaßstab

Literatur

- [EG88] Heinz Haferkorn Ernst Grimsehl, Walter Schallreuter. *Lehrbuch der Physik, Band 3, Optik*. Teubner Verlag, Leipzig, 1988. ISBN: 3322007812.
- [Gila] Michael C Gillett. Depth-of-field calculator. <http://www.syspac.com/~gillett/DOF.html>.
- [Gilb] Michael C Gillett. Depth-of-field formula. <http://www.syspac.com/~gillett/DOFormula.html>.
- [Hot] Benedikt Hotze. Zusammenfassung: Herrschende Meinung in drf. <http://spot.fho-empden.de/gast/foto/faq/humor03.htm>.
- [Jac] David Jacobson. Lens tutorial. <http://photo.net/photo/optics/lensTutorial.html>.
- [Klu] Alexander Kluge. Schärfentiefechner. <http://www.uni-giessen.de/~gk1030/div/Schaerfe.html>.
- [Kod] Kodak. Kodak professional portra 100t film tungsten: Tech pub e-2468. <http://www.kodak.com/global/en/professional/support/techPubs/e2468/e246%8.pdf>.

- [Loc] Locher. Das menschliche Auge. http://numerik.fernuni-hagen.de/vortraege/Tag_der_Forschung/Vortrag/Htm\%l/dasauge.html.
- [Reea] ReefNet Software. Depth of field and the hyperfocal distance. <http://www.reefnet.on.ca/gearbag/wwwdof.html>.
- [Reeb] ReefNet Software. Field of focus. <http://www.reefnet.on.ca/gearbag/wwwfof.html>.
- [Stra] Tom Striewisch. Die Javascriptrechner für die Tiefenschärfe und für die hyperfokale Distanz. http://privat.schlund.de/s/striewisch/anmerk/ts_kb.htm.
- [Strb] Tom Striewisch. Die Tiefenschärfeskalen für die Fototasche. http://privat.schlund.de/s/striewisch/goodies/tsskala/ts_35_50.pdf und <http://privat.schlund.de/s/striewisch/goodies/tsskala/ts242885.pdf>.