

Es darf als bekannt vorausgesetzt werden, daß bei sehr kleinen effektiven Blenden sogenannte Beugungsunschärfe auftritt. Der Wert für die erreichbare Grenzauflösung richtet sich nach der effektiven Blende und nach der Wellenlänge des Lichtes nach folgender Beziehung:

$$\text{Grenzauflösung (L/mm)} = \frac{1}{1,22 \cdot W \cdot k_{\text{eff}}} \quad (1)$$

(W = Wellenlänge in ,mm'; k_{eff} = effektive Blende).

Andererseits blendet man bei Nah- und Lupenaufnahmen zum Erreichen möglichst großer Schärfentiefe gern stark ab. Der Schärfentiefebereich für Nah- und Lupenaufnahmen mit Abbildungsmaßstäben ab etwa 1 : 10 (0,1 x und größer) ergibt sich aus:

$$\text{Schärfentiefe ges. (mm)} = 2 \cdot \frac{z \cdot k (m + 1)}{m^2} \quad (2)$$

(z = zulässiger Streukreis-Durchmesser in ,mm'; k = eingestellter Blendenwert; m = Abbildungsmaßstab).

Wie wir schon aus diesen beiden Beziehungen sehen, ist unbedingt ,k' und , k_{eff} ' zu unterscheiden. Mit ,k' bezeichnen wir den eingestellten Blendenwert, also den Wert auf der Objektivskala. Nun gilt dieser Gravurwert allerdings nur für die Unendlicheinstellung, wenn $a' = f$ ist. Wird die Bildweite größer als die Brennweite (bei Auszugsverlängerungen für Naheinstellungen), wird automatisch die effektive Blende kleiner als die eingestellte Blende. Dazu ein Beispiel: Ein 100-mm-Objektiv ist auf Blende 4 abgeblendet, was einem freien Blendendurchmesser von $100 : 4 = 25$ mm entspricht. Nun benutzen wir dieses Objektiv für eine Abbildung im Maßstab 1 : 1 mit 200 mm Bildweite. Dann errechnet sich die effektive Blende (der Durchmesser bleibt, weil ja nichts verstellt wurde) aus $200 : 25 = 8$. Dem eingestellten Blendenwert ,k' = 4,0 steht bei der 1 : 1-Abbildung der effektive Blendenwert , k_{eff} ' = 8,0 gegenüber. Die beiden Werte lassen sich leicht umrechnen nach:

$$k_{\text{eff}} = k \cdot (m + 1) \quad \text{oder} \quad k = \frac{k_{\text{eff}}}{(m + 1)} \quad (3)$$

Also für obiges Beispiel:

$$k_{\text{eff}} = 4,0 (1 + 1) = 8,0$$

Es ist außerordentlich wichtig, bei den nachfolgenden Erläuterungen, Tabellen etc. die eingestellte von der effektiven Blende zu unterscheiden. Zieht man die Formeln (1) und (3) zusammen, gewinnt man direkt ein Gebilde, mit dem sich die „förderliche Blendeneinstellung“ ermitteln läßt. In Anlehnung an die Begriffe der Mikroskopie („förderliche Vergrößerung“) und nach einem Vorschlag von H. Eisenbeiss ist unter „förderlicher Blendeneinstellung“ die Gravurblende zu verstehen, bei der die Beugungsunschärfe einen bestimmten Streukreis-Durchmesser ,z' nicht überschreitet.

$$\text{„förderliche Blende“} = \frac{z}{1,22 \cdot W (m + 1)} \quad (4)$$

(z = Streukreis-Durchmesser in ,mm'; W = Wellenlänge des Lichtes in ,mm'; m = Abbildungsmaßstab).

Josef Scheibel, Ing.:

Schärfentiefe und Beugungsunschärfe im Nah- und Lupenbereich

Um dem Leser das Rechnen zu ersparen, wurden mit Computerhilfe einige neuartige Tabellen erstellt. Tabelle 1 gibt direkt die „förderlichen Blendeneinstellungen“ für die wichtigsten Abbildungsmaßstäbe und fünf verschiedene max. Streukreis-Durchmesser an. Die Tabelle ist für eine mittlere Wellenlänge von $546 \text{ nm} = 0,000546 \text{ mm} = \text{Grün/Gelbgrün}$ gerechnet. Nehmen wir beispielsweise an, eine Lupenaufnahme im Abbildungsmaßstab 7 : 1 soll unter zugrunde gelegtem max. Streukreisdurchmesser von $1/50 \text{ mm}$ (entsprechend einer max. Grenzauflösung von 50 L/mm) entstehen. Dann darf gemäß Tabelle 1 das Objektiv nur bis 3,8 abgeblendet werden. Zunächst dürfte nur selten ein Objektiv mit 3,8 graviert sein. Tabelle 5 hilft dabei, diesen Zahlenwert in eine der üblichen $1/2$ - oder $1/3$ -Blendenstufungen zu „übersetzen“. Blende 3,8 liegt danach um $1/6$ -Stufe unter dem Blendenwert 4,0. Nun dürfen jedoch übliche, fernkorrigierte Foto-Objektive im Nah- und Lupenbereich meistens nicht über Blende 8 aufgeblendet werden, weil sonst die optische Leistung stark abfällt. Hier zeigen sich schon die Grenzen universeller und fernbereichskorrigierter Aufnahmeobjektive im Lupenbereich. Im vorstehenden Beispiel bleibt dem Benutzer nur die Wahl zwischen der „Beugungs-Grenzblende“ 3,8 (mit dem Erfolg schlechter Allgemeinschärfe wegen unzureichender Objektivleistung) oder der Blende 8, bei der das Objektiv hinreichende Leistung auch im Lupenbereich zeigen würde, aber infolge Beugung nur noch etwa 23 L/mm aufgelöst werden. Der Praktiker wird sich in solchen Fällen meistens für die kleinere Blende mit hinreichender Objektivleistung entscheiden. Nur ganz bestimmte Spezialobjektive dürfen mit größeren Blenden als etwa 8,0 im Nah- und Lupenbereich benutzt werden. Die Grenzen für ein fernkorrigiertes Foto-Objekt im Lupenbereich lassen sich aus Tabelle 1 entnehmen, indem man die „förderlichen Blenden“ zwischen etwa 8,0 und 11 aufsucht und den

Streukreis-Durchmessern bzw. Abbildungsmaßstäben gegenüberstellt.

Im allgemeinen wird es das Ziel des Fotografen sein, einen nützlichen Kompromiß zwischen Beugungsunschärfe und Schärfentiefe zu schließen. Dabei helfen die Tabellen 1 und 2 bei wechselseitiger Inanspruchnahme. Eine Aufgabenstellung:

Ein sehr kleines Objekt mit $0,3 \text{ mm}$ Tiefe in axialer Richtung soll in bestmöglicher Schärfe fotografiert werden. Aus Tabelle 2 entnehmen wir, daß beim erforderlichen Abbildungsmaßstab 6:1 für $0,28 \text{ mm}$ Schärfentiefe auf etwa Blende 22 eingestellt werden muß. Andererseits sagt Tabelle 1 dazu, daß beim genannten Abbildungsmaßstab und $1/30 \text{ mm}$ Streukreisdurchmesser nur bis 7,1 ($5,6 + 2/3$) abgeblendet werden darf. Man wird sich in fast jedem Fall zugunsten der Schärfentiefe entscheiden und die Blende 22 einstellen. Die durch Beugung verringerte allgemeine Auflösung (im Beispiel nur noch $9,7 \text{ L/mm}$) nimmt man dann in Kauf. Oder man entschließt sich zu einem kleineren Abbildungsmaßstab, der bei Wahrung des max. Streukreisdurchmessers von $1/30 \text{ mm}$ (= 30 L/mm) und Einstellung von Blende 11 nicht größer als etwa 3:1 ausfallen dürfte. Bitte ermitteln Sie diese Werte übungshalber anhand von Tabelle 1 und 2: Gesucht wird ein Blendenwert und Abbildungsmaßstab in Tabelle 1, der die gewünschte Schärfentiefe von etwa $0,3 \text{ mm}$ ergibt. In Tabelle 2 ist ein Blendenwert und Abbildungsmaßstab zu suchen, die mit den Daten aus Tabelle 1 korrespondieren und $z = 1/30 \text{ mm}$ entsprechen. Es ist jedoch zwecklos, den Verzicht an Abbildungsgröße durch eine um den Faktor 2 stärkere Positivvergrößerung wettmachen zu wollen. Das gelingt nur zum Teil, weil sich die $1/30 \text{ mm}$ Streukreisdurchmesser mitvergrößern auf $1/15 \text{ mm}$. Doch ist dieser Wert (entsprechend 15 L/mm) immer noch erheblich besser als die Grenzauflösung beim Abbildungsmaßstab 6:1 und Blende 22 mit $9,7 \text{ L/mm}$. Fazit: In unserem Beispiel zeigen

Tabelle 1

„Förderliche Blendeneinstellungen“ für verschiedene Streukreis-Durchmesser und Abbildungsmaßstäbe. Streukreis-Durchmesser in ‚mm‘.

Abbildungsmaßstäbe	„förderliche Blendeneinstellungen“ bei ...				
	$z = 1/10$	$z = 1/20$	$z = 1/30$	$z = 1/50$	$z = 1/100$
1 : ∞	150	75	50	30	15
1 : 5	125	63	42	25	12,5
1 : 2	100	50	33	20	10
1 : 1	75	38	25	15	7,5
2 : 1	50	25	17	10	5,0
3 : 1	38	19	12,5	7,5	3,8
4 : 1	30	15	10	6	3,0
5 : 1	25	12,5	8,3	5,0	2,5
6 : 1	21	10,7	7,1	4,3	2,1
7 : 1	19	9,4	6,2	3,8	1,9
8 : 1	17	8,3	5,6	3,3	1,7
10 : 1	14	6,8	4,5	2,7	1,4
15 : 1	9,4	4,7	3,1	1,9	(0,9)
20 : 1	7,1	3,6	2,4	1,4	(0,7)
30 : 1	4,8	2,4	1,6	(1,0)	—
50 : 1	2,9	1,5	(1,0)	(0,6)	—

Die Tabellenwerte gelten streng nur für eine „mittlere Wellenlänge“ von 546 nm (Grün-Gelbgrün = Maximum der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges).

Tabelle 2

Gesamter Schärfentiefebereich in ‚mm‘ für Abbildungsmaßstäbe zwischen 1 : 2 und 50 : 1 (für $z = 1/30$ mm).

Abbildungsmaßstäbe	Einstell-Blendenwerte							
	5,6	8	11	16	22	32	45	64
1 : 2	2,2	3,2	4,4	6,3	8,7	12,7	18,0	25,6
1 : 1	0,74	1,06	1,45	2,11	2,90	4,22	6,0	8,5
2 : 1	0,28	0,40	0,54	0,79	1,09	1,58	2,25	3,20
3 : 1	0,16	0,23	0,32	0,47	0,65	0,94	1,33	1,90
4 : 1	0,12	0,16	0,23	0,33	0,45	0,66	0,94	1,33
5 : 1	0,09	0,13	0,17	0,25	0,35	0,51	0,72	1,02
6 : 1	0,07	0,10	0,14	0,21	0,28	0,41	0,58	0,83
7 : 1	0,06	0,09	0,12	0,17	0,24	0,35	0,49	0,70
8 : 1	0,05	0,07	0,10	0,15	0,20	0,30	0,42	0,60
10 : 1	0,04	0,06	0,08	0,12	0,16	0,23	0,33	0,47
15 : 1	0,03	0,04	0,05	0,08	0,10	0,15	0,21	0,30
20 : 1	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,11	0,16	0,22
25 : 1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,09	0,12	0,18
30 : 1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,10	0,15
50 : 1	0,008	0,011	0,015	0,022	0,030	0,044	0,06	0,09

Tabelle 3

„Förderliche Blendeneinstellungen“ bei einem max. Streukreisdurchmesser von $1/30$ mm und für verschiedene Abbildungsmaßstäbe und „Lichtfarben“ (Wellenlängen).

Abbildungsmaßstäbe	förderliche Blenden für ...				
	Rot	Grün/ Gelbgrün	Blau	Infrarot	Ultraviolett
	700 nm	546 nm	480 nm	800 nm	350 nm
1 : ∞	39	50	57	34	78
1 : 2	26	33	38	23	52
1 : 1	20	25	29	17	39
2 : 1	13	17	19	11	26
3 : 1	9,8	12,5	14	8,5	20
5 : 1	6,5	8,3	9,5	5,7	13
7 : 1	4,9	6,3	7,1	4,3	9,8
10 : 1	3,5	4,5	5,2	3,1	7,1
15 : 1	2,4	3,1	3,6	2,1	4,9
25 : 1	1,5	1,9	2,2	1,3	3,0

sich schon deutlich die Grenzen der Lupen-
fotografie. Im Zweifelsfall kann es vorteil-
haft sein, das Objekt etwas kleiner abzubilden.

Tabelle 1 enthält Rubriken für verschiedene Schärfenansprüche (Streukreisdurchmesser) und erleichtert die Wahl der günstigsten Kompromißbedingungen. Tabelle 2 ist starr auf die bei Kleinbild- und Mittelformaten geltenden max. Streukreisdurchmesser von $1/30$ mm bezogen. Für kleinere Streukreis-
durchmesser muß weiter abgeblendet werden. Werden $z = 1/50$ mm gewünscht, muß der abgelesene Blendenwert mit 1,7, für $z = 1/100$ mm mit 3,3 multipliziert werden. Gibt man sich mit größeren Streukreisdurchmessern zufrieden, wird die abgelesene Blende für $z = 1/20$ mm mit 0,7 und für $z = 1/10$ mm mit 0,3 multipliziert.

Die Tabellen 1 und 2 (in Verbindung mit Tabelle 5) sind unentbehrlich für alle Fotografen, die im Lupenbereich kontrolliert arbeiten möchten. Obwohl in den Formeln (1) und (4) die Wellenlänge des Lichts vorkommt, haben wir für Tabelle 1 durch den Bezug auf eine mittlere Wellenlänge diesen Parameter zunächst übergangen. Bei Farbaufnahmen und Aufnahmen auf panchromatische Schwarzweißfilme ohne Filter sind ohnehin alle Wellenlängen des sichtbaren Spektrums beteiligt. Anders sieht die Sache aus, wenn auf speziell sensibilisierte Filme oder mit strengen Farbfiltern fotografiert wird. Dann gibt es zumindest eine dominierende Wellenlänge, die bei der Feststellung von Beugungsunschärfe und „förderlicher Blendeneinstellung“ nicht mehr ohne weiteres vernachlässigt werden darf. Tabelle 3 zeigt, welche „förderlichen Blenden“ bei verschiedenen „Lichtfarben“ bzw. Wellenlängen eingestellt werden sollten. Bei gleicher Blendeneinstellung ist das Auflösungsvermögen für ultraviolette Strahlung am besten und für infrarote Strahlung am schlechtesten. Deshalb bedient man sich bei sehr hohen Anforderungen an das Auflösungsvermögen (z. B. in der Halbleiterherstellung usw.) gern der ultravioletten Strahlung mit ihrem besseren Auflösungsvermögen und der günstigen Energie- und Frequenzlage. Andererseits kann bei Infrarot-Aufnahmen — wie sicher bekannt — nur mit einem recht begrenzten Auflösungsvermögen gerechnet werden bzw. die ohnehin harten Grenzwert-Bedingungen werden noch erheblich ungünstiger als bei mittleren Wellenlängen. Für rot- und orangegefilterte Schwarzweißaufnahmen sollten die Werte für 700 nm (Rot) zugrunde gelegt werden. Orthochromatisch sensibilisierte Filme lassen sich gemäß ihrer spektralen Empfindlichkeit (im allgemeinen ab 600 nm mit Maximum bei etwa 550 nm) am besten nach der Rubrik für 546 nm (Grün/Gelbgrün) einschätzen. Kommen strenge Blaufilter bzw. sogenannte „unsensibilisierte“ oder „blauempfindliche“ Emulsionen zur Verwendung, gilt in etwa die Rubrik für 480 nm (Blau).

Tabelle 4 nennt die „förderlichen Blendeneinstellungen“ für Unendlich, unmittelbar auf Wellenlängen und verschiedene Streukreis-Durchmesser bezogen. Für den Nah- und Lupenbereich sind diese Blendenwerte als ‚ k_{eff} ‘ anzusehen und mit Hilfe von Formel (3) auf die Einstellwerte ‚ k ‘ für bestimmte Ab-

Tabelle 4

„Förderliche Blendeneinstellung“ für ∞ (1 : ∞) bei verschiedenen Wellenlängen und für verschiedene max. Streukreisdurchmesser.

Wellenlänge	entsprechend etwa ...	„förderliche Blenden“ (∞) für ...		
		$z = 1/10$ mm	$z = 1/30$ mm	$z = 1/100$ mm
800 nm	Empfindlichkeitsmaximum der Schwarzweiß-Infrarotfilme	102	34	10,2
750 nm	Infrarot, nah	109	36	10,9
700 nm	Grenze zwischen sichtbarem Rot und Infrarot	117	39	11,7
650 nm	Rot/Orange	126	42	12,6
600 nm	Abs.kante von Rotfiltern	137	46	13,7
550 nm	Gelb; Abs.kante von Orangefiltern	149	50	14,9
500 nm	Grün	164	55	16
450 nm	Blau; Abs.kante von Gelbfiltern	182	61	18
400 nm	Grenze zwischen sichtbarem Violett und Ultraviolett; Abs.kante von UV-Sperrfiltern	205	68	21
350 nm	Ultraviolett	234	78	23

bildungsmaßstäbe umzurechnen. Für $z = 1/100$ mm und 650 nm ist $k_{\text{eff}} = 12,6$. k' wird dann nach (3) = 3,15 für $m = 3:1$. Diesen Wert erhält man auch, wenn man nach (4) direkt rechnet. Aber Tabelle 4 dient mehr der begriffsbildenden Übersicht als dem praktischen Gebrauch, der durch Tabelle 3 hinreichend abgedeckt ist.

Abschließend ein praktisches Beispiel dafür, welche Objektiefe sich mit einem max. Streukreisdurchmesser von $1/30$ mm schärfenmäßig bei verschiedenen Wellenlängen erfassen läßt. Gerechnet wird nach (4) und (2). Hinreichend genau läßt sich das Beispiel auch aus den Tabellen 3 und 2 ablesen. Aufzunehmen ist im Abbildungsmaßstab 5:1 auf unsensibilisierten Schwarzweißfilm (bzw. mit strengem Blaufilter), auf Farbfilm oder panchromatischen Schwarzweißfilm ohne Filter und auf Infrarotfilm mit Schwarzfilter.

- Aufnahme auf unsensibilisierten Schwarzweißfilm bzw. mit strengem Blaufilter (entsprechend 480 nm). „Förderliche Blendeneinstellung“ = 9,5. Damit erreichte Schärfentiefe = 0,152 mm.
- Aufnahme auf Farbfilm oder panchromatischem Schwarzweißfilm ohne Filter (entsprechend etwa dem mittleren Wellenlängenwert von 546 nm). „Förderliche Blendeneinstellung“ = 8,3. Damit erreichte Schärfentiefe = 0,133 mm.
- Aufnahme auf Infrarotfilm mit „Schwarzfilter“ (entsprechend etwa 800 nm). „Förderliche Blendeneinstellung“ = 5,7. Damit erreichte Schärfentiefe = 0,091 mm.

Auf dem unsensibilisierten Film läßt sich gegenüber dem Infrarotfilm eine rund 1,7mal größere Objektiefe ausreichend scharf (mit $z = 1/30$ mm) erfassen.

Allgemeine Regeln

Ebene Objekte wie beispielsweise Dünnschnittpräparate oder Gesteinsschliffe nimmt

Tabelle 5

Die wichtigsten Blenden-Zwischenwerte.

Blendenstufungen	= exakte Blendenwerte
2,8	2,8
$2,8 + 1/3$	3,2
$2,8 + 1/2$	3,4
$2,8 + 2/3$	3,6
4,0	4,0
$4,0 + 1/3$	4,5
$4,0 + 1/2$	4,8
$4,0 + 2/3$	5,0
5,6	5,6
$5,6 + 1/3$	6,3
$5,6 + 1/2$	6,8
$5,6 + 2/3$	7,1
8,0	8,0
$8 + 1/3$	9
$8 + 1/2$	9,5
$8 + 2/3$	10
11	11
$11 + 1/3$	12,5
$11 + 1/2$	13,5
$11 + 2/3$	14,5
16	16
$16 + 1/3$	18
$16 + 1/2$	19
$16 + 2/3$	20
22	22
$22 + 1/3$	25
$22 + 1/2$	27
$22 + 2/3$	29
32	32
$32 + 1/3$	36
$32 + 1/2$	39
$32 + 2/3$	41
45	45
$45 + 1/3$	51
$45 + 1/2$	55
$45 + 2/3$	58
64	64

man mit der „förderlichen Blende“ für einen sehr kleinen Streukreisdurchmesser (z. B. $1/100$ mm) auf, soweit die Korrektur des Objektivs so große Blenden im Nahbereich erlaubt.

Objekte mit Tiefenausdehnung lassen sich oft nicht in der ursprünglich gewünschten Auflösung erfassen. Es ist dann günstiger, für eine große Schärfentiefe weiter abzublenzen und stärkere Beugungsunschärfe in Kauf zu nehmen. Oder man verkleinert den Abbildungsmaßstab (bildet das Objekt kleiner ab) und verbessert damit die Voraussetzungen für einen günstigen Kompromiß zwischen allgemeiner Schärfe und Schärfentiefe.

Da sich aufgrund der geschilderten Fakten ohnehin nur eine begrenzte Auflösung realisieren läßt, ist es nicht sinnvoll, für Lupenaufnahmen immer hochauflösende Filme zu benutzen. Vielmehr sollte das Auflösungsvermögen des Films in einen nützlichen Kompromiß einbezogen werden. So löst jeder uns bekannte Schwarzweiß- oder Farbfilm beispielsweise die oft zugrundegelegten 30 L/mm ($z = 1/30$ mm) mit Sicherheit auf.

Nur ein Fingerhut ...

Beim Leser mit weniger Erfahrung im Lupenphotobereich könnte nun der Gedanke aufkommen, daß die vorstehend beschriebenen „Feinheiten“ nur bei sehr speziellen Objekten zu beachten sind. Das ist nicht so, wie wir an einem alltäglichen Objekt beweisen werden.

Zu fotografieren ist ein fein ziselierter Fingerhut von etwa 20 mm Höhe und 17 mm Durchmesser. Auf dem Foto muß der halbe Durchmesser (8,5 mm) im Schärfentiefebereich liegen. Für die Kleinbildaufnahme wird der Abbildungsmaßstab 1:1 gewählt. Gemäß Tabelle 2 müßte für die benötigte Schärfentiefe auf Blende 64 abgeblendet werden (diese Blende ist nur an wenigen Spezialobjektiven einstellbar). Aus Tabelle 1 läßt sich unschwer schließen, daß bei Blende 64 ziemliche Beugungsunschärfen auftreten. Für $z = 1/30$ mm dürfte man höchstens bis 25 abblenden. Blende 64 liegt recht nahe beim Wert 75 für $z = 1/10$ mm. Die Nachrechnung mit (1) ergibt dann auch eine Grenzauflösung von 11,7 L/mm für Blende 64 und Abbildungsmaßstab 1:1. Der einfache Fingerhut läßt sich schon nicht mehr in der gewünschten Schärfe über seine Tiefenausdehnung hinweg fotografieren. Man muß sich mit etwa 12 L/mm zufrieden geben und ist damit kaum in der Lage, die feine Ziselierstruktur bis zu den letzten Einzelheiten wiederzugeben. Eine großformatige Vergrößerung würde aus normalem Betrachtungsabstand als „unscharf“ empfunden. Da der Fingerhut mit 20 mm Abbildungshöhe ohnehin nur ungenügend formatfüllend im Kleinbildformat steht, verbieten sich praktisch auch Experimente mit geringerem Abbildungsmaßstab. Auf diese Weise entziehen sich unzählige Kleinstobjekte der fotografischen Abbildung ganz oder teilweise, weil kein zufriedenstellender Kompromiß zwischen Schärfentiefe und Beugungsunschärfe herzustellen ist.