

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';  $k_{\text{eff}}$  = 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 , $k_{\text{eff}}$ ' 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 , $k_{\text{eff}}$ ' = 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  $50 \text{ L/mm}$ ) 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  $23 \text{ L/mm}$  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  $1/30 \text{ mm}$  (=  $30 \text{ L/mm}$ ) 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  $15 \text{ L/mm}$ ) 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/<br>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 Streukreisdurchmes-  
sern 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 Ta-  
belle 5) sind unentbehrlich für alle Fotogra-  
fen, 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 Schwarz-  
weißfilme ohne Filter sind ohnehin alle Wel-  
lenlängen des sichtbaren Spektrums betei-  
ligt. 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 Beugungs-  
unschärfe und „förderlicher Blendeneinstel-  
lung“ nicht mehr ohne weiteres vernachlässigt  
werden darf. Tabelle 3 zeigt, welche  
„förderlichen Blenden“ bei verschiedenen  
„Lichtfarben“ bzw. Wellenlängen eingestellt  
werden sollten. Bei gleicher Blendeneinstel-  
lung ist das Auflösungsvermögen für ultra-  
violette Strahlung am besten und für infra-  
rote Strahlung am schlechtesten. Deshalb  
bedient man sich bei sehr hohen Anforder-  
ungen an das Auflösungsvermögen (z. B. in  
der Halbleiterherstellung usw.) gern der  
ultraviolette 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 orange-  
gefilterte Schwarzweißaufnahmen sollten die  
Werte für 700 nm (Rot) zugrunde gelegt wer-  
den. Orthochromatisch sensibilisierte Filme  
lassen sich gemäß ihrer spektralen Empfind-  
lichkeit (im allgemeinen ab 600 nm mit Maxi-  
mum bei etwa 550 nm) am besten nach der  
Rubrik für 546 nm (Grün/Gelbgrün) einschät-  
zen. Kommen strenge Blaufilter bzw. so-  
genannte „unsensibilisierte“ oder „blau-  
empfindliche“ Emulsionen zur Verwendung,  
gilt in etwa die Rubrik für 480 nm (Blau).

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

**Tabelle 4**

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

| Wellenlänge | entsprechend etwa ...  | „förderliche Blenden“ ( $\infty$ ) 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  $k_{eff} = 12,6$ .  $k'$  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.