

# Beugungsunschärfe: Basics & Praxis

Eine Einführung von Herbert 41 für die Freunde des Lumix-Forums

## 1 Einleitung

Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen der Beugung an der Blende eines Objektivs und die Auswirkungen auf die Digitalfotografie in aller Kürze dargestellt. Hierbei liegt der Fokus auf der anschaulichen Darstellung der Tendenzen und den praktischen Schlussfolgerungen für den anspruchsvollen Amateurfotografen.

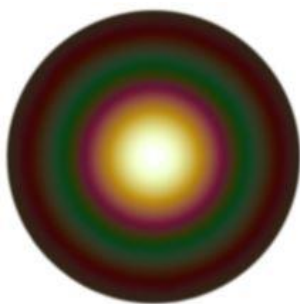
Es wird betont, dass die gesamte Darstellung stark vereinfacht ist. Wie sich jedoch im Vergleich mit den praktischen Versuchen ergibt, sind die Ergebnisse durchaus praxisrelevant. Wer sich tiefergehend mit Beugung und Fotografie auseinandersetzen will, wird auf die zahlreiche Literatur zu diesem Thema verwiesen. Eine Auswahl findet sich am Ende dieses Beitrags.

## 2 Physikalische Grundlagen der Beugung [1, 3, 4, 5, 6]

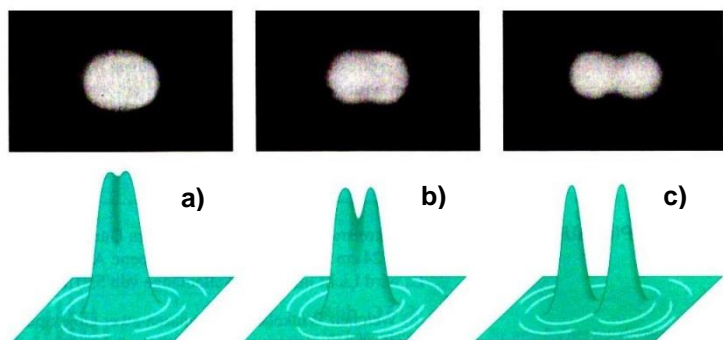
Die Untersuchungen beschränken sich auf die Beugung an einer Blende mit kreisrunder Öffnung und unendlicher Bildweite. Ferner wird als Objektiv eine einzige dünne Linse vorausgesetzt. Die Ergebnisse gelten deshalb nur eingeschränkt für moderne Objektive mit mehreren Linsen und für Nahaufnahmen.

### Beugung an einem kreisförmigen Loch (z. B. Blende der Optik)

Die Lichtstrahlen, die von einem Punkt eines Objekts durch ein Objektiv und dessen Blende auf einen Sensor fallen, erzeugen dort keinen Punkt, wie es nach der geometrischen Optik bei exakter Fokussierung idealerweise der Fall sein sollte. Vielmehr werden die Strahlen am Rand der Blende abgelenkt. Hierdurch entsteht auf dem Sensor statt eines Punktes ein kreisringförmiges konzentrisches Beugungsmuster (Bild 1). In der Mitte befindet sich eine kreisförmige Scheibe, das Beugungs- oder Airy-Scheibchen, mit dem Intensitätsmaximum im Zentrum. Um diesen Fleck herum sind helle und dunkle Ringe konzentrisch gelagert. Sie sind von deutlich geringerer Intensität, sodass sie aus dem Blickwinkel der Fotografie vernachlässigt werden können.

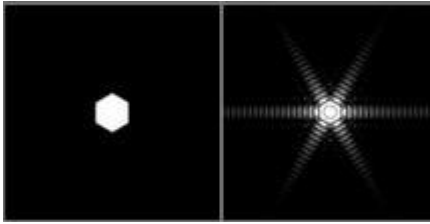


**Bild 1.** Beugungsbild einer mit weißem Licht bestrahlten Lochblende [3]



**Bild 2.** Abbildung zweier dicht benachbarter Objektpunkte  $P_1$  und  $P_2$  oben: Abbild auf dem Sensor, unten: Intensitätsverteilung [1]

## Auflösungsvermögen



**Bild 3.** Beugungsbild einer sechseckigen Blende [4]

Aus Sicht des Fotografen interessiert die getrennte Erkennbarkeit zweier dicht nebeneinanderliegender Objektpunkte  $P_1$  und  $P_2$ , also die Auflösbarkeit. In Bild 2a überlagern sich die beiden Hauptmaxima der Beugungsmuster so stark, dass man nicht entscheiden kann, ob es sich um ein Objekt oder mehrere Objekte handelt. In den Bildern 2b ist zwar zu erkennen, dass zwei Objekte vorhanden sind, jedoch kann von einer scharfen Abbildung noch nicht die Rede sein.

In Bild 2b ist der Spezialfall dargestellt, dass das Hauptmaximum des einen Musters mit dem ersten Minimum des anderen Musters zusammenfällt. Die mathematische Untersuchung des Problems ist kompliziert; sie führt auf Bessel-Funktionen und wird hier übergangen. Für den Winkel  $\varphi_R$  zwischen den Lichtstrahlen von  $P_1$  und  $P_2$  gilt:

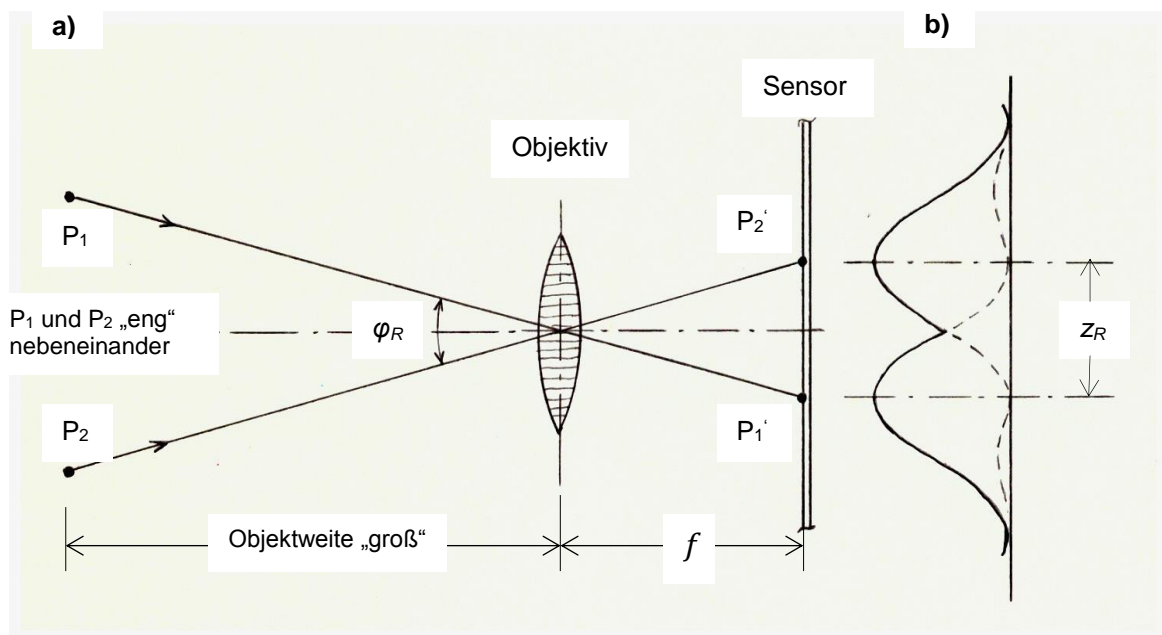
$$\varphi_R = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{Rayleigh-Kriterium}) \quad (1)$$

( $\lambda$  = Wellenlänge des Lichts ;  $d$  = Durchmesser der Blendenöffnung)

$$0,38 \cdot 10^{-3} < \lambda < 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (\text{Spektrum des weißen Lichts}) \quad (2)$$

(violett)                      (rot)

Da sich weißes Licht aus Wellen unterschiedlicher Wellenlänge  $\lambda$  zusammensetzt, sind die Beugungsmuster des weißen Lichts gemäß (1) farbig (Bild 1).



**Bild 4.** a) Geometrie, b) Intensität des Beugungsmusters

Aus (1) ergibt sich mit Bild 4 und für die hier vorliegenden, sehr kleinen Winkel ( $\tan \varphi \approx \varphi$ ) der Abstand der beiden Maxima:

$$z_R = f \varphi_R = 1,22 \lambda \frac{f}{d} \quad (f = \text{Brennweite des Objektivs}) \quad (3)$$

Mit der Blendenzahl  $B$

$$B = \frac{f}{d} \quad (B = \text{Blendenzahl}) \quad (4)$$

ergibt sich aus (3) der Abstand der beiden Maxima:

$$z_R = 1,22 \lambda B \quad (5)$$

Für die Beurteilung der Schärfe eines Fotos ist der Durchmesser des Zerstreuungskreises, hier also der Durchmesser  $z_B$  des Beugungsscheibchens. Wie auch direkt aus Bild 4b hervorgeht, ist dieser gerade doppelt so groß wie der Abstand  $z_R$ :

$$z_B = 2 z_R = 2,44 \lambda \frac{f}{d} = 2,44 \lambda B \quad (6)$$

### Überraschendes Fazit

#### Bei vorgegebener Blendenzahl $B$

hat der Durchmesser  $z_B$  des Zerstreuungskreises  
für alle Kameras mit einem beliebigen Sensor  
für alle Objektive vom Weitwinkel- bis zum Teleobjektiv  
trotz der verschiedenen Blendendurchmesser  $d$   
ein- und denselben Wert. (7)

### **Makro-Fotografie** (Anmerkung zu den Gln 3, 5, 6)

Die Gleichungen 3, 5 und 6 gelten nur für „weit“ entfernte Objektpunkte  $P_1$  und  $P_2$ , also für Fälle, in denen die Bildweite ungefähr gleich der Brennweite des Objektivs ist. Für Nah- und Makro-Aufnahmen sind die Verhältnisse komplizierter; deshalb wird hierauf nicht weiter eingegangen (Stichworte: Fraunhofer- und Fresnelbeugung [6]).

## **3 Auswirkungen auf die praktische Digitalfotografie**

### **Maß für die Schärfe**

In der Fotografie wird die Schärfe einer Aufnahme entweder an der Anzahl der Linien (oder Linienpaare) pro Längeneinheit, die gerade noch aufgelöst werden, oder am Zerstreuungskreisdurchmesser  $Z_{gr}$  definiert. Da die Beugungsbilder kreisförmig sind, wird hier die Schärfe zweckmäßig mit Hilfe des  $Z_{gr}$ -Wertes beurteilt. Allgemein gilt:

$$Z_{gr} < \approx D/1500 \quad (D = \text{Länge der Sensor-Diagonalen}) \quad (8)$$

Der  $Z_{gr}$ -Wert wird durch zwei verschiedene Einflüsse „aufgezehrt“ (die Bewegungsunschärfe bleibt hier selbstverständlich außen vor):

- die optischen und mechanischen Unzulänglichkeiten des Objektivs, insbesondere bei kleinen Blendenzahlen, im Folgenden als „System-Unschärfe  $z_s$ “ bezeichnet
- die Beugungsunschärfe  $z_B$

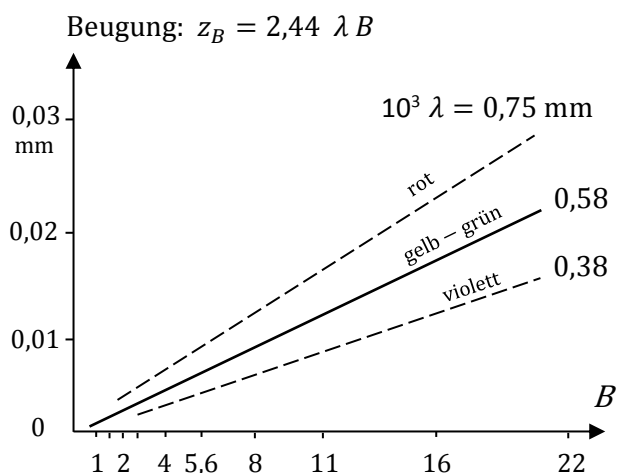


Bild 4. Beugungsunschärfe

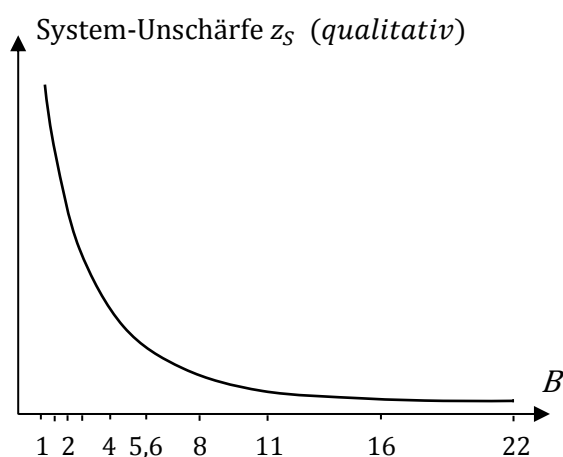


Bild 5. System-Unschärfe

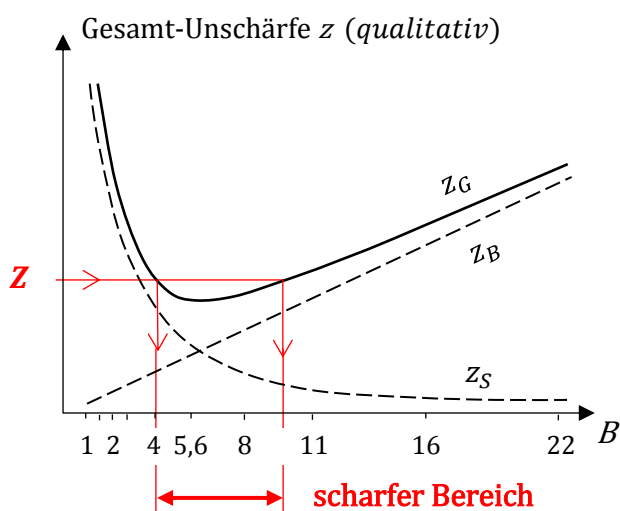


Bild 6. Gesamt-Unschärfe

Die System-Unschärfe ist für jedes einzelne Objektiv verschieden; sie kann hier nur qualitativ (d. h. ohne konkrete Zahlenangaben) berücksichtigt werden. Hingegen kann die Beugungsunschärfe (unter den aufgeführten, stark vereinfachten Annahmen) quantitativ angegeben werden. Beide Einflüsse hängen in erster Linie von der Blendenzahl  $B$  ab.

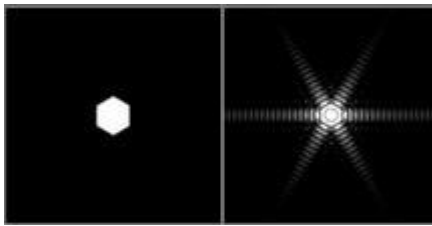
In Bild 4 ist der (in Abhängigkeit der Blendenzahl  $B$  gemäß (6) lineare!) Verlauf der Beugungsunschärfe  $z_B$  im Gelb-Grün-Bereich ( $\lambda = 0,58 \mu\text{m}$ ) dargestellt. Zusätzlich sind in Bild 5 die beiden gestrichelten Geraden für  $\lambda = 0,38$  (rot) und  $0,75 \mu\text{m}$  (violett) eingezeichnet. Die Geraden gelten für alle Brennweitenbereiche.

Bild 5 zeigt den qualitativen Verlauf der System-Unschärfe  $z_S$  in Abhängigkeit von der Blendenzahl  $B$ . Die System-Unschärfe wirkt sich vor allem im Bereich kleiner Blendenzahlen negativ auf die Schärfe aus, während sie bei großen Blendenzahlen eine untergeordnete Rolle spielt.

In Bild 6 ist die Summe aus System-Unschärfe und Beugungsunschärfe, also die Gesamt-Unschärfe  $z$  dargestellt. (Wie die Unschärfen tatsächlich interagieren und ob die hier vorgenommene einfache Addition der Zerstreuungskreise einigermaßen zutreffend ist, ist eine offene Frage.)

Das Minimum der Unschärfe liegt bei mittleren Blendenzahlen, hier ungefähr bei Blendenzahlen von 5,6 bis 8. Bei sehr gut korrigierten Objektiven kann die maximale Schärfe sogar

um die Blendenzahl 4 liegen. Wie gesagt, handelt es sich bei diesen Angaben nur um die Abschätzung einer Tendenz, die allerdings gut von den Probeaufnahmen bestätigt wird.



**Bild 7.** Beugungsbild einer sechseckigen Blende [4]

### Einfluss der Blendenform

Die Blende moderner Objektive besteht aus einzelnen Lamellen, die je nach Anzahl der Elemente die Kreisform mehr oder weniger gut durch ein regelmäßiges Vieleck (Polygon) annähern. In Bild 7 ist zu erkennen, dass sich das Beugungsscheibchen ebenfalls als Polygon einstellt, von dessen Eckpunkten zusätzlich strahlenförmige Beugungserscheinungen ausgehen. Demnach wären Objektive mit hoher Lamellenzahl zu bevorzugen.

### Einfluss des Sensorformats

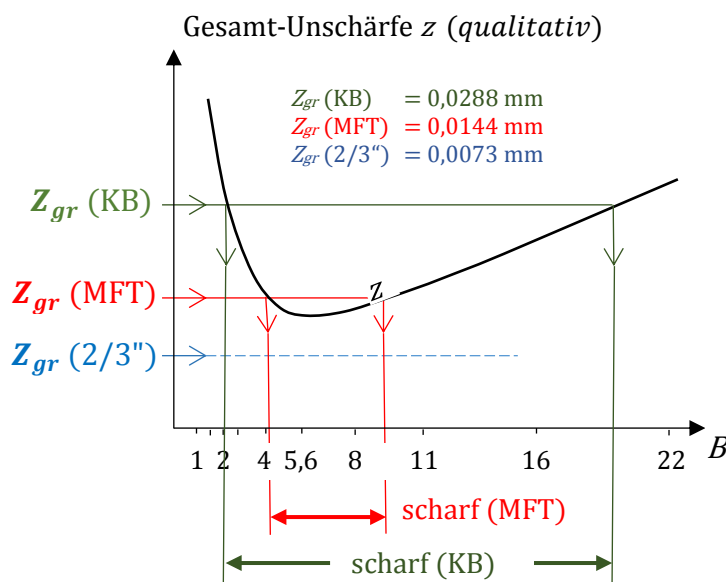
Gemäß (8) ist das Maß  $Z_{gr}$  für die Definition der Schärfe von der Länge der Sensordiagonalen linear abhängig.

Die weitere Auswertung erfolgt für drei Sensorgrößen:

$$2/3'': \quad D = 11,0 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad Z_{gr} = 11,0 / 1500 = 0,0073 \text{ mm}$$

$$\text{MFT:} \quad D = 21,6 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad Z_{gr} = 21,6 / 1500 = 0,0144 \text{ mm}$$

$$\text{Vollformat:} \quad D = 43,3 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad Z_{gr} = 43,3 / 1500 = 0,0288 \text{ mm}$$



In Bild 8 sind diese  $Z$ -Werte und der jeweils zugehörige Schärfe-Bereich markiert. Wie zu erwarten, schrumpft der Schärfereich mit abnehmender Sensorabmessung, bis schließlich bei keiner Blende mehr scharfe Aufnahmen möglich wären (hier:  $2/3''$ -Sensor).

**Bild 8.** Schärfebereiche bei verschiedenen Sensortypen

Es gibt jedoch einige Maßnahmen, die die Beugungsunschärfe auch bei sehr kleinen Sensoren mildern: Nachschärfen / die Beugungsunschärfe bereits in der Kamera herausrechnen / die Blende durch Graufilter ersetzen (und stets mit kleinen Blendenzahlen fotografieren) usw.

**Tab. 1.** Beugungsunschärfe  $z_B$  im Vergleich mit dem  $Z_{gr}$ -Wert verschiedener Sensorgrößen

$B \rightarrow$	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32
$\downarrow 10^3 \lambda$	Beugungsunschärfe $z_B = 2,44 \lambda B$										
0,38 mm	0,93	1,3	1,9	2,6	3,7	5,2	7,4	10	15	20	30
0,58 mm	1,4	2,0	2,8	4,0	5,7	7,9	11	16	23	31	45
0,75 mm	1,8	2,6	3,7	5,1	7,3	10	15	20	29	40	59
$\rightarrow z_B \geq Z_{gr} (2/3'')$						$\rightarrow z_B \geq Z_{gr} (MFT)$		$\rightarrow z_B \geq Z_{gr} (KB)$			

- Anm.:** 1) Rechts von der jeweiligen Treppenlinie wird der Schärfe-Grenzwert  $Z_{gr}$  allein durch die Beugungsunschärfe aufgezehrt  
 2) Wegen der getroffenen starken Vereinfachungen sind alle Zahlenwerte in der Tabelle auf zwei führende Ziffern gerundet.

### Fazit:

Gerade bei kleinen Sensoren sollte die Lichtstärke der Objektive möglichst groß sein. Der Verlust an Tiefenschärfe bei kleinen Blendenzahlen wird durch die geringe Brennweite des Objektivs teilweise kompensiert.

### Einfluss der Größe der Pixel

Wird bei einer fest vorgegebenen Abmessung eines Sensors die Zahl der Pixel erhöht, so müssen die einzelnen Pixel zwangsläufig kleiner werden. Dies hat zur Folge, dass der Beugungsfleck eine größere Anzahl von Pixeln erfasst und deshalb die Beugungsunschärfe zunehmen kann. Von der Anzahl der Pixel eines Sensors auf die Aufnahmequalität zu schließen, ist also nicht immer richtig („Pixelwahn“).

## 4 Probeaufnahmen

Wegen der eingeschränkten Gültigkeit der theoretischen Untersuchungen ist es erforderlich, die spezifische Unschärfe eines Kamerasystems mittels Probeaufnahmen zu untersuchen. Diese Aufnahmen müssen für jedes einzelne Objektiv und unter genau definierten Bedingungen gemacht werden. Die Zahl der Aufnahmen kann beträchtlich sein; für 5 Objektive mit Festbrennweite und 8 Blendenstufen ergeben sich bereits 40 Aufnahmen, für 3 Zoom-Objektive 72, wenn jedes Objektiv mit Anfangs-, mittlerer und Endbrennweite getestet wird. Wird auch der Makrobereich auf die Beugungsunschärfe getestet, verdoppelt sich die Zahl der Aufnahmen.

## Aufnahmebedingungen

Kameraseitig:

Stativ / sicherer, schwingungsfreier Untergrund / Fernauslöser / elektronischer Verschluss (wenn vorh.) / Vor-Auslösung des Spiegels bei DSLR-Kameras / Kamera und Objektiv möglichst im Schatten / Gegenlichtblende /  
manuelle Scharfstellung (stets auf dasselbe, geeignete Detail!)

Geeignete Motive:

Filigrane Objekte wie Gittermaste mit Seilen / Baukräne / Freilandleitungen / Wetterhähne, bei hinreichendem Kontrast

Wetterbedingungen:

schwachwindig bis windstill / gleichmäßige Beleuchtung (blauer bzw. bedeckter Himmel)

## Auswertung der Probeaufnahmen

Ausschnittvergrößerung eines für die Beurteilung der Schärfe geeigneten Bereichs (z. B. Teil eines Gittermastes mit Seilanschluss), Vergrößerung ca. 5-fach (linear),

Beurteilung der Schärfe auf einem geeigneten Monitor oder TV-Bildschirm, wobei möglichst jeweils 2 Aufnahmen nebeneinander auf dem Monitor platziert werden sollten

## 5 Anhang: Probeaufnahmen mit Lumix GX8 und mehreren Objektiven (MFT)

Der Autor hat insgesamt fast ein Dutzend Objektive getestet, darunter:

Panasonic 2,8/12-35mm , Panasonic 2,8/35-100mm , Leica 2,8-4/100-400mm,  
Tamron 3,5-5,8/14-150mm , Voigtländer Nokton 0,95/25mm,  
Zeiss Contarex Olympia-Sonnar 2,8/135mm , Zeiss Contarex Planar 2/50mm.

Die in den Abschnitten 1 bis 3 theoretisch hergeleiteten Ergebnisse wurden von der Tendenz her überraschend gut bestätigt, sowohl hinsichtlich der Unabhängigkeit der Beugungsunschärfe von der Brennweite als auch hinsichtlich des optimalen Bereichs der Blendenwerte.

Als Beispiel sind zwei Ausschnittvergrößerungen der Probeaufnahmen mit den Blendenzahlen 4,5 und 22 mit der GX8 und dem Lumix Panasonic 35-100mm beigelegt. Trotz der geringen Bildgröße sind die Schärfenunterschiede infolge der Beugung deutlich zu erkennen.

## 6 Literatur

- [1] Halliday/Resnick/Walker: Physik. Wiley-VCH, Weinheim 2003
- [2] fotomagazin:  
<https://www.fotomagazin.de/technik/fotowissen-beugung-und-beugungskorrektur>
- [3] Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Beugungsscheibchen>
- [4] Cosmos: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Beugungsscheibchen>
- [5] Uni Oldenburg: [https://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user\\_upload/physik/ag/physikpraktika/download/GPR/pdf/Beugung\\_Fraunhofer\\_Fresnel.pdf](https://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/physik/ag/physikpraktika/download/GPR/pdf/Beugung_Fraunhofer_Fresnel.pdf)
- [6] Hecht, Eugene: Optik. 5. Aufl. Oldenbourg, München 2009