

Abbildungsschärfe I:

Optik, geometrische Schärfe und Schärfentiefe

Zwischen Aberration und Beugung – Nicht jede Blende ist eine gute Blende

Gleich von welchem Hersteller oder in welchem Format, eine Optik zeichnet nur in einem bestimmten Blendenfenster (englisch *Sweet Spot*) wirklich scharf. Die Rahmen dieses Fensters sind die **Aberration** auf der Seite der großen Öffnungen und die **Beugung** auf der Seite der kleinen Blenden.

Aberrationen sind durch die Abweichung von der idealen optischen Abbildung bedingte Fehler, die zu einem unscharfen und/oder verzerrtem Bild führen. Zu den Abbildungsfehlern zählt die **chromatische Aberrati-**

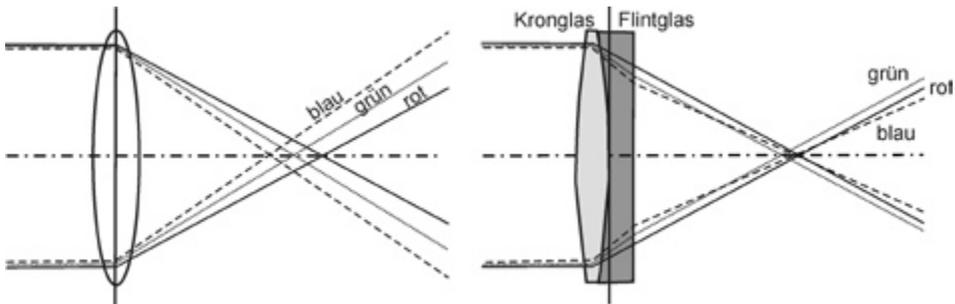


Abb. 36: Geometrie der chromatischen Aberration

on (auch **Farbfehler**). Sie ist dadurch bedingt, daß die Brechzahl jedes Materials mit der Wellenlänge des einfallenden Lichts variiert (dies wird Dispersion genannt). Mit den Brechzahlen der Gläser einer Optik schwankt aber auch die Brennweite des Abbildungssystems und damit auch der Abbildungsmaßstab der Teilbilder, die vom Licht unterschiedlicher Wellenlängen produziert werden. Diese fallen verschieden groß aus und das führt zu Farbsäumen, Kanten und Unschärfen im Bild. Dieser erste Effekt wird als **Farbquerfehler** bezeichnet. Darüber hinaus hängt aber auch die Schnittweite und damit der Abstand des Bildes von der letzten optischen Fläche des Systems von der Brechzahl (und damit indirekt von der Wellenlänge) ab. Aus diesem Grund werden die Teilbilder der unterschiedlichen Wellenlängen in verschiedenen Punkten abgebildet

und es kann nicht auf alle gleichzeitig fokussiert werden. Dieser zweite Effekt heißt **Farblängsfehler** und bewirkt ebenfalls eine Unschärfe im Bild. Hauptmittel gegen die chromatische Aberration ist der Einsatz zweier Linsen, sogenannter Achromaten, aus Glassorten, die für zwei Wellenlängen dieselbe Brechzahl aufweisen. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes sind die Apochromaten (zu erkennen an dem Kürzel APO auf der Optik), bei denen Glassorten mit anormaler Dispersion zum Einsatz kommen und die so dieselbe Brechzahl für drei Wellenlängenbereiche aufweisen. Aufgrund der notwendigen speziellen Glassorten sind apochromatisch korrigierte Optiken sehr teuer.

Die **sphärische Aberration** (auch **Öffnungsfehler** oder **Kugelgestaltsfehler** genannt) bewirkt, daß sich achsparallel einfallende oder vom gleichen

Abbildungsschärfe I:

Optik, geometrische Schärfe und Schärfentiefe

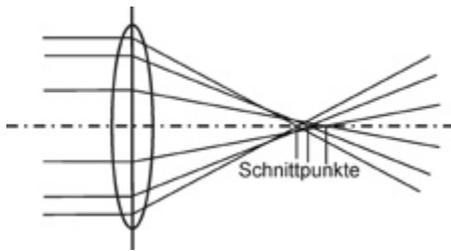


Abb. 37: Sphärische Aberration

Objektpunkt auf der optischen Achse ausgehende Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch das optische System nicht im selben Punkt treffen. Objektive, die unter sphärischer Aberration leiden, liefern ein weiches und etwas verschwommenes, aber scharfes Bild. Feine Objektdetails sind noch erkennbar, aber ihr Kontrast ist vermindert. Die sphärische Aberration kann deshalb gut zur Erzielung eines Weichzeichnungseffekts eingesetzt werden. Es gibt zu diesem Zweck Objektive, bei denen man die sphärische Aberration stufenlos in einem weiten Bereich einstellen kann. Korrigiert wird die sphärische Aberration durch den Einsatz von Linsen, die eine asphärische Oberfläche aufweisen. Da es aufwendig ist solche asphärisch gekrümmten Flächen zu schleifen, sind derartig korrigierte Objektive besonders teuer.

Die **Koma** (vom lateinischen *Coma* gleich Haar oder Schweif) ist ein Abbildungsfehler, der dadurch verur-

sacht wird, daß Lichtstrahlen, die von Objektpunkten abseits der optischen Achse kommen auch abseits dieser Achse gebündelt werden. Bei nicht korrigierten optischen Systemen erfolgt dies asymmetrisch, so daß anstelle eines scharfen Beugungsscheibchens ein Bildpunkt mit zum Rand der Optik gerichtetem „Schweif“ entsteht, der dem Phänomen seinen Namen gibt. Dies kann durch Ablenden gemindert werden. Aplanate sind Objektive, bei denen die Koma vollständig korrigiert ist.

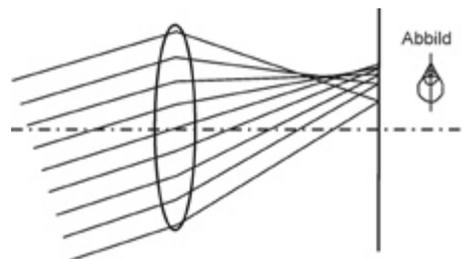


Abb. 38: Geometrie der Koma

Astigmatismus (auch **Punktlosigkeit**) entsteht, weil sich schräg zur Achse einfallenden Strahlen der Meridionalebene in einem anderen Punkt schneiden als die Strahlen der Sagittalebene. Dadurch entstehen zwei verschiedene Bildschalen, die verschieden stark gewölbt sind. Auf der einen Bildschale werden die Punkte als radiale und auf der anderen als tangential

Striche abgebildet. Objektive, bei denen der Astigmatismus korrigiert ist, nennt man Anastigmaten.

Weist ein Objektiv eine Bildfeldwölbung auf, so wird das Bild nicht auf einer Ebene, sondern auf einer gewölbten Fläche erzeugt. Die Position des Strahlenschnittpunkts längs der optischen Achse ist dann von der Bildhöhe abhängig, d. h. je weiter Objekt- und damit Bildpunkt von der Achse entfernt sind, umso mehr ist der Bildpunkt in Achsrichtung verschoben. Aus diesem Grund kann der flachliegende Film oder Bildsensor nicht überall ein scharfes Bild erzeugen. Stellt man auf die Bildmitte scharf, ist der Bildrand unscharf und umgekehrt. Die Bildfeldwölbung kann durch die geschickt gerechnete Anordnung der Linsen unterhalb einer gewissen Schwelle gehalten werden. Bei manchen Spezialkameras wird die Bildwölbung auch durch Anpressen des Bildträgers an eine entsprechend gekrümmte Fläche ausgeglichen.

Ein letzter Abbildungsfehler ist die **Verzeichnung**. Sie bewirkt, daß gerade Linien, deren Abbilder nicht durch die Bildmitte gehen, gekrümmt wiedergegeben werden. Der Abstand eines Bildpunktes von der Bildmitte hängt also auf nichtlineare Art von der Höhe des entsprechenden Objektpunkts ab. Anders ausgedrückt hängt der Abbildungsmaßstab von der Höhe

des Objektpunkts ab. Nimmt der Abbildungsmaßstab mit zunehmender Höhe ab, nennt man dies **tonnenförmige Verzeichnung**. Dann wird ein Quadrat mit nach außen gewölbten Seiten abgebildet und sieht ein wenig aus wie eine Tonne. Der umgekehrte Fall wird als **kissenförmige Verzeichnung** bezeichnet. Es können auch **wellenförmige Verzeichnungen** auftreten, wenn sich die beiden ersten Verzeichnungsarten verschieden stark überlagern. Dann werden gerade Linien wie Wellenlinien zu beiden Seiten gekrümmt.

Aplanat und Anastigmat sind heute nur noch historische Bezeichnungen, weil diese Korrekturen bei aktuellen Optiken Standard sind.

Die zur **Aberration** zusammengefaßten Faktoren unterliegen zu einem großen Teil der Kontrolle der Ingenieure und können durch entsprechende aufwendige Konstruktion schon bei großen Öffnungen nahezu ausgeschaltet werden. – Die Konstrukteure von Zeiss oder Leica beweisen dies immer wieder. Allerdings lassen sich diese Abbildungsfehler nicht „mal eben so“ berechnen. Wenn Sie also wissen wollen, wie gut ein bestimmtes Objektiv in

Abbildungsschärfe I:

Optik, geometrische Schärfe und Schärfentiefe

dieser Hinsicht abschneidet, müssen Sie Testberichte konsultieren oder Vergleichsaufnahmen bei verschiedenen Blendeneinstellungen machen. Die generell tradierte Regel besagt, daß die Aberration ihre geringste Ausprägung bei Abblendung auf zwei bis vier Stufen unter die maximale Öffnung aufweist. Ab dieser Blendenstufe öffnet sich das Fenster zu den scharfen Bildern. Wie groß es ist, wie weit es sich also in den Bereich der kleinen Öffnungen erstreckt, hängt von der Größe des zugrunde gelegten Zerstreuungskreises ab. Denn je kleiner die Öffnung ist, umso stärker fällt die damit unweigerlich einhergehende Beugung aus. – Der kurze Weg zur maximalen Bildschärfe führt also nicht über die Devise „abblenden, bis der Arzt kommt“

Etwas Grundsätzliches zur **Beugung** haben wir ja schon im Abschnitt „Die Beugung als physikalische Einschränkung“ im Kapitel „Das Auflösungsvermögen des visuellen Systems“ gelernt. Um Ihnen das Zurückblättern zu ersparen, rekapituliere ich noch mal kurz. Die Lichtwellen verlaufen normalerweise geradlinig durch den Raum. Treffen sie auf ein Hindernis oder passieren ein solches in großer Nähe („nah“ meint im Bereich weniger Wellenlängen), so werden sie auf der anderen Seite aus dieser geraden Richtung abgelenkt. Diesen Vorgang

nennen wir Beugung und er ist ein unvermeidbarer physikalischer Effekt und unabhängig von der Qualität der Optik. Je kleiner die Öffnung umso größer ist die Beeinträchtigung der Abbildung durch die Beugung. Aufgrund dieser Zerstreuung in unterschiedliche Richtungen legen die Lichtwellen dann nicht mehr alle dieselbe Entfernung zurück, sondern verlassen zum Teil ihre ursprüngliche Schwingungsrichtung. Das führt dazu, daß sie sich an einer Stelle überlagern und ergänzen bzw. an einer anderen ganz oder teilweise auslöschen. Diese Überlagerung (**Interferenz**) produziert ein **Beugungsmuster** (auch **Beugungsscheibchen**) das die höchste Intensität dort aufweist, wo sich die Wellen addieren und die geringste, wo sie sich auslöschen. Würden wir die Stärke an jeder Position einer geraden Linie messen, so ergäbe sich ein Band ähnlich dem, das Abb. 4 auf S. 14 in b) zeigt. Eine perfekt runde und daher ideale Blende würde ein Beugungsmuster produzieren, das nach seinem Entdecker, dem britischen Astronomen Sir George Airy (1835-1892), als **Airy-Scheibchen** (auch **Airy Disk**) bezeichnet wird. Auf einen praktischeren Fall übertragen können wir uns die Beugung wie bei einem Wasserschlauch vorstellen. Genügend Druck vorausgesetzt verläßt ihn das Wasser als nahezu runder

Strahl. Wenn wir die freie Öffnung aber mit den Fingern ein wenig zusammendrücken, wird der Strahl zu einem mehr oder weniger breiten Fächer auseinandergezogen.

Hier kommen wir nun auf unseren schon angesprochenen wichtigen Bezug zurück: Die Abbildungsschärfe ist beeinträchtigt, wenn das Beugungsscheibchen größer wird als unser maximal zulässiger Zerstreungskreis. Dann wird der auf der Gegenstandsseite vorhandene Punkt aufgrund der Ablenkung der Lichtwellen nicht mehr als solcher abgebildet, sondern zu einer Scheibe aufgeweitet. Die Frage lautet also: wie weit können wir Abblenden ohne Gefahr zu laufen die dadurch erreichte größere Schärfentiefe durch zu große Beugungsscheibchen zu konterkarieren? Um die Antwort zu finden, holen wir noch ein ganz bißchen weiter in die Physik aus.

Die Lichtintensität $I(r)$ hinter einer Blendenöffnung folgt der **Besselfunktion erster Ordnung** $J_1(r)$, wobei r für den Radius der Öffnung steht:

Formel 27

$$I(r) = \left(\frac{J_1(r)}{r} \right)^2$$

Damit können wir den Airy Disk mit seinen nach außen schwächer wer-

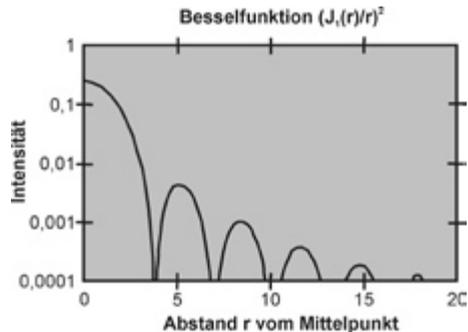


Abb. 39: Graphische Darstellung der Besselfunktion

denden Ringen berechnen, die nur bedeuten, daß die Lichtintensität in regelmäßigen Abständen auf null zurückgeht. Diese Oszillation um den Nullpunkt spiegelt die graphische Darstellung der Funktion in Abb. 39 wider. Tatsächlich gibt es eine unendlich große Anzahl dieser Oszillationen, aber rund 84% der Intensität finden wir am ersten Nullpunkt. Dieser liegt bei:

$$1,21967 * \lambda / 2 * R$$

λ = Wellenlänge des Lichts

R = Radius der Öffnung/Blende

Die Größe des Beugungsscheibchens ist umgekehrt proportional zur Öffnung. Das heißt, je größer die Öffnung, desto kleiner ist das Beugungsscheibchen. Außerdem ist seine Größe proportional zur Wellenlänge des

Abbildungsschärfe I:

Optik, geometrische Schärfe und Schärfentiefe

Lichts. Je kurzwelliger das Licht ist, desto kleiner ist das Beugungsscheibchen.

Wenn wir den Abstand zwischen Blende und Film auf den Wert der Brennweite f vereinfachen und die Tatsache mit einbeziehen, daß sich der Durchmesser der Blende D aus der Funktion f/D ergibt, können wir direkt ableiten, daß der Durchmesser des Beugungsscheibchens am ersten Nullpunkt aus der folgenden Funktion ergibt:

Formel 28

$$2,43934 * \lambda * N$$

λ = Wellenlänge des Lichts

N = Blendenzahl

Dies ist ein bißchen schwierig auf eine tatsächliche Situation anzuwenden, weil das Licht normalerweise nicht aus einer einzigen Wellenlänge besteht, sondern ein kontinuierliches Spektrum zwischen 380 und 750 nm aufweist. Dieser Integration müssten wir eigentlich Rechnung tragen. Tun wir aber nicht. Zur Annäherung begnügen wir uns damit mit jener Wellenlänge rechnen, für die unser visuelles System am empfindlichsten ist. Dies ist der grüngelbe Teil bei 555 nm (0,000555 mm). Basierend darauf ergibt sich:

$$2,43934 * 0,000555 \text{ mm} * N \\ = 0,00135383 * N$$

Wie bereits angesprochen, hängt der für die Filmebene relevante Zerstreuungskreis vom Vergrößerungsmaßstab und damit indirekt vom Aufnahmeformat ab. Für das Kleinbildformat liegt er, 8fache Vergrößerung unterstellt, traditionell immer noch bei 0,032 mm und $0,032/0,00135383 = 23,64$. Bei Blende 22 ist der Durchmesser des Beugungsscheibchens am ersten Nullpunkt in diesem Fall also genauso groß wie unser maximal zulässiger Zerstreuungskreis. Rechnen wir dagegen mit dem strikteren Wert von 0,0091 mm, der aus dem durchschnittlichen Sehvermögen 20/20 folgt, so ergibt sich $0,0091/0,00135383 = 6,72$. Damit liegt die Beugungsgrenze bereits zwischen $f/5,6$ und $f/8$. – Ein erheblicher Unterschied in Bezug auf die maximal erreichbare Schärfentiefe. Mit einem Mittelwert von 0,025 mm ergibt sich $0,025/0,00135383 = 18,5$. Damit können wir problemlos bis auf $f/16$ Abblenden.

Tabelle 9 auf der nächsten Seite stellt die nach diesem Schema ermittelten Parameter für die gängigen Aufnahmeformate zusammen. Aufgrund der zum Teil unterschiedlichen Seitenverhältnisse sind unter

Zwischen Aberration und Beugung – Nicht jede Blende ist eine gute Blende

Tabelle 9 Sweet Spot und Aufnahmeformate				
Aufnahmeformat	Normalbrennweite	Vergrößerungsmaß auf 20x25 cm	Zerstreuungskreis konservativ / progressiv	f/... beugungsbegrenzt
1/2.5" 5,7x4,3 mm	7 mm	44x	0,0058 mm / 0,0045 mm	<i>f/4.0 / f/2.8</i>
1/1.8" 6,8x5,1 mm	9 mm	35x	0,0073 mm / 0,0057 mm	<i>f/5.6 / f/4.0</i>
APS-C 22,5x15 mm	30 mm	11x	0,023 mm / 0,018 mm	<i>f/16 / f/11</i>
KB 24x36 mm	50 mm	8x	0,032 mm / 0,025 mm	<i>f/22 / f/16</i>
6x6 cm	80 mm	5x	0,051 mm / 0,04 mm	<i>f/45 / f/32</i>
6x7 cm	100 mm	4x	0,064 mm / 0,05 mm	<i>f/45 / f/32</i>
4x5"	200 mm	2x	0,128 mm / 0,1 mm	<i>f/90 / f/64</i>
8x10"	400 mm	1x	0,25 mm / 0,2mm	<i>f/180 / f/128</i>

Umständen Ausschnittvergrößerungen nötig, um auf das Endformat zu kommen. Dementsprechend können sich die Angaben dann verschieben. Die beugungsbegrenzten Blendenwerte sind jeweils gerundet. Der progressive Wert bezieht sich auf 0,025 mm.

Aus der Tabelle 9 können wir etwas wichtiges ablesen: Ausgehend vom 35mm Kleinbild verändert sich der Sweet Spot mit dem Aufnahmeformat. Wächst es, so wächst auch das Fenster praktisch nutzbarer Blenden, weil 4x5" oder 8x10" nicht so stark vergrößert werden müssen, um auf ein Endformat von beispielsweise 20x25 cm zu kommen. Aus diesem Grund dürfen Zerstreuungskreis bzw. Beugungsscheibchen im Negativ größer ausfallen. Umgekehrt müssen die kleineren Formate sehr viel stärker vergrößert werden,

um dasselbe Endformat zu erreichen und entsprechend kleiner müssen Zerstreuungskreis bzw. Beugungsscheibchen im Negativ sein, damit sie den Schärfeeindruck im Print nicht mindern. Und ist der Sweet Spot im APS-C Format auch noch gerade groß genug, um effektiv arbeiten zu können, so geraten Aberrationsbegrenzung und Beugungsbegrenzung bei 1/1.8" und 1/2.5" Sensoren oder dem ähnlich großen 8x11 mm Minoxformat derart in Konflikt, daß sie in ein und derselben Blende zu liegen kommen und ein Fenster nahezu nicht mehr existent ist. Aufgrund der verschärft einsetzenden Beugung gestatten es die Optiken dieser Formate auch aus gutem Grund nicht weiter als bis f/5,6 oder f/8 abzublenden. Um überhaupt zumindest eine „gute“ Blende zur Verfügung stellen zu können, müssen

Abbildungsschärfe I:

Optik, geometrische Schärfe und Schärfentiefe

sie die Aberration im Bereich der großen Öffnungen schon durch sehr gute Korrektur ausschalten.

Ein Mikrometer, abgekürzt μm , entspricht dem millionsten Teil eines Meters:

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 0,000\,001 \text{ m.}$$

$$\text{Oder } 1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm,}$$

also ein tausendstel Millimeter.

Die deutlich gewordene wenig ausgeprägte Befähigung zur Abblendung machen die kleinen Digitalsensoren dadurch wett, daß sie aufgrund der im Vergleich zum Kleinbildformat kurzen Normalbrennweiten gar nicht weit abgeblendet werden müssen, um einen relativ großen akzeptabel scharfen Bereich zu liefern. Tabelle 10 stellt diese Werte für die einzelnen Formate gegenüber. In dieser Hinsicht ist ihr Problem eher, daß sie gar nicht weit genug geöffnet werden können, um ein Motiv durch geringe Schärfentiefe vom Hintergrund freizustellen. Kleinbild- und Mittelformat besitzen in dieser letzten Hinsicht zwar deutliche Vorteile, sind aber mit Blick auf maximale Schärfentiefe aufgrund der relativ früh einsetzenden Beugungsbegrenzung häufig ein bißchen knapp dran. – Mit den aus praktischer Sicht als

Maximalwerte anzusehenden Blenden $f/11$ (KB) und $f/22$ (MF) kommt man nicht sehr weit. Die Werte der absoluten Schärfentiefe liegen bei ihnen (formatäquivalente Blende vorausgesetzt) nah beieinander. Bei den Großformaten $4 \times 5''$ und $8 \times 10''$ erkennen wir dagegen bei den formatäquivalenten Blenden eine Abnahme der Schärfentiefe. Sie spielt aber keine Rolle, denn erstens ist ihr *Sweet Spot* groß genug, um dies durch weiteres Abblenden zu kompensieren und zweitens verfügen Kameras dieser Formate über Verstellmöglichkeiten, mit denen sich Objekt- und Bildebene übereinanderlegen lassen. Diese **Schärfedehnung nach Schimpflug** (benannt nach dem österreichischen Offizier und Kartographen Theodor Scheimpflug, 1865-1911, der sie 1907 entwickelte) gestattet es, Vordergrund und Hintergrund gleichermaßen problemlos scharf abzubilden. Mit ihr sind Großbildkameras uneinholbar im Vorteil, denn man kann immer im Bereich der optimalen Blende bleiben und die Schärfentiefe durch die Verschwenkung der Objektiv und/oder Filmstandarte steuern. – Die wunderbar scharfen Abbildungen zahlreicher Kalender und Kunstdrucke legen davon ein beredtes Zeugnis ab! Für Kleinbild- und Mittelformatkameras sind einige

Tabelle 10 Schärfentiefe und Aufnahmeformate							
Format	Normalbrennweite	Blende	Zerstreuungskreisdurchmesser konservativ/progressiv	Entfernung	Nahpunkt	Fernpunkt	Schärfentiefe
1/ 2.5 [“]	7 mm	2,8	0,0058 mm	5 m	1,88 m	∞	∞
1/ 2.5 [“]	7 mm	2,8	0,0045 mm	5 m	2,19 m	∞	∞
1/ 2.5 [“]	7 mm	4	0,0058 mm	5 m	1,49 m	∞	∞
1/ 2.5 [“]	7 mm	4	0,0045 mm	5 m	1,76 m	∞	∞
1/ 1.8 [“]	9 mm	2,8	0,0073 mm	5 m	2,21 m	∞	∞
1/ 1.8 [“]	9 mm	2,8	0,0057 mm	5 m	2,52 m	301,42 m	298,9 m
1/ 1.8 [“]	9 mm	4	0,0073 mm	5 m	1,79 m	∞	∞
1/ 1.8 [“]	9 mm	4	0,0057 mm	5 m	2,08 m	∞	∞
APS-C	30 mm	5,6	0,023 mm	5 m	2,92 m	17,32 m	14,39 m
APS-C	30 mm	5,6	0,018 mm	5 m	3,21 m	11,28 m	8,07 m
KB 24x36 mm	50 mm	8	0,032 mm	5 m	3,39 m	9,53 m	6,14 m
KB 24x36 mm	50 mm	8	0,025 mm	5 m	3,58 m	8,28 m	4,7 m
6x6 cm	80 mm	11	0,051 mm	5 m	3,49 m	8,79 m	5,3 m
6x6 cm	80 mm	11	0,04 mm	5 m	3,74 m	7,56 m	3,82 m
4x5 [“]	200 mm	16	0,128 mm	5 m	4,01 m	6,63 m	2,62 m
4x5 [“]	200 mm	16	0,1 mm	5 m	4,19 m	6,19 m	1,99 m
8x10 [“]	400 mm	32	0,25 mm	5 m	4,07 m	6,49 m	2,43 m
8x10 [“]	400 mm	32	0,2mm	5 m	4,22 m	6,13 m	1,9 m

wenige Objektive und Zubehörteile erhältlich, die diese Verstellbarkeiten nachahmen.

Eine über den Vergleich zwischen Zerstreuungskreis und Beugungsscheibchen hinausgehende Besonderheit ergibt sich im Fall der aktuellen Consumer- und Prosumer Digitalkameras. Ihre Bildsensoren besitzen Pixel, die so klein und so

dicht aneinandergereiht sind, daß es keiner besonders starken Abblendung bedarf, damit der Airy Disk zwei oder mehr von ihnen gleichzeitig bedeckt. Darunter leiden dann natürlich Schärfe und Auflösungsvermögen. Basierend auf diesem Kriterium zeigt sich anhand von Tabelle 11, daß die Abbildungsbeeinträchtigung beispielsweise bei der **Canon**

Abbildungsschärfe I:

Optik, geometrische Schärfe und Schärfentiefe

Tabelle 11 Blende und Beugungsscheibchen

Blendenzahl	Durchmesser des Beugungsscheibchens	Fläche des Beugungsscheibchens
2	0,0027 mm = 2,7 μm	5,7 μm^2
2,8	0,0038 mm = 3,8 μm	11,3 μm^2
4	0,0054 mm = 5,4 μm	22,9 μm^2
5,6	0,0076 mm = 7,6 μm	45,4 μm^2
8	0,0108 mm = 10,8 μm	91,6 μm^2
11	0,0149 mm = 14,9 μm	174,4 μm^2
16	0,0217 mm = 21,7 μm	369,8 μm^2
22	0,0297 mm = 29,7 μm	692,8 μm^2
32	0,0433 mm = 43,3 μm	1472,5 μm^2

EOS 5D (Pixelmaß 8,2 μm = 52,18 μm^2 Pixelfläche) unter $f/8$, bei der **Canon EOS 20D** (Pixelmaß 6,4 μm = 32,17 μm^2 Pixelfläche) bei $f/5,6$ und bei der **Canon PowerShot A640** mit ihrem viel kleineren Sensor (Pixelmaß 1,97 μm = 3,048 μm^2 Pixelfläche) schon unter $f/2$ auftritt. In der Praxis ist der Effekt nicht ganz so dramatisch, denn Bayer-Muster-Sensoren besitzen in der Regel ein Anti-Aliasing-Filter das die Auflösung um gut 30% mindert. Die **Canon EOS 5D** kommt unter Berücksichtigung dieses Umstands auf eine tatsächlich wirksame Pixelfläche von 67,83 μm^2 und eine realitätsnahe Beugungsbegrenzung zwischen $f/5,6$ und $f/8$ (**Canon EOS 20D** = 41,82 μm^2 $\sim f/5,6$, **Canon PowerShot A640** = 3,69 μm^2 $\sim f/2$). Bei diesen Blendenwerten beginnen Schärfe und Auflösung unter der Beugung zu leiden, aber dies ist noch nicht dramatisch. Benutzen Sie jedoch Blendeneinstellungen die weiter darüber liegen, so sind beide, Schärfe und Auflösung, zusehends durch die Beugung und nicht etwa den Sensor begrenzt. – Blenden Sie bei einem aktuellen Vollformat-Sensor auf $f/22$ ab, so halbieren Sie mindestens sein tatsächliches Auflösungsvermögen! Sofern Sie also nicht regelmäßig mit hochgeöffneten Optiken arbeiten, brauchen Sie einen

**Tabelle 12
Beugungsscheibchen und Wellenlängen**

Blendenzahl	Durchmesser des Beugungsscheibchens in Mikrometern		
	kurzwellig Blau 0,47 μm	mittelwellig Grün 0,53 μm	langwellig Rot 0,6 μm
2	2,3	2,6	2,9
2,8	3,2	3,6	4,1
4	4,6	5,2	5,9
5,6	6,4	7,2	8,2
8	9,2	10,3	11,7
11	12,63	14,2	16,1
16	18,3	20,7	23,4
22	25,2	28,5	32,2
32	36,7	41,4	46,8
45	51,6	58,2	65,9
64	73,4	82,8	93,7

Bildsensor mit möglichst großen Pixeln, um Schärfe und Details zu erhalten.

Da die Größe des Beugungsscheibchens von der Wellenlänge des Lichts abhängt, ist zudem erwähnenswert, daß die die drei Grundfarben registrierenden Pixel eines Sensors mit Bayer-Muster ihre Beugungsgrenze bei unterschiedlichen Blenden erreichen. Weil fast alle Bayer-Sensoren doppelt so viele grüne Pixel aufweisen wie rote oder blaue, zeigt sich die schwindende Bildqualität beim Erreichen der Beugungsgrenze ganz besonders stark im Grün- bzw. Luminanzkanal (Tabelle 12).

Jetzt haben Sie zum Schluß vielleicht noch die Frage, warum für unsere vorangegangenen Berechnungen die Blendenzahl genügt, wo wir doch weiter oben davon gesprochen haben, daß der Beugungseffekt vom tatsächlichen Durchmesser der Öffnung abhängt? Ganz einfach. Eine große Öffnung beugt das Licht weniger stark als eine kleine. Das heißt, daß der Winkel in dem die Lichtwellen gebeugt werden, im Fall einer großen Öffnung geringer ist. Je länger die Brennweite nun ist, umso weiter ist die Blende vom Film entfernt und diese Abstandsverlängerung löscht die Veränderung des Beugungswinkels exakt aus. Aus

diesem Grund führt dieselbe Blendenzahl bei jeder Brennweite zu einem identischen Beugungseffekt.