



Schärfentiefe und Bokeh

von

H. H. Nasse

Vorwort

„Neun gerundete Blendenlamellen garantieren Bilder mit ausgezeichnetem Bokeh“

Diesen Satz liest jetzt man oft, wenn irgendwo von einem neuen Objektiv berichtet wird. Welche Eigenschaft des Bildes ist damit eigentlich gemeint? Und was hat die Blende damit zu tun?

Mit diesen Fragen wollen wir uns heute beschäftigen. Weil aber das Thema ‚Bokeh‘ ganz eng zusammenhängt mit dem Thema ‚Schärfentiefe‘, möchte ich auf den folgenden Seiten zunächst damit beginnen. Zwar ist darüber an anderen Stellen schon sehr viel geschrieben worden, und mancher mag das Thema für abgenutzt halten. Doch ich bin dennoch sicher, dass Sie sich nicht langweilen werden. Denn ich werde Ihnen einen eher ungewohnten Weg vorstellen, wie man die wichtigsten Eigenschaften der optischen Abbildung des Raumes ganz anschaulich mit ein wenig Geometrie verstehen kann.

Keine Angst, von ganz leichten Ausnahmen abgesehen werden wir uns überhaupt nicht mit Formeln befassen; wir wollen stattdessen die Zusammenhänge verstehen und ein paar praktische Faustregeln kennen lernen. Wissenswerte Zahlen finden Sie in einigen Grafiken und Tabellen.

Danach ist es dann nur noch ein kleiner Schritt, auch zu verstehen, was hinter dem etwas geheimnisvoll klingenden Begriff ‚Bokeh‘ steckt. Denn beide Teile des heutigen Artikels handeln eigentlich von demselben Phänomen; sie betrachten es nur unter verschiedenen Gesichtspunkten. Während die geometrische Theorie der Schärfentiefe mit einer idealisierten Vereinfachung des Objektivs arbeitet, muss man die realen Eigenschaften von Objektiven, sprich ihre kleinen Fehler, berücksichtigen, wenn man Bokeh richtig verstehen will. Die Blende genügt nicht – soviel sei hier schon gesagt.

Und wer sich gar nicht mit der Theorie seiner Kamera herumschlagen mag, der findet viele Bilder zur Illustration unseres Themas; wir können also wirklich jedem viel Spaß bei der Lektüre wünschen.

Schärfentiefe oder Tiefenschärfe?

Wenn man im Netz surft, findet man eine scheinbar unendlich große Zahl von Beiträgen zu unserem Thema, und natürlich ist auch vieles, was da zu lesen ist, falsch oder unvollständig. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass sich auch die phototechnischen Diskussionsforen gern ausgiebig damit befassen.

Eine besondere Steigerung erfuhr das Interesse am Verständnis von Schärfentiefe, als die ersten digitalen SLR-Kameras im kleineren APS-C Format auf den Markt kamen, die kompatibel waren zu „alten“ Objektiven für das Format 24x36 mm. Gilt da noch die gravierte Skala auf dem Objektiv oder nicht – das war die Frage.

In den deutschsprachigen Foren findet man sogar mitunter heftigen Streit über die richtigen Begriffe – soll es ‚Schärfentiefe‘ oder ‚Tiefenschärfe‘ heißen?

Nun, darüber sollte man keine Haarspaltereien betreiben, zumal wir sehen werden, dass diese Eigenschaft selbst nichts sehr genaues ist. Es sind seit jeher beide Begriffe gebräuchlich. Und beide meinen auch die gleiche Eigenschaft der photographischen Abbildung – dass man nämlich unter bestimmten Bedingungen von Gegenständen des dreidimensionalen Raumes ein scharfes zweidimensionales photographisches Bild machen kann, obwohl sich die Kamera nur auf eine bestimmte Entfernung fokussieren lässt.



*Ausstattungsdetail einer Kamera von 1934: eine Tiefenschärfentabelle! Sprache ist nicht immer so streng (jeder kennt den Unterschied zwischen Erdbeerkuchen und Hundekuchen), man muss beide Begriffe gelten lassen. Wir werden aber im Folgenden immer von Schärfen-**Tiefe** sprechen, wenn wir sie in Längeneinheiten messen.*

Dass wir einen beträchtlichen Teil des dreidimensionalen Raumes vor und hinter der optimal fokussierten Entfernung auf den Film oder Chip bannen können, liegt daran, dass wir offenbar ein gewisses Maß von Unschärfe tolerieren können oder gar nicht bemerken.

Dass dies so ist, ist wirklich ein Segen, denn kaum eine Kamera ist so präzise, dass sie die optimale Leistung eines Objektivs mit hundertprozentiger Sicherheit auf Film oder Sensor bringen kann. Begrenzte Filmplanlage in analogen Zeiten, Fokussierfehler und andere mechanische Toleranzen erschweren das nämlich sehr.

Aber solange die Fehler nicht zu groß sind, bemerken wir das in der Regel nicht.

Schärfentiefe beruht auf erlaubter Unschärfe und damit ganz wesentlich auf willkürlicher Festlegung. Es ist aber keineswegs so, dass die Bildschärfe innerhalb einer bestimmten Raumtiefe wirklich konstant ist und dann davor und dahinter aufhört. Schärfe ändert sich immer kontinuierlich mit der Objektentfernung.

Wann hängt Schärfentiefe nicht von der Brennweite ab?

Wie entsteht die Skala auf dem Objektiv?

Wenn jemand sagt, Schärfentiefe hänge gar nicht von der Brennweite ab, möchte man natürlich gleich widersprechen, denn die praktische Erfahrung zeigt uns ja: das Weitwinkelobjektiv macht Bilder mit großer Schärfentiefe, das Teleobjektiv hat selektive Schärfe. Trotzdem könnte er Recht haben, er muss nur genauer sagen, welche Schärfentiefe er meint. Da haben es die Angelsachsen besser, indem sie gleich zwei deutlich verschiedene Begriffe verwenden: **depth-of-field** und **depth-of-focus**.

Der erste steht für das, was wir im Allgemeinen unter Schärfentiefe verstehen und meint die Tiefe im Objektraum. Es gibt aber auch eine Schärfentiefe im Bildraum, also in der Kamera. Und diese bildseitige Tiefe, die im Englischen **depth-of-focus** heißt, hängt wirklich nicht von der Brennweite ab, sondern nur von der Blendenzahl, was wir leicht verstehen können:

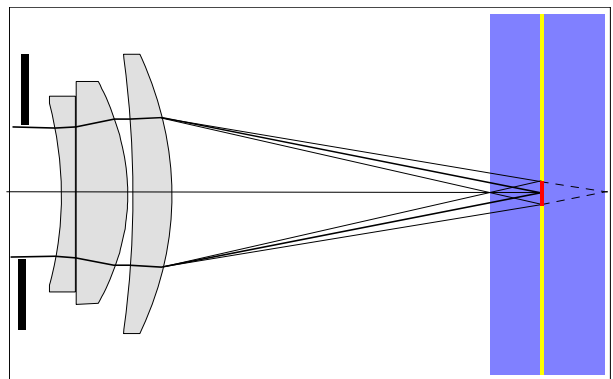
Jeder Bildpunkt wird ja erzeugt von einer großen Zahl von Lichtstrahlen, die durch die Blendenöffnung laufen und sich dann im Bildpunkt vereinigen. Sie formen also einen **Lichtkegel**, dessen Grundfläche das vom Sensor her gesehene Bild der Blende ist. Dieses Bild der Blende nennt man **Austrittspupille**. Man kann sie sehr schön sehen, wenn man von hinten in ein Objektiv sieht, das man gegen eine helle Fläche richtet:



Die **Blendenzahl** ist der Quotient aus der Entfernung der Austrittspupille von der Bildebene und aus dem Durchmesser der Austrittspupille. Deshalb hängt der **Öffnungswinkel des Lichtkegels** nur von der Blendenzahl ab.

Eine große Blende (also eine kleine Blendenzahl) bedeutet einen stumpfen Kegel, eine kleine Blendenöffnung (also eine große Blendenzahl) bedeutet einen spitzen Lichtkegel.

$$\text{Blendenzahl} = \frac{\text{EntfernungAP}}{\text{DurchmesserAP}}$$



Wenn die Sensorfläche (**gelbe Linie**) den Lichtkegel in einer gewissen Entfernung von der Kegelspitze schneidet, entsteht als Schnittfläche der **Zerstreuungskreis** (**Durchmesser rot**).

Die **gesamte bildseitige Schärfentiefe** (in der obigen Skizze blau gefärbter Bereich des Bildraumes) ist das doppelte Produkt von Zerstreuungskreis-Durchmesser z und Blendenzahl k :

$$ST_{\text{Bild}} \approx 2 \cdot z \cdot k$$

Diese einfache Gleichung ist sichtbar in den gravierten Schärfentiepeskalen: Der Drehwinkel am Entfernungsring ist proportional zur bildseitigen Fokusänderung, und die Schärfentiefe-Markierungen am Entfernungsring sind deshalb proportional zur Blendenzahl.

(Streng genommen ist die bildseitige Schärfentiefe hinter der Bildebene ein klein wenig größer, das darf man aber vernachlässigen)



Beispiele für Schärfentiefeskalen an Objektiven, links graviert, rechts eine aufwändige Lösung, bei der zwei rote Zeiger durch die Blendeneinstellung bewegt wurden. Bei beiden ist die Entfernung der Schärfentiefemarken vom Index in der Mitte proportional zur Blendenzahl. Die Abstände der einzelnen Skalenstriche hängen natürlich auch noch ab von der Festlegung des erlaubten Zerstreuungskreisdurchmessers und von der Gewindesteigung des Entfernungsrings. Deshalb sind solche Skalen auf vielen modernen AF-Objektiven nicht mehr sinnvoll, wenn sie extrem steile Entfernungseinstellung haben. Die Schärfentiefeskalen sind links und rechts symmetrisch.

Man begegnet manchmal der Ansicht, dass ein Objektiv mit längerer Brennweite eine größere bildseitige Schärfentiefe (depth-of-focus) habe. Das stimmt aber nicht, die bildseitige Schärfentiefe hängt nur von der Blendenzahl ab. Hinter dieser falschen Vorstellung steckt die Verwechslung von **bildseitiger Schärfentiefe** und **Tiefe des dreidimensionalen Bildes**.

Kurze Brennweiten haben nur einen sehr kurzen Fokushub, weil sie alles vom nahen Vordergrund bis zur Ferne in einen sehr kurzen Bildraum abbilden - ihr Bild ist flach. Lange Brennweiten benötigen einen wesentlich größeren Fokushub, weil das Bild desselben Gegenstandsraumes viel tiefer ist.

Wenn Kameras schlecht justiert sind, dann kann es manchmal bei sehr kurzen Brennweiten vorkommen, dass der Sensor vollständig neben dem flachen Bild liegt; dann erscheint das ganze Motiv leicht unscharf. Bei einer langen Brennweite hingegen ist es trotz schlechter Justierung irgendwo perfekt scharf, wenn auch nicht da, wo man es wollte. Auch diese Erfahrung verleitet zu der falschen Annahme, kurze Brennweiten hätten eine kleine bildseitige Schärfentiefe.

Es ist allerdings so, dass die Schärfentiefe auch **im Objektraum** (fast) nicht von der Brennweite abhängt, wenn man jeweils Abbildungen des Gegenstands im **gleichen Abbildungsmaßstab** vergleicht. Bei Aufnahmen mit verschiedenen Brennweiten und jeweils gleichem Bildformat heißt das natürlich, dass diese Aufnahmen aus entsprechend unterschiedlichen Entfernungen gemacht werden.

Dass die Schärfentiefe unabhängig von der Brennweite nur vom Abbildungsmaßstab abhängt, gilt übrigens nicht mehr bei sehr großen Entfernungen. Und auch in der Nähe sind zwei Aufnahmen eines Gegenstandes nicht identisch, wenn sie mit zwei verschiedenen Brennweiten gemacht wurden, auch wenn die Schärfentiefe praktisch gleich ist. Neben der Perspektive ist nämlich auch die maximale Unschärfe des sehr weit entfernten Hintergrundes verschieden. Sie ist bei kürzeren Brennweiten geringer als bei längeren.

Warum das alles so ist, werden wir verstehen, wenn wir auf den folgenden Seiten den Bildraum in der Kamera, wo die Zerstreuungskreise eigentlich entstehen, verlassen und uns in den Raum vor dem Objektiv begeben.

Objektseitige Schärfentiefe und die Eintrittspupille

Auf den beiden vorhergehenden Seiten haben wir Lichtkegel auf der Bildseite betrachtet, und wir haben verstanden, dass Zerstreuungskreise entstehen, wenn diese Lichtkegel von der Sensorfläche geschnitten werden. Die von einem Objektpunkt ausgehenden und ins Objektiv eintretenden Lichtstrahlen haben dann keinen Bildpunkt in der Sensorfläche sondern irgendwo im Raum davor oder dahinter. In beiden Fällen ist ihre Energie in der Sensorfläche auf einen ausgedehnten Fleck verteilt, den wir evtl. nicht mehr als scharfen Bildpunkt wahrnehmen.

Welche Abweichungen der Bildpunkte von der Sensorfläche in der Kamera erlaubt sind, interessiert vielleicht den Hersteller der Kamera – wir denken beim Fotografieren eher nicht daran, sondern denken im Raum **vor dem Objektiv**. Dort messen wir Entfernungen, dort wollen wir einen in die Tiefe ausgedehnten Gegenstand von vorn bis hinten scharf im Bild haben, dort wollen wir ein Detail vom unwichtigen Hintergrund trennen. Deshalb muss man die vorher besprochene **bildseitige in die objektseitige Schärfentiefe** umrechnen. Und da fängt dann in den vertrauten Erklärungen das Problem mit den Formeln an, das wir heute mal vermeiden möchten.

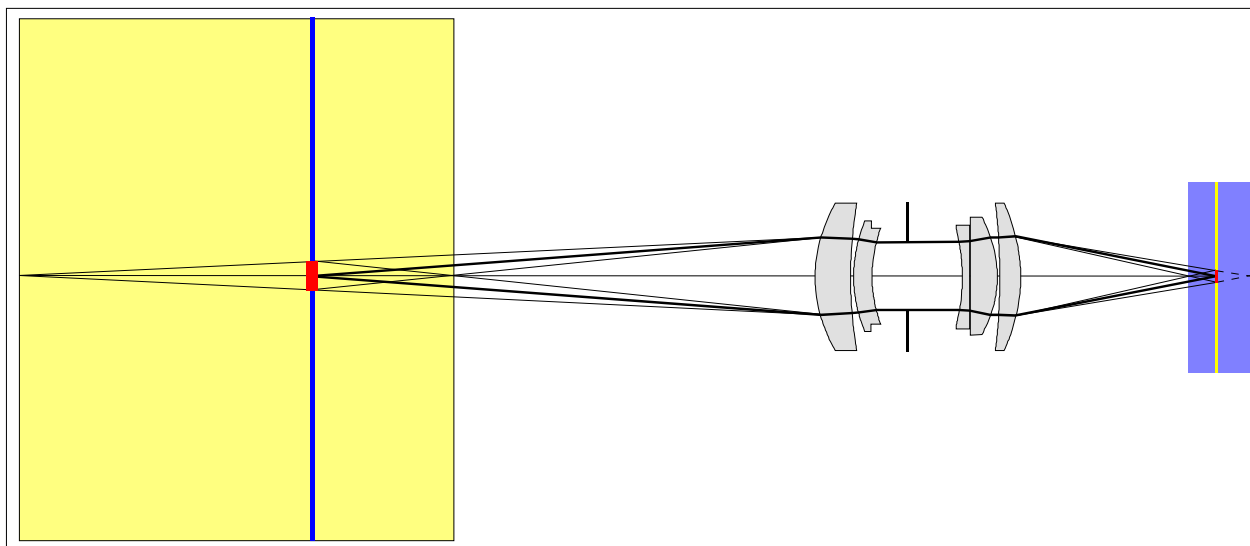
Die Lichtkegel als Ursache der Zerstreuungskreise entstehen ja nicht im Objektiv sondern kommen von den entsprechenden Objektpunkten. Folglich gibt es solche Lichtkegel auch auf der Objektseite vor dem Objektiv. Ihre Grundfläche ist die **Eintrittspupille**. Das ist das **Bild der Blende**, das man sieht, wenn man **von vorn** aus gewissem Abstand durch das Objektiv auf eine helle Fläche schaut:



Die **Eintrittspupille** kann übrigens auch weit hinten im Objektiv liegen, da darf man sich durch ihren Namen nicht täuschen lassen. Bei den langbrennweitigen **Tele-Tessaren** zur Hasselblad liegt sie im Filmmagazin.

Eine gedachte Ebene vor dem Objektiv in der Fokulentfernung wird von den Lichtkegeln geschnitten, die von weiter entfernt liegenden Punkten kommen; sie wird von den rückwärtigen Verlängerungen der Lichtkegel näher liegender Objektpunkte geschnitten.

Die Schnittflächen mit dieser objektseitigen Ebene sind die Bilder der Zerstreuungskreise in der Sensorebene, wir nennen sie der Einfachheit halber „**objektseitige Zerstreuungskreise**“. Auch wenn sie nicht körperlich vorhanden sind, können wir das so sagen, weil man ja jeden **Strahlengang auch umkehren** kann. Dass wir etwas benutzen, was es physikalisch gar nicht gibt, ist gerade der Trick, um die Sache einfach zu machen.



In der Skizze der vorangegangenen Seite ist der blaue Bildraum rechts, hinter dem Objektiv. Er ist das Bild des gelb gezeichneten Objektraumes links, vor dem Objektiv. Die ganz links am weitesten entfernt liegenden Punkte werden auch im Bildraum links, näher am Objektiv abgebildet. Die blau gezeichnete Linie im Objektraum ist das Bild der rechts im Bildraum gelb gezeichneten Sensorfläche, es ist also die Fokusebene. Die in der Sensorfläche entstehenden Zerstreuungskreise sind rot gezeichnet. Wir denken uns ihr Bild in der objektseitigen Fokusebene.

Wenn man z.B. im Kleinbildformat eine Abbildung im Maßstab 1:100 macht und die üblichen 0.03 mm großen Zerstreuungskreise zulässt, dann dürfen die Bilder der Zerstreuungskreise in der Fokusebene im Objektraum maximal 3 mm groß sein. Der auf dem Sensor abgebildete Ausschnitt der Fokusebene ist 2.4 x 3.6 m groß. Das Verhältnis von Zerstreuungskreisdurchmesser und Bilddiagonale bzw. Objektfelddiagonale ist auf beiden Seiten gleich groß.

Wie groß dieses Verhältnis des Zerstreuungskreisdurchmessers zur Bildgröße sein sollte, werden wir uns später überlegen. Auf jeden Fall ist es ein Maß für die erlaubte Unschärfe. Und im Objektraum hängt es von drei Dingen ab:

1. Wie groß ist das Objektfeld?
2. Wo liegt die Spitze eines Lichtkegels?
3. Wie groß ist die Grundfläche des Lichtkegels?

Die Bedingungen 2. und 3. bestimmen, wie schlank ein objektseitiger Lichtkegel ist. Und aus der Bedingung 1. ergibt sich dann die relative Größe der Schnittfläche des Kegels mit der Fokusebene.

Die Grundfläche des Lichtkegels ist die **Eintrittspupille**, ihr **Durchmesser** ist der Quotient aus Brennweite und Blendenzahl. Objektive langer Brennweite und lichtstarke Objektive (kleine Blendenzahl) haben große Eintrittspupillen, Objektive kurzer Brennweite und abgeblendete Objektive haben kleine Eintrittspupillen.

$$\text{Durchmesser}_{EP} = \frac{\text{Brennweite}}{\text{Blendenzahl}}$$

Mit ein wenig Geometrie können wir jetzt ganz einfach verstehen, wie die Schärfentiefe abhängt von **Aufnahmeentfernung, Brennweite und Blende**:

1. Aufnahmeentfernung

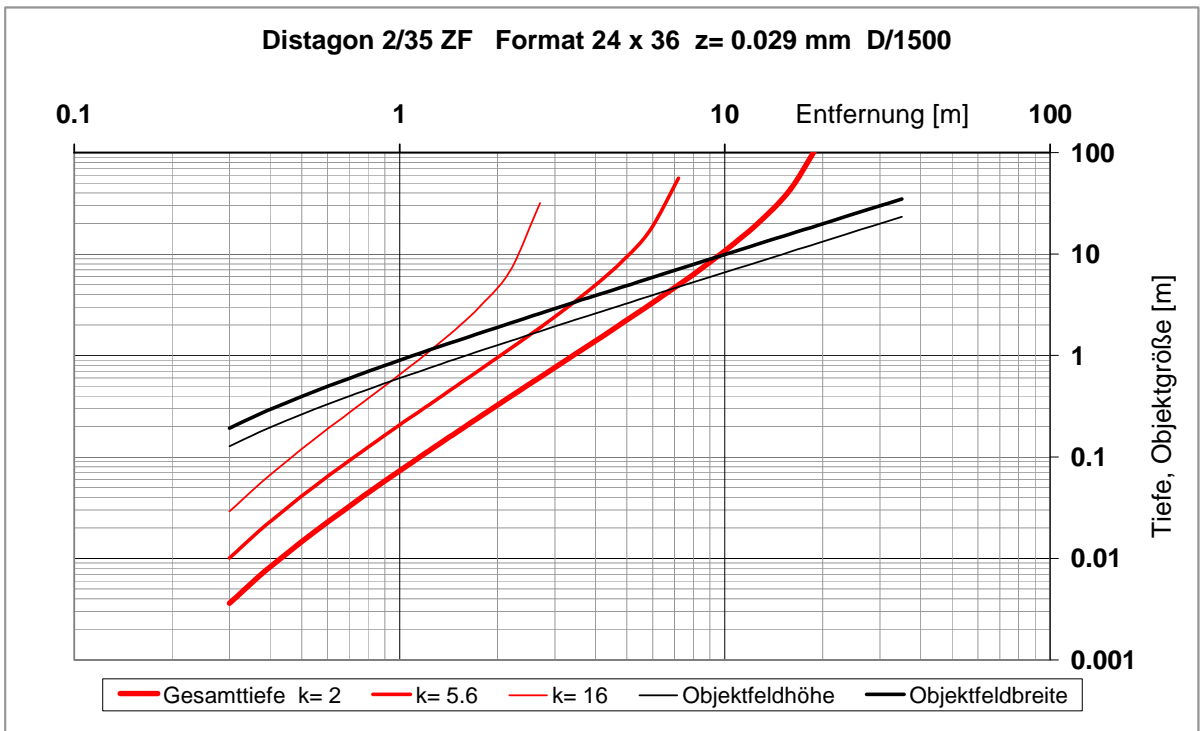
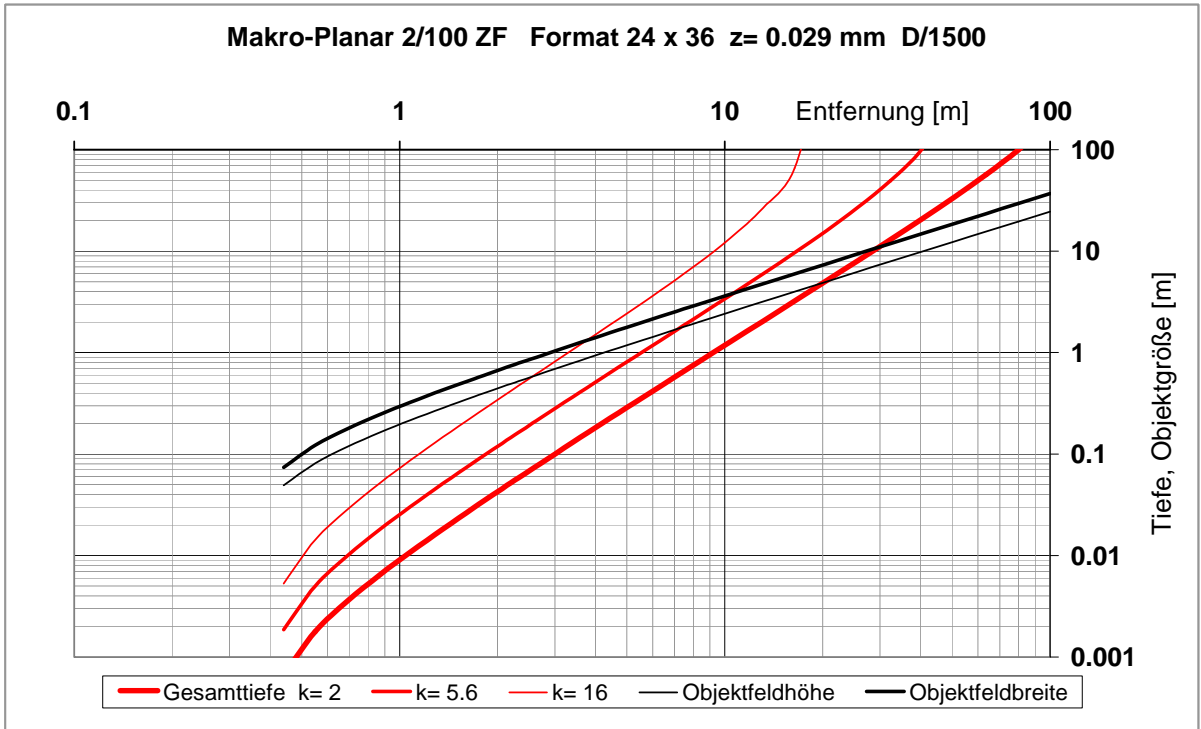
Wenn wir die Aufnahmeentfernung verdoppeln, verdoppelt sich auch die Größe des Objektfeldes in der Fokusebene – nicht seine Fläche, sondern die Längen von Breite, Höhe und Diagonale. Gleichzeitig wird z.B. der Lichtkegel von einem Punkt hinter der Fokusebene doppelt so schlank, weil ja die Grundfläche gleich bleibt und wir diesen Kegel in Gedanken in die Länge ziehen. Folglich ist das Verhältnis von Diagonale und Zerstreuungskreis viermal so groß geworden wie vorher, oder anders ausgedrückt: die **Schärfentiefe wächst mit dem Quadrat der Aufnahmeentfernung**.

2. Brennweite

Ganz ähnlich geht es mit der Brennweite: wenn wir sie z.B. halbieren, verdoppelt sich ebenfalls die Größe des Objektfeldes in der Fokusebene. Gleichzeitig halbiert sich bei gleicher Blendenzahl auch der Durchmesser der Eintrittspupille, was wiederum den Lichtkegel von einem Punkt hinter der Fokusebene doppelt so schlank macht. Folglich ist das Verhältnis von Diagonale und Zerstreuungskreis viermal so groß geworden wie vorher, oder anders ausgedrückt: die **Schärfentiefe ist bei jeweils gleicher Aufnahmeentfernung umgekehrt proportional zum Quadrat der Brennweite**.

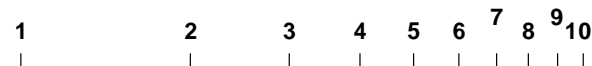
3. Blende

Wenn wir das Objektiv abblenden, halbieren wir mit jeder ganzen Blendenstufe die Fläche der Eintrittspupille. Ihr Durchmesser nimmt also jedes Mal um den Faktor 0.71 ab, nach zwei Blendenstufen um den Faktor 0.5. Dabei wird auch der Lichtkegel schlanker. Wenn die Größe des Objektfeldes gleich bleibt, **wächst also die Schärfentiefe linear mit der Blendenzahl**. Zwei Stufen Abblendung - z.B. von Blende 5.6 auf Blende 11 - verdoppeln die Schärfentiefe.



Grafische Darstellung der auf der vorigen Seite beschriebenen Zusammenhänge. Die Meter-Skalen auf beiden Achsen sind logarithmisch geteilt, d.h. bei gleich langen Schrittgrößen hat sich die Entfernung immer um den gleichen Faktor geändert. Solche Skalen sind günstig, um weit gespannte Größenvariation in einem Bild zu zeigen, und sie liefern uns sehr einfache Kurven. Nur an den Enden sind sie etwas gekrümmt, wenn wir dem Objektiv nahe kommen oder der Unendlichstellung. Die Fokussentfernung ist auf der horizontalen Achse aufgetragen und die gesamte Schärfentiefe auf der vertikalen.

Logarithmische Skalen haben 10 verschieden lange Intervalle für gleiche Zahlenschritte, 1 zwischen 1 und 10, 10 zwischen 10 und 100, 100 zwischen 100 und 1000, 0.01 zwischen 0.01 und 0.1 ... usw.



Genauso einfach können wir uns jetzt erklären, was bei einem Wechsel des Aufnahmeformates passiert:

4. Kleineres Aufnahmeformat mit gleichem Objektiv

Wenn wir ein Objektiv von einer alten analogen Kamera abnehmen und stattdessen an eine Digitalkamera des gleichen Systems ansetzen, die aber den etwas kleineren APS-C Sensor enthält, dann sprechen wir ja von einem „Crop-Faktor“, wir hätten auch einfach sagen können, dass der kleinere Sensor automatisch eine Ausschnittvergrößerung macht, wenn wir am gleichen Standpunkt stehen bleiben. Den Ausdruck „*Brennweitenverlängerung*“ wollen wir lieber nicht benutzen, denn die gibt es nicht – das Objektiv weiß ja nicht, wie viel von seinem Bildkreis wir mit unserem Sensor einfangen.

Die Größe des Objektfeldes wird also um den Crop-Faktor kleiner, während die objektseitigen Lichtkegel gleich bleiben, solange wir dasselbe Objektiv benutzen und die Blendeneinstellung nicht ändern. Deshalb dürfen sich die Spitzen der Lichtkegel nicht so weit von der Fokusebene entfernen, wenn wir den gleichen Grenzwert des Verhältnisses Diagonale zu Zerstreuungskreis einhalten wollen. **Bei Verkleinerung des Aufnahmeformats nimmt also die Schärfentiefe um den Crop-Faktor ab.**

Das gilt natürlich genauso, wenn man später nur einen Teil der Bildfläche verwendet. Das sieht man auch von der Bildseite her ein, denn wenn man die dortigen Zerstreuungskreise stärker nachvergrößert, muss man strengere Ansprüche an ihre Kleinheit haben.

5. Unterschiedliche Aufnahmeformate mit gleichem Objektfeld

Wenn wir durch die Wahl der passenden Brennweite dafür sorgen, dass wir vom gleichen Aufnahmestandort mit verschiedenen Aufnahmeformaten immer dasselbe Objektfeld abbilden, dann ist das Verhalten genau umgekehrt: **bei Verkleinerung des Aufnahmeformates nimmt die Schärfentiefe zu, bei Vergrößerung nimmt sie dagegen ab**, vorausgesetzt wir stellen immer die gleiche Blende ein. Das liegt daran, dass ein kleineres Aufnahmeformat dasselbe Objektfeld mit einer entsprechend kürzeren Brennweite darstellt. Bei gleicher Blendenzahl ist dann aber die Eintrittspupille um den Crop-Faktor kleiner und die Lichtkegel schlanker.

Aus dem gleichen Grund zeigen Mittelformat-Aufnahmen bei gewohnten Blenden eine deutlich kleinere Schärfentiefe, obwohl man mit größeren Zerstreuungskreisen rechnet, 0.05mm gegenüber 0.03mm im Kleinbild. Adaptiert man aber das Mittelformatobjektiv an eine Kleinbild-Kamera, dann gelten natürlich die dort üblichen Werte.

Der erlaubte Zerstreuungskreisdurchmesser ist also keine Objekteigenschaft sondern eine **Formateigenschaft**. Eine Eigenschaft der Objektiv ist nur der kleinstmögliche Zerstreuungskreis, und der ist durch die Korrektur der Bildfehler gegeben.

Man beobachtet also die auf den ersten Blick paradoxe Eigenschaft, dass bei gleichen Blenden und Objektfeldern große Formate eine **kleinere objektseitige** Schärfentiefe aber gleichzeitig eine **größere bildseitige** Schärfentiefe haben. Dies spiegelt sich auch in den mechanischen Toleranzen von Kameras: Großformatkameras konnte man mit Schreiner-genauigkeit bauen, das Kameramodul in einem Mobiltelefon verlangt µm-Präzision. Das sind die Extreme, man merkt in der SLR-Fotografie aber auch schon zwischen APS-C und Vollformat den Unterschied hinsichtlich der Anforderungen an die Fokussiergenauigkeit.

Was auf den ersten Blick so paradox und verwirrend erscheint, hat natürlich eine ganz einfache Erklärung. Wir hatten ja gleich große Objektfelder mit verschiedenen großen Bildformaten fotografiert. Wenn dabei die erlaubte Unschärfe immer gleich sein soll, heißt das, dass das Größenverhältnis von Objektfelddiagonale und „objektseitigem Zerstreuungskreis“ auch immer gleich sein soll. Es sollen also bei allen verglichenen Kameras die objektseitigen Lichtkegel gleich sein, die z.B. von einem Objekt hinter der Fokusebene kommen. Wenn nun aber die Bildformate verschieden groß sind, ist der Abbildungsmaßstab verschieden. Deshalb müssen unter diesen Bedingungen die bildseitigen Zerstreuungskreise mit der linearen Formatgröße wachsen.

Die objektseitigen Lichtkegel können aber nur gleich sein, wenn alle Eintrittspupillen gleich groß sind. Da aber gleich große Objektfelder bei größerem Aufnahmeformat längere Brennweiten bedeuten, müssen die Blendenzahlen verschieden sein.

Der große Formatvergleich

Wir wissen jetzt, dass bei gegebener Entfernung und gegebenem Bildwinkel die Schärfentiefe nur noch von der Größe der Eintrittspupille abhängt. Und die ist der Quotient aus Brennweite und Blendenzahl.

Wenn sich dann die Brennweite bedingt durch das Aufnahmeformat um einen Faktor ändert, dann muss man nur die Blendenzahl mit dem gleichen Faktor multiplizieren. Dann hat der Quotient, also die Eintrittspupille, wieder den gleichen Wert, und wir haben wieder dieselben Schärfentiefeverhältnisse.

Es gibt also für alle Formate äquivalente Blendenzahlen, und sie verhalten sich wie die linearen Formatmessungen.

Eine Blende 2.8 im 2/3"-Format entspricht also etwa der Blende 8-11 im Kleinbild und Blende 22 im Mittelformat 6x7. Beim APS-Format muss man die Blende um gut eine Stufe öffnen, um gleiche Schärfentiefeverhältnisse wie im Kleinbild zu haben, immer gleiche Bildwinkel vorausgesetzt.

Die weit verbreitete Praxis, Bildwinkel von Objektiven durch Angabe der äquivalenten Kleinbildbrennweite zu beschreiben, ist also inkonsequent, wenn sie nicht auch die Blende umrechnet. Das kann man aber andererseits nicht machen, weil eine umgerechnete Blendenzahl als Belichtungsparameter falsch wäre.

Die Tabelle zeigt uns, dass die kleinen Formate geringere bis gar keine Variationsmöglichkeiten der Tiefenabbildungseigenschaften besitzen.

Diagonale [mm]	6.6	8	11	21.6	26	40	70	90	150
Format	3.96x5.28	4.8x6.4	6.6x8.8	13x17.3	15.6x20.8	24x32	42x56	54x72	90x120
k/D	1/2.5"	1/1.8"	2/3"	4/3"	APS	Kleinbild	4.5x6	6x7	9x12
0.025						1	1.7	2.4	4
0.035						1.4	2.4	3.4	5.6
0.05					1.4	2	3.4	4.8	8
0.07				1.4	2	2.8	4.8	6.7	11
0.10			1.2	2	2.8	4	6.7	9.5	16
0.14		1.2	1.7	2.8	4	5.6	9.5	13	22
0.20	1.4	1.7	2.4	4	5.6	8	13	19	32
0.28	2	2.4	3.4	5.6	8	11	19	27	45
0.40	2.8	3.4	4.8	8	11	16	27	38	64
0.55	4	4.8	6.7	11	16	22	38	54	90
0.80	5.6	6.7	9.5	16	22	32	54	76	128

Jede Zeile dieser Tabelle enthält die **äquivalenten Blendenzahlen**, bei denen bei gleichen Bildwinkeln gleiche Tiefenabbildungsverhältnisse vorliegen. Formate sind jeweils auf das Seitenverhältnis 3:4 beschnitten, Blendenwerte auf halbe Stufen gerundet, in der linken Spalte in blauer Schrift die Blendenzahl als Bruchteil der Formatdiagonalen. Die unteren Zeilen stellen die wegen der Beugung maximal sinnvollen Blendenzahlen dar.

Schärfentiefe bei gleichem Abbildungsmaßstab

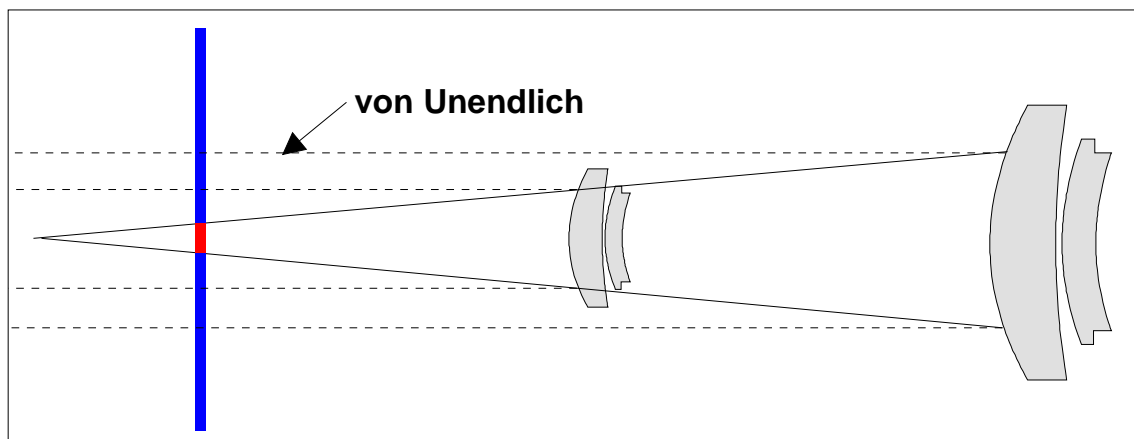
Im Formatvergleich der vorangegangenen Seite sind die Abbildungsmaßstäbe in jeder Spalte verschieden, weil wir verschiedene Kameras betrachten. Das ist allerdings in der Praxis eher selten, man hat vielmehr eine Kamera und verschiedene Objektive dafür. Deshalb steht man manchmal vor der Frage, welche Brennweite man einsetzen soll. Raumverhältnisse, Perspektive, Hintergrund sind dabei Entscheidungskriterien.

Gibt es etwa auch Unterschiede hinsichtlich der Schärfentiefe, wenn wir ein Motiv in gleicher Größe abbilden wollen? Ist z.B. von unseren beiden Makroobjektiven das 2/50 oder das 2/100 günstiger?

Nun, **die Schärfentiefe hängt (fast) überhaupt nicht von der Brennweite ab, sondern nur vom Abbildungsmaßstab**, und das können wir so verstehen:

Die doppelt so lange Brennweite erzeugt das gleich große Bild aus etwa doppelter Entfernung, und bei gleicher Blendenzahl ist ihre Eintrittspupille doppelt so groß. Dann sind aber trotzdem wegen der größeren Aufnahmeentfernung die objektseitigen Kegel der abbildenden Lichtstrahlen gleich und folglich auch die Zerstreuungskreise in der gleich großen Objektebene.

Aber: der unendlich weit entfernte Hintergrund wird mit unterschiedlicher Unschärfe wiedergegeben, weil die Eintrittspupillen unterschiedlich groß sind.



Geometrische Erklärung dafür, dass die Schärfentiefe nicht von der Brennweite abhängt, wenn die Objektfeldgröße jeweils gleich ist: bei gleicher Blendenzahl ist die Größe der Eintrittspupillen proportional zu Brennweite und Aufnahmeabstand. Die Lichtkegel sind deshalb immer gleich und damit auch die relative Größe der Zerstreuungskreise.

Aber die aus dem Unendlichen in die Eintrittspupillen eintretenden Lichtbündel schneiden die Objektebene in unterschiedlich großen Flächen. Deshalb ist die Unschärfe im Bild sehr weit entfernter Objekte nicht gleich. Daraus muss man schließen, dass die schön einfache Regel dieser Seite nicht beliebig genau gelten kann; wir kommen später auf die Abweichungen zurück.

Die hyperfokale Entfernung

Wenn wir an Bedingungen denken, wo die Schärfentiefe hinter der Fokulentfernung schon bis **Unendlich** reicht, dann wird uns klar, dass wir bisher vielleicht etwas zu leichtsinnig von Verdopplung oder Halbierung der Schärfentiefe gesprochen haben. Denn Unendlich kann man weder verdoppeln noch halbieren.

Aber für die **hyperfokale Entfernung (Nah-Unendlich-Einstellung)**, die kürzeste Fokusentfernung, bei der die Schärfentiefe bis Unendlich reicht, gelten im Formatvergleich genau dieselben Regeln. Und das können wir wieder mit Hilfe unserer objektseitigen Strahlkegel leicht verstehen:

Ein aus dem Unendlichen kommender Strahlkegel ist ein Bündel zueinander paralleler Strahlen, sein Öffnungswinkel beträgt 0° . Sein Durchmesser ist gleich dem Durchmesser der Eintrittspupille. Also ist die hyperfokale Entfernung diejenige, **wo der erlaubte „objektseitige Zerstreuungskreisdurchmesser“ so groß ist wie die Eintrittspupille**.

Und wieder gilt: bei gleichem Bildwinkel und gleicher Blende hat das kleinere Aufnahmeformat die kleinere Eintrittspupille. Der erlaubte objektseitige Zerstreuungskreisdurchmesser wird also schon in kleineren Objektfeldern, also bei geringerer Entfernung erreicht.

Wir können an den Strahlkegeln auch leicht erkennen, dass bei hyperfokaler Einstellung die **Vordergrenze der Schärfentiefe** bei der halben hyperfokalen Entfernung liegt. Denn der Strahlkegel, dessen rückwärtige Verlängerung in der hyperfokalen Objektebene so groß ist wie die Eintrittspupille, hat seine Spitze genau in der Mitte zwischen Eintrittspupille und Objektebene.

An dieser Stelle sollten wir doch eine Ausnahme machen und ein paar Formeln hinschreiben, weil sie die allerwichtigsten des ganzen Themas sind und auch so einfach, dass man sie im Kopf rechnen kann:

$$EP = \frac{f'}{k}$$

Durchmesser der Eintrittspupille ist Brennweite geteilt durch Blendenzahl

$$Z_{\text{hyperfokal}} = EP = M \cdot z'$$

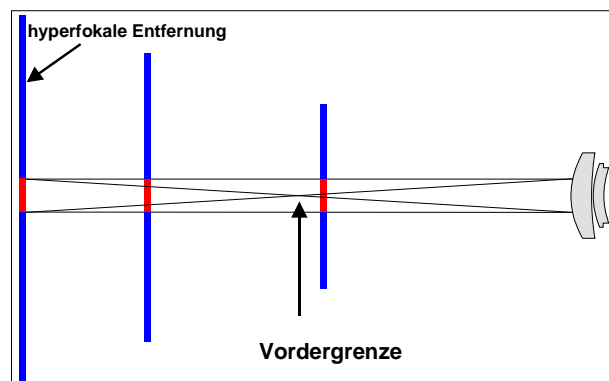
Der objektseitige Zerstreuungskreis in hyperfokaler Entfernung ist so groß wie die Eintrittspupille, der bildseitige Zerstreuungskreis ergibt sich daraus durch den Abbildungsmaßstab

$$M \approx \frac{E}{f'}$$

Bei großen Entfernungen ist der Maßstab das Verhältnis von Entfernung und Brennweite; daraus folgt:

$$E_{\text{hyperfokal}} \approx \frac{(f')^2}{z' \cdot k}$$

EP = Durchmesser der Eintrittspupille, f' = Brennweite, k = Blendenzahl, M = Maßstab, Z = objektseitiger Zerstreuungskreis, z' = bildseitiger Zerstreuungskreis, E = Entfernung



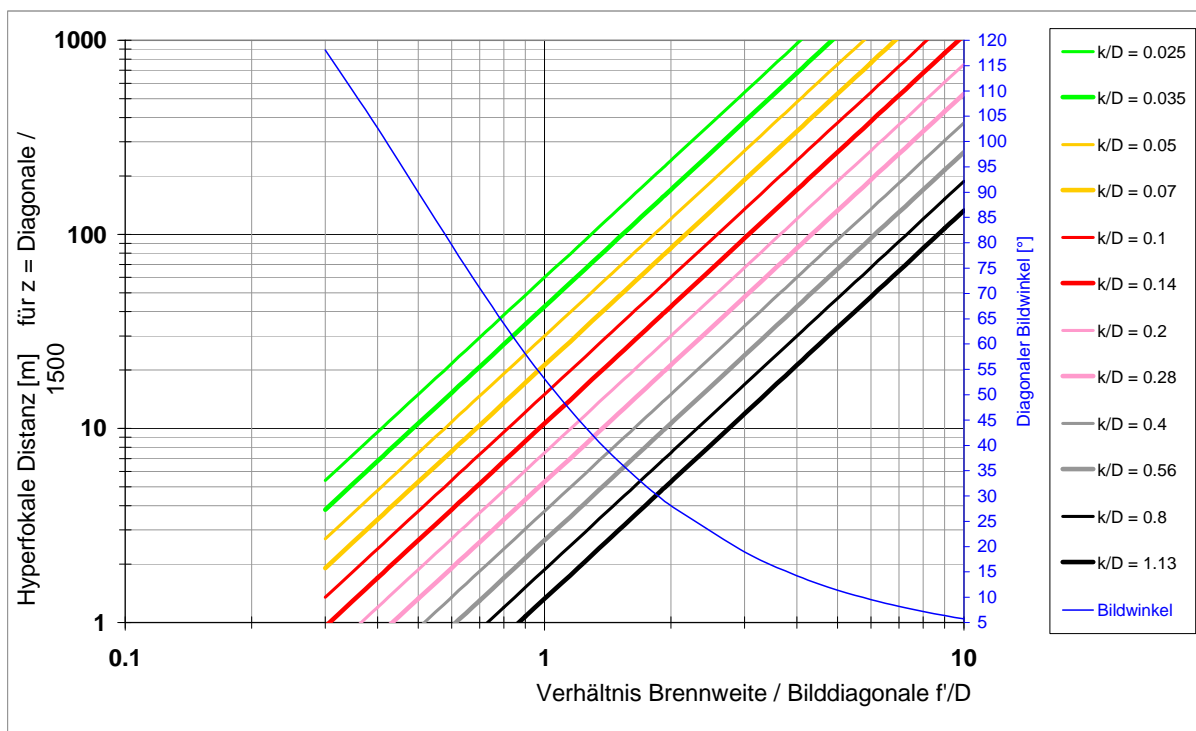
Besonders leicht lässt sich mit diesen Größen rechnen, wenn man alles auf die Formatdiagonale bezieht (D = Diagonale des Bildformates); dann sieht die Formel für die hyperfokale Entfernung zunächst komplizierter aus, aber sie führt zu sehr handlichen Zahlen, mit denen man die hyperfokale Entfernung tatsächlich im Kopf ausrechnen kann:

$$E_{\text{hyperfokal}} \approx \frac{D}{z'} \cdot \frac{D}{k} \cdot \left(\frac{f'}{D}\right)^2$$

Bei einem Kleinbildobjektiv mit Brennweite $f' = 85$ mm und Blendenzahl $k=2$, einer Länge der Bilddiagonalen von 43 mm und einem geforderten Zerstreuungskreisdurchmesser von $D/1500$ wird daraus:

$$E_{\text{hyperfokal}} \approx 1.500 \cdot 21.5 \cdot (2)^2 = 129\text{m}$$

(dabei muss man für höchste Ansprüche an die Schärfe den Faktor 1.5 sogar verdoppeln!)

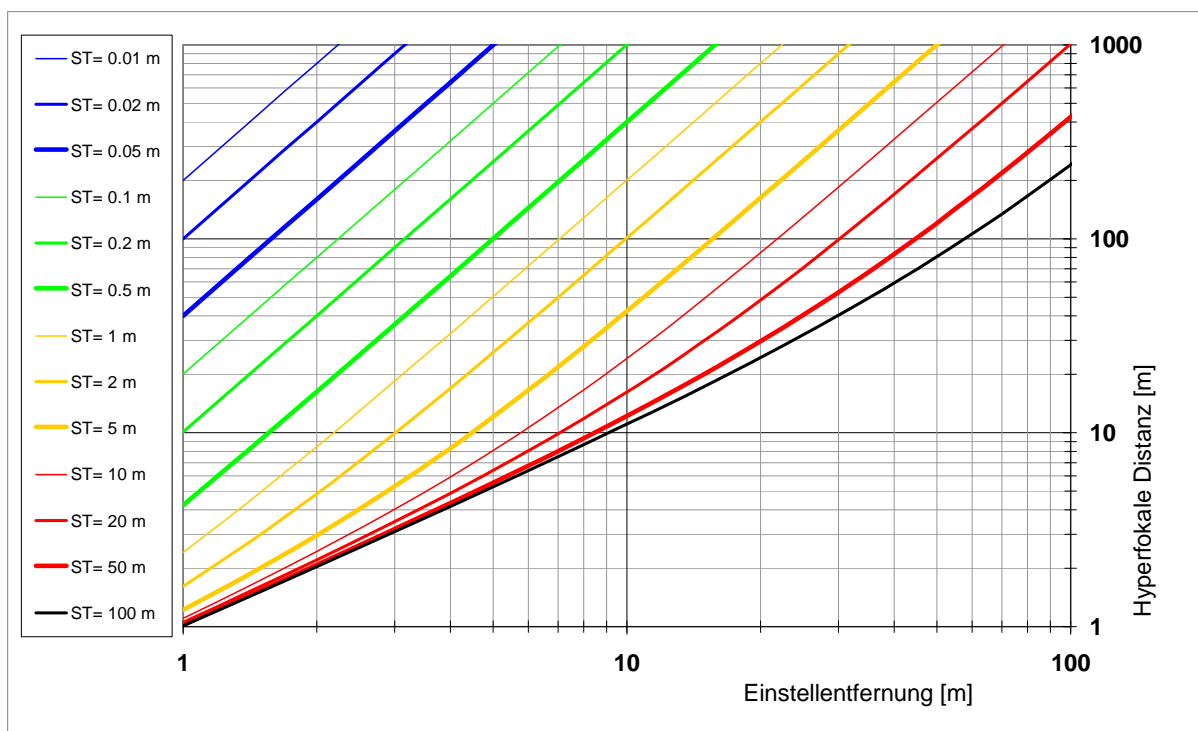


Wer sich das Rechnen ersparen will, kann auch diese Grafik benutzen, sie gilt universell für alle Formate, weil Blende und Brennweite nicht absolut, sondern bezogen auf die Diagonale des Bildformates angegeben sind. Beim kurzen Teleobjektiv aus dem obigen Beispiel ist die Brennweite doppelt so lang wie die Bilddiagonale; die Blendenzahl 2 ist rund ein zwanzigstel der Diagonale: also findet man die hyperfokale Entfernung, wenn man von der horizontalen Skala bei 2 nach oben geht bis zur dünnen gelben Linie für $k/D=0.05$. Die hyperfokale Entfernung wird oft unterschätzt; wenn man prüfen will, ob die Unendlichjustage von Objektiv und Kamera in Ordnung sind, muss man für längere Brennweiten sehr weit entfernte Objekte suchen.

Die **hyperfokale Entfernung** ist eine Art **Schlüsselgröße** für die Berechnung von Schärfentiefe – kennt man sie, dann kann man allein daraus für jede Entfernung die Schärfentiefe ausrechnen. Das liegt daran, dass sie alles enthält, was wir für unsere Vorstellung von den „objektseitigen Zerstreuungskreisen“ benötigen, weil sie das Produkt von drei Verhältnis-Zahlen ist (siehe vorhergehende Seite):

- Das Verhältnis von Brennweite und Bilddiagonale legt fest, wie schnell das Objektfeld mit wachsender Entfernung von der Kamera größer wird.
- Das Verhältnis von Brennweite und Blendenzahl legt fest, wie groß der Durchmesser der Eintrittspupille ist, wie schlank also die Lichtkegel von Punkten außerhalb der Fokusebene sind.
- Das Verhältnis von Bilddiagonale und Zerstreuungskreisdurchmesser legt fest, wie groß die erlaubte Unschärfe sein darf.

Deshalb kann man sehr einfach mit der folgenden Grafik einen Überblick geben über die Größenordnungen von Schärfentiefe im normalen Aufnahmebereich. Jede farbige Linie steht für eine bestimmte, konstante Schärfentiefe, beginnend bei 1 Zentimeter in der linken oberen Ecke und endend bei 100 Meter Schärfentiefe auf der schwarzen Linie. Die Achsen der Grafik sind nur Entfernungen, gemessen in Metern, nämlich die Aufnahmeentfernung auf der horizontalen Achse und die hyperfokale Entfernung auf der vertikalen Achse. Blendenzahlen, Formatgrößen und Brennweiten kommen überhaupt nicht vor, sie stecken schon in der hyperfokalen Entfernung drin. Deshalb ist diese Grafik universell für alle Kameraformate.



Faustregeln

Mit der hyperfokalen Distanz lassen sich ein paar nützliche Faustregeln für die Schärfentiefe formulieren:

„Wenn die Fokussentfernung ein zehntel der hyperfokalen Distanz ist, dann ist die Schärfentiefe ein fünftel der Fokussentfernung.“

„Wenn die Fokussentfernung gleich dem 0.4fachen der hyperfokalen Distanz ist, dann ist die gesamte Schärfentiefe so groß wie die Fokussentfernung.“

„Wenn die Fokussentfernung ein Drittel der hyperfokalen Distanz ist, dann ist die Schärfentiefe hinter der Fokusebene doppelt so groß wie die Tiefe nach vorn vor der Fokusebene.“

Einen Teil der letzten Regel („1/3 davor, 2/3 dahinter“) findet man oft in Lehrbüchern der Fotografie. Sie stimmt aber nicht allgemein. Sie gilt bei jeder Blende nur für eine bestimmte Aufnahmeentfernung.

Bei kürzeren Entfernungen wird die Verteilung symmetrischer, bei längeren Entfernungen immer unsymmetrischer, was ja bei der hyperfokalen Entfernung ganz offensichtlich wird.

Es gibt einen Zusammenhang zwischen den Entfernungen von der Kamera zur vorderen und hinteren Grenze der Schärfentiefe und der Fokussentfernung, der für alle Blenden und Entfernungen gilt:

$$E = \frac{2 \cdot V \cdot H}{V + H}$$

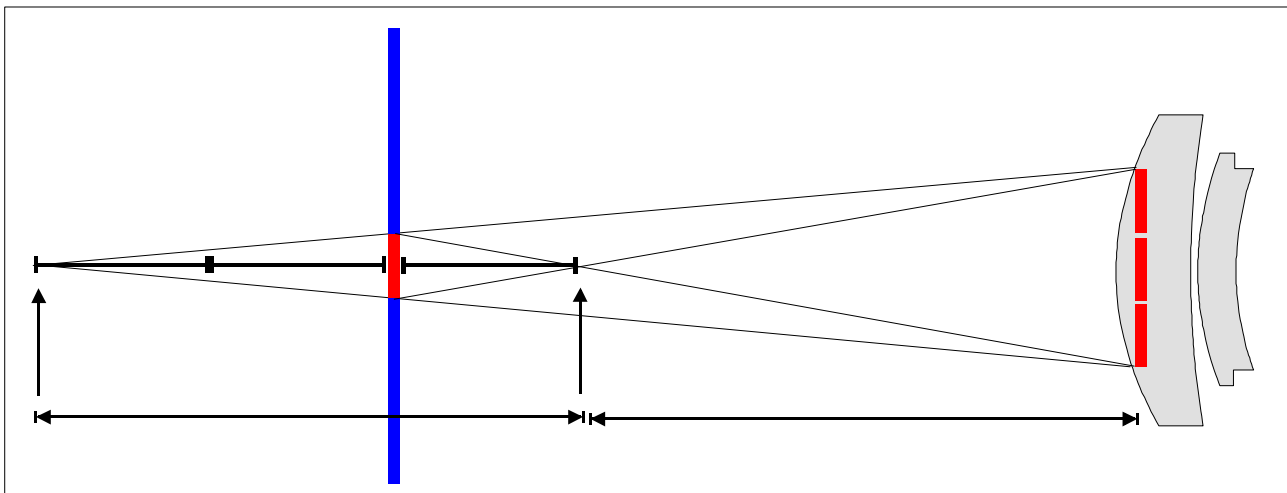
In Worten: die Fokussentfernung ist das Produkt von Vordergrenze und Hintergrenze, geteilt durch den Mittelwert von Vordergrenze und Hintergrenze. (auch **harmonisches Mittel** genannt, Beispiel: Vordergrenze 3m, Hintergrenze 6m, fokussierte Entfernung 4 m, 18 geteilt durch 4.5). Daraus kann man ausrechnen, dass die genannte Verteilung im Verhältnis vorn:hinten = 1:2 nur dann vorliegt, wenn die Entfernung zur hinteren Grenze doppelt so groß ist wie die zur vorderen. Oder anders ausgedrückt: die gesamte Schärfentiefe ist dann so groß wie die Entfernung zwischen Kamera und Vordergrenze.

Für diejenigen, die Freude haben an der Schönheit mathematischer Zusammenhänge, sei erwähnt, dass dies genau bei der Entfernung der Fall ist, wo die Größe des „objektseitigen Zerstreuungskreises“ 1/3 der Eintrittspupille beträgt, also bei einem Drittel der jeweiligen hyperfokalen Entfernung.

Für ein 50 mm Kleinbildobjektiv ist das bei einem Zerstreuungskreis 0.03 mm und Blende 8 etwa eine Fokussentfernung von 3.5 Meter, also eine Standard-Aufnahmesituation. Deshalb geistert diese Regel immer wieder durch die Fotolehrbücher.

Sie gilt aber keineswegs allgemein, im Nahbereich wird die Verteilung sehr symmetrisch. Die Umkehrung des Objektivs ändert daran auch nichts, sie beeinflusst nur den Korrektionszustand.

Wenn man mit relativ langen Brennweiten fotografiert, deren hyperfokale Entfernung ja sehr groß ist, dann muss man eher von einer symmetrischen Verteilung der Schärfentiefe vor und hinter der Fokusebene ausgehen.



Nahbereich

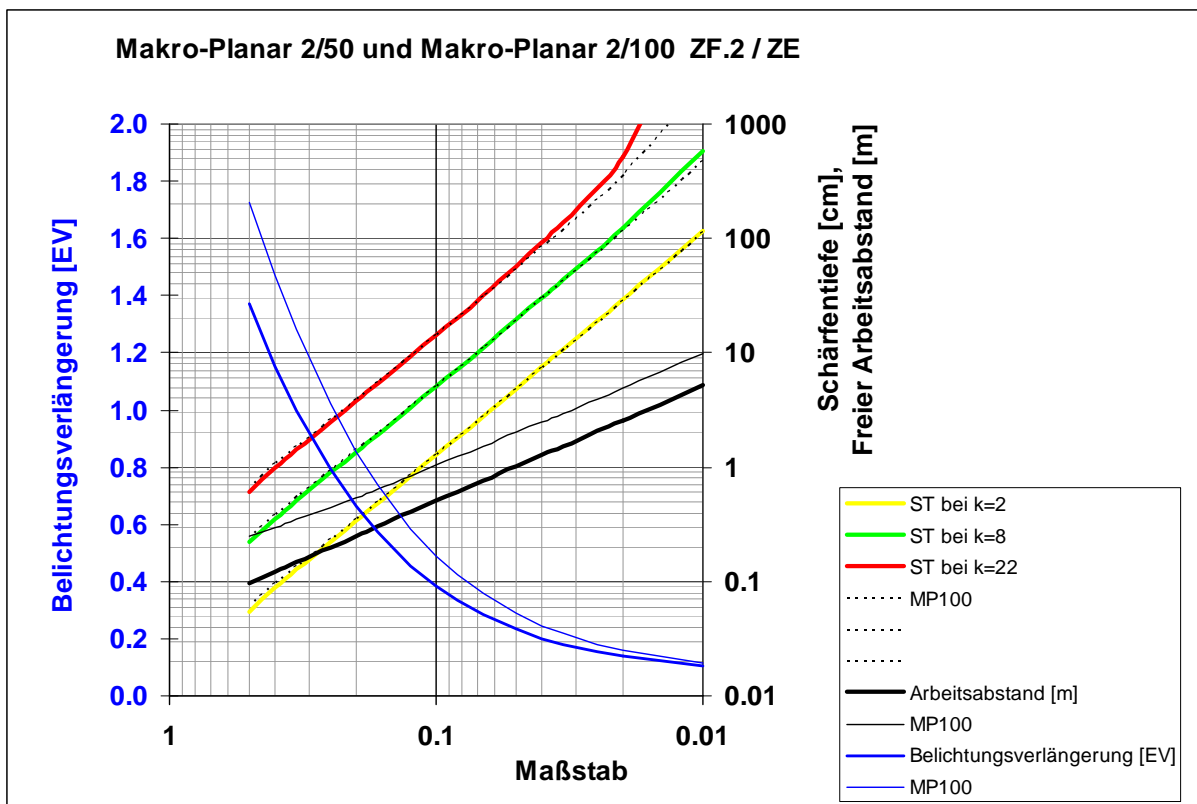
Bei der üblichen maximalen Naheinstellung von Objektiven (Maßstab ca. 1:8 bis 1:10), und erst recht wenn man mit Makroobjektiven oder mit Zubehör wie Zwischenringen und Balgengeräten noch weiter in den Makrobereich vordringt, wird die Schärfentiefe ziemlich klein. Die an der Objektivfassung gravierten Skalen helfen dann nur noch wenig; bei vielen modernen Objektiven mit ihren steilen Entfernungsskalen sind sie ohnehin kaum mehr als eine nutzlose Verzierung.

Viele Erläuterungen zum Thema Schärfentiefe machen einen Bogen um die Makrofotografie, weil dort die üblichen Formeln und Tabellen für große Entfernungen nicht mehr gelten. Im Nahbereich hat das Objektiv in Wirklichkeit nicht mehr die Blendenzahl, die auf dem Ring graviert ist; man muss mit der effektiven Blende rechnen – manche Kameras zeigen sie an, andere nicht. Wie stark der effektiv wirksame Blendenwert abweicht vom Nennwert, hängt nicht nur vom Maßstab sondern auch von der Bauweise des Objektivs ab.

Teleobjektive zeigen im Nahbereich einen stärkeren Verlust der effektiven Blendenzahl als symmetrisch gebaute Objektive. Moderne Makroobjektive haben relativ zueinander bewegliche Linsengruppen, um die Korrektur bei allen Entfernungen stabil zu halten. Infolgedessen ändert sich aber auch ihre Brennweite mit der Fokussierung. Also genügend viele Komplikationen.

Eine ausführliche und gründliche Erklärung der optischen Gesetze in der Makrofotografie bis in den Bereich der vergrößerten Abbildung hinein würde deshalb den Rahmen des heutigen Themas sprengen.

Ich möchte unsere Leser aber wenigstens mit den wichtigsten Zahlen für unsere beiden Makroobjektive 2/50 und 2/100 für das Kleinbildformat versorgen, hier zunächst als grafischer Überblick und am Schluss des Kapitels als Tabelle:



Schärfentiefe, freier Arbeitsabstand (ohne Sonnenblende) und Belichtungsverlängerung der beiden Objektive Makro-Planar 2/50 und 2/100, berechnet für das Kleinbildformat und Zerstreuungskreisdurchmesser Diagonale/1500.

Die Grafik der vorigen Seite ist ähnlich wie die auf Seite 8, allerdings ist hier die Schärfentiefe nicht über der Aufnahmeentfernung sondern über dem Abbildungsmaßstab aufgetragen, und zwar gleichzeitig für zwei Objektive. Dass derselbe Abbildungsmaßstab aus unterschiedlichen Entfernungen erreicht wird, zeigen uns die beiden schwarzen Linien. Die gelbe, grüne und rote Linie zeigen die Schärfentiefe für volle Öffnung, Blende 8 und Blende 22 beim 2/50. Die Werte für dieselben Blenden des 2/100 sind als gestrichelte Linien eingezeichnet.

Fast überall sind diese Linien deckungsgleich - noch einmal ein schöner Beweis dafür, dass Schärfentiefe meist nur vom Abbildungsmaßstab abhängt. Nur an den Enden gibt es Abweichungen: auf der rechten Seite beim Maßstab 1:100 und starker Ablendung nähert sich beim 50er die hintere Grenze des Schärfenbereichs schon dem Wert ‚Unendlich‘. Auf der linken Seite beim Maßstab 1:2 hat das 100er ein klein wenig mehr Schärfentiefe bei gleichem Nennwert der Blende, die gestrichelten Linien liegen geringfügig über den farbigen.

Ist das ein Vorteil der optischen Konstruktion des 2/100 gegenüber dem 2/50? Nein. Denn die etwas größere Schärfentiefe ist bedingt durch die um eine Drittel Blendenstufe größere Belichtungsverlängerung des 100ers, wie wir an den blauen Kurven ablesen können. Beim Maßstab 1:2 ist seine Anfangsöffnung nicht mehr $f/2$ sondern $f/3.6$, beim 50er verringert sich die Anfangsöffnung nur auf $f/3.2$. Dieser Unterschied zwischen unseren zwei Makroobjektiven deutet darauf hin, dass wir Schärfentiefe nicht gratis bekommen sondern dafür bezahlen müssen, nämlich mit Belichtungszeit. In der Tat steckt dahinter ein sehr grundlegendes, sehr allgemeines physikalisches Gesetz: **das Gesetz von der Erhaltung der Energie**.

Der Öffnungswinkel des objektseitigen Lichtkegels bestimmt nämlich auch, wie viel optische Strahlungsenergie in das Objektiv eintritt. Und nur diese Energie kann auf die Bildfläche verteilt werden. Vergleicht man zwei Bilder gleicher Größe miteinander, dann muss das, was bei gleicher Empfindlichkeit eine längere Belichtungszeit benötigt, die größere Schärfentiefe haben, weil es mit einem schlankeren Lichtkegel auf der Bildseite weniger Energie eingesammelt hat (Absorption durch Filter muss man natürlich ausschließen, es geht hier nur um die geometrische Effizienz). Deshalb ist die spezielle optische Konstruktion eines Objektivs letzten Endes für die Schärfentiefe bedeutungslos.

Telekonstruktionen haben zwar einen stärkeren Lichtverlust bei Naheinstellung; das kommt daher, dass ihre Eintrittspupille relativ weit hinten liegt, so dass die objektseitigen Lichtkegel etwas schlanker werden, wenn die Entfernungen zum Objekt ähnlich sind wie die Abmessungen des Objektivs. Man muss sie aber einfach etwas weniger abblenden, um die gleiche Schärfentiefe zu haben wie mit einem symmetrischen Objektiv.

Verschiedene Aufnahmeformate haben gleiche objektseitige Schärfentiefe, wenn sich bei gleicher Sensorempfindlichkeit ihre Belichtungszeiten verhalten wie die Bildflächen. Denn gleiche Schärfentiefe heißt, dass gleich viel Energie für beide Bilder vom Objekt gesammelt wird; wenn diese Energie auf die doppelt so große Sensorfläche verteilt wird, ist dort die Lichtintensität halb so groß und deshalb die doppelte Belichtungszeit erforderlich.

Als in der analogen Fotografie praktisch alle Formate mit den gleichen Emulsionen gearbeitet haben, waren deshalb kleine Formate im Nahbereich immer im Vorteil, wenn man große Schärfentiefe bei kurzen Verschlusszeiten erreichen musste. Falls aber das Signal/Rausch-Verhältnis des Sensors mit wachsender Formatgröße zunimmt, wie das z.T. in digitalen Kameras der Fall ist, dann kann man den größeren Lichtbedarf des größeren Formats für gleiche Schärfentiefe durch Steigerung der Empfindlichkeit ausgleichen.

Wenn man die Forderungen der Freihand-Fotografie mal beiseite lässt und statische Objekte vom Stativ fotografiert, so dass die Belichtungszeit beliebig sein kann, dann gibt es hinsichtlich der maximal erreichbaren Schärfentiefe gar keine Unterschiede zwischen verschiedenen Aufnahmeformaten.

Denn wie weit man abblenden darf, ohne dadurch schließlich wieder Bildqualität zu verlieren, ist aufgrund der Wellennatur des Lichtes durch die Beugung vorgegeben. Sie sorgt dafür, dass ein Bildpunkt als Scheibchen abgebildet wird, dessen Durchmesser in Mikrometern etwa gleich der Blendenzahl ist. Die auf das Format bezogene relative Größe des Beugungs-scheibchens erlaubt also beim größeren Format stärkeres Abblenden. **An der Beugungsgrenze haben alle Formate die gleiche Schärfentiefe.**

Makro-Planar 2/50

Maßstab	BV [EV]	AA [m]	Schärfentiefe [cm]								FB
			k=2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	
1: 100	0.1	5.15	118	167	245	361	581	1026	4592	2427	15.4
1: 50	0.1	2.57	29.5	41.4	59.6	84	124	179	294	521	15.3
1: 40	0.2	2.06	19.0	26.6	38.2	54	78	111	174	275	15.2
1: 30	0.2	1.54	10.8	15.1	21.6	30.4	44	61	93	137	15.0
1: 25	0.2	1.28	7.5	10.5	15.1	21.2	30.4	42	63	91	14.9
1: 20	0.2	1.02	4.9	6.8	9.7	13.7	19.6	27.1	40	57	14.8
1: 15	0.3	0.77	2.8	3.9	5.6	7.8	11.2	15.4	22.7	31.7	14.5
1: 12	0.3	0.61	1.8	2.5	3.6	5.1	7.3	10.0	14.6	20.3	14.3
1: 10	0.4	0.51	1.3	1.8	2.5	3.6	5.1	7.0	10.3	14.2	14.0
1: 8	0.5	0.41	0.83	1.17	1.67	2.33	3.33	4.59	6.70	9.25	13.7
1: 6	0.6	0.30	0.48	0.72	0.97	1.35	1.93	2.66	3.87	5.34	13.1
1: 5	0.7	0.25	0.34	0.48	0.68	0.96	1.37	1.88	2.74	3.78	12.7
1: 4	0.8	0.20	0.22	0.31	0.45	0.63	0.90	1.23	1.79	2.47	12.2
1: 3	1.0	0.15	0.13	0.18	0.26	0.36	0.51	0.71	1.03	1.42	11.3
1: 2.5	1.2	0.12	0.09	0.12	0.18	0.25	0.36	0.49	0.71	0.98	10.7
1: 2	1.4	0.10	0.06	0.08	0.11	0.15	0.22	0.30	0.44	0.61	9.9

Makro-Planar 2/100

Maßstab	BV [EV]	AA [m]	Schärfentiefe [cm]								FB
			k=2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	
1: 100	0.1	9.81	117	164	236	335	493	715	1198	2209	15.4
1: 50	0.2	4.93	29.6	41.5	59.3	83	120	167	251	364	15.1
1: 40	0.2	3.96	19.1	26.7	38.2	54	77	107	158	225	15.0
1: 30	0.2	2.98	10.9	15.2	21.8	30.5	44	60	89	124	14.8
1: 25	0.2	2.50	7.6	10.7	15.3	21.4	30.6	42	62	86	14.7
1: 20	0.3	2.01	4.9	6.9	9.9	13.9	19.8	27.3	40	55	14.5
1: 15	0.4	1.52	2.8	4.0	5.7	8.0	11.4	15.7	22.9	31.6	14.1
1: 12	0.4	1.23	1.9	2.6	3.7	5.2	7.5	10.3	15.0	20.6	13.8
1: 10	0.5	1.03	1.3	1.9	2.6	3.7	5.3	7.3	10.6	14.6	13.5
1: 8	0.6	0.84	0.87	1.22	1.74	2.44	3.48	4.79	6.98	9.61	13.1
1: 6	0.7	0.64	0.51	0.72	1.02	1.43	2.05	2.81	4.09	5.63	12.4
1: 5	0.9	0.54	0.37	0.51	0.73	1.02	1.46	2.01	2.93	4.03	11.9
1: 4	1.0	0.45	0.24	0.34	0.49	0.68	0.97	1.33	1.94	2.67	11.2
1: 3	1.3	0.35	0.14	0.20	0.28	0.40	0.57	0.78	1.14	1.56	10.3
1: 2.5	1.5	0.30	0.10	0.14	0.20	0.28	0.40	0.55	0.80	1.10	9.6
1: 2	1.7	0.25	0.06	0.09	0.12	0.17	0.25	0.34	0.50	0.69	8.8

Schärfentiefetabellen für die Objektive Makro-Planar 2/50 und 2/100. Die Blendenzahlen sind die gravierten Nennwerte. BV = Belichtungsverlängerung in Blendenstufen [EV], AA ist der freie Arbeitsabstand, gemessen von der Fokusebene bis zum Filtergewinde der Objektive. FB ist der förderliche Blendenwert, bei dem auch beugungsbegrenzt noch eine Kontrastübertragung von 10% bei 90 Lp/mm erreicht wird. Damit tritt auch bei 24MP-Kameras nur ein sehr kleiner Verlust des Schärfeeindrucks auf, der noch durch digitale Scharfzeichnung ausgeglichen werden kann. Kombinationen von Maßstab und Blendenzahl, die diese Forderung nicht mehr erfüllen, sind in der Tabelle grau wiedergegeben. Die Schärfentiefe ist für den Standard-Zerstreuungskreis 0.03 mm im Kleinbildformat berechnet. Die beste Leistung bei der förderlichen Blende wird natürlich nicht in der gesamten Tiefe erreicht.

Zerstreuungskreisdurchmesser

Alle bisher gezeigten Kurven und Tabellen sind berechnet worden mit der Annahme eines Zerstreuungskreisdurchmessers, der 1500mal auf die Diagonale des Bildes passt. Wir müssen aber noch begründen, warum man oft diese Größe wählt und warum man manchmal eine andere nehmen sollte. Schärfentiefe ist ja das Ergebnis einer willkürlichen Festlegung, oder besser gesagt, sie hängt von den Betrachtungsbedingungen ab. Ob man aber eine kleine oder größere Unschärfe toleriert, hat keinen Einfluss auf die grundsätzlichen Eigenschaften der Schärfentiefe.

Das Auge wird in einem Bild keinen Mangel an Schärfe wahrnehmen, wenn es nur von der Leistungsfähigkeit des Auges selbst abhängt, welche kleinsten Details erkannt werden können. Umgekehrt wird das Auge ein Bild als unscharf empfinden, wenn seine Leistungsfähigkeit deutlich unterfordert wird. **Das Auflösungsvermögen des Auges muss also unser Maßstab sein.**

Wenn man das Auflösungsvermögen des Auges an periodischen Schwarz-Weiß-Mustern testet, dann findet man bei normalsichtigen Versuchspersonen eine Auflösungsgrenze von ca. 8 Linienpaaren pro Millimeter, wenn sich das Testmuster in deutlicher Sehweite befindet, also in etwa 250 Millimeter Abstand vom Auge. Bei größerem Betrachtungsabstand ist das Auflösungsvermögen natürlich geringer; aus zwei Meter Entfernung kann man gerade noch ein Muster mit einem Linienpaar pro Millimeter von einer gleichförmig grauen Fläche unterscheiden; das kann man leicht mit einem Lineal probieren.

Will man die Leistung des Auges unabhängig von der Objektentfernung beschreiben, dann gibt man seine Winkelauflösung an. Und damit entspricht den obigen Zahlen, dass das Auge kleinste Details voneinander trennen kann, wenn sie unter einem **Sehwinkel von mindestens einer Bogenminute** erscheinen. Dies ist der **physiologische Grenzwinkel** des menschlichen Auges.

Wenn man ein 12x18 cm großes Bild, also z.B. eine 5fache Vergrößerung vom vollständig genutzten Kleinbildformat, aus 25 cm Entfernung betrachtet, dann sieht man 1/3000 der Diagonale dieses Bildes unter einem Sehwinkel von einer Bogenminute.

Eine noch höhere Schärfe des Bildes würde das Auge also gar nicht bemerken. Dieser Zerstreuungskreis ist deshalb die strengste sinnvolle Forderung, wenn man solche Betrachtungsbedingungen wählt.

Natürlich können wir das Negativ oder das Sensorbild viel stärker vergrößern, z.B. 20fach auf die Postergröße 48x72 cm. Gerade in der digitalen Fotografie geht das ganz einfach mit wenigen Mouseklicks. Dann sehen wir 1/3000 der Bilddiagonale schon unter einem Sehwinkel von vier Bogenminuten, wenn wir das Bild immer noch aus 25 cm Entfernung betrachten; das Auge kann dann durchaus feinere Details sehen.

Allerdings erscheint uns die gesamte Bildbreite unter einem Winkel von 110°; das können wir nicht als ganzes überblicken und überall im Bild gleichzeitig kleinste Details sehen. Bei dieser Betrachtungsweise muss unser Auge im Bild herumwandern, es sieht Details, aber nicht das ganze Bild. Wenn wir dagegen das Poster aus 1 m Entfernung betrachten, dann sehen wir - wie beim 12x18 cm Bild aus 25 cm Entfernung - die Bildbreite unter einem Winkel von 40°, den wir noch ganz passabel überblicken können.

Immer wenn wir Bilder so betrachten, dann ist 1/3000 der Bilddiagonale die strengste sinnvolle Forderung an den Zerstreuungskreisdurchmesser. Ein doppelt so großer Zerstreuungskreis von 1/1500 der Diagonale, den man unter dem Sehwinkel von 2 Bogenminuten sieht, bietet dann auch noch eine brauchbare Schärfe; diese Forderung entspricht ungefähr dem oft benutzten 0.03 mm Zerstreuungskreis für das Kleinbildformat. Wir dürfen aber nicht vergessen, dass mit diesem so begründeten üblichen Zerstreuungskreis unsere Erwartungen an die Bildschärfe nicht mehr erfüllt werden können, wenn wir Ausschnittvergrößerungen machen oder in Großvergrößerungen Details betrachten.

Den 0.03 mm großen Zerstreuungskreis des Kleinbilds sehen wir in einer 20fachen Vergrößerung aus 25 cm Abstand unter einem Sehwinkel von über 8 Bogenminuten – das empfindet das Auge nicht mehr als scharf.

In den 50er Jahren hat man die Schärfentiefe bei Kleinbildobjektiven oft mit einem Zerstreuungskreis von 0.05 mm berechnet, also sogar 1/865 der Bilddiagonale. Den sieht man unter 2 Bogenminuten, wenn man ein Postkartenbild 10x15 cm aus 35 cm Entfernung betrachtet. Das entsprach damals im Amateurbereich schon den etwas kritischeren Sehgewohnheiten, als man noch überwiegend Kontaktabzüge von Rollfilmkameras in die Fotoalben geklebt hat.

Die Schärfentiefe ist also eine recht unscharf definierte Größe, die stark von den Betrachtungsbedingungen abhängt. Streng genommen kann man sogar Gründe dafür finden, innerhalb eines Aufnahmeformates je nach Brennweite mit verschiedenen Zerstreuungskreisen zu rechnen.

Wie genau sind Tabellen und Schärfentieferechner?

In der Regel täuschen die meisten Tabellen eine Genauigkeit vor, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden und auch nicht sinnvoll ist. Das liegt zum Teil daran, dass die errechneten Tabellenwerte ja auf der willkürlichen Festlegung eines Grenzwertes beruhen (erlaubter Zerstreuungskreisdurchmesser). In Wirklichkeit ändert sich die Schärfe in der Tiefe aber kontinuierlich, und ihre subjektive Wahrnehmung hängt außer von den Betrachtungsbedingungen auch ein wenig vom Bildinhalt ab. Es existiert also keine scharfe Grenze!

Dagegen erwecken die **von-bis**-Tabellen mit Millimeter-Genauigkeit bei Meter-Entfernungen leicht die Vorstellung, dass da vor der Kamera zwei präzise positionierte, ebene Grenzflächen sind, zwischen denen alles optimal scharf abgebildet wird. An dieser Vorstellung ist aber einiges falsch.

Die allermeisten Tabellen und auch die Berechnungsprogramme, die man im Internet findet, beruhen auf dem geometrischen Modell der Lichtkegel und Zerstreuungskreise, das auch wir bisher zur Veranschaulichung benutzt haben. Das ist aber trotz aller Schönheit nur eine Idealisierung der wirklichen optischen Vorgänge in einem Objektiv. Denn dieses Modell kennt keine Aberrationen, keine Farbe und keine Beugung. Im geometrischen Modell ist der Zerstreuungskreis eine gleichmäßig helle Scheibe –

Wenn man nämlich Bilder ‚**perspektivisch richtig**‘ betrachtet, also annähernd unter dem gleichen Winkel unter dem bei der Aufnahme vom Kamerastandpunkt die Wirklichkeit gesehen wurde, dann muss man Weitwinkelaufnahmen aus geringerem Abstand betrachten als Bilder von Normal- und Teleobjektiven. Folglich muss man die Schärfentiefe in Weitwinkelaufnahmen mit kleineren Zerstreuungskreisen berechnen.

Beim DISTAGON 4/40 der alten C-Baureihe für die HASSELBLAD wurde die Schärfentiefe kritischer berechnet als für die übrigen Objektive der Reihe. Denn auch ohne perspektivisch richtige Betrachtung sind die uns interessierenden Details in Weitwinkelaufnahmen meist kleiner und stellen daher höhere Anforderungen an die Bildschärfe.

In Wirklichkeit ist die Helligkeitsverteilung im fokussierten und im leicht defokussierten Punktbild aber ungleichmäßig. Damit werden wir uns weiter unten noch ausführlicher beschäftigen. Alle Arten von Aberrationen realer Objektive sorgen für eine Reihe von Abweichungen vom geometrischen Modell:

- Bei idealen Objektiven wächst die bildseitige Schärfentiefe beim Abblenden gleichmäßig nach vorn und hinten. Bei realen Objektiven kann zusätzlich eine einseitige Verschiebung auftreten, die sogenannte Blendendifferenz. Wenn sie sehr groß ist, kann es z.B. passieren, dass die Vorgrenze des Schärfentiefebereiches beim Abblenden unverändert stehen bleibt.
- Oft ist diese Verschiebung im Bildfeld gegenläufig zur Verschiebung in der Bildmitte, der Schärfentieferaum ist dann also gekrümmt, und die Krümmung nimmt mit dem Abblenden etwas zu.
- Wenn Objektive Vignettierung durch die Fassung aufweisen, dann ist die Schärfentiefe am Rand größer als in der Bildmitte, weil ja die Größe der Pupille durch die Vignettierung abnimmt.
- Abhängig vom Korrektionszustand kann der Charakter der Unschärfe vor und hinter der Fokusebene unterschiedlich sein. Streng genommen hängt dann die Schärfentiefe von der Ortsfrequenz, also der Feinheit der abgebildeten Strukturen ab.
- Die Lage des Schärfentiefebereiches hängt auch etwas von der Lichtfarbe ab.

Die üblichen Tabellen und Berechnungshilfsmittel liefern also nicht mehr als Anhaltswerte für die Praxis, aber man sollte sie nicht allzu ernst nehmen.

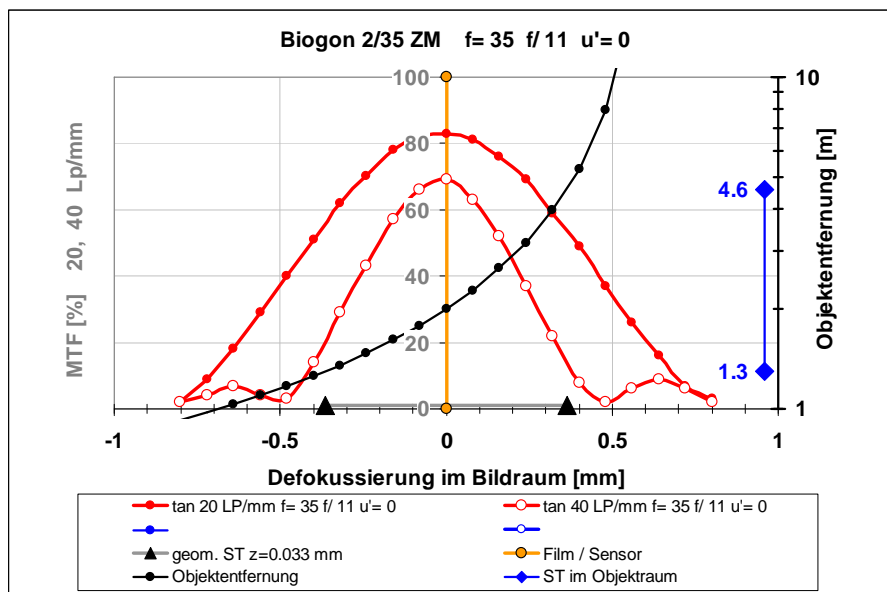
Schärfentiefe und Kontrastübertragung MTF

Was Schärfentiefe – hier müsste man vielleicht besser ‚Tiefenschärfe‘ sagen – bedeutet, kann man auch verstehen, wenn man misst, wie sich die Modulationsübertragung MTF (siehe CLN30 und CLN31) an einer Stelle im Bild mit der Tiefe ändert. Bei so einer Messung findet man Kurven von annähernd glockenförmiger Form, die sehr schön zeigen, dass die Bildschärfe innerhalb der Schärfentiefe keineswegs konstant ist, sondern sich kontinuierlich ändert. Und sie zeigen auch, dass an den Grenzen der üblichen Schärfentiefebereiche nicht mehr so arg viel von der bestmöglichen Leistung eines Objektivs übrig ist.

Als Faustregel kann man sagen, dass bei Defokussierung im Bildraum um k / R (k = Blendenzahl, R = Ortsfrequenz in Linienpaaren pro Millimeter) der MTF-Wert vom Maximum auf ca. 20-30 % abfällt.

Solche Messungen der MTF in Abhängigkeit vom Fokus zeigen vor allem auch die Grenzen der einfachen geometrischen Modelle zur Erklärung der Schärfentiefe. Wir finden zahlreiche Beispiele, wo die bildseitige Schärfentiefe aus verschiedenen Gründen nicht symmetrisch zum besten Fokus liegt sondern mehr nach vorn oder hinten ausgedehnt ist.

Wir finden auch Beispiele, wo bei gleicher Blendenzahl die Schärfentiefe unterschiedlich groß ist – nicht weil wir wegen unterschiedlicher Formatgrößen unterschiedliche Ortsfrequenzen betrachten – sondern, weil die Kurven der gleichen Ortsfrequenz unterschiedliche Breite haben.



Die roten Kurven in der obigen Grafik zeigen die MTF-Werte für die Ortsfrequenzen 20 und 40 Linienpaare pro Millimeter, und zwar wie sie sich in Längsrichtung im Bildraum ändern, wenn am Objektiv die Blende 11 eingestellt ist.

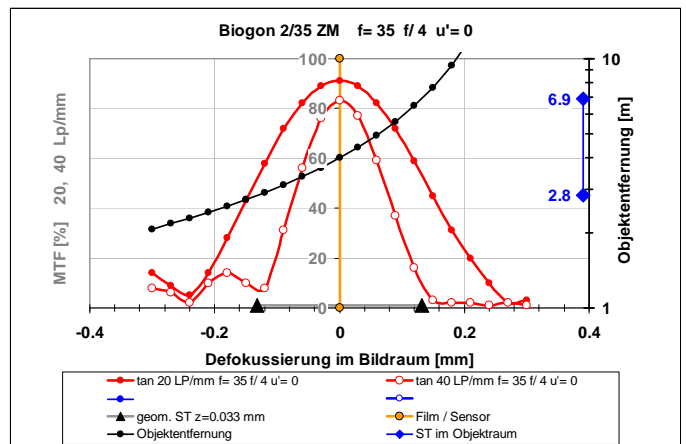
Die Lage jedes Messpunktes im Bildraum ist angegeben durch den Parameter ‚Defokussierung‘, der auf der horizontalen Achse angegeben ist. Bei Defokussierung Null ist die Kontrastübertragung am größten, dort sollte der Film oder Sensor sein – oben durch eine gelbe Linie symbolisiert.

Die schwarzen Dreiecksmarken auf der bildseitigen Fokusskala zeigen die bildseitige Schärfentiefe nach dem geometrischen Modell des Zerstreungskreises, also im obigen Beispiel jeweils 11 x 0.033 mm nach vorn und hinten.

Die gekrümmte schwarze Kurve zeigt den Zusammenhang zwischen den Entfernungen im Objektraum und den zugehörigen Lagen im Bildraum bei Fokussierung auf 2 Meter. Die Objektentfernungen sind auf der Skala am rechten Rand der Grafik abzulesen. Zur bildseitigen Schärfentiefe zwischen den schwarzen Dreiecken gehört also die objektseitige Schärfentiefe zwischen den blauen Marken; diese sind auch im Bild der Schärfentiefeskala auf der Objektivfassung zu sehen.

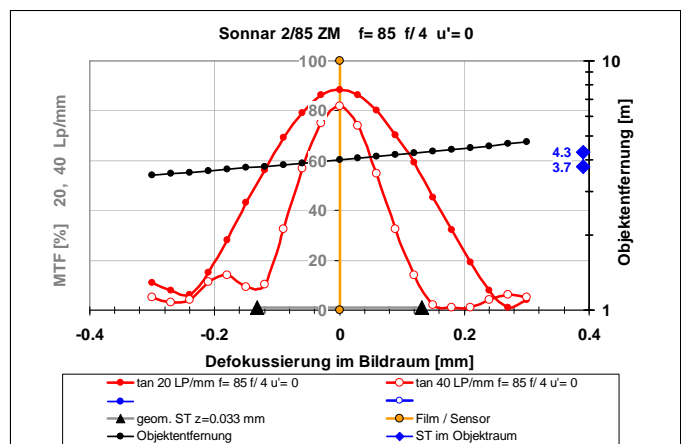
Wenn man an den Grenzen des Schärfentiefebereiches bei den Dreiecksmarken die MTF-Werte abliest, findet man noch 10 bis 20% bei 40 Lp/mm. Wenn man noch die zusätzlichen Verluste durch den Sensor berücksichtigt, dann dürfte also dort die Auflösung bei höchstens 40 Lp/mm liegen, also in einer 5fachen Vergrößerung bei 8 Lp/mm. Mehr leistet das Auge bei Betrachtung aus 25 cm Entfernung nicht, es wird also das Bild noch als scharf empfinden. Bei höheren Vergrößerungen muss man aber offenbar die erlaubte Abweichung vom besten Fokus etwas mehr einengen.

Wenn man die Blende weiter öffnet, werden die Kurven schmaler (beachten Sie bitte die geänderte Skalierung!) Die folgenden Kurven wurden am gleichen Objektivexemplar des **Biogon 2/35 ZM** wieder in der Bildmitte gemessen, jetzt bei Blende 4. Die schwarze Kurve für den Zusammenhang zwischen Bild und Objektentfernung gilt jetzt für Fokussierung auf 4 Meter Entfernung:

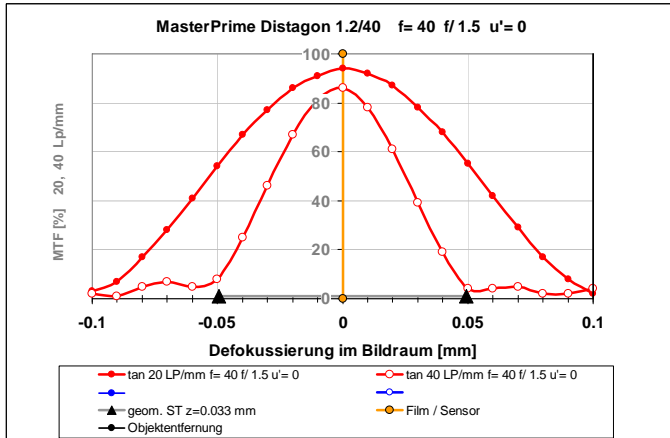


Im Vergleich zur geometrischen Schärfentiefe sind die Kurven jetzt eine Idee schmaler geworden. Gleichzeitig sind die maximalen MTF-Werte im besten Fokus etwas höher. Es liegt am einsetzenden Einfluss der Beugung, dass bei Blende 11 die Maximal-Kontraste schon etwas gesunken sind, und dass die Breite der Kurven stärker wächst als es dem Verhältnis der Blendenzahlen 11 und 4 entspricht.

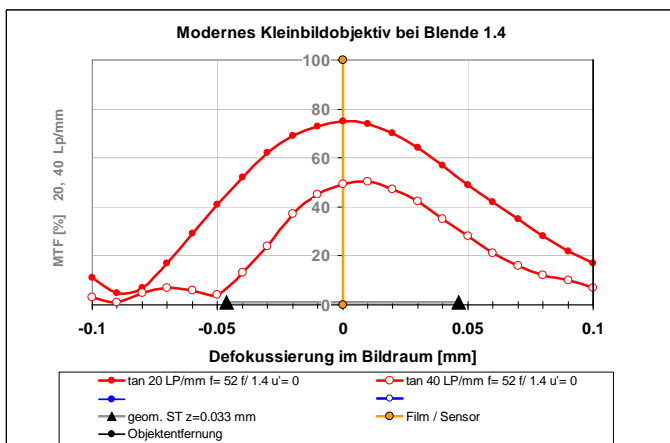
Wenn man ein Objektiv längerer Brennweite und ähnlicher Leistung bei der gleichen Blendenzahl misst, erhält man nahezu identische Kurven gleicher Breite, wie das Beispiel des **Sonnar 2/85 ZM** zeigt. Das ist also ein Beweis dafür, dass die bildseitige Schärfentiefe nicht von der Brennweite abhängt, sondern nur von der Blendenzahl. Ganz anders sieht aber nun die schwarze Kurve aus, welche den Zusammenhang zwischen Objektentfernung und Bildraumlage zeigt. Sie ist jetzt viel flacher, weil das Bild des Raumes eine größere Tiefe hat als bei der kurzen Brennweite. Deshalb gehört jetzt zur gleichen bildseitigen Schärfentiefe eine kleinere objektseitige Schärfentiefe.



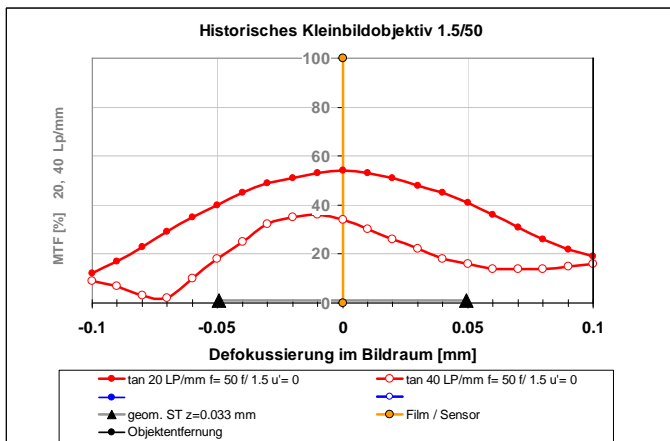
Die MTF-Kurven der vorigen Seite sind sehr ähnlich zueinander. Das muss aber nicht immer so sein; die Werte an den Schärftiefegrenzen nach der geometrischen Theorie können recht unterschiedlich sein, was uns nur zeigt, dass diese Theorie eine Vereinfachung der Wirklichkeit ist:



Hochleistungsobjektiv Zeiss MasterPrime für 35mm Filmkamera ARRIFLEX bei Blende 1.5 Man sieht, wie hoch bei solchen Öffnungen und Leistungen die Anforderungen an die Kamerapräzision sind; 1/100 mm ändert die MTF bei 40 Lp/mm um 20%!

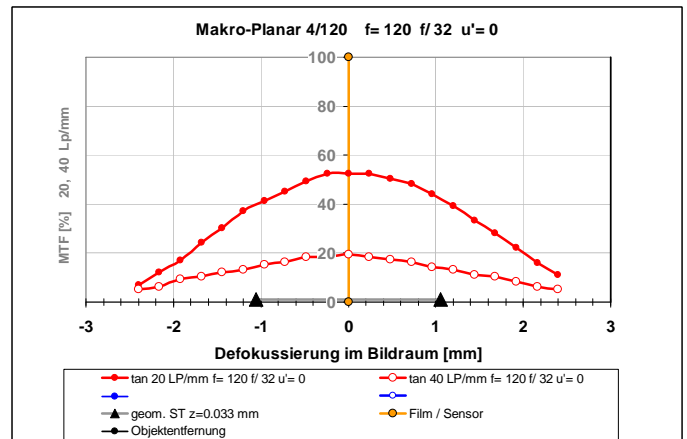


Modernes, sehr gutes Kleinbildobjektiv 1.4/50 bei voller Öffnung; beachten Sie den Unterschied zum Distagon.

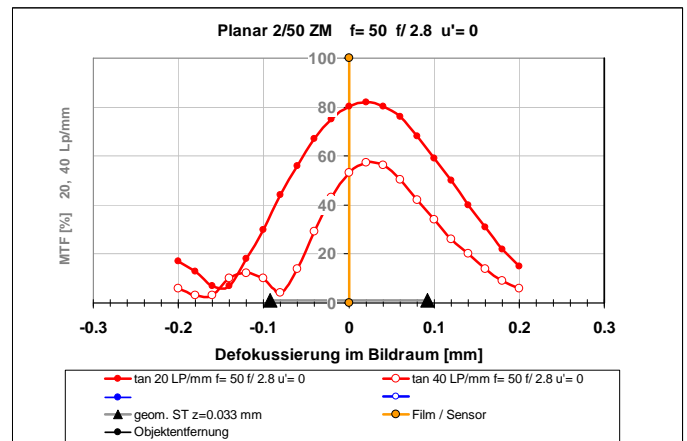


Ein historisches lichtstarkes Objektiv, das bei voller Öffnung f/1.5 größere Abbildungsfehler hat, zeigt eine insgesamt flachere, breitere Kurve, also eine leicht erhöhte

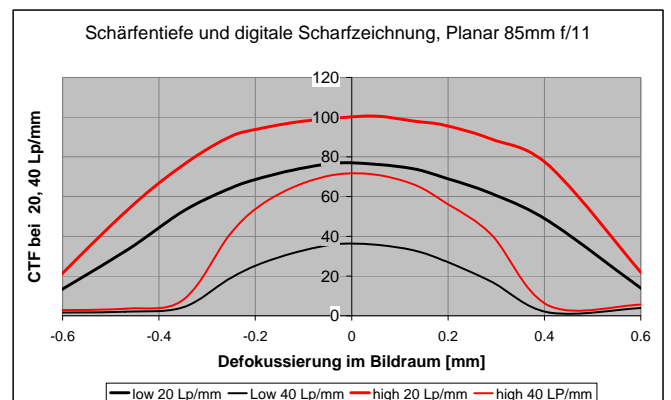
Schärftiefe und innerhalb der Schärftiefe einen geringeren Unterschied zwischen den besten und den noch tolerierten Werten.



Ein sehr stark auf f/32 abgeblendetes Makro-Objektiv; MTF durch Beugung reduziert.



Ein lichtstarkes 50mm Kleinbildobjektiv, bei Blende 2 fokussiert und hier bei f/2.8 in der Bildmitte gemessen: es zeigt eine ganz kleine Verschiebung und leicht „schiefe“ Kurven. Die Lage der Schärftiefe stimmt nicht mit der Zerstreuungskreistheorie überein.



Wenn man Kontrastübertragung in der digitalen Bilddatei vermisst, sind die Kurven ebenfalls flacher – Tiefpassfilterung ist ja auch eine Bildverschlechterung. Scharfzeichnung erhöht die Tiefe nur geringfügig, sorgt aber für einen abrupten Übergang in die Unschärfe.

Auflösung

Oft wird auch danach gefragt, welches Auflösungsvermögen innerhalb der Schärfentiefe mindestens erreicht werden kann. Übersetzt in die Ausdrucksweise der MTF-Messung heißt diese Frage dann:

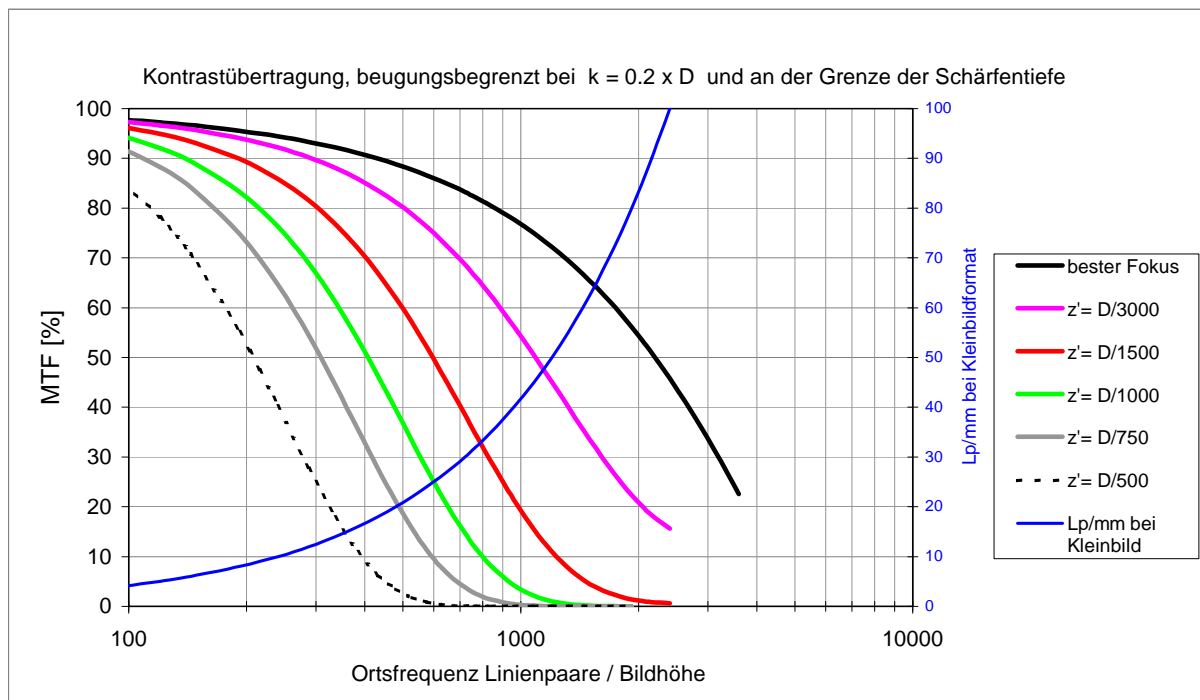
„Bei welcher Ortsfrequenz sinkt die Kontrastübertragung (MTF) unter einen bestimmten Schwellenwert (z.B. 10 %)?“

Typische Werte, die diese Frage beantworten, sind in der folgenden Grafik dargestellt. Sie zeigt, wie die Kontrastübertragung mit wachsender Ortsfrequenz, also mit zunehmender Feinheit der Strukturen, allmählich abnimmt. Damit die Zahlen unabhängig von der Formatgröße werden, ist die Ortsfrequenz nicht absolut in Linienpaaren pro mm, sondern in Linienpaaren pro Bildhöhe angegeben. Die blaue Kurve stellt den Zusammenhang mit dem besonders vertrauten Kleinbildformat her: die entsprechenden absoluten Ortsfrequenzen kann man an der blauen Skala auf der rechten Seite ablesen.

Die Daten gelten für ein Objektiv, das bei der Blende $k = 0.2 \times \text{Bilddiagonale}$ beugungsbegrenzt ist. Im Kleinbildformat ist das etwa Blende 8; beim 2/3“-Format entspricht das Blende 2 – bei dieser Öffnung wird die beugungsbegrenzte Leistung nur von sehr aufwendigen und teuren Objektiven erreicht, wie z.B. vom Zeiss **DigiPrime**.

Die schwarze Kurve gilt für die beste Fokussierung, die anderen Kurven zeigen den Verlauf der Kontrastübertragung an der Grenze des Schärfentiefebereichs bei verschiedenen Zerstreuungskreisdurchmessern z' . Sie sind jeweils als Bruchteil der Bilddiagonalen angegeben.

Man sieht an diesen Kurven auch, dass Auflösungen oberhalb von 2000 Lp/Bildhöhe in der praktischen Fotografie keine große Rolle spielen können, weil sie nur mit engsten Fokustoleranzen und je nach Bildwinkel mit recht flachen Objekten erzielt werden können.



Auflösungsvermögen des Objektivs bei verschiedenen erlaubten Unschärfen, beschrieben durch den Zerstreuungskreisdurchmesser als Bruchteil der Bilddiagonalen. Ein bei Blende 8 beugungsbegrenztes Objektiv erreicht im Kleinbildformat eine Auflösung von etwa 4000 Linienpaaren pro Bildhöhe. Bei einem Zerstreuungskreis von $z'=D/1500$, also dem populären Wert von 0.03mm, sinkt die Auflösung auf etwa 1200 Linienpaare pro Bildhöhe.

Bokeh – Eigenschaften der Unschärfe

Große Schärfentiefe kann eine erwünschte Eigenschaft sein; in der Makrofotografie hätte man gern mehr davon als möglich ist. Oft ist sie aber auch unerwünscht. Denn ein gutes Bild zeichnet sich meist dadurch aus, dass es die überflüssigen Dinge weglässt oder nur andeutet und den Blick auf die wesentlichen Aspekte des Motivs lenkt.

Ein Gestaltungsparameter, der uns helfen kann, dieses Ziel zu erreichen, ist die Dosierung der Unschärfe vor und hinter dem Hauptmotiv durch die geeignete Kombination von **Blende, Brennweite und Aufnahme-standpunkt**. Ein unscharfer Hintergrund löst das Hauptmotiv von ablenkenden unwichtigen Details und erhöht die plastische Wirkung des Bildes. Unschärfe Partien des Bildes können auch dekorativ sein und eine durchaus wichtige Rolle in der Bildkomposition haben.

Deshalb wollen wir uns auf den folgenden Seiten mit der Unschärfe beschäftigen. Diese Bildeigenschaft ist ja mehr von ästhetischer, also sehr subjektiver Natur und lässt sich nicht so einfach mit Zahlen beschreiben wie das scharfe Bild. Deshalb spielen ihre Feinheiten hierzulande in Objektivtests keine große Rolle. Das ist in Japan ganz anders; dort enthält jeder Test außer Zahlen für Kontrast und Auflösung etc. immer auch Bildbeispiele mit unscharf abgebildeten Blumen, Blättern und anderen Dingen, die häufig als fotografischer Hintergrund fungieren. Ganz zu Recht ist deshalb als Sammelbegriff für alle Eigenschaften der Unschärfe das japanische Wort ‚Bokeh‘ weltweit im Gebrauch.

ぼけ

*Die Wurzel des japanischen Wortes **boke** oder **bokeh*** meint eigentlich nichts Gutes; der Wortsinn ist verwandt mit dem deutschen ‚verwirrt‘ und wird auch genauso für mentale Zustände verwendet. In der Fotografie bezieht sich das ‚verwirrt‘ natürlich auf die Lichtstrahlen, die nicht mehr ordentlich in einem Punkt ankommen.*

* Ich danke meiner Kollegin Hiromi Mori für die japanischen Hiragana-Schriftzeichen und die Erläuterungen zur Wortbedeutung.

Trotz des subjektiven Charakters wollen wir aber auch hier versuchen, dem Stil und Anspruch unserer technischen Artikel treu zu bleiben, indem wir auch Bokeh mit Zahlen beschreiben. Das kann natürlich nicht auf ganz simplen Skalen passieren, etwa in der Art „das Bokeh hat die Note 5.5“, weil die Unschärfe immer von vielen Parametern abhängt. Aber die Zahlen können helfen, die Zusammenhänge besser zu verstehen.

Alle hier aufgezählten Größen haben einen Einfluss auf die Phänomene außerhalb der Fokusebene:

- Aufnahmeformat
- Brennweite
- Blendenzahl
- Entfernung Kamera – Hauptmotiv
- Abstand des Hinter-/Vordergrunds
- Formen und Muster des Motivs
- Blendenform
- Korrektur des Objektivs
- Anfangsöffnung des Objektivs
- Helligkeit im Hinter-/Vordergrund
- Farbe

Deshalb ist es kein Wunder, dass man über das Bokeh mancher Objektive sehr unterschiedliche und teils widersprüchliche Urteile hört. Denn allzu oft werden einzelne Beobachtungen unzulässig verallgemeinert. Manche Effekte werden dem Objektiv zugeschrieben, obwohl sie hauptsächlich vom Gegenstand vor der Kamera verursacht werden. Oft sind Unterschiede zwischen Objektiven auch recht marginal und werden dann stark übertrieben.

Man sollte generell nicht die Rangordnung in der Bedeutung von Bildelementen auf den Kopf stellen und kleine technische Artefakte zum allerwichtigsten Teil erheben. In vielen Bildern ist doch die Aussage des Hauptmotivs, der entscheidende Moment, soviel bedeutender, dass alles Bokeh auch im übertragenen Sinn in den Hintergrund tritt.

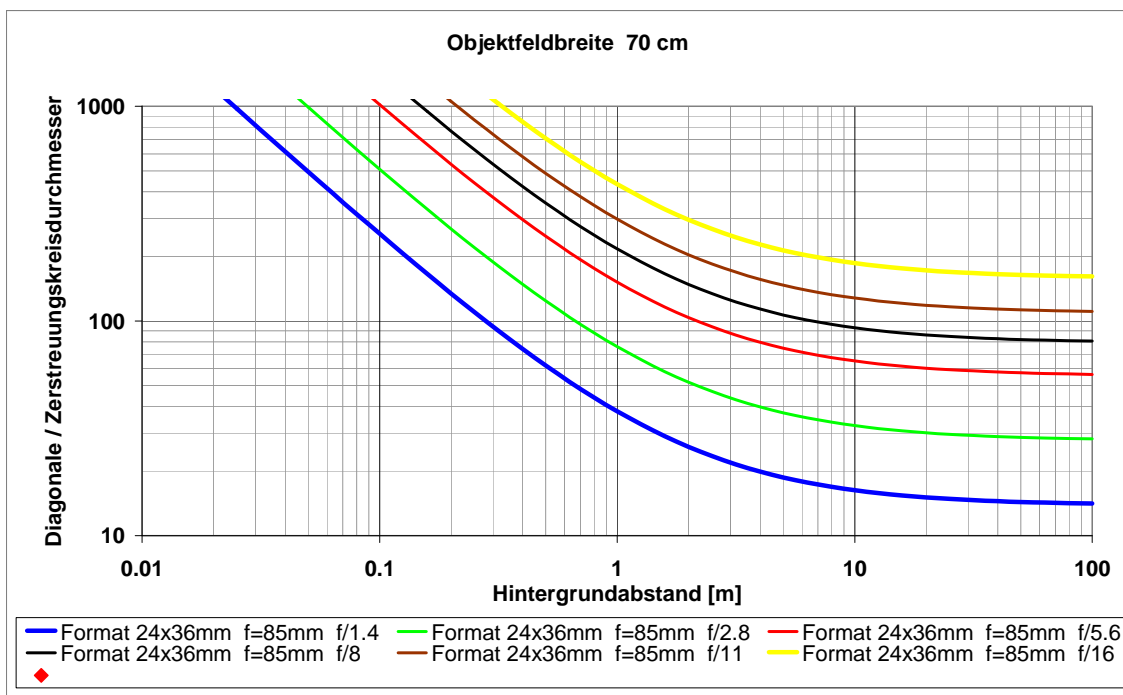
Aber gerade in der Schönheit ruhig komponierter Bilder kann es schon den Schritt zur Perfektion bedeuten. Hier darf jeder seine eigenen Maßstäbe haben.

Die Quantität der Unschärfe

Die wichtigste und deutlichste Eigenschaft der Unschärfe ist schlicht ihre Quantität. Bei den Überlegungen zu Schärfentiefe haben wir uns ja mit erlaubter Unschärfe beschäftigt; erlaubt ist sie, wenn man sie gar nicht bemerkt, oder wenn sie bei den jeweiligen Betrachtungsbedingungen noch nicht stört. Wir haben gelernt, dass dabei die Grenzen fließend sind.

Jenseits dieser Grenzen, wo man die Unschärfe schon deutlich sieht, können wir das Ausmaß der Unschärfe auf die gleiche Weise beschreiben wie innerhalb der Schärfentiefegrenzen: mit dem Durchmesser des Zerstreuungskreises.

Diese Zahl verbinden wir am einfachsten mit unserer Erfahrung, indem wir zunächst einmal betrachten, welchen Einfluss die Blende bei einer vertrauten Aufnahmesituation hat:

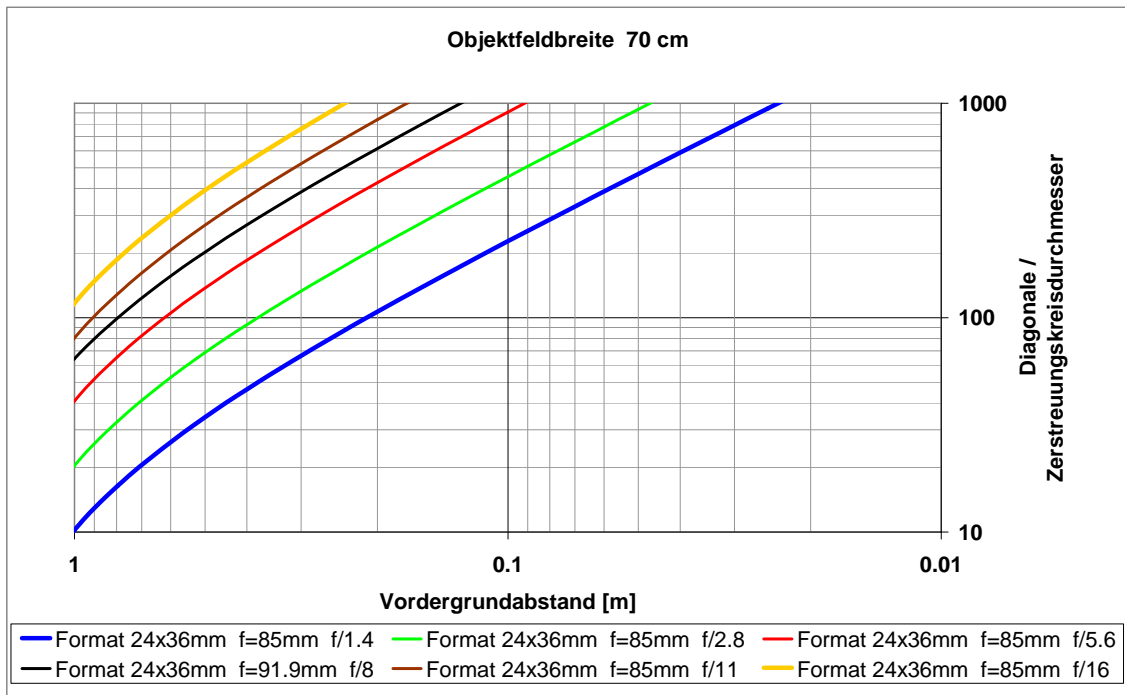


Die Grafik beschreibt eine typische Aufnahmesituation, z.B. in der Porträtfotografie: das Objektfeld ist 70cm breit und wird mit einem 85mm-Objektiv auf Kleinbildformat fotografiert. Die am Objektiv eingestellte Fokussentfernung zum Hauptmotiv ist deshalb 1.8 Meter.

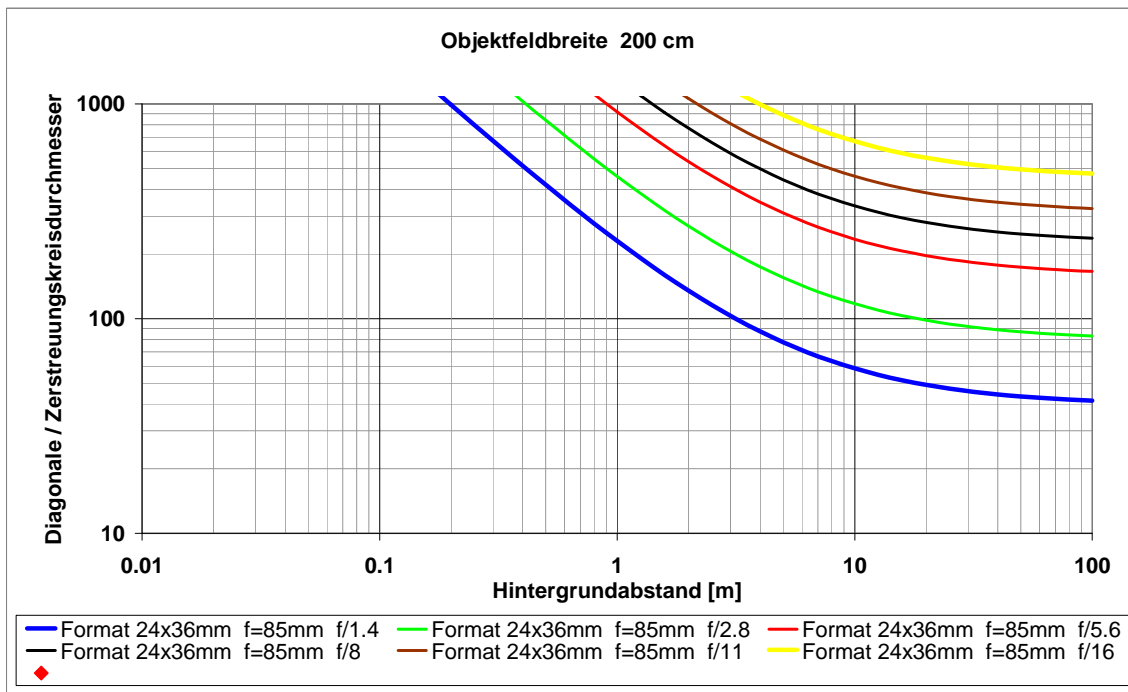
Auf der horizontalen Achse ist die Entfernung des Hintergrundes vom Hauptmotiv angegeben, auf der vertikalen Achse die Größe des Zerstreuungskreises in Bezug zur Bilddiagonale. In dieser Grafik ist also ganz oben links gerade außerhalb der Skalen die Region der Schärfentiefe, mit der wir uns im ersten Teil beschäftigt haben; dort sind die Zerstreuungskreise „Diagonale/1500“ oder kleiner, dort sind wir auch noch ganz dicht am Fokus, nach rechts entfernen wir uns bis auf 100 Meter Abstand in den Hintergrund.

Jede Kurve in der Grafik steht für einen der in der Legende genannten Blendenwerte, und alle Kurven haben denselben Charakter: sie fallen zunächst gleichmäßig (dabei werden ja die Zerstreuungskreise größer) und erreichen dann jenseits von etwa 10m Hintergrundabstand einen Grenzwert. Die Unschärfe wird also weit im Hintergrund nicht mehr größer. Dieser Grenzwert hängt natürlich von der Blende ab, und wenn wir die Zahlen mit unserer Erfahrung vergleichen oder es einfach ausprobieren, dann sehen wir, dass die Zerstreuungskreise schon **größer sein sollten als ein hundertstel der Diagonale**, damit wir vom „Freistellen“ des Motivs sprechen können.

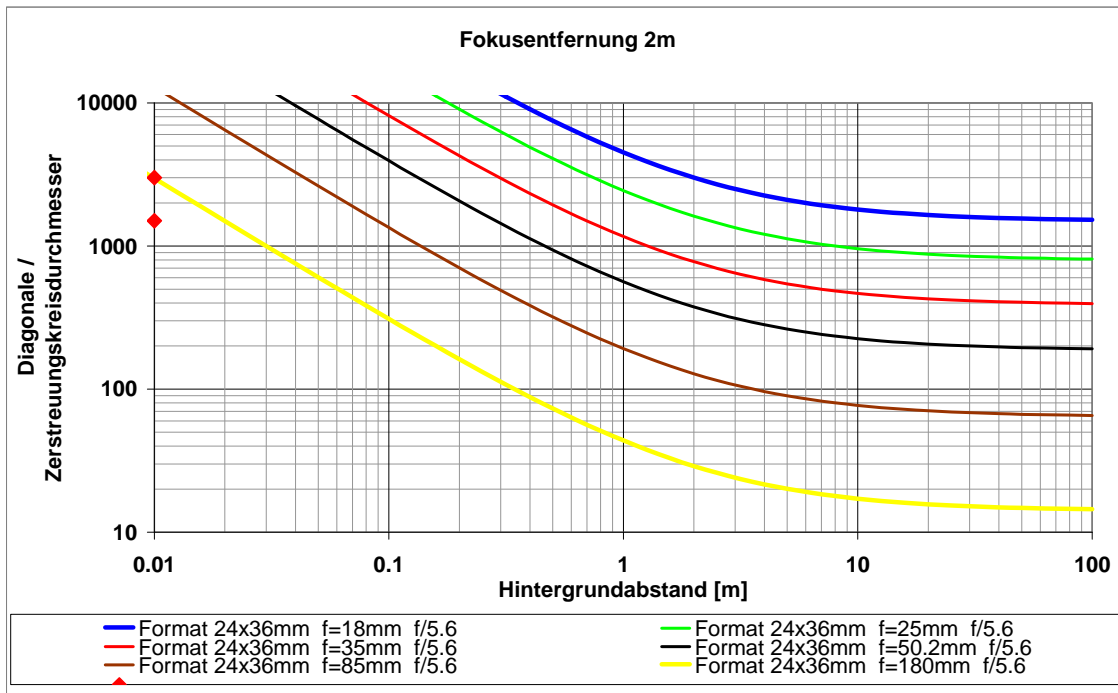
Was die Zahlen bedeuten, illustrieren auch einige Bilder, die zum **Download** bereitliegen.



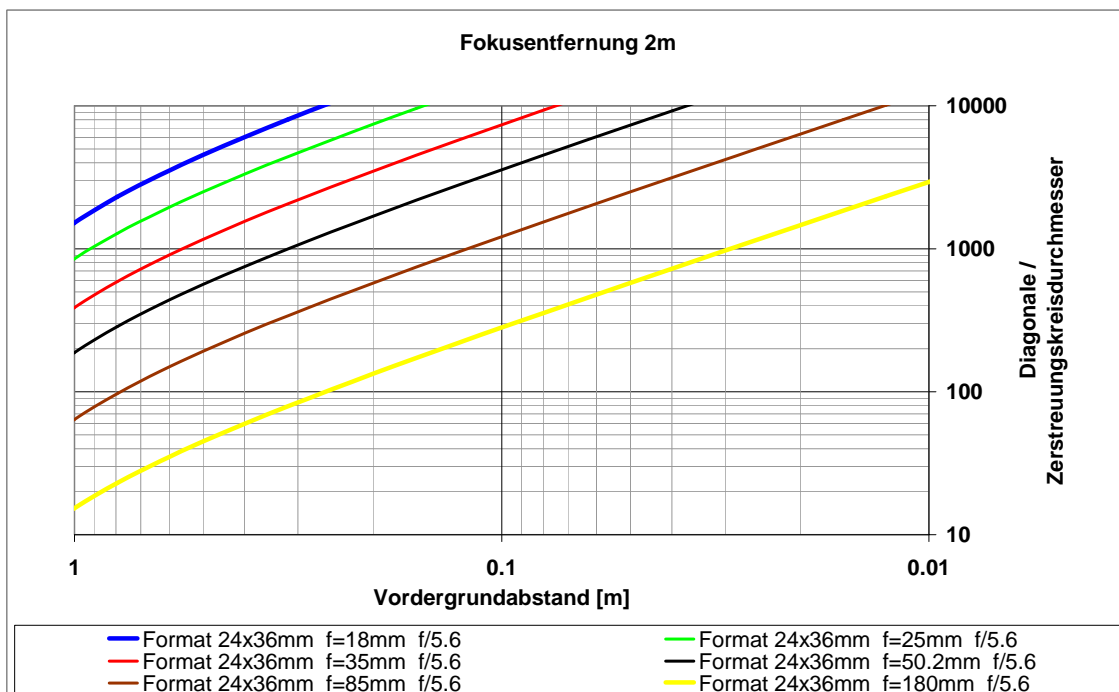
So sehen die entsprechenden Kurven für den Vordergrund aus, wenn wir uns wieder vorstellen, dass die Kamera links steht. Bei 1m Vordergrundabstand und 1.8m Fokulentfernung beginnt die horizontale Skala also 0.8m vor der Kamera, genauer gesagt vor der Sensorebene. Im nahen Vordergrund gibt es keinen Grenzwert; die Kurven werden stattdessen immer steiler, die Unschärfe nimmt immer schneller zu. Dank dieser Eigenschaft kann man filigrane Hindernisse im Vordergrund, z.B. das Drahtgitter eines Käfigs im Zoo, mit weit geöffneten Objektiven optisch verschwinden lassen.



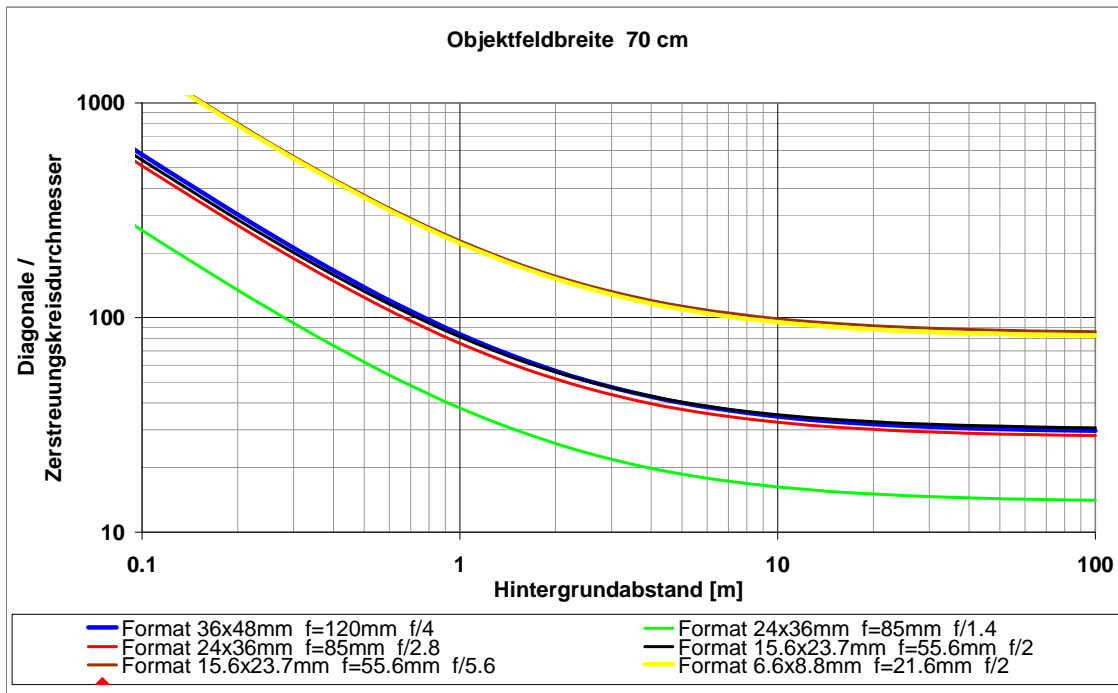
Wenn die Aufnahmeentfernung größer wird, hier 4.8m bei einer Objektfeldbreite von 2m, erreicht man nur noch geringere maximale Unschärfe. Um gleiche Hintergrundunschärfe wie im ersten Beispiel zu erreichen, darf man nicht mehr so stark abblenden oder muss größeren Abstand zum Hintergrund einhalten.



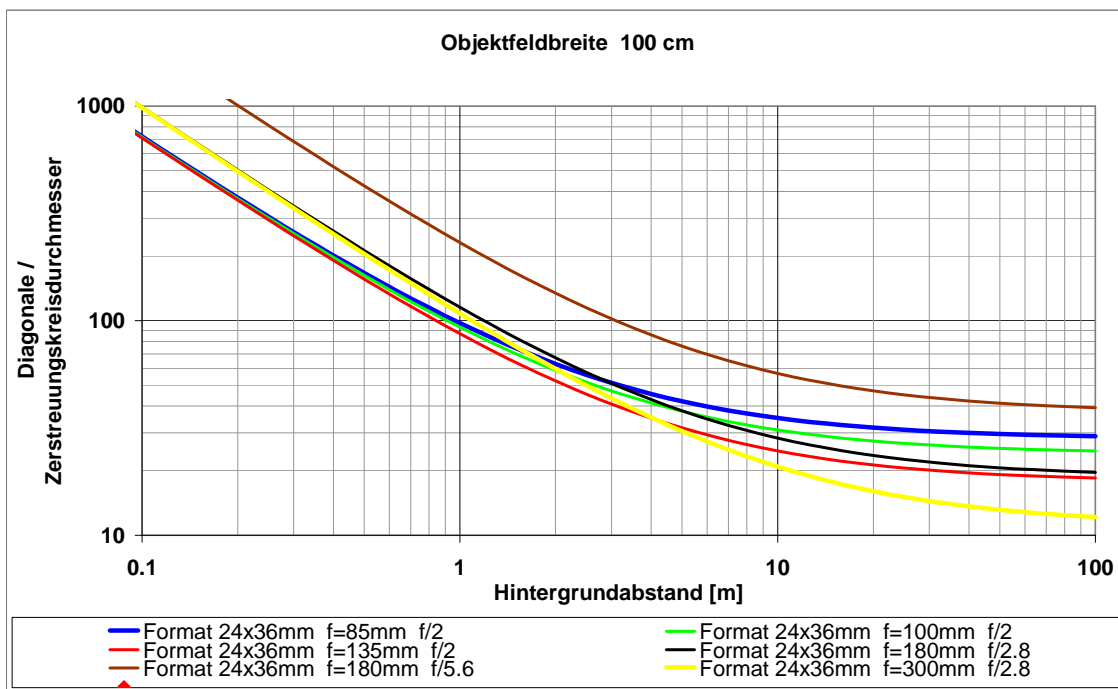
Hier vergleichen wir sechs verschiedene Brennweiten am Kleinbildformat, jeweils bei gleicher Blende 5.6 und bei gleichem Abstand der Kamera zum Motiv. Die Abbildungsmaßstäbe der Bilder sind also verschieden. Die beiden roten Marken auf der vertikalen Achse kennzeichnen die für die Berechnung der Schärfentiefe angenommenen Zerstreuungskreis-Durchmesser „Diagonale/1500“ und „Diagonale/3000“. Die blaue Kurve zeigt, dass bei 18mm Brennweite zumindest die schwächere der beiden Bedingungen in beliebiger Entfernung hinter dem Motiv noch eingehalten wird – die Schärfe reicht bis Unendlich. Bei den anderen Weitwinkelbrennweiten ist die Schärfe im weit entfernten Hintergrund nicht mehr perfekt, aber auch nicht deutlich verschwunden.



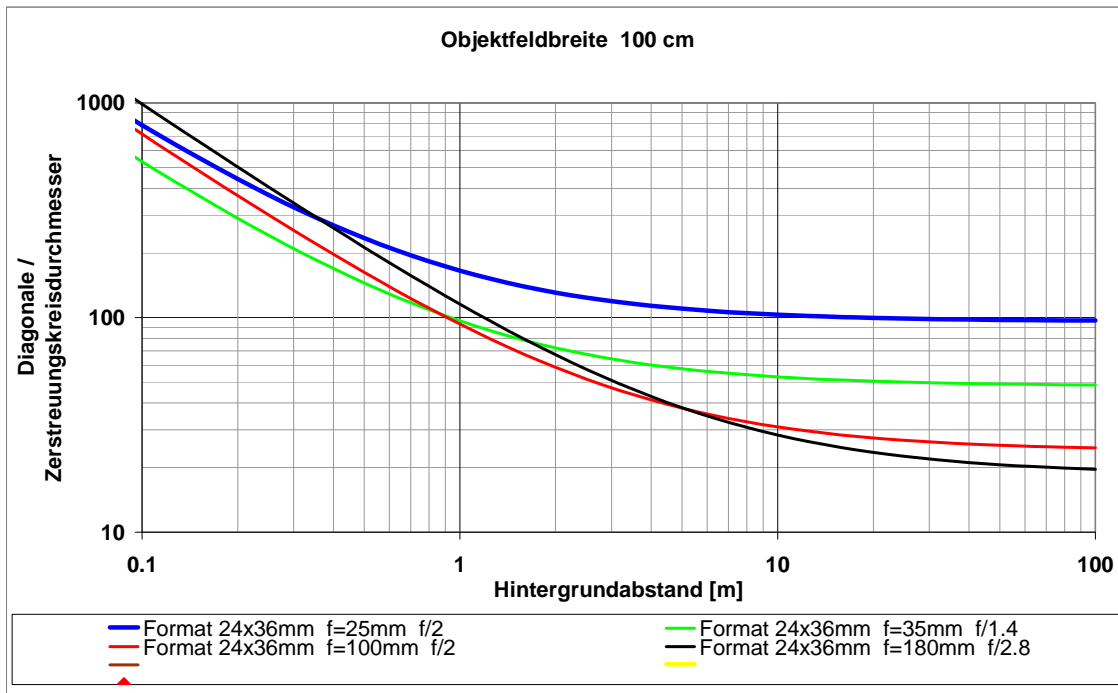
Hier dieselben Objektive im Vordergrund. Wenn wir in der oberen und unteren Grafik vergleichen, in welchem Abstand vom Hauptmotiv bestimmte Unschärfen erreicht werden, z.B. der Wert 1000, dann sehen wir, dass die Ausdehnung vor und hinter der Schärfe symmetrisch ist, bei kürzeren Brennweiten immer unsymmetrischer. Die roten Kurven für 35mm kommen der „1/3 davor – 2/3 dahinter“ Regel recht nah.



Wir sind jetzt wieder zum ersten Motivbeispiel zurückgekehrt, fotografieren aber jetzt aus gleicher Entfernung mit verschiedenen Formatgrößen, also mit unterschiedlichen Brennweiten mit jeweils gleichem Bildwinkel. Wenn äquivalente Blendenzahlen gewählt sind (siehe Tabelle auf Seite 10), dann sind die Tiefenabbildungseigenschaften verschiedener Formate identisch, die Kurven sind dann deckungsgleich. Bei sehr kleinem Format (2/3") muss man aber mit sehr großen Blendenöffnungen arbeiten und genügend Abstand zum Hintergrund halten, um deutliche Unschärfe zu erzielen.



Jetzt vergleichen wir sechs verschiedene Brennweiten oder Blendenzahlen am Kleinbildformat, wir fotografieren also aus Entfernungen zwischen 2.5 und 8.5m. Die ersten drei Kurven (blau, grün, rot) sind alle für Blende f/2; diese Kurven kommen zunächst deckungsgleich aus der Zone der Schärfe, bestätigen also, dass Schärfentiefe nur vom Maßstab und der Blendenzahl abhängt. Aber bei größerem Abstand hinter der Fokusebene erzeugt die längere Brennweite mehr Unschärfe. Das gleiche sehen wir auch, wenn wir 300mm und 180mm vergleichen (schwarz und gelb).



Noch ein Vergleich im Kleinbildformat mit einer größeren Brennweitenspanne mit jeweils gleichem Abbildungsmaßstab des Hauptmotivs. Während bei ganz kleinen Unschärfen links eindeutig der Einfluss der Blende dominiert und die Reihenfolge der Kurven festlegt, überwiegt im weit entfernten Hintergrund der Einfluss der Brennweite. Für eine richtige Freistellung des Motivs braucht man also am besten beides: längere Brennweite und hohe Anfangsöffnung.

Alle diese Kurven der großen Zerstreuungskreise können Sie leicht verstehen, wenn Sie noch einmal nach Seite 11 zurückblättern und die dortige Skizze betrachten. Lassen Sie in Ihrer Vorstellung oder auf einem Blatt Papier die Spitze des Lichtkegels hinter der blau gezeichneten Fokusebene wandern und sehen Sie, wie sich dabei die Schnittfläche des Kegels mit der Fokusebene ändert. Sie ist das Bild des Zerstreuungskreises, der auf dem Sensor entsteht.

Die entscheidende Größe für die Quantität von Unschärfe ist also die **physische Größe der Eintrittspupille**. Wenn man mit ‚Bokeh‘ in erster Linie die Fähigkeit meint, den Hintergrund sehr unscharf, weich und detailarm darstellen zu können, muss man eine genügend große Eintrittspupille haben. Großes Aufnahmeformat, lichtstarke Objektive und längere Brennweiten haben in der Richtung das beste Potential.

Es gibt Objektive, bei denen der Öffnungswinkel der vom Objekt in die Optik eintretenden Lichtkegel so wichtig ist, dass man diese Daten auf die Fassung schreibt:



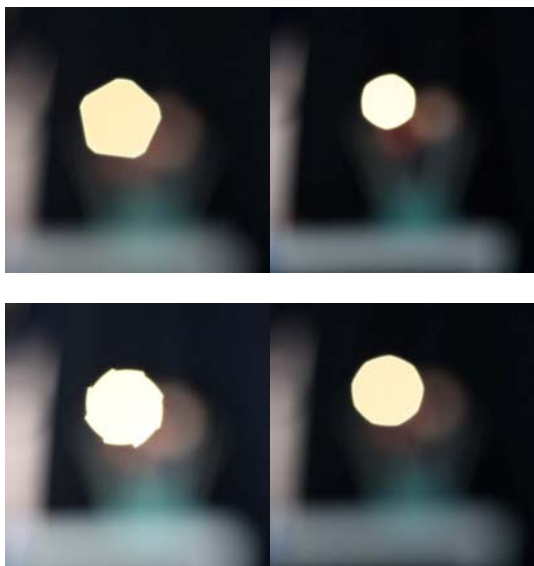
Die Zahl 0.75 auf diesem Mikroskop-Objektiv für 20fache Vergrößerung ist der Sinuswert des halben Öffnungswinkels von 48.5°, und sie bedeutet, dass das Objektiv eine beugungsbegrenzte Auflösung von rund 2300 Lp/mm hat bei einer winzigen Schärfentiefe von 0.001mm.

Zum Vergleich: ein Fotoobjektiv hat beim Abbildungsmaßstab 1:10 und nominaler Blende 8 einen Öffnungswinkel von 0.6°; das beugungsbegrenzte Auflösungsvermögen im Objekt ist dann 16 Lp/mm und die Tiefe, in der diese Auflösung erreicht wird, beträgt 20mm.

Die Blendenbilder

Meistens überlagern sich im Bild sehr viele Zerstreuungskreise ähnlicher Helligkeit und vermischen sich so miteinander, dass der einzelne Kreis nicht mehr erkennbar ist. Dadurch entsteht ja der glatte, weiche Charakter eines sehr unscharfen Hintergrundes. Manchmal ist aber ein Punkt des Objektes viel heller als seine Umgebung, wenn sich z.B. Lichtquellen in glänzenden Oberflächen oder in Wassertropfen spiegeln. Immer dann ist der zugehörige Zerstreuungskreis im Bild hervorgehoben aus seiner Umgebung, so dass wir seine geometrische Form sehen können. Dann fällt uns auf, dass wir es gar nicht immer mit Kreisen zu tun haben, weil ja die Eintrittspupille ein Bild der mechanischen Blende ist.

Die Blende des Objektivs bestimmt die Grundfläche der Lichtkegel, die nicht genauso aussehen wie die Kegel im Schulbuch. Wir sehen deshalb Anzahl und Form der Blendenlamellen, wenn die Sensorfläche die Kegel an einer Stelle schneidet, wo die Schnittfläche noch recht groß ist.

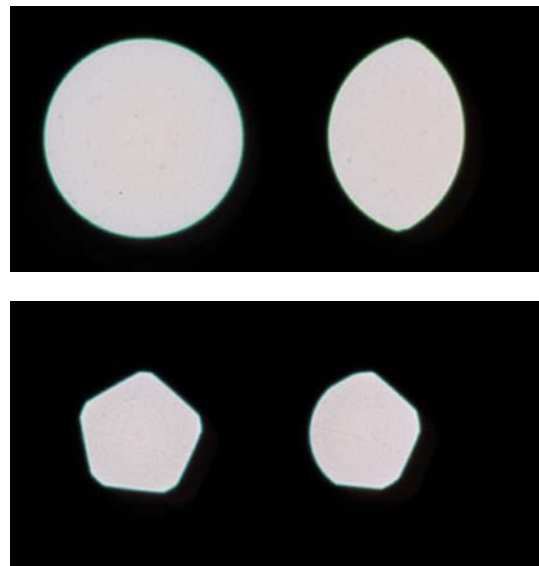


Vier Beispiele für Blendenkonstruktionen mit 5, 6, 8 und 9 Lamellen, die durch eine sehr unscharf abgebildete helle Lichtquelle sichtbar gemacht werden. Das Objektiv oben links ist nur um eine halbe Blende gegenüber der vollen Öffnung abgeblendet, deshalb sieht man zwischen den fünf geraden Blendenkanten auch noch kurze Bögen der kreisförmigen vollen Öffnung.

Solche Blendenbilder können durchaus dekorative Elemente in einem Bild sein. Bei auffälliger Helligkeit ziehen sie den Blick des Betrachters auf sich. Deshalb ist eine „schöne“ Blendengeometrie erwünscht. Ein Blendenbild, das an ein Sägeblatt erinnert wie im Beispiel unten links, wird man oft als störend empfinden.

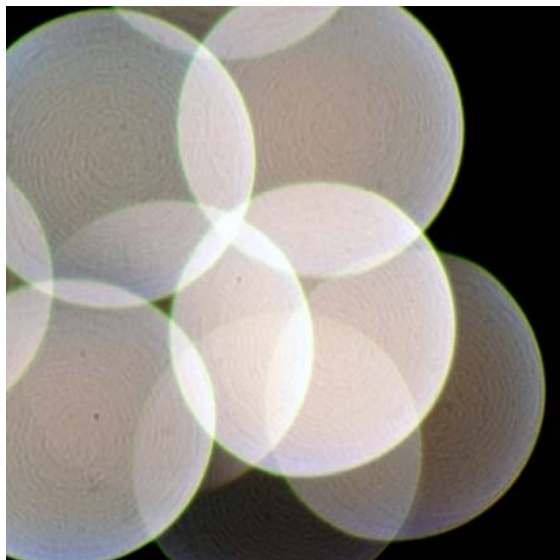
Mit einer genügend großen Anzahl von Blendenlamellen und einer geeigneten Krümmung kann man dem Ideal einer kreisförmigen Öffnung nahe kommen. Regelmäßige Fünfecke oder Sechsecke, die früher weit verbreitet waren, werden heute als „zu technisch“ empfunden. Aber das ist natürlich letzten Endes eine Geschmacksfrage.

Am **Bildrand** werden Blendenbilder auch durch **Vignettierung** verändert, solange bei großen Öffnungen die zum Bildrand gehenden Lichtkegel durch vordere oder hintere Fassungssteile beschnitten werden:



Wie Vignettierung in Blendenbildern sichtbar wird: aus einem Kreis in der Bildmitte wird am Rand ein Kreis-Zweieck, aus einem Fünfeck wird eine seltsame Mischform. Regelmäßige Blendenformen kann man also in der gesamten Bildfläche erst dann sehen, wenn das Objektiv soweit abgeblendet wurde, dass die künstliche Vignettierung durch Fassungssteile nicht mehr vorhanden ist.

Neben den konstruktiven Eigenschaften des Objektivs sorgen aber auch ganz natürliche, unvermeidbare Effekte dafür, dass Bilder von Spitzlichtern nicht nur perfekte Kreise zeigen können. Wenn nämlich viele Spitzlichter dicht beieinander liegen - eine glitzernde Wasseroberfläche wäre ein Beispiel - dann überlagern sich die von jedem einzelnen Spitzlicht erzeugten hellen Flächen, und in diesen Überlappungszonen addieren sich die Helligkeiten:



Wenn sich Blendenbilder von defokussiert abgebildeten Spitzlichtern überlagern, addieren sich die Helligkeiten und erzeugen auf diese Weise neue geometrische Muster. Solche Effekte können auch zur ‚Unruhe‘ des Hintergrundes beitragen.

Wenn man dieses Bild ganz genau betrachtet, fällt noch ein anderer interessanter Effekt auf: alle Blendenbilder enthalten eine kreisförmige Struktur. Daran erkennt man, dass das Objektiv eine asphärische Linsenoberfläche enthält, denn diese Flächen sind oft nicht ganz so glatt wie eine konventionell polierte Linse. Insbesondere bei asphärischen Linsen, die durch Pressen des heißen, flüssigen Glases hergestellt werden, erkennt man die Spuren des Drehprozesses, mit dem die Form hergestellt wurde.

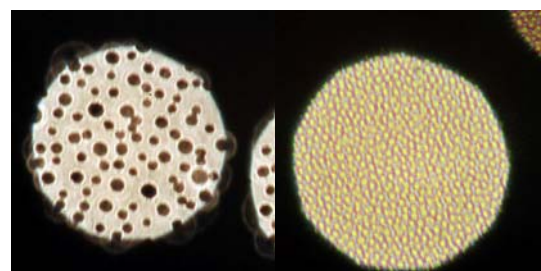
Beim Polieren sphärischer Oberflächen kann man Rotations- und Schwenkbewegungen kombinieren, weil die Krümmung der Fläche ja überall gleich ist; dabei bleiben dann keine Spuren übrig. Bei asphärischen Flächen ist die Krümmung variabel und verlangt deshalb andere Bearbeitungstechniken. Deren restliche Oberflächenrauigkeit wird sichtbar, wenn man eine sehr kleine Lichtquelle sehr unscharf abbildet.

Ähnliche Effekte kann man oft beobachten in Blitzaufnahmen mit digitalen Kompaktkameras, wenn nah an der Kamera in der Luft schwebende Staubteilchen angeblitzt werden. Durch die geringe Entfernung zum Blitz leuchten sie sehr hell und werden gleichzeitig sehr unscharf abgebildet. Ihre innere Struktur und Transparenz wecken dann bei manchem Betrachter die Vorstellung von im Raum schwebenden durchsichtigen Kugeln. Wenn man im Internet unter dem Stichwort ‚Lichtkugeln‘ sucht, findet man dutzende von Beiträgen, die geheimnisvolle Geister in diesem Phänomen sehen, das in Wirklichkeit verursacht wird durch die Störung der durch das Objektiv laufenden Lichtwellen durch raue Oberflächen und Beugung an Staubteilchen.



„Lichtkugeln“ im Bild einer Kompaktkamera mit eingebautem Blitz.

Solche Störungen der Lichtwellen sind besonders prägnant, wenn man „Softfilter“ am Objektiv verwendet. Beim „Softar“-Filter von Zeiss beruht die Wirkung auf kleinen, statistisch auf der Filterfläche verteilten linsenförmigen Erhebungen. Auch sie werden im Blendenbild sichtbar:



Blendenbilder mit Zeiss ‚Softar‘ und Minolta ‚Portrayer‘ Weichzeichnerfiltern

Manchmal wird das Phänomen der einzeln sichtbaren Blendenbilder mit ‚Bokeh‘ gleichgesetzt; man findet unter diesem Stichwort Bildersammlungen, in denen Blendenbilder mit Aufnahmen von Seifenblasen vermischt werden. Das ist aber eigentlich mit ‚Bokeh‘ nicht gemeint. Im Blendenbild lässt sich das Objektiv gewissermaßen in die Karten blicken, aber welche Bedeutung hat das alles für die Wiedergabe von Bildbereichen, in denen keine Spitzlichter vorhanden sind?

Wir werden in den folgenden Bildbeispielen sehen, dass man die Bedeutung der Blendenform nicht überschätzen sollte:



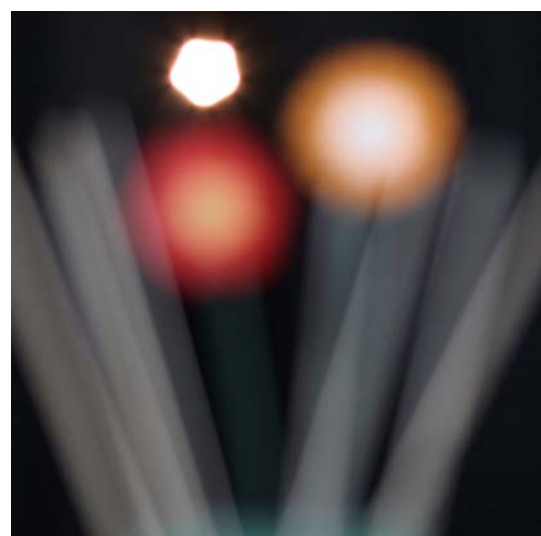
Testmotiv: zwei auch unter Scheinwerferlicht nicht verwelkende Blumen, Holzstäbchen und Metallstricknadeln als Modell für Grashalme und im Hintergrund eine kleine, helle, kreisrunde Lichtquelle als Blendenindikator.



Testmotiv leicht unscharf fotografiert mit dem Objektiv mit 5 Blendenlamellen (siehe S. 31)

Die bei diesen Aufnahmen gewählten Blendenzahlen waren exakt dieselben wie bei den Blendenbildern auf S. 31. Man sieht hier aber im Bild der hellen Lichtquelle die geometrische Form der Blende nur indirekt in den abwechselnd breiten und schmalen Strahlen, die radial von der Lichtquelle ausgehen. Sie werden durch Beugung des Lichtes an den Kanten der Blende verursacht.

Die geometrische Form der hellen Scheibe des Lichtquellenbildes verrät nicht die genaue Blendenform. Das liegt daran, dass bei der hier eingestellten leichten Defokussierung die kreisrunde Leuchtfläche der Lichtquelle noch relativ groß ist im Vergleich zum winzigen 5eckigen Bild jedes einzelnen Punktes auf der Leuchtfläche. Deshalb sieht das Bild noch ziemlich rund aus. Das ändert sich aber, wenn man stärker defokussiert



Testmotiv stärker unscharf fotografiert, oben liegt der Fokus näher im Vordergrund, unten ist die Kamera auf ‚Unendlich‘ eingestellt.

Es hängt also vom Größenverhältnis ab, ob wir die Form eines hellen Objektes sehen oder die Form der Blende. Ein praktisch punktförmiges Objekt zeigt uns immer die Blendenform, wenn es unscharf abgebildet wird. Umgekehrt dominiert bei leichter Unschärfe immer die Umriss-Form eines etwas größeren Objektes. Dazwischen gibt es einen Übergangsbereich, in dem sich beide Formen vermischen.

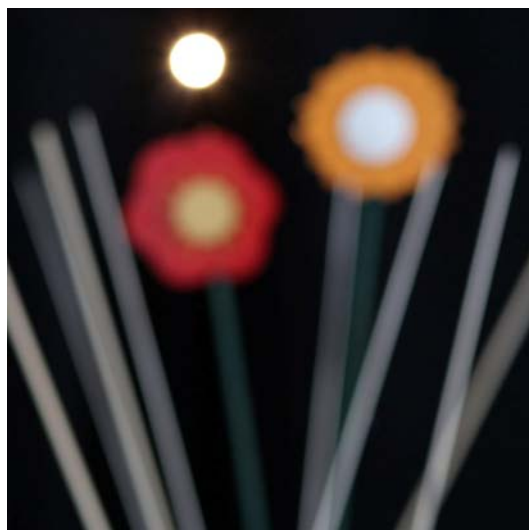
An den fünfeckigen Blendenbildern der beiden letzten Fotos fällt auf, dass einmal eine Spitze nach oben zeigt und einmal nach unten. Das liegt daran, dass im oberen Bild die Sensorebene hinter dem Fokus liegt und im unteren davor. Hinter ihrem Schnittpunkt im Fokus vertauschen alle Lichtstrahlen ihren Platz im Lichtkegel: aus innen wird außen und aus links wird rechts.

Außer im Bild des Spitzlichtes finden wir die Blendenform in keinem anderen Bildelement wieder. Insbesondere **Linien und lange Kanten** erzeugen ja ein in einer Richtung **verwischtes Bild vieler Blendenbilder** – da spielt die Form keine Rolle.

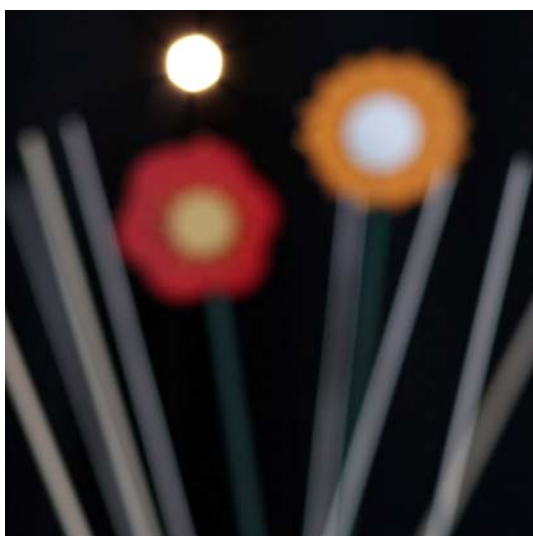
Nur in dem leicht unscharfen Blendenbild unten links auf der vorigen Seite sieht man am Rand der Blüten ein paar zarte Spitzlichter, welche die fünfeckige Blendenform zeigen. Sie verschwinden bei stärkerer Unschärfe, weil dann die Lichtmenge des Spitzlichtes auf eine so große Fläche verteilt wird, das es nicht mehr auffällt. Wie man Blendenbilder von hellen Stellen des Motivs sieht, hängt also von Größe, Helligkeit und Grad der Unschärfe ab. Das gilt für den Umriss und auch für die innere Struktur, mit der wir uns im nächsten Kapitel noch genauer beschäftigen werden.



Objektiv mit 8 Blendenlamellen



Objektiv mit 9 Blendenlamellen



Objektiv mit 6 Blendenlamellen

Zusammenfassend können wir festhalten, dass die Blendenform markant und dekorativ oder auch störend im Bild sichtbar werden kann und dass sie uns interessante Dinge über das Objekt verraten kann. Sie kann aber auch in vielen Bildern völlig unsichtbar bleiben. Na, und wenn wir ein Objektiv mit voller Öffnung benutzen, kann sie ohnehin keine Rolle spielen.

Trotzdem, oder gerade dann kann es große Unterschiede beim Bokeh geben!

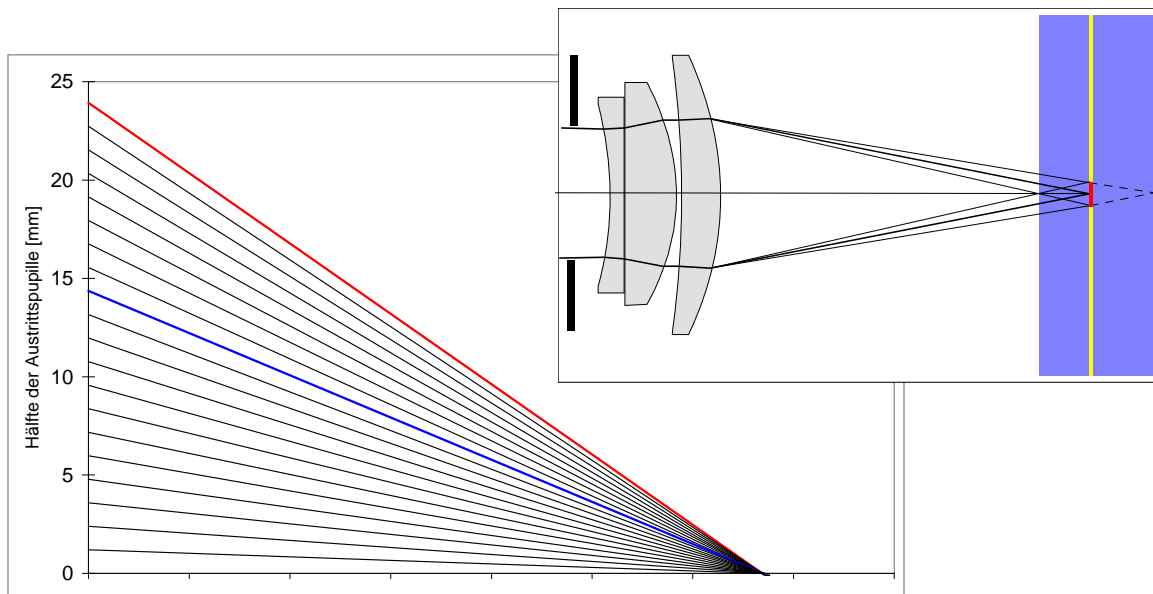
Der Charakter der Unschärfe

Die prinzipiellen Eigenschaften der Schärfentiefe haben wir verstanden mit Hilfe von etwas Geometrie: wir haben **Lichtkegel** betrachtet, die vom Sensor der Kamera an verschiedenen Stellen sozusagen durchgeschnitten werden (siehe S. 4 und S. 6). Die Schnittflächen sind die Zerstreungskreise, und wir haben bisher immer angenommen, dass sie wie gleichmäßig helle Scheiben aussehen.

Wenn das richtig wäre, dann dürften die Zerstreungskreise nur von den rein geometrischen Daten des Objektivs abhängen, die man z.B. in einen Schärfentieferechner eingibt. Bei gleicher Blendenzahl und gleicher Fokusabweichung müssten alle Objektive gleich sein.

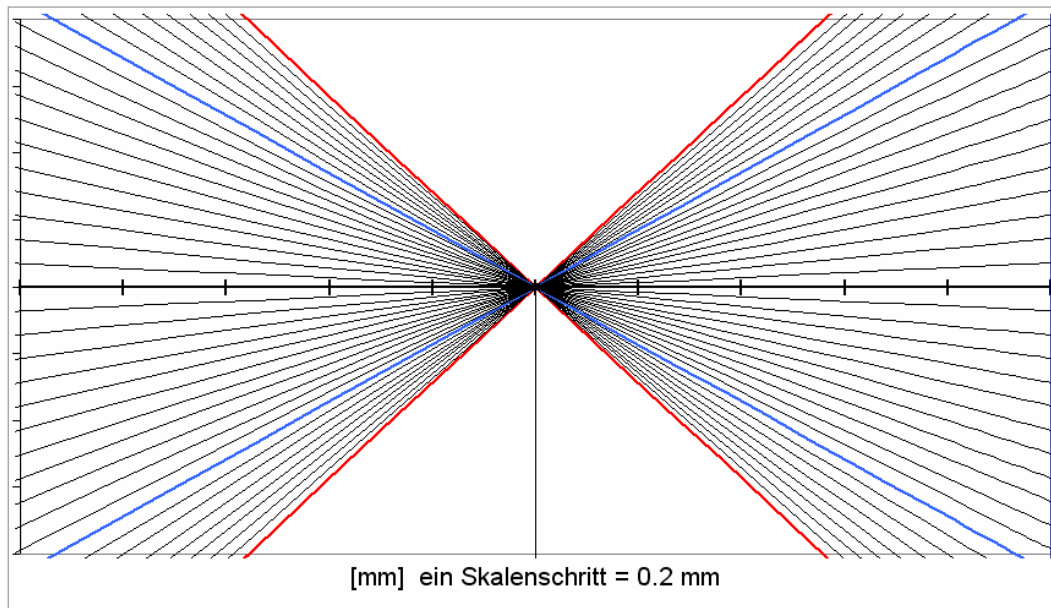
Wir wissen aber andererseits, dass Objektive vor allem bei großer Öffnung im besten Fokus keineswegs gleich sind. Da sind uns Unterschiede in Kontrast und Schärfe ganz selbstverständlich. Warum aber sollten diese Unterschiede bei leichter Abweichung vom besten Fokus völlig verschwinden? Die Messungen der Kontrastübertragung in Abhängigkeit von der Tiefe im Bild haben uns schon gezeigt, wie unterschiedlich Objektive sein können, nicht nur im besten Fokus, sondern auch an der rechnerischen Grenze der geometrischen Schärfentiefe (siehe S. 23). Wir wollen jetzt verstehen, warum das so ist.

Die geometrische Theorie der Schärfentiefe ist ein idealisiertes Modell, das Aberrationen nicht berücksichtigt; es nimmt einfach an, dass sich alle Lichtkegel in einem Punkt schneiden:

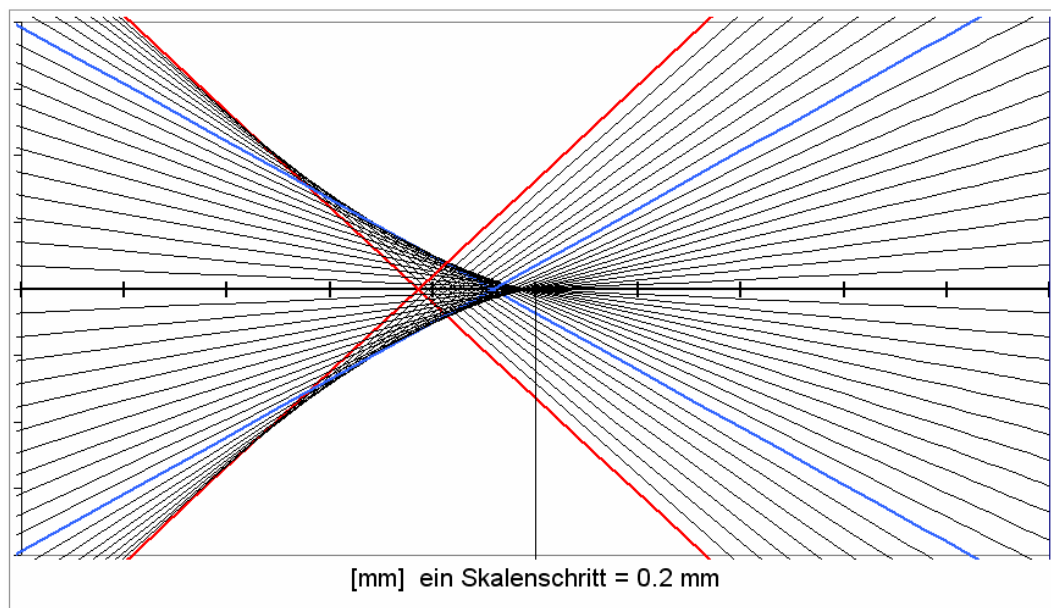


Diese Grafik ist einfach eine etwas abstraktere Variante der Skizze auf Seite 4. Weil das Objektiv ja rotationssymmetrisch ist, betrachten wir jetzt aus Platzgründen nur noch eine Hälfte des Lichtkegels. Dafür haben wir aber 20 Lichtstrahlen eingezeichnet, die aus einer Hälfte der Austrittspupille kommen und sich alle in einem Punkt schneiden. Die Maße der Austrittspupille sind typisch für ein Objektiv 1.4/50mm.

Zwei Lichtstrahlen haben wir besonders hervorgehoben: der **Randstrahl** ist rot gezeichnet; der etwas weiter innen verlaufende blau gezeichnete Strahl kommt von einem Punkt der Blendenebene, der 14mm von der optischen Achse entfernt ist. Wenn man die Blende von 1.4 auf den Wert 2.4 schließt, wird der blaue Strahl seinerseits zum Randstrahl, und die äußeren werden von der Blende blockiert.



Wenn wir die Umgebung des Schnittpunktes vergrößert betrachten, sehen wir den idealen Zustand: alle Strahlen nähern sich, ordentlich nebeneinander verlaufend, dem Fokus, schneiden sich dort in einem einzigen gemeinsamen Schnittpunkt und verlassen dann den Fokus auf der rückwärtigen Seite genauso geordnet. So haben wir uns das bei allen Rechnungen zur Schärfentiefe immer vorgestellt – es ist aber zu schön, um wahr zu sein.



Ein reales Objektiv kann auch so aussehen. Die Strahlen aus unterschiedlichen Höhen der Pupille haben keinen gemeinsamen Schnittpunkt mehr, jede Zone der Pupille hat ihren eigenen Schnittpunkt. Die liegen zwar alle auf der optischen Achse, aber verschieden weit vom Objektiv entfernt. Der Fokus der Randstrahlen ist kürzer entfernt; die nahe an der optischen Achse und flach geneigt verlaufenden Strahlen schneiden sich im weiter entfernten schwarzen Punkt, auf den die senkrechte Linie zeigt.

Diesen Abbildungsfehler nennt man „**Sphärische Aberration**“. Und weil bei jeder einfachen Sammellinse der Schnittpunkt der Randstrahlen dichter an der Linse liegt, dieser natürliche Fehler also bei diesem Objektiv nicht behoben ist, nennt man den obigen Typ „**sphärisch unterkorrigiert**“. Die stärkste Einschnürung des Doppelkegels liegt vor dem schwarzen Punkt, dort ist bei voller Öffnung der beste Fokus. Wenn man abblendet, wandert der Fokus zum schwarzen Punkt hin – das Objektiv hat eine positive Blendendifferenz.

Noch etwas weiter links in der obigen Grafik, etwa 0.4mm vor dem Fokus der achsnahen Strahlen ist eine besonders interessante Stelle: hier überholen sozusagen die Randstrahlen die weiter innen verlaufenden. Die Ordnung des idealen Strahlkegels ist aufgehoben, man könnte sagen, dass die Lichtstrahlen „verwirrt“ sind.

Hier finden wir also die ursprüngliche Bedeutung des japanischen Wortes ‚bokeh‘.

In dieser Kreuzungszone überlagern sich sehr viele Strahlen, es gibt daher dort einen Ring mit erhöhter Helligkeit. Der Zerstreuungskreis ist also keine gleichmäßig helle Scheibe.



In praktischen Fotos kann das so aussehen:



Vordergrund-Unschärfe mit ringförmigen Strukturen beim Sonnar 1.5/50 ZM, einem sphärisch unterkorrigierten Objektiv

Hinter dem Fokus gibt es keine Strahlen, die sich schneiden oder überlagern. Ganz im Gegenteil ist dort die Dichte der Strahlen im Vergleich zum idealen geometrischen Lichtkegel außen etwas reduziert. Der Zerstreuungskreis ist also hinter dem Fokus größer als in der geometrischen Theorie, und die Helligkeit nimmt von innen nach außen ab, während er vor dem Fokus kleiner ist und nach außen durch einen hellen Ring scharf begrenzt wird.



Außen hat der Zerstreuungskreis einen dünnen grünen Saum, denn außen sehen wir die Lichtstrahlen, deren Fokus am dichtesten am Objektiv liegt. Der normale Farblängsfehler aller achromatisch korrigierten Objektive hat nämlich die Eigenschaft, dass grünes Licht den kürzesten Fokus hat.



Hintergrund-Unschärfe mit Sonnar 1.5/50

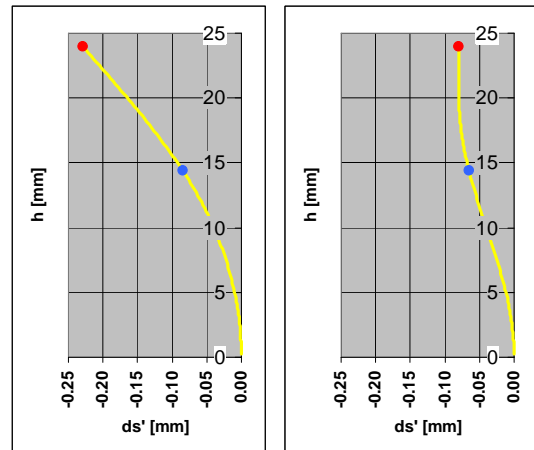
Der Charakter der Hintergrund-Unschärfe eines sphärisch unterkorrigierten Objektivs wird als schön empfunden. Denn der Hintergrund wirkt ruhig und die Konturen des Objektes bleiben auch in der Unschärfe länger erhalten. Weiter unten finden Sie Bildbeispiele, die das illustrieren.

Aber man erkaufte diese Abbildungseigenschaft mit Nachteilen:

- Je schöner die Unschärfe im Hintergrund ist, desto unschöner ist sie im Vordergrund. Sie wirkt oft harsch und unruhig. Sie erzeugt Kringel aus kleinen Spitzlichtern und verwandelt Linien in Doppellinien.
- Wenn man ein auffallend schönes Bokeh im Hintergrund erzeugen will, muss man die Unterkorrektur so groß machen, dass auch die Blendendifferenz sehr groß wird und die Fokussierung erschwert.
- Außerdem ist zwangsläufig die Kontrastwiedergabe des Objektivs insgesamt schlechter. Denn dort, wo die inneren Strahlen einen kleinen Bildpunkt formen, bilden die äußeren einen Halo, der den Bildpunkt umgibt und den Kontrast senkt.

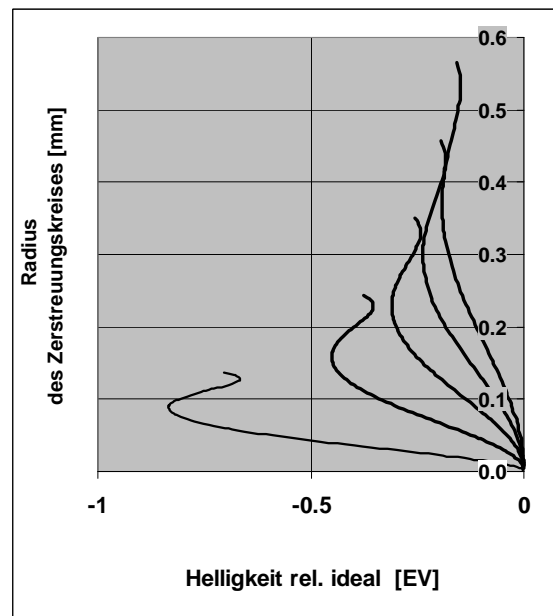
Man muss also bei einem für den universellen Gebrauch gedachten Objektiv maßvoll umgehen mit dieser Eigenschaft und muss die sphärische **Unterkorrektur** in Grenzen halten. Auf jeden Fall vermeiden sollte man die sphärische **Überkorrektur**. Damit ist keineswegs gemeint, dass das Objektiv besser ist als gut – Überkorrektur bedeutet nur, dass der sphärische Fehler jetzt ein anderes Vorzeichen hat. Die Randstrahlen schneiden sich dann deutlich hinter dem Fokus der achsnahen Strahlen. Die Bokeh-Eigenschaften kehren sich dann einfach um. Die Eigenschaften des Vordergrundes bei Unterkorrektur findet man bei Überkorrektur im Hintergrund. Und da der fast immer wichtiger ist, wäre das schädlich.

Aber auch ein Verlauf der sphärischen Aberration, der insgesamt im Bereich der leichten Unterkorrektur bleibt, jedoch deutliche Zeichen der Maßnahmen zeigt, die ein zu starkes Anwachsen des sphärischen Fehlers begrenzen sollen, kann im Zerstreuungskreis des Hintergrundes schon ein leichtes Anwachsen der Helligkeit nach außen bewirken. Deshalb sind besonders lichtstarke Objektivs meist nicht ganz frei davon. Sie sollten auch nicht verglichen werden mit Objektivs bescheidener Anfangsöffnung, wo die sphärische Korrektur viel einfacher ist.



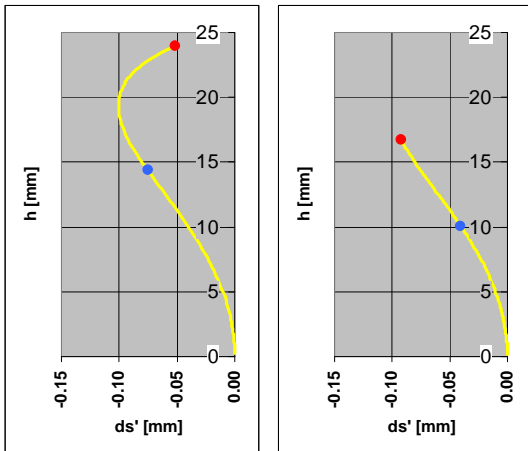
In der Optik übliche grafische Darstellung der sphärischen Längsaberration: nach oben ist aufgetragen, woher ein Strahl aus der Blendenebene kommt, unten auf der waagerechten Achse ist die Abweichung der Fokusposition zu sehen. Die Richtungen entsprechen also den Grafiken auf den vorigen Seiten. Links ein stark unterkorrigiertes Objektiv.

Aber selbst bei dem gut korrigierten Objektiv rechts zeigt das Helligkeitsprofil der Zerstreuungskreise schon einen „Hauch von Ring“ am Rand:



Helligkeitsprofil in verschiedenen großen Zerstreuungskreisen des Hintergrundes bei einem schwach sphärisch unterkorrigierten Objektiv. Je stärker man defokussiert, desto kleiner werden die Abweichungen von der idealen gleichmäßig hellen Scheibe der Zerstreuungskreise ohne Aberrationen.

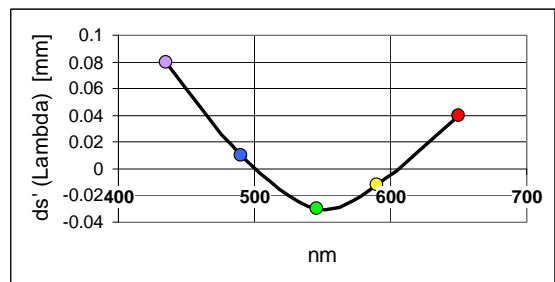
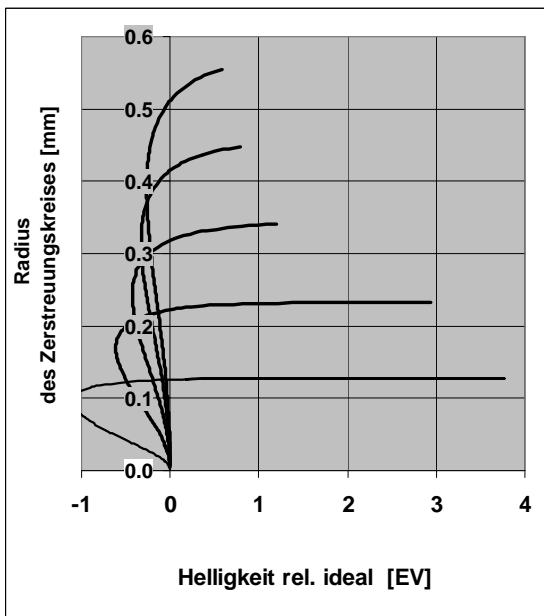
Schon eine etwas stärkere Auslegung der Gegenmaßnahmen in Richtung sphärischer Überkorrektion lässt die Helligkeit am Rand der Zerstreungskreise stark ansteigen:



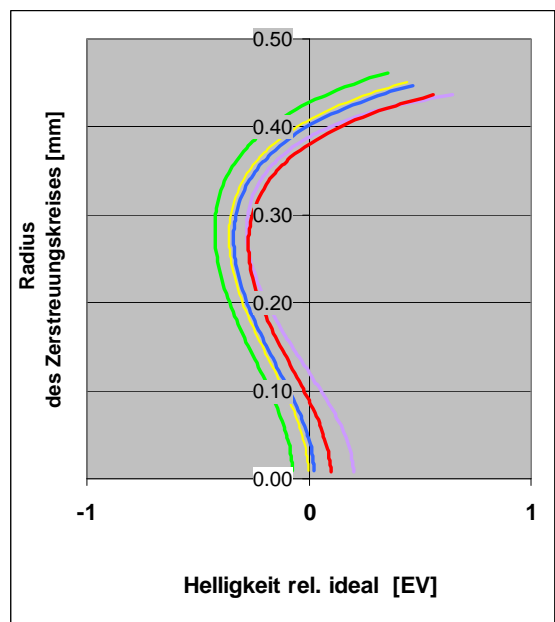
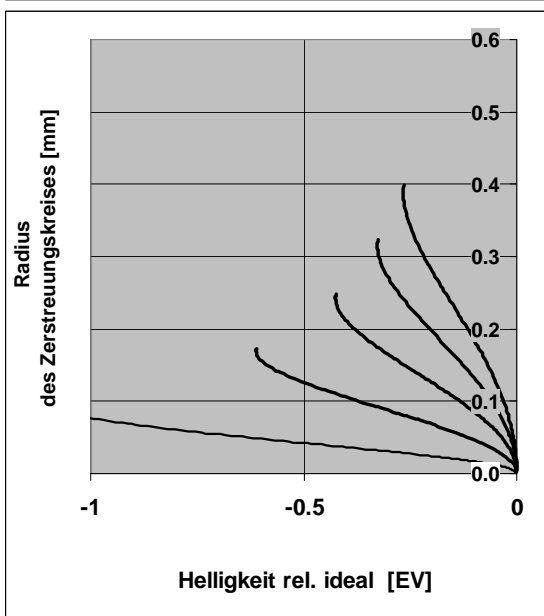
Doch wenn man das Objektiv um eine Stufe abblendet (Grafik rechts und unten), ist der Umkehrpunkt der sphärischen Längsaberration ausgeschlossen, und die Helligkeitsprofile sehen wieder gutmütig aus.

Außerdem sehen wir auch in diesem Beispiel, dass die Helligkeitsprofile verflachen, wenn die Abbildung stärker unscharf wird.

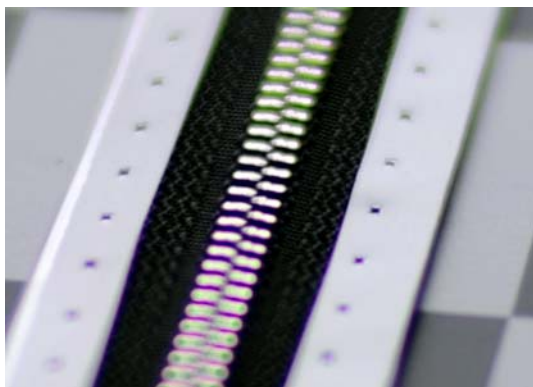
Ganz so scharf wie in den oben gezeigten Helligkeitsprofilen ist der Anstieg der Helligkeit am Rand der Zerstreungskreise in der Wirklichkeit nicht. Denn die Profile in den beiden letzten Grafiken wurden nur für eine Wellenlänge gerechnet. Das reale Objektiv hat aber schon in einem Bildpunkt auf der Achse außer sphärischer Aberration auch **chromatische Längs-Aberration**: der Schnittpunkt der Strahlen hängt auch von der Farbe des Lichtes ab, und dieser Fehler kann durchaus ähnlich groß sein wie der sphärische:



Deshalb sind die Farben unterschiedlich stark defokussiert und die entsprechenden Zerstreungskreise verschieden groß:



Im Hintergrund des Bildes führt dieses Zusammenwirken verschiedener Fehler dazu, dass im Inneren des Zerstreuungskreises die Farben dominieren, die am weitesten entfernt vom Objektiv fokussiert werden, also in der Regel die Farben von den Enden des sichtbaren Spektrums. Ihre Mischung sieht dort also **purpurfarbig** aus. Dagegen überwiegen am Rand des Zerstreuungskreises die Farben aus der Mitte des Spektrums – das erklärt den **grünen** Saum, den wir immer sehen, wenn ein weißes Objekt unscharf abgebildet wird.



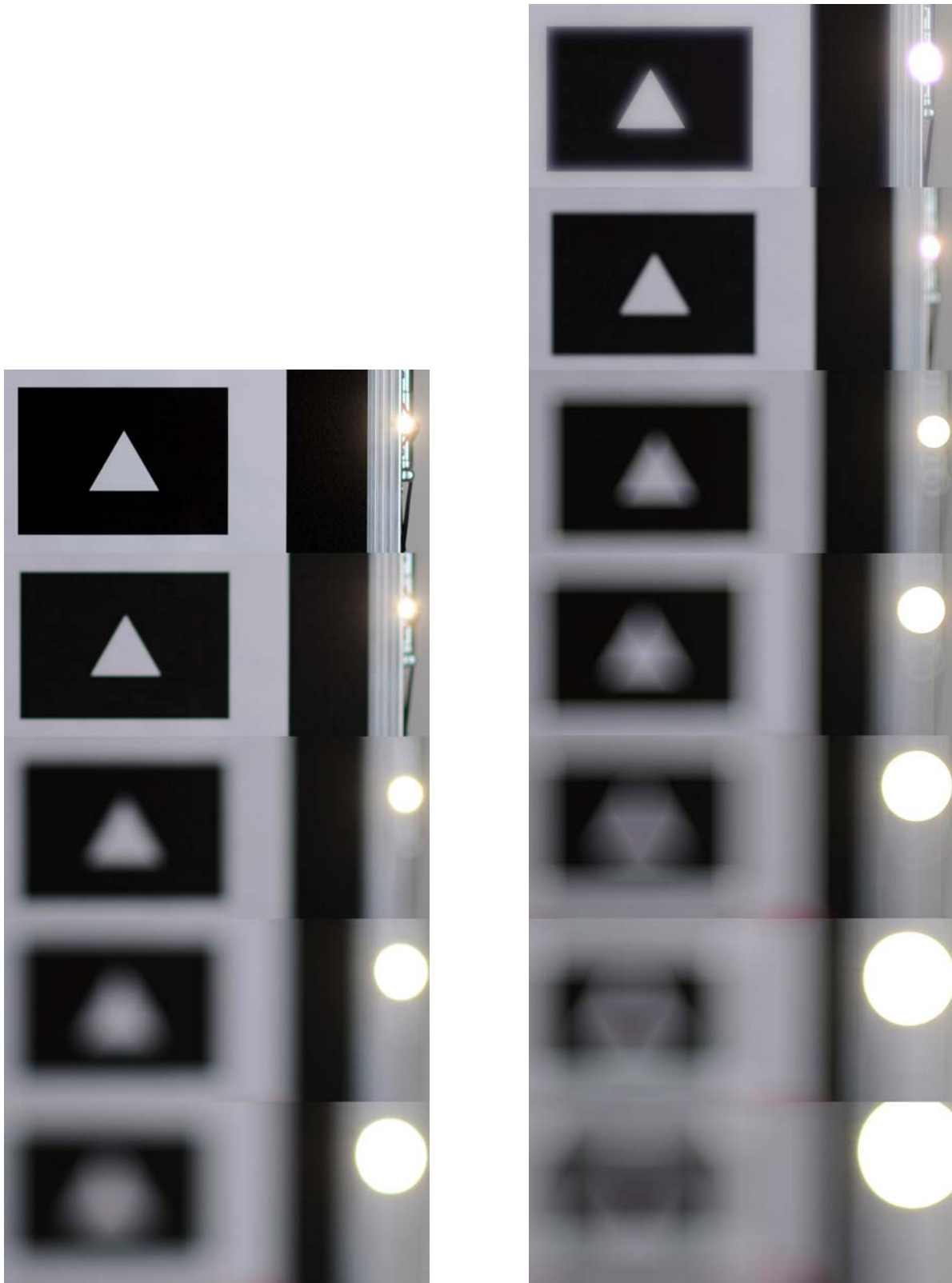
Zwei Beispiele für **Farb-Bokeh** in direkter Nachbarschaft zur Fokuszone. Im oberen Bild sind alle glänzenden Objekte im Hintergrund, im unteren Bild durchlaufen sie die Fokuszone. Deshalb sieht man die Umkehrung der Farbeffekte vor und hinter dem Fokus. Dass man im unteren Bild hinter dem Fokus zwar den grünen Saum sieht aber nicht den purpurfarbigen Kern, liegt an der zu großen Helligkeit in den Spitzlichtern.

Für die Feinheiten der chromatischen Aberration gilt dasselbe wie für die sphärischen Effekte: wenn man sehr stark defokussiert oder das Objektiv abblendet, verschwinden diese besonderen Phänomene.

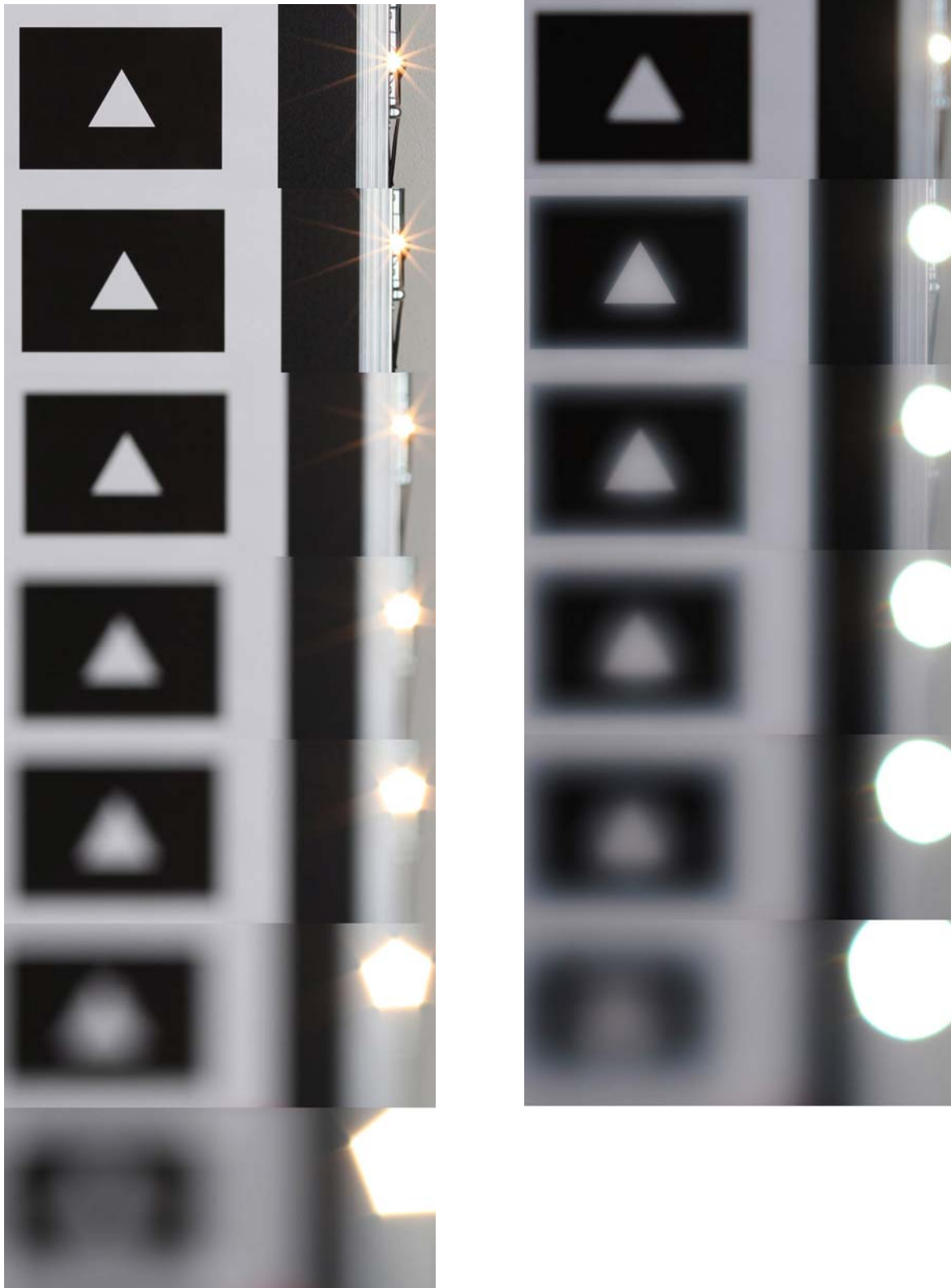
Aus allen auf den letzten fünf Seiten dargestellten Zusammenhängen ergeben sich folgende Regeln über Bokeh:

- *Man sollte mit Urteilen über das durch die Korrektur bedingte Bokeh von Objektiven sehr vorsichtig sein. Denn das Bokeh ist etwas sehr variables, vor allem kann es im Vordergrund und im Hintergrund deutlich verschieden sein.*
- *Der Einfluss der Korrektur auf die unscharfe Wiedergabe ist besonders groß bei sehr kleinen Abweichungen vom Fokus. Bei starker Unschärfe wird er meist verschwindend gering.*
- *Die Blende hat sehr großen Einfluss; schon geringe Ablendung kann den Charakter der Unschärfe deutlich sichtbar verändern. Generell haben weniger hoch geöffnete Objektive naturgemäß kleinere Zonenfehler der sphärischen Aberration. Es ist also kein Wunder, wenn ihr Bokeh als gutmütig gelobt wird.*
- *Die sphärische Aberration eines Objektivs ändert sich auch mit dem Abbildungsmaßstab. Deshalb hängen auch Bokeh-Eigenschaften von der Aufnahmeentfernung ab. Die Hintergrundunschärfe in der maximalen Naheinstellung des Objektivs ist nicht die gleiche wie bei 2m Entfernung.*

Nach vielen schwierigen Grafiken haben Sie zum Schluss etwas Entspannung verdient, einige Bildbeispiele, die den Einfluss der sphärischen Aberration illustrieren, und die dazu anregen sollen, auch unsere Download-Bilder zu studieren:



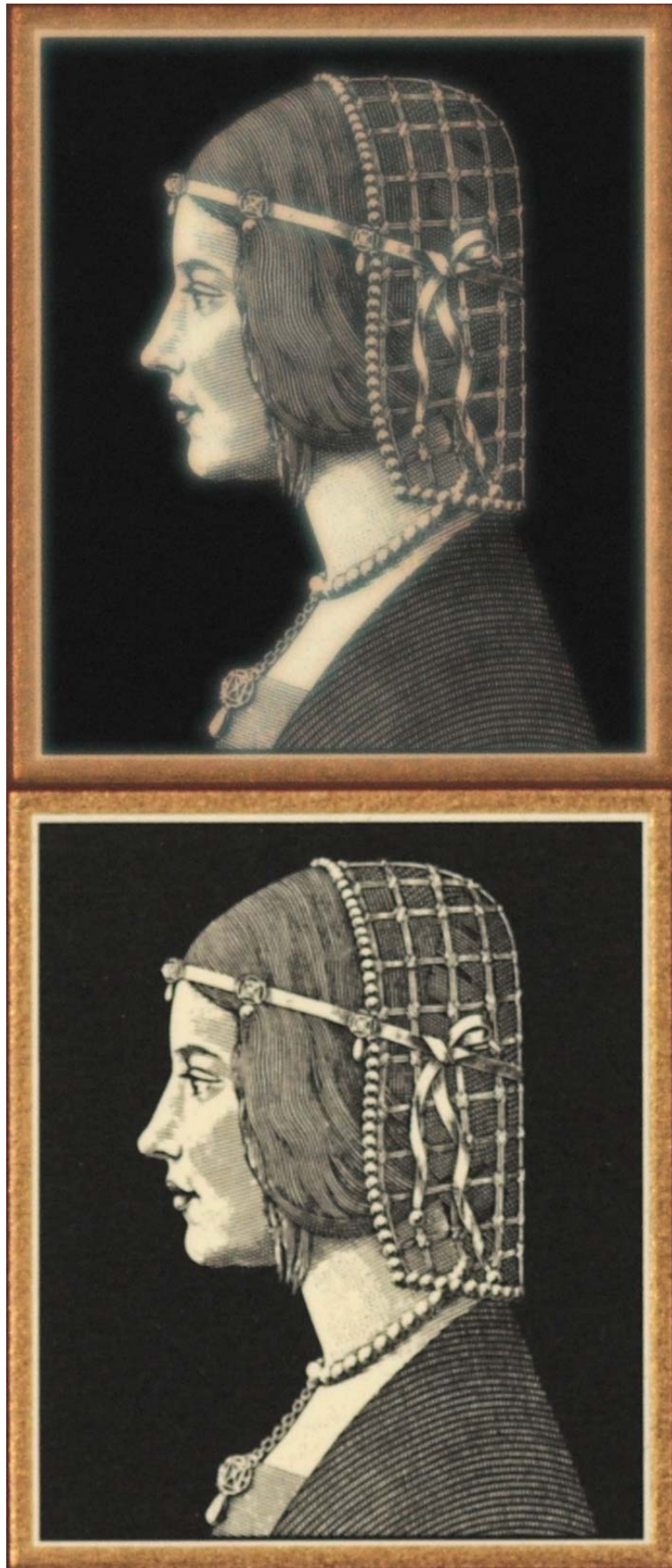
Links eine Fokusreihe der Unschärfe im Hintergrund mit einem sphärisch normal korrigierten Objektiv, rechts mit einem deutlich überkorrigierten Objektiv. Seine Eigenschaften sind: bei bester Kantenschärfe ist ein Schleier vorhanden (oberstes Bild), im unscharfen Bild sieht man viele Artefakte in Form von neu entstehenden Konturen.



Links eine Fokusreihe der Unschärfe im Hintergrund mit einem sphärisch normal korrigierten Objektiv mit fünf Blendenlamellen, rechts mit einem unterkorrigierten Objektiv. Seine Eigenschaften sind: bei bester Kantenschärfe ist ein Schleier vorhanden (zweites Bild von oben), die Kontur des Dreiecks bleibt lange erhalten. Wegen der Schleier der sphärischen Aberration erscheint das sehr helle Spitzlicht viel größer.



Ein ca. 700x820 Pixel großer Ausschnitt aus einem 24MP-Bild, oben mit starker sphärischer Aberration, unten gut korrigiert. Die Schraffur im Haar liegt im Sensorbild bei etwa 40 Lp/mm. Aufnahme im Maßstab 1:10. Diese Bilder liegen zum Download auf unserem Server.



Die gleichen Objektive wie auf der vorigen Seite, jetzt um 1.5 Schärfentiefen defokussiert, das Motiv liegt im Hintergrund. Beim schlechter korrigierten Objektiv ist die Änderung der Schärfe deutlich kleiner – aber mit Abstrichen bei der maximalen Bildqualität.

Download-Bilder

Bild 1 bis 7

Die Bildsequenz zeigt einen Blick auf die Zeiss Werksgebäude in Oberkochen mit unterschiedlich starker Unschärfe, erzeugt durch Kombination von Fokussierung und Blendenzahl. Das Objektiv war ein Planar 1.4/50 an einer APS-C Kamera. Ein roter Pfeil in einigen Bildern zeigt auf ein markantes Spitzlicht, wo sich die Sonne in einer Autoscheibe spiegelt; zwei blaue Pfeile markieren die Breite einer hellen Struktur.

- Bild 1 scharfe Abbildung
- Bild 2 Zerstreuungskreis ca. 1/1000 der Bilddiagonale
- Bild 3 Zerstreuungskreis ca. 1/200 der Bilddiagonale

- Bild 4 Zerstreuungskreis ca. 1/90 der Bilddiagonale; die Belichtung mit Blende 1.4 zeigt im Bild des Spitzlichtes die Aufhellung am Rand und den grünen Saum der chromatischen Längsaberration

- Bild 5 Zerstreuungskreis wieder ca. 1/90 der Bilddiagonale – aber jetzt mit Blende 11 Die Aufhellung am Rand des defokussierten Spitzlichtes hat jetzt nichts zu tun mit den Korrektioneigenschaften des Objektivs – sie wird durch Beugung verursacht.

- Bild 6 Zerstreuungskreis ca. 1/45 der Bilddiagonale
- Bild 7 Zerstreuungskreis ca. 1/10 der Bilddiagonale

Bild 8 bis 11

Ein recht unregelmäßiges Objekt in unterschiedlicher Unschärfe. Die beiden weniger unscharfen Varianten wären uns als Bildhintergrund vermutlich unangenehm, weil sie unruhig wirken. Sie sind aber mit Blende 2.8 und Blende 11 fotografiert, wo Bokeh-Eigenschaften der Korrektion kaum wirksam sind. Wir sehen daran, dass unruhiger Hintergrund oft gar nichts mit speziellen Objektiveigenschaften zu tun hat, sondern eine Frage der Motiveigenschaften selbst ist. Solche Strukturen müssen wohl entweder richtig unscharf oder richtig scharf sein.

Bild 12

Das Bild vergleicht Unterschiede der Hintergrund-Unschärfe: links ein Zoom-Objektiv bei längster Brennweite, rechts das Makro-Planar 2/100, beide bei Blende 5.6. Viele Zoom-Objektive zeigen bei ihren längeren Brennweiten Anzeichen sphärischer Überkorrektion.

Bild 13

Diese Bild ist eine Montage kleiner Ausschnitte aus Bildern einer 24MP KB-Vollformat Kamera. Der Ausschnitt ist im Original 5cm hoch und wurde im Maßstab 1:10 abgebildet. Die Strukturen im Haar der abgebildeten Dame liegen im Bild bei ca. 40 Linienpaaren/mm. Jede horizontale Reihe aus neun Bildern ist eine Fokusreihe: links ist die Kamera am dichtesten am Motiv, nach rechts wandert das Motiv durch den Fokus in den Hintergrund. Die Schrittweite zwischen den einzelnen Bildern beträgt 4mm, also im Bildraum 0.04mm.

Die Aufnahmen der oberen Reihe wurden mit dem Makro-Planar 2.0/100 ZF.2 bei Blende 2.8 gemacht. Nach der Rechnung mit einem Zerstreuungskreis-Durchmesser von 1/1500 der Diagonale beträgt die Schärfentiefe bei 1:10 1.9cm; also sollten mindestens zwei Bilder links und rechts von der Mitte innerhalb der Schärfentiefe liegen. Sie sehen, dass es bei anspruchsvoller Betrachtung nur halb so viele sind.

In der zweiten Reihe von oben wurde ein Objektiv verwendet, das so justiert wurde, dass es eine große sphärische Aberration hatte. Sein Bild ist auch im besten Fokus weniger scharf und kontrastreich, zeigt dafür aber über eine große Tiefe eine geringere Änderung der Abbildungsqualität. Im Vergleich zur oberen Reihe sieht man, dass besser korrigierte Objektive abrupter in die Unschärfe übergehen.

Die unteren drei Reihen zeigen Bilder verschiedener Objektive bei Blende 1.4, bei denen der Charakter der Unschärfe vor und hinter dem besten Fokus sehr verschieden ist. Speziell nach hinten kann die Auflösung feiner Strukturen über größere Tiefe erhalten bleiben als bei den Bildern mit Blende 2.8. Das zeigt die Grenzen der geometrischen Schärfentieferechnung.

Bild 14 bis 17 enthalten Bilder des Textes als jpg-Datei.