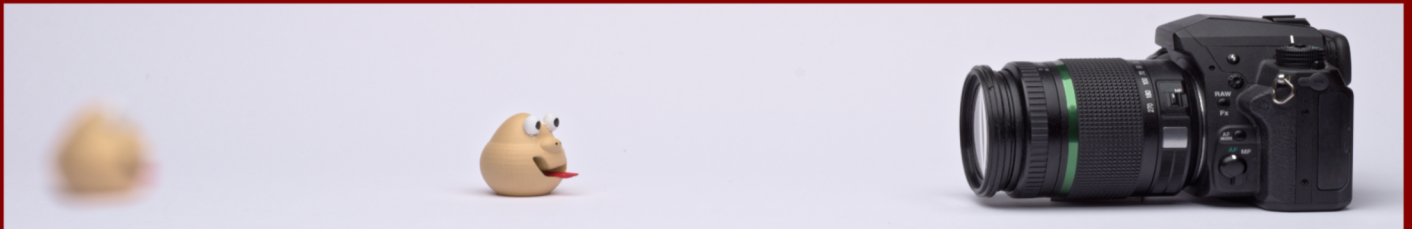


# Themenhefte Fotografie

Michael Kretzschmar

## Schärfe und Unschärfe in der Fotografie



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Schärfe und Schärfeeindruck in der Fotografie .....	2
Der Versuch einer Definition der Schärfe.....	2
Der maximale Durchmesser des Zerstreungskreises.....	3
Der Schärfeeindruck.....	5
Der Schärfeeindruck in der Post-Produktion.....	5
Die Schärfentiefe.....	6
Die Entstehung der Schärfentiefe .....	7
Fazit.....	9
Berechnung der Schärfentiefe.....	10
Hyperfokale Entfernung.....	10
Nah- und Fernpunkt.....	11
Schärfentiefe.....	11
Die Scheimpflugregel .....	12
Praktische Anwendung.....	14
Überprüfung der Scheimpflug-Fokussierung.....	16
Beugungsunschärfe .....	16
Förderliche Blende .....	17
Berechnung des Beugungsscheibchens.....	18
Rayleigh-Kriterium .....	18
Näherungsberechnung der Größe des Beugungsscheibchens .....	18

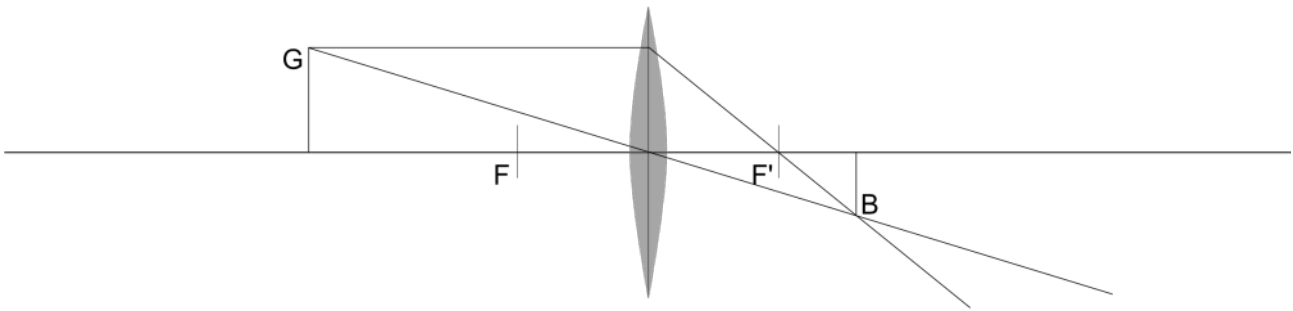
# Schärfe und Schärfeeindruck in der Fotografie

Eine Definition von Schärfe in der fotografischen Literatur zu finden, ist nicht leicht. Zwar beschäftigen sich fast alle Autoren mit Schärfe, Scharfstellen und Schärfentiefe - aber eine Beschreibung, was Schärfe eigentlich ist, fehlt.

## Der Versuch einer Definition der Schärfe

„Ein Bild ist scharf, wenn jeder Punkt eines Gegenstandes in genau einem Punkt des Bildes wiedergegeben wird.“

Nehmen wir dazu die folgende Konstruktion eines Linsenabbildes:



Konstruktion eines optischen Bildes

Der Gegenstand G steht auf der Gegenstandsseite in mehr als doppelter Brennweite von der Linse entfernt. Der Mittelpunktstrahl und der Parallel-Brennstrahl schneiden sich auf der Bildseite an einem Punkt. **Hier wird der Punkt G als Bildpunkt B scharf wiedergegeben.** Die Gesamtheit aller Strahlen, die von G ausgehen, erzeugen das Bild B<sup>1</sup>. Vor und hinter dem Schnittpunkt der Strahlen erschiene der Punkt auf der Bildebene als Kreis. Dieser Kreis wird als **Zerstreuungskreis** bezeichnet. Abhängig von der Größe des Kreises nimmt man das Bild als unscharf wahr<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> In der Zeichnung ist stellvertretend nur ein Punkt von G nach B eingezeichnet.

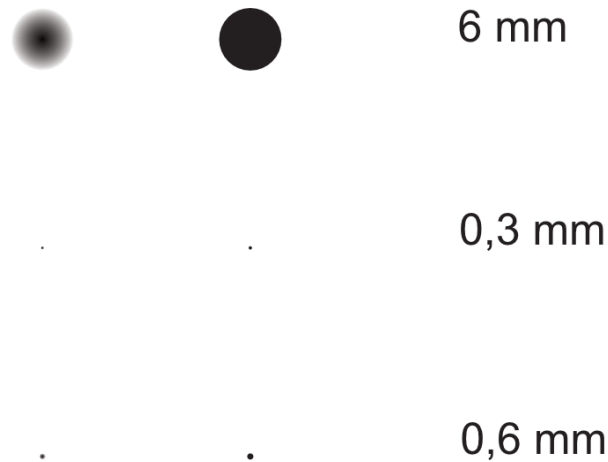
<sup>2</sup> Selbstverständlich ist auch der Bildpunkt B streng genommen ein Kreis. Da dieser Kreis aber den kleinsten möglichen Radius hat, wollen wir ihn als Punkt bezeichnen. Und Punkte sollen immer scharf sein.

## Der maximale Durchmesser des Zerstreungskreises

Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges liegt bei ungefähr einer Bogenminute<sup>3</sup>, entsprechend 0,017°. In einem Abstand von einem Meter entspricht das einem Kreis von nicht ganz 0,3 mm Durchmesser. Bei einem Betrachtungsabstand von 30 cm sind es noch knapp 0,09 mm.

So kann die Definition von Schärfe ergänzt werden:

**„Ein Zerstreungskreis mit einem Durchmesser von maximal 1' (0,017°) oder weniger wird als Punkt wahrgenommen. Ein Punkt wird als „scharf“ wahrgenommen.“**



Zerstreungskreise

*In der oberen Abbildung zeigen die beiden 6 mm Kreise den Aufbau der „Zerstreungskreise“. In der darunter sind die beiden Zerstreungskreise noch 0,3 mm groß und erscheinen aus einem Meter Entfernung scharf, obwohl der linke Kreis einen Helligkeitsverlauf darstellt. In der unteren Reihe sind die Kreise 0,6 mm groß und der linke Kreis kann in einem Meter Abstand ansatzweise als unscharf erkannt werden. Betrachtet man die unteren Kreise aus 2 m Abstand, erscheinen wieder beide Kreise scharf<sup>4</sup>.*

Wie bereits oben ausgeführt, kann der Zerstreungskreis mit zunehmendem Betrachtungsabstand größer werden, ohne dass der Schärfeeindruck sich ändert. Erst wenn der Zerstreungskreisdurchmesser des Ausgabemediums 0,017° überschreitet, nimmt der Schärfeeindruck ab.

Diese Definition gilt für Ausgabemedien wie Drucke und Monitore. Aber wie verhält es sich bei Aufnahme-medien, also Filme und Sensoren?

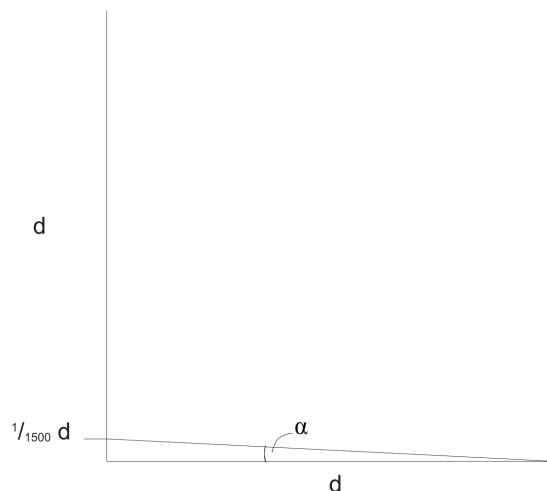
<sup>3</sup> Manche Autoren geben als Auflösungsgrenze auch zwei Bogenminuten (2') an. Der Spielraum ist hier sehr groß.

<sup>4</sup> Wegen des Helligkeitsverlaufs erscheint der linke Kreis immer etwas kleiner als der rechte Kreis.

Feininger definiert 1978, dass ein „Kleinbildnegativ oder -dia ... als scharf angesehen [wird], wenn der Durchmesser des Zerstreuungskreises nicht mehr als  $\frac{1}{1500}$  der normalen Brennweite beträgt.“<sup>5</sup> Für ein 50 mm Objektiv erhält man so einen Zerstreuungskreis von 33  $\mu$ m Durchmesser.

Andere Autoren definieren den Zerstreuungskreisdurchmesser als  $\frac{1}{1500}$  der Diagonale des Aufnahmemediums. Dieser scheinbare Unterschied von Brennweite vs. Diagonale des Ausgabemediums klärt sich auf, wenn man weiß, dass 50 mm<sup>6</sup> die Normalbrennweite für das Kleinbildformat sind. Daher entspricht die Brennweite der Diagonalen des KB-Formats (ungefähr).

Es bleibt anzumerken, dass der Faktor  $\frac{1}{1500}$  nicht willkürlich gewählt ist. Betrachtet man ein Bild mit einer Diagonalen  $d$  im Abstand von  $d$ , dann sind 2 Bogenminuten ungefähr  $\frac{1}{1500}$  der Diagonalen:



$$\tan \alpha = \frac{d}{1500} \times \frac{1}{d} = \frac{1}{1500} = 0,00\bar{6}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1500}\right) = 0,0382^\circ = 0^\circ 2' 18''$$

Für Digitalkameras sollte der Zerstreuungskreis bei monochromatischen Aufnahmen dem Durchmesser einer Fotodiode entsprechen. Bei Farbaufnahmen darf der Durchmesser dem Doppelten des Fotodiendurchmessers entsprechen.

Wie groß sollte also der Zerstreuungskreisdurchmesser für einen Kleinbild-Farbsensor (36 x 24 mm) sein? Nehmen wir an, der Sensor hat 6000 x 4000 Fotodioden. Dann hat eine Diode einen Durchmesser von

$$d = 36 \div 6000 = 0,006 \text{ mm} = 6 \mu\text{m}$$

Der Zerstreuungskreis für einen KB-Farbsensor mit 24 MP darf also 12  $\mu$ m betragen. Das sind rund  $\frac{2}{5}$  des Durchmessers für einen KB-Film!

<sup>5</sup> Feininger, A.: „Grosse Fotolehre“, 10. Auflage 1979, Wilhelm Heyne Verlag München, S. 139

<sup>6</sup> Korrekt wären 43,27 mm. Tatsächlich haben sich 50 mm eingebürgert.

Die minimal erreichbare Größe des Zerstreuungskreises ist von mehreren Parametern abhängig. Neben der Einstellgenauigkeit am Fokusring spielen Glasfehler am Objektiv und die Oberflächengüte der Aufnahmeeinheit (Sensor oder Film) ebenso wie die Auflösung und die Umgebungsbedingungen (Luftverschmutzung, Wärme) eine Rolle. Auch der optimale „Fokuspunkt“ ist tatsächlich immer ein (Zerstreuungs-)Kreis.

## Der Schärfeeindruck

Wenn wir ein Bild als „scharf“ empfinden, spielen neben dem Zerstreuungskreis noch weitere Faktoren eine Rolle. Die wichtigsten scheinen mir der Helligkeits- und der Farbkontrast an Kanten zu sein. Das ist auch naheliegend, denn unser Auge ist so gebaut, dass die Wahrnehmung von Kanten, Gestaltgrenzen, erleichtert wird<sup>7</sup>.



Unschärfes Bild



Scharfes Bild

In der Fotografie ist der Schärfeeindruck eines Bildes entscheidender als die tatsächliche Schärfe. Hier gilt regelhaft: **„Ein Bild ist scharf, wenn die maximale Anzahl an Details wahrgenommen werden kann.“**

Diese Regel setzt voraus, dass es Einstellmöglichkeiten gibt, die die Anzahl der Details verändern können. Neben der richtigen Fokuseinstellung am „*Scharfstellring*“ ist der Schärfeeindruck von vielen Einflussfaktoren abhängig, u.a. der Qualität des Objektivs und des Sensors, der Auflösung, den Umgebungsbedingungen (Luftverschmutzung, Wärme) etc. Einige können wir leicht ändern (Fokussierung), andere nur schwer (Qualität von Objektiv und Sensor) und wieder andere möglicherweise gar nicht (Umweltbedingungen).

## Der Schärfeeindruck in der Post-Produktion

Das obere linke Bild ist unscharf - es wurde nicht richtig fokussiert. Nach der Korrektur der Fokussierung entstand das rechte Bild. Es ist hinreichend scharf, die Unschärfe vor und hinter dem Motiv entsteht aufgrund der endlichen Schärfentiefe.

In der Post-Produktion kann der Schärfeeindruck verändert werden. Im ersten Bild auf der folgenden Seite wurde der Schärfeeindruck erhöht.

---

<sup>7</sup> Schmidt, Thews: „Physiologie des Menschen“, 27. Auflage 1997, Springer Verlag Berlin Heidelberg, S. 205f, 295 ff



Schärfeeindruck erhöht

Im verwendeten Programm DxO PhotoLab heißen die benutzten Regler „ClearViewPlus“, „Kontrast“ und „Mikrokontrast“. ClearViewPlus ist zur Entfernung von atmosphärischem Dunst im Bild gedacht. Er arbeitet laut DxO Website<sup>8</sup> mit einer Kontrastanpassung.

Außerdem wurde der Kontrast vermindert und der Mikrokontrast massiv erhöht. Der Mikrokontrast arbeitet laut DxO PhotoLab Handbuch<sup>9</sup> Details heraus und soll ähnlich wie eine Schärfekorrektur wirken.

korrektur wirken.

Um die Schärfe in der Post-Produktion zu bearbeiten, gibt es online und offline spezielle Software und Tipps im Internet. Aber bitte bedenkt, oder versucht es selbst, dass ein unscharf fokussiertes Bild durch alle Tricks der Welt nicht in ein scharfes Bild verwandelt werden kann. Am besten arbeiten die Schärfetools, wenn ein scharfes Bild noch etwas knackiger werden soll.

Abschließend das gleiche Bild mit unterschiedlichen Verfahren „knackiger“ gemacht:



Original



Mikrokontrast erhöht



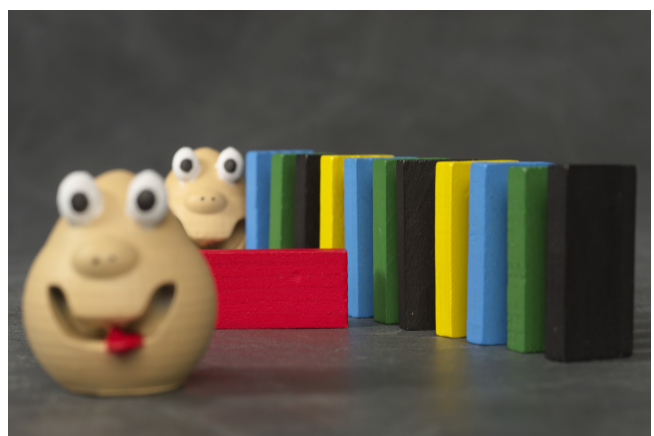
Unschärfmaskierung



Spezielles Schärfetool

## Die Schärfentiefe

In einem Bild kann es nur eine physikalisch scharf abgebildete Ebene geben. Sie wird als Schärfenebene bezeichnet. Trotzdem empfinden wir einen bestimmten Bereich vor und hinter dieser Ebene als scharf. Die Ausprägung dieses Bereichs wird als **Schärfentiefe** oder depth of field (dof) bezeichnet. Im unteren Bild kann der Schärfentiefebereich um den roten Block herum gut erkannt werden.



Schärfentiefe

<sup>8</sup> Quelle: <https://www.dxo.com/de/dxo-photolab/clearview/> am 01.08.2025

<sup>9</sup> DxO PhotoLab 8 Handbuch, 2024, S. 179 (PDF-Format)

Der Bereich der Schärfentiefe wird größer, wenn

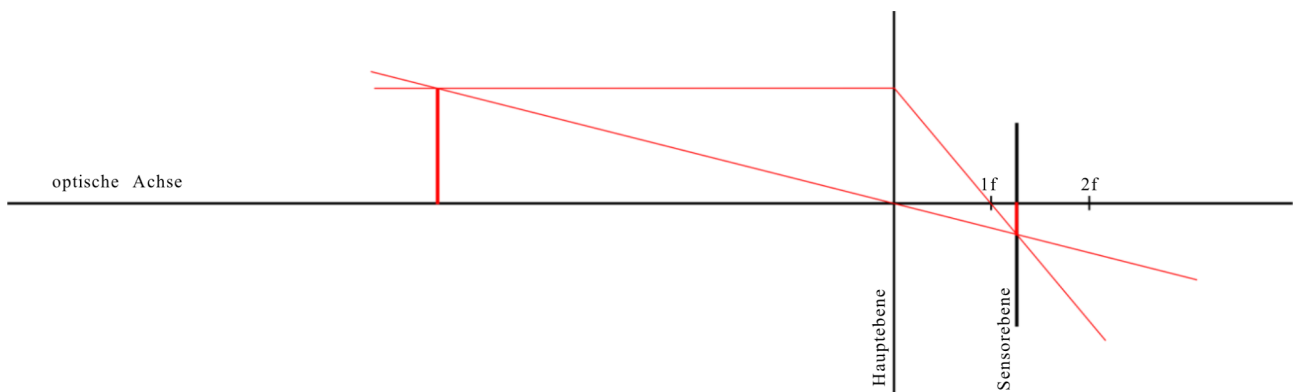
- die Blende geschlossen wird (z.B. von  $f/4$  auf  $f/11$ ),
- der Aufnahmeabstand vergrößert wird (z.B. von 3 m auf 7 m) oder
- die Brennweite geringer wird (z.B. von 150 mm auf 50 mm).

Der gesamte Bereich der Schärfentiefe erstreckt sich von der Schärfenebene um  $\frac{1}{3}$  nach vorne in Richtung Kamera und  $\frac{2}{3}$  nach hinten, von der Kamera weg.

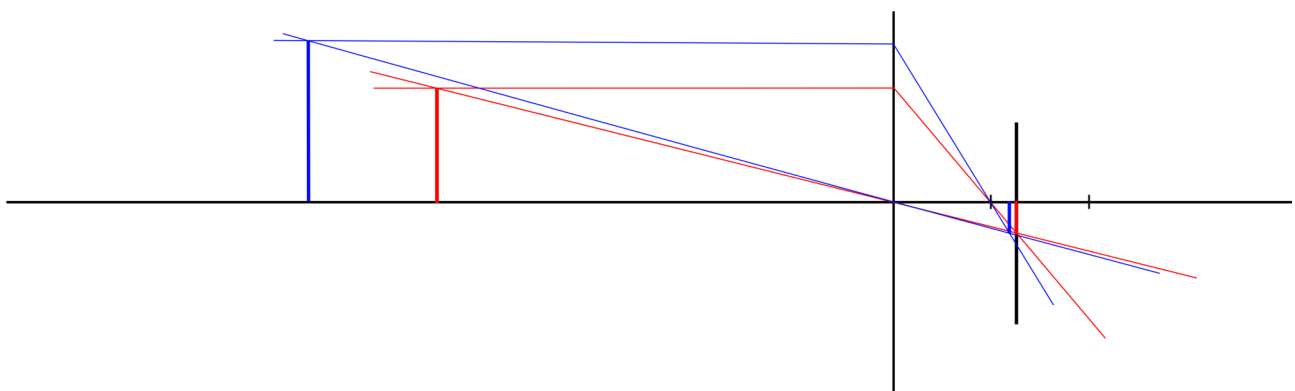
## Die Entstehung der Schärfentiefe

Betrachten wir nur ein, am besten zweidimensionales Detail einer Szene, wie z.B. den roten Block im Bild oben, stellt sich das Problem der Schärfentiefe nicht. Der Block ist entweder scharf oder nicht, warum haben wir bereits besprochen.

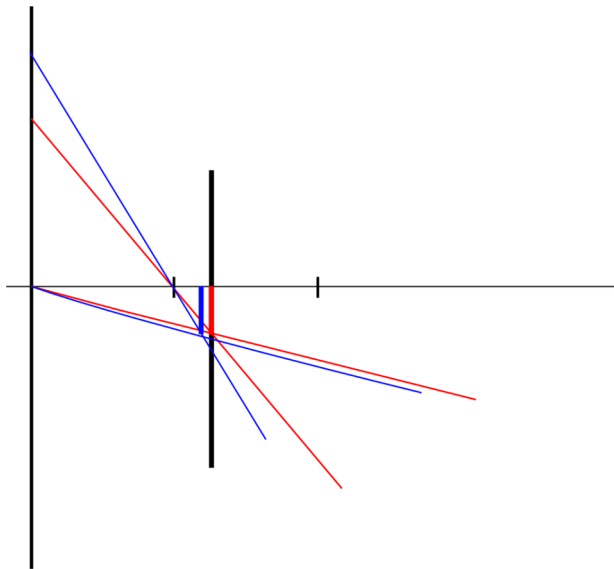
Die Bildkonstruktion würde etwa so aussehen:



Erweitern wir jetzt unsere Bildkonstruktion um ein Detail:

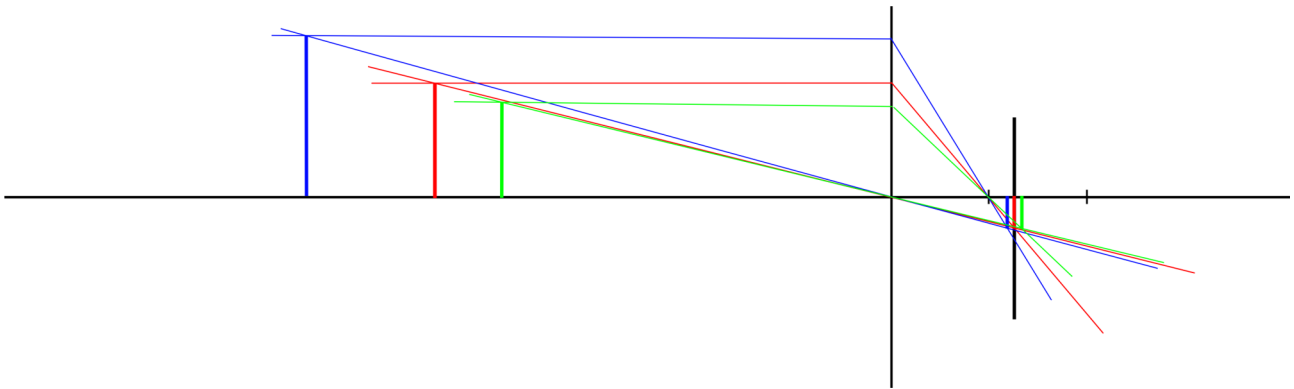


Wir haben ein blaues Detail zugefügt, das hinter dem roten Detail steht. Vergrößern wir nun den Bildbereich:

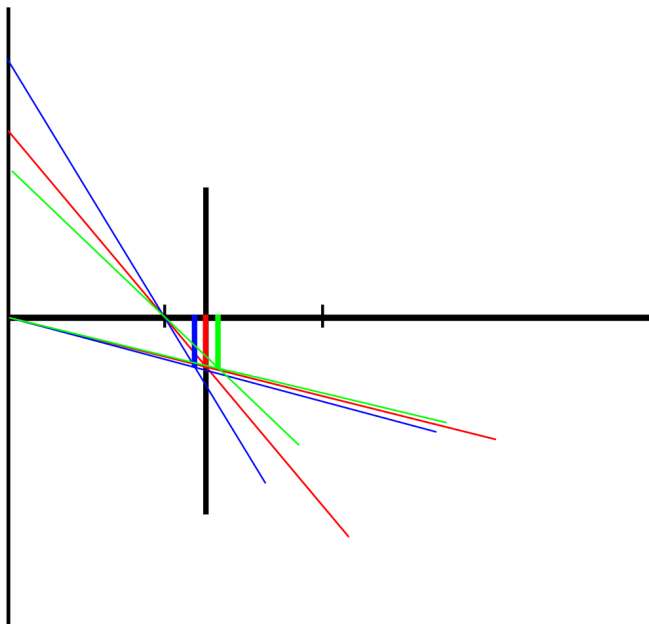


Die Konstruktionsstrahlen des roten Details schneiden sich genau auf dem Sensor. Der Zerstreungskreis ist minimal und das Detail wird scharf wahrgenommen. Die Konstruktionsstrahlen des blauen Details schneiden sich bereits vor dem Sensor und divergieren, wenn sie auf den Sensor treffen. Das Detail erscheint unscharf.

Gehen wir noch einen Schritt weiter:



Vor dem roten Detail steht ein grünes Detail. Vergrößern wir wieder den Bildbereich:



Die Konstruktionsstrahlen des grünen Details schneiden sich erst hinter dem Sensor. Das Detail ist auf dem Sensor unscharf.

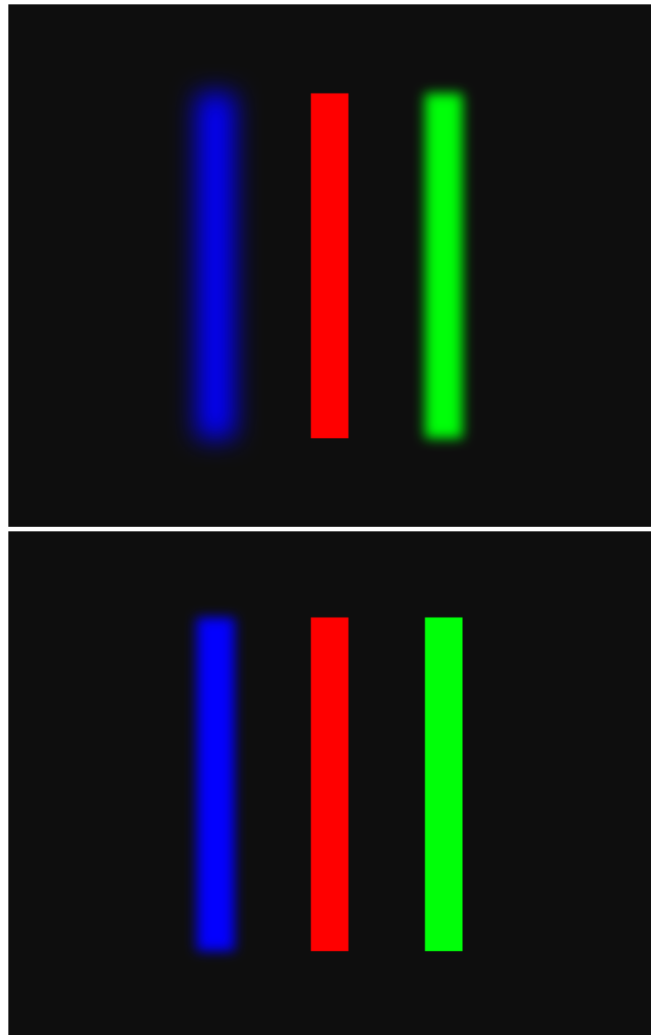
Außerdem sehen wir, dass die Abstände der Bilder des blauen und des grünen Details vom Bild des roten Details gleich sind. Die Gegenstandsweiten im Gesamtbild darüber zeigen aber die typischen  $\frac{1}{3}$  -  $\frac{2}{3}$  Abstände der Details, die wir bei der Eingrenzung der Schärfentiefe erwarten.

In der nächsten Abbildung schauen wir entlang der optischen Achse auf den Sensor:

Das rote Detail wird scharf abgebildet. Seine Zerstreuungskreise liegen in der Sensorebene und sind kleiner als eine Bogenminute. Das blaue und das grüne Detail sind unterschiedlich unscharf abgebildet.

Wenn wir jetzt die Blende weiter schließen und die Belichtung ausgleichen, sieht das Bild so aus:

Das rote und das grüne Detail sind scharf abgebildet, das blaue Detail ist schärfer als im vorigen Bild, aber immer noch unscharf.



## Fazit

Den kleinsten Zerstreuungskreis und das schärfste Bild erhalten wir, wenn die Schärfenebene mit der Sensorebene zusammen fällt. Details, die davor oder dahinter liegen, werden mit größeren Kreisdurchmessern dargestellt. Aber so lange diese Kreisdurchmesser nicht zu groß werden<sup>10</sup>, nehmen wir die Bilder scharf wahr. Erst wenn die Grenzen überschritten werden, werden die Bilder mehr und mehr unscharf.

Physikalisch bedingt wachsen die Durchmesser der Zerstreuungskreise von Details, die vor der Schärfenebene in Richtung Kamera liegen, schneller als die, die hinter der Schärfenebene liegen. Deshalb ist die Schärfentiefe nach vorne (von der Schärfenebene aus gesehen), kürzer als nach hinten. So entsteht die  $\frac{1}{3}$  -  $\frac{2}{3}$  - Regel.

---

<sup>10</sup> Eine Bogenminute bei der Betrachtung von Ausdrucken, der doppelte Durchmesser eines CCD bei Farbsensoren etc.

## Berechnung der Schärfentiefe

Zur Bestimmung der Schärfentiefe werden rechnerisch der *Nahpunkt* und der *Fernpunkt* benötigt. Der Nahpunkt ist der kameranächste Punkt, an dem das Bild gerade scharf wird. Der Fernpunkt ist dementsprechend der kameraferne Punkt, an dem ein Bild gerade noch scharf ist.

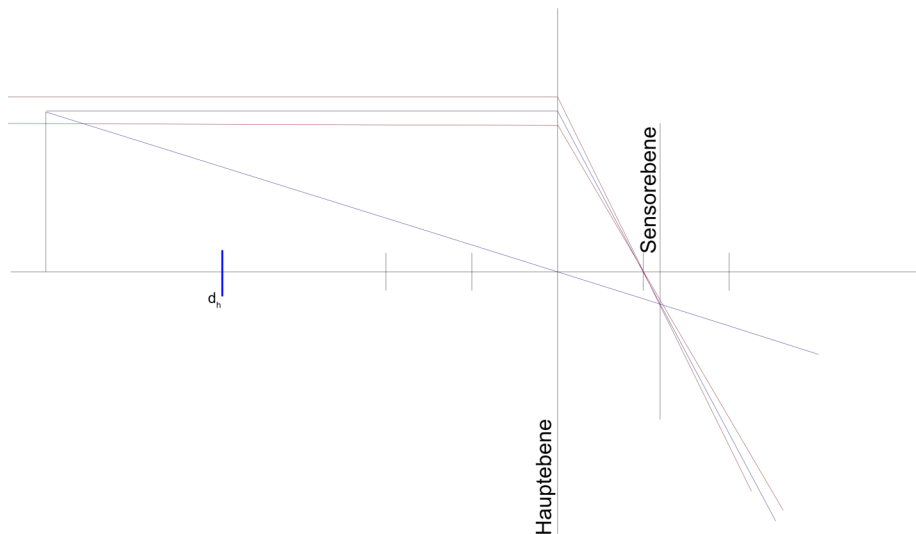
Zur Berechnung des Nah- und Fernpunktes wird die *hyperfokale Entfernung* benötigt. Zur Herleitung der Formeln sei auf die Wikipedia unter dem Stichwort „Schärfentiefe“ verwiesen. Wir werden uns hier mit den fertigen Formeln auseinandersetzen.

## Hyperfokale Entfernung

Die hyperfokale Entfernung liefert die größte Schärfentiefe, der Fernpunkt liegt gerade im Unendlichen. Der Nahpunkt liegt dann immer bei der halben hyperfokalen Entfernung.

$$d_h = \frac{f^2}{z \times b} + f$$

$d_h$ : hyperfokale Entfernung in mm  
 $f$ : Brennweite in mm  
 $z$ : Durchmesser des Zerstreuungskreises in mm  
 $b$ : Blendenzahl



Als Vereinfachung der Formel wird oft der Summand „+ f“ weggelassen. Wer mag, kann nachrechnen, wie groß der Unterschied ist.

In der Abbildung oben sehen wir ein blaues Objekt weit hinter der doppelten Brennweite. Seine Konstruktionsstrahlen schneiden sich in der Sensorebene (blaue Strahlen). Die roten Strahlen gehören zu einem Teil eines Objektes, das sich im Unendlichen befindet. Sie bilden einen Zerstreuungskreis auf der Sensorebene ab. Wenn das Objektiv auf die hyperfokale Entfernung  $d_h$  eingestellt ist, erfüllen die Durchmesser der Zerstreuungskreise gerade die Schärfeforderung.

## Nah- und Fernpunkt

Nachdem wir die hyperfokale Entfernung einer bestimmten Brennweite und Blende kennen, ist die Berechnung des Nah- und Fernpunktes nicht mehr schwierig. Hierzu brauchen wir noch die Einstellentfernung, die wir am Fokusring ablesen können.

$$d_N = \frac{d_f \times E}{d_f + E}$$

$$d_F = \frac{d_f \times E}{d_f - E}$$

E: eingestellte Entfernung am Fokusring (E ist nur in den positiven rationalen Zahlen definiert.)

$d_f$ : hyperfokale Entfernung

$d_F$ : Fernpunkt

$d_N$ : Nahpunkt

Der Nenner der Nahpunktberechnung kann nie negativ werden. Setzen wir  $E = d_f$ , ergibt sich  $d_N$  zu  $\frac{1}{2} d_f$ , also der halben hyperfokalen Entfernung.

Ist  $E \geq d_f$  wird der Nenner der Fernpunktberechnung null oder negativ. In diesem Fall gehen wir davon aus, dass  $d_f$  im Unendlichen liegt.

## Schärfentiefe

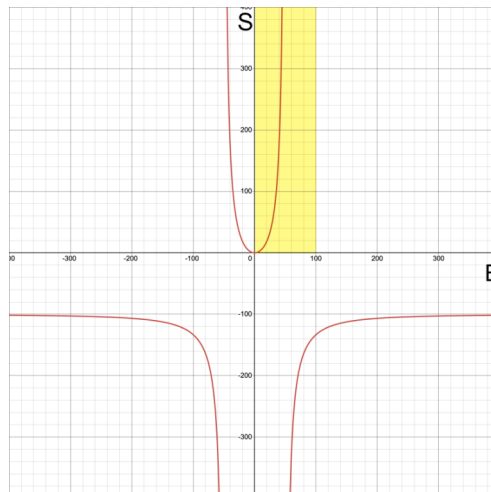
Die Schärfentiefe S ergibt sich dann zu:

$$S = d_F - d_N$$

Setzen wir die obigen Formeln ein und rechnen sie aus, erhalten wir schließlich:

$$S = \frac{2 \times d_f \times E^2}{d_f^2 - E^2}$$

Grafisch sieht das dann zum Beispiel so aus:



Das mag mathematisch interessant sein, für die Fotografie ist aber nur der gelb unterlegte Bereich wichtig. Denn mit negativen Werten von  $E$  arbeiten wir nicht. Damit fällt der gesamte linke Bereich weg.

Wird  $S$  null oder negativ, nehmen wir an, dass der Fernpunkt im Unendlichen liegt.<sup>11</sup>

Der Graph zeigt, dass die Schärfentiefe dann am größten wird, wenn sich die Einstellentfernung der hyperfokalen Entfernung annähert. Wird die Einstellentfernung größer als die hyperfokale Entfernung, behält die Schärfentiefe einen unendlichen Bereich. Das ist primär dadurch bedingt, dass der Fernpunkt im Unendlichen liegt.

Nähert sich die Einstellentfernung null, wird auch die Schärfentiefe auf null sinken.

Wer mag, kann mit diesen Formeln spielen und z.B. die Einstellentfernung bei bestimmten Schärfentiefenbereichen oder Nahpunkten oder so berechnen. Dazu können wir aber auch eine App aus dem Internet verwenden, die auf diesen oder ähnlichen Formeln beruht.

## Die Scheimpflugregel

Auf dem Bild stehen die beiden Fotoassistenten hintereinander, der hintere auf einem Glasblock. Leider ist er unscharf.

Um das Problem zu lösen, gibt es mehrere Wege: z.B. eine kleinere Blende wählen, den Abstand vergrößern oder Focusstacking verwenden. Eine weitere Lösung ist die Kippung der Schärfenebene nach Scheimpflug. Dazu sind Tilt/Shift-Objektive, Fachobjektive oder Fachkameras notwendig. Die Kamerastandarte<sup>12</sup> ist oft dreh- und schwenkbar, ebenso die Objektivstandarte<sup>13</sup>. Die zugrunde liegende Idee hat ihren Ursprung in der Kartografie und wurde von Theodor Scheimpflug in die Photographie eingeführt.



<sup>11</sup> s.a. Gilles, M., Boyard, D.: „Naturfotografie“, S. 37, Christian-Verlag München 2003

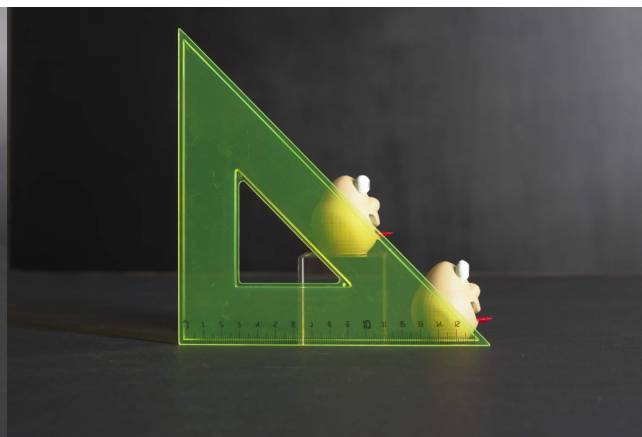
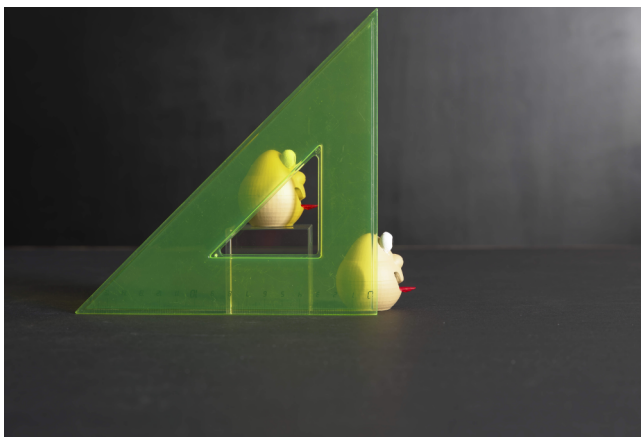
<sup>12</sup> An die Kamerastandarte wird die Kamera oder das Rückteil angeschlossen.

<sup>13</sup> Die Objektivstandarte trägt das Objektiv. Hat das System einen Zentralverschluss ist er hier integriert.

Das Bild zeigt ein Fachobjektiv. Die Kamerastandarte ist hinten im Bild und daher nicht sichtbar. An diese Standarte kann mit einer Adapterplatte eine Digitalkamera angeschlossen werden. Die Objektivstandarte, vorne im Bild, ist in beide Raumrichtungen geschwenkt. Das Objektiv hat keinen Zentralverschluss, stattdessen wird der Schlitzverschluss der Digitalkamera genutzt.



**Werfen wir einen Blick auf die Schärfenebene:**



Die gerade Schärfenebene im linken Bild verläuft parallel zur Sensorebene. Sie trifft nur einen Fotoassistenten. Im rechten Bild ist die Schärfenebene um 45° gekippt. Sie verläuft durch beide Fotoassistenten. In beiden Bildern verläuft die Schärfentiefe senkrecht zur Schärfenebene.

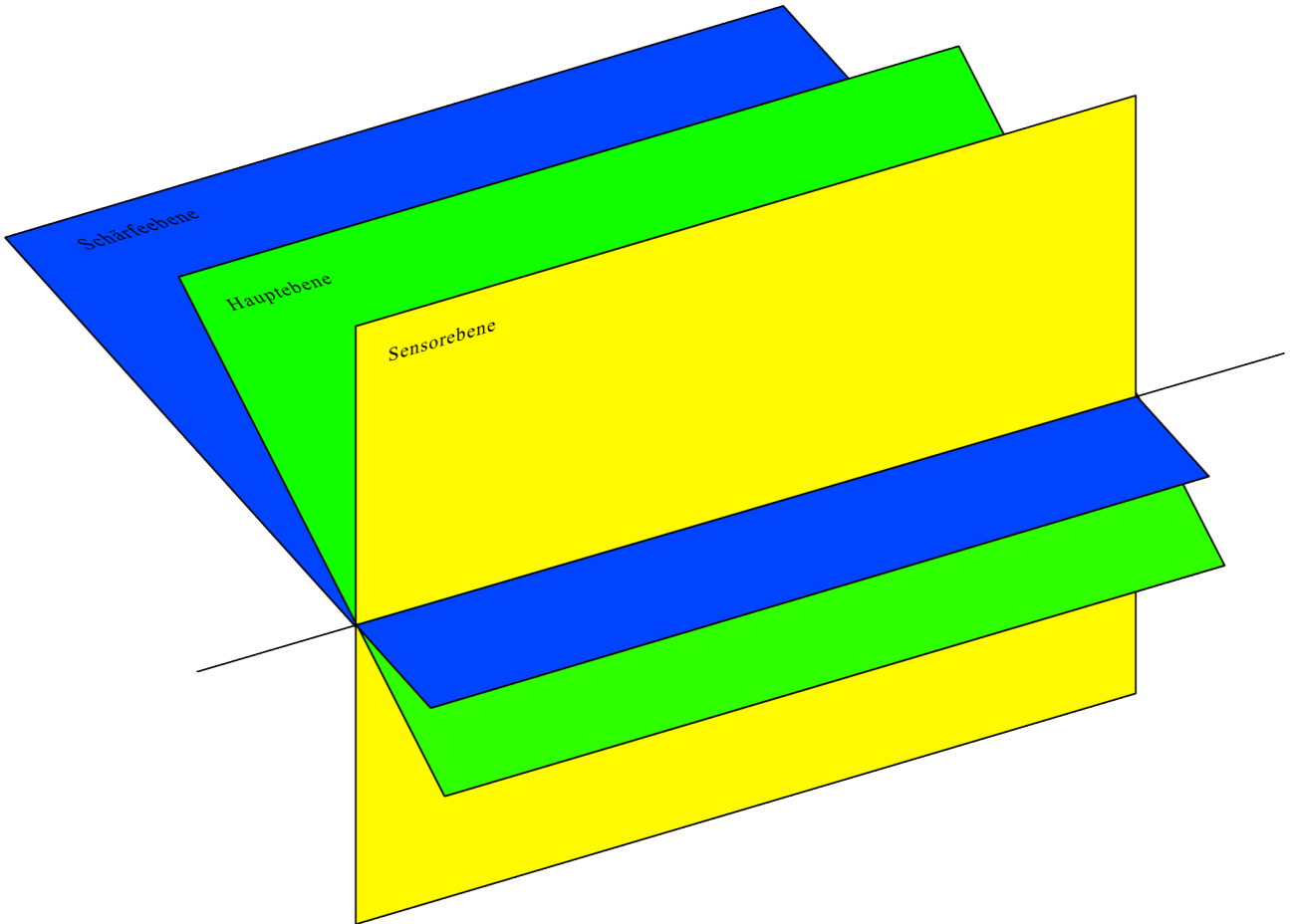
**Was macht das mit dem Schärfeverlauf?**

Beide Fotoassistenten sind scharf abgebildet. Im unteren Bereich der Figuren zieht etwas Unschärfe ein, die Tiefeninformationen sind erhalten. Die Farbtemperatur ist unverändert, da die Blitzleistung nicht verändert werden musste.



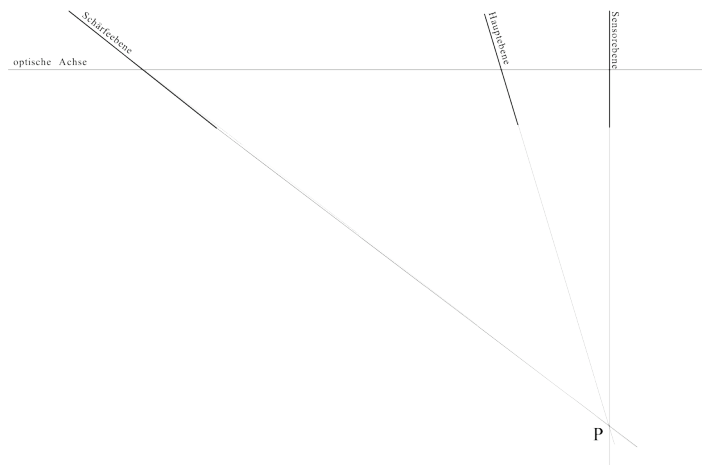
Das Objektiv arbeitet mit Offenblende f4. Ein wenig abblenden hätte dem Bild wahrscheinlich gut getan, ist wegen der Vergleichbarkeit aber nicht geschehen.

## Praktische Anwendung



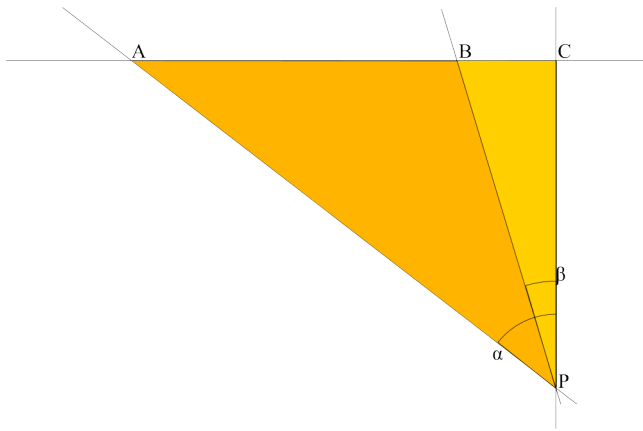
Die Scheimpflugregel besagt, dass sich die Sensor-, Haupt- und Schärfeebene in einer Geraden müssen, um ein scharfes Bild zu erzeugen.

Nehmen wir an dieser Stelle eine Vereinfachung vor: aus den drei Dimensionen unserer täglichen Welt machen wir für den Moment zwei Dimensionen. Dadurch reduzieren sich die Schärfe-, Haupt- und Sensorebene zu Geraden, die Schnittgerade zu einem Punkt P.



Ziel ist es, den Winkel zu bestimmen, um den wir die Hauptebene, also die Objektivstandarte, verschwenken müssen, um die Scheimpflugbedingung zu erfüllen.

Dazu denken wir uns zwei Dreiecke in der vereinfachten Abbildung.



Das erste Dreieck hat die Punkte A, C und P. Der Winkel  $\alpha$  ist bekannt. Es ist der Winkel, um den wir die Schärfeebene verschwenken wollen.

Das zweite Dreieck hat die Punkte B, C und P. Der Winkel  $\beta$  ist der Winkel, um den wir die Objektivstandarte verschwenken müssen, um unser Ziel zu erreichen.

Die Strecke AC ist der Abstand zwischen dem Sensor und der Schärfeebene auf der optischen Achse. Dieser Abstand ist messbar und daher bekannt. Die Strecke BC ist der Abstand zwischen Sensor und Objektiv. Er muss gemessen werden, weil durch die Fokussierung der Fachkamera die Kamerastandarte ihre Position verändert. Die Strecke CP ist unbekannt, kann aber aus der Strecke AC und dem Winkel  $\alpha$  berechnet werden.

$$\tan \alpha = \frac{AC}{CP} \Leftrightarrow CP = \frac{AC}{\tan \alpha}$$

Der Ansatz, um den Winkel  $\beta$  zu bestimmen, ist ähnlich. Die Strecken BC und CP sind bekannt, daraus kann der Winkel  $\beta$  bestimmt werden.

$$\tan \beta = \frac{BC}{CP} \Leftrightarrow \beta = \arctan \frac{BC}{CP}$$

Nach Einsetzen der ersten Gleichung in die zweite und einigen Umstellungen erhalten wir für den Winkel  $\beta$ :

$$\beta = \arctan \frac{BC \tan \alpha}{AC}$$

Es empfiehlt sich, die gesamte Berechnung in Grad durchzuführen. Dann erhalten wir das Ergebnis auch in Grad. Um die Richtung der Verschwenkung festzustellen, überlegen wir, in welche Richtung die Objektivstandarte geschwenkt werden muss, damit sich alle Ebenen in einer Geraden schneiden. Wichtig ist nur die Richtung. Den Betrag haben wir gerade berechnet.

Da die Messungen stark fehlerbehaftet und die Skalen an den Standarten nicht sehr präzise sind, müssen wir die Einstellung kontrollieren.

## Überprüfung der Scheimpflug-Fokussierung

Wir betrachten zuerst die Schärfe entlang der optischen Achse<sup>14</sup>. Wenn dieser Bereich unscharf erscheint, korrigieren wir das mit der Fokuseinstellung.

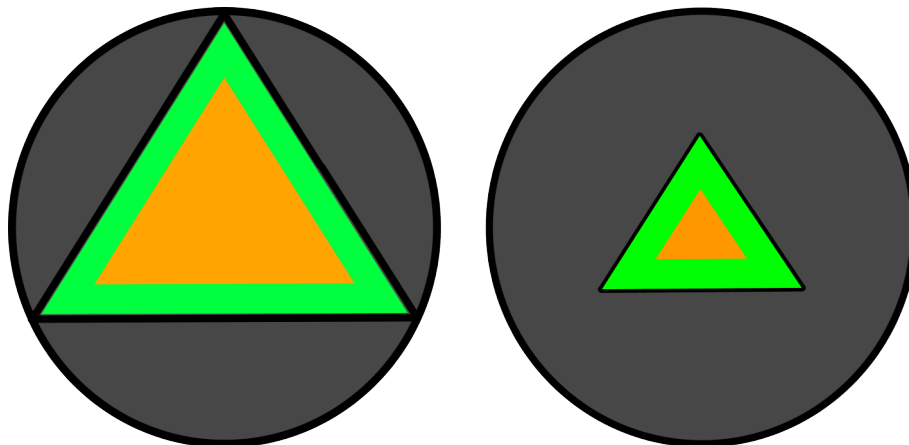
Dann betrachten wir die entfernteren Bereiche der gekippten Schärfenebene. Wenn sie unscharf erscheinen, verändern wir vorsichtig die Verschwenkung der Objektivstandarte.

Beide Vorgänge müssen wir wahrscheinlich mehrfach wiederholen.

Wenn die gewünschte Schärfenebene durchgängig scharf ist, können wir das Bild schießen.

## Beugungsunschärfe

Trifft Licht auf eine Kante, ändert es seine Richtung, es wird gebeugt. Gebeugte Lichtstrahlen erzeugen beim Auftreffen auf einen Sensor oder Schirm keinen Lichtpunkt sondern ein **Beugungsscheibchen**, ähnlich wie der Zerstreungskreis der Unschärfe. Lichtstrahlen, die in einem hinreichenden Abstand von der Kante



verlaufen, werden nicht gebeugt.

In diesem sehr einfachen Modell einer Objektiveblende sollen die Lichtstrahlen, die im grünen Bereich verlaufen, gebeugt werden. Im orangenen Bereich verlaufen die Lichtstrahlen ungebeugt.

Je kleiner nun die Blendenöffnung wird, desto höher ist der Anteil der gebeugt verlaufenden Lichtstrahlen - und desto höher ist die Auswirkung. Und die sieht wie folgt aus:

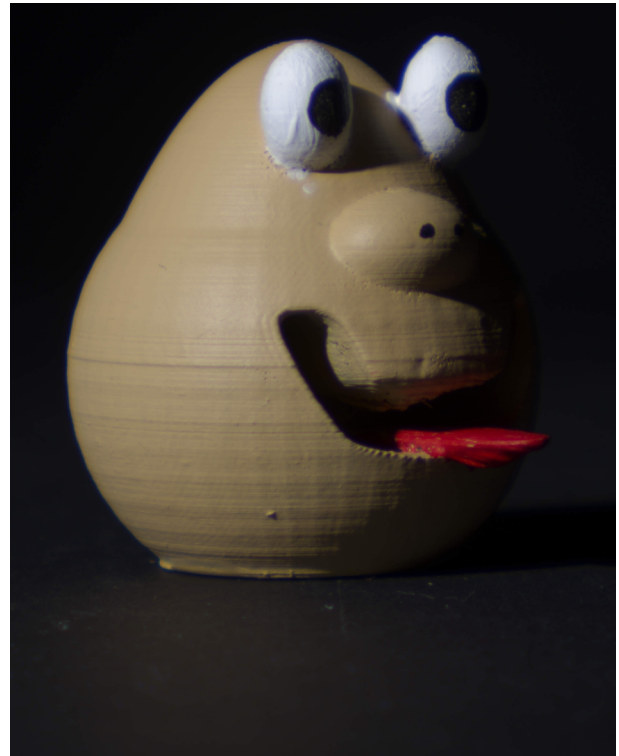
---

<sup>14</sup> Wenn wir eine Fachkamera mit Mattscheibe verwenden, empfiehlt sich eine Lupe zu verwenden. Bei einem digitalen Rückteil oder einer angesetzten Kamera sollte die Monitorvergrößerung ausreichend sein.



Das Bild erscheint weicher, weil die Beugungsunschärfe bei Blende 45 sichtbar im Bild ist<sup>15</sup>.

Das andere Ende der Skala produziert in der verwendeten Linsencombination zu viele Aberrationen, deshalb für das folgende Bild Blende 9 gewählt:



Mit der größeren Blendenöffnung wirkt das Bild deutlich schärfer. Um die Beugungsunschärfe reduzieren, wählen wir also eine kleinere Blende. Aber - gibt es eine beste Blende?

## Förderliche Blende

Nach der Scharfstellung ist der Zerstreuungskreis auf dem Sensor minimal. Wenn wir die Blende immer weiter schließen, werden die Beugungsscheibchen immer größer. Wenn die Beugungsscheibchen größer sind als die Zerstreuungskreise fällt die Beugungsunschärfe störend auf. Unser „sweet spot“ ist genau dann erreicht, wenn die Zerstreuungskreise und die Beugungsscheibchen die gleiche Größe haben. Diese Blendeneinstellung wird als **förderliche Blende**<sup>16</sup> bezeichnet.

---

<sup>15</sup> Unschärfe, die auf Beugung beruht, kann nicht durch Nachführen des Fokus ausgeglichen werden. Der größte Durchmesser (Zerstreuungskreis oder Beugungsscheibchen) bestimmt die Unschärfe im Bild.

<sup>16</sup> Manchmal findet man auch den Begriff **optimale Blende**.

## Berechnung des Beugungsscheibchens

Die Herleitung der Berechnung für den Durchmesser des Beugungsscheibchens führt zu weit. Unterschiedliche Wellenlängen werden unterschiedlich stark gebeugt. Da wir in der Fotografie meistens nicht mit monochromatischem Licht arbeiten, sollten wir mindestens mit der größten (rot) und der kleinsten (blau) verwendeten Wellenlänge rechnen. Da die Praxisrelevanz der Berechnung nur gering ist, ist das der Mühe nicht wert. Die vorgestellte Berechnung dient dem Verständnis der Zusammenhänge. Quelle der Rechnungen ist die Wikipedia<sup>17</sup>, in der wir auch weitergehende Berechnungen und Herleitungen finden.

## Rayleigh-Kriterium

Das Rayleigh-Kriterium beschreibt den Mindestabstand, den zwei Lichtquellen voneinander haben müssen, um sie als getrennt wahrnehmen zu können, wenn das Auflösungsvermögen durch Beugung begrenzt wird.

$$\sin(\alpha) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

## Näherungsberechnung der Größe des Beugungsscheibchens

Der Durchmesser des Beugungsscheibchens ergibt sich näherungsweise zu:

$$d = \frac{f}{D}$$

oder

$$d = 1,34 \cdot \frac{f}{D} \text{ (mit Rayleigh-Kriterium)}$$

$f/D$  entspricht der Blendenzahl. Werden beide Werte in mm eingesetzt, ergibt sich  $d$  in  $\mu\text{m}$ . Bei Blende 9 liegt der Durchmesser des Beugungsscheibchens zwischen  $9 \mu\text{m}$  und  $12,06 \mu\text{m}$ , bei Blende 12 zwischen  $12 \mu\text{m}$  und  $16,08 \mu\text{m}$ .

Erinnern wir uns an Seite 5. Dort haben wir den Durchmesser des Zerstreungskreises auf  $12 \mu\text{m}$  berechnet. Nach dieser Rechnung sollten wir für eine maximale Schärfe nicht über Blende 9, maximal 12 hinaus abblenden<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Stichworte: Beugungsscheibchen, Beugungsunschärfe und Rayleigh-Kriterium

<sup>18</sup> Nach meinen persönlichen Erfahrungen bleiben die Bilder auch bei Blende 16 akzeptabel scharf, nur mit größerer Schärfentiefe.