

Optik-Grundlagen

© 2003 The Imaging Source Europe GmbH

Alle Rechte vorbehalten

<http://www.1394imaging.com/>

Version: Dezember 2003

Optik - kein Problem – ist ja einfaches Schulwissen. Aber Hand aufs Herz – gelingt Ihnen die Berechnung der Brennweite eines Objektivs für diese oder jene optische Messaufgabe? Wenn Ja sind Sie eine grosse Ausnahme und sollten nicht weiter lesen. Allen anderen bietet sich hier die zweite Chance.

Also nochmal von vorne

"Glasscherbe verursacht Waldbrand" – diese oder ähnliche Meldungen sind im Sommer nicht ungewöhnlich. Wie konnte das passieren? Aufgrund der grossen Entfernung erscheint die Sonne nur als ein kleiner Punkt, der parallele Lichtstrahlen aussendet (Abb. 1a). Gehen diese parallelen Lichtstrahlen durch eine Linse (oder irgend ein linsenähnliches Glasstück), treffen sie sich hinter der Linse im Brennpunkt (im Zusammenhang mit Waldbränden ist der Name hier Programm).

Was aber passiert, wenn der Lichtpunkt so nahe an der Linse ist, dass man nicht mehr von parallelen Lichtstrahlen ausgehen kann? Sie treffen sich hinter dem Brennpunkt (Abb. 1b). Würde man sich die Abbildung des Punktes auf Höhe des Brennpunktes ansehen, sähe man einen matten, unscharfen Fleck.

Und damit sind wir bei der Frage des "Scharfstellens". Dazu vergrössert man den Abstand zwischen Abbildungsebene und Linse solange, bis die Abbildungsebene und der Treffpunkt der Lichtstrahlen übereinander liegen (Abb. 1c).

Für einzelne Lichtpunkte stellt sich das alles also recht einfach dar. Was geht aber bei der Abbildung irgendwelcher Schrauben, Platinen oder Stahlplatten vor sich?

Vom Lichtpunkt zum Bild

Bisher haben wir den Lichtpunkt mit einer aktiven Lichtquelle, wie z.B. der Sonne gleichgesetzt. Tatsächlich kann ein Lichtpunkt aber auch die Folge einer Reflexion sein. Wir können uns die Oberfläche eines reflektierenden Objektes als ein Ensemble aus unendlich vielen Lichtpunkten vorstellen. Betrachten wir auf diese Weise den Anfangspunkt und den Endpunkt des Pfeils in Abb. 1d und verfolgen wir die Strahlen dieser beiden Punkte, bilden diese hinter der Linse den Anfangspunkt und den Endpunkt des abgebildeten Pfeils (allerdings auf dem Kopf stehend). Sämtliche übrigen (unendlich vielen) Lichtpunkte an der Oberfläche des Pfeils werden auf dieselbe Weise behandelt und so entsteht ein komplettes Abbild des Pfeils auf der Abbildungsebene.

Von der Linse zum Objektiv

Kokeln gehört sicher zu den weniger erwünschten Anwendungen von Linsen. In der optischen Messtechnik ist das Ziel die Abbildung eines Gegenstandes auf einen Bildsensor (wie z.B. ein CCD-Chip). Das so entstandene Bild (Abb. 1d) ist die Basis für verschiedenste Messungen – wie z.B. der Grösse, Lage oder Oberflächenbeschaffenheit.

Man verwendet hierzu allerdings nicht mehr einzelne Linsen, sondern fasst solche zu Objektiven zusammen. Objektive sind hinsichtlich ihrer Abbildungsqualität wesentlich besser, als einzelne Linsen. In unserem Arbeitsalltag können wir es uns aber glücklicherweise einfach machen und ein Objektiv als ideale Linse betrachten.

Aber welches Objektiv ist nun das richtige? Dessen grundlegendste Eigenschaft ist das Verhältnis der Grösse des Bildes zur Grösse des Gegenstands:

$$\text{Abbildungsmaassstab} = \frac{\text{Bildgrösse}}{\text{Gegenstandsgrösse}}$$

Bilden wir also z.B. eine Schraube mit einer Länge von 5 cm auf 5 mm ab, ist der Abbildungsmaassstab 0,1. Ist das Objekt mit z.B. 0,5 mm sehr klein und soll auf 5mm vergrössert abgebildet werden, ist der Abbildungsmaassstab 10.

Nun ist der Abbildungsmaassstab zusätzlich abhängig vom Arbeitsabstand (Abb. 1d). Je weiter der Gegenstand entfernt ist, desto kleiner ist sein Abbild. Die Angabe des Abbildungsmaassstabs macht also nur dann Sinn, wenn wir gleichzeitig den Arbeitsabstand wissen. Das ist Ihnen zu umständlich? Klar – also brauchen wir einen Parameter, der Objektive direkter beschreibt. Die Lösung kennen wir aus dem Alltag. Es ist die

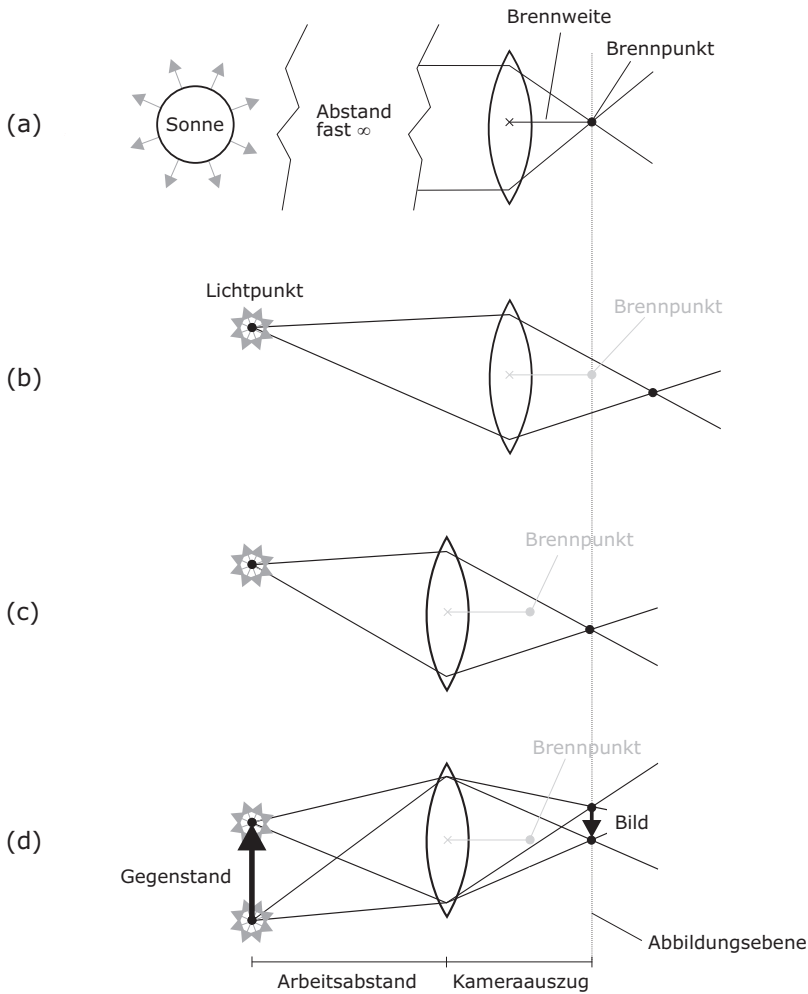


Abb. 1: Vom Lichtpunkt zum Bild

$$Brennweite = \frac{Arbeitsabstand * Bildgrösse}{Gegstandsgrösse + Bildgrösse}$$

Urlaub und optische Messtechnik haben etwas gemeinsam?

Ehrlich gesagt wenig. Aber das Schiessen von Urlaubsfotos und die optische Vermessung einer Stahlbramme beruhen auf den selben optischen Gesetzen. Nehmen wir an, der Bildsensor hat die Abmessungen eines Kleinbildfilms mit 24 mm Höhe und 36 mm Breite. Hierauf wollen wir unseren Strand auf eine Breite von 1000 m in einem Abstand von 500 m bannen. Die Brennweite ist dann

$$Brennweite = \frac{500.000mm * 36mm}{1.000.000mm + 36mm} = 18mm$$

Tauschen wir den Kleinbildfilm gegen ein typisches CCD-Chip mit einer Abmessung von 4,8 * 6,4 mm bekommen wir eine deutlich niedrigere Brennweite:

$$Brennweite = \frac{500.000mm * 6,4mm}{1.000.000mm + 6,4mm} = 3,2mm$$

Kein Strand ohne Bay Watch-Typ. Soll sein Bild bei einer Entfernung von 500 m und einer Grösse von 2m einen Kleinbildfilm füllen bekommen wir

$$\text{Brennweite} = \frac{500.000\text{mm} * 24\text{mm}}{2.000\text{mm} + 24\text{mm}} = 5.929\text{mm}$$

Eine solche Brennweite gehört nicht gerade zu einer Foto-Grundausrüstung. Wir müssen wohl oder übel näher an den Typen ran. Bei einem Abstand von 10 m bekommen wir ihn mit einer mehr oder weniger normalen Brennweite von knapp 120 mm formatfüllend auf den Kleinbilddfilm.

Für Freunde kleinerer Lebewesen führt oftmals weniger ein zu grosser Abstand als vielmehr ein zu kleiner Abstand zu Kopfzerbrechen. Nähern wir uns einem Insekt mit einer Höhe von 10 mm auf 30 cm bekommen wir es mit einer Brennweite von

$$\text{Brennweite} = \frac{300\text{mm} * 24\text{mm}}{10\text{mm} + 24\text{mm}} = 212\text{mm}$$

auf einen Kleinbilddfilm. Aber haben Sie schon einmal versucht, ein "normales" 200er Objektiv bei einem Abstand von 30 cm scharf zu stellen?. Vergessen Sie's.

Die Mystik der Zwischenringe

Manchen technischen Dingen wird wesentlich zuviel zugetraut. Dazu gehören insbesondere auch Zwischenringe. Sie werden zwischen Objektiv und Kamera geschraubt, um den Kameraauszug, also den Abstand zwischen Abbildungsebene und Linse zu erhöhen (Abb. 1d). Wozu ist das gut? Je näher ein Lichtpunkt der Linse ist, desto weiter hinter dem Brennpunkt treffen sich die Strahlen und um so grösser muss der Kameraauszug sein, um eine scharfe Abbildung des Lichtpunkts zu erhalten (Abb. 1b und 1d). Real existierende Objektive realisieren den Kameraauszug durch einen sog. Schneckenzug, der Ihnen das Verschieben der Linsen im Objektivgehäuse und damit das Scharfstellen erlaubt. Dieses Verschieben der Linsen hat natürlich mechanische Grenzen. Eine dieser Grenzen bestimmt den maximal möglichen Kameraauszug und damit auch den kleinst möglichen Arbeitsabstand (auch MOD = Objektdistanz). Möchte man dem Objekt der Begierde näher kommen erhöht man den Kameraauszug einfach durch Zwischenringe.

Diesen eigentlich simplen Effekt umranken seltsamerweise verschiedenste Mysterien wie z.B. eine angebliche Erhöhung oder, je nach Glaubensrichtung auch Verkleinerung der Schärfentiefe. Es ist alles Unfug! Stürzen wir uns lieber auf einige in der Praxis relevante Detail-Teufel wie z.B. der Frage

Warum C-Mount Objektive?

In grauer Vorzeit wurden Filme mit Röhrenkameras aufgenommen. Die **Aussendurchmesser** dieser Röhren waren 1/2", 2/3" und 1", die lichtempfindlichen Rechtecke auf der Stirnseite dieser Röhren entsprechend kleiner. Abb. 2 zeigt deren Abmessungen. Sie sind auch die Basis für die heute dominierenden CCD-Bildsensoren.

Den Objektiv-Anschluss der Röhrenkameras nannte man C-Mount (C wie Cinema). Es handelt sich dabei um ein 1" Grobgewinde und bietet daher eine einfache, kompakte und robuste Basis für Wechselobjektive. Die CS-Mount Variante unterscheidet sich hiervon nur im Auflagemass (Abb. 3).

Die unterschiedlichen Abmessungen der Bildröhren bzw. CCDs spiegeln sich in den verschiedenen Formaten der Objektive wider. Leider - denn das führt zu dem Glauben, z.B. ein 1/3" CCD bedürfe auch eines 1/3" Objektivs.

Alles dreht sich um den Bildkreis

Weisse Wände sind zwar etwas langweilig, eignen sich aber hin und wieder für kleine Gedankenexperimente. Stellen Sie sich vor, Sie richten ein Objektiv auf eine solche Wand. Was wird das Bild sein? Ein runder heller Fleck, der ebenso langweilig wie die Wand ist (Fachleute nennen ihn Bildkreis). Im Fall eines 1/3" Objektivs z.B. ist dessen Bildkreis etwas grösser als die Diagonale eines 1/3" CCDs. Unser heller Fleck deckt also den CCD vollständig ab. Ein 1/2" CCD läge allerdings an seinen Ecken im Dunkeln. Fazit: Das Format des Objektivs muss **grösser oder gleich** dem des CCDs sein.

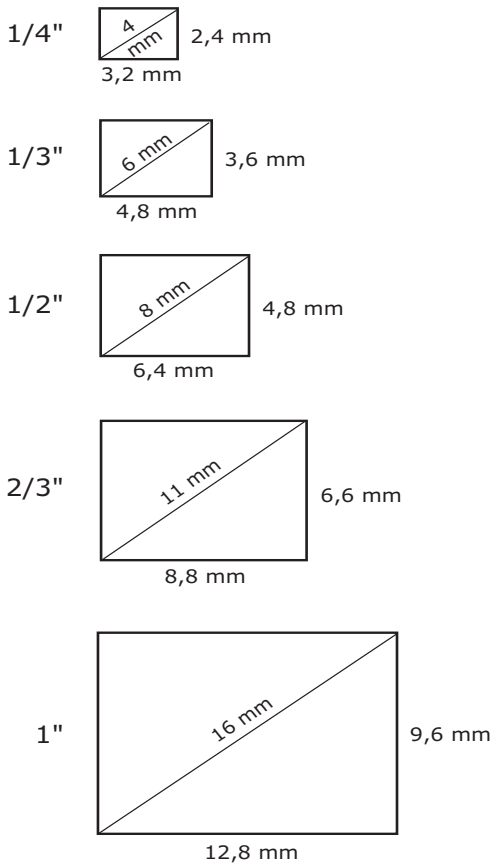


Abb. 2: CCD-Formate

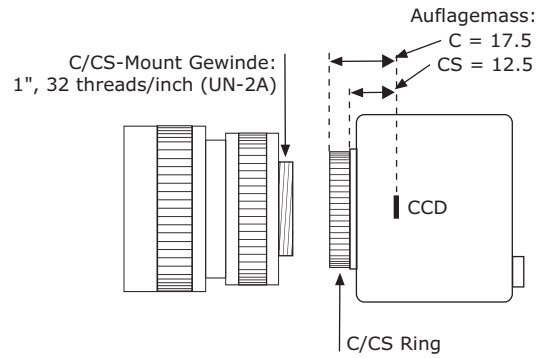


Abb. 3: Der C-Mount Anschluss.

Nun sind auch leider Objektive nicht perfekt. Ihre Fehler zeigen sie hauptsächlich an ihren Rändern. Daher ist es empfehlenswert, das Objektiv-Format so gross wie möglich zu wählen. Die zweite mögliche Massnahme ist genauso simpel. Wenn man das Licht gar nicht erst durch die äusseren Bereiche der Linsen hindurchlässt, entstehen dort auch keine Fehler. Unser Werkzeug dazu ist die Blende.

Ein tiefscharfer Blick

Blenden bewirken nicht nur eine Verringerung der Objektivfehler, sondern beeinflussen auch die Schärfe. Aber was ist eigentlich "scharf"? In Abb. 4a erzeugen zwei Lichtpunkte A und B zwei Bilder A' und B'. Der Kamerazug (Abb. 1d) ist so eingestellt, dass Bild A' exakt auf das CCD fällt. Das ist scharf!

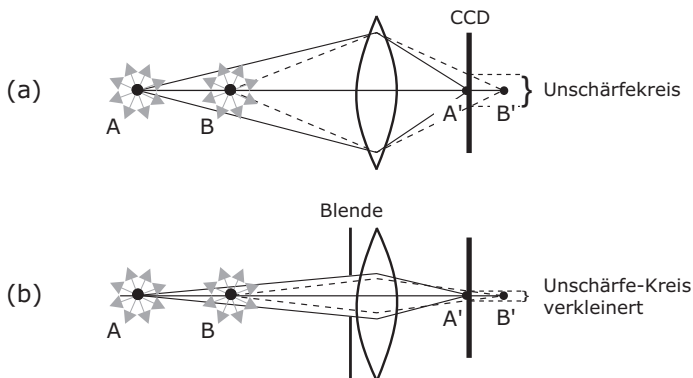


Abb. 4: Was ist scharf?

Punkt B ist näher an der Linse, also liegt Bild B' hinter A'. Das Bild von B auf dem Sensor ist damit ein unscharfer Fleck. Die Fachleute sprechen vom Unschärfe-Kreis.

Messerscharf geschlossen hiesse das aber, dass es nicht möglich ist, ein dreidimensionales Objekt scharf abzubilden. Lediglich eine Ebene des Objektes wäre demnach scharf, während diejenigen davor und dahinter unscharf wären. Aber warum verhält es sich in der Praxis nicht so? Weil unsere Augen einen kleinen Unschärfe-Kreis nicht als unscharf wahrnehmen. Dies ist der Effekt der Tiefenschärfe. Im Fall eines Kleinbildfilms z.B. bedeutet "kleiner Unschärfe-Kreis", dass selbiger nicht grösser als 1/30 mm sein sollte. Im Fall eines CCD können wir die Abmessungen eines Pixels als

Unschärfekreis definieren. Über den Daumen messen die Pixel eines modernen CCDs $5 * 5 \mu\text{m}$.

In der Praxis ist es nur selten notwendig die Schärfentiefe exakt zu berechnen. Allerdings ist - wie die Zwischenringe - auch das Thema Schärfentiefe eher mit Glauben, als mit Wissen belegt. Es lohnt sich also die "Schärfentiefe-Formel" näher anzusehen, um herauszufinden, was wie zusammenhängt:

$$\text{Schärfentiefe} = \frac{\text{Arbeitsabstand}}{1 \pm \text{Unschärfekreis} * \text{Blende} * \frac{\text{Arbeitsabstand} - \text{Brennweite}}{\text{Brennweite}^2}}$$

Nehmen wir einmal an, wir möchten während des Produktionsprozesses mit der MegaPixel-Kamera DFK 31F03 Schraubenmuttern beobachten. Die Muttern haben einen Durchmesser von 10 mm und der Arbeitsabstand beträgt 100 mm. Da die DFK 31F03 mit einem 1/3" CCD ausgerüstet ist (s. Abb. 3), benötigen wir eine Brennweite von

$$\text{Brennweite} = \frac{100\text{mm} * 3,6\text{mm}}{10\text{mm} + 3,6\text{mm}} = 26,5\text{mm}$$

um die Mutter vollständig abzubilden. Wir können also problemlos ein im Handel erhältliches 25mm-Objektiv einsetzen. Nehmen wir nun einen Unschärfekreis von $5 \mu\text{m}$ an, sehen wir im folgenden Bereich scharf:

$$\text{Vordere Schärfentiefe} = \frac{100\text{mm}}{1 + 0,005\text{mm} * 1,4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 99,92\text{mm}$$

$$\text{Hintere Schärfentiefe} = \frac{100\text{mm}}{1 - 0,005\text{mm} * 1,4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 100,08\text{mm}$$

Brauchen wir es schärfer, hilft nur das Schliessen der Blende. Probieren wir es einmal mit einer Blende von 4:

$$\text{Vordere Schärfentiefe} = \frac{100\text{mm}}{1 + 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 99,76\text{mm}$$

$$\text{Hintere Schärfentiefe} = \frac{100\text{mm}}{1 - 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 100,24\text{mm}$$

Obwohl die Blendenzahl um den Faktor 3 vergrößert wurde, ist der Erfolg nicht gerade überwältigend. Der Grund ist der starke Einfluss der Brennweite. Könnten wir ein 12er-Objektiv benutzen (die Brennweite also halbieren) sähe die Sache besser aus:

$$\text{Vordere Schärfentiefe} = \frac{100\text{mm}}{1 + 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 12\text{mm}}{12\text{mm}^2}} = 98,79\text{mm}$$

$$\text{Hintere Schärfentiefe} = \frac{100\text{mm}}{1 - 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 12\text{mm}}{12\text{mm}^2}} = 101,23\text{mm}$$

Allerdings würde das Abbild der Mutter den CCD-Chip nur halb füllen. Ist das nicht akzeptabel, bleibt tatsächlich nur das weitere Verkleinern der Blende. Zum Ausgleich müssen wir dann mehr Licht spendieren und/oder die Belichtungszeit der Kamera verlängern.

Zusammenfassend beruht die Schärfentiefe also auf 3 Parametern:

Unschärfekreis: Je kleiner der erlaubte Unschärfekreis ist, desto kleiner ist die Schärfentiefe.

Blende: Je kleiner die Blendenzahl (also je "offener" die Blende) ist, desto kleiner ist die Schärfentiefe.

Brennweite: Je grösser (!) die Brennweite ist, desto kleiner ist die Schärfentiefe. Der Zusammenhang ist quadratisch. Also bedeutet schon eine kleine Erhöhung der Brennweite eine deutliche Abnahme der Schärfentiefe.

Wie schon gesagt – es gibt verschiedenste Glaubenssätze zum Thema Schärfentiefe. Besonders beliebt ist die Annahme, Spezialformen von Objektiven (wie z.B. die sog. Telezentrischen Objektive) hätten eine "bessere Schärfentiefe". Tatsächlich hängt die Schärfentiefe aber in jedem Fall nur von den drei Parametern Unschärfekreis, Blende und Brennweite ab.

Es gäbe noch viel zu erzählen

Z.B. über Bildwinkel, Nahlinsen, Makroobjektive, telezentrische Objektive und vor allen Dingen über die erstaunliche Tatsache, dass leicht unscharfe Bilder zu exakteren Messergebnissen führen! Wir werden daher diesen Text von Zeit zu Zeit erweitern und Sie via Email darüber informieren.