

Im Brennpunkt

Grundlagen über Brennweite, Bildebene und andere Eigenschaften



Optik? Kein Problem. Das ist ja einfaches Schulwissen. Aber Hand aufs Herz. Gelingt Ihnen die Berechnung der Brennweite eines Objektivs für diese oder jene optische Messaufgabe? Wenn ja, dann sind Sie eine große Ausnahme und sollten nicht weiter lesen. Allen anderen bietet sich hier eine zweite Chance.

Johannes Vogel*

■ Also noch einmal von vorne: „Glasscherbe verursachte Waldbrand“ – diese oder ähnliche Meldungen sind im Sommer nicht ungewöhnlich. Wie konnte das passieren? Von Nahem betrachtet verlassen die Lichtstrahlen kreuz und quer die Sonne. Aus großer Distanz betrachtet ist die Sonne nur ein kleiner Punkt, der parallele Lichtstrahlen aussendet (Bild 3 a). Gehen diese parallelen Lichtstrahlen durch eine Linse (oder durch irgend ein linsenähnliches Glasstück), dann 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

*Johannes Vogel ist Systemberater bei der DBS GmbH, Berlin.

Bild: Linos Photonics

(Bild 3 b). Schaut man sich die Abbildung des Punktes auf der Höhe des Brennpunktes an (liegt also die Abbildungsebene im Brennpunkt), sieht 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 (Bild 3 c). Für einzelne Lichtpunkte stellt sich das alles recht einfach dar. Was geht aber bei der Abbildung irgendwelcher Schrauben, Platinen oder Stahlplatten vor sich?

Ein Lichtstrahl muss nicht notwendigerweise direkt (aktiv) einer Sonne, Kerze oder Lampe entspringen. Die meisten uns umgebenden Objekte reflektieren Licht auf die eine oder andere Weise. Also können wir uns die Oberflächen dieser Objekte als ein Ensemble aus unend-

lich vielen Lichtpunkten vorstellen. Verfolgen wir auf diese Weise z.B. den End- und Anfangspunkt des Pfeils in Bild 3 d, bilden die ebenfalls wieder End- und Anfangspunkt des abgebildeten Pfeils (allerdings auf dem Kopf stehend). Sämtliche übrigen möglichen Lichtpunkte an der Oberfläche des Pfeils werden auf dieselbe Weise behandelt und so entsteht ein komplettes Abbild des Pfeils auf der Abbildungsebene.

Auf dem Weg vom Lichtpunkt zum perfekten Bild

In der optischen Messtechnik ist das Ziel die Abbildung eines Gegenstandes auf einen Bildsensor (etwa einem CCD-Chip). Das so entstandene Bild (Bild 3 d) ist die Basis für verschiedene Messungen – etwa der Größe, Lage oder Oberflächenbeschaffenheit.

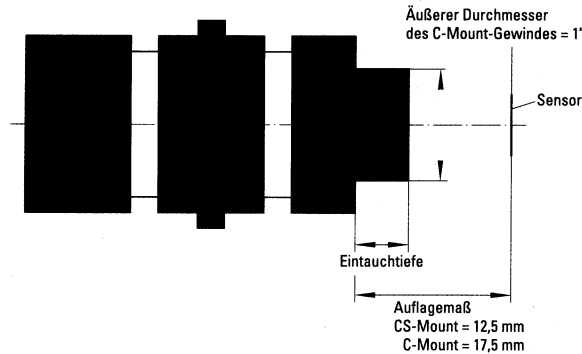
Man verwendet hier allerdings nicht mehr einzelne Linsen, sondern fasst solche zu Objektiven zusammen. Real existierende Objektiv sind hinsichtlich ihrer Abbildungsqualität wesentlich besser als real existierende Linsen. In unserem Arbeitsalltag können wir es uns glücklicherweise einfach machen und ein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

Aber welches Objektiv ist nun das richtige? Dessen grundlegende Eigenschaft ist das Verhältnis von Größe eines Bildes zur Größe des

Gegenstandes (dazu Formel 1 im Kasten).

Bilden wir also beispielsweise eine Schraube mit einer Länge von 5 cm auf 5 mm ab, dann ist der Abbildungsmaßstab 0,1. Ist das Objekt mit 0,5 mm sehr klein und soll auf 5 mm vergrößert werden, ist der Abbildungsmaßstab 10.

Nun ist der Abbildungsmaßstab zusätzlich abhängig vom Arbeitsabstand (Bild 3 d). Je weiter der Gegenstand entfernt ist, desto kleiner ist sein Abbild. Die Angabe des Abbildungsmaßstabs hat also nur Sinn, wenn wir gleichzeitig den Arbeitsabstand wissen. Das ist Ihnen zu umständlich? Klar – also brauchen wir einen Parameter, der Objektiv direkter beschreibt. Die praktikable Lösung beschreibt als Brennweite die Formel 2 (siehe Kasten).



Urlaub und optische Messtechnik haben zwar nichts gemeinsam, doch 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 Klein-

bildfilms mit 24 mm Höhe und 36 mm Breite. Hierauf wollen wir (zum besseren Verständnis) einen Strand auf einer Breite von 1000 m in einem Abstand von 500 m bannen. Die Brennweite ist dann gemäß der Formel 3. Tauschen wir nun den Kleinbildfilm gegen einen

■ **Bild 1:**
Den Objektiv-Anschluss früherer Röhrenkameras nannte man C-Mount (C wie Cinema). Es handelt sich dabei um ein 1"-Grobgewinde und bietet daher eine robuste Basis für Wechselobjektive.

typischen CCD-Chip mit einer Abmessung von 4,8 mm × 6,4 mm, dann bekommen wir eine deutlich niedrigere Brennweite, nämlich entsprechend der Formel 4. Und fast jeder Strand hat einen Bay Watcher, dessen Bild wir bei einer Entfernung von 500 m und einer Objektgröße von 2 m formatfüllend auf einen Kleinbildfilm bannen wollen. Die nötige Brennweite berechnet man nach Formel 5. Solche Objektive gehören nicht zu einer Fotoausrüs-

$$\text{Abbildungsmaßstab} = \frac{\text{Bildgröße}}{\text{Gegenstandsgröße}} \quad (1)$$

$$\text{Brennweite} = \frac{\text{Arbeitsabstand} \times \text{Bildgröße}}{\text{Gegenstandsgröße} + \text{Bildgröße}} \quad (2)$$

$$\text{Brennweite} = \frac{500000 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}}{1000000 \text{ mm} + 36 \text{ mm}} = 18 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\text{Brennweite} = \frac{500000 \text{ mm} \times 6,4 \text{ mm}}{1000000 \text{ mm} + 6,4 \text{ mm}} = 3,2 \text{ mm} \quad (4)$$

$$\text{Brennweite} = \frac{500000 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}}{2000 \text{ mm} + 24 \text{ mm}} = 5929 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\text{Brennweite} = \frac{300 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}}{10 \text{ mm} + 24 \text{ mm}} = 212 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\text{Tiefenschärfe} = \frac{\text{Arbeitsabstand}}{1 \pm \text{Unschärfekreis} \times \text{Blende} \times \frac{\text{Arbeitsabstand} - \text{Brennweite}}{\text{Brennweite}^2}} \quad (7)$$

$$\text{Unschärfekreis} \times \text{Blende} \times \frac{\text{Arbeitsabstand} - \text{Brennweite}}{\text{Brennweite}^2} \quad (8)$$

sen im Objektivgehäuse und damit das Scharfstellen erlaubt. Der maximal mögliche Kameraauszug bestimmt also den kleinst möglichen Arbeitsabstand (auch MOD = Objektdistanz). Möchte man dem Objekt der Begierde näher kommen, erhöht man den Kameraauszug einfach durch Zwischenringe.

Der Begriff C-Mount steht für Cinema

Widmen wir uns dem nächsten in der Praxis relevanten Detail-Teufel. Es geht um 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 solcher Röhren entsprechend kleiner. Bild 4 verdeutlicht deren Abmessungen. Sie sind auch die Basis für die heute dominierenden CCD-Bildsensoren. Diese tendieren allerdings zu immer kleineren Formaten wie 1/3" und 1/4".

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 (Bild 1).

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

Jetzt dreht sich alles um den Bildkreis

Weißer Wände eignen sich gut für Gedankenexperimente. Stellen Sie sich vor, Sie richten ein Objektiv auf eine solche Wand. Was wird das Bild sein? Ein ebenso langweiliger runder heller Fleck. Man kann

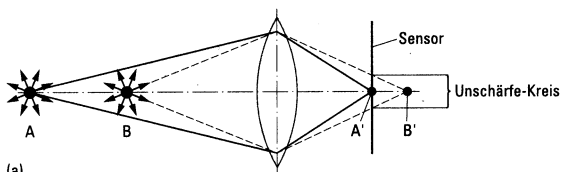
tion. Ergo – man muss näher ran. Bei einem Abstand von 10 m bekommen wir das Motiv mit einer Brennweite von knapp 120 mm formatfüllend auf den Kleinbildfilm.

Bei Freunden kleinerer Lebewesen führt oft nicht der große Abstand als vielmehr ein zu kleiner Abstand zu Kopfzerbrechen. Nähern wir uns einem Insekt mit einer Höhe von 10 mm auf 30 cm,

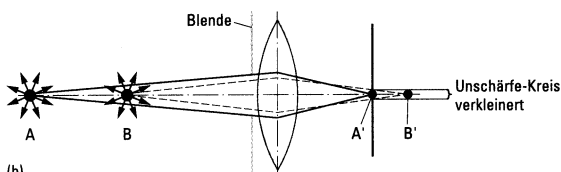
bekommen wir es mit einer Brennweite wie sie Formel 6 bestimmt auf einen Kleinbildfilm. Aber haben Sie schon einmal versucht ein normales 200er Objektiv bei einem Objektabstand von 30 cm scharf zu stellen? Vergessen Sie es. Das führt uns dann zum nächsten Problem.

Manchen technischen Dingen wird wesentlich zu viel zugetraut. Dazu gehören

insbesondere auch Zwischenringe. Sie werden zwischen Objektiv und Kamera geschraubt, um den Kameraauszug, also den Abstand zwischen Abbildungsebene und der Linse zu erhöhen (Bild 3 d). 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 zum Fokussieren der Kameraauszug sein (Bild 3 b und 3 d). Erhältliche Objektive realisieren den Kameraauszug durch einen sogenannten Schneckenzug, der das Verschieben der Lin-



(a)



(b)

■ Bild 2:
Nur ein Punkt wird wirklich scharf abgebildet. Alle davor und dahinter liegende sind mehr oder weniger unscharf. Erstaunlich die Tatsache, dass leicht unscharfe Bilder zu exakteren Messergebnissen führen!

nun Objektiv so bauen, dass bei gleicher Brennweite dieser Fleck (Fachleute nennen ihn Bildkreis) größer oder kleiner ist. Im Fall eines 1/3"-Objektivs ist dessen Bildkreis etwas größer als die Diagonale eines 1/3"-Sensors. Unser heller Fleck deckt also den Sensor vollständig ab. Ein 1/2"-Sensor läge allerdings an seinen Ecken im Dunkeln. Fazit: Das Format des Objektivs muss größer oder gleich dem des Sensors sein.

Nun sind auch leider Objektiv 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.

■ Bild 3: Das Prinzip des Scharfstellens

Eine Blende bewirkt nicht nur eine Verringerung der Objektivfehler, sondern beeinflusst auch die Tiefenschärfe. Aber was ist eigentlich „scharf“? Die Antwort ist unscharf: In Bild 2 erzeugen zwei Lichtpunkte A und B zwei Bilder A' und B'. Der Kameraauszug (Bild 3 d) ist so eingestellt, dass Bild A' exakt auf den Sensor fällt. Das ist scharf!

Die Blende sorgt für einen tiefen, scharfen Blick

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 nur ein Punkt wirklich scharf und alle davor und dahinter liegenden Punkte unscharf abgebildet werden. Dann kann es doch gar keine Tiefenschärfe geben!? Stimmt. Aber ein Blick auf CCD-Chips zeigt,

dass deren Pixel nicht unendlich klein sind. Die Pixel der in der Messtechnik weit verbreiteten 1/2"-Sensoren sind gut $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ groß. Daher bezieht sich die Angabe der Tiefenschärfe von C-Mount-Objektiven häufig auf einen Unschärfekreis-Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$. Unschärfekreis-Durchmesser von $50\ \mu\text{m}$ sind aber durchaus erlaubt.

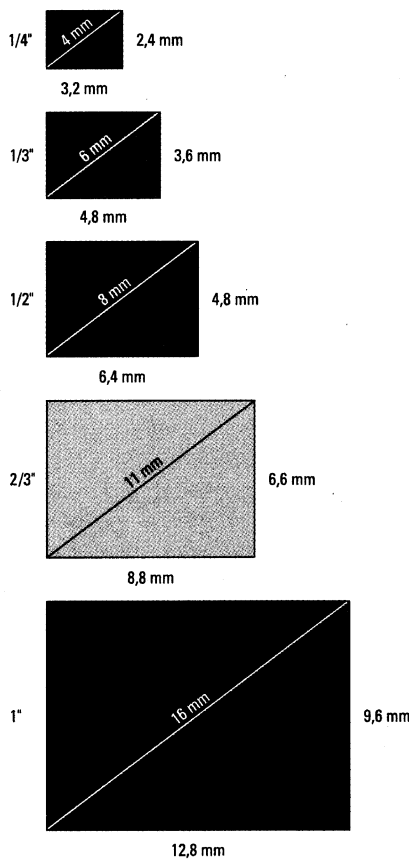
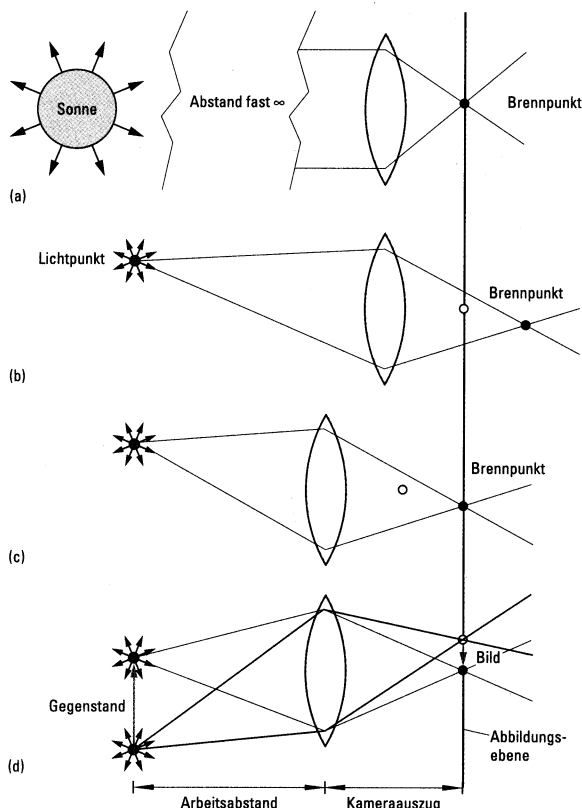
In der Praxis ist es nur selten notwendig die Tiefenschärfe exakt zu berechnen. Aber sehen wir uns die Tiefenschärfe-Formel näher an, um herauszufinden, was wie zusammenhängt: (Formel 7). Entscheidend dabei ist der Teil in Formel 8, denn er beschreibt, wie weit der Arbeitsabstand bei einem vorgegebenen Unschärfekreis verkürzt bzw. verlängert werden darf. Demnach ist die Tiefenschärfe abhängig von den drei Parametern Unschärfekreis, Blende und Brennweite.

Unschärfekreis: Je kleiner der erlaubte Unschärfekreis ist, desto kleiner ist die Tie-

fenschärfe. Blende: Je kleiner die Blendenzahl (also je offener die Blende) ist, desto kleiner ist die Tiefenschärfe. Brennweite: Je größer (!) die Brennweite ist, desto kleiner ist die Tiefenschärfe. Der Zusammenhang ist quadratisch. Also bedeutet schon eine kleine Erhöhung der Brennweite eine deutliche Abnahme der Tiefenschärfe.

Es gäbe noch viel zu erzählen. Etwa über Bildwinkel, Nahlinsen, Makroobjektive, telezentrische Objektiv und vor allen Dingen über die erstaunliche Tatsache, dass leicht unscharfe Bilder zu exakteren Messergebnissen führen! Wollen Sie wissen warum? Dann schlagen Sie nach – im Internet über den Hotlink hier am Ende oben rechts. (ku)

Kennziffer: 301



■ Bild 4 :
Unterschiedliche
Abmessungen der
CCDs spiegeln
sich in den diversen
Objektiv-Formaten wider. Das
führt leider zum
Glauben, ein 1/3"-
Sensor bedürfe
auch eines 1/3"-
Objektivs.