



Imaging Solutions - WHITEPAPER

Highspeed-Video - Objektivauswahl & Berechnungen

Physikalische Zusammenhänge und Auswahlhilfe

Neben den technischen Fähigkeiten einer Hochgeschwindigkeits-Kamera ist die Auswahl einer geeigneten Optik von entscheidender Bedeutung für die Qualität der gewonnen Bilddaten. Auch das beste Kamerasystem kann bei Einsatz eines leistungsschwachen Objektivs nur mittelmäßige Bilder liefern.

Dieses Whitepaper erhebt keinen Anspruch auf wissenschaftliche Vollständigkeit. Es dient als Leitfaden für die Auswahl von geeigneten Objektiven für den Einsatz an modernen Hochgeschwindigkeits-Kamerasystemen. Berechnungen basieren auf einem einfachen Linsensystem und liefern Näherungswerte für die Objektivauswahl. Objektive bestehen aus komplexen Linsenkombinationen die für ein exaktes Ergebnis eine ebenso komplexe Berechnung erfordern. Da die lieferbaren Objektive aber in fixe Brennweiten unterteilt sind, genügt für die Auswahl der vorgenannte Näherungswert über vereinfachte Formeln.

- 1.0 Grundüberlegung
- 2.0 Objektivauflösung vs. Sensorauflösung - Die optische Qualität
- 3.0 Sensorformat vs. Objektivformat (Bildkreis) - Das optische Format
- 4.0 Auflagemaß und Objektivanschluss
- 5.0 Brennweitenberechnung
- 6.0 Objektivblende (Schärfentiefe)
- 7.0 Naheinstellgrenze (MOD), Abbildungsmaßstab & Makro-Objektive
- 8.0 Kurzform zur Objektivauswahl



Imaging Solutions GmbH
Professional Imaging & Light Solutions

1.0 Grundüberlegung

Die Aufgabe des Objektivs ist die Abbildung eines gewünschten Motivs auf dem Bildsensor einer Kamera. Die Brennweite der Optik bestimmt unter Berücksichtigung von Objektgröße, Abstand und Sensorgröße, wie der Strahlengang gebrochen wird um das Objekt formatfüllend auf den Kamerasensor zu übertragen.

Typische Aufnahmesituationen mit Hochgeschwindigkeits-Kamerasystemen:

Die Objektivwahl bestimmt was aus welchem Abstand, wie abgebildet werden soll. Abstand steht aber im Widerspruch zu Bildaufzeichnungen mit Hochgeschwindigkeits-Kamerasystemen. Um möglichst kurze Belichtungszeiten zu erreichen, ist möglichst viel Beleuchtung gefordert. Über große Distanzen ist dies nur schwer zu realisieren. Entsprechend sollte der Abstand zwischen Objekt und Kamerasystem möglichst gering sein. Theoretisch ist es möglich aus 30m Entfernung ein Objekt von 1m Größe aufzuzeichnen. Dafür wäre - sensorabhängig - ein sehr lichtschwaches Supertele-Objektiv mit etwa 500mm Brennweite erforderlich. Für den Einsatz an solchen Kamerasystemen ungeeignet. Üblicherweise werden Highspeed-Kameras für folgende Abstände und Objektgrößen eingesetzt:

Bildausschnitt	Abstand	Beispiel	Objektivart
2 - 5 m	5 - 10 m	Crashtest, Großformate,	Festbrennweite
1 - 2 m	1 - 3 m	Mechanik, Airbag, Biomechanik	Festbrennweite / Zoom
0,5 - 1 m	1- 2 m	Produktionsprozesse, Komponententest	Festbrennweite / Zoom
0,1 - 0,5 m	0,5 - 1,0 m	Prozessdetails, Ballistik, Materialtest	Festbrennweite / Zoom
1 - 10 cm	0,1 - 0,5 m	Detailaufnahmen, Laboranwendungen	Festbrennweite / Makro
0,1 - 1 cm	0,1 - 0,5 m	Partikel und kleinste Details	Makro
µm-Bereich	0,1 - 0,5 m	Mikroskopie / Laboranwendungen	Vergrößerungs-Optiken

Daraus ergeben sich für den täglichen Einsatz Brennweiten von 7,5 bis maximal 150 mm. Auf diesen Bereich beschränkt sich dieses Whitepaper. Warum dies so ist, und Details dazu in den Folgekapiteln.



Bei der Wahl des Bildausschnittes sollte das kleinste Details von Interesse im Fokus stehen. Interessiert, wie im linken Beispiel, die Gesamtmechanik, bestimmt dies den aufzuzeichnenden Bildausschnitt und die Objektivwahl. Sind, wie im rechten Beispiel, einzelne Details gefragt, muss das Objektiv der Art gewählt sein, das nur dieser Ausschnitt möglichst formatfüllend auf dem Sensor abgebildet wird. Im Bedarfsfall führen zwei Aufnahmen, Totale und Detail, zu aussagekräftigen Ergebnissen. Zu diesem Zweck sind Objektive unterschiedlichster Brennweiten und Funktionen verfügbar.

Festbrennweite:

Objektive mit einer festen Brennweite und optimiertem Linsensatz. Sie liefern die beste Abbildungsqualität dank optimiertem Linsensatz bei hoher Lichtstärke. Die erste Wahl bei Highspeed-Video!

Zoom-Optik:

Objektive mit variablem Linsensatz und folglich variabler Brennweite. Durch den variablen Linsensatz besitzen Zoom-Optiken nicht die Abbildungsqualität und Lichtstärke von optimierten Festbrennweiten, liefern aber ihren Brennweitenbereich entsprechend eine gewisse Komfortlösung ohne Objektivwechsel. Ein Zoom vergrößert nicht die Abbildung sondern passt durch Änderung der Brennweite den Bildausschnitt an!

Makro-Optik:

Makro-Objektive eignen sich für Nahaufnahmen bzw. Detailaufnahmen auf kurze Distanz. Sehr gute Makro-Objektive realisieren einen Abbildungsmaßstab von 1:1. Gegenstand und Abbild werden gleich groß abgebildet.

2.0 Objektivauflösung vs. Sensorauflösung - Die optische Qualität

Jedes Objektiv bzw. jedes optische System produziert so genannte Abbildungsfehler (Aberrationen). Dies sind Abweichungen von der theoretisch möglichen idealen optischen Abbildung. Dies können z.B. chromatische & sphärische Aberration, Koma, Astigmatismus und mechanische Fehler (wie Zentrierfehler) sein. Details sind in entsprechender Fachliteratur verfügbar, und würden in diesem Whitepaper zu weit in die Theorie führen. Bei Objektiven werden diese Fehler durch mehr oder weniger aufwendige Linsensätze ausgeglichen. Grundsätzlich gilt aber in diesem Zusammenhang, je hochwertiger die optische Güte des Objektivs (Linsenanzahl und deren optische Güte/Qualität), je geringer sind diese Abbildungsfehler oder Aberrationen.

Einer der wichtigsten Faktoren für die Auswahl von Objektiven beim Einsatz an Highspeed-Kameras ist deren optisches Auflösungsvermögen. Wie ein Bildsensor, ist auch ein Objektiv in seiner Auflösung begrenzt. Die Sensoren moderner Kamerasysteme verfügen über eine immer höhere aktive Auflösung. Da die zur Verfügung stehende Sensorfläche ebenfalls physikalischen und technische Grenzen unterliegt, werden die Pixel bei steigender Sensorauflösung kleiner.



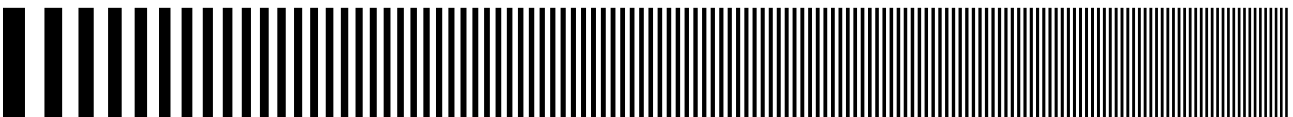
Objektiv mit optimaler Auflösung und hoher optischer Güte



Objektiv mit zu geringer Auflösung und Randfehler

Das Objektiv muss also in der Lage sein, die Sensorauflösung bzw. Pixelgröße zu bedienen. Die meisten Hersteller geben in ihren Datenblättern dieses Auflösungsvermögen in MP (Megapixel) an. Dies drückt zumindest aus, dass z.B. eine 5 Megapixel-Optik in der Lage ist einen Bildsensor bis zu dieser Auflösung und relativ kleine Pixel zu bedienen. Im Allgemeinen reicht diese Voraussetzung auch.

Da aber das Auflösungsvermögen jeder Optik zum Rand hin abfällt, liefert eine Angabe in Linienpaare pro Millimeter (Lp/mm) einen exakteren Wert. Auch diese Werte werden in den meisten Datenblättern angegeben. Er beschreibt die Fähigkeit eines Objektivs wie viele schwarze und weiße Linienpaare bzw. deren Kontraste pro Millimeter unterschieden bzw. an den Bildsensor übertragen werden können. Bei Überschreiten dieser Grenze wird der Kontrast der Linienpaare nicht mehr unterschieden.



Einfache Regel (Vergleich Datenblätter):

Das Auflösungsvermögen der Optik muss größer als die Auflösung des Sensors sein (Megapixel)

Detaillierte Auswahl (Berechnung):

Die Optik muss mehr Linienpaare pro Millimeter (Mittelpunkt & Randbereich) als der Bildsensor auflösen

Die empfohlene Mindestauflösung in Lp/mm kann über die Pixelgröße des Sensors ermittelt werden.

Monochrom-Sensor:
Color-Sensor:

$Lp/mm = 500 / (\text{Pixelgröße in } \mu m \times 1,41)$
 $Lp/mm = 500 / (\text{Pixelgröße in } \mu m \times 2)$

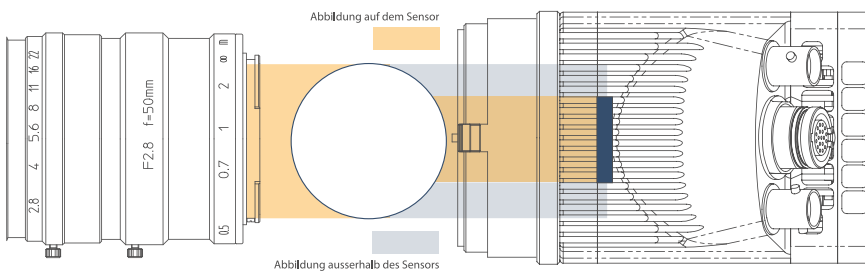
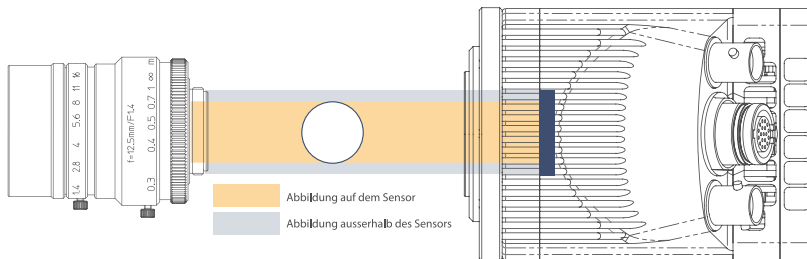
3.0 Sensorformat vs. Objektivformat (Bildkreis) - Das optische Format

Digitale Bildsensoren unterscheiden sich in ihren mechanischen Abmessung, dem Sensorformat. Das Sensorformat wird in exakten Abmessungen oder als Zoll-Klassifizierung angegeben. Konform zu dieser Klassifizierung werden auch Objektive unterschieden.

CMOS / Sensorformat	Normabmessung	Diagonale	gefordertes minimales Objektiv-Format
1/2"	6,40 x 4,80 mm	8,00 mm	C-Mount 1/2"
2/3"	8,80 x 6,60 mm	10,99 mm	C-Mount 2/3"
1"	13,20 x 8,80 mm	15,87 mm	C-Mount 1"
4/3" (MicroFourThirds)	17,30 x 13,00 mm	21,67 mm	C-Mount 1.1" oder 4/3" MicroFourThirds
Kleinbild-Format	36,00 x 24,00 mm	43,27 mm	F-Mount-Objektiv

Das Objektiv sollte immer passend zum Bildsensor gewählt werden. Eine 2/3" Optik kann niemals einen größeren 1" oder 1.3" Sensor vollflächig ausleuchten. Dieser Effekt ist dann als Vignettierung im Bild sichtbar. Eine kreisrunde Zone auf dem Bildsensor die beleuchtet wird, die Ränder werden von dem Objektiv nicht erfasst und sind als schwarze Fläche sichtbar.

Der minimal benötigte Bildkreisdurchmesser des Objektivs ist gleich der aktiven Sensordiagonale!



Gleiches gilt für „zu große“ Objektive. Der vom Objektiv ausgeleuchtete Bildkreis ist größer als die Sensorfläche. Randbereiche werden außerhalb der Sensorfläche abgebildet, und entsprechend nicht erfasst. Allerdings werden auch Randabbildungsfehler nicht auf den Sensor übertragen.

Die meisten Bildsensoren moderner Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme sind zwar grob in die o. g. Formate klassifiziert, weichen aber mitunter von diesen Normen ab. Neben dem klassischen 4:3 Bildformaten erfordern aktuelle Formate wie 16:9 oder völlig individuelle Formate über eine Änderung der aktiven Sensorauflösung, eine Anpassung bei der Objektivauswahl. Siehe Absatz 5.0 ff.

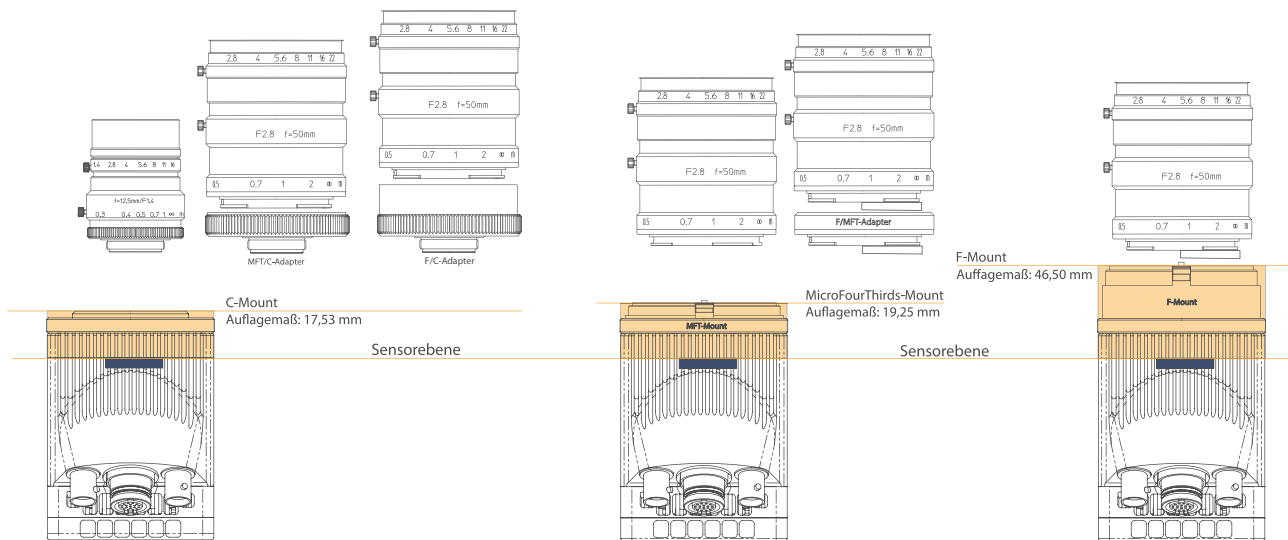
4.0 Auflagemaß und Objektivanschluss

Das Auflagemaß definiert den Abstand zwischen der Sensoroberfläche und der hintersten Linsenebene des Objektivs, und ist eine genormtes Maß. Die meisten Highspeed-Kamerasysteme sind mit einem C-Mount-Objektivanschluss ausgestattet, da für diesen Mount viele kompakte, lichtstarke und kostengünstige Objektive der unterschiedlichsten Hersteller zur Verfügung stehen. Zudem erlaubt der C-Mount die Adaptation an Sonderoptiken wie Mikroskope, Bores- und Endoskope und Spezialvergrößerungsoptiken.

Der C-Mount-Anschluss ist ein standardisierter Gewindeanschluss für Objektive mit 1 Zoll (25,4 mm) Durchmesser und einer Gewindesteigung von 1/32 Zoll. Bedingt durch die stetig steigende physikalische Auflösung und damit verbundenen Größe der Sensorfläche aktueller digitaler Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme, stoßen die aktuell auf dem Markt verfügbaren Objektive mit C-Mount-Anschluss mitunter an ihre mechanischen und optischen Einsatzgrenzen.

Alternativ stehen Objektive mit z.B. Nikon F-Mount und MicroFourThirds-Mount (MFT) zur Verfügung. Diesen Objektive bauen mechanisch deutlich größer auf, bieten aber den Vorteil auch sehr große Bildsensoren vollflächig ausleuchten zu können. Dazu sind entsprechende Objektiv-Adapter für jedes Kamerasystem lieferbar.

Die nachstehende Grafik zeigt die Auflagemaße der aktuell gängigsten Anschlussstypen bei Einsatz von Hochgeschwindigkeits-Kamerasystemen an.



Das Beispiel zeigt, dass jede Kamera mit C-Mount-Anschluss (Auflagemaß 17,526 mm) über entsprechende Adapter auf das Auflagemaß von F- oder MFT-Mount verlängert werden kann. Umgekehrt kann ein Kamera mit fixem F-Mount keine C-Mount Objektive aufnehmen, da eine Verkürzung des Auflagemaßes nicht möglich ist. Diese Aufwärtskompatibilität ist ein weiterer Grund warum Highspeed-Kamerasysteme meist mit einem C-Mount ausgestattet sind.

Neben den genannten Objektivanschlüssen sind noch eine Vielzahl von Lens-Mounts mit entsprechenden Auflagemaßen verbreitet, die modellabhängig auch adaptiert werden können. Die oben genannten Mounts bilden aktuell aber den Standard für Highspeed-Kamerasysteme.

Motorisierte Objektive:

Objektive mit motorisierter Steuerung für Blende, Fokus und Zoom kommen bei Hochgeschwindigkeits-Kameras selten zum Einsatz. Es stehen wenige C-Mount-Optiken mit externer Steuerung und Spannungsversorgung zur Verfügung. Für solche Anwendungsfälle setzt sich aktuell der MFT-Mount durch, da hier die Steuerung der Kamera über die Anwendungssoftware der Kamera erfolgen kann. Bei Einsatz einer motorisierten MFT-Optik genügt keine nachträgliche Adaptation auf den C-Mount. Das Kamerasystem muss werksseitig mit einem solchen MFT-Mount ausgestattet sein, damit die Spannungsversorgung und Übertragung aller Steuersignale gewährleistet ist.

Eine motorisierte Optik ist nicht mit der Funktion „Autofokus“ zu verwechseln. Eine automatische Schärfereinstellung ist bei Highspeed-Anwendungen nicht möglich, da es bei Bildraten von z.B. 1000 fps nicht möglich ist die Bildschärfe von Bild zu Bild zu bewerten und gegebenenfalls zu korrigieren.

5.0 Brennweitenberechnung (Format-Gleichheit)

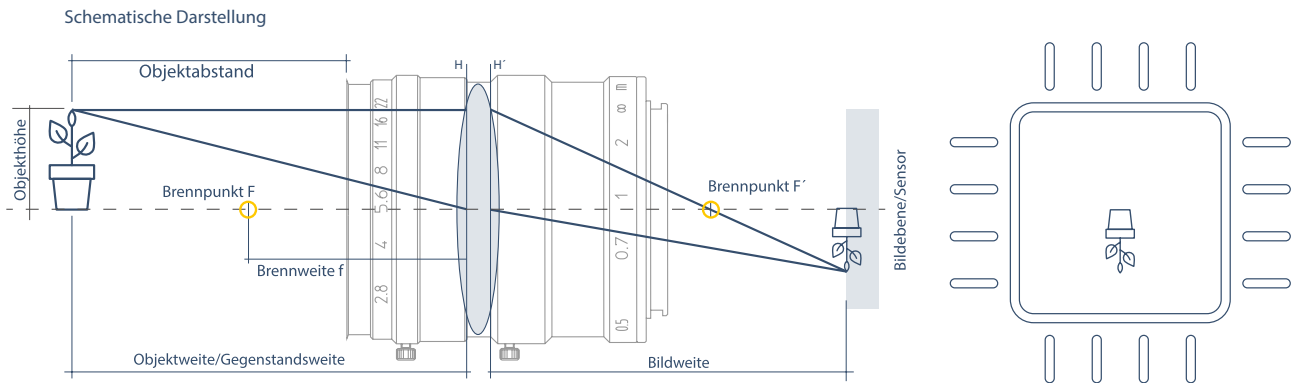
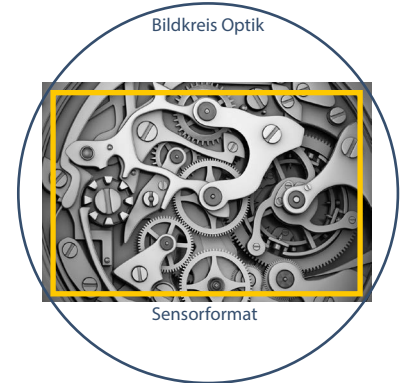
Sofern, wie im Vorkapitel empfohlen, zwischen Bildsensorgröße und Bildkreis des Objektivs eine relative Formatgleichheit herrscht, ist die benötigte Brennweite über die nachstehende Formel einfach zu berechnen.

Die hier stark vereinfachte Formel (einfaches Linsensystem) reicht in der Regel völlig aus. Objektive bestehen aus komplexen Linsensätzen die einer exakten Berechnung bedürfen. Dies isWhitepaper dient als Auswahlhilfe für die benötigte Optik.

Das rechnerische Ergebnis liegt meistens zwischen zwei verfügbaren Brennweiten.

$$\text{Horizontale Brennweite} = f_H = \frac{\text{Objektstand (mm)} \times \text{Sensorbreite (mm)}}{\text{Objektbreite (mm)} + \text{Sensorbreite (mm)}}$$

$$\text{Vertikale Brennweite} = f_V = \frac{\text{Objektstand (mm)} \times \text{Sensorhöhe (mm)}}{\text{Objekthöhe (mm)} + \text{Sensorhöhe (mm)}}$$



5.1 Brennweitenberechnung/-Korrektur bei unterschiedlichen Formaten (Crop-Faktor / Formatfaktor)

Gelegentlich ist eine Anpassung der Brennweite an veränderte Sensorgegebenheiten erforderlich.

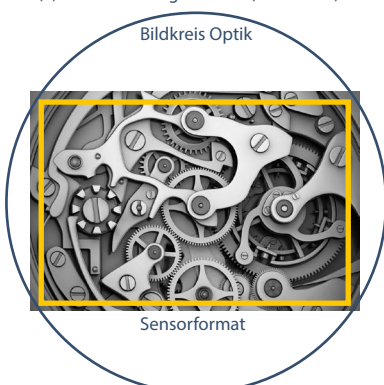
Reduzierung der aktiven Sensorauflösung (ROI):

Wenn die aktive Sensorfläche der Kamera verkleinert wird, um z.B. höhere Aufzeichnungsgeschwindigkeiten zu ermöglichen, ist diese Fläche kleiner als der für die volle Sensorauflösung berechnete Bildkreis des Objektivs. Die Brennweite muss um den s.g. Crop-Faktor korrigiert werden. Durch diese Korrektur wird die rechnerische Brennweite der Optik verlängert um den gleichen Bildausschnitt auf der kleineren Sensorfläche darstellen zu können.

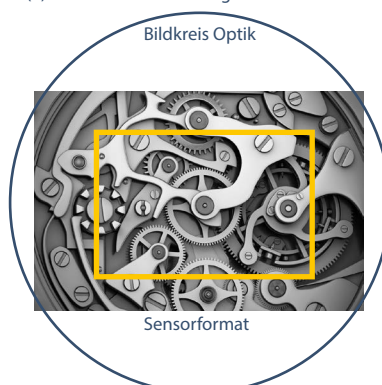
Unterschiedliche Kamerasysteme - unterschiedliche Bildausschnitte :

Ein für Kamera A berechnetes Objektiv, liefert bei Kamera B mit kleinerem/größerem Sensor einen anderen Bildausschnitt. Hier kann über den Crop-Faktor die Brennweite angepasst werden um bei beiden Kameras den gleichen Bildausschnitt zu erhalten.

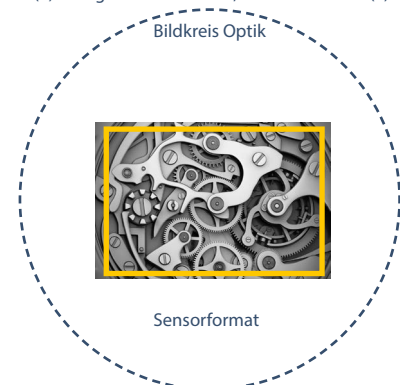
(1) Ideale Formatgleichheit (Absatz 5.0)



(2) Kleinerer Sensor oder geänderte ROI



(3) Korrigierte Brennweite, Bildinhalt wie in (1)



Umseitig eine Beispielrechnung:



Beispielrechnung für eine ROI-Reduzierung:

Vollformat: CMOS-Sensor mit 1280 x 1024 Pixel und Pixelgröße 10,85 µm
Die Volle Sensorfläche beträgt hier 13,88 x 11,11 mm, also etwa ein 1" Normformat

Reduzierung: Die aktive Sensorfläche wird auf 720 x 512 Pixel reduziert
Die aktive Sensorfläche beträgt nun 7,81 x 5,55 mm, also etwa ein 2/3" Normformat
(Bei kleinerem/größerem Sensor ist dessen Maß im Datenblatt nachzulesen, oder zu berechnen)

Anstatt einer 1" Optik bei Vollauflösung, könnte bei dieser reduzierten Sensorauflösung auch eine 2/3" Optik verwendet werden.

Format	Horizontal (Norm)	Vertikal (Norm)	Bildkreis (Norm)	Objektiv
2/3"	8,80 mm	6,60 mm	10,99 mm	C-Mount 2/3"
1"	13,20 mm	8,80 mm	15,87 mm	C-Mount 1"
1.1"	14,52 mm	9,68 mm	117,45 mm	C-Mount 1.1"
4/3" (MicroFourThirds - MFT)	17,30 mm	13,00 mm	21,67 mm	4/3" MicroFourThirds
Kleinbild-Format	36,00 mm	24,00 mm	43,27 mm	F-Mount-Objektiv

Objektgegebenheiten: Objektabstand: 1000 mm Objektbreite: 500 mm

Für die volle Auflösung des Bildsensor wird eine 1" Optik mit folgender Brennweite benötigt (konform Absatz 5.0)

$$\text{Brennweite}_H = f_H = \frac{\text{Objektabstand (mm)} \times \text{Sensorbreite (mm)}}{\text{Objektbreite (mm)} + \text{Sensorbreite (mm)}} = \frac{1000 \text{ (mm)} \times 13,88 \text{ (mm)}}{500 \text{ (mm)} + 13,88 \text{ (mm)}} = 27,01, \text{ gewählt } 25 \text{ mm}$$

Es würde bei Vollauflösung eine 25 mm 1" C-Mount Optik zum Einsatz kommen . Um den gleichen Bildausschnitt auf der reduzierten ROI zu erhalten müsste die Brennweite um den Crop-Faktor verlängert werden.

$$\text{Crop-Faktor} = \frac{\text{Ø Bildkreis Objektiv (Norm) mm}}{\sqrt{(\text{Sensorbreite}^2 + \text{Sensorhöhe}^2)}} = \frac{\text{Ø } 15,87 \text{ (Norm 1") mm}}{\sqrt{(7,81^2 + 5,55^2) \text{ ROI}}} = 1,65$$

$$\text{Brennweite}_{cf} = \text{Unkorrigierte Normbrennweite} \times \text{Crop-Faktor} = 27,01 \times 1,65 = 41,25 \text{ mm , gewählt } 35 \text{ mm}$$

Um ungefähr den gleichen Bildausschnitt wie in Vollauflösung auf der kleineren Sensorfläche abzubilden benötigt man eine Brennweite von 35 mm, anstatt 25 mm im Vollformat. Die Möglichkeiten sind hier natürlich durch die auf dem Markt verfügbaren Festbrennweiten begrenzt. Eine exakte Anpassung kann dann über eine Zoom-Optik mit geeignetem Brennweitenbereich erfolgen.

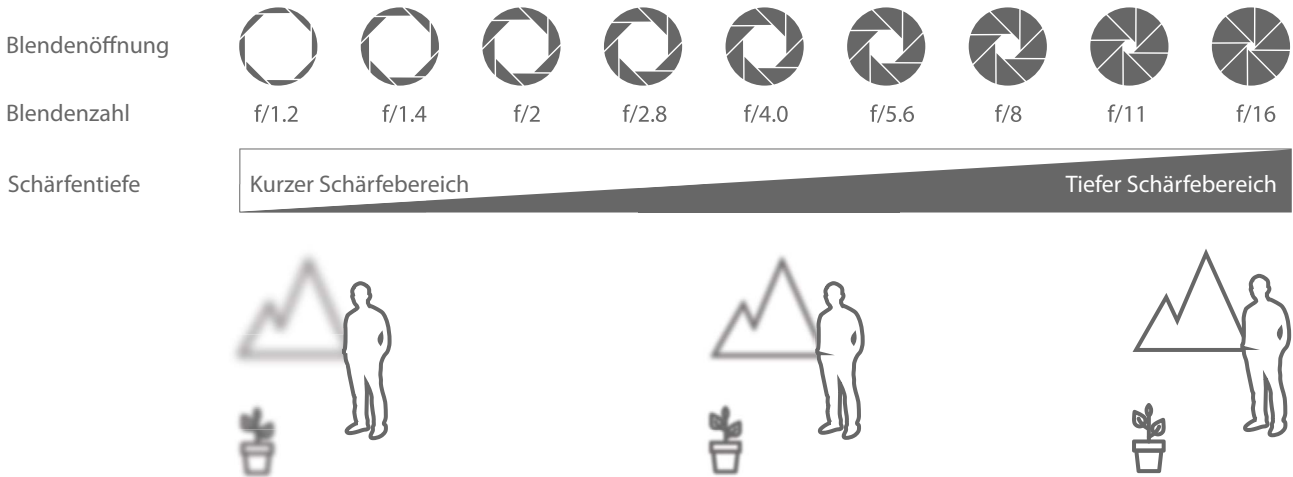
Berechnung bei unterschiedlichen Kamerasystemen und Sensorgrößen:

Vorausgesetzt dass das Objektiv einen passenden Bildkreis zu beiden Sensorformaten hat, erfolgt die Berechnung des Crop-Faktors konform zum o.g. Beispiel. Grundsätzlich gilt um den identischen Bildausschnitt zu erhalten folgendes:

Kleinerer Sensor (oder ROI) - Längere Brennweite
Größerer Sensor (oder ROI) - Kürzere Brennweite

6.0 Objektivblende (Schärfentiefe)

Ein wichtiges mechanisches Element einer Optik ist die Blende. Die Blende ist die hinterste Öffnung des Objektivs - also zwischen Linsensatz der Optik und Bildsensor. Die Blendenöffnung definiert die Lichtmenge die auf den Bildsensor der Kamera fällt und die räumliche Abbildungsqualität des Objektivs. Die maximale Blendenöffnung eines Objektivs charakterisiert dessen Lichtempfindlichkeit. Die Blendenzahlen sind international genormt und an jedem Objektiv sichtbar. Je kleiner die kleinste Blendenzahl, je lichtstärker ist das Objektiv. Die Blendenzahl ergibt sich aus dem Verhältnis von Brennweite zur Öffnungsweite des Objektivs.

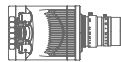
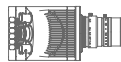


Die Blendenöffnung hat unmittelbaren Einfluss auf die Schärfentiefe (auch Tiefenschärfe genannt). Die Tiefenschärfe beschreibt die räumliche Tiefe in der Abbildung, die durch das Objektiv scharf abgebildet wird.

- Je größer die gewählte Blende, sprich je kleiner die Blendenöffnung, je größer die Schärfentiefe.
- Je kürzer die Objekt-Distanz (bei gleicher Blende), desto geringer die Schärfentiefe
- Je kürzer die Objektiv-Brennweite (bei gleichem Abstand), je größer die Schärfentiefe

Variierender Abstand

Brennweite & Blende identisch



Objektstand



Schärfentiefe



Variierende Brennweite

Abstand & Blende identisch

Brennweite 25 mm

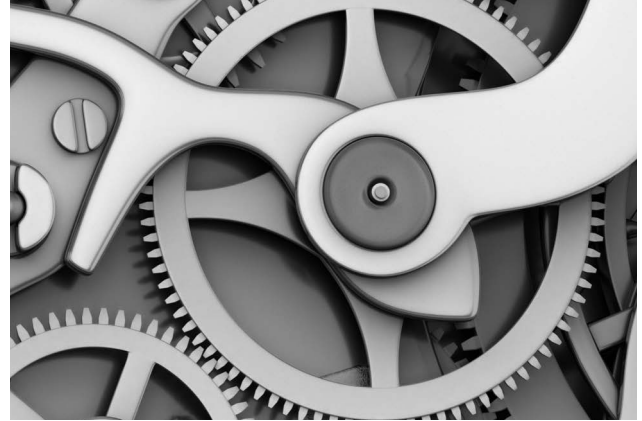


Brennweite 200 mm



7.0 Naheinstellgrenze (MOD), Abbildungsmaßstab & Makro-Objektive

Jedes Objektiv hat optisch bedingt eine Naheinstellgrenze, auch minimale Objektdistanz (MOD) genannt. Dies ist der kürzeste Abstand zwischen Objekt und Vorderkante des Objektivs, der scharf abgebildet werden kann. Diese Naheinstellgrenze ist ebenfalls im Datenblatt der Objektive aufgeführt (MOD oder MWD). Diese Grenze liegt bei typische Festbrennweiten zwischen 0,2m und 1,0m, kann bei extremen Zoom-Optiken mit langen Brennweiten auch über 2m betragen. Standardoptiken sind von ihrem Linsensatz her auf einen Bereich zwischen ihrer MOD und Unendlich optimiert. Diese Spezifikation wird mit z.B. 1,0m - ∞ angegeben.



Möchte man nun näher an das Objekt heran bzw. Details besser ablichten gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im rechten Bild wird z. B. eine 100 Makro-Optik verwendet um Details der Mechanik zu erfassen.

Makro-Objektive:

Ein 100 Makroobjektiv ist im Grunde nichts anderes als eine 100 mm Festbrennweite. Der Linsensatz der Makrooptik ist aber so optimiert, dass die Naheinstellgrenze extrem kurz ist. Auch mit einem Makro kann man auf Unendlich fokussieren. Die Abbildungsqualität ist in der Ferne aber meist schwächer. Durch den wesentlich komplexeren Linsenaufbau sind Makro-Objektive deutlich lichtschwächer als vergleichbare Festbrennweiten. Stärke der Makro-Objektive ist deren Abbildungsmaßstab von bis 1:1 bei hervorragender Abbildungsqualität im Nahbereich.

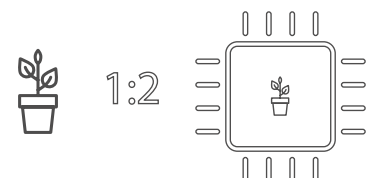
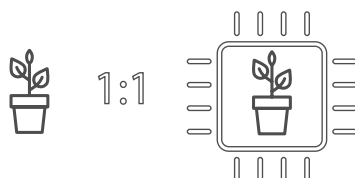
Abbildungsmaßstab:

Der Abbildungsmaßstab gibt an in welcher Größe bzw. in welchem Verhältnis das reale Objekt auf dem Bildsensor abgebildet wird. Ein Abbildungsmaßstab von 1:1 bedeutet z.B., dass ein 5mm großes Objekt auch in 5mm Größe auf dem Kamerasensor aufgezeichnet wird. Das bedeutet im Umkehrschluss auch, dass ein 10 mm großes Objekt, bei 1:1 auf einem 8mm Sensor beschnitten wird. Bei z.B. 1:5 (oder 0,2x) ist wird das Objekt 5 x kleiner auf dem Sensor abgebildet. Die Angabe erfolgt als Verhältnis oder Faktor. Der Abbildungsmaßstab nimmt mit kleiner werdendem Abstand zum Objekt und mit Verlängerung der Brennweite zu.

Und hier ist der Ansatzpunkt für echte Makro-Objektive. So genannte Makro-Zoom-Objektive sind normale Zoom-Objektive die über eine zusätzliche Linsenstellung die Naheinstellgrenze verkürzen können. Dies geschieht aber deutlich auf Kosten der Abbildungsqualität und möglichen Abbildungsmaßstäben.

Nur optimierte und für diesen Zweck konstruierte Makro-Objektive erreichen Abbildungsmaßstäbe von 1:1 bei ihrer MOD.

Typ	Brennweite	MOD	Abbildungsmaßstab (Verhältnis/Faktor)	
Festbrennweite	65 mm	70 cm	1:6	0,166x
Festbrennweite	105 mm	100 cm	1:8	0,125x
Makro-Zoom	20-200 mm	40 cm	1:4	0,250x
Makro	70 mm	25 cm	1:1	1x
Makro	105 mm	30 cm	1:1	1x



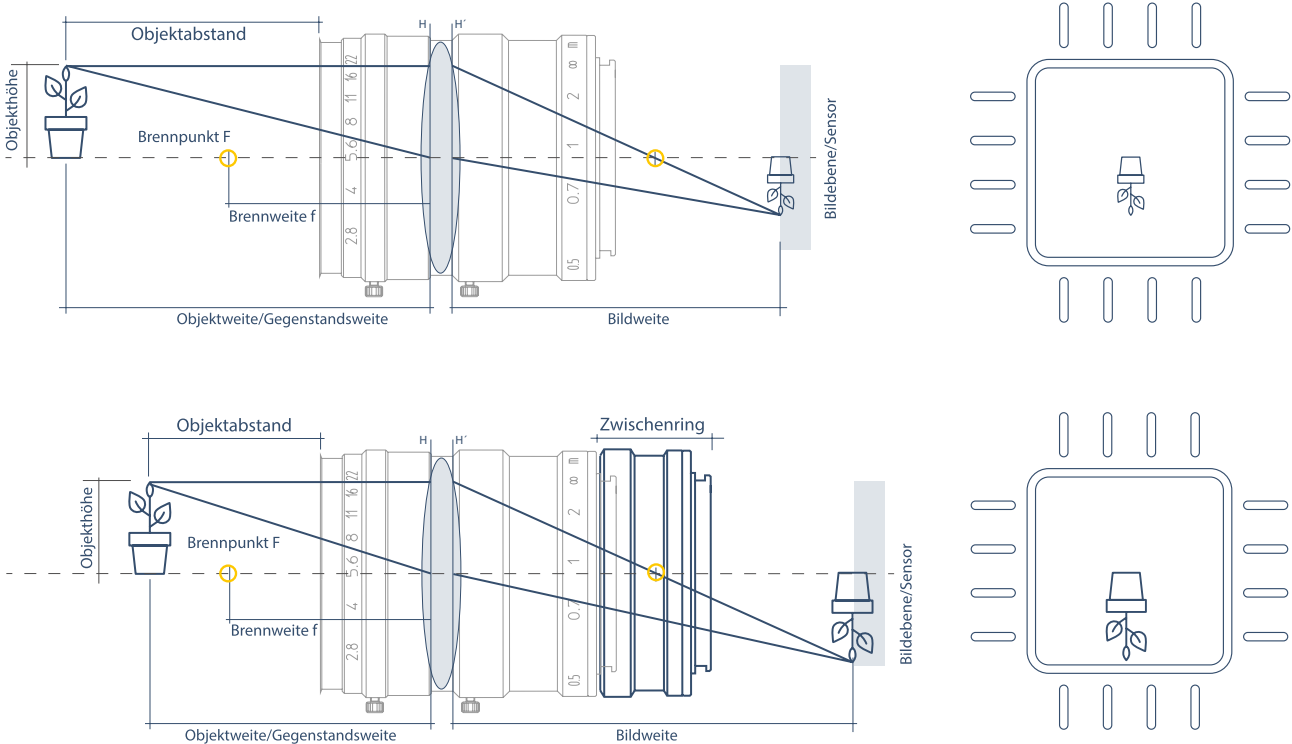
7.1 Kostengünstige Alternativen zu reinen Makro-Optiken

7.1.1 Zwischenringe

Zwischenringe sind linsenlose Abstandsringe die zwischen Objektiv und Kameragehäuse, also der Bildseite, eingesetzt werden. Sie verlängern die Bildweite und erzeugen so einen größeren Abbildungsmaßstab bei geringerem Objektstand. Objekte können entsprechend größer dargestellt werden und der minimale Objektstand des Objektivs (MOD) wird reduziert. Mit längerem Zwischenring verkleinert sich die maximale Objektdistanz dabei schneller als die minimale Objektdistanz, so dass ab einer bestimmten Verlängerung des Abstandes keine Fokussierung über den Fokusring mehr möglich ist.

Zwischenringe sind preiswert und an verschiedene Objektive mit gleichem Objektivanschluss verwendbar. Die Lichtstärke der Optik wird jedoch deutlich reduziert, und eine Fokussierung in Unendlich ist nicht möglich.

Schematische Darstellung



Beispiel für gegebene Werte aus dem Datenblatt der Optik:

Brennweite (f): 35 mm
 MOD Objektiv: 300 mm
 Abbildungsmaßstab (m_0): 1:8 oder 0,125x

Neuer Abbildungsmaßstab mit einem Zwischenring x (Beispiel 10mm):

$$m_N = m_0 \text{ (Abbildungsmaßstab Objektiv)} + \frac{\text{Breite Zwischenring (mm)}}{\text{Brennweite Objektiv (mm)}} = 0,125 + \frac{10 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} = \mathbf{0,41x \text{ bzw. } 1:2,4}$$

Neue MOD bei Zwischenring X (Beispiel 10mm) unter Berücksichtigung des neuen Abbildungsmaßstabes m_N :

$$d_0 = \text{Gegenstandsweite} = \text{Brennweite} + \frac{\text{Brennweite (mm)}}{\text{Abbildungsmaßstab } m_N} = 35 + \frac{35}{0,41} = 120,36 \text{ mm}$$

$$d_B = \text{Bildweite} = \text{Gegenstandsweite } d_0 \times \text{Abbildungsmaßstab} = 120,36 \times 0,41 = 49,35 \text{ mm}$$

$$\mathbf{MOD = d_0 + d_B = 169,71 \text{ mm}} \text{ (10mm Ring = Verkürzung der MOD von 300 etwa 170 mm)}$$

Zwischenringstärke bei gewünschter MOD, z.B. 160mm MOD (Näherungsformel):

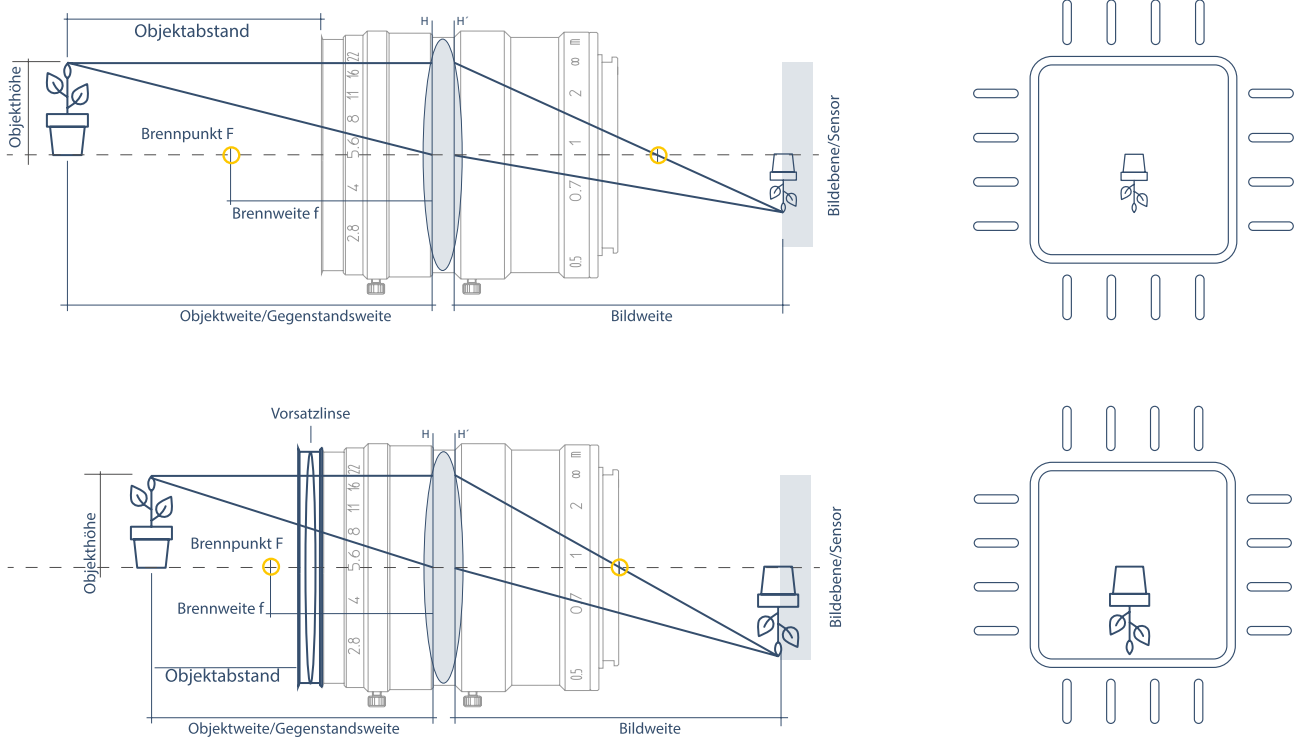
$$Z = \frac{\text{Brennweite}^2}{\text{MOD} - \text{Brennweite}} = \frac{35 \text{ mm}^2}{160 \text{ mm} - 35 \text{ mm}} = 9,8 \text{ mm gewählt } 10 \text{ mm Zwischenring}$$

7.1.2 Nahlinen / Vorsatzlinsen / Achromate

Im Gegensatz zu Zwischenringen sind Nah- oder Vorsatzlinsen, Glaslinsen die vor das Objektiv geschraubt werden, also auf der Gegenstandsseite wirken. Nahlinen wirken als Lupe und verkürzen die Brennweite des Objektivs. Gleichzeitig bleibt der Auszug des Objektivs erhalten wodurch ein kürzerer minimaler Objektstand ermöglicht wird.

Nahlinen verursache keinen Verlust der Lichtstärke der Gesamtoptik, bei besserer Abbildungsqualität als Zwischenringe.

Nachteilig ist die Tatsache, dass Nahlinen einen festen Gewindedurchmesser haben, und damit auch nur auf Optiken mit identischem Durchmesser passen. Die Abbildungsqualität (vor allem chromatische Aberration) ist bei sehr einfachen und preiswerten Nahlinen - bei höheren Kosten im Vergleich zum Zwischenring. Die „Weiterentwicklung“ der einfachen Nahlinen bilden s.g. Achromate. Diese bestehen meistens aus zwei Linsen um die optischen Abbildungsfehler der einfache Nahlinen auszugleichen. Diese sind jedoch deutlich teurer.



Beispiel für gegebene Werte aus dem Datenblatt der Optik:

Nahlinen werden in Dioptrien (Brechkraft) angegeben.
Die Brechkraft entspricht dem Kehrwert der Brennweite

Brennweite (f):	35 mm
MOD Objektiv:	300 mm
Abbildungsmaßstab (m_o):	1:8 oder 0,125x

Neue MOD bei Nahlinse X (Beispiel +4 Dioptrien)

Das gegebene Objektiv kann auf 300mm scharf gestellt werden. Dies entspricht einer Nahsichtigkeit von +3.3 Dioptrien. (Kehrwert = $1/0,3m = +3.3$ Dioptrien). Bei Verwendung einer Nahlinse mit z.B. 4 Dioptrien, erhöht sich die gesamte Nahsichtigkeit der Optik auf 7.3 Dioptrien. Die Nahsichtigkeit (also die MOD - minimale Objektdistanz) der Optik verändert sich auf 136mm (Kehrwert = $1/7.3 = 0,136 m$ bzw. 136 mm).

Maximaler Arbeitsabstand beim Einsatz einer Nahlinse X (z.B. +4 Dioptrien)

Der maximale Arbeitsabstand einer Nahlinse entspricht ihrer Brennweite (1/Brechkraft Dioptrien) im Beispiel $1/+4 = 250$ mm
Im Gegensatz zur MOD (Minimale Objektdistanz) liefert dieser Wert den maximal möglichen Objektstand der fokussiert werden kann. Kürze Abstände können bis zur neuen MOD fokussiert werden.

Neue Brennweite mit Nahlinse x (Beispiel +4 Dioptrien):

Brechkraft Objektiv = $1/\text{Brennweite in m} = 28,5$ Dioptrien

$$\text{Brennweite} = \frac{1}{\text{Dioptrien (Objektiv + Linse)}} = \frac{1}{\text{Dioptrien (28,5 + 4)}} = 0,030m = 30mm \text{ Brennweite}$$



8.0 Kurzform zur Objektivauswahl

1

Optimalen Bildausschnitt und Kameraabstand für Highspeed-Video wählen

Beim Objektabstands die Zusammenhänge zwischen Beleuchtung, Belichtungszeit und Blende beachten.
Im Zweifelsfall zwei Aufnahmen für Detail und Totale planen

2

Hochwertige, lichtstarke Objektive mit optischer Auflösung passend zum Bildsensor wählen

Das Auflösungsvermögen der Optik muss größer als die Auflösung des Sensors sein (Megapixel), Absatz 2.0
Der minimal benötigte Bildkreisdurchmesser des Objektivs ist gleich der aktiven Sensordiagonale! , Absatz 3.0
Der Objektivanschluss muss passen zum Kamerasystems sein, Adaptationsmöglichkeiten beachten

3

Die benötigte Brennweite berechnen, Absatz 5.0

Bei Bedarf Korrekturen über den Crop-Faktor vornehmen

4

OBJEKTIVAUSWAHL

Objektiv entsprechend der benötigten Brennweite aussuchen.
Zusammenhang von Brennweite, Blende und Schärfentiefe berücksichtigen, Absatz 6.0
Eventuell Naheinstellgrenze und Abbildungsmaßstab beachten , Absatz 7.0

5

Makro-Objektiv oder Alternativlösungen abwägen, Absatz 7.0

Bei einmaligem oder gelegentlichem Bedarf genügen Zwischenringe vollkommen
Bei regelmäßigem Bedarf - Hochwertige Makro-Objektive mit entsprechender Abbildungsqualität wählen

