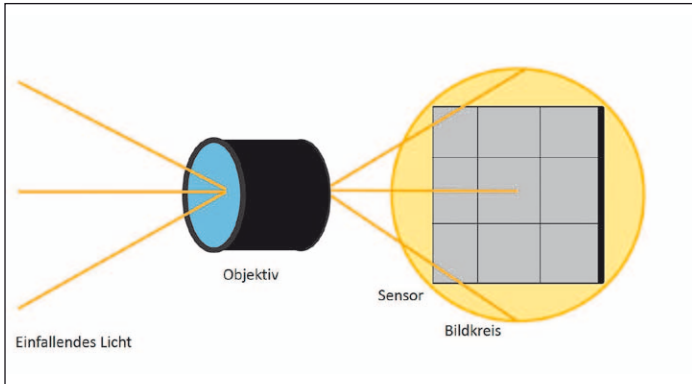


## Das Runde muss aufs Eckige

Das richtige Objektiv für Bildverarbeitungsanwendungen wählen



**Bild 1:** Der Bildkreis muss so groß wie der Sensor sein, damit der Sensor voll ausgeleuchtet wird

Die Qualität einer jeden Bildverarbeitungsanwendung steht und fällt mit der Auswahl ihrer Komponenten und deren Zusammenspiel. Das Kameraobjektiv ist dabei der Eintrittskanal für Bildinformationen auf dem Weg zum Sensor und spielt eine oft unterschätzte Schlüsselrolle. Die richtige Objektivwahl ist somit ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Vision Systemen - fünf Faktoren helfen Anwendern bei der Vorgehensweise und Entscheidung.

### Das Objektiv muss zum Sensor passen

Der Bildsensor als bildfassende Basis eines jeden Systems ist der wichtigste Ausgangspunkt für die Wahl des passenden Objektivs. Sensorgröße und Auflösung sind dabei die beiden wichtigsten Kriterien. Viele Kunden unterschätzen die Wichtigkeit des Objektivs in diesem Zusammenspiel. Zwar werden immer hochwertigere Sensoren eingesetzt, an die notwendige Passgenauigkeit der Objektivs aber wird nicht unbedingt gedacht. Mit der fortschreitenden technischen Entwicklung im CCD- und CMOS-Bereich verbessern sich die Sensoren rapide, auch das Objektiv muss qualitativ dazu passen. Hängt doch davon die Qualität des Gesamtsystems entscheidend ab – ohne ein passendes Objektiv kann keine hohe Bildqualität erreicht werden – was in schlechten Auswertungen und damit ungenauere Inspektionen resultieren würde.

Das korrekt gewählte Objektiv zur Sensorgröße gewährleistet, dass Licht über das Objektiv auf die gesamte Sensorfläche trifft und diese vollständig ausgeleuchtet wird. Wenn dieser sogenannte Bildkreis für Objektiv und Sensor übereinstimmt, verhindert er unerwünschte Abschattungen, Vignettierungen oder dunkle Bildflächen und sorgt für eine gleichbleibende Bildqualität bis zum Rand. Für welche Sensorgöße sich das Objektiv eignet, ist im Datenblatt des Herstellers ersichtlich. Für einen 2/3-Zoll-Sensor sollte demnach ein 2/3-Zoll-Objektiv eingesetzt werden. Da der maximale Bildkreis vom Sensor vorgegeben ist, bringen größere Objektivs keinen Mehrwert sofern die Abbildungsqualität des Objektivs bis zum Rand gleichbleibend hoch ist – größere Objektivs sind teurer und daher aus Rentabilitätsgründen nicht notwendig.

Neben der Sensorgröße sollte sich die Objektivwahl zusätzlich immer an der Pixelgröße, also der Auflösung des Sensors richten. Nur mit einem hochauflösenden Objektiv kann auch ein hochauflösendes Bild entstehen. Die Pixelgröße eines Sensors ist nicht unbedingt auf den ersten Blick angegeben, muss also auf jeden Fall beim Hersteller angefragt oder selbst errechnet werden.

Pixelgröße = höchste Sensorgöße / Auflösung

Ein 2/3-Zoll-Sensor mit 5 Megapixel hat dementsprechend eine Pixelgröße von 3,45 µm, ein 1/3-Zoll-Sensor mit derselben Auflösung eine Pixelgröße von 2,2 µm. Die Auflösung eines Objektivs wird dazu in Linienpaaren pro Millimeter angegeben und drückt aus, wie viele Linienpaare sich auf einem Bild pro Millimeter trennscharf abbilden lassen, bevor eine nicht auswertbare graue Fläche entsteht. Für diese Kontrastmessung werden spezielle Testcharts, beispielsweise sogenannte Siemenssterne mit einer spezifischen Analysesoftware genutzt, um die effektive Optikleistung von der Bildmitte bis zum Bildrand zu messen.

Die entstehende Kurve ergibt den Kontrastverlust und damit die Übertragungseffizienz des Objektivs. Wieviele Linienpaare/mm für einen bestimmten Sensor benötigt werden, kann mit der folgenden Formel abgeschätzt werden:

Objektivauflösung in lp/mm = 500/Pixelgröße in µm

Bei einer Pixelgröße von 3,45 µm sollte das Objektiv dementsprechend 144 lp/mm erfassen können.

IMI	
<b>f=16mm F2.0</b>	
<b>for 2/3 type Cameras, 5 Megapixel</b>	
<b>C-Mount</b>	
Model No.	M1620-MPW2
Focal Length	16mm
Max. Aperture Ratio	1:2.0
Max. Image Format	8.8mm x 6.6mm(φ 11mm)
Operation Range	Iris F2.0 - F16.0

**Bild 2:** Ausschnitt aus einem Datenblatt

Sensor-Fläche = 8,8 mm x 6,6 mm = 58,08 mm²,

Pixel-Fläche = 58,08 mm² / 5 MP = 11,6 µm²

Bei quadratischen Pixeln: Pixel-Kantenlänge = 3,45 µm

**Autorin:**

Stephanie Simon, Framos

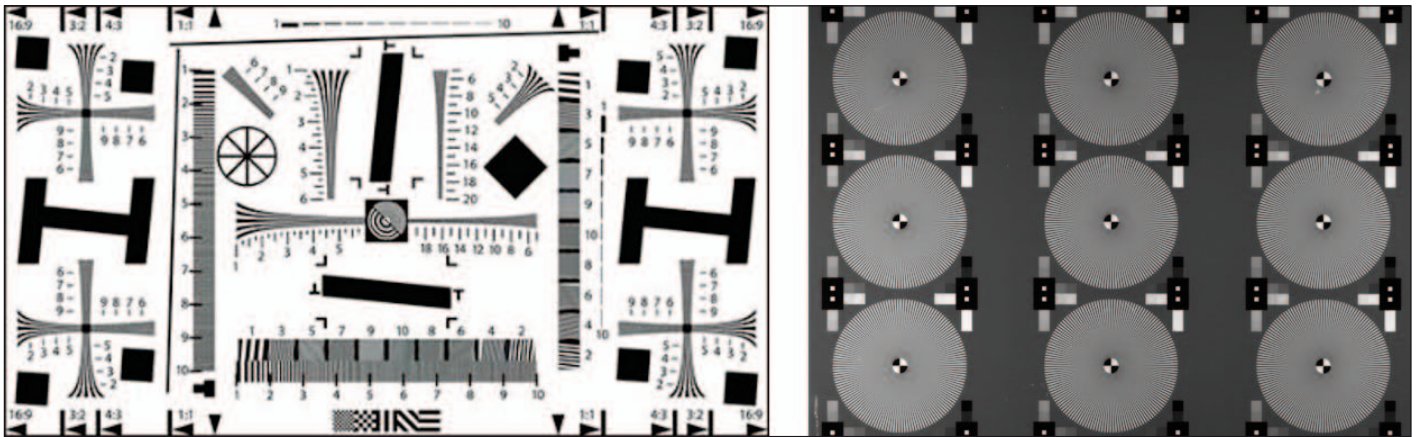


Bild 3: Test-Chart Te170, Test-Chart Te253 mit Siemenssternen

## Arbeitsabstand und Sichtfeld

Jedes Objektiv hat einen optimalen Arbeitsabstand (im Datenblatt oft „recommended shooting distance“ genannt). In diesem Abstand wird das Objektiv zum aufzunehmenden Objekt oder der zu beobachtenden Szenerie montiert, um die maximale Bildqualität zu erzielen und Unschärfe zu vermeiden. Wichtig für die Objektivwahl ist dabei ebenfalls die Objektgröße, also die Größe des Sichtfeldes (FOV, Field of View), welches von der Kamera erfasst und ausgewertet werden soll. Aus dem FOV, dem Arbeitsabstand und der Sensorgröße ergibt sich die Brennweite, mit welcher das Objektiv für die bestmögliche Bilderfassung gewählt werden sollte.

$$f = \text{Sensorgröße} / \text{Objektgröße} \times \text{Arbeitsabstand}$$

Die Brennweite  $f$  wird in Millimetern angegeben und Industriekameras werden standardmäßig mit Festbrennweiten genutzt. Objektive mit Festbrennweiten benötigen gegenüber Zoom-Objektiven weniger Linsenelemente, sind stabiler und damit für den Industriegebrauch verlässlicher. Die Brennweite ist damit im Gegensatz zu den meisten Consumer-Objektiven nicht veränderbar. Mit steigender Brennweite erhöhen sich die Tele-Eigenschaften des Objektivs, womit weit entfernte Objekte detailreich und scharf abgebildet werden. Kleinere Brennweiten, wie in Weitwinkel- oder Fisheye-Objektiven dagegen, ermöglichen die Erfassung eines möglichst großen Sichtfeldes aus dem Nahbereich.

Soll beispielsweise ein zwei Meter hohes Objekt aus einem Abstand von fünf Metern betrachtet werden und der Kamerasensor hat eine Höhe von 6,6 Millimetern wird eine Kamera mit einer Brennweite von 16 mm benötigt ( $6,6/2000 \times 5000 = 16,5$ ). Ergibt der errechnete Wert für die Brennweite nicht direkt eine real verfügbare Brennweite, sollte immer die nächst kleinere Brennweite gewählt werden. So ergibt sich ein etwas größeres Sichtfeld (FOV) und ein Puffer für die Anwendung.

Liegt der errechnete Wert jedoch nur knapp unter der nächsten Brennweitenstufe, macht es Sinn den Arbeitsabstand anzupassen, um damit höhere Auflösung zu erreichen. Die einmal gesetzten Parameter und damit das Festbrennweiten-Objektiv sind später nur sehr aufwändig veränderbar. Eine vorausschauende Planung der Bildaufnahme und exakte Berechnung sind daher für die dauerhafte Qualität der Aufnahme und Auswertung ausschlaggebend.

## Objektivarten

Die am häufigsten eingesetzten Objektive im Machine-Vision-Bereich sind sogenannte endozentrische Objektive, die am ehesten dem menschlichen Auge entsprechen und einen festen Öffnungswinkel haben. Weit entfernte Objekte erscheinen kleiner, Objekte in kurzer Entfernung größer. Telezentrische Objektive, bei denen das Objekt unabhängig von der Entfernung immer gleich groß erscheint, kommen vor allem in Mikroskopen und der Messtechnik zum Einsatz. Der Vorteil liegt darin, dass sie Objekte ohne perspektivische Verzerrung

erfassen und damit Abstandsmessungen mit hoher Präzision möglich sind. Da dies in den meisten Industrieanwendungen nicht notwendig ist, wird im Folgenden auf endozentrische Objektive und einige ihrer Spezialarten eingegangen.

Objektive werden zumeist nach der Größe ihres Gewindeanschlusses, mit dem englischen „Mount“ bezeichnet, klassifiziert. C-Mount-Objektive mit einem Gewindedurchmesser von einem Zoll sind der am meisten verwendete Objektivstandard im Industriebereich. Er eignet sich für Sensoren bis 4/3 Zoll oder einer Sensordiagonale von 22,5 mm. Für größere Sensoren, Vollformate oder Zeilensensoren werden meist F-Mount-Objektive eingesetzt. Für kleinere Sensoren mit einer Größe von 1/2 Zoll, 1/3 Zoll oder kleiner eignen sich dagegen S-Mount-Objektive sehr gut. CS-Mount-Objektive haben genau wie C-Mount-Objek-

tive einen Gewindedurchmesser von einem Zoll, jedoch eine kürze „Back focal distance“ (Abstand zwischen Sensor und Objektiv). Dadurch sind kürzere Brennweiten und größere Öffnungswinkel möglich, wobei die maximale Sensorgröße meist 1/2 Zoll ist. Für den Anschluss von C-Mount-Objektiven auf CS-Mount-Kameras sind 5-m-Adapterringe erhältlich, so kann eine eventuelle Neuanschaffung verhindert werden. Dies funktioniert durch die größeren Back focal distance der C-Mounts, der den CS-Mount vollständig erfasst, andersrum ist eine Adapterlösung genau aus diesem Grund nicht möglich.

Einen Sonderfall stellen die sogenannten M12-Objektive dar, die mit einem Durchmesser von 12 Millimeter und ihrer flachen Höhe sehr wenig Bauraum in Anwendungen beanspruchen. Sie sind oft nur wenige Millimeter bis mehrere zwei Zenti-

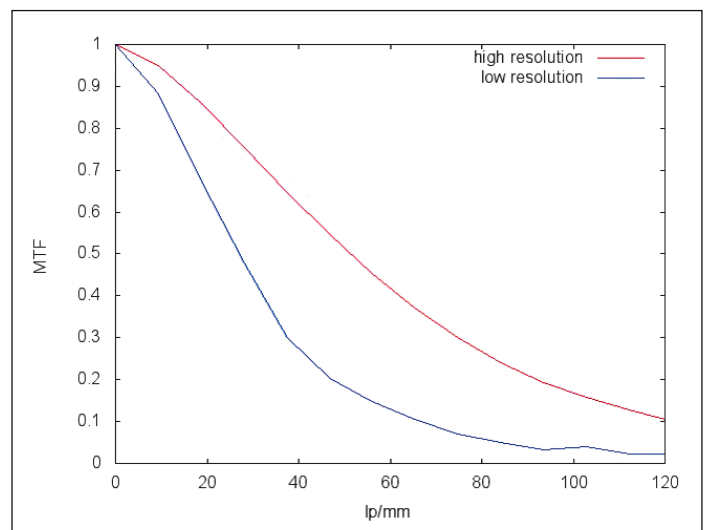
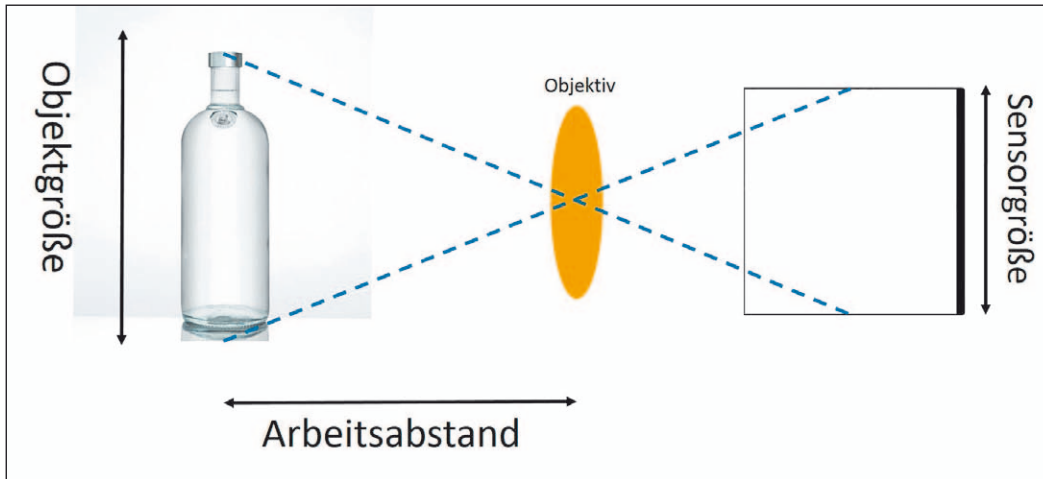


Bild 4: MTF-Diagramm zweier Objektive



**Bild 5:** Die Brennweite errechnet sich aus Objektgröße, Arbeitsabstand und Sensorgröße

meter hoch. Diese meist kurzbrennweitigen Objektive, oftmals Fish-Eyes, sind mit einer festen Blende ausgestattet und eignen sich insbesondere für die Abdeckung großer Sichtfelder von 160° oder sogar 180°. Mit ihrer geringen Größe sind sie optimal für die Ausleuchtung von kleinen Sensoren bis 2/3 Zoll in OEM-Entwicklungen geeignet. M12-Objektive kommen sehr oft in Mobile Devices sowie dem Automobil- und Sicherheitsbereich zum Einsatz. Rückfahrkameras erfassen Einpark szenarien, Überwachungskameras erfassen große Flächen oder Wartungsingenieure erweitern mit kamerabestückten Datenbrillen ihr natürliches Blickfeld um eine weitere Dimension.

Eine weitere Art von Spezialobjektiven für den Industriebereich stellen „Ruggedized“ Objektive dar, die insbesondere für raue Umgebungen mit einem hohen Maß an Bewegung oder Erschütterung gedacht sind. Auch in Anwendungen, in denen subpixelgenaue Messungen erforderlich sind, z. B. in 3D-Messsystemen für den Karosseriebau und die Prototypenfertigung sowie in Stereoskopiesystemen, können mit diesen „stoßfesten“ Objektiven präzisere und stabilere Ergebnisse erzielt werden. Das gilt auch für Anwendungen, bei denen die optische Achse unabhängig von der Objektiveposition stabil sein muss sowie in rauen Umgebungen wie bei Druckmaschinen, Anwendungen der Schieneninspektion und anderen anspruchsvollen Situationen. Um eine größtmögliche Stabilität der optischen Achse und eine perfekte Schwerkraftkompensation zu ermög-

lichen, sind sämtliche Glaselemente der stabilisierten Objektive verklebt. Eine besondere mechanische Konstruktion schützt gegen starke Vibrationen und Stoßbelastungen. Der Fokus-Einstellring beispielsweise wird mit einer selbstsichernden Mutter an Ort und Stelle gehalten. Anstelle mechanischer Irisblenden mit beweglichen Verschlusslamellen werden zur Auswahl des Blendenwertes austauschbare Irisplatten verwendet, die eingeklebt werden können.

### Die optimale Beleuchtung und Blende

Die Lichtverhältnisse einer Anwendung stellen ein weiteres Kriterium für die Auswahl des passenden Objektives dar. Dabei wird zum einen die zur Verfügung stehende Lichtmenge, also die Helligkeit betrachtet und

zum zweiten die Lichtfarbe bzw. Wellenlänge. Für die auf den Sensor treffende Lichtmenge ist innerhalb des Objektivs die Blende verantwortlich. Je nachdem wie weit offen oder geschlossen die Blende ist und wie lange belichtet wird, desto mehr oder weniger Licht trifft durch das Objektiv auf den Sensor. Die Blendenzahl ist das Verhältnis der Brennweite zum Durchmesser der Blendenöffnung – sie zeigt damit den Öffnungsgrad der Blende.

Der Öffnungsgrad der Blende ist für die Steuerung der Tiefenschärfe verantwortlich: je weiter offen die Blende, desto geringer die Tiefenschärfe, was eine geringe Auswertbarkeit über die gesamte Tiefe des Sichtfeldes bedeutet. Soll eine gleichbleibende Schärfe über einen Tiefenbereich des Bildes erreicht werden, muss dementsprechend eine

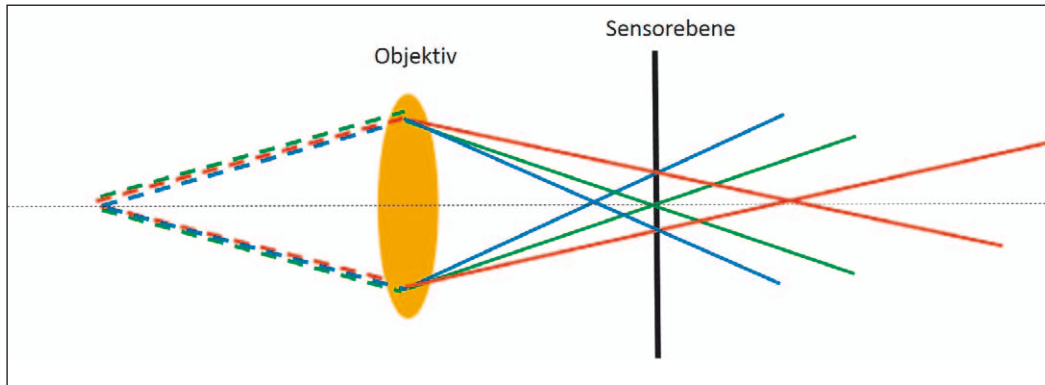
wenig geöffnete Blende und/oder eine kurze Brennweite gewählt werden. Hier muss allerdings beachtet werden, dass die möglicherweise entstehende Beugungsverzerrung kleiner Brennweiten keinen Einfluss auf die Bildqualität nimmt.

Da mit einer gering geöffneten Blende, zusätzlich abhängig von der Belichtungszeit, nur wenig Licht auf den Sensor treffen kann, muss eine gute Beleuchtung, gegebenenfalls mit künstlichen Lichtquellen, gewährleistet sein. Die ist zum Beispiel wichtig, wenn Produktionsprozesse on-the-fly mittels Bilderkennung gesteuert werden. Eine notwendig kurze Belichtungszeit mit einer hohen Bildrate pro Sekunde an einem sich schnell bewegenden Fließband und die dort vorhandenen Beleuchtungsbedingungen beeinflussen die Wahl der passenden Blende enorm. Die optimale Blendenzahl ergibt sich als bestmögliche Kombination aus hoher Tiefenschärfe und geringer Beugungsverzerrung. Für die Auswahl der optimalen Blende bietet sich für individuelle Applikationen eine praktische Simulation oder die Beratung durch einen Bildverarbeitungsexperten an. Als grobe Richtschnur wird bei mittlerer Blendenzahl meist die beste Auflösung erreicht.

C-Mount-Objektive verfügen über eine variable Blende, M12- oder Ruggedized Objektive werden dagegen mit einer festen Blende ausgestattet. Welche Blende eingesetzt werden soll, muss daher im Vorfeld der Objektivwahl feststehen.



**Bild 6:** Öffnungsgrade verschiedener Blenden



**Bild 7: Nicht korrigiertes Objektiv: Grünes Licht ist fokussiert, die Fokusebene von rotem und blauem Licht liegt hinter bzw. vor der Sensorebene**

Außerdem sind nicht alle Objektive für jede Blende geeignet. Benötigt die Anwendung eine hochgeöffnete Blende mit einer Blendenzahl kleiner als 1.4, kommen nur Spezialobjektive in Frage.

## Lichtfarbe und Wellenlänge verändern den Brennpunkt

Grundsätzlich sollte natürlich bereits außerhalb der Kamera eine optimale Ausleuchtung der Szenerie angestrebt werden, sei es mit zusätzlichen Lichtquellen an der Applikation oder mit der Einbindung von Beleuchtungseinheiten sowie Blitzsteuerungen in die Applikation selbst. Speziell, wenn das Bildverarbeitungssystem schnell bewegte Objekte analysieren oder unabhän-

gig vom Umgebungslicht funktionieren soll, ist eine zusätzliche Beleuchtung notwendig. Hier kommen aufgrund ihrer Langlebigkeit und Zuverlässigkeit meist LEDs zum Einsatz, die über entsprechende Steuerelektronik wie Schrittgeber oder Lichtschranken zum Auslösezeitpunkt der Kamera mittels eines Beleuchtungs-Controllers geblitzt werden.

Dieses Blitzen spart Strom, reduziert die Erwärmung der LEDs, erhöht damit ihre Lebensdauer, und das bei gleichzeitig deutlich höherer Lichtintensität. Der Einsatz farbiger LEDs und des passenden Filters vor dem Kameraobjektiv verringert zusätzlich den Einfluss von weißem oder andersfarbigem Umgebungslicht.

Die einfallende Lichtfarbe, messbar in der Wellenlänge, ist damit

auch ein ausschlaggebendes Kriterium für die Objektivwahl. Wird die Szene mit weißem Licht beleuchtet, das eine Mischung aus allen Lichtfarben ist, kommt es zu sogenannten Farbfehlern, deren Grund in den physikalischen Eigenschaften der Linsen liegt. Der Brechungsindex der Linsen ändert sich mit der Wellenlänge des Lichtes. Ultraviolettes und blaues Licht wird deutlich stärker gebrochen als rotes Licht, am wenigsten stark gebrochen wird infrarotes Licht. Da der Brennpunkt für blaues Licht näher an der Linse liegt, als der Brennpunkt für rotes Licht, ergeben sich für die unterschiedlichen Lichtfarben unterschiedliche Fokusebenen. Dieser Effekt nennt sich Dispersion. Neue Objektive sind hierfür im sichtbaren

Bereich korrigiert. Ist ein Objektiv bis in den nahen Infrarot-Bereich optimiert, heißt es meist „IR-corrected“.

## Zusammen ergeben alle Kriterien das optimale Objektiv

Sind alle Kriterien berücksichtigt, steht der Auswahl des geeigneten Objektivs für eine optimale Bildfassung nichts mehr im Weg. Die folgende Checkliste gibt einen Überblick, um aus der Vielzahl der angebotenen Objektive das richtige für die individuellen Anwendungsanforderungen zu wählen:

- Passt die Sensor- und Pixelgröße zum Bildkreis des Objektivs und seiner Auflösung?
- Welche Brennweite ergibt sich aus dem Arbeitsabstand und der gewünschten Bildgröße?
- Welchen Anschluss benötigt ihre Kamera und welche Bauform passt in ihre Anwendung?
- Wieviel Licht steht zur Verfügung und welche Blendenzahl ist optimal?
- Ist das Objektiv für die gewünschte Wellenlänge geeignet?

■ Framos GmbH  
[info@framos.com](mailto:info@framos.com)  
[www.framos.com](http://www.framos.com)