Passgenauer Baustein in der Machine-Vision-Prozesskette

Telezentrische Blue Vision-Objektive

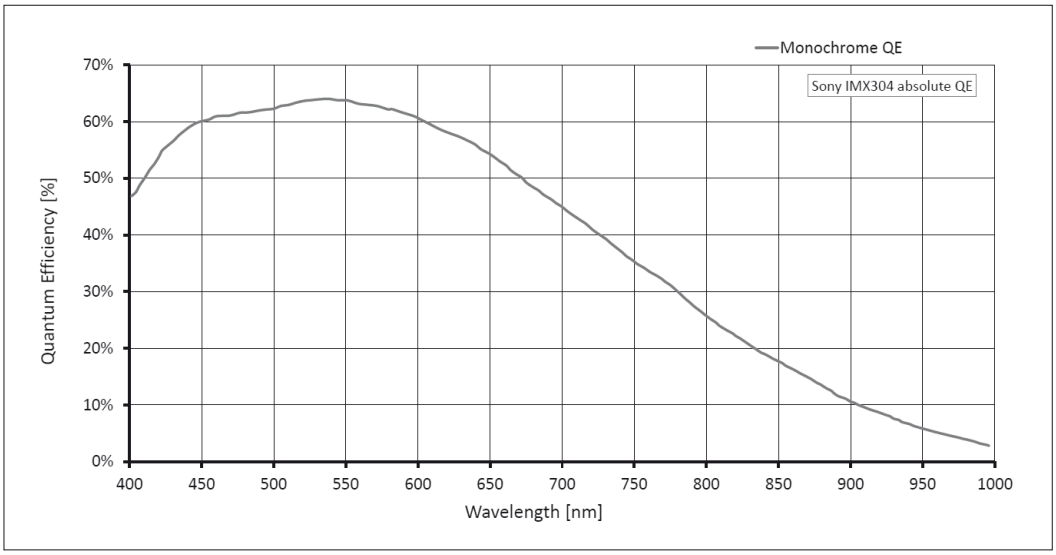

Bild 1: Quanteneffizienz für den monochromen Sensor Sony IMX304 (gemessen von Allied Vision Technologies GmbH)

Blaue LEDs bieten für die industrielle Bildverarbeitung einige Vorteile. Deshalb wurde bei Vision & Control eine eigene Serie telezentrischer Objektive speziell für diesen Spektralbereich entwickelt. Obwohl die Objektive auf den ersten Blick nur monochromatisch korrigiert werden müssen, gibt es dennoch einige Hürden bei dieser speziellen Objektiventwicklung.

Mit der Marktreife blauer LEDs eröffnen sich für die Bildverarbeitung ganz neue Möglichkeiten. Vormals wurde aufgrund der zuerst für diese Wellenlängen ausgereiften Technologie für die Bildverarbeitung die rote oder infrarote Wellenlänge verwendet. Und diese werden für Machine-Vision-Anwendungen auch häufig noch genutzt – ungeachtet der vielfältigen Vorteile, die sich durch den gezielten Einsatz blauen Lichts böten. Besonders im Bereich der Messtechnik, wo es auf eine besonders genaue Kantendetektion ankommt, ermöglicht die blaue Wellenlänge eine hohe Bildschärfe. Aber auch bei der Inspektion, wo es darum geht bestimmte Objektdetails zu erkennen, kann die blaue Wellenlänge feinere Strukturdetails abbilden. Dabei ist die mögliche Auflösung mit der blauen Wellenlänge im Vergleich zum Infraroten fast doppelt so groß und im Vergleich zum roten Licht ist sie noch fast ein Drittel höher.

Schärfentiefe

Ein weiterer Aspekt ist, dass telezentrische Objektive einen bestimmten Schärfentiefebereich erfordern. Denn nur so können die Objekte in ihrer Tiefe verzerrungsfrei und scharf abgebildet werden. Idealer Weise bietet das Objektiv über den gesamten Telezentriebereich eine bestimmte Schärfentiefe. Mit dem Einsatz der blauen Wellenlänge kann nun ein größerer Bereich des Objekts in der Tiefe scharf abgebildet werden. So können beispielsweise Bohrungen verzerrungsfrei abgebildet werden, ohne dass es zu Kantenverdeckungen kommt. Oder Bauteilkennzahlen können in verschiedenen Höhen abgelesen werden, ohne dass die am Grund von den hohen Bauteilen verdeckt werden, wie es in der Halbleiter-Industrie häufig gefordert wird.

Blendenzahl

Typischer Weise kommen hier die Blendenzahlen 10, 16 oder 22 zur Anwendung. Hier ermöglicht es die blaue Wellenlänge, die Blende im Vergleich zur roten oder infraroten Wellenlänge weiter zuzudrehen, um so eine höhere Schärfentiefe bei im Vergleich zu den herkömmlichen Wellenlängen gleichbleibenden Auflösung zu bekommen. Denn die Schärfentiefe ist vorrangig von der Blendenzahl abhängig. Eine hohe Güte bei der Abbildung ist für die korrekte Informationsübertragung in der Bildverarbeitung essentiell. So ist auch das Objektiv ein wesentlicher Kostenfaktor eines solchen Systems. Breitbandig korrigierte Objektive erfordern eine bestimmte Anzahl an Linsen. Der Preis eines Objektivs ist aber wesentlich durch die Anzahl der Linsen bestimmt. Um die Kosten der Objektive zu reduzieren, kann man sich auf einen Teil des Spektrums beschränken, in dem Fall nur für blaues Licht auslegen. Dadurch kann die Anzahl an Linsen wesentlich reduziert werden. Und dies war auch eine der Intensionen zur Entwicklung der neuen telezentrischen Blue Vision-Objektivserie.

Machine Vision Objektive

unterscheiden sich im Wesentlichen von Fotoobjektiven darin, dass sie nicht für das menschliche Auge bestimmt sind. Denn der Empfänger – ein CMOS-Chip – hat eine völlig andere Empfindlichkeit gegenüber den einzelnen Wellenlängen als das menschliche Auge. Dadurch ist es in den meisten Fällen auch gar nicht erforderlich, dass die Objektive breitbandig für das gesamte visuelle Spektrum korrigiert werden. Häufig ist die Verwendung einer einzigen Lichtfarbe ausreichend, um die notwendigen Objektinformationen zu erhalten. Es gibt sogar Fälle, wo sich die Abbildungsgüte gegenüber einer breitbandigen Abbildung sogar erhöht.

Im Folgenden werden nun einige wichtige Aspekte in der Machine Vision-Prozesskette aufgezeigt. – Angefangen von den LED-Eigenschaften, über Sensor-Empfindlichkeitskurve bis hin zu Besonderheiten bei der Objektiventwicklung.

LED-Eigenschaften

Die Umwandlung von elektrischer Energie in Licht kann im Blauen insbesondere für die Wellenlänge um 450 nm (Deep Blue) sehr effi-

Autorin:
Claudia Link,
Teamleiterin Optikentwicklung

Vision & Control
www.vision-control.com

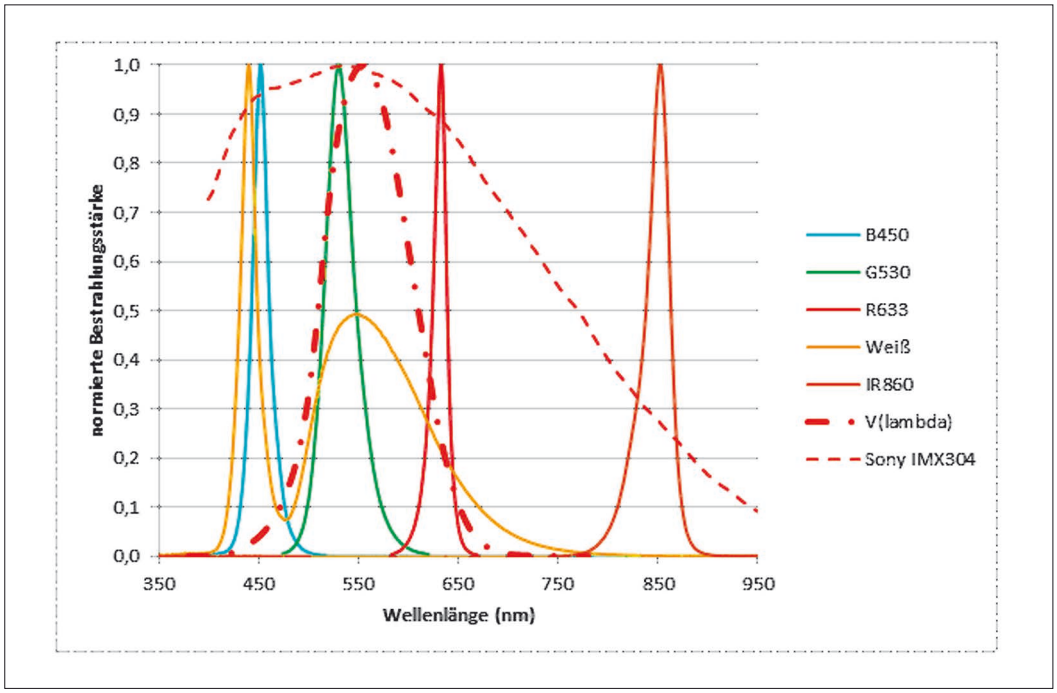

Bild 2: Messkurven typischer LED-Spektren im Vergleich zur Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges und zur Sensorempfindlichkeit.

zient erfolgen. Laut Herstellerangaben liegt die Strahlungseffizienz im Bereich von 52 bis 60 %. Aktuell gibt der Hersteller Osram für eine seiner LEDs eine Effizienz von 75 % an (Oslon SSL 150 GD CSHPM1.14). Die optische Effizienz bezeichnet das Verhältnis von austretendem Strahlungsfluss in W zu eingespeister elektrischer Energie ebenfalls in W. Um die Strahlungseffizienz jedoch mit der von LEDs anderer Lichtfarben vergleichen zu können, ist es erforderlich die üblichen lichttechnischen Angaben in entsprechende strahlungsphysikalische umzurechnen. Denn häufig werden diese noch für die anderen Wellenlängen des sichtbaren Lichts bzw. für weiße LEDs angegeben.

Optische Effizienz

So auch die optische Effizienz. Sie wird für den sichtbaren Spektralbereich in lm/W angegeben. Hier wird der austretende Lichtstrom in Lumen zur eingespeisten elektrischen Energie in W ins Verhältnis gesetzt. Die Einheit Lumen bedeutet, dass hier eine Wichtung mit der Farbempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges vorgenommen wurde. Die Umrechnung ist jedoch relativ leicht möglich. Die entsprechende Größe ist das Strahlungsäquivalent k, welches für eine bestimmte spektrale Verteilung den Umrechnungsfaktor von einer lichttechnischen Größe X_v mit einer Einheit verbunden mit Lumen (lm) in die entsprechende strahlungsphysikalische Größe X_e mit einer Einheit verbunden mit Watt (W) angibt: $k = X_v/X_e$. In Tabelle 1 werden typische Werte dieses Umrechnungsfaktors für häufig genutzte LED-Wellenlängen gezeigt. Sie können aus dem Verhältnis der gemessenen Werte für die Beleuchtungsstärke E_v und Bestrahlungsstärke E_e bestimmt werden. Diese wurden durch eigene Messungen mit einem Spektralradiometer ermittelt. Mit den LED-spezifischen Größen für das Strahlungsäquivalent war es nun möglich, die strahlungsphysikalischen Effizienzen in W/W für die anderen LED-Farben im sichtbaren Spektralbereich zu berechnen. Eine Übersicht für typische Effizienzen verschiedener LED-Farben liefert Tabelle 1.

Lichtquelle	LED-Serie	Farbe	Messwert Beleuchtungsstärke E_v (lx oder lm/m²) @ 200 mm AA	Messwert Bestrahlungsstärke E_e (W/m²) @ 200 mm AA	Umrechnungsfaktor (Strahlungs-äquivalent) (lm/W)	Lichtausbeute LED (lm/W)	optische Effizienz (W/W, Angabe in %)	Quantenefficienz Sensor (Sony 304) (W/W, Angabe in %)	Gesamteffizienz LED+Sensor
L-CLR-10x150-B450-P-SL	Oslon SSL 150	Deep Blue	7082,9	196,8	36,0	k. A.	52 %*	60 %	31 %
L-CLR-10x150-G520-P-SL	Oslon SSL 150	Grün	44013,9	78,9	558,0	88*	16 %	64 %	10 %
L-CLR-10x150-R633-P-SL	Oslon SSL 150	Rot	21668,2	115,0	188,5	77*	41 %	57 %	22 %
L-CLR-10x150-W5k7-P-SL	Oslon SSL 150	Weiß	49827,2	154,0	323,6	151*	47 %	ca. 60 %	28 %
L-CLR-10x150-IR860-P-SL	Oslon Black	IR 860	1,7	91,7	0,0185	k. A.	30 %*	18 %	5 %

*Herstellerangabe

Tabelle 1: LED-Effizienzen bei verschiedenen Lichtfarben

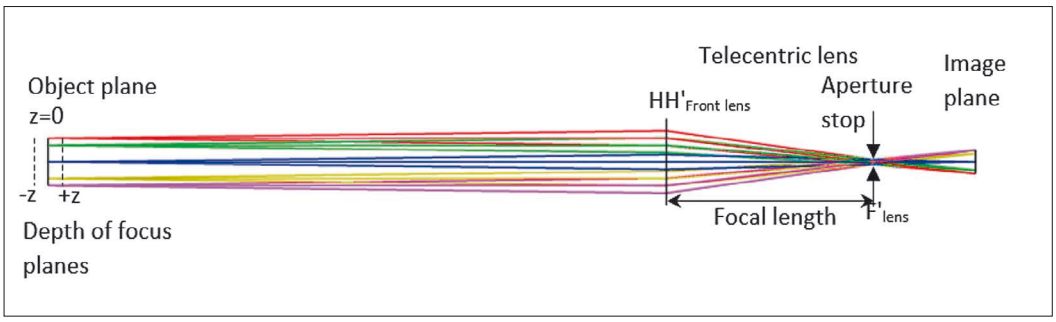

Bild 3: Prinzipieller Aufbau eines objektseitig telezentrischen Objektivs

Es zeigt sich folgender Trend:

Blaue LEDs haben den größten Wirkungsgrad. Die Effizienz für „Deep Blue"-LEDs mit Wellenlängen um 450 nm wird direkt mit 52 % angegeben oder 0,52 W/W. Dies bedeutet, dass 52 % der eingehenden elektrischen Leistung in W auch in Lichtenergie umgewandelt werden. Hingegen liegt sie bei rotem Licht im Bereich von 40 % und bei grün nur bei 19 %.

Falls man die Umrechnung über das Strahlungsäquivalent nicht vornimmt, so wirken von den einfarbigen LEDs die grünen am effizientesten, da für sie der höchste lichttechnische Wirkungsgrad in lm/W angegeben wird und für sie auch der höchste Beleuchtungsstärkewert ermittelt wurde. – Dies kommt aber nur daher, dass das Auge in diesem Bereich am empfindlichsten ist. Es muss also weniger Lichtleistung eingesetzt werden, um einen bestimmten Helligkeitseindruck zu erzeugen.

Eigene Messungen konnten die durch den Hersteller angegebene hohe Effizienz der blauen LED bestätigen. Jüngst wurde eine Spotbeleuchtung (SL-Serie) entwickelt, bei der die Bestrahlungsstärke der blauen Variante, die der roten um mehr als das Doppelte bei gleicher aufgenommener elektrischer Leistung übersteigt.

Zusammengefasst kann die hohe Effizienz der blauen LED auf zwei Weisen genutzt werden: Sollen die Lichtquellen vergleichbare Bestrahlungsstärken liefern, dann kann der Strom für die blaue LED geringer eingestellt werden. Werden die LEDs hingegen mit gleichem Strom beaufschlagt, so führt dies direkt zu einer höheren Bestrahlungsstärke der Lichtquelle. In beiden Fällen führt dies zu einer geringeren Wärmeentwicklung an der LED.

Sensor-Eigenschaften

Der Vergleich von Beleuchtungsstärke und Bestrahlungsstärke zeigt, dass die grüne und die weiße LED dem Auge am hellsten erscheinen, jedoch objektiv gesehen, die blaue LED die meiste Leistung liefert. Einem Empfänger mit flacher Empfindlichkeitskurve würde sie dann am hellsten erscheinen. Empfänger sind heutzutage typischer Weise CMOS-Sensoren. Passend zur einfarbigen LED sind monochrome Empfänger für Bildverarbeitungssysteme in den meisten Fällen ausreichend. Die Empfindlichkeitskurven moderner CMOS-Sensoren weisen einen nahezu flachen Verlauf im sichtbaren Spektralbereich auf. Der zugehörige Messwert wird als spektrale Quanteneffizienz bezeichnet und stellt das Verhältnis von ausgehender elektrischer Leistung zu eingehender Strahlungsleistung des Empfängers bei einer bestimmten Wellenlänge dar. . Exemplarisch ist sie hier für die Kamera Allied Vision Manta 1236G mit dem Sensor der Firma Sony vom Typ IMX304 angegeben. Sie wurde uns von der Firma Allied Vision Technologies GmbH zur Verfügung gestellt. Sie basiert auf firmeneigenen Messungen (Bild 1).

Hellempfindlichkeitskurve

Um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Bestrahlungsstärke-Kurven der LEDs und der Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges zu erhalten, wurden die auf ihr eigenes Maximum normierten Kurven in Bild 2 mit eingezeichnet. Hieran ist ersichtlich, dass sie sich deutlich von der Hellempfindlichkeitskurve des Auges unterscheidet, wenn auch ihr Maximum ebenfalls im grünen Spektralbereich liegt. Diese Kurve verläuft jedoch viel breiter und ist auch noch im nahen Infrarot-Spektralbereich empfindlich. Interessant ist nun die Ermittlung der Gesamteffizienz des Zusammenwirkens von LED und Sensor. Hierfür müssen die einzelnen Wirkungsgrade multipliziert werden. Demnach beträgt die Gesamteffizienz im Blauen 31 %, im Grünen 10 % und im Roten 22 %. Im Infraroten beträgt sie gerade einmal 5 %. Hier zeigt sich, dass die Gesamteffizienz im Blauen am höchsten ist.

Optikdesign telezentrischer Objektive für blaue LEDs

Genereller Schwerpunkt beim Design von Objektiven für Machine Vision sind die Korrektur von Bildfeldwölbung, Astigmatismus und Koma. Die Verzeichnung sollte in Maßen gehalten werden, kann jedoch häufig durch eine Kalibrierung herausgerechnet werden. Auch der Randabfall spielt erfahrungsgemäß eine untergeordnete Rolle und kann durch geeignete Verfahren abgeglichen werden. Die erst genannten Bildfehler führen jedoch zu einem Verlust an übertragenen Objektinformationen, die dann nicht wieder durch einen Algorithmus ersetzt werden können.

Nun könnte der Eindruck entstehen, dass wenn ein Objektiv für eine bestimmte LED-Wellenlänge optimiert werden soll, es reichen würde nur die oben benannten Abbildungsfehler zu korrigieren und auf eine Korrektion der Farbfehler zu verzichten. Es ist aber so, dass das Spektrum einzelner farbiger LEDs schon so breit ist, dass auch hier eine Farbkorrektur erfolgend muss. – Sowohl Farblängs- als auch Farbquerfehler bedürfen einer Optimierung.

Die Schwierigkeit bei der Entwicklung telezentrischer Objektive ist, dass sich die Öffnungsblende in der bildseitigen Brennebene der Frontoptik befinden muss (Bild 3).

Objektivtyp	Abb.-Maßstab	Arbeitsabstand (mm)	Sensorgröße	Baulänge (mm)	Max. Durchmesser (mm)
TO18/4.1-100-V-B	0,23	100	1/4"	57,4	30,5
TO18/6.0-95-V-B	0,33	95	1/3"	64,1	30,5
TO18/9.0-85-V-B	0,50	85	1/1,8"	75,5	30,5
TO18/11.0-80-V-B	0,62	80	2/3"	83,2	30,5
TO30/4.1-100-V-B	0,15	100	1/4"	92,7	42
TO30/6.0-100-V-B	0,20	100	1/3"	98,3	42
TO30/9.0-85-V-B	0,31	85	1/1,8"	106,2	42
TO30/11.0-80-V-B	0,67	80	2/3"	111,3	42

Tabelle 2: Übersicht TO18- und TO30-Serien

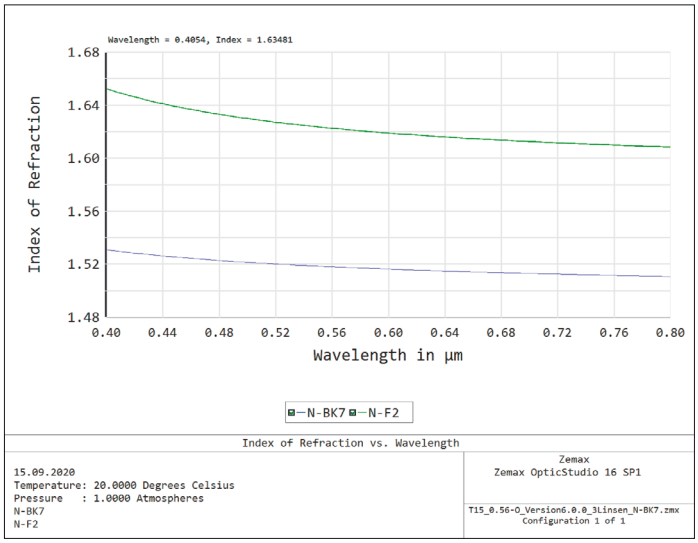

Bild 4: Dispersionskurven typischer Glassorten

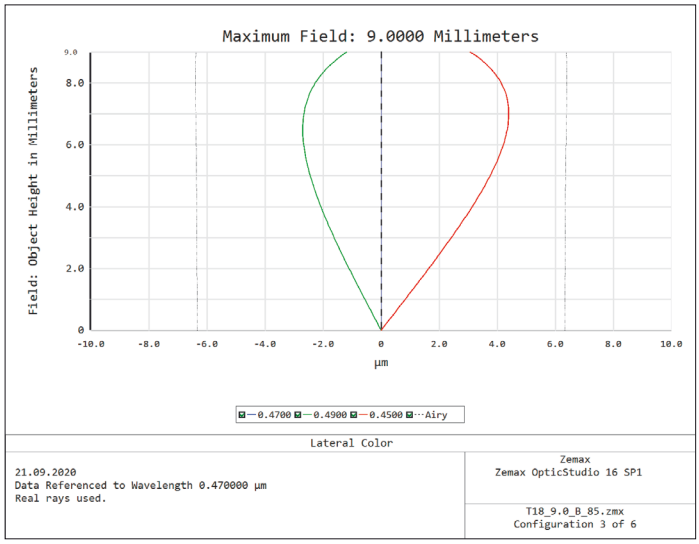

Bild 5: Farbquerfehler des TO18/9.0

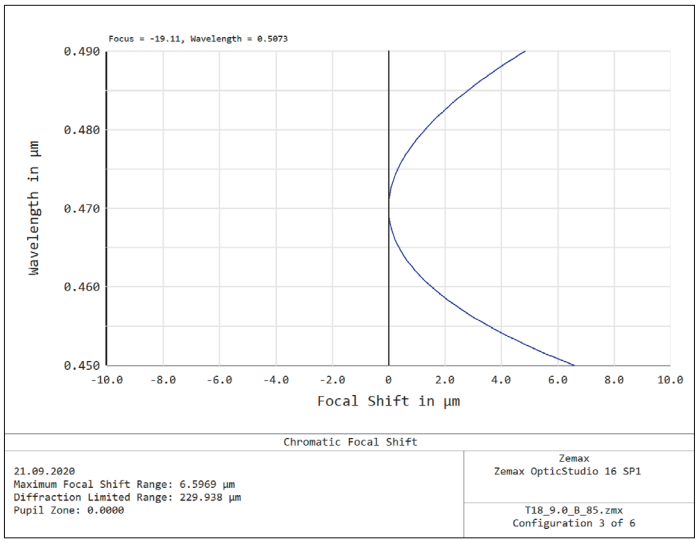

Bild 6: Farblängsfehler TO18/9.0

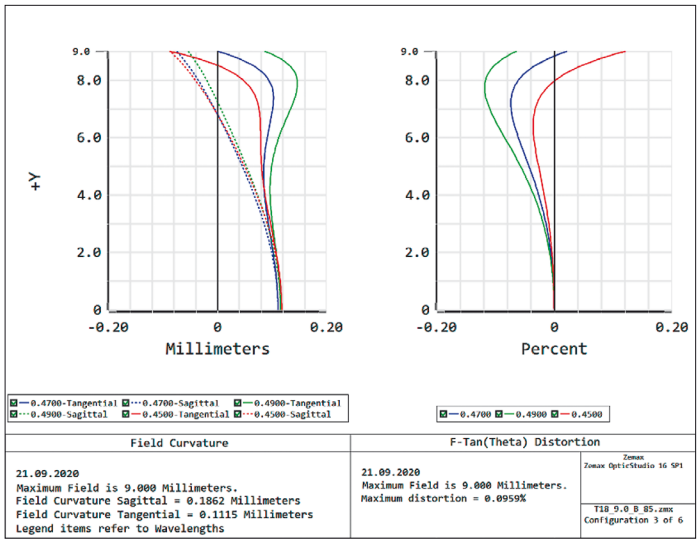

Bild 7: Bildfeldwölbung und Verzeichnung TO18/9.0

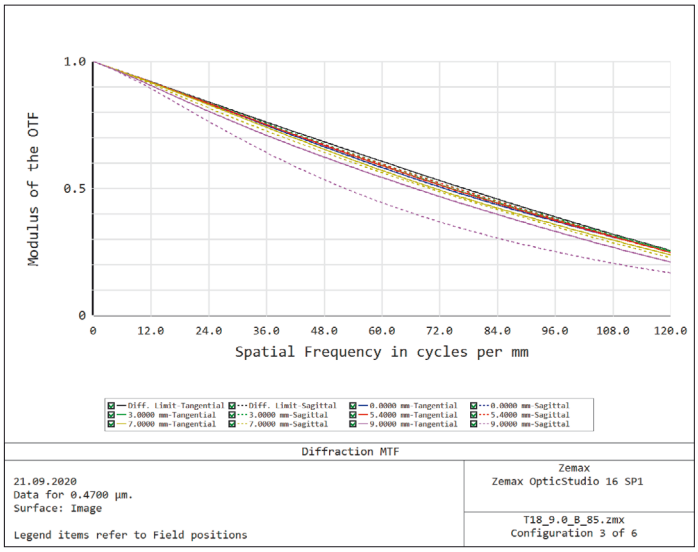

Bild 8: Modulationstransferfunktion TO18/9.0 bei F11

Sie muss also einen gewissen Abstand zu den abbildenden Elementen haben. Dies reduziert erheblich die Freiheitsgrade bei der Korrektur der Objektive. Insbesondere die Fehler Koma, Astigmatismus, Verzeichnung und der Farbquerfehler sind davon betroffen, da sie von der Blendenlage abhängen.

Farbfehler

Typischer Weise haben monochromatische LEDs (unabhängig vom Spektralbereich) eine Halbwertsbreite von ca. 20 bis 30 nm. Die spektrale Breite bei einer Intensität von 20 % kann durchaus schon 40 bis 60 nm betragen (Bild 2).

Durch die Dispersion, d. h. die Abhängigkeit des Brechungsindexes von der Wellenlänge, kommt es auch bei dieser relativ geringen spektralen Bandbreite zu einem nicht vernachlässigbaren Farblängs- und Farbquerfehler. Die Dispersion ist im Blauen größer als im Roten, so dass diese Farbfehler von umso größerer Bedeutung sind, je kürzer die Wellenlänge ist, was gerade bei der blauen LED der Fall ist (Bild 4).

Der Farblängsfehler einer Linse, also der Unterschied der bildseitigen Schnittweite, ist abhängig von der Wellenlänge (über den Brechungsindex) und von der Brennweite (über die Krümmungsradien). Als typisches Beispiel kann eine Einzellinse mit einer Brennweite von 100 mm aus einem Standardglas (N-BK7) betrachtet werden. Dann beträgt er für den blauen Spektralbereich bereits 600 µm hingegen

	F6			F8			F11			F16			F22		
Wellenlänge (nm)	Auflösung (µm)	Kantensteilheit (µm)	Schärfentiefe (mm)	Auflösung (µm)	Kantensteilheit (µm)	Schärfentiefe (mm	Auflösung (µm)	Kantensteilheit (µm)	Schärfentiefe (mm)	Auflösung (µm)	Kantensteilheit (µm)	Schärfentiefe (mm)	Auflösung (µm)	Kantensteilheit (µm)	Schärfentiefe (mm)
470	8.2	3.9	2.48	11.0	5.2	3.37	15.2	7.1	4.76	22.0	10.3	7.17	30.3	14.2	10.34
525	9.2	4.3	2.49	12.4	5.8	3.39	16.9	8.0	4.81	24.7	11.5	7.28	33.9	15.9	10.55
635	11.1	5.2	2.53	14.9	7.0	3.45	20.6	9.6	4.91	29.9	13.9	7.51	40.8	19.1	10.99
850	14.9	7.0	2.57	20.0	9.3	3.55	27.4	12.9	5.11	40.0	18.7	7.95	55.6	25.7	11.85

Tabelle 3: Auflösung, Kantensteilheit und Schärfentiefe bei verschiedenen Blendenzahlen für ein ideales Objektiv mit dem Abbildungsmaßstab 0,5

für den roten nur ca. 250 µm. Im Falle eines hochdispersiven Glases wie N-F2 verstärkt sich der Effekt. Hier beträgt der Farblängsfehler im Blauen fast 1 mm und im Roten bereits 360 µm. Fallen die Bildebenen derart weit auseinander, so wirkt sich das in einer deutlich reduzierten Abbildungsgüte aus.

Die erforderliche Blendenlage im Fokus der Frontoptik leistet insbesondere dem Farbquerfehler Vorschub. Der Hauptstrahl trifft dann nicht mehr die Linsenmitte, sondern den Linsenrand, so dass dieser wie ein Prisma wirkt. Der Farbquerfehler führt dazu, dass der Abbildungsmaßstab abhängig von der Wellenlänge ist. Er steigt mit größer werdenden Objektfeld. Er muss für scharfe Bilder besonders im Blauen unbedingt beachtet werden. Denn ein solcher Farbquerfehler kann bei einem Objektiv (Abbildungsmaßstab 0,56, objektseitig telezentrisch) ohne besondere Farbkorrektur im Blauen durchaus im Bereich von 50 µm liegen (gerechnet für einen 2/3"-Sensor). Bei einem vergleichbaren Objektiv für Rot ist er geringer, da die Dispersion hier nicht so stark ausfällt.

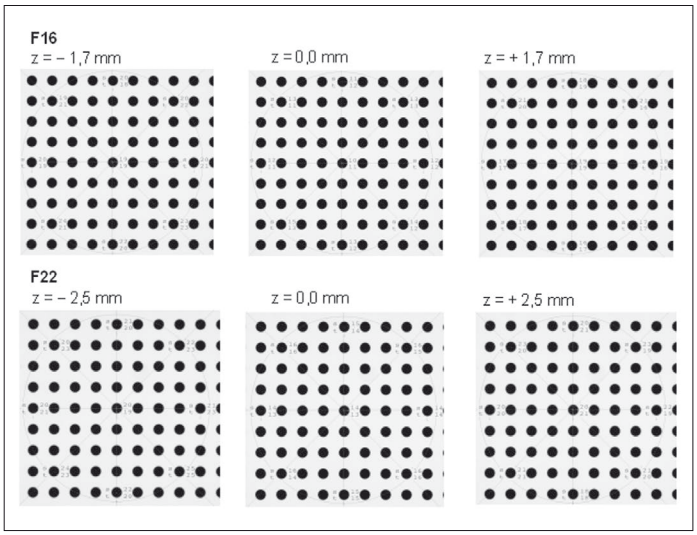

Bild 9: Aufnahmen eines Punktgitters mit dem Objektiv TO18/9.0 bei verschiedenen Blendenzahlen in der Schärfenebene (z = 0,0 mm) und in der vorderen und hinteren Schärfentiefe. Die Werte der Kantensteilheit in µm sind mit eingeblendet.

Hier beträgt er für das gewählte Beispiel nur 20 µm. In beiden Fällen ist dies größer als ein Pixel (ca. 3,5 µm) und würde zu Farbsäumen im Bild führen.

Korrektur

Korrigiert werden kann der Farblängsfehler über eine Kombination eines Kron- und eines Flintglases, also eines Glases niedriger und eines hoher Dispersion (wie zum Beispiel N-BK7 und N-F2). Der Farbquerfehler hingegen kann nur durch einen symmetrischen Systemaufbau zur Blende vollständig korrigiert werden. Dafür müsste das System aber auch bildseitig telezentrisch sein. Dies bedeutet, dass nach der Öffnungsblende noch Linsen so platziert werden, dass die Öffnungsblende wiederum im objektseitigen Fokus der nachgeschalteten Linsengruppe sitzt. Dies würde aber wieder den Einsatz zusätzlicher Linsen erfordern und steht dem Ziel entgegen, Linsenanzahl und Systembaulänge möglichst gering zu halten. Für höchste Anforderungen an die Abbildung bietet Vision & Control hier tatsächlich auch eine eigene Baureihe bi-telezentrischer Objektive an, die sogenannten TOB-Serie.

Die Lösung

Die Kunst bei der Entwicklung der Blue Vision-Objektive bestand nun darin, die zur Verfügung stehenden Linsen so geschickt anzuordnen, dass der Farbquerfehler unterhalb der Größe eines Pixels reduziert wird. Dann können nämlich die Farbsäume nicht mehr aufgelöst werden und stören somit auch nicht mehr. Für die Farbkorrektur wurden die Blue-Vision-Objektive schwerpunktmäßig bei 470 nm und zusätzlich bei den Wellenlängen 450 nm und 490 nm korrigiert. Als Beispiel zeigen Bild 5 den Farbquerfehler und Bild 6 den Farblängsfehler des TO18/9.0. Der Farbquerfehler ist zwischen 490 nm und 470 nm für diese Objektiv kleiner als 3 µm und zwischen 450 nm und 470 nm kleiner als 4,5 µm, was also im Bereich der Pixelgröße liegt. Der Farblängsfehler beträgt weniger als 7 Mikrometer. Die Bilder 7 und 8 zeigen Bildfeldwölbung und Verzeichnung und die Modulationstransferfunktion für Blendenzahl 11. Hier ist das System über das gesamte Feld nahezu beugungsbegrenzt.

Vier telezentrische Objektive

Die Blue Vision-Objektivreihe besteht momentan aus je vier telezentrischen Objektiven mit denen Objektfelder von 18 mm sowie 30 mm Durchmesser abgebildet werden können. Sie werden anhand dieses maximalen Objektfelddurchmessers entsprechend TO18- bzw. TO30-Serie benannt. Die Abbildungsmaßstäbe der einzelnen Modelle sind so gewählt, dass sie alle gängigen Sensorgrößen voll abdecken. So ergeben sich jeweils Bildfelddiagonalen von 4,1 mm (1/4"); 6 mm (1/3"); 9 mm

(1/1,8“) sowie 11 mm (2/3“). Besonderer Wert wurde auf eine kompakte Bauform und eine minimale Anzahl an Linsen gelegt. So ist etwa das TO18/4.1-100-V-B nur geringfügig länger als ein konventionelles entozentrisches Objektiv (Tabelle 2). Die komplette TO18-Serie kommt mit nur 3 Linsen aus. Bei der TO30-Serie musste eine 4. Linse mit verwendet werden. Durch die kleine Linsenanzahl ist auch das Gewicht entsprechend gering.

Zusammenhang Auflösung, Kantensteilheit, Schärfentiefe

Eingangs wurde erwähnt, dass die Abbildung mit blauem Licht eine höhere Schärfe liefert und, dass sich die Schärfentiefe bei gleichbleibender Auflösung durch den Einsatz blauen Lichts erhöht, da die Blende weiter zugedreht werden kann. Tabelle 3 ermöglicht es, diesen Zusammenhang exemplarisch für ein Objektiv mit dem Abbildungsmaßstab 0,5 nachzuvollziehen. Sie zeigt hierfür Auflösung und Schärfentiefe bei den typischen LED-Wellenlängen im Blauen, Grünen, Roten und Infraroten. Zusätzlich ist noch die Kantensteilheit mit eingetragen. Die Berechnungen wurden für ein ideales Objektiv mit dem Programm ZEMAX durchgeführt. Daran können die maximal möglichen Werte ermittelt werden. Abbildungsfehler können diese reduzieren.

Als Auflösung

wird hier die Periode eines Gitters angegeben, welches bei der Abbildung mit dem Objektiv gerade so noch einen Kontrast (hier 20 %) im Bild liefert. Je kleiner diese Periode ist, desto höher ist die Auflösung. Diese Periode ist der Kehrwert der übertragenen Ortsfrequenz. Die maximal übertragbare Ortsfrequenz eines optischen Systems ist umgekehrt proportional zu Blendenzahl F# und zur Wellenlänge λ. Sie berechnet sich im Bildraum aus:

$R'_g = 1/(F\# \times \lambda)$.

Die Kantensteilheit wird als Breite einer Kante im Bildraum definiert zwischen den Intensitätsleveln 10 % und 90 %. Die Kante ist umso steiler, je kleiner dieser Wert ist.

Schärfentiefe kann nur erreicht werden, wenn auf die maximal mögliche Auflösung verzichtet wird. Die in Tabelle 3 angegebene Schärfentiefe ist der Bereich vor und hinter der Objektebene, bei dem bildseitig Strukturen von 20 LP/mm mit einem Kontrast von 20 % abgebildet werden können. Dies entspricht für das gewählte Beispiel objektseitig einer Strukturperiode von 100 µm. Die bildseitige Kantenbreite liegt hierbei bei circa 35 µm. Sie verläuft also in etwa über 10 Pixel bei eine Pixelgröße von 3,5 µm.

Zusammenhänge

Aus Tabelle 3 lassen sich folgende Zusammenhänge ablesen:

Innerhalb einer Blendenstufe steigen Strukturauflösung und Kantensteilheit je kleiner die Wellenlänge ist. Wie erwartet zeigt sich, dass die Auflösung im Blauen bei gleicher Blendenzahl am höchsten von allen betrachteten Wellenlängen ist. Entsprechend werden die Kanten auch am steilsten im Blauen abgebildet (kleinster Wert). Die Schärfentiefe hingegen bleibt in etwa auf dem gleichen Niveau, ist also relativ unabhängig von der Wellenlänge. Je größer die Blendenzahl ist, d. h. umso kleiner der Durchmesser der Öffnungsblende, desto geringer werden Auflösungsvermögen und Kantensteilheit.

Da die Kantensteilheit bildseitig angegeben ist, ist sie nur abhängig von der Blendenzahl und nicht vom Abbildungsmaßstab des Objektivs. Hingegen sind Auflösung und Schärfentiefe sehr wohl vom Abbildungsmaßstab abhängig. Für die in der Tabelle angegebene Auflösung wurde aus der bildseitigen Ortsfrequenz bei einem Bildkontrast von 20 % über den Abbildungsmaßstab M die objektseitige Strukturperiode berechnet. Für eine bildseitige Ortsfrequenz von 200 LP/mm und einem Abbildungsmaßstab von 0,5 beträgt die objektseitige Ortsfrequenz 100 LP/m und somit die maximale Auflösbare Strukturperiode 10 µm. Für die Schärfentiefe S gilt für Makroobjektive folgender vereinfachter Zusammenhang:

$S = r'F\#(M-1)/M^2$

Dabei ist r‘ der zulässige Zerstreuungskreisdurchmesser im Bild. Hieran wird ersichtlich, dass die Schärfentiefe direkt von der Blendenzahl abhängt. Von einer Blendenzahl zur nächsten beträgt der Faktor 1,4. Dies entspricht einer Verdopplung bzw. Halbierung der Lichtmenge. Dies ist aber gerade auch das Verhältnis zwischen den Wellenlängen bei Rot und bei Blau: 635 nm/470 nm = 1,4. Der Faktor zwischen 2 Blendenzahlen beträgt 2. Dies ist ungefähr aber auch gerade das Verhältnis zwischen der infraroten und der blauen Wellenlänge mit 1,8.

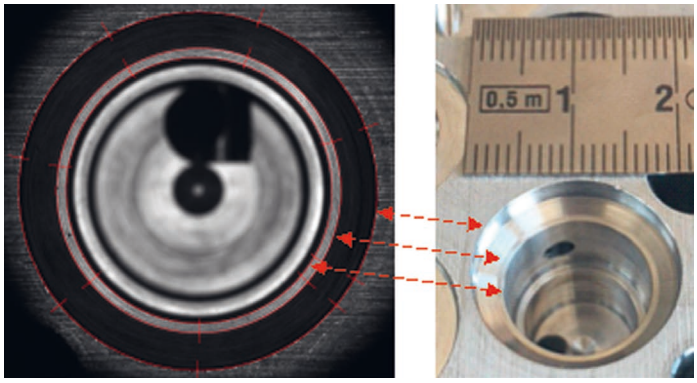

Bild 10: Kantendetektion in verschiedenen Höhen mit Hilfe der Schärfentiefe des TO18/9,0 bei Blendenzahl F16.

Es lässt sich feststellen, dass durch den Einsatz blauer LEDs im Vergleich zu roten LEDs bei vergleichbarer Auflösung eine Blendenstufe für die Schärfentiefe gewonnen werden kann und im Vergleich zu infraroten LEDs zwei Blendenstufen. Der gefundene Zusammenhang gilt unabhängig vom Abbildungsmaßstab.

Folgende Bilder wurden mit einem Objektiv TO18/9.0-85-B-V aufgenommen (Bild 9). Es wurden bei den Blendenzahlen 16 und 22 jeweils ein Testgitter in der die Objektebene, also im Arbeitsabstand von 85 mm, und in die vordere und hintere Schärfenebene aufgenommen. Als Kamera wurde die eingangs beschrieben Allied Vision Kamera Manta 1236G mit einer Pixelgröße von 3,45 µm verwendet. Die maximal zulässige Kantensteilheit für den Schärfentiefebereich wurde hier auf 20 µm begrenzt. Damit ergibt sich für die Blendenzahl F16 eine Schärfentiefe von 3,4 mm und für die Blendenzahl F22 eine Schärfentiefe von 5 mm. Diese Werte entsprechen ungefähr der Hälfte der in Tabelle 3 maximal abgeschätzten Schärfentiefe mit dem etwas erweiterten Kriterium von 35 µm Kantenbreite.

Zur Veranschaulichung der Schärfentiefe wurde mit demselben Objektiv ein Bauteil mit Bohrungen verschiedener Durchmesser in verschiedenen Höhen mit blauem LED-Licht bei 470 nm abgebildet (Bild 10). Bei Blende 22 können innerhalb der Schärfentiefe von 5 mm die oberen drei Kanten fehlerfrei detektiert und deren Durchmesser somit bestimmt werden.

Zusammenfassung

Hochauflösende telezentrische Objektive finden bei folgenden Aufgaben Anwendung:

- Bauteilwerte in verschiedenen Höhen bestimmen
- Objektabmessungen, wie Bohrungsdurchmesser in verschiedenen Höhen am Bauteil bestimmen
- mehrere Bauteile unterschiedlicher Höhe mit der gleichen Objektiveinstellung vermessen
- Bauteile vermessen, deren Abstand vom Objektiv nicht genau definiert werden kann.

Es wurde gezeigt, dass hierfür die Verwendung von Lichtquellen mit blauen LEDs am effizientesten ist, da sich hier im Zusammenspiel von LED-Effizienz und Sensor-Effizienz der höchste Wirkungsgrad ergibt. Weiterhin wurde gezeigt, dass es für telezentrische Objektive für diesen Spektralbereich einer farbangepassten Optimierung bedarf. So lässt sich die mögliche hohe Auflösung und hohe Schärfentiefe bei der Abbildung mit blauem Licht auch wirklich nutzen. Hierfür bieten die neu entwickelten, kompakten und leichten Objektive der Blue Vision-Serie einen passenden Baustein zur effizienten und hochaufgelösten Bildgewinnung in der Machine-Vision-Prozesskette. ◄