

## ToF-Systemdesign – Teil 2:

# Optisches Design für Kameras, die Entfernungen mit der Lichtlaufzeit messen

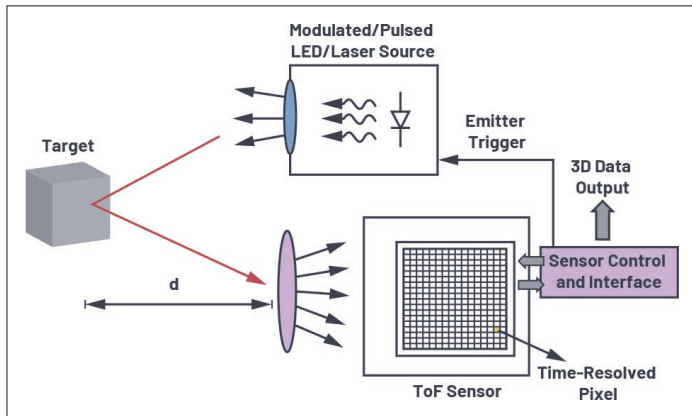


Bild 1: Das Prinzip der ToF-Technik

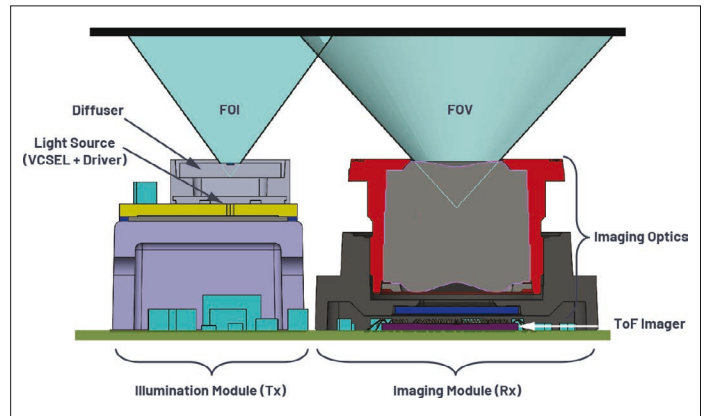


Bild 2: Beispiel des Querschnitts durch eine optische ToF-Systemarchitektur

ToF ist eine immer stärker aufkommende 3D-Sensor- und Bildverarbeitungstechnik, die zahlreiche Anwendungen in Bereichen, wie autonome Fahrzeuge, virtuelle und erweiterte Realität, Identifizierung neuer Merkmale und Objektdimensionierung gefunden hat. ToF-Kameras nehmen Entfernungsbilder auf, indem sie die Zeit messen, die das Licht benötigt, um von einer Lichtquelle zu Objekten in einem bestimmten Bereich und zurück zu einem Pixel-Array zu laufen. Die spezielle Technik wird als kontinuierliche Wellenmodulation (CW) bezeichnet, die eine indirekte ToF-Messmethode ist. In einer CW-ToF-Kamera wird das Licht von einer amplitudenmodulierten Lichtquelle von Objekten im Sichtfeld der Kamera (FOV = field of view) zurückgeworfen und die Pha-

senverschiebung zwischen dem gesendeten und reflektierten Lichtstrahl gemessen. Durch das Messen der Phasenverschiebung bei unterschiedlichen Modulationsfrequenzen kann man einen Tiefenwert für jeden Bildpunkt berechnen. Die Phasenverschiebung erhält man, indem man die Korrelation zwischen dem gesendeten und dem reflektierten Lichtstrahl bei unterschiedlichen relativen Verzögerungen mit einer Photonenmisch-Demodulation in den Bildpunkten (in-pixel photon mixing demodulation [2]) misst. Das Prinzip von CW-ToF ist in Bild 1 illustriert.



Autorin:

Tzu-Yu Wu,

Senior Optical Design Engineer

Analog Devices Inc.

www.analog.com

### Optische Systemarchitektur der Entfernungsmessung

Bild 2 zeigt die optische Systemarchitektur. Sie kann in zwei große Untergruppen aufgeteilt werden: das Bildverarbeitungsmodul (auch als Empfänger oder Rx bezeichnet) und das Leuchtmodul (auch als Sender oder TX bezeichnet). Die folgenden Abschnitte erklären die Funktion jeder Komponente und die besonderen Anforderungen des ToF-Systems, sowie korrespondierende Designbeispiele.

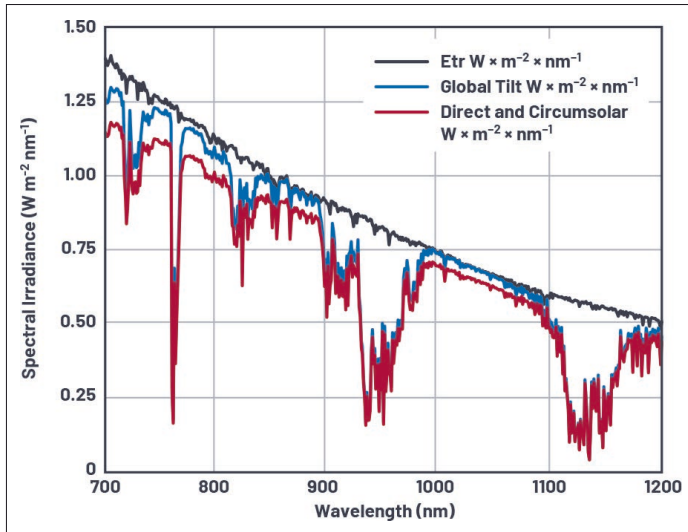
### Leuchtmodul

Das Leuchtmodul besteht aus einer Lichtquelle, einem Treiber, der die Lichtquelle bei hoher Modulation betreibt und einer Streuscheibe, die den Lichtstrahl von der Lichtquelle auf das gewünschte ausgeleuchtete Sichtfeld (FOI) projiziert, wie in Bild 2 illustriert.

ToF-Module nutzen abhängig von der Wellenlänge normalerweise schmalbandige Lichtquellen mit geringer Temperaturentwicklung, wie oberflächenemittierende Laser (vertical cavity surface emitting lasers = VCSELs) oder flankenemittierende Laser (edge emitting lasers = EELs). Lichtemittierende Dioden (LEDs) sind allgemein zu langsam für die Anforderungen der ToF-Modulation. VCSELs sind wegen ihrer geringeren Kosten, kleineren Maße und höherer Zuverlässigkeit in den letzten Jahren sehr populär geworden. Zudem lassen sie sich sehr einfach in ToF-Module integrieren. Verglichen mit EELs, die Licht von der Seite emittieren, und LEDs, die Licht sowohl von der Oberseite als auch den Seiten emittieren, strahlen VCSELs das Licht senkrecht von ihrer Oberfläche ab, was eine bessere Ausbeute in der Fertigung und geringere Produktionskosten bedeutet. Darüber hinaus kann das gewünschte FOV mit einem speziell dafür entwickelten Diffusor mit der entsprechenden Streuscheibe und dem optischen Profil erreicht werden. Die Optimierung des Lasertreibers sowie das elektrische Design und Layout der Leiterplatte (PCB) und der Lichtquelle sind besonders

### Auf einen Blick

Die Optik spielt eine zentrale Rolle bei Kameras, die Entfernungen über das Laufzeitverfahren (Time of Flight) von Licht messen, und das optische Design bestimmt die Komplexität und Machbarkeit des endgültigen Systems und seiner Leistungsfähigkeit. 3D-ToF-Kameras haben spezielle ausgeprägte Charakteristiken [1], die besondere optische Anforderungen stellen. Dieser Artikel präsentiert die optische Systemarchitektur zur Entfernungsmessung – die aus dem bildgebenden optischen Modul, dem ToF-Sensor auf dem Empfänger und dem Lichtquellenmodul auf dem Sender besteht – und diskutiert, wie man jedes dieser Module optimieren kann, um die Leistung des Sensors und des Gesamtsystems zu steigern.



**Bild 3: Spektrale Beleuchtungsstärke der Sonne im NIR [3]**

wichtig, um einen hohen Modulationskontrast und eine hohe optische Leistung zu erzielen.

### Beleuchtungs-Wellenlänge (850 nm und 940 nm)

Obwohl das ToF-Arbeitsprinzip nicht von der Wellenlänge abhängt (sondern von der Laufzeit des Lichts) und die Wellenlänge deshalb keinen Einfluss auf die Genauigkeit haben sollte, kann die Wahl der Wellenlänge in manchen Einsatzbereichen dennoch die Leistung des Gesamtsystems beeinträchtigen. Im Folgenden einige Betrachtungen zur Auswahl der Wellenlänge:

### • Quanteneffizienz und Ansprechempfindlichkeit des Sensors

Die Quanteneffizienz (QE) und Ansprechempfindlichkeit hängen direkt zusammen.

- QE ist ein Maß für die Fähigkeit eines Fotodetektors Photonen in Elektronen umzuwandeln.

$$QE = \frac{\# \text{ of electrons collected}}{\# \text{ of photons impinging on a photodetector}} \text{ in } \%$$

- R ist ein Maß der Fähigkeit eines Fotodetektors optische Leistung in elektrischen Strom zu wandeln

$$Responsivity = \frac{\text{current produced at photodetector}}{\text{optical power on a photodetector}}$$

$$R = QE \times \frac{q}{hc/\lambda}$$

wobei q die Elektronenladung, h die Plank'sche Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit und  $\lambda$  die Wellenlänge sind.

Die QE von siliziumbasierten Sensoren ist bei 850 nm rund doppelt so hoch oder noch besser als bei 940 nm. Die CW-ToF-Sensoren von ADI haben 44 % QE bei 850 nm und 27 % QE bei 940 nm. Für die gleiche optische Beleuchtungsstärke führen eine höhere QE und R zu einem besseren Signal-Rauschabstand (SNR) besonders, wenn nicht sehr viel Licht an den Sensor zurückgestrahlt wird, was bei sehr entfernten oder schwach reflektierenden Objekten der Fall ist.

### • Menschliche Wahrnehmung

Obwohl das menschliche Auge unempfindlich für den nahen Infrarotbereich (NIR) ist, kann Licht mit einer Wellenlänge von 850 nm vom

menschlichen Auge noch wahrgenommen werden. Licht mit 940 nm ist jedoch unsichtbar für das menschliche Auge.

### • Sonnenlicht

Obwohl das Sonnenlicht sein Maximum im sichtbaren Spektralbereich hat, ist die Energie in den NIR-Regionen immer noch recht signifikant. Sonnenlicht (und allgemeines Umgebungslicht) kann das Tiefenrauschen (depth noise) erhöhen und den Sichtbereich einer ToF-Kamera reduzieren. Wegen der atmosphärischen Dämpfung gibt es im Bereich zwischen 920 nm und 960 nm glücklicherweise einen Abfall in der Bestrahlungsstärke des Sonnenlichts, in der die Bestrahlungsstärke der Sonne verglichen mit 850 nm nur halb so stark ist (Bild 3). Bei Anwendungen im Freien liefert der Betrieb des ToF-Systems bei 940 nm eine höhere Immunität gegen Umgebungslicht und führt zu einer genaueren Entfernungsmessung.

### Strahlungsintensität (optische Leistung pro Raumwinkel)

Die Lichtquelle generiert eine konstante optische Leistung, die innerhalb des von der Streuoptik erzeugten Sichtfeldes in einen Raum verteilt wird. Wenn das FOI größer wird, sinkt die Energie pro Steradianen (sr) – das ist die Strahlungsintensität (W/sr). Es ist wichtig zu verstehen, dass die Kompromisse zwischen FOI und Strahlungsintensität die SNR beeinflussen und damit den Tiefenbereich (Entfernung) des ToF-Systems.

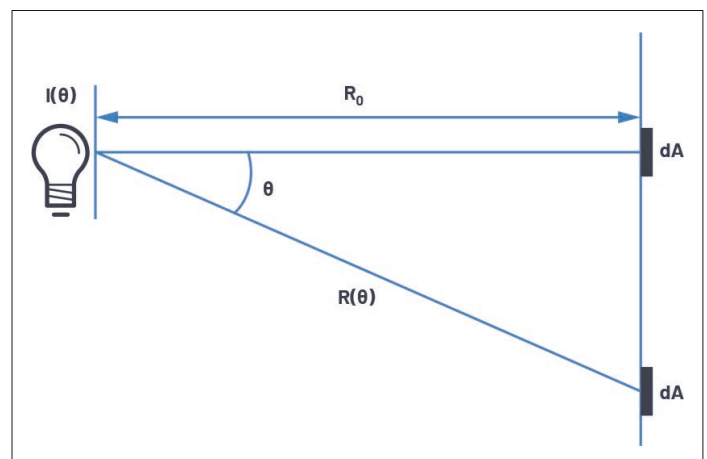
Tabelle 1 listet einige Beispiele des FOI und der entsprechenden Strahlungsintensität auf, normalisiert auf eine Strahlungsintensität im Winkel von 60° x 45°. Man beachte, dass die Strahlungsintensität als optische Leistung pro rechteckigen Raumwinkel berechnet wird.

Fall	Horizontale FOI	Vertikale FOI	Normalisierte Bestrahlungsstärke
1	60°	45°	100%
2	52°	52°	100%
3	60°	60°	76%
4	72°	58°	67%
5	78°	65°	56%

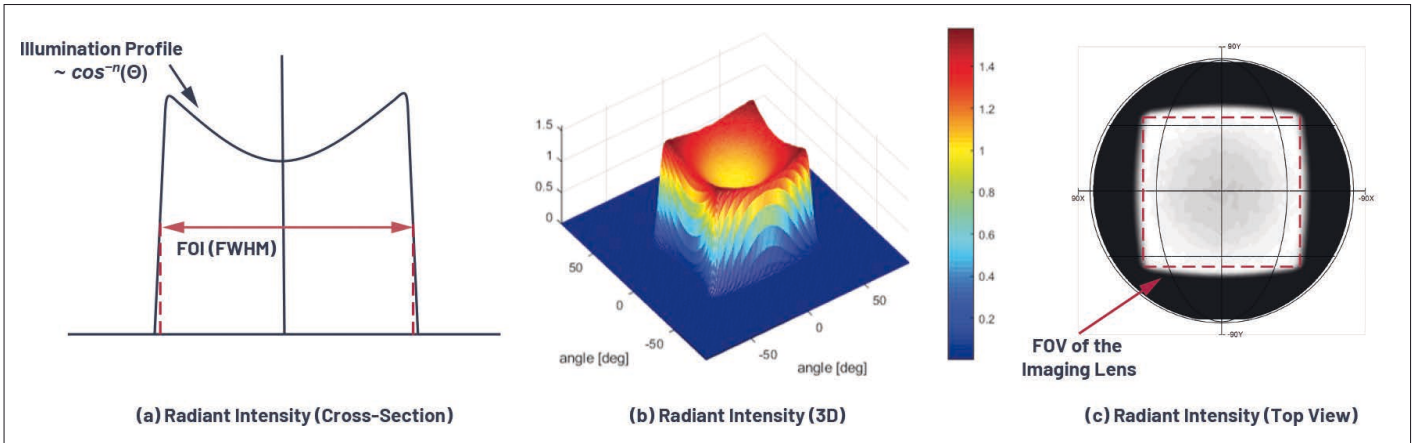
**Tabelle 1: Normalisierte Strahlungsstärke**

### Spezifikationen des Profils der Beleuchtungsstärke

Um das Beleuchtungsprofil vollständig zu definieren, sollten mehrere Charakteristika klar spezifiziert sein, wie die Profilform, Profildbreite, optische Effizienz (das ist die in einem bestimmten FOV enthaltene Energie) und der optische Leistungsabfall außerhalb der FOI. Die Spezifikationen des



**Bild 4: Verteilung der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Intensität**



**Bild 5: Beispiel eines Beleuchtungsprofils**

Beleuchtungsprofils sind normal als Strahlungsstärke im rechtwinkligen Raum definiert. Mathematisch ist das folgendermaßen ausgedrückt:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Mit  $d\Phi$  als die in den Raumwinkel  $d\Omega$  abgestrahlte Leistung. Das FOI muss mit dem Seitenverhältnis des Bildsensors übereinstimmen und ist folglich entweder quadratisch oder rechteckig.

### Form des Beleuchtungsprofils innerhalb des FOI

Das häufigste Profil der Strahlungsstärke in einer großflächigen ToF-Ausleuchtung hat die Form eines Fledermausflügels. Dieses variiert in  $\cos^n(\theta)$ , um den Abfall (das ist die relative Beleuchtung) der Bildverarbeitungslinse zu kompensieren. Bild 5 demonstriert das Beispiel eines Beleuchtungsprofils in Form eines Fledermausflügels. Wenn man von einem flachen Ziel eine konstante Beleuchtungsstärke am Bildpunkt-Array des Imagers erreichen möchte, sollte man auch einen  $\cos^3(\theta)$ -Abfallfaktor in der Beleuchtungsstärke  $E$  zwischen dem Zentrum und den Kanten des Ziels ( $W/m^2$ ) beachten, der folgendermaßen definiert ist:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I(\theta)\cos(\theta)}{R(\theta)^2} = \frac{I(\theta)\cos^3(\theta)}{R_0^2}$$

wobei  $E$  die Beleuchtungsstärke,  $dA$ , die von der optischen Leistung bestrahlte Oberfläche,  $R(\theta)$  der Abstand der Lichtquelle zu  $dA$ , definiert in Bild 4, und  $d\Omega = dA\cos(\theta)/R(\theta)^2$  sind.

### Breite des Profils

Die Breite des Profils bestimmt das FOI des Ausleuchtungsprofils. Es kann als volle Breite mit halber maximaler oder  $1/e^2$  der maximalen Intensität definiert werden. Um eine Fehlanpassung zwischen der Abbildungsoptik und der Toleranz des Diffusors aufzunehmen, ist das FOI normalerweise etwas größer als das FOV der Linse, um dunkle Bildpunkte zu vermeiden.

Die Breite des Profils ist die Faltung des Intensitätsprofils der Lichtquelle mit der Diffusor-Antwort für einen kollimierten Strahl. Je breiter der Eingangsabweichungswinkel zum Diffusor ist, desto weiter und langsamer ist die Übergangsflecke. Eine breitere und langsamere Übergangsflecke resultiert darin, dass mehr Energie außerhalb des FOI fällt, was optische Leistungsverluste verursacht. Das Akzeptanzkriterium für solche Verluste kann mit den beiden folgenden Anforderungen spezifiziert werden.

### Optische Effizienz - in der FOV der Abbildungsoptik enthaltene Energie

Diese Spezifikation definiert, wie viel Energie vom abbildenden Modul empfangen wird und ist spezifiziert als:

$$\text{Optical efficiency} = \frac{2D \text{ integrated optical power inside the lens FOV}}{2D \text{ integrated optical power of the entire illumination profile}} \% \times \text{transmission of the diffuser}$$

Bild 5 illustriert das Konzept der 2D-Integration des Beleuchtungsprofils im FOV.

### Optischer Leistungsabfall außerhalb des FOI

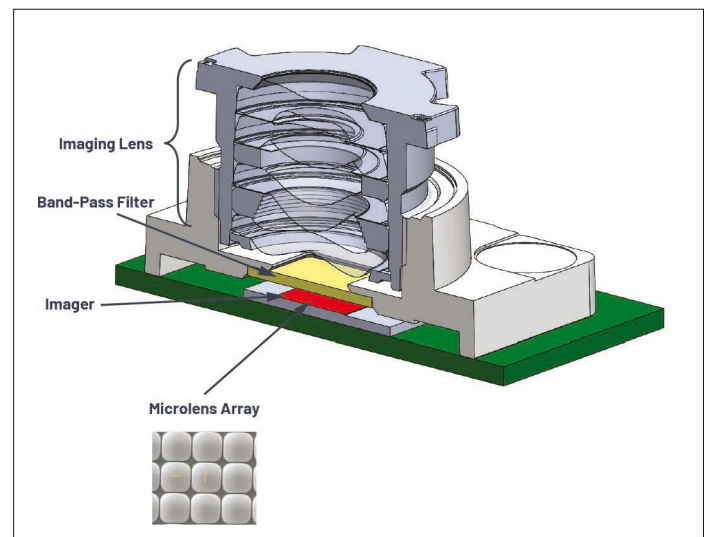
Optical power drop-off outside the FOI =

$$\frac{\text{Total integration of illumination profile} - \text{integration of illumination profile within FOI}}{\text{Total integration of illumination profile}} \%$$

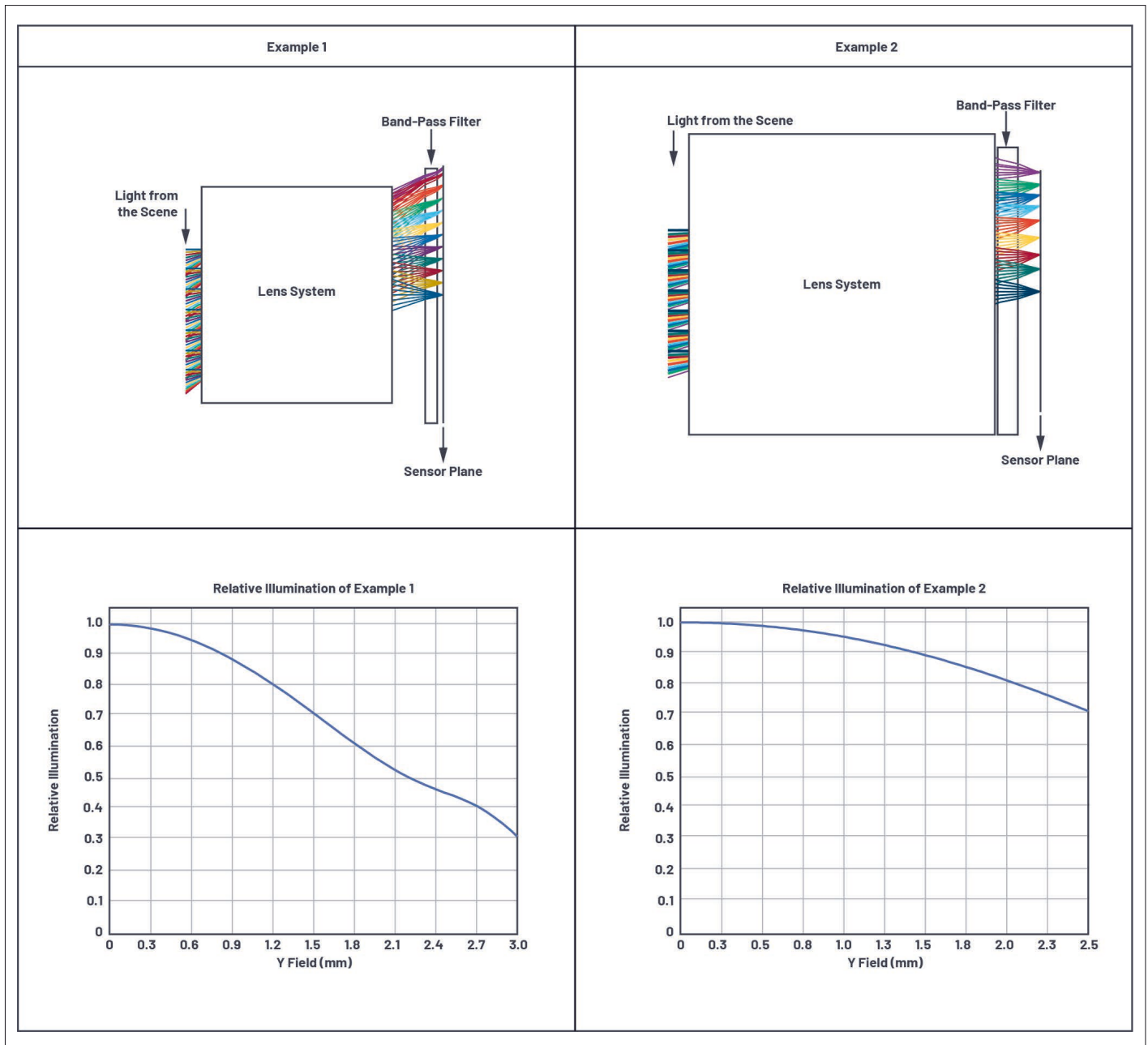
Ganz allgemein kann die optische Effizienz verbessert werden, indem man eine Kollimationslinse zwischen der Lichtquelle und dem Diffusor einsetzt, um den Eingangswinkel für den Diffusor zu reduzieren, oder durch Wahl einer Lichtquelle mit einem kleineren Divergenzwinkel.

### Bildgebendes Modul

Das Aufnahmemodul besteht aus dem bildgebenden Linsensystem, einem Bandpassfilter (BPF) und einem Mikrolinsen-Array am Imager. Die Dicke und Art des Materials auf der Rückseite der optischen Anordnung des Imagers sollte auf eine geringe Rück-Reflexion optimiert werden. Bild 6 zeigt die Illustration eines solchen bildgebenden Moduls.



**Bild 6: Illustration des bildgebenden Moduls**



**Bild 7: Beispiele der relativen Beleuchtungsstärke**

## Betrachtungen zum Design der abbildenden ToF-Linse

Da die ToF-Kamera Licht sammelt, das von einer aktiven Beleuchtung generiert wird, beeinflussen die Effizienz und Gleichförmigkeit der Lichtsammlung am Pixel-Array die Gesamtleistung. Die Linsen müssen eine hohe Sammelwirkung und Übertragung sowie geringes Streulicht aufweisen. Im Folgenden sind Design-Betrachtungen für ToF-Linsen beschrieben, die sich klar von traditionellen Kameralinsen unterscheiden.

### Effizienz der Lichtsammlung

Die Effizienz der Lichtsammlung ist proportional zu  $1/(f/\#)^2$ , wobei  $f/\# = (\text{Brennweite})/(\text{Größe der Blendenöffnung})$  ist. Je kleiner  $f/\#$  ist, desto besser ist die Effizienz. Es gibt jedoch einige Kompromisse bei einem optischen System mit kleinem  $f/\#$  zu beachten. Da die Blendenöffnung größer wird, gibt es mehr Randlichtabfall (Vignettierung) und Abbildungsfehler, was zu größeren Herausforderungen beim Design der Optik führt. Ein System mit geringem  $f/\#$  tendiert auch zu einer geringeren Tiefenschärfe.

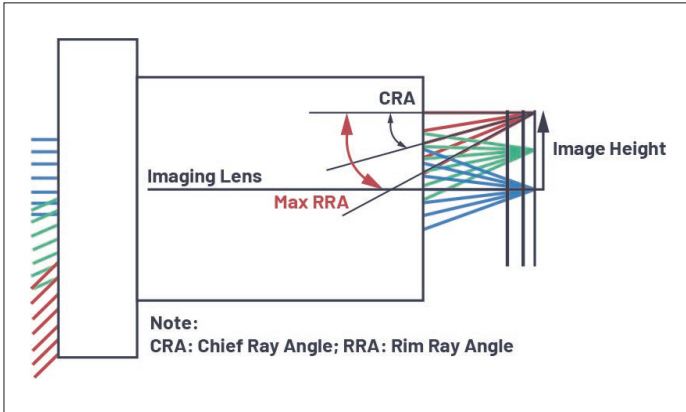
## Relative Ausleuchtung (RI) und Hauptstrahlwinkel (Chief-Ray-Angle CRA)

RI ist definiert als:

$$RI = \frac{\text{Illumination at a single point on the sensor}}{\text{Maximum illumination within the field}}$$

Die Beleuchtungsstärke des Sensors sinkt gemäß dem  $(\cos q)^4$ -Gesetz in einem Verzerrungs- und vignettierungsfreien Linsensystem, in dem  $q$  der CRA-Auftreffwinkel auf der Sensorebene ist. Das Ergebnis ist eine relative Verdunkelung des Bildes in Richtung Sensorkanten. Der Abfall der Einstrahlung lässt sich mit einer negativen Verzerrung des Linsensystems reduzieren.

Der maximale CRA an der Sensorkante sollte basierend auf den Spezifikationen für das Mikrolinsen-Array des Imagers optimiert werden. Ein kleinerer CRA hilft die Bandbreite des BPF zu verschmälern, um eine bessere Immunität gegen Umgebungslicht zu erreichen.



**Bild 8: Maximaler CRA einer bildgebenden Linse**

Die folgenden Beispiele demonstrieren, wie der CRA und die Größe des fokussierten Lichtkegels (effektive  $f/\#$ ) über dem Sichtfeld die RI beeinflussen. Das Linsensystem von Beispiel 1 in Bild 7 hat größere CRAs und allmählich abnehmende Bildkegel (das entspricht steigender  $f/\#$ ), da sich der Feldwinkel vergrößert. Die korrespondierende RI fällt mit dem Feldwinkel signifikant ab, wie im korrespondierenden RI-Ausdruck zu erkennen. Beispiel 2 in Bild 7 demonstriert, dass die RI bei Minimierung des CRA recht gut beibehalten werden kann, und auch die uniforme  $f/\#$  über dem Feld erhalten bleibt.

## Streulicht

Streulicht ist jedes unerwünschte Licht in einem System, das vom Sensor erkannt werden könnte. Streulicht kann von Quellen in und außerhalb des Sichtfeldes stammen, die ein Geisterbild durch geradzählige Reflexionen erzeugen (z. B. Linsenreflexionen). Streulicht kann auch von optisch/mechanischen Strukturen und jeder anderen streuenden Oberfläche ausgehen. ToF-Systeme sind besonders empfindlich auf Streulicht, weil die Ausbreitung von Streulicht in alle Richtungen unterschiedlich lange optische Pfade zu einem Bildpunkt beisteuern, was zu Ungenauigkeiten der Entfernungsmessung führt. Deshalb müssen einige Strategien im Entwicklungsprozess eingesetzt werden, um Streulicht zu reduzieren. Dazu zählen die Antireflexionsbeschichtung (AR) und die mechanische Blende, Abdunkeln der Linsenkanten und der Montagestruktur sowie ein kundenspezifisches Design der BPF zur Optimierung der Wellenlänge und des CRA.

Im Folgenden einige Dinge, die Streulicht in einem System beeinflussen.

## Vignettierung

Idealerweise sollte es keine Vignettierung in einem ToF-System geben. Die Vignettierung schneidet die bildgebenden Strahlen ab und wird manchmal als eine Technik zur Verbesserung der Bildqualität eingesetzt, allerdings auf Kosten der Helligkeit in den peripheren Sichtfeldern. Die abgeschnittenen Strahlen reflektieren jedoch häufig im Linsensystem und führen wiederum zu Problemen mit Streulicht.

## AR-Beschichtung

Die Anti-Reflexions-Beschichtung der optischen Elemente reduziert die Reflexion jeder Oberfläche und kann den Einfluss von Linsenreflexionen auf die Berechnung der Tiefenschärfe deutlich reduzieren. AR-Beschichtungen sollten sorgfältig für den Wellenlängenbereich der Lichtquelle und den Winkelbereich der Auftreffwinkel auf den Linsenoberflächen ausgelegt werden.

## Anzahl der Linsenelemente

Obwohl das Hinzufügen weiterer Linsenelemente eine höhere Freiheit bietet, die Designspezifikation und eine bessere Bildqualität bezüglich der Auflösung zu erreichen, kann dies auch zu einer Erhöhung der

unvermeidlichen Rückreflexionen von den Linsenelementen sowie steigenden Komplexität und Kosten führen.

## Bandpassfilter (BPF)

Der BPF schneidet den Anteil von Umgebungslicht aus und ist essenziell für ToF-Systeme. Das BPF-Design sollte auf die folgenden Parameter maßgeschneidert sein, um die bestmögliche Leistung zu erhalten:

- Linsenparameter wie  $f/\#$  und CRA über dem Sichtfeld.
- Parameter der Lichtquelle wie Bandbreite, nominale Wellenlängentoleranz und thermische Drift.
- Materialeigenschaften des Substrats für eine kleine Drift des Auftreffwinkels, abhängig von der Wellenlänge oder geringe thermische Drift in Abhängigkeit der Wellenlänge.

## Mikrolinsen-Array

Ein rückseitenbeleuchteter ToF-Sensor (BSI) hat normalerweise ein Mikrolinsen-Array, das die Strahlen für den Bildsensor bündelt und damit die Anzahl an Photonen maximiert, die den Pixel-Modulationsbereich erreichen. Die Geometrie der Mikrolinsen ist auf höchste Absorption innerhalb der Bildpunktregion optimiert, in der Photonen in Elektronen gewandelt werden.

In vielen Linsendesigns steigt der CRA der Linsen, da auch die Bildhöhe an den Rändern des Sensors anwächst, wie in Bild 8 gezeigt. Dieser schräge Einfallwinkel führt zu Absorptionsverlusten im Bildpunkt und Übersprechen zwischen benachbarten Pixeln, wenn der CRA zu groß ist. Es ist deshalb wichtig, eine Abbildungslinse so zu entwerfen oder zu wählen, dass der CRA der Linse den Spezifikationen des Mikrolinsen-Arrays entspricht, für das sie entwickelt ist. Ein optimaler CRA, der zum ToF-Sensor ADSD3100 von ADI passt, liegt bei rund  $12^\circ$  für die horizontalen und vertikalen Kanten des Sensors.

## Zusammenfassung

ToF-Optiken stellen ganz spezielle Anforderungen, um eine optimale Leistung zu erzielen. Dieser Artikel bietet einen Überblick über die optische Architektur einer 3D-ToF-Kamera und Entwicklungs-Richtlinien für die Beleuchtungs- und bildgebenden Module, um bei der Entwicklung eines solchen optischen Systems und/oder Auswahl der Komponenten zu helfen. Für das Beleuchtungsmodul sind die Schlüsselfaktoren die Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und die Fähigkeit, die Lichtquelle mit hoher Modulationsfrequenz und bei hohem Modulationskontrast betreiben zu können. Betrachtungen zur Auswahl der Wellenlänge von 850 nm und 940 nm werden detailliert geschildert sowie auch, wie man das Ausleuchtungsprofil spezifiziert. Für das bildgebende Teilmodul sind das Linsendesign einschließlich  $f/\#$ , CRA der den Spezifikationen der Mikrolinsen entspricht, und die Streulichtkontrolle wichtig für die Leistung des Gesamtsystems.

## Referenzen

- [1] Paul O'Sullivan und Nicolas Le Dortz. "Time of Flight System Design - Part 1: System Overview." Analog Dialogue, Vol. 55, No. 3, July 2021.
- [2] Cyrus S. Bamji, Swati Mehta, Barry Thompson, Tamer Elkhatib, Stefan Wurster, Onur Akkaya, Andrew Payne, John Godbaz, Mike Fenton, Vijay Rajasekaran, Larry Prather, Satya Nagaraja, Vishali Mogalapu, Dane Snow, Rich McCauley, Mustansir Mukadam, Iskender Agi, Shaun McCarthy, Zhanping Xu, Travis Perry, William Qian, Vei-Han Chan, Prabhu Adepu, Gazi Ali, Muneeb Ahmed, Aditya Mukherjee, Sheethal Nayak, Dave Gampell, Sunil Acharya, Lou Kordus, und Pat O'Connor. "IMpixel 65nm BSI 320MHz demodulated TOF Image sensor with 3 $\mu$ m global shutter pixels and analog binning." 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), February 2018.
- [3] "Reference Air Mass 1.5 Spectra." National Renewable Energy Laboratory. ◀