

Hochauflösende Lichtlaufzeit-Kamera (Time-of-Flight-Kamera)

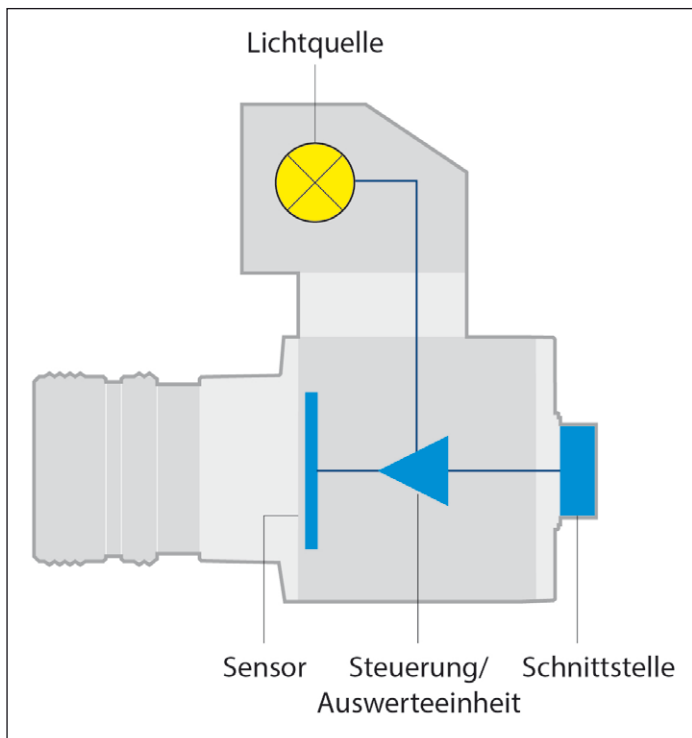


Bild 1: Komponenten der Time-of-Flight-Kamera

Licht breitet sich mit etwa 300.000.000 Metern pro Sekunde aus. Wenn wir die Laufzeit des Lichtes zwischen zwei Punkten messen, dann können wir auch ihre Entfernung ausrechnen. Diese Tatsache macht man sich als Messprinzip in Lichtlaufzeit-Kameras (Time-of-Flight-Kameras) zunutze. Eine Lichtlaufzeit-Kamera liefert zu jedem Bildpunkt nicht nur die Helligkeit, sondern zentimetergenau die Entfernung der lichtreflektierenden Oberfläche zur Kamera. In diesem White Paper stellen wir am Beispiel einer Basler Lichtlaufzeit-Kamera vor, wie diese Lichtlaufzeitmessung funktioniert.

Die Basler Lichtlaufzeit-Kamera verfügt bereits über 640 x 480 Bildpunkte und liefert 15 Bilder pro Sekunde. Das entspricht 4,6 Millionen Entfernungsmessungen in nur einer Sekunde. Höhere Auflösungen sind in Vorbereitung.

Aufbau

Doch werfen wir zunächst einen Blick auf den Aufbau der Kamera, bevor wir uns dem Messprinzip, der Messgenauigkeit und deren Ein-

flussfaktoren zuwenden. Die vorgestellte Time-of-Flight-Kamera verfügt über folgende Komponenten (siehe Bild 1):

- Lichtquelle
- Optik
- Sensor
- Steuerung
- Auswerteeinheit
- Schnittstelle

Lichtquelle

Die Lichtquelle beleuchtet die zu vermessenden Oberflächen und ist auf den Öffnungswinkel des Objektivs abgestimmt. Sie sorgt zum einen für eine ausreichende Beleuchtung auch von weiter entfernt liegenden Oberflächen mit niedrigem Reflexionsgrad, um kurze Belichtungszeiten und hohe Bildwiederholraten zu ermöglichen. Vor allem aber ist die Lichtquelle ein wichtiger Baustein im Messprozess und wird in ausgeklügelter Weise von der Elektronik der Lichtlaufzeit-Kamera angesteuert.

Die Lichtquelle wird während einer Aufnahme viele tausend Male ein- und wieder ausgeschaltet. Ein einzelner Lichtpuls ist nur wenige Nanosekunden lang. Ein Kameraparameter für Belichtungszeit bestimmt die Anzahl der Pulse pro Bild. Um genau messen zu können, ist es wichtig, dass die Lichtpulse hinsichtlich ihrer Dauer, Anstiegs- und Abfallzeiten präzise und identisch sind. Der Helligkeitsverlauf wird für jede einzelne Kamera kalibriert, da schon eine kleine Abweichung von nur einer Nanosekunde bereits einen Fehler von 30 Zentimeter bedeuten würde. Besonders gut geeignet für eine Lichtquelle mit solch hohen Anforderungen sind LEDs oder Laserdioden, die sich für exakten Pulsbetrieb besonders gut eignen.

Zum Schutz von Lebewesen im Umfeld der Kamera ist die Augensicherheit auch im Fehlerfall zu gewährleisten. Dies erfolgt unter anderem in der Zusammenarbeit mit Gutachtern von akkreditierten Prüfstellen für optischen Strahlenschutz. Licht im nahen Infrarot ist für uns Menschen unsichtbar und stört somit nicht. Prinzipiell kommt aber das gesamte Spektrum des Lichtes für die Messung in Frage.

Optik

Das Objektiv bildet die von den Oberflächen reflektierten Lichtpulse auf den Sensor ab. Jede Kamera ist geometrisch kalibriert, um die Raumkoordinaten der Oberflächen berechnen zu können. Brennweite, Fokus und Blendenöffnung sollten daher nach einer Kalibrierung nicht mehr geändert werden.

Ein optischer Bandpassfilter hinter dem Objektiv lässt nur die Wellenlängen der kameraeigenen Lichtquelle durch. Der Sensor ist so vor Überbelichtung durch störendes Fremdlicht geschützt.

Sensor

Als Sensoren werden CCD-Bildsensoren der neuesten Generation verwendet, die die Firma Panasonic speziell für die Lichtlaufzeitmessungen entwickelt hat. Der elektronische Verschluss des Sensors läuft exakt synchron mit den vielen Lichtpulsen, so lange bis ausreichend durch Licht erzeugte Ladung eingesammelt wurde.

Ist die Ladungsaufnahme beendet, wird die Ladung über einen 12 bit Analog-Digital-Wandler ausgelesen und an die Auswerteelektronik übertragen. Belichtung und Auslesegeschwindigkeit des Sensors begrenzen bei diesem Vorgang die Bildwiederholrate.

Im Falle eines Farbsensors kann für die Lichtlaufzeitmessung nur jeder vierte Bildpunkt verwendet werden. Die übrigen drei Bildpunkte werden für das Farbbild verwendet. Der Sensor kann im schnellen Wechsel eine Lichtlaufzeitmessung oder ein Farbbild aufnehmen, jedoch nicht beides gleichzeitig.

Steuerung

Die elektronische Steuerung der Kamera realisiert einen exakt synchronen Ablauf zwischen den Lichtpulsen und dem elektronischen Verschluss des Sensors. Sie betreibt das Auslesen und Wandeln der Sensorladungen und führt sie der Auswertung und Datenschnittstelle zu. Hierzu wird ein leistungsfähiges FPGA verwendet.

Autor:



Martin Gramatke, Technical Architect - R&D Platform Architecture, Basler AG

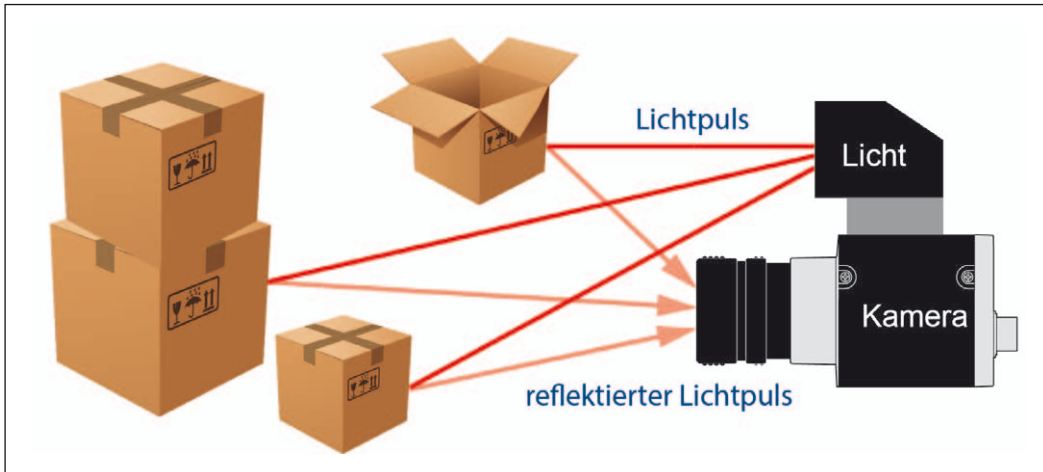


Bild 2: Funktionsprinzip der Lichtlaufzeit-Kamera

Auswerteeinheit

Mit den Daten nur eines Auslesevorgangs berechnet die Auswerteelektronik ein Intensitätsbild, eine Tiefenkarte mit Konfidenz, sowie die Raumkoordinaten des aufgenommenen Objekts (Punktwolke).

Das Intensitätsbild gibt die Helligkeit als 16 bit Ganzzahl je Bildpunkt an. Dabei ist die Wellenlänge der kamera-eigenen Lichtquelle von Bedeutung. Da nahes Infrarot für uns Menschen unsichtbar ist, sind uns die Reflexionseigenschaften von Gegenständen im Infrarot aus dem Alltag unbekannt. Da sie deutlich verschieden vom sichtbaren Licht sind, kann das Intensitätsbild deutlich von unserer Wahrnehmung abweichen.

Die Tiefenkarte gibt die Entfernung zwischen lichtreflektierender Oberfläche und Kamera als 16 bit Ganzzahl je Bildpunkt an. Genau genommen repräsentiert diese Ganzzahl die Laufzeit des Lichtpulses vom Aussenden bis zum wieder Eintreffen auf dem Sensor, überlagert von allen Umwegen und Abkürzungen, die das Licht dabei genommen hat. Anders gesagt: das Ergebnis kann auch Messfehler enthalten.

Alternativ kann die Tiefenkarte als Farbbild ausgegeben werden, rot, grün und blau als 8 bit Ganzzahl. Dies dient vor allem der Visualisierung. Rote Flächen sind nah, blaue Flächen fern. Ob ein- oder mehrfarbig – die Farbzuoordnung der Tiefenkarte wird über die beiden Parameter „Offset“ und „Depth“ eingestellt.

Die Konfidenzkarte enthält ein Maß für den Fehler der Tiefenkarte als 16 bit Ganzzahl je Bild-

punkt. Je größer diese Zahl, umso ungenauer ist das Messergebnis in diesem Bildpunkt. Dies ist zum Beispiel bei sehr dunklen Oberflächen oder bei einer Überbelichtung der Fall. Der Benutzer erhält über die Konfidenzkarte die Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Messwerte in der Tiefenkarte in seiner Anwendung mit zu berücksichtigen.

Die Punktwolke besteht aus drei 32 bit Fließkommazahlen je Bildpunkt. Dies sind die Raumkoordinaten der reflektierenden Oberflächen in einem kartesischen Koordinatensystem. Die Einheit ist Millimeter. Für die genaue Berechnung dieser Werte werden die Kameras einzeln und ab Werk geometrisch kalibriert.

Bildpunkte mit unzuverlässiger Messung haben einen hohen Konfidenzwert und werden als Entfernung Null oder NaN (Not a Number) ausgegeben. Diese Konfidenzschwelle kann eingestellt werden.

Schnittstelle

Die Kamera verfügt über eine Gigabit-Ethernet-Schnittstelle und lässt sich daher über kostengünstige Standardkabel auch über größere Länge unmittelbar mit jedem Host-PC verbinden. Die Kommunikationsprotokolle GigE Vision und GenICam sind herstellerübergreifende, bewährte Standards für Industriekameras.

Funktionsprinzip Lichtlaufzeit-Kamera

Bei einer gepulsten Lichtlaufzeitkamera gibt es sehr viele Variationsmöglichkeiten von Lichtpulsen und elektronischem Verschluss, jede mit

spezifischen Vor- und Nachteilen. Im Folgenden wird eine sehr einfache, aber grundlegende Methode erklärt (siehe Bild 2).

Die Steuerung der Kamera schaltet die Lichtquelle ein und wieder aus und formt so einen Lichtpuls. Exakt gleichzeitig öffnet und schließt die Steuerung den elektronischen Verschluss des Sensors. Die so integrierte Ladung – nennen wir sie S_0 – wird im Sensor gespeichert.

Nun schaltet die Steuerung die Lichtquelle ein und ein zweites Mal genauso ein und wieder aus. Der Verschluss wird dieses Mal jedoch später geöffnet, nämlich zum Zeitpunkt des Ausschaltens der Lichtquelle. Die so gesammelte Ladung S_1 wird ebenfalls im Sensor gespeichert (siehe Bild 3).

Da ein Lichtpuls sehr kurz ist, wird dieser Vorgang viele tausend Male wiederholt, bis die eingestellte Belichtungszeit vorüber ist. Anschließend wird der Sensor ausgelesen. Wir haben nun als Ergebnis der Belichtungssequenz zwei Bilder. In dem S_0 -Bild sind die nahen Oberflächen heller, denn mit zunehmender Entfernung erreicht immer weniger Licht den Sensor solange dessen Verschluss noch offen ist. Bei der S_1 -Messung ist es genau umgekehrt: nahe Oberflächen sind dunkel, da der Verschluss erst öffnet, wenn das Licht schon eine Weile unterwegs war.

Aus dem Verhältnis dieser Intensitäten kann tatsächlich die Entfernung d bestimmt werden. Wenn mit c die Lichtgeschwindigkeit und mit t_p die Dauer des Lichtpulses bezeichnet sind, ferner S_0 die gesammelte Ladung mit frühen Verschluss und

S_1 die Ladung mit verzögerten Verschluss darstellen, dann gilt für die Entfernung d der Zusammenhang:

$$d = \frac{c}{2} \times t_p \times \frac{S_1}{S_0 + S_1}$$

Die geringste messbare Entfernung wird dann gemessen, wenn alle Ladung während der frühen Verschlusszeit in S_0 und keine Ladung während der verzögerten Verschlusszeit in S_1 gesammelt wird, d.h. $S_1 = 0$. Die Formel ergibt dann $d = 0$.

Die größte messbare Entfernung wird gemessen, wenn alle Ladung in S_0 und keinerlei Ladung in S_1 entsteht. Die Formel ergibt dann $d = c/2 \times t_p$.

Daran erkennt man übrigens auch, dass die Lichtpulsbreite bei dieser Methode die maximal messbare Distanz bestimmt. Beispielsweise sollte t_p wenigstens 47 Nanosekunden betragen, um bis 7 Meter messen zu können.

Genauigkeit

Die absolute Genauigkeit ist die mittlere Differenz von gemessener Entfernung und tatsächlicher Entfernung. Die Wiederholgenauigkeit ist die Standardabweichung dieser Genauigkeit. Eine genaue Messung gelingt unter bestimmten Bedingungen, die nun beschrieben werden.

Einflussfaktoren

Es gibt einige Einflussfaktoren, die Auswirkungen auf die Messungen der Lichtlaufzeitkamera-Kamera haben und die Messgenauigkeit einschränken können. Dazu gehören: Mehrfach-Reflexionen, Streulicht, Umgebungslicht und Temperatur.

Mehrfach-Reflexionen

Für die Entfernungsmessung wird nur das einmal reflektierte Licht benötigt. Licht, das mehrmals reflektiert wurde, verfälscht die Messung. Etwa sind Zimmerecken oder das Innere einer Kaffeetasse, also konkave Formen, nur mit einem Fehler zu messen, der sich aus der mehrfachen Reflexion des Lichtstrahls ergibt.

Spiegel und spiegelnde Oberflächen (lackierte Tischplatte) lenken den Lichtstrahl um. Man halte sich immer vor Augen, welche vielen Wege der Lichtpuls von der Quelle zurück zur Kamera nimmt. Wird der Lichtstrahl in den Sensor

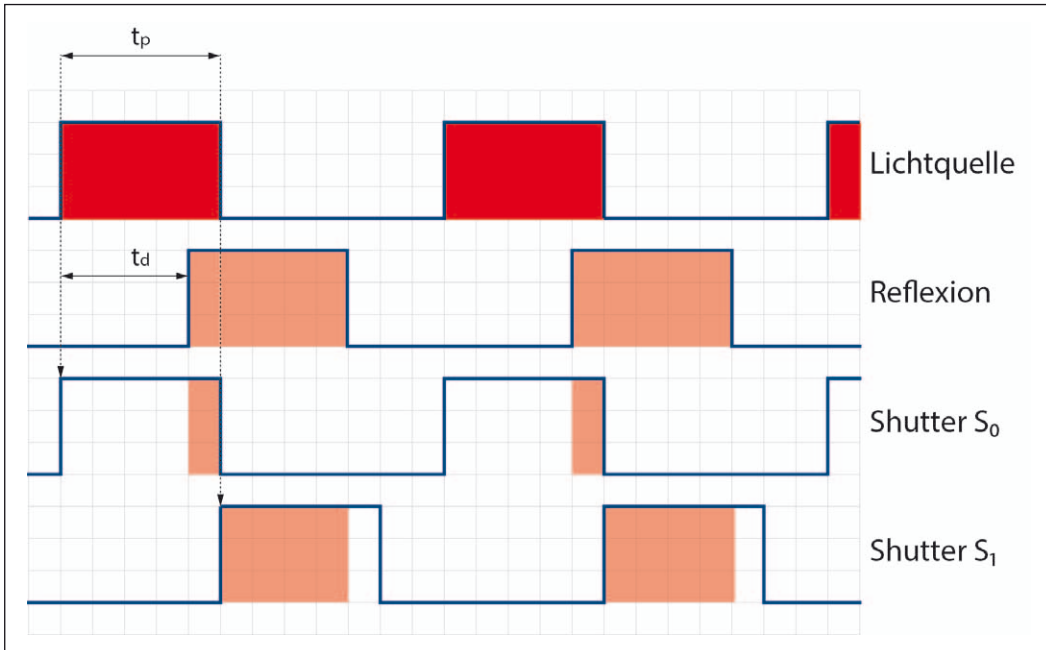


Bild 3: Belichtungszeit

gespiegelt, dann kommt es leicht zu einer Überbelichtung. Wird er zu 100% reflektiert und abgelenkt, dann kommt keine reflektierte Intensität in der Kamera an und die Entfernung zur Spiegeloberfläche lässt sich nicht messen. Dagegen ist eine diffus reflektierende, helle, ebene Wand in einem ansonsten leeren, schwarzen Raum ideal.

Streulicht

Streulicht (siehe Bild 5) entsteht durch unerwünschte Reflexionen innerhalb des Objektivs oder dahinter. Auch bei sorgfältigster Konstruktion lässt sich Streulicht nicht vollständig eliminieren. Helle Oberflächen die sich sehr nahe bei der Lichtquelle befinden, streuen schnell zu viel Licht in das Objektiv.

Dazu muss diese Oberfläche noch nicht einmal im Sichtfeld des Sensors liegen. Legt man beispielsweise die Kamera direkt und mitten auf eine Tischplatte, so ist die Entfernungsmessung stark vom Streulicht überlagert.

Im Intensitätsbild führt Streulicht zu einem kontrastarmen, ausgewaschenen Bild und ist ein hinlänglich bekanntes Problem der Fotografie. Daher sollte der Raum unmittelbar vor der Kamera stets frei von stark reflektierenden Oberflächen sein.

Arbeitsbereich

Vier Faktoren begrenzen den Arbeitsbereich einer Lichtlaufzeitkamera:

- Die verwendete Messmethode, etwa Lichtpulsbreite: Jedes zeitliche Gefüge aus Lichtpuls und elektronischen Verschluss ist für einen bestimmten Entfernungsbereich ausgelegt. Oberflächen die außerhalb dieses Bereichs liegen, liefern keinen oder einen falschen Messwert. Das Intensitätsbild ist weniger betroffen, dennoch können auch hier Oberflächen schlecht ausgeleuchtet oder unscharf sein.
- Der Kontrastumfang (Dynamikbereich) der Kamera: Einerseits erscheinen Oberflächen in der Nähe sehr hell, in der Ferne dagegen sehr dunkel. Die Intensität des reflektierten Lichts reduziert sich mit dem Quadrat ihrer Entfernung. An beiden Enden dieser Helligkeitsskala will man Entfernungen messen, was einen guten Kontrastumfang erfordert.
- Intensität der Lichtquelle: Das Licht muss ausreichen, um Oberflächen auch in größerer Entfernung anzuleuchten. Andernfalls überwiegt das Rauschen und die Messung ist ungenau.
- Schärfentiefe des Objektivs: Unschärfe Grenzen zwischen Vordergrund und Hintergrund führen zu ungünstigen Entfernungen im Zwischenraum.

Raumwinkel

Zum Bildrand fällt die Helligkeit durch Objektiv und Lichtquelle ab.

Daher sind Oberflächen hier eher unterbelichtet und die Entfernungsmessung ist unsicherer. Weiterhin sind Schattenwürfe an den Rändern größer, sodass einzelne Lichtelemente stärker in die Messung eingehen als andere.

Umgebungslicht

Obwohl die Kamera das Umgebungslicht misst und bei der Auswertung herausrechnet, bleibt ein physikalisches Problem. Ein Bildpunkt des Sensors kann nur eine begrenzte Ladung aufnehmen. Je mehr diese Kapazität mit Umgebungslicht gefüllt wird, umso weniger steht für den wichtigen Lichtpuls zur Verfügung. Das Signal-Rausch-Verhältnis sinkt.

Ein optischer Bandpassfilter lässt nur das Spektrum der Lichtquelle durch. Daher ist Kunstlicht in der Regel unproblematisch, da es in diesem Teil des Spektrums nur wenige Anteile enthält.

Tageslicht ist jedoch nahezu auf dem gesamten Lichtspektrum vorhanden und erreicht unter Umständen eine erhebliche Intensität, etwa an einem sonnigen Sommertag. Dann muss die Kamera durch weitere Maßnahmen geschützt werden, damit die Lichtquelle messbar bleibt.

Reflexionsgrad und Transparenz

Die Reflexionsgrade der zu messenden Oberflächen und ihre

Abstände bestimmen die optimale Belichtungszeit. Sollen stark und gering reflektierende Oberflächen gleichzeitig aufgenommen werden, dann muss die Belichtungszeit sorgfältig gewählt werden. Andernfalls kommt es zur Über- oder Unterbelichtung.

Es wird empfohlen, die Belichtungszeit so einzustellen, dass die am stärksten reflektierende Oberfläche im geringsten Abstand und bei maximalem Umgebungslicht knapp nicht mehr überbelichtet wird. Dies lässt sich zuerst gut im Intensitätsbild und danach in der Tiefenkarte kontrollieren. Die Belichtungszeit sollte so lang wie möglich gewählt werden, jedoch unterhalb der Sättigung. Hierzu ist gegebenenfalls die Position und Ausrichtung der Kamera zu variieren.

Mit der gleichen Belichtungszeit prüft man nun die gering reflektierenden Oberflächen im größten Abstand auf ausreichende Intensität und korrekte Entfernungswerte. Gelingt es nicht, eine solche Belichtungszeit zu finden, dann müssen zwei oder mehr Aufnahmen mit entsprechend unterschiedlichen Belichtungszeiten gemacht werden und etwa mit Hilfe der Konfidenzwerte - zu einem Bild zusammengeführt werden. Spiegeln und transparente Oberflächen lassen keine sichere Entfernungsmessung zu, da die überwiegenden Lichtpfade nicht der kürzesten Entfernung entsprechen.

Temperatur

Die Berechnung der Entfernung basiert auf einem Modell des zeitlichen Verlaufs von Lichtpuls und Verschlusszeit. Öffnet sich beispielsweise der elektronische Verschluss der Kamera nur 33 Pikosekunden zu spät, so sind die berechneten Entfernungen bereits um einen Zentimeter zu kurz. Selbst hochwertige Elektronikkomponenten stoßen mit den Genauigkeitsanforderungen einer Lichtlaufzeitmessung an ihre Grenzen. Hohe Temperaturen führen zu Rauschen und Temperaturänderungen ändern das Zeitverhalten.

Daher sollte die Kamera in einem thermisch stabilen Zustand betrieben werden. Extreme Temperaturen und Temperaturänderungen sind zu vermeiden. Die Kamera sollte möglichst gekühlt werden,

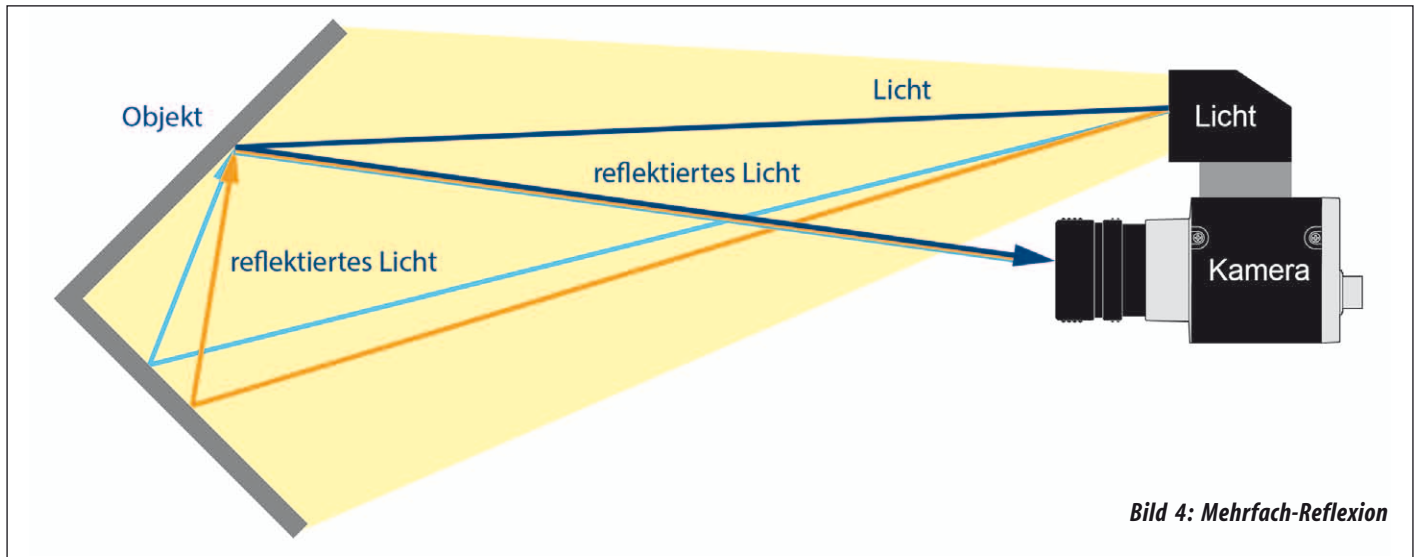


Bild 4: Mehrfach-Reflexion

beispielsweise durch einen Luftstrom oder die Montage an einen massiven Metallträger.

Kamera-Konfiguration

Die Kamera verfügt über zahlreiche Parameter, um sie ihrem Einsatz entsprechend optimal einzustellen. Neben Belichtungszeit und Bildwiederholrate nehmen auch diverse Filter Einfluss auf die Genauigkeit. Nicht in jeder Kombination kann eine der Spezifikation entsprechende Genauigkeit gewährleistet werden.

Fazit

Die Entfernungsmessung mit einer Lichtlaufzeit-Kamera erfolgt

schnell und effizient. Anders als normale Kameras sind Steuerelektronik und Lichtquelle in der Lichtlaufzeit-Kamera wichtige Bestandteile, deren Charakteristik unmittelbaren Einfluss auf die Messgenauigkeit der Kamera haben.

Eine Lichtlaufzeit-Kamera muss als Messgerät inklusive Objektiv kalibriert werden. Sie liefert optimalste Ergebnisse nur unter bestimmten Umgebungsbedingungen und für einen definierten Messbereich. Die Lichtlaufzeit-Kamera liefert deutlich mehr Daten als eine herkömmliche Kamera, nämlich zusätzlich zum Intensitätsbild auch noch eine Tiefenkarte sowie Konfidenzwerte zu jedem Punkt der Tiefenkarte.

Auch bei optimalen Bedingungen hängt eine gelungene Lichtlaufzeitmessung von vielen Faktoren innerhalb und außerhalb der Kamera ab. Für gute Ergebnisse sollte der Anwender der Lichtlaufzeit-Kamera

- Mehrfach-Reflexionen vermeiden
- Streulicht vermeiden
- Im der Mitte des Arbeitsbereichs messen
- In der Mitte des Bildes messen
- Umgebungslicht vermeiden, insbesondere helles Tageslicht
- Kamertemperatur konstant niedrig halten
- Spiegelnde und transparente Oberfläche vermeiden
- Diffus reflektierende, helle Oberflächen bevorzugen

- Kameraposition und Ausrichtung optimieren
 - Apriori Wissen bei der Bildverarbeitung einsetzen, etwa „die Form ist ein Würfel“, etc.
 - Rauschfilter einsetzen, räumlich und zeitlich
 - ein Intensitätsbild hinzuziehen
 - die Kamera stabil betreiben und keine Parameteränderungen im Betrieb vornehmen
- Wer dies beherrscht, bekommt über 4 Millionen zentimetergenaue Entfernungsmessungen pro Sekunde! Schneller lässt sich ein Raum nicht erfassen.

■ Basler AG
www.baslerweb.com

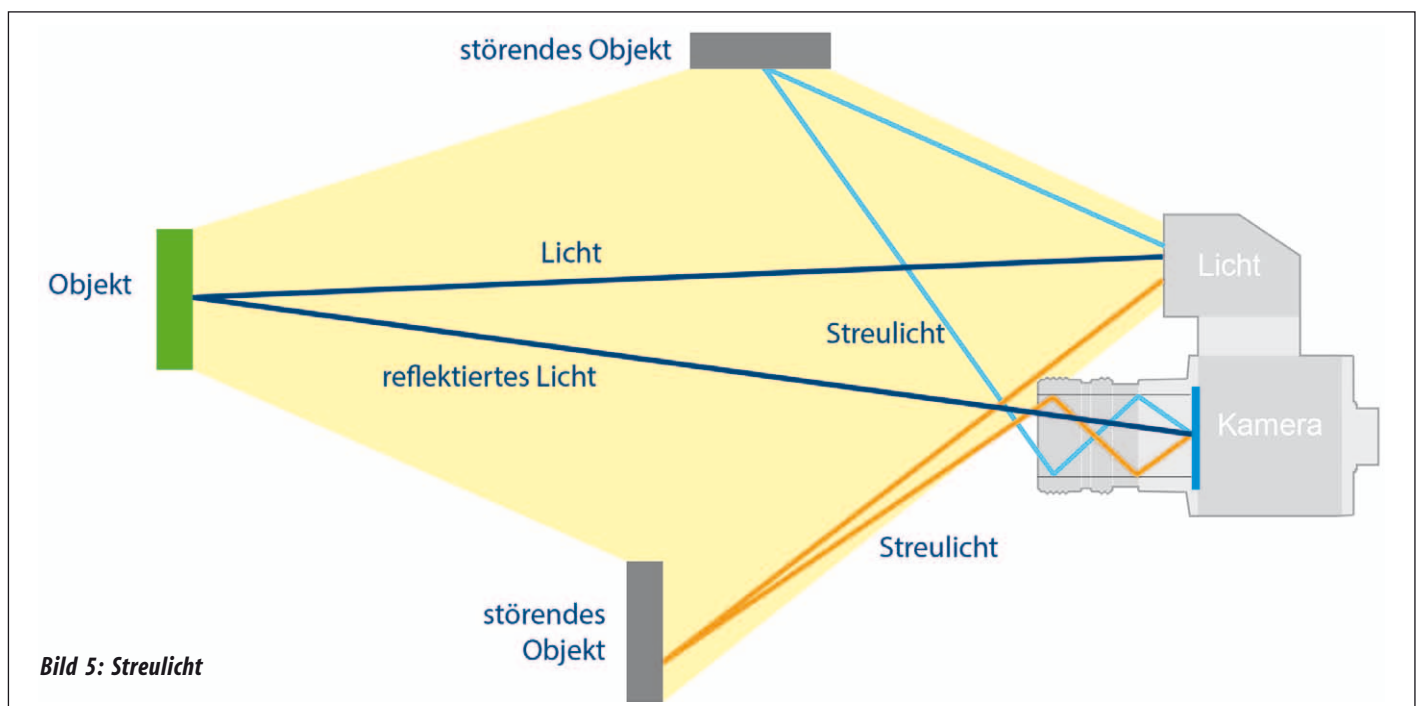


Bild 5: Streulicht