

## CCD oder PSD?

### Zwei Techniken zur Positionsmessung im Vergleich

Um die Position eines Lichtpunktes auf einer Detektoroberfläche zu bestimmen, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Entweder wird die gesamte Fläche betrachtet und versucht festzustellen, was darauf ein Lichtpunkt ist und wo er sich befindet – entsprechend der Suche nach einer Stecknadel im Heuhaufen. Oder aber es wird eine Vorrichtung verwendet, die allein auf Lichtpunkt-Positionen reagiert und alle anderen Größen ignoriert – die gezielte Suche nach der Nadel mit einem Magneten. Die erste Methode entspricht der Arbeitsweise eines CCDs (charge coupled device – Zeilen- oder Matrixsensor mit Ladungsverschiebung), die zweite der eines PSDs (position sensitive detector – positionsempfindlicher Sensor).

CCDs und PSDs sind zwei grundsätzlich verschiedene Bauelemente. Zwar detektieren beide die Position von einfallendem Licht aber in sehr unterschiedlicher Weise. Das Ausgangssignal eines PSDs hängt von der Position des Schwerpunktes der Lichtverteilung auf der aktiven Fläche ab. Ein CCD dagegen erfasst das Licht in vielen getrennten Pixeln parallel und gibt dann die einzelnen Messwerte sequentiell aus. Daraus können der Maximalwert und dessen Position ermittelt werden.

### Ein ganzes Bild auf einmal

Ein CCD besteht aus einer Matrix von vielen, dicht nebeneinander liegenden, einzelnen lichtempfindlichen Zellen, die Pixel (Anm. d. Red.: von picture element) genannt werden. Das auftreffende Licht erzeugt in jedem Pixel eine elektrische Ladung, deren Größe proportional zur Lichtintensität ist. Die generierten Ladungen werden in MOS-Kondensatoren (Schieberegister) gespeichert, welche mit jedem lichtempfindlichen Element verbunden sind. Zur Auslesung der Lichtinformation eines CCD-Arrays, werden die unterschiedlichen Ladungen schrittweise durch die Kondensatorenreihe wie in einem analog geschriebenen Register verschoben, bis sie den Ausleseverstärker erreichen. Hier findet eine Transformation in eine Spannung statt, die proportional zur Ladungsgröße und damit zum eingefallenen Licht ist. Es wird somit ein örtlich bzw. zeitlich diskretes Ausgangssignal abgegeben. Bei den Ausleseverfahren gibt es verschiedene Methoden, die mit jeweiligen Vor- und Nachteilen behaftet sind.

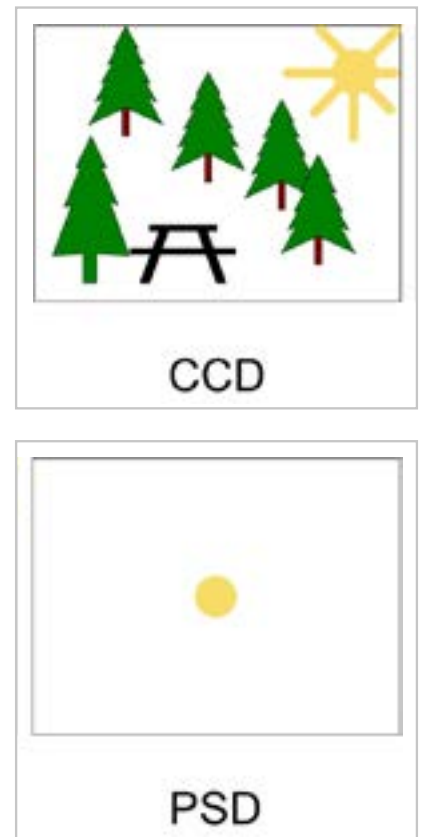


Abb. 1:  
Ein CCD-Sensor mit Pixel-Struktur sieht die komplette Szene, ein positionsempfindlicher Detektor (PSD) sieht nur den Punkt höchster Helligkeit.  
(Quelle: Laser Components)

## Fotodiode mit Stromverteilung

Ein positionsempfindlicher Detektor arbeitet ähnlich wie eine herkömmliche Fotodiode. Das auf das aktive Gebiet einfallende Licht generiert einen Fotostrom. Im Gegensatz zu einer Fotodiode verfügt ein PSD jedoch über mehrere elektrische Kontakte. Bei einem eindimensionalen PSD sind zwei gegenüberliegende Kontakte auf der aktiven Oberfläche platziert (vgl. Abb. 3). Bei einem zweidimensionalen PSD wird zusätzlich ein Elektrodenpaar auf dessen Rückseite platziert, so dass sie in einem 90°-Winkel zu den anderen Elektroden auf der Oberfläche stehen (vgl. Abb. 4). Hierdurch kommt es zu einer Aufteilung des photoneninduzierten Stroms zwischen den Kontakten. Die Aufteilung erfolgt in Abhängigkeit der Position des Lichtflecks.

Die Position wird über Bildung der Stromdifferenz zwischen zwei gegenüberliegenden Kontakten gebildet. Durch Normierung auf den Gesamtstrom ist das Positionssignal unabhängig von der einfallenden Lichtintensität. Die aktive Oberfläche fungiert als sehr homogener Widerstand, so dass der Strom in jedem Kontakt linear abhängig von der Position des auftreffenden Lichts ist, was wiederum den Abstand zu jedem Kontakt darstellt. Die Positionsmessung erreicht eine Toleranz von etwa 0,1 %. Die Abtastfrequenz kann, abhängig von der Größe, zwischen 250 kHz und 15 MHz für ein PSD liegen – verglichen mit einigen kHz für ein lineares CCD. Generell wird bei den PSDs eine Vorspannung angelegt, um die Genauigkeit und Schnelligkeit der Messung zu erhöhen.

Ein eindimensionaler PSD erlaubt die kontinuierliche Positionsbestimmung eines Lichtflecks entlang einer Achse. Er verfügt über drei Kontakte (s. Abb. 3), wobei der dritte Kontakte zum Anlegen der Vorspannung genutzt wird. Die Position des Lichtflecks ergibt sich aus

$$Y = L / 2 \times ((Y_1 - Y_2) / (Y_1 + Y_2))$$

$Y_1$  und  $Y_2$  sind dabei die Ströme, die am Kontakt ankommen;  $L$  beschreibt die Länge der aktiven PSD-Fläche.

Zweidimensionale PSDs verfügen über vier Kontakte. Bei ihnen müssen zur Positionsbestimmung sowohl die X- als auch die Y-Koordinaten bestimmt werden (s. Abb. 4). Der Ursprung des Koordinatensystems wird dabei in die Mitte des PSDs gelegt. Die Position des Lichtflecks ergibt sich aus

$$X = LX / 2 \times ((X_1 - X_2) / (X_1 + X_2))$$

$$Y = LY / 2 \times ((Y_1 - Y_2) / (Y_1 + Y_2))$$

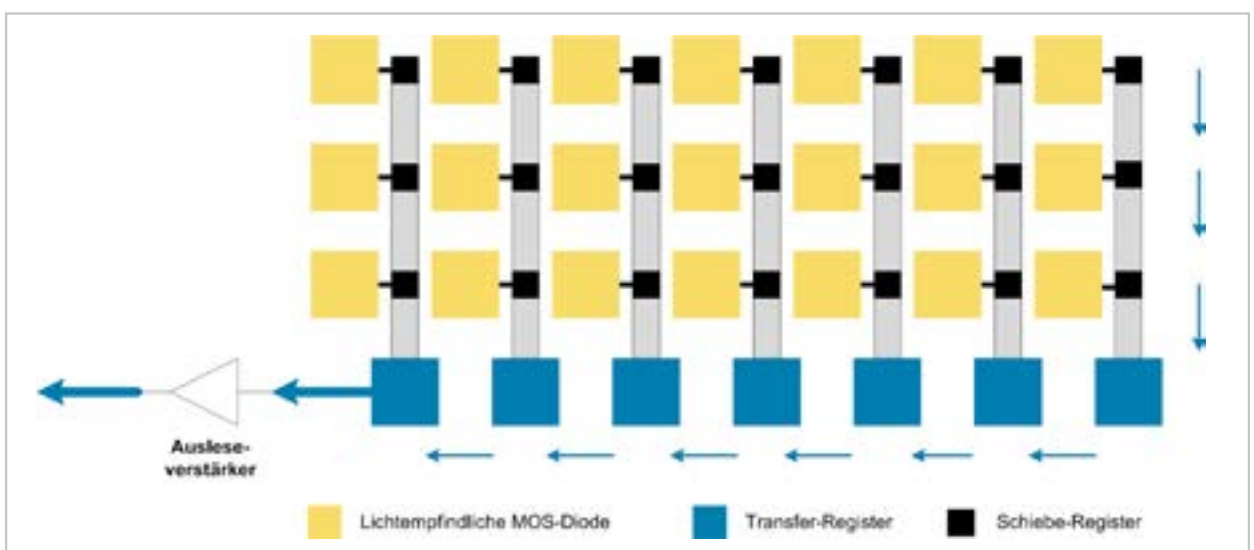


Abb. 2: Arbeitsweise eines CCD-Chips. Dargestellt ist ein Interline-Transfer-CCD (Quelle: Laser Components)

## Möglichkeiten von PSDs

PSDs gewinnen die Positionsinformation aus den Fotoströmen der Dioden. Dadurch lassen sich mit ihnen Betriebsweisen wie bei normalen Fotodioden anwenden – etwa eine Modulation des Lichts, um Störungen durch Fremdlicht zu verringern. Der Dynamikbereich der Lichtintensität einer PSD erstreckt sich über mehrere Dekaden. Die Genauigkeit der Lagebestimmung lässt sich noch wesentlich erhöhen. Hierzu werden Referenzpunkte in einer Wertetabelle abgespeichert, wodurch das Gesamtsystem kalibriert werden kann.

Die Standardausführungen von PSDs bestehen aus Silizium. Detektoren für UV-Strahlung und IR-Wellenlängen, z.B. von YAG-Lasern, sind ebenfalls auf dem Markt erhältlich, genauso wie PSDs mit integrierter Streulichtunterdrückung und mit erhöhter spektraler Empfindlichkeit. Zur Unterdrückung von Reflexionen können die Elemente mit einer Antireflex-Beschichtung versehen werden. Die Linearität des Detektors kann aus Kalibrierungsdaten entnommen werden, welche die Hersteller zur Verfügung stellen.

Beliebig sind die Bauformen, in der sich PSDs herstellen lassen. Einige ungewöhnliche Ausführungen sind z. B. helixförmige, kreisrunde oder sphärische Abmessungen für 2D- und 3D-Winkelmessungen. Für einige Anwendungen (z. B. Oberflächenuntersuchungen) wurden ganze Arrays von PSDs entwickelt. Standardelemente besitzen in der Regel Kantenlängen von 2,5 bis 60 mm.

## Ein ganzes Bild auf einmal – der CCD-Chip

Das Ausgangssignal eines CCDs enthält Informationen über die Lichtintensitätsverteilung auf der gesamten aktiven Fläche, es beschreibt also ein Bild. Ein CCD ist deshalb die übliche Wahl für den Bildsensor in einer Videokamera.

Den Schwerpunkt eines Lichtpunktes kann ein CCD nicht ohne zusätzliche digitale Signalverarbeitung ermitteln. Alle Pixel müssen abgetastet werden, um sie anschließend digital zu verarbeiten. Beide Prozesse benötigen mehr Zeit, als die Auswertung bei einer PSD. Damit ist dieser Messwert nicht so schnell verfügbar wie beim PSD.

Andererseits hat jedes Pixel eine durch die Herstellungsmaske definierte Position, wodurch eine sehr hohe Genauigkeit resultiert. Um die genaue Lage zu bestimmen und die höchste Auflösung zu erhalten, ist eine Interpolation zwischen benachbarten Punkten erforderlich. Dadurch wird die Messung weiter verlangsamt. Für Lichtpunkte, die kleiner sind als der Abstand zwischen zwei benachbarten Pixeln, ist keine Interpolation möglich, und das Signal geht verloren. Dies setzt eine untere Grenze für die Größe des verwendbaren Lichtpunktes.

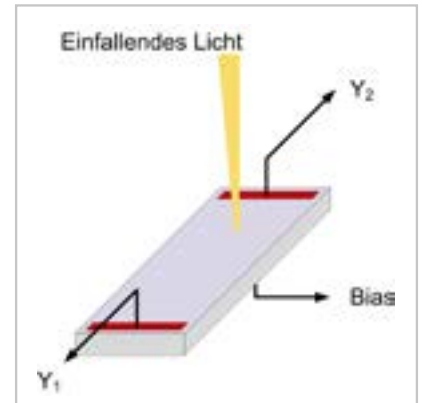


Abb. 3:

Bei einem eindimensionalen PSD erfolgt die Auslesung des Signals über zwei gegenüberliegende Kontakte, die auf der Oberfläche des Bauteils angebracht sind. Über einen dritten Kontakt kann eine Vorspannung (Bias) aufgebaut werden.

(Quelle: Laser Components)

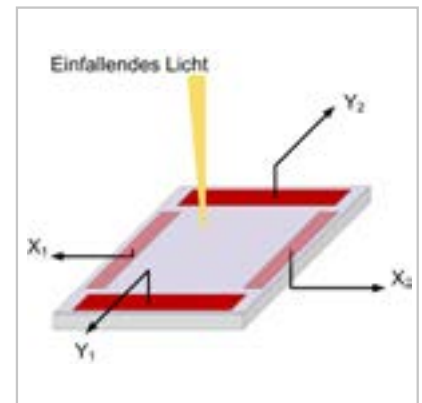


Abb. 4:

Zweidimensionale, duolaterale PSDs besitzen vier Kontakte, die in einem Winkel von 90° zueinander stehen. Zwei gegenüberliegende Kontakte befinden sich auf der Oberseite des Bauteils, die anderen zwei auf der Unterseite.

(Quelle: Laser Components)

Der Dynamikbereich eines CCDs ist begrenzt, und eine plötzliche Änderung der Lichtintensität kann so genanntes „Blooming“ verursachen. Jedes Pixel kann nur eine bestimmte Ladungsmenge verarbeiten. Trifft mehr Licht auf das Element, so wird die Ladung in die Nachbarpixel übertragen, was das Messergebnis u. U. verfälscht.

### Vielfältige Anwendungen für PSDs

PSDs sind den CCDs in vielen Eigenschaften wie beispielsweise hohe Auflösung und Schnelligkeit deutlich überlegen, was sie interessant für unterschiedliche Anwendungen macht. Beispiele sind etwa Ausricht-Systeme, wo die Position eines Referenz-Laserstrahls relativ zum PSD gemessen wird. Dieses Prinzip wird in den verschiedensten Bereichen genutzt – vom Brückenbau bis zu optischen Bänken. Vorteilhaft ist weiterhin, dass besonders hergestellte PSDs auch bei sehr tiefen Temperaturen bis zu  $-193\text{ °C}$  arbeiten, was das Anwendungsspektrum deutlich erhöht.

Ein Schwachpunkt der PSDs besteht darin, dass sie nicht zwischen einem direkten und einem reflektierten Strahl unterscheiden können. Wenn zwei Lichtpunkte auftreffen, geben sie den Schwerpunkt zwischen beiden als Messwert aus. Ein CCD bietet in diesem Fall die Möglichkeit, über die Intensität zwischen dem direkten und dem reflektierten Strahl zu unterscheiden. Hierdurch wird die Komplexität des Systems erhöht und es leidet die Schnelligkeit.

### Abstandsbestimmung per Triangulation

PSDs finden häufig in Abstandssensoren Einsatz, die nach dem Prinzip der Triangulation arbeiten. Solche Sensoren kommen mit relativ einfacher Elektronik aus und lassen sich kostengünstig herstellen. Ihre Schwachstelle besteht darin, dass die Struktur der zu messenden Oberfläche Fehler bei den Messwerten verursachen kann. Rauigkeit kann die Form des Lichtpunktes verändern, wodurch sich der Schwerpunkt verschieben kann und das Messergebnis verfälscht wird.

### PSDs der nächsten Generation

Ein anderes Problem besteht darin, dass dunkle Oberflächen, etwa schwarzes Gummi, nur wenig Licht reflektieren und der PSD dadurch ein zu schwaches Signal erhält. Um dieses Problem zu lösen, hat SiTek (Vertrieb: Laser Components) eine neue Familie von PSDs entwickelt, die wesentlich lichtempfindlicher sind. Es handelt sich um positionsempfindliche Phototransistoren. Sie geben bei gleicher Lichtintensität einen mehr als fünfmal höheren Fotostrom ab. Es wird erwartet, dass ihre Lichtempfindlichkeit in naher Zukunft noch deutlich gesteigert werden kann.

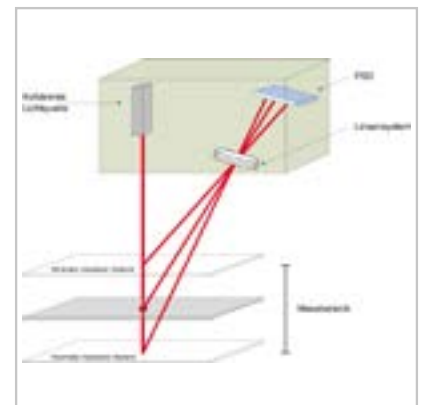


Abb. 5: Schematischer Aufbau eines Triangulationssystems mittels PSD. Dargestellt ist der minimale und maximale Arbeitsabstand, der sich aus der Größe des PSDs und der eingesetzten Optik ergibt (Quelle: Laser Components)

## Ausblick

In Verbindung mit einer ausgeklügelten Signalverarbeitung, etwa optische Filterung und synchrone Detektion, lösen PSDs einige bisher für unlösbar gehaltene Messaufgaben. Sie sind z.B. geeignet, um den Füllstand von flüssigem Eisen mit entsprechend leuchtender Oberfläche zu detektieren. PSDs zeigen ihre Vorteile auch in Anwendungen, wo Bewegungen von mechanischen Teilen ohne Berührung oder Belastung erfasst werden müssen. Dazu gehören die Überwachung von Schwingungen an Bauwerken ebenso wie der Rundlauf von Wagonrädern bei der Eisenbahn. Die Züge können dabei in ICE-Geschwindigkeit untersucht werden. Weitere Beispiele sind etwa die Bewegung von Membranen in Mikrofonen, Lautsprechern und Drucksensoren oder von optischen Fasern in Wind- oder Beschleunigungssensoren. Mit einer relativ einfachen analogen Schaltung erreichen sie Auflösungen bis in den Nanometer-Bereich.

## Autoren

Winfried Reeb, Produktioningenieur/Gruppenleiter Laserdioden und Photodioden,  
LASER COMPONENTS GmbH, Werner-von-Siemens-Str. 15, 82140 Olching;  
w.reeb@lasercomponents.com

Anders Lundgren, R&D Manager, SiTek Electro Optics AB, Partille, Schweden

## Abstract

Today in principle there are two different ways of measuring the position of a light spot on a surface: Charge coupled devices (CCD) as used in cameras or position sensitive detectors (PSD) operating like a two-dimensional photo diode (size up to 45 mm x 45 mm). Several advantages of PSDs are shown. Due to their basic semiconductor design, they are very fast: up to 15 MHz compared to a few kHz for CCDs. They are available also for UV or IR wavelengths and for extreme low temperature (-193 °C). Even geometry of PSDs can be made fitting for specific applications. Accuracies of both methods are at a high level.

Ähnlich erschienen in der Zeitschrift Sensor Report, Ausgabe 2/2008