

Hintergrundunterdrückung in Lichtschranken durch Triangulation

Mittels Doppeldioden lassen sich kostengünstige, genaue und robuste Lichtschranken mit Hintergrundausbldung realisieren. Der folgende Aufsatz erklärt die grundlegenden Prinzipien und stellt auch ein einfaches Anwendungsbeispiel dar.

von Beat De Coi, ESPROS Photonics AG

Bei der Anwendung von Reflexions-Lichttastern stellt sich in der Regel das Problem, dass gut reflektierende Objekt auf grosse Distanz und wenig reflektierende Objekt nur auf sehr kurze Distanz erfasst werden. Die Gesetzmässigkeit basiert auf folgender Formel:

$$P_{PD} = \frac{(P_{LED} * \rho * (\frac{A_E}{(2 * D)})^2 * k)}{(\frac{A_{Image}}{A_{PD}})} \quad (1)$$

Dabei sind P_{PD} die in der Photodiode empfangene Lichtleistung, P_{LED} die ausgestrahlte Lichtleistung der LED, ρ die Reflexion des Objekts (Remission als Lambert Strahler), A_E die Fläche der Empfangslinse, D die Distanz zwischen Lichtschranke und Objekt, A_{Image} die von der LED angestrahle und von der Empfangslinse beobachtete Fläche auf dem Objekt, A_{PD} die Fläche der Fotodiode sowie k die Transmission der Linsen.

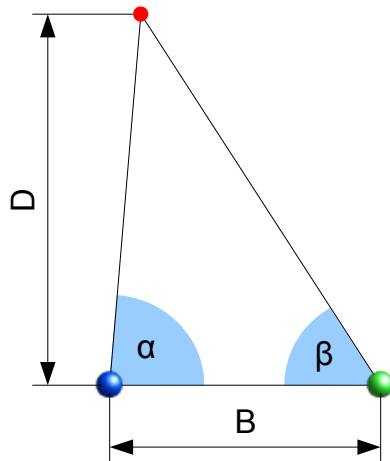
Es ist aus (1) ersichtlich, dass die Objektrefektivität ρ linear in die empfangene Lichtleistung in der Photodiode eingeht. Wenn wir also im Vergleich ein weisses Papier mit 90% und einen dunklen Teppich mit 5 % Reflexion annehmen, ergibt sich ein Unterschied in der Empfangsleistung von 20:1. Allerdings hilft das Entfernungsgesetz der Optik, den Einfluss von Reflexionsunterschieden zu reduzieren. Bei Umstellung der Formel (1) nach der Distanz ergibt sich

$$D = \sqrt{\frac{(P_{LED} * A_{Image} * \rho * k * A_{PD} * A_E^2)}{(P_{PD} * A_{Image} * 4)}} \quad (2)$$

Das heisst, die Reflektivität ρ des Objekts geht mit der Wurzel in die Distanz ein. Jedoch bedeutet eine Streuung der Objektreflexion von 1:20 immer noch eine Distanzvariation von 1:4.5. Oder anders ausgedrückt, wenn ein weisses Blatt Papier in einer Distanz von 1m detektiert werden kann, wird ein schwarzes Objekt nur noch in einer Distanz bis zu maximal 22cm detektiert. Oftmals sind aber gerade solche störende Distanzunterschiede unerwünscht. Man stelle sich vor, dass man einen dunklen Körper vor einem hellen Hintergrund erkennen soll. Der dunkle Körper wird nicht erkannt, der Hintergrund aber schon. Um dieses Problem zu vermeiden, gibt es verschiedene Lösungswege. Zwei bewährte Verfahren sind die Triangulation und die Lichtlaufzeit-

messung. Da die Lichtlaufzeitmessung extreme Anforderungen an die Technologie stellt – bei einer Distanzauflösung von 1cm wird eine Zeitauflösung von 66 ps benötigt – weicht man gerne auf das Prinzip der Triangulation aus. Es ist einfach und robust, wenn man die richtigen Zutaten dazu hat.

Das Triangulationsprinzip



Darstellung 1: Funktionsprinzip der Triangulation

Das Prinzip der Triangulation beruht darauf, dass ein Punkt auf einem Objekt aus zwei unterschiedlichen Richtungen betrachtet wird. Wenn der Abstand der Beobachtungspositionen (die Basislänge) sowie die Winkel zwischen Basisgeraden und Beobachtungsachsen zum Objektpunkt bekannt sind, kann die Distanz zum Objekt berechnet werden (siehe Darstellung 1).

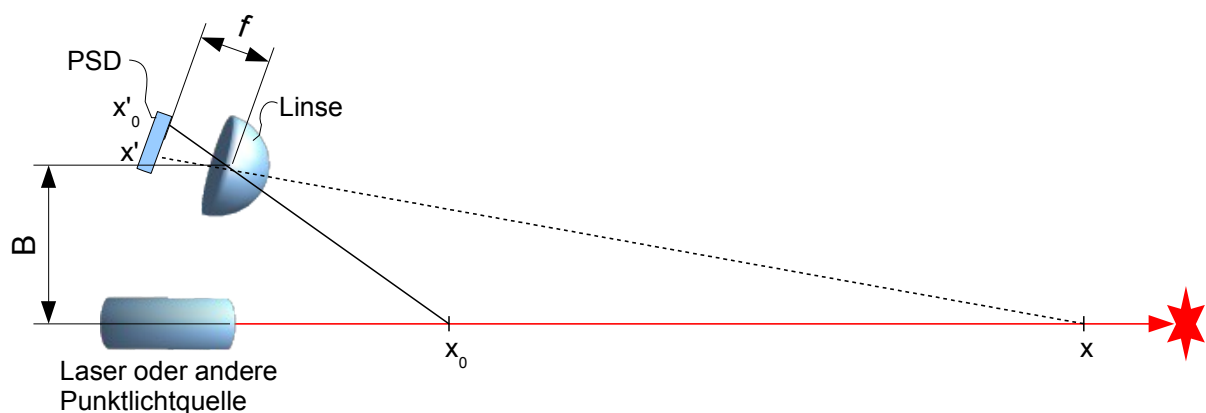
Die Berechnung der Distanz D erfolgt einfach mit folgender Formel:

$$D = \frac{B}{\left(\frac{1}{\tan(90^\circ - \alpha)}\right) + \left(\frac{1}{\tan(90^\circ - \beta)}\right)} \quad (3)$$

Macht man den Winkel α zu 90° , vereinfacht sich die Formel (3) zu

$$D = B * \tan(90^\circ - \beta) \quad (4)$$

Mit dieser einfachen Formel wird lediglich ein Element benötigt, mit welchem man den Winkel β messen kann. Am einfachsten geschieht dies mit einer positionssensitiven Photodiode (PSD). Die geometrische Anordnung in Darstellung 2 zeigt das Prinzip.

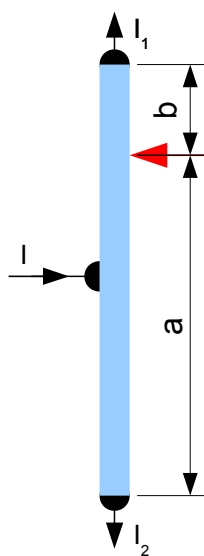


Darstellung 2: Prinzip eines Lichttasters basierend auf dem Triangulationsprinzip

Die Distanz x berechnet sich aus

$$x = B * \left(\frac{\left(\frac{x_0}{B} + \frac{(x' - x'_0)}{f} \right)}{\left(1 - \left(\frac{x_0}{B} \right) * \left(\frac{(x' - x'_0)}{f} \right) \right)} \right) \quad (5)$$

wobei f die Brennweite der Linse darstellt. Mittels einer positionssensitiven Photodiode kann die Position des Lichtpunkts, welcher vom Objekt reflektiert und über die Linse auf die photosensitive Fläche abgebildet wird, bestimmt werden. Das Prinzip einer PSD ist in Darstellung 3 ersichtlich.



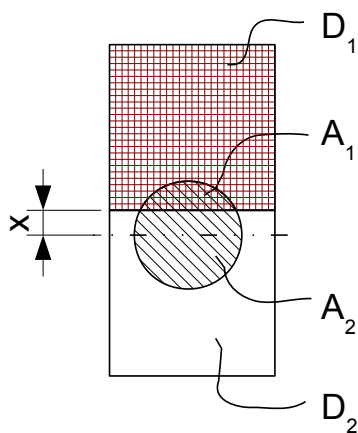
Die Position des Lichtpunkts auf der PSD kann mittels der Formel 6 über das Verhältnis der Photoströme I_1 und I_2 berechnet werden:

$$\frac{I_1}{I_2} = k * \left(\frac{b}{a} \right) \quad (6)$$

Wenn die beiden Ströme I_1 und I_2 gleich gross sind, ist der Lichtpunkt exakt in der Mitte der PSD. Sobald er sich wie in Darstellung 3 gezeichnet nach oben bewegt, wird der Strom I_1 grösser und gleichzeitig wird der Strom I_2 geringer. Der Term k ist eine Systemkonstante, welche abhängig von der Leuchtstärke, der Quanteneffizienz der Diode sowie anderen Parametern abhängig ist. Da mit einer PSD ein Stromverhältnis ausgewertet werden muss, ist eine genaue Detektion der Position nicht ganz einfach.

Darstellung 3: Prinzip einer PSD

Das Triangulationsprinzip mittels Doppel-Photodiode



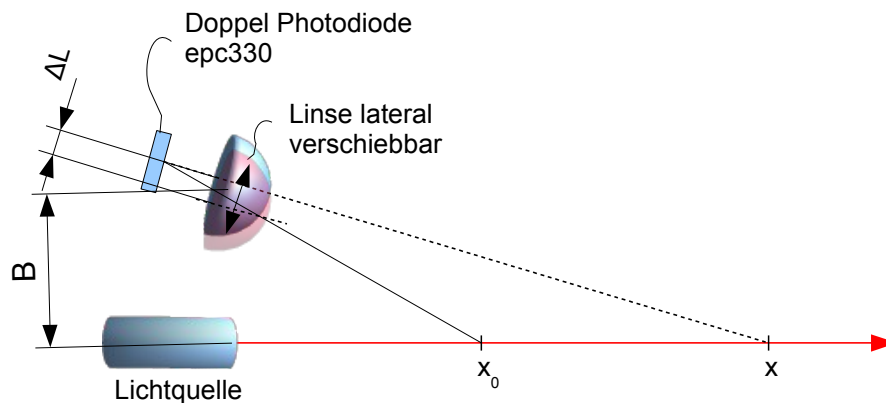
Wird nur ein digitales Signal benötigt, welches eine Aussage darüber macht, ob das Objekt eine bestimmte Position in Bezug zur Lichtschranke erreicht hat, kann die PSD auch durch eine Doppeldiode ersetzt werden. Das Prinzip ist in Darstellung Fehler: Referenz nicht gefunden gezeigt.

Ein Lichtfleck wird auf die Doppeldiode abgebildet. In oben gezeigtem Beispiel ist er etwas nach oben versetzt, so dass die Diode D_1 mehr Licht als die Diode D_2 erhält. Der Schwerpunkt des Lichtflecks ist also das Mass für die Photoströme I_1 und I_2 . Der Vorteil dieser Anordnung ist, dass es nicht notwendig ist einen äusserst scharfen Lichtpunkt abzubilden. Deshalb sind Triangulationssensoren in der Regel mit kostengünsti-

Darstellung 4: Leuchtfleck auf Photodiode

gen Leuchtdioden aufgebaut. Die Position des Schwerpunkts des Lichtflecks berechnet sich (vereinfacht) mit Formel (7).

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (7)$$



Mittels einer einfachen Schaltung, welche feststellt, welcher der beiden Ströme I_1 oder I_2 grösser ist, lässt sich bestimmen, ob sich ein Objekt näher oder weiter weg als eine bestimmte eingestellte Distanz befindet. Die Schaltdistanz wird dabei einfach mit einem (mechanischen) Verschieben der Photodiode erreicht.

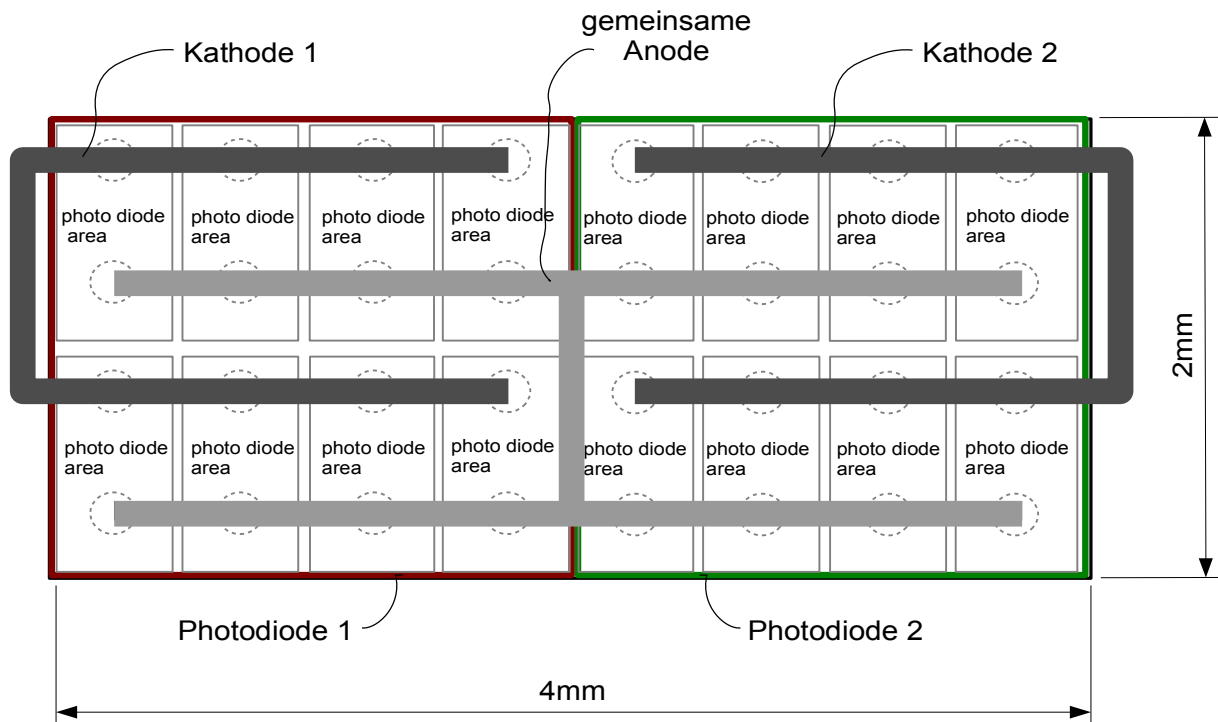
Darstellung 5: Einstellung Schaltungspunkt durch Verschieben der Empfängerlinse

Die Doppeldiode kann als kirchhoffscher Knoten betrachtet werden, in dem die Summe der Ströme Null ist. Oder anders ausgedrückt ist die Summe von I_1 und I_2 immer I. I_1 und I_2 sind abhängig von der Position des Lichtflecks. Je grösser der Anteil des Lichtflecks auf einer Photodiode, desto grösser der Photostrom in der Diode. Der Photostrom ist also abhängig von der beleuchteten Fläche auf der Photodiode. Die beleuchtete Fläche kann wie folgt berechnet werden:

$$A_{(1,2)} = r^2 * \arccos\left(1 - \frac{(r-x)}{r}\right) + \sqrt{(2r * (r-x) - (r-x)^2)} * x \quad (8)$$

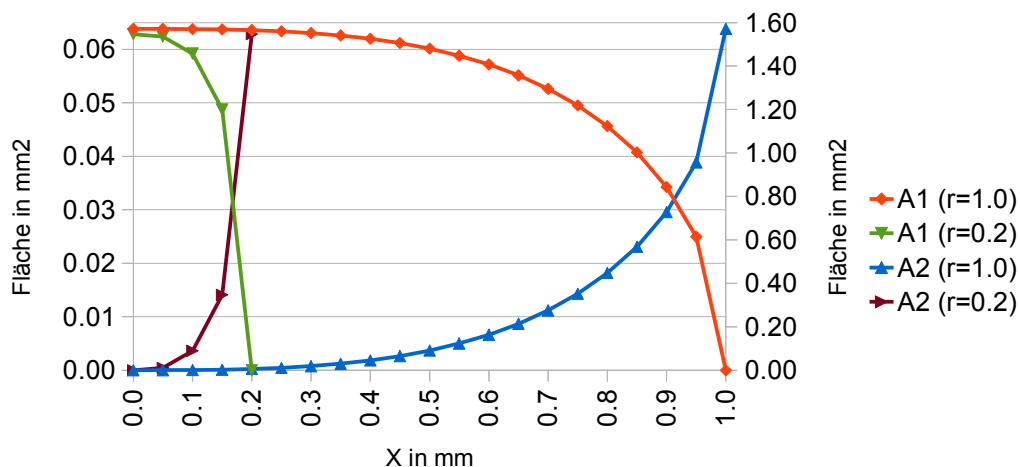
wobei A die beleuchtete Fläche, r der Radius des Leuchtflecks und x die Verschiebung des Leuchtflecks aus dem Zentrum bedeutet. Darstellung 4 zeigt die Situation auf der Photodiode in Draufsicht.

Als Detektor kann ein Photodiodenarray epc330 von ESPROS zur Anwendung kommen. Dieses Photodiodenarray besteht aus 16 Einzeldioden, welche in zwei Gruppen zu 8 Photodioden parallelgeschaltet wurden (siehe Darstellung 6). Dabei sind die beiden dunkelgrauen Linien die Leiterbahnen, welche die Kathoden der Einzeldioden verbinden. Hier werden zwei Segmente gebildet damit zwei Photodioden entstehen. Die Anoden aller Einzeldioden werden durch die hellgraue Leiterbahn verbunden. Somit entsteht eine Doppeldiode, welche aus zwei Einzeldioden mit je einer Empfangsfläche von 2x2 mm besteht.



Darstellung 6: Photodiodearray epc330 als Doppel-Photodiode beschaltet (top view)

Mittels Gleichung (8) lässt sich der Verlauf der Ströme I_1 und I_2 als Funktion von x , der Position des Leuchtflecks auf der Doppeldiode, bestimmen. Es ist anschaulich klar, dass dies keine lineare Funktion ist, wie Darstellung 7 gezeigt ist:



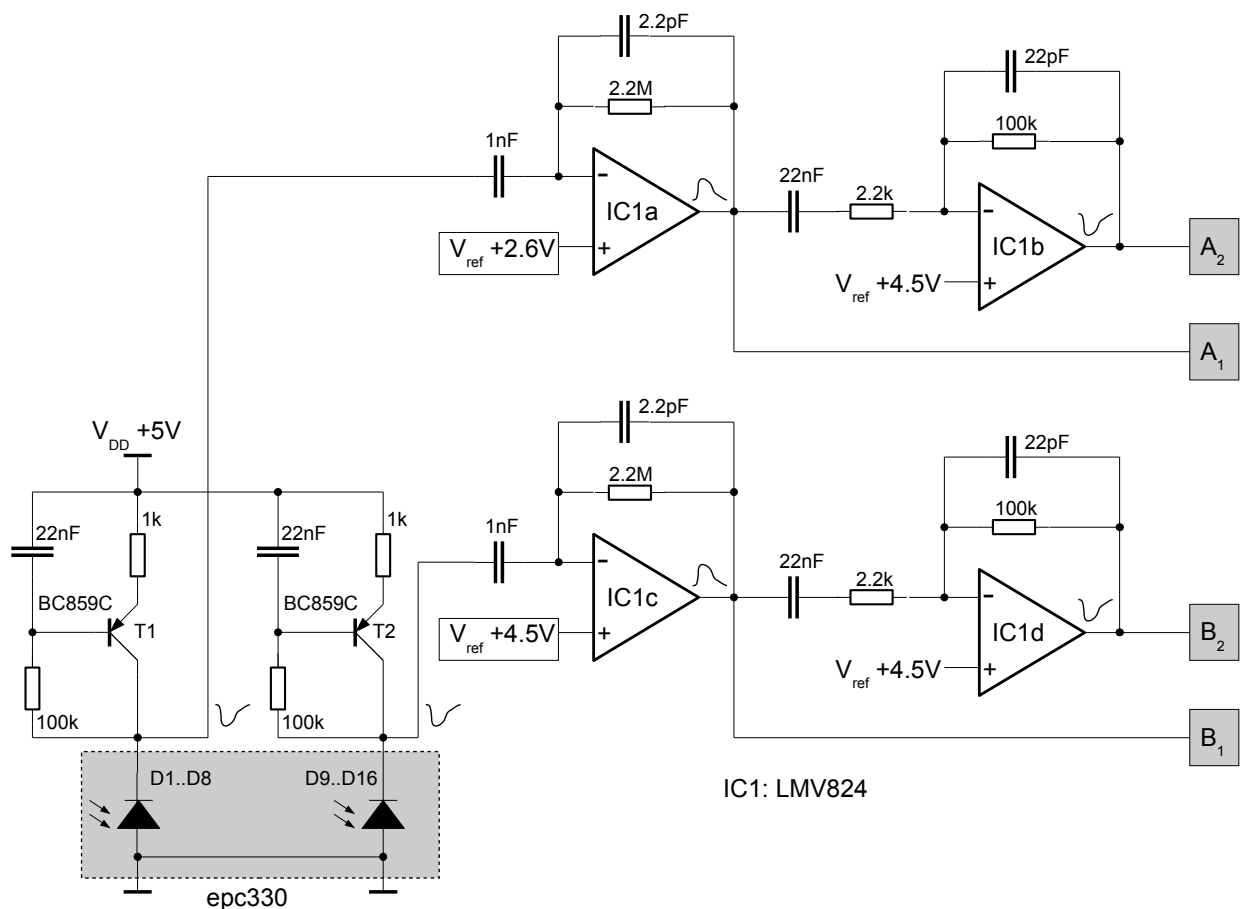
Darstellung 7: Flächenverlauf (Stromverlauf in den Photodioden) als $f(x)$, Parameter r

In der Darstellung 7 wurde gemäss Darstellung 4 die Position des Lichtflecks variiert. Als Parameter wurde zudem die Leuchtfleckgrösse variiert. Es ist anschaulich klar, dass

mit kleinerem Leuchtfleckdurchmesser die Kantendiskrimination und damit die Schaltungsgenauigkeit besser wird (Kurven A1 und A2).

Implementation der Empfängerschaltung

Eine einfache Implementation einer elektronischen Schaltung zeigt Darstellung 8. Basierend auf eines epc330 Photodiodenarrays werden zwei Gruppen gemäss Darstellung 7 gebildet. Je 8 Photodioden werden parallel geschaltet. Die beiden so entstandenen Photodioden werden mittels je eines Gytrators, gebildet aus der Schaltung um T₁



Darstellung 8: Prinzipschaltung der Empfängerschaltung einer Triangulationslichtschranke im Pulslichtbetrieb

bzw. T₂ auf V_{DD} vorgespannt. Diese Schaltung bewirkt, dass die Photodiode bei tiefen Frequenzen und bei Gleichlicht eine sehr niedrige Impedanz von etwa 1kOhm „sieht“. Ab einer Frequenz von etwa 500Hz wird die Schaltung hochohmig und erreicht bei 20kHz etwa 100kOhm. Damit werden niederfrequente Signale und insbesondere Ströme in der Photodiode, welche durch Gleichlicht (Sonnenlicht) erzeugt werden, wirksam unterdrückt. Wichtig ist, dass die Transistoren T₁ und T₂ sehr rauscharm sind. Das Photodiodensignal wird wechsellspannungsmässig über die beiden 1nF Kondensatoren ausgekoppelt und in einer zweistufigen Schaltung um IC1 verstärkt. Die Ausgänge der Operationsverstärker IC1a, b, c, d werden an analoge Eingänge eines

Mikrocontrollern geführt und dort digitalisiert. Da die Lichtschranke mit Lichtimpulsen von etwa $5\mu\text{s}$ betrieben wird, muss der A/D-Wandler eine Abtastrate von mindestens 500ksps haben. Die Verstärkerschaltung ist zweistufig ausgeführt, da der Dynamikbereich in der Größenordnung von 80dB ist (Signalunterschied zwischen einem dunklen Objekt in grosser Entfernung und einem hellen Objekt sehr nahe am Sensor). Um diesen Dynamikbereich abbilden zu können, müsste der A/D-Wandler im Mikrocontroller eine Auflösung von mindestens 14 Bit haben. Durch die zweistufige Lösung genügen A/D-Wandler von 8 Bit.

Der Mikrocontroller vergleicht die Signale A1 mit B1. Sofern diese beiden Signale nicht in der Sättigung sind, werden sie zur Distanzbewertung herangezogen. Wenn A1 grösser als B1 ist, ist der Lichtfleck eher auf der Seite mit D1 bis D8 (Darstellung 6). Wenn B1 grösser als A1 ist, ist der Lichtfleck eher auf der Seite mit D9 bis D16. Sollte eines der Signale in der Sättigung sein, werden die Ausgänge A2 und B2 analog zur Beschreibung oben zur Auswertung beigezogen. Mit diesem einfachen Prinzip ist es möglich, eine Lichtschranke aufzubauen, welche mit einer Basislänge von 25mm und einer Brennweite der Empfängerlinse von 25mm sowie einem Lichtfleckdurchmesser von 50mm in 2m Distanz eine Schaltungsgenauigkeit von einigen Millimetern erreicht.



Abbildung 1: Triangulationssensor von CEDES

Im Triangulationssensor TPS von CEDES ist das Prinzip der Triangulation mittels Doppeldiode umgesetzt. Er arbeitet mit einer LED-Beleuchtung, erreicht eine Reichweite von 2 m auf dunkle Objekte (5% Reflexion) und hat eine Distanzauflösung von besser als $\pm 5\text{ mm}$, unabhängig von der Objektrefektivität. Die Distanz wird eingestellt, indem mit einer mechanischen Stellenschraube die Position der LED lateral verschoben wird. Durch eine spezielle Schraube mit Feingewinde wird eine Auflösung der Distanzeinstellung von etwa 1 mm erreicht.