



Über Kimme und Korn

Varianten der Entfernungs- bestimmung mit dem Laser

► Winfried Reeb, Olching

Die optische Distanzmessung funktioniert schnell und berührungslos. Für verschiedene Messbereiche und –genauigkeiten haben sich unterschiedliche Methoden der Laser-Entfernungsmessung etabliert. Alle diese Verfahren arbeiten ohne Verschleiß und auch unter widrigen Bedingungen.

Der Wilderer im Silberwald hat ein ruhiges Gewissen. Weder der Hirsch, den er gerade mit seinem Laserzielfernrohr aufs Korn nimmt, noch unbeteiligte Zeugen müssen sich um ihr Augenlicht sorgen: Der Halbleiterlaser in der Zieloptik erfüllt die Bestimmungen der Laserschutzverordnung, Klasse I. Innerhalb einer Sekunde liefert das System seinem Benutzer die Entfernung des ausgewählten Ziels auf 2m genau, was dazu beiträgt, dass sich der Hirsch bald um überhaupt nichts mehr sorgen muss. Obwohl mehr als 600m zwischen dem Wild und dem Schützen liegen.

Dieses Beispiel einer Laser-Entfernungsmessung ist Ihnen zu brutal? Dann einige andere: Golfspieler versuchen, mit Laser->Rangefindern< ihr Handicap zu verbessern. In der Automatisierungstechnik sorgen Laser-Abstandssysteme mit Submillimeter-Messgenauigkeit für Vollständigkeitsanalysen, vermessen Werkstücke oder kontrollieren Leiterplattenbestückungen. Neben der hohen Messgeschwindigkeit ist der größte Vorteil optischer Distanzerfassung, dass sie berührungslos funktioniert. Die Technik kommt deshalb selbst

Mit klebrigen, chemisch aggressiven, heißen oder auch empfindlichen Oberflächen zurecht, solange dem Empfänger das reflektierte Signal für eine Messung ausreicht. Kein mechanischer Verschleiß, wie er bei taktilen Verfahren auftritt, trübt die Messfreude. Je nach Messbereich und erforderlicher Genauigkeit haben sich verschiedene Laser-Abstandsmessverfahren etabliert (Tabelle 1):

- Pulslaufzeitmessung,
- Phasenverschiebung,
- Triangulation,
- absolute Interferometrie.

Pulslaufzeit:

Mondentfernung und Radarfalle

Auch das schnellste Photon braucht eine bestimmte Zeit, um die Strecke Sender – Ziel und zurück zum Empfänger zurückzulegen. Da sich bei bekanntem Brechungsindex die Lichtgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium leicht aus der definierten Vakuumlichtgeschwindigkeit berechnen lässt, ist die Laufzeit des Lichtpulses ein direktes Maß für die Zieldistanz.

Je höher die Anforderungen an die Genauigkeit und die Auflösung der Abstandsmessung sind, desto aufwändiger und somit kostspieliger wird diese Methode. Die Auswerteelektronik, einschließlich des Empfängers und der Signalverarbeitung, muss nämlich Zeiten auf der Nano- und Subnanosekunderskala verarbeiten. Während der Dezimeterbereich noch relativ leicht mit Nanosekunden-Pulsen beherrschbar ist, verlangt die Millimeter- und Submillimeter-Messgenauigkeit nach optischen Pulsen mit einer Dauer von einigen zehn Pikosekunden und sehr speziellen Signalverarbeitungstechniken (1). Eine Hauptanwendung für die Entfernungsbestimmung nach der Pulslaufzeit sind Laserradar-sensoren. Mit Hilfe von leistungsstarken ns-Laserimpulsen mit Impulsleistungen von einigen 10W wird die

Geschwindigkeit von Fahrzeugen bis 250km/h überwacht. Dabei kann der Abstand zwischen dem fest installierten Lasergeschwindigkeits-Messsystem oder dem Polizisten mit Laser-radar-pistole und dem vorbeirasenden Fahrzeug bis zu 1000m betragen. Die Fahrtgeschwindigkeit wird dabei mit einer Genauigkeit von 1 bis 3 Prozent ermittelt.

Bei Entfernungen von mehr als einigen Kilometern hat die Signalauswertung mit ganz anderen Problemen zu kämpfen. Immer weniger vom Ziel reflektierte Photonen erreichen anschließend den Detektor. Eine Verbesserung der Signalintensität kann durch geeignete Bündelung schon in der Sendeoptik geschehen. Zusätzlich bringen Retroreflektoren am Zielobjekt die Lichtstrahlen in die richtige Bahn. SO auch beim >Lunar- Ranging-Experiment< der NASA, bei dem mehrere optische Reflektoren auf dem Erdtrabant mithelfen, seine Entfernung zur Erde auf 5cm genau zu messen.

Die Reichweite des Systems erhöht sich natürlich, wenn empfindlichere Empfänger verwendet werden. Eine Low-Cost-Avalanche-Photo-Diode (APD) kann bei gleicher Laserleistung etwa viermal so weit messen wie eine PIN-Diode, und eine High-End-APD schafft sogar die zehnfache Entfernung.

Auf der Emitter-Seite sind passende Puls-laserdiodes nur im Infraroten verfügbar (zwischen 850 und 1650nm). Das hat zwar zur Folge, dass der Strahl selbst nicht sichtbar ist, erleichtert es aber, vor allem im langwelligen Bereich, bei hinreichend kleinen Pulsbreiten die Augensicherheit der Systeme zu erreichen – trotz hoher optischer Spitzenleistungen.

Sehr kompakte, portable Messgeräte sind mit Hilfe einer koaxialen Optik für Sende- und Empfangsstrahl sowie durch Integration der Auswerteelektronik realisierbar. Daher werden diese Entfernungsmesser und Distanzsensoren auch als Navigationshilfe beim Andocken von Schiffen, zur Vermessung im Stadt- und Freilandgebiet, bei der Profilmessung von Steinbrüchen oder Abraumhalden oder zur Höhenmessung von Gebäuden, Bäumen und anderen Objekten verwendet.

In der Telekommunikation werden zum Beispiel bei der Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) schadhafte Stellen in Lichtwellenleitern anhand der an ihnen reflektierten Signale lokalisiert und charakterisiert. Auch die sogenannten Lidar-Geräte, die schon seit Jahrzehnten die Atmosphäre erkunden, sind mit dieser Technik eng verwandt.

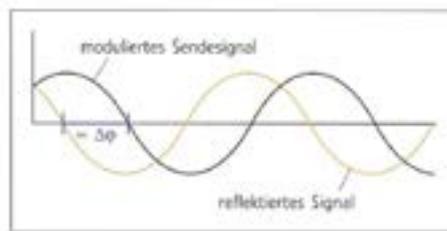


Bild 1. Die Phasenverschiebung $\Delta\phi$ zwischen emittiertem und empfangenem Signal ist proportional zum Lichtlaufweg und lässt sich leicht auswerten. Eine eindeutige Abstandsmessung ist jedoch nur dann gewährleistet, wenn $\Delta\phi = 360^\circ$

| | Pulslaufzeitmessung | Triangulation | Absolute Interferometrie |
|-------------|---|--|--|
| Messbereich | finanziell interessant einige 10 m bis einige 10 km | einige mm bis max. 10 m, meist 5 – 200 mm | mit konv. Halbleiterlaser: ca. 1 m mit External Cavity Laser >40 m |
| Genauigkeit | Submillimeterbereich möglich | 0,01% erreichbar | in Größenordnung der benutzten Wellenlänge |
| Bauteile: | Emitter | Impuls-laserdiode; verfügbar zw. 850 und 1650 nm | Modensprungfrei durchstimmbare Laserdiode |
| | Detektor | Si-(In,Ga)As- PIN-Fotodioden Si-(In,Ga)As- Avalanche-Fotodioden für höhere Reichweite | PSDs, CCD-Zeilen, Mehrelement-Dioden |
| | | | Standard-Fotodioden |

Tabelle 1. Varianten der Laser Entfernungsmessung im Vergleich

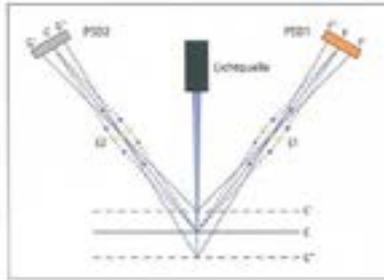


Bild 2. Triangulation:
Streulicht, das von einem Objekt in der Ebene C über die Optik F auf den Detektor abgebildet wird, trifft diesen im Punkt F. Befindet sich das Objekt in einer anderen Ebene, etwa C' oder C'', registriert der PSD das Licht in F' beziehungsweise F''

Phasenverschiebung: Räume messen und Kräne überwachen

Bei der Phasenverschiebungsmethode misst man das Echo einer Modulation des ausgesandten cw-Laserstrahls (Bild 1). Die Phasenverschiebung zwischen emittiertem und empfangenem Signal ist proportional zum Lichtlaufweg und lässt sich mit relativ einfachen Mitteln auswerten. Dabei wird das zu messende Objekt mittels einer fokussierten, hochfrequent (10 bis 500MHz) modulierten optischen Strahlung abgetastet. Bei der Vermessung von Gebäuden oder Räumen wird die Laserstrahlung an der Wand diffus reflektiert und auf einen Detektor geleitet. In elektrische Signale umgewandelt, wird die abstandsabhängige Phase mit der Referenzphase verglichen und ausgewertet. Die Phasendifferenz liefert das Maß für den Messabstand. Bei der Verwendung von kostengünstigen 7- bis 10mW-Laserdioden erreicht man eine Messgenauigkeit von $\pm 3\text{mm}$ bei Distanzen bis 100m. Neben der Vermessung von Räumen wird diese Art von Entfernungsmessgeräten auch bei der Überwachung von Förderanlagen und Krananlagen, Securityapplikationen, Füllstandsmessungen und zur Positionsüberwachung von bewegten Objekten verwendet.

Triangulation: Roboterarme Steuern in Echtzeit

Bei Messbereichen von einigen Millimetern bis zu maximal 10m ist die Triangulation das meistbenutzte Entfernungsmessverfahren (Bild 2). Ein Laser oder eine LED sendet einen gut kollimierten Analysestrahl auf die Zieloberfläche. Von dort wird das Licht im Allgemeinen in alle Richtungen gestreut.

Die Lage des Abbildungspunkts des Streulichts auf der Detektoroberfläche ist abhängig von der Entfernung zum Objekt. Ortsauflösende Detektoren wie PSDs (positionsempfindliche Detektoren), Mehrelement-Dioden oder CCD-Zeilen vermögen den Auftreffpunkt des Lichts mit hoher räumlicher Auflösung und hoher Abtastfrequenz (bis zu einigen MHz) zu ermitteln. Einfache trigonometrische Beziehungen führen zur zuverlässigen Messung der Objektdistanz mit einer Genauigkeit, die besser als 0,5 Prozent ist. Weniger als 10ms Messdauer sind erforderlich, so dass auch Schwingungen online erfasst werden können.

Die Lichtquelle sollte kompakt sein und muss einen möglichst kleinen Lichtfleck ausreichender Intensität aussenden, der sich mit zunehmender Entfernung nur wenig aufweitet. Eine leichte Modulierbarkeit der Amplitude ist wichtig, wenn das System zwischen Störungen aus der Umgebung (Fremdlicht) und dem modulierten Messsignal unterscheiden muss. Kollimierte Halbleiterlaser, die im Sichtbaren oder im nahen Infraroten emittieren, erfüllen diese Vorgaben und kommen deshalb bevorzugt zum Einsatz.

Bei Verwendung eines einigen Detektors können sich Kanten durch ungünstige Abschattungen störend bemerkbar machen. Die >doppelte Triangulation< überwindet solche Probleme (Bild 2). Die Kompensationswirkung der beiden Detektoren verbessert die laterale Empfindlichkeit deutlich, was zu einer Abstandsauflösung von mindestens 0,01 Prozent führt. Die Summe der Signale der beiden Detektoren ist direkt

proportional zur Energiemenge, die den Empfänger erreicht; das ermöglicht eine automatische Regelung der Sendeleistung. Auch bei unregelmäßig strukturierten oder nahezu transparenten Oberflächen führt diese Technik zum Erfolg.

Noch einen Schritt weiter geht die >rotationssymmetrische Triangulation<. Eine spezielle Optik bildet das reflektierte Licht auf einen ringförmigen PSD ab. Die Position des Lichtstrahls verschiebt sich, wenn die Entfernung zum Objekt verändert wird. Abschattungen beliebig orientierter Kanten oder Nuten spielen nun keine Rolle mehr, Farb- und Helligkeitsänderungen der Messoberflächen wirken sich nicht aus. Auch stark glänzende Gegenstände können sich der Messung nicht mehr entziehen. Die Anwendungsmöglichkeiten der Triangulation sind vielfältig (Bild 3). Unter anderem kontrollieren und regeln solche Verfahren in Echtzeit Produktionsprozesse, überwachen die Produktqualität, positionieren Roboterarme und regeln die Fahrwerke der Rennboliden von Schumacher, Frenzen und Co.

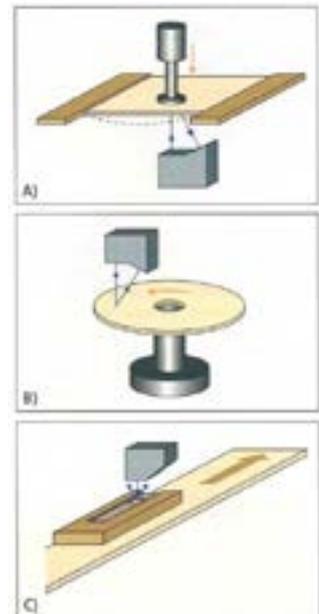


Bild 3. Die Kontrolle der Produktqualität erfolgt immer häufiger in Echtzeit schon während der Fertigung; (A) Deformierung; (B) Taumelprüfung; (C) Profilerfassung

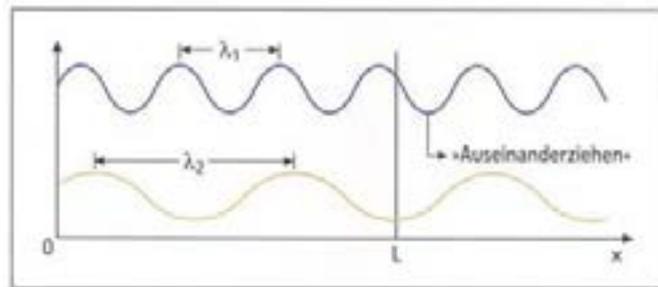


Bild 4. Absolute Interferometrie:
Beim kontinuierlichen durchstimmen der Wellenlänge ist die relative Phasenlage der Wellen λ_1 und λ_2 bei $x = L$ ein Maß für die Entfernung L

Absolute Interferometrie: Sehr genau auf große Entfernungen

Wo Abstandsmessungen eine Genauigkeit in der Größenordnung weniger Mikrometer erfordern, vertraut man auf die Unbestechlichkeit von Interferenzeffekten: Vom Licht der Wellenlänge λ_1 passt eine bestimmte Anzahl Wellenlängen in den Abstand L (Bild 4). Ein kontinuierliches Durchstimmen der Wellenlänge bis λ_2 entspricht anschaulich einem >Auseinanderziehen< der Lichtwelle. Dabei läuft eine von L eindeutig abhängige Anzahl Wellenberge am Beobachtungsort bei $x = L$ vorbei. Die Aufgabe des Interferometers besteht nun darin, diese Zahl möglichst genau zu ermitteln. Ist $\Delta\phi$ die messbare Phasendifferenz, welche aus der kontinuierlichen Wellenlängenänderung resultiert (2), so ergibt sich der Abstand zu

$$L = \Delta\phi \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (1)$$

Der Bruch wird auch als >synthetische Wellenlänge< λ_s bezeichnet.

HERSTELLER
Laser Components GmbH
82140 Olching,
Tel. 08142 / 2864-0
Fax 08142 / 2864-11
www.lasercomponents.com,
Laser 2003: B1.459

Dazu misst ein Michelson-Interferometer während des Durchstimmens die Phasenänderung. Da die Wellenlängen λ_1 und λ_2 bei Halbleiterlasern nicht ohne weiteres reproduzierbar eingestellt werden können, misst man gleichzeitig mit einem zweiten Interferometer eine wohl bekannte Referenzstrecke. Aus dem Verhältnis der Messergebnisse ergibt sich:

$$L = l_{ref} \frac{\Delta\phi}{\Delta\phi_{ref}} \quad (2)$$

Oder aber man tauscht die Referenzstrecke gegen Regelinterferometer, das die Änderung einer wohl bestimmten Wellenlänge λ_1 um ein ganz bestimmtes $\Delta\lambda$ kontrolliert. Mit einem zweiten Halbleiterlaser, der bei λ_3 emittiert, lässt sich die Auflösung erhöhen. Ein Vergleich der Phasen ϕ_1 und ϕ_2 und ϕ_3 liefert die entsprechende Genauigkeit.

Die Messgenauigkeit der absoluten Interferometrie wird um so besser, je größer der modensprungfreie Durchstimmbereich ist und je besser die Phasenauflösung gelingt. Außerdem sollte die Messdauer möglichst kurz sein, damit Brechungsindexänderungen oder Variationen der Messspiegelposition durch

Schwingungen während des Durchstimmens das Messergebnis nicht zu sehr beeinträchtigen.

Die kurze Kohärenzlänge konventioneller Halbleiterlaser schränkt deren Nutzen für diese Methode auf Messbereiche bis zu etwa einem Meter ein. Ein externer Gitterresonator erlaubt wegen seiner größeren Resonatorabmessungen Kohärenzlängen von mehr als 100m. Damit lassen sich Entfernungen bis über 40m mit einer Genauigkeit von 10^{-6} bestimmen. Man muss dafür allerdings das nötige Kleingeld für die teuren External-Cavity-Laser auf den Tisch blättern.

Auf Grund der hohen Messgenauigkeit werden derartige Laserinterferometer für präzise 3D-, Winkel- und Geradheitsmessungen eingesetzt. Dadurch können Maschinenteile und Maschinen in allen Freiheitsgraden exakt ausgerichtet und justiert werden, wie es zum Beispiel in der Druckmaschinenindustrie, bei Drehbankherstellern und ähnlichen Industriezweigen verlangt wird.

- **Literatur**
 - 1 F.P. Volpe: >Erzeugung von optischen Pikosekundenimpulsen hoher Leistung mit Halbleiterlasern zur Nahbereichs-Entfernungsmessung mit Submillimetermessgenauigkeit< Fortschrittsberichte VDI, Reihe 9: Elektronik, Nr. 202, VDI-Verlag.
 - 2 T. Pfeifer, J. Thiel: >Untersuchung eines absolutmessenden Interferometers mit Halbleiterlaser< Weiterführende Ansätze in der Interferometrie, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1995
- Dipl.-Ing. **Winfried Reeb** ist Vertriebsingenieur bei Laser Components in Olching.