

Ein Zollstock aus Licht

Das umständliche Hantieren mit Zollstock oder Maßband lässt sich mittlerweile mit Hilfe handlicher Lasergeräte umgehen. Dabei lassen sich ganz unterschiedliche physikalische Prinzipien nutzen, um optisch Entfernungen zu messen.

Das Wohnzimmer müsste mal wieder tapeziert werden – kein Problem für den modernen Heimwerker. Schnell noch mal messen, wie lang, breit und hoch das Zimmer ist, um nicht am Sonntag nachmittag, den Abschluss der Arbeit vor Augen, erschrocken feststellen zu müssen, dass eine Rolle Tapete fehlt. Früher suchte der Hobbytapezierer nun nach einem Zollstock, schob ihn mehrmals an seinem Daumen vorbei über den Teppich, überlegte, wie er den Schrank, unter dem er nicht messen konnte, mit zu berechnen hatte – heute holt er dagegen sein handliches Lasermessgerät aus dem Keller, hält es an die Wand, ein kurzer Knopfdruck, schon kennt er berührungslos den Abstand zur gegenüberliegenden Wand. Selbst Golfer verlassen sich nicht mehr nur auf ihr Augenmaß, sondern benutzen einen Laser, Rangefinder genannt, um die Entfernung zum nächsten Loch zu messen. Jäger bestimmen per Laser die Entfernung zum Hirsch, Maurer die Fensterbreite, und in der Industrie sind die Anwendungen der Laserentfernungsmessung zahlreich, vom Vermessen von Werkstücken über die Kontrolle von Leiterplatten bis zur Steuerung von Robotern.

Alle optischen Methoden zur Entfernungsmessung basieren auf der Reflexion eines Lichtstrahls. Je nach Anwendung kommen aber, abgesehen von dieser Gemeinsamkeit, unterschiedliche physikalische Prinzipien zum Einsatz, um dem Lichtstrahl seine Information zu entlocken. Das Triangulationsverfahren nutzt geometrische Verhältnisse, die Messung der Phasenverschiebung die Überlagerung zwischen ausgesandtem und empfangenem Lichtstrahl und die Pulslaufzeitmessung die Zeit, die der Lichtstrahl unterwegs ist.

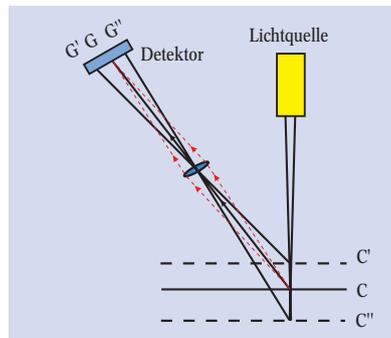
Reine Geometrie

Die Triangulationsmethode ist ein rein geometrisches Verfahren. Ein Lichtstrahl wird auf das Ziel gelenkt, dort reflektiert und von einem Detektor wieder registriert. Aus der Position des Abbildungs-



Mit Lasermessgeräten können Handwerker auch an unzugänglichen Stellen bequem Distanzen messen. (Foto: Hilti)

punktes auf der Detektorfläche, dem Winkel des reflektierten Strahls und dem Abstand zwischen Sender und Detektor lässt sich die Entfernung zum Ziel berechnen. Die Genauigkeit, die besser als 0,5 % ist, wird vor allem von der Kollimation des Lichtstrahls und der Ortsauflösung des Detektors bestimmt. Als Sender wird bei diesem Verfahren in der Regel ein Halbleiterlaser eingesetzt, da er einen kleinen Lichtfleck mit ausreichender Intensität liefert; eine Infrarotdiode tut's aber auch, vor allem bei kleineren Entfernungen. Als Detektoren eignen sich z. B. CCD-Zeilen, wie sie etwa auch in Scannern vorkommen. Die Genauigkeit lässt sich noch steigern, indem die Amplitude des Lichtstrahls leicht moduliert wird und damit eine Unterscheidung zwischen dem



Bei der Triangulationsmethode empfängt der Detektor je nach Lage der Reflexionsebene (C, C', C'') den Lichtstrahl in G, G' oder G''. Zusammen mit dem Abstand zwischen Lichtquelle und Empfänger lässt sich dann die Entfernung zum Ziel berechnen.

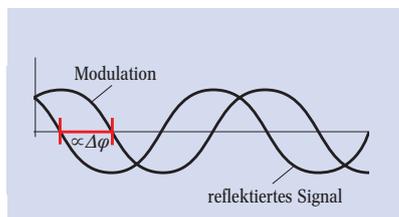
Messsignal und Streulicht von anderen Quellen möglich ist. Außerdem können mehrere Detektoren bis hin zu ganzen Detektorringen verwendet werden, um Fehler durch Abschattungen, unregelmäßige Objekte etc. zu eliminieren. Die Triangulationsmethode ist vor allem bei kleinen Distanzen die meistgenutzte

Methode, sie kontrolliert und steuert Produktionsprozesse, überwacht die Qualität von Werkstücken und positioniert Roboterarme. Da die Messdauer nur einige Millisekunden beträgt, können auch Schwingungen in Echtzeit erfasst werden.

Verschobene Phasen

Bei der Phasenverschiebungsmethode wird, wie der Name schon sagt, die Phasenverschiebung zwischen einem amplitudenmodulierten aus- und eingehenden Signal ausgewertet – man misst also sozusagen das Echo einer Modulation, das die Entfernung verrät. Das optische Sendesignal wird dafür mit einem hochfrequenten (im MHz-Bereich) und damit langwelligeren (Wellenlängen von etwa 1 bis einigen hundert Metern) Signal überlagert. Ab einer bestimmten Entfernung wird das Ergebnis dieses Verfahrens allerdings mehrdeutig, nämlich wenn der Lichtstrahl so lang unterwegs ist, dass der Sender schon in der zweiten Modulationsperiode arbeitet, wenn das Signal am Empfänger eintrifft: Die Phasenverschiebung wird dann größer als 360 Grad. Der maximale eindeutig messbare Abstand ist also die halbe Strecke, die das Licht während einer Periode (des Modulationssignals) zurücklegt – in der Praxis einige zehn Meter. Man kann aber den Messbereich erweitern, indem man ab einer bestimmten Entfernung eine andere Frequenz des Modulationssignals benutzt – dann bleibt das Signal eindeutig. Die Phasenverschiebungsmethode ist das Verfahren, das Golfer, Jäger, Architekten und Maurer anwenden – sie interessieren sich für Entfernungen bis zu einigen hundert Metern. Selbst mit preiswerten Laserdioden, deren Leistung nur wenige Milliwatt beträgt, können solche Distanzen auf einige Millimeter genau gemessen werden.

Bei ganz kleinen Distanzen ist nur eine Methode zuverlässig: die Interferenzmethode. Wirft man einen kohärenten Lichtstrahl auf ein Ziel, so passt nur eine bestimmte Anzahl Wellen in den Abstand, abhängig von der Wellenlänge. Zwei verschiedene Wellenlängen



Die Phasenverschiebungsmethode nutzt aus, dass der Phasenunterschied zwischen ausgesandtem und empfangenem Lichtstrahl proportional zum Laufweg des Lichtes ist. (Die Abbildung zeigt nur die Modulation des Sendesignals.)

erzeugen also eine ganz bestimmte Phasendifferenz, aus der sich der Abstand berechnen lässt. Die maximale Strecke, die sich mit der Interferenzmethode messen lässt, ist vor allem durch die Kohärenzlänge des verwendeten Lasers begrenzt; konventionelle Halbleiter lassen hier etwa einen Meter zu. Es gibt jedoch auch Laser mit einem externen Gitterresonator, die weitaus größere Kohärenzlängen und damit Messbereiche von einigen zehn Metern besitzen – bei einer Genauigkeit von 10^{-6} . Diese Methode dürfte dem Heimwerker allerdings etwas zu teuer sein.

Am Puls der Zeit

Das direkteste Verfahren zur Entfernungsmessung ist die Pulslaufzeitmethode: Zurückgelegter Weg ist gleich Geschwindigkeit mal benötigte Zeit. Das Problem: Licht bewegt sich sehr schnell, entsprechend kurz sind die Messzeiten und hoch die Ansprüche an die Auswerteelektro-

nik, die – will man eine Auflösung von einigen Millimetern oder noch besser erreichen – Signale im Nanosekundenbereich und darunter verarbeiten muss. Auch das Signal selbst, ein Lichtpuls, darf nur einige Pikosekunden „lang“ sein, weil ansonsten die Standardabweichung der Messentfernung zu stark ansteigt. Ein Vorteil der kurzen Messzeit ist natürlich gerade diese Kürze: Die Pulslaufzeitmethode eignet sich z. B. dort, wo extrem kurze Reaktionszeiten verlangt werden, etwa in der Überwachung des Sicherheitsabstandes um Maschinen herum.

Das Problem mit den kurzen Zeiten bedeutet umgekehrt, dass sich die Pulslaufzeitmethode vor allem für große Entfernungen eignet. Das zieht natürlich sofort ein zweites Problem nach sich: Je weiter der Reflektor entfernt ist, desto weniger Licht erreicht auch wieder den Detektor. Durch Bündelung des Lichtstrahls schon in der Sendeoptik und den Einsatz von Retroreflektoren, die ähnlich wie die „Katzenaugen“ am Fahrrad funktionieren und den Lichtstrahl wieder „auf Kurs“ bringen, ist man jedoch in der Lage, den Messbereich dieses Verfahrens auf die erstaunliche Größenordnung der Entfernung zwischen Erde und Mond auszuweiten. Auf der Oberfläche unseres Trabanten wurden von den bemannten Missionen Apollo 11, 14 und 15 sowie den unbemannten Missionen Luna 17 und Luna 21 Reflektoranordnungen zurückgelassen, die bis heute dazu dienen, die Entfernung zum Mond zu messen, seine Rotationsdaten zu verfolgen usw. Auch Informationen über die Erde, etwa die Kontinentalverschiebung, lassen sich daraus gewinnen. Zur Messung werden kurze Laserpulse (Pulslänge etwa 150–200 Pikosekunden) in ein ter-

restrisches Teleskop eingekoppelt, zum Mond geschossen, von den Reflektoren aus bis zu 300 Tripelprismen reflektiert und auf der Bodenstation wieder empfangen. Natürlich wird der Lichtstrahl trotz Fokussierung unterwegs stark auf-



Reflektoren auf dem Mond ermöglichen es, die Entfernung zwischen Erde und Mond mit Laserhilfe auf wenige Zentimeter genau zu bestimmen (Foto: NASA).

geweitet und hat auf dem Mond eine Fläche von 20 Quadratkilometern, d. h. nur ein Bruchteil der etwa 10^{19} Photonen pro Puls wird überhaupt reflektiert, und im Mittel nicht mal ein einziges Lichtquant erreicht wieder seinen Ausgangspunkt. Dazu gesellen sich weitere Probleme, von der Luftunruhe über das Aufspüren der Reflektoren (mit dem Fernrohr sind sie nicht zu sehen!) und der Nachführung des Teleskops bis hin zur Modellierung zahlreicher astronomischer und relativistischer Effekte bei der Auswertung – trotzdem kann die Entfernung Erde-Mond inzwischen auf wenige Zentimeter genau angegeben werden! Mithilfe der kontinuierlichen Messungen gelang es u. a. festzustellen, dass sich der Mond aufgrund der Gezeitenreibung jährlich um ca. 3,8 Zentimeter von der Erde entfernt. Doch so genau will es der Heimwerker vermutlich gar nicht wissen.

ULRICH KILIAN

Dr. Ulrich Kilian,
science & more
redaktionsbüro,
uk@scienceand-
more.de