

5 Elektrooptische Distanzmessung, Tachymeter und Laserscanner

Bei der *elektrooptischen Distanzmessung* wird zur Bestimmung einer Distanz d von einem Sender eine elektromagnetische Strahlung aus dem Bereich des nahen Infrarotlichtes ($\lambda_T = 0,8 \mu\text{m}$ bis $0,9 \mu\text{m}$) oder sichtbaren Lichtes ($\lambda_T = 0,65 \mu\text{m}$) ausgesendet, von einem Prisma oder von der Objektoberfläche reflektiert und durch einen Empfänger detektiert. Sender und Empfänger sind in einem Gehäuse untergebracht. Die Distanz kann aus der Laufzeit (*Impulslaufzeitverfahren*), aus dem Unterschied zwischen der Phasenlage beim Verlassen des Senders und der Phasenlage beim Empfang (*Phasenvergleichsverfahren*) oder aus einer aus beiden Prinzipien kombinierten Methode der über die Strecke geschickten und reflektierten Strahlung abgeleitet werden.

Ein wesentliches Bauteil eines Tachymeters bzw. Laserscanners ist das verwendete Distanzmessmodul, weshalb diese Instrumententypen in diesem Kapitel gemeinsam mit den Messprinzipien der elektrooptischen Distanzmessung behandelt werden.

5.1 Messprinzipien der elektrooptischen Distanzmessung

5.1.1 Impulslaufzeitverfahren

5.1.1.1 Messprinzip

Vom Sender wird ein Lichtimpuls mit bekannter Fortpflanzungsgeschwindigkeit c ausgesandt, am Ende der Strecke reflektiert und vom Empfänger aufgenommen (Abb. 5.1-1). Durch *Messung der Laufzeit t des Impulses* lässt sich die im Hin- und Rückweg, also doppelt durchlaufene Strecke d ermitteln:

$$2d = c \cdot t \quad \text{oder} \quad d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (5.1)$$

Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt von der Genauigkeit ab, mit der zum einen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt ist und zum anderen die Laufzeit t bestimmt werden kann. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c_0 einer elektromagnetischen Welle im Vakuum wird beim Durchgang durch ein Medium hauptsächlich in Abhängigkeit von der Dichte des Mediums verringert. Mit dem durch den *Brechungsindex n* ausgedrückten Verringerungsverhältnis und der Wellengeschwindigkeit c_0 im Vakuum ergibt sich die Geschwindigkeit c des Lichtes im jeweiligen Medium zu

$$c = \frac{c_0}{n} . \quad (5.2)$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c_0 im Vakuum wurde aus genauen Labormessungen zu $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ bestimmt und als eine universelle Naturkonstante festgelegt. Falls die Laufzeit t auf 10 Picosekunden ($1 \cdot 10^{-11} \text{ s}$) genau gemessen wird, resultiert daraus eine Streckenmessgenauigkeit von 1,5 mm für die Einzelmessung. Da diese Genauigkeit nur schwer

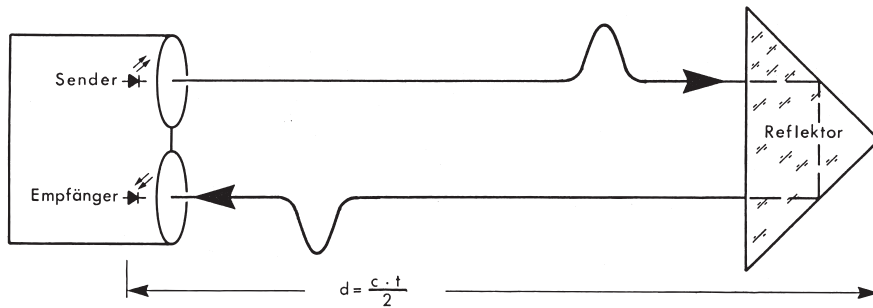


Abbildung 5.1-1: Prinzip der Distanzmessung mit Lichtimpulsen

erreichbar ist, wurde bei Vermessungsinstrumenten überwiegend das Phasenvergleichsverfahren angewandt, obwohl das Impulslaufzeit-Messverfahren durch die direkte Messung der Laufzeit einen im Prinzip einfacheren Geräteaufbau ermöglicht.

Der Einfluss der Ungenauigkeit einer Einzelmessung auf das Ergebnis der Distanzmessung wird dadurch herabgesetzt, dass durch eine *Mittelung über in schneller Folge ausgeführte Einzelmessungen* die Auflösung in den Millimeter-Bereich gebracht wird. Die erhaltenen Messwerte sind von Fluktuationen der Impulsamplituden unabhängig, da die zeitliche Mitte des Startimpulses und die zeitliche Mitte des reflektierten Impulses für die Laufzeitmessung maßgeblich sind.

Die Zeitmessung erfolgt digital, früher auch analog. Bei der *digitalen Zeitmessung* gibt der Startimpuls das Eingangstor eines Digitalzählers frei, das Stoppsignal sperrt ihn. In der Zwischenzeit gelangen von einem quarzstabilisierten Oszillator erzeugte Impulse in einen Zähler. Dieses Prinzip wird auch bei der digitalen Phasenvergleichsmessung (Abb. 5.1-10) angewandt.

Beim veralteten *analogen Messverfahren* wurde im einfachsten Fall während des auszumessenden Zeitintervalls ein Kondensator durch einen Konstantstrom aufgeladen. Die gespeicherte Ladungsmenge und die damit am Kondensator anliegende Spannung ist zu der Ladezeit und damit zu dem Zeitintervall zwischen Start- und Stoppsignal proportional.

Einen Laserimpuls-Distanzmesser mit Millimetergenauigkeit herzustellen ist nur mit erheblichem technischen Aufwand möglich. So seien hier nur die zur Zeitfestlegung erforderliche Impulsanalyse und die konstante Strahlungsleistung der Laserdiode über den gesamten Temperaturbereich genannt.

Gegenüber dem Phasenvergleichsverfahren (Kap. 5.1.2) ist beim Impulsverfahren kein Messen mit mehreren Frequenzen erforderlich, was zu einer kürzeren Messzeit führt. Außerdem kann bei gleich bleibender mittlerer Lichtleistung der Energieinhalt eines einzelnen Impulses erhöht und dadurch die Reichweite gesteigert werden. Somit ist dieses Messverfahren gut für die *reflektorlose Distanzmessung* geeignet. Auch können anstelle von *Prismen* die preiswerteren *Reflexfolien* Verwendung finden (Kap. 5.1.4).

5.1.1.2 Die WFD-Technologie der Firma LEICA GEOSYSTEMS als Beispiel für die instrumentelle Umsetzung

Die von der Firma LEICA GEOSYSTEMS in deren Pulsdistanzmessern verwendete Wellenform-Digitalisierungstechnologie (WFD), eine spezielle Form eines Laufzeit-Messsystems, das beispielsweise in der Leica Nova MS50 implementiert ist, soll jetzt als Beispiel für die Weiterentwicklung des zuvor erläuterten Messprinzips vorgestellt werden. Wie in Abb. 5.1-1 prinzipiell dargestellt, werden Signale ausgesendet, die reflektierten Signale erkannt und als digitalisierte Signalvektoren gespeichert. Von jedem in Impulsform abgestrahlten optischem Signal wird für die interne Kalibrierung ein minimaler Prozentsatz jedes Impulses direkt zum Empfänger geleitet (vgl. Prinzipskizze der Abb. 5.1-2), wodurch der Referenz- bzw. Startimpuls gewonnen wird. Der „Rest“ des Impulses gelangt durch die Fernrohroptik zum Objekt und wird dort reflektiert. Der durch das Fernrohr auf den Empfänger geleitete reflektierte Impuls wird als Stopp- oder Messimpuls bezeichnet. Für jede einzelne Messung wird eine interne Kalibrierungsmessung ausgeführt. Bei größeren Distanzen verringert sich die Energie des reflektierten Signals und damit das Signal-Rausch-Verhältnis jedes einzelnen zurückkommenden Impulses, was zu Schwierigkeiten bei der Analyse des Stoppimpulses führt. Durch die WFD-Technologie werden mehrere Impulse akkumuliert; je mehr Impulse gesendet und empfangen werden, desto besser lässt sich der Stoppimpuls digitalisieren (Abb. 5.1-3). Die Distanz ergibt sich aus dem Zeitunterschied zwischen Start- und Stoppimpuls (Abb. 5.1-1). Dieser Zeitunterschied wird aus den akkumulierten, digitalisierten Signalen gewonnen. Die Form des Start- bzw. Referenzimpulses wird bei der Digitalisierung berücksichtigt. Eine gültige Messung liegt nur dann vor, wenn die Form des Stoppimpulses der des Startimpulses entspricht. Wenn das Lasersignal z. B. durch eine querende Person unterbrochen wird, dann ist die Messung ungültig. Eine längere Messzeit verbessert das Signal-Rausch-Verhältnis proportional zur Quadratwurzel aus der Messzeit. So ergibt sich ein dreimal besseres Signal-Rausch-Verhältnis, wenn anstelle von 1 Sekunde 9 Sekunden lang gemessen wird.

Die WFD-Technologie weist eine Reihe von Vorteilen auf, wie eine schnelle Messung, eine geringe Größe des Laserpunktes, eine hohe Messgenauigkeit und eine große Reichweite. Diese Vorteile sind die Voraussetzung für den Einsatz dieser Technologie im 3D-Laserscanning. Im Vergleich zum Phasenvergleichsverfahren (Kap. 5.1.2) sind die Distanzmessungen auf Prismen um 50 % schneller bei einer nur geringfügig schlechteren Messgenauigkeit.

5.1.1.3 Impulsdistanzmesssystem der Firma TRIMBLE

Als weitere Messtechnologie soll das von der Firma TRIMBLE entwickelte Impulsdistanzmesssystem erläutert werden, das in deren Pulsdistanzmessern DR Plus implementiert und in den Tachymetern dieser Firma eingebaut ist. Von dem gepulst und nicht sichtbarem Laserstrahl wird ein minimaler Prozentsatz über einen Spiegel ausgeblendet (Abb. 5.1-2) und über einen inneren Lichtweg auf den Empfänger geleitet. Damit wird der Referenzimpuls erhalten. Das am Ziel reflektierte Laserlicht wird mithilfe der Optik auch auf den Empfänger geführt und erzeugt den Messimpuls, der gegenüber dem Referenzimpuls einen Zeitunterschied t aufweist. Der Referenzimpuls wird permanent gemessen. Die Dauer der Messung ist abhängig von der Zeit, die für die Auswertung des Referenzimpulses benötigt wird.

Die Erfassung des Referenzimpulses lässt sich in sechs Schritte aufteilen (Abb. 5.1-4). Im 1. Schritt (Bild 1 in Abb. 5.1-4) wird die Pulsweite des Referenzimpulses in der halben Höhe

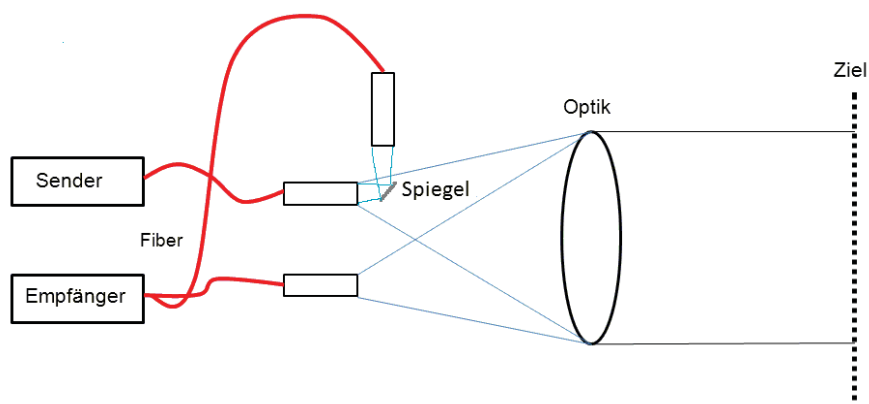


Abbildung 5.1-2: Prinzipskizze zum optischen Aufbau eines Pulsdistanzmessers nach Köhler

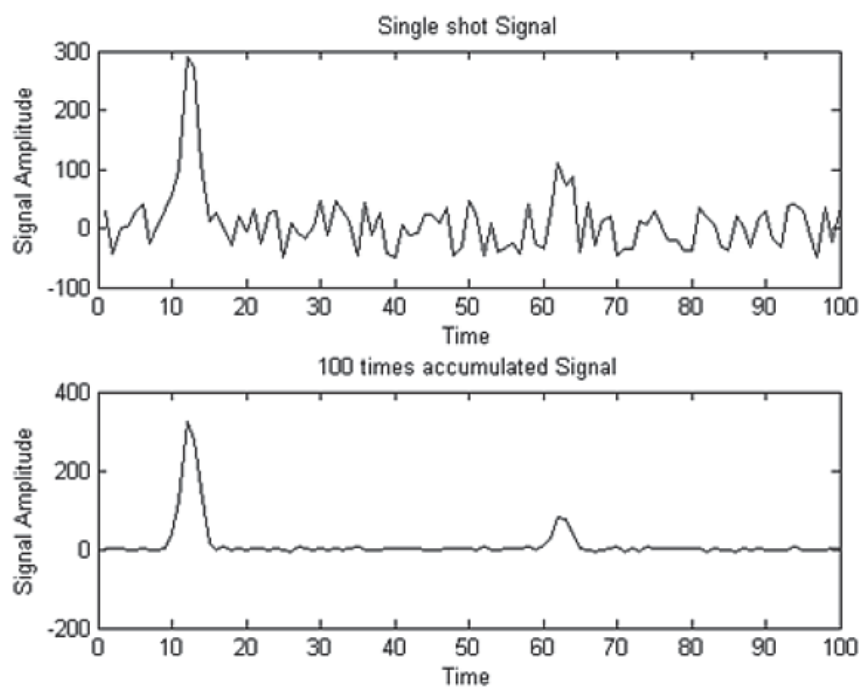


Abbildung 5.1-3: Start- und Stoppimpuls bei einem einfachen Signal und bei akkumulierten Signalen nach Grimm u. Zogg

der Maximalintensität des Pulses bestimmt. Die Pulsweite beträgt 4 ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$), was einer Strecke von 1,2 m entspricht ($c = 300\,000\,000 \text{ km/s}$; für 1 ns ergibt sich damit 0,3 m). Im 2. Schritt (Bild 2 in Abb. 5.1-4) werden mithilfe einer speziellen elektronische Schaltung (Sample&Holdschaltung = Abtast-Halteschaltung) die Amplituden an vier Stellen des Pulses simultan gemessen. Im 3. Schritt (Bild 3 in Abb. 5.1-4) werden die vier Amplituden an um 200 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-10} \text{ s}$) verschobenen Stellen gemessen und im 4. Schritt erfolgen weitere Verschiebungen um jeweils 200 ps, sodass der ganze Impuls erfasst werden kann. Durch ein ausgleichendes Polynom wird im 5. Schritt (Bild 5 in Abb. 5.1-4) ein Teil des Impulses mathematisch bestimmt, was im 6. Schritt auch für die anderen drei Bereiche des Impulses ausgeführt wird.

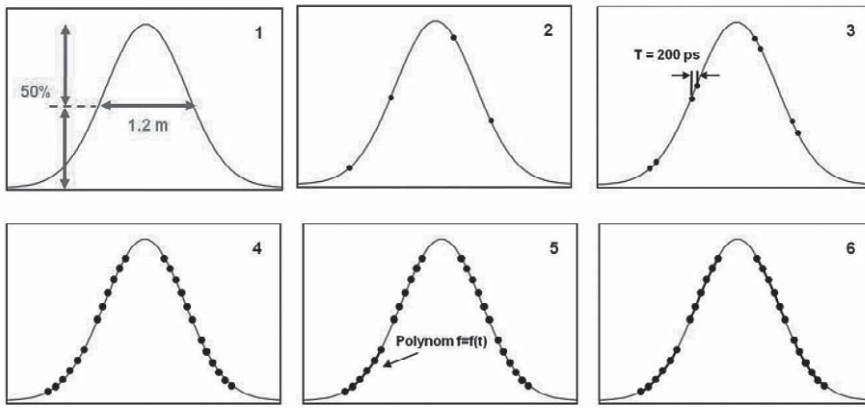


Abbildung 5.1-4: Erfassung des Referenzimpulses beim Trimble Distanzmesser DR Plus (entn. aus Köhler)

Die Erfassung des Messimpulses lässt sich in vier Schritte (Abb. 5.1-5) untergliedern: Im 1. Schritt wird der Referenzimpuls auf der Zeitachse um n 200 ps in Richtung Messimpuls verschoben, wobei die Anzahl der Verschiebungsintervalle von der Distanz abhängt, die mithilfe einer Grobdistanzmessung ermittelt wird. Wie beim Referenzimpuls wird auch beim Messimpuls an vier Stellen mit der Sample&Hold-Schaltung gemessen und das Signal integriert, um es vom Rauschen zu filtern. Sowohl der Referenz- als auch der Messimpuls werden digital abgespeichert. Im 2. Schritt wird der Messimpuls auf die gleiche Signalthöhe gebracht wie der Referenzimpuls. Für die exakte Distanz muss noch die Zeitdifferenz dt zwischen den vier Polynomen des Referenzimpulses und dem Messimpuls bestimmt werden. Diese Situation ist im Bild 3 der Abb. 5.1-5 dargestellt. Schließlich wird im 4. Schritt durch eine im Computer des Instruments berechnete Zeitverzögerung eine Position gefunden, für die die vier Messpunkte des Messimpulses mit der Form des Referenzimpulses bestmöglich übereinstimmen. Jetzt kann die Distanz über die Anzahl n der Verschiebeintervalle von jeweils 200 ps und mit dem Reststück dt berechnet werden.

Die Genauigkeit, mit der sich die Distanz bestimmen lässt, hängt direkt von der Genauigkeit der Zeitmessung ab, mit der die einzelnen Verschiebeintervalle von 200 ps ermittelt werden. Für die exakte Zeitmessung wird ein temperaturstabilisierter Quarzoszillator benutzt,

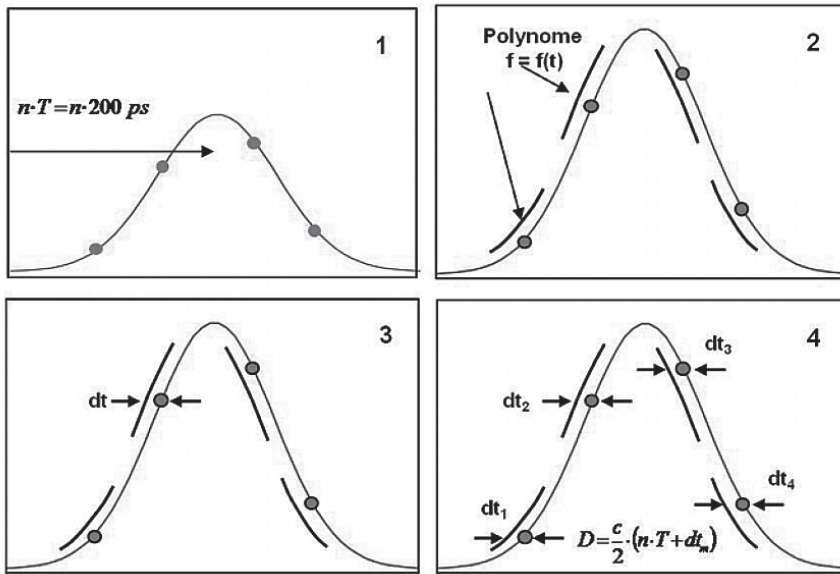


Abbildung 5.1-5: Erfassung des Messimpulses beim Trimble Distanzmesser DR Plus (entn. aus Köhler)

der die Systemzeit mit einer Periode von 51 ns zur Verfügung stellt. In dieses Zeitintervall werden mithilfe eines elektronischen Schaltkreises (PLL = Phase-Locked-Loop = Phasenregelschleife) 255 Intervalle zu jeweils 200 ps genau eingepasst. Hierdurch lassen sich Zeitintervalle mit sehr hoher Auflösung erreichen, die zu einer distanzunabhängigen Genauigkeit von $< 0,5$ mm führen.

Diese Messtechnologie, die in TRIMBLE-Instrumenten mit DR Plus Distanzmessern implementiert ist, bietet den Vorteil einer hohen Pulsausgangsleistung, die dazu führt, dass die Reichweite reduzierende Einflüsse wie Regen, Nebel, Schnee u. Ä. sich weniger stark auswirken. Die Zeit zwischen den Impulsen beträgt $40 \mu\text{s}$ ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$), weshalb das Laserlicht trotz hoher Intensität in den Pulsspitzen ungefährlich ist. Neben der kürzeren Messzeit für eine Standardmessung im Vergleich zum Phasenvergleichsverfahren (Kap. 5.1.2) können als Ziele wegen der höheren Pulsausgangsleistung auch dunkle Objekte angemessen werden.

5.1.2 Phasenvergleichsverfahren

5.1.2.1 Amplitudenmodulation

Bei diesem Verfahren werden kontinuierlich ausgesandte Lichtwellen in ihrer Intensität sinusförmig moduliert (Helligkeitsschwankungen durch *Amplitudenmodulation*), sodass die hochfrequente Lichtwelle mit der Länge λ_T als *Trägerwelle* für die niederfrequente *Modulationswelle* mit der Länge λ_M dient (Abb. 5.1-6).

Die Modulationsfrequenz wird in einem Schwingkreis (Hochfrequenz-Oszillator), der mit einem Quarz stabilisiert wird, erzeugt. Die Abweichungen zwischen der tatsächlichen Modu-