

Distanzmessverfahren elektrooptischer Tachymeter

Stand der Trimble Technik

Distance Meters in Total Stations

State of Trimble Technologies

Martin Köhler

Die Grundprinzipien des Pulslaufzeitverfahrens und der Phasenmessung in den Distanzmessern der Trimble® Tachymeter werden erläutert und gegenübergestellt. Im Einzelnen werden der prinzipielle Aufbau der Distanzmesser, die Messwerterfassung und -verarbeitung diskutiert. Den Abschluss bildet eine Erläuterung der Rückführung der Messgrößen und der Kalibrierungsmethoden in den Trimble Fertigungen.

Schlüsselwörter: Trimble Tachymeter, Pulsdistanzmessung, Phasendistanzmessung, Rückführung, Kalibrierung

The basic principles of the pulse distance and the phase shift technologies in Trimble total stations are explained and compared. The basic design of the distance meters, the pulse and phase shift determination and the data processing are shown in detail. Finally, the traceability is explained and information about the calibration strategy in Trimble productions is given.

Keywords: Trimble total stations, pulse distance meters, phase shift distance meters, traceability, calibration

1 EINFÜHRUNG

In Trimble Tachymetern sind zwei verschiedene Typen von Distanzmessern eingebaut, Pulsdistanzmesser und Phasenvergleichsdistanzmesser.

Seit der Implementierung eines DR200+ Pulsdistanzmessers in den Tachymetern der Serie Trimble 5600 ist dieser Typ stetig verbessert worden. Der nächste nach außen sichtbare Entwicklungsschritt war der DR300+ Entfernungsmesser, der zunächst auch im Trimble 5600 Tachymeter und dann in den Instrumenten der Trimble S-Serie eingesetzt war. Den bislang letzten Schritt bildet der DR Plus EDM, der den DR300+ in der S-Serie abgelöst hat.

Phasendistanzmesser, die Prismen- und reflektorlose Messungen ermöglichen, gibt es bei Trimble seit 2001. Distanzmesser der ersten Generation sind in den Tachymeterserien Trimble 3300, 3600 und 5600 eingebaut. In den folgenden Jahren wurden eine Reihe von Verbesserungen implementiert und in verschiedenen Tachymetern integriert (Trimble S-Serie, Nikon NPR 302, Trimble M3 und Spectra Precision® Focus® 6, 8, und 30). Als Beispiele für den aktuellen Stand seien der „HighPrecision“ Distanzmesser (DR HP) im Trimble S8 und der Distanzmesser mit Laserklasse 3R im Trimble S3 genannt.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf den jeweils letzten Stand der Entfernungsmesser in den Trimble Totalstationen.

2 IMPULSVERFAHREN

2.1 Das Prinzip der Pulsdistanzmessung

Das Prinzip der Pulsdistanzmessung ist sehr einfach, z.B. /Joeckel, Stober 1989/. Ein Lichtpuls wird ausgesendet, vom Reflektor zurückgespiegelt und wieder empfangen (Abb. 1), und die Laufzeit t des Signals für die Summe aus Hin- und Rückweg gemessen.

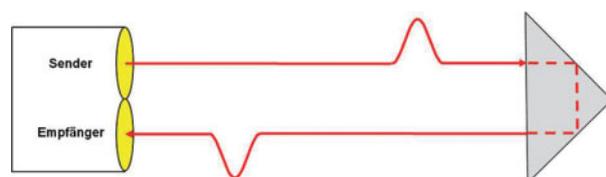


Abb. 1 | Prinzip der Pulsdistanzmessung

Mit der Lichtgeschwindigkeit c und der gemessenen Laufzeit t kann dann die einfache Distanz D berechnet werden.

$$D = \frac{t}{2} \cdot c$$

Die Entfernungsgenauigkeit ist also weitgehend davon abhängig, wie gut die Laufzeit der Pulse bestimmt werden kann. Trimble hat dazu eine spezielle Lösung entwickelt.

2.2 Aufbau des DR Plus

Ein Lichtpuls vom Sender wird durch die Optik zum Ziel ausgesen-

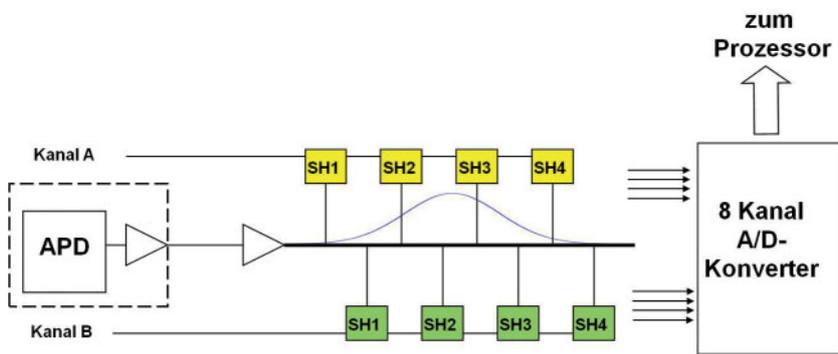


Abb. 4 | Doppelte Auslegung der Abtast-Halte-Schaltung

det (Abb. 2). Der Laserstrahl ist nicht sichtbar und entspricht für Prismenmessung und reflektorloser Messung der ungefährlichen Laserklasse 1. Ein kleiner Prozentsatz dieses Lichtes wird über einen Spiegel ausgeblendet und über einen inneren Lichtweg auf den Empfänger gebracht. Damit erhält man den ersten oder Referenzpuls. Das vom Ziel reflektierte Licht fällt auf den Empfänger und generiert einen zweiten oder Messpuls. Beide Pulse sind unten auf der Zeitskala zu sehen, links der Referenzpuls und rechts der Messpuls.

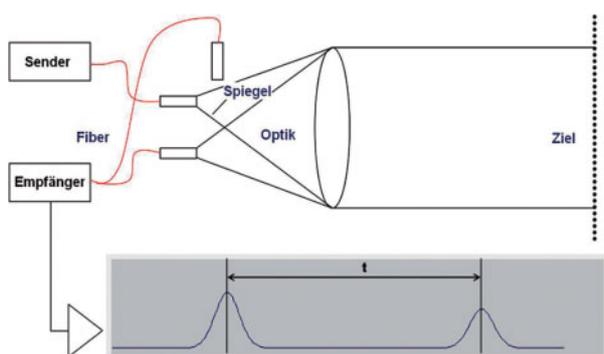


Abb. 2 | Aufbau des DR Plus EDM

2.3 Erfassung eines Laserpulses

Ein Trigger-Impuls steuert eine Abtast-Halte-Schaltung (Abb. 3), mit der der Laserpuls an 4 Stellen abgetastet wird. Sample & Hold heißt, dass die Amplitude gemessen, gespeichert und über eine gewisse Pulsanzahl integriert wird.

SHI = Sample & Hold Integrate

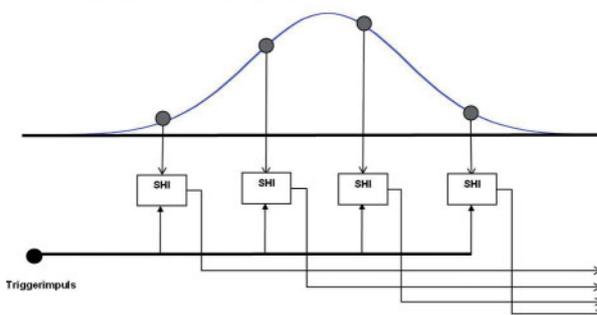


Abb. 3 | Abtast-Halte-Schaltung

Beim Referenzpuls wird eine konstante Anzahl Pulse ausgewertet, wohingegen beim Messpuls die Menge der Pulse vom Grad des Rauschens und der Signalstärke abhängt.

In Abb. 4 ist zu sehen, dass die zuvor gezeigte Schaltung doppelt vorhanden ist. Das ist sehr wichtig. Denn dann können über die Kanäle A oder B immer 2 Signale parallel ausgewertet werden.

Die analogen Werte für die integrierten Amplituden werden auf einen AD-Wandler gegeben und zum EDM-Prozessor weitergeleitet.

Der Referenzpuls wird permanent gemessen, auch wenn keine Messung vom Operateur angefordert ist. Zudem wird der Referenzpuls immer wechselseitig mit den Kanälen A und B gemessen (Abb. 5). Daher kann bei Auslösen der Messung immer sofort der Messpuls ausgewertet werden, und zwar auf dem Kanal, auf dem die letzte Referenzmessung stattgefunden hat. Dadurch ist gewährleistet, dass Referenz- und Messpuls immer mit derselben Elektronik gemessen und Drifteffekte eliminiert werden. Die Messdauer ist nur von der Auswertung des Messpulses bestimmt und nicht von der Referenzpulsmessung.

Daraus erwachsen noch weitere positive Effekte. Der Laser hat keine Aufwärmphase, da er immer an ist. Und es gibt keine Unterbrechung der Distanzmessung für die Messung des inneren Lichtweges. Die Distanz kann permanent gemessen werden mit dem besonderen Vorteil für kinematische Anwendungen, z.B. für die Maschinensteuerung.

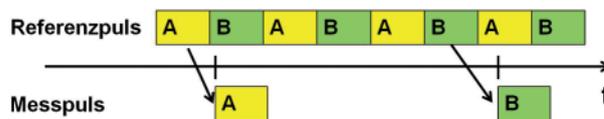


Abb. 5 | Kanalfestlegung Referenz- und Messpuls

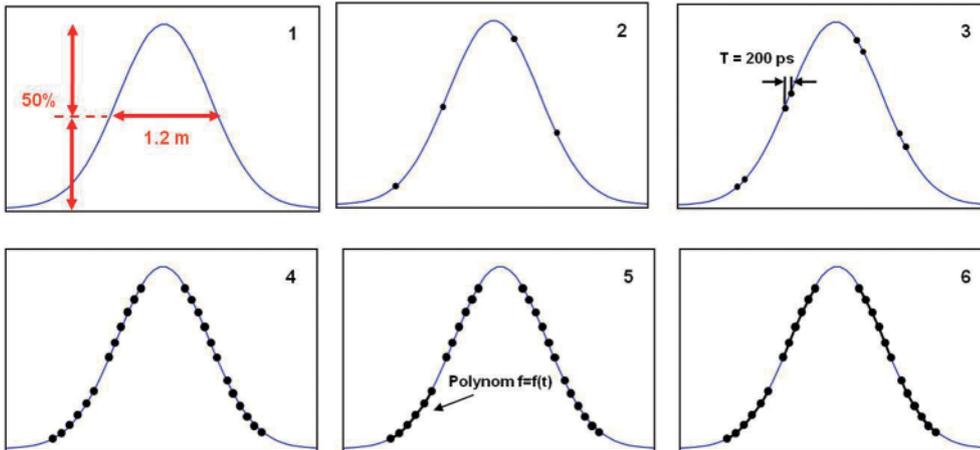


Abb. 6 | Die Erfassung des Referenzpulses

2.4 Die Erfassung des Referenzpulses

Abb. 6 zeigt die Schritte, mit denen die Erfassung des Referenzpulses erfolgt.

1. Der Referenzpuls
Die Pulsweite wird in der halben Höhe der Maximalintensität des Pulses zu 1,2 m gemessen. Auf der Zeitskala entspricht dies 4 ns ($1 \text{ ns} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ s}$).
2. Vier Amplituden werden mit der S&H-Schaltung simultan am Puls gemessen.
3. Die nächste Messung der 4 Amplituden ist um 200 Pikosekunden verschoben ($1 \text{ ps} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ s}$).
4. Durch weitere Verschiebungen um jeweils 200 ps kann der gesamte Puls erfasst werden.
5. Durch ein bestangepasstes Polynom in t wird ein Teil des Pulses mathematisch bestimmt.
6. Das geschieht ebenso für die anderen 3 Bereiche des Pulses.

Damit ergibt sich eine mathematische Beschreibung des Referenzpulses, die in der weiteren digitalen Verarbeitung des Messpulses benutzt wird.

2.5 Die Erfassung des Messpulses

Die Erfassung des Messpulses erfolgt in mehreren Schritten, wie in Abb. 7 dargestellt:

1. Der Trigger-Zeitpunkt wird vom Zeitpunkt des Referenzpulses auf der Zeitachse um n mal 200 ps in Richtung Messpuls verschoben. Die Anzahl n der Schritte hängt von der Distanz ab, die zuvor über eine Grobdistanzmessung bestimmt wird. Das Messsignal wird an den 4 S&H-Punkten wiederholt abgetastet und integriert, um es vom stochastischen Rauschen zu filtern. Die Integrationszeit hängt dabei vom Signalniveau und dem Rauschen ab. Beide Pulse (Referenz- und Messpuls) befinden sich nun mit Amplitude und Zeit im digitalen Speicher des EDM.
2. Im Rechner wird das Messsignal normiert, damit es die gleiche Signalhöhe bekommt wie der Referenzpuls.
3. Um zu einer genauen Distanz zu kommen, muss noch die Zeitdifferenz dt zwischen dem Messpuls und den Polynomen des Referenzpulses berechnet werden.
4. Durch eine zeitliche Verzögerung im Rechner wird eine Lage gefunden, bei der sich die 4 S&H-Punkte des Messpulses bestmöglich der Form des Referenzpulses anpassen. Dann kann die Distanz D über die Anzahl n der Verschiebungen um 200 ps und die Restabweichung dt berechnet werden.

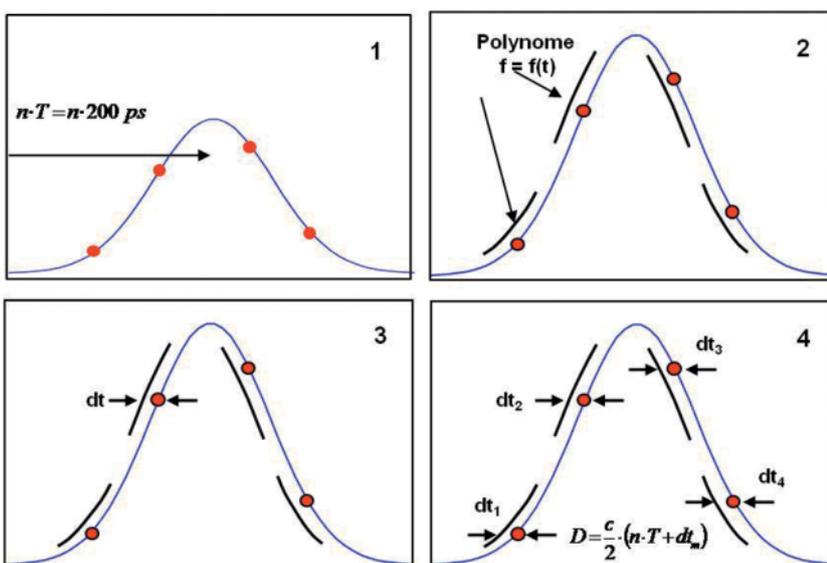


Abb. 7 | Die Erfassung des Messpulses

2.6 Die Genauigkeit der Zeiterfassung

Die Erfassung des Referenzpulses und die Grobdistanz zur Erfassung des Messpulses basieren auf einer Anzahl von Schritten im 200 ps Intervall. Diese Intervalle müssen sehr genau abgestimmt sein, da ein Fehler im Intervall sonst einen größeren Maßstabsfehler erzeugen könnte.

Der TCXO (Temperatur kompensierter Quarz Oszillator) arbeitet mit einer Frequenz von 19,44 MHz und liefert die Maßstabsgenauigkeit der Systemzeit. In den Zeitrahmen der resultierenden Periode von 51 ns Länge passt eine PLL (PLL = Phase-Locked-Loop = Phasenregelschleife) 255 Schritte zu jeweils 200 ps genau ein. Dadurch werden Zeitschritte mit sehr hoher Auflösung erreicht mit der Konsequenz, dass der Gesamtfehler distanzunabhängig und kleiner als 0,5 mm ist.

Dieses Verfahren kann vereinfachend mit einem Messband verglichen werden, wie in *Abb. 8* dargestellt: Die 51 ns Periode definiert die Meter-Striche und die 200 ps Perioden legen die mm-Striche dazwischen fest.

2.7 Vorteile des DR Plus

Hohe Reichweiten

Der Puls-EDM hat eine hohe Pulsausgangsleistung mit einer Intensität, die in den Pulsspitzen um den Faktor 10000 größer ist als beim Phasemesser. Das hebt den Puls deutlicher aus dem Rauschen heraus. Zusammen mit einer geringeren Umgebunglichtempfindlichkeit führt das dazu, dass alle reichweitenreduzierenden Einflüsse, wie Nebel, Regen, Schnee etc., sich weniger auswirken.

Niedrige Laserklasse 1 auch im DR-Mode

Mit einer Pulsrate von 25000 Hz und einer Pulsbreite von 4 ns ist die Zeit zwischen den Pulsen mit 40 μ s (1μ s = $1 \cdot 10^{-6}$ s) verhältnismäßig lang (*Abb. 9*). Das Verhältnis von An/Aus-Zeiten liegt bei 1:10000. Durch die langen Auszeiten ist das Laserlicht trotz hoher Intensität in den Pulsspitzen ungefährlich, und die mittlere Laserleistung wird sogar so niedrig, dass die Laserklasse 1 auch bei reflektorlosem Messen gewährleistet werden kann.

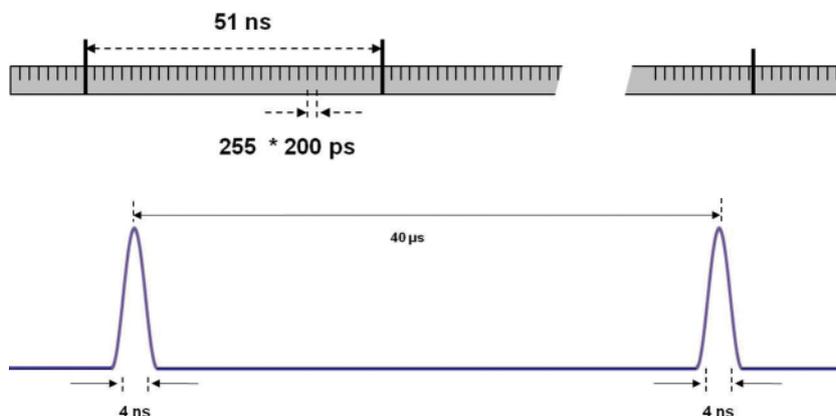


Abb. 8 | Abstimmung TCXO und PLL

Abb. 9 | An/Aus-Zeiten des Lasers

Permanente Messung

Bei der Messung mit dem DR Plus EDM erfolgt keine Unterbrechung für den inneren Lichtweg. Das ist besonders wichtig für kinematische Anwendungen, z.B. in der Maschinensteuerung. Da der Laser immer an ist, ergeben sich auch keine Aufwärmphasen beim Start einer Messung.

Weitere Vorteile

- Kürzere Messzeit einer Standardmessung.
- Dunkle Objekte können bei reflektorloser Messung durch die hohe Pulsausgangsleistung besser erfasst werden.
- Reflexionen an mehreren Zielen sind separierbar. Der Benutzer kann über einen Entfernungsbereich das auszuwertende Signal selektieren, wenn 2 oder mehrere Objekte in der Sendekeule liegen.

3 PHASENVERGLEICHsverfahren

In den phasenmessenden Distanzmessern von Trimble wird nur eine Sendediode für Prismenmessung und reflektorlose Messung verwendet, ein roter Halbleiterlaser mit 660 nm Wellenlänge. Sieben gleichwertige Maßstabsfrequenzen rund um 400 MHz werden von einem TCXO mit 15 MHz abgeleitet und tragen alle zur Feinmessung bei. Die Maßstabsfrequenz von 400 MHz entspricht einem Feinmaßstab von 0,375 m /Kludas et al. 2011/.

Es werden keine Grobmaßstäbe erzeugt und ausgesendet. Die Eindeutigkeit erfolgt vielmehr durch Differenzbildung. Der Eindeutigkeitsbereich ist 7,3 km. Das heißt: Wenn alle Maßstabswellen mit Phase Null ausgesendet werden, wird es einen gemeinsamen Nulldurchgang aller 7 Wellenlängen erst wieder bei der Eindeutigkeitsstrecke geben.

3.1 Aufbau des Phasendistanzmessers

Um thermische Driteffekte zu erfassen und zu kompensieren, besteht der Messvorgang aus der Messung eines inneren und eines äußeren Lichtweges (*Abb. 10*).

Ein kleiner Teil des von der Sendediode emittierten Signals wird über einen Referenzspiegel ausgeblendet und über eine Referenzfaser weitergeleitet. Der Referenzspiegel ist immer im Lichtweg des äußeren Signals. Vor dem Empfänger befindet sich ein bewegliches Paddel, das zwischen innerem und äußerem Lichtweg selektiert.

An der Laserdioden liegt immer volle Leistung an, <1 mW für Laserklasse 2 im Trimble S8 und <5 mW für Laserklasse 3R im Trimble S3. Im äußeren Lichtweg liegt zunächst ein Filter, mit dem die Ausgangsleistung im Prismenmode für Laserklasse 1 auf <0,3 mW reduziert wird. Das Filter wird durch einen Filtermotor gesteuert, sodass es im DR-Mode aus dem Transmitterstrahl gedreht werden kann.

Das Filter dämpft das Licht im Prismenmode, um ein Irritieren des Reflektorträgers durch zu starkes Licht zu vermeiden. Das reflektierte Signal gelangt über das Objektiv und zwei Spiegel in eine Empfängerfaser. Ein Graukeil, dessen „offene“ Stellung durch einen Reflexkoppler indiziert wird, regelt über einen Schrittmotor die Amplitude des empfangenen Signals.

Die Empfängerdiode empfängt, gesteuert mit dem Paddel, wechselweise die Signale vom inneren und vom äußeren Lichtweg, woraus im Transceiver Board die Distanz abgeleitet wird. Von hier aus wird die Entfernungsinformation zum IPC Board weitergeleitet, der Schaltzentrale einer Totalstation.

3.2 Traditionelle Mehrdeutigkeitslösung

Zum Vergleich mit der Trimble Variante der Mehrdeutigkeitslösung wird kurz die traditionelle Methode diskutiert. Detaillierte Informationen findet man z.B. in /Joeckel, Stober 1989/. Eine Lichtwelle wird ausgesendet, wobei dieser Lichtwelle eine Maßstabswelle amplitudenmoduliert mitgegeben ist. Das vom Prisma gespiegelte Licht trifft phasenverschoben ($\Delta\varphi$) wieder im Instrument ein (*Abb. 11*). Die Phasenverschiebung wird gemessen sie ist ein Maß für die Strecke. Damit lässt sich allerdings nur das Reststück innerhalb des gewählten Maßstabes, z.B. 10 m, bestimmen.

Zur Eindeutigkeit werden eine Reihe von Grobmaßstäben mit längeren Maßstabswellen ausgesendet, z.B. 100 m, 1000 m, auf denen wieder die jeweiligen Reststücke in gleicher Weise gemessen werden. Dann kann die Strecke bis zu einer zweckmäßig gewählten Grenze eindeutig bestimmt werden. Aus der Feinmessung mit dem 10 m Maßstab erhält man z.B. die Restphase 7,358 m, mit der 100 m Welle 77,4 m und aus dem 1000 m Maßstab 378 m. Dann kann das Messergebnis zu 377,358 m zusammengesetzt werden.

Wichtiger Unterschied zur Mehrdeutigkeitslösung in modernen Trimble EDM ist, dass die Grobmaßstäbe in traditionellen Lösungen alle nacheinander ausgesendet werden. Das kostet Zeit. Nur die Integrationszeit während der Feinmessung trägt zur Genauigkeit bei.

3.3 Eindeutigkeit durch Differenzbildung

Das Prinzip der Trimble Phasenvergleichsmessung soll anhand *Abb. 12* mit einem emulierten Beispiel beschrieben werden. Statt der 7 Maßstabsfrequenzen werden nur 3 dargestellt, wodurch die Darstellung übersichtlicher wird. Und anstelle der Maßstabswellen um 0,375 m werden solche um 1 m verwendet. Damit ist das Prinzip rechnerisch einfacher nachzuvollziehen.

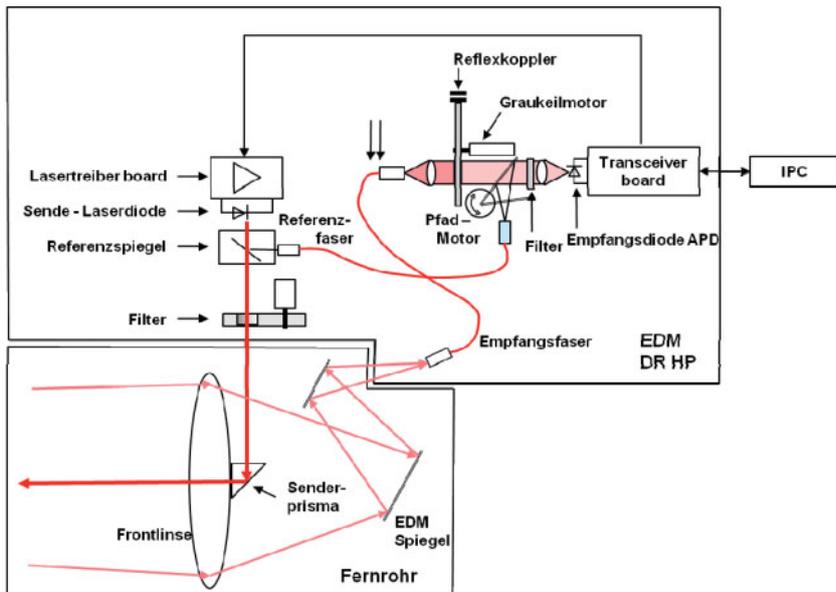


Abb. 10 | Aufbau des Phasendistanzmessers

Wir gehen davon aus, dass 3 Maßstabsfrequenzen mit $F_1 = 150$ MHz (1 m), $F_2 = 135$ MHz (1,11 m) und $F_3 = 148,5$ MHz (1,01 m) erzeugt werden. Auf diesen 3 Maßstäben werden die Restphasen R_1 , R_2 und R_3 gemessen. Dies ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Frequenzen	Maßstäbe	Reststücke
$F_1 = 150,0$ MHz	$M_1 = 1,00$ m	$R_1 = 0,56$ m
$F_2 = 135,0$ MHz = $9/10 \cdot F_1$	$M_2 = 1,11$ m	$R_2 = 0,82$ m
$F_3 = 148,5$ MHz = $99/100 \cdot F_1$	$M_3 = 1,01$ m	$R_3 = 0,49$ m

Rechnerisch werden noch die Differenzen $F_4 = F_1 - F_2$ und $F_5 = F_1 - F_3$ gebildet. Im Gegensatz zu konventionellen Techniken werden diese Wellen aber nicht abgestrahlt, sondern sie dienen nur rechnerisch als Grobmaßstäbe, hier 10 m und 100 m, mit Restphasen, die aus den Restphasen der Feinmessfrequenzen gerechnet sind:

Differenzfrequenzen (Berechnung)	Maßstäbe	Reststücke
$F_4 = F_1 - F_2 = 15$ MHz	$M_4 = 10$ m	$R_4 = R_1 - R_2 = -0,25 + 1 = 0,75$ m
$F_5 = F_1 - F_3 = 1,5$ MHz	$M_5 = 100$ m	$R_5 = R_1 - R_3 = 0,56 - 0,49 = 0,07$ m

Die Restphase am Feinmaßstab F_1 und die gerechneten Restphasen der Grobmaßstäbe werden dazu benutzt, eine erste eindeutige Distanz zu bestimmen:

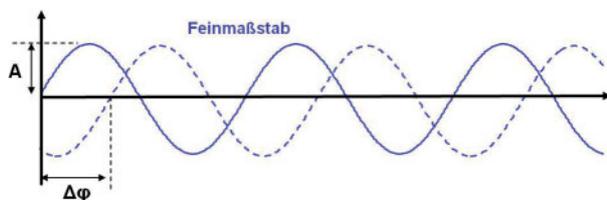


Abb. 11 | Phasenverschiebung

Genäherte Distanz		
M5 · R5	$100 \text{ m} \cdot 0,07$	7 m
M4 · R4	$10 \text{ m} \cdot 0,75$	7,5 m
M1 · R1	$1 \text{ m} \cdot 0,56$	0,56 m
	Distanz	7,56 m

Im nächsten Schritt werden die Vielfachen der Maßstabsfrequenzen berechnet. Dazu wird die Formel für die Distanzmessung hergenommen:

$$D = M_i \cdot (N_i + R_i)$$

und nach dem Vielfachen N aufgelöst:

$$N_i = \text{ROUND} \left(\frac{D}{M_i} - R_i \right)$$

Mit dieser Formel können dann die Vielfachen der Maßstabsfrequenzen abgeleitet werden:

Vielfache		
N_1	$\text{ROUND}(7,56/1 - 0,56)$	7
N_2	$\text{ROUND}(7,56/1,11 - 0,82)$	6
N_3	$\text{ROUND}(7,56/1,01 - 0,49)$	7

Mit diesen Vielfachen, den Maßstäben und den Reststücken werden nun die Distanzen mit der o.a. Formel für alle Maßstabsfrequenzen ausgerechnet und gemittelt.

Distanzen		
$D_1 = M_1 \cdot (N_1 + R_1)$	$1 \cdot (7 + 0,56) \text{ m}$	7,56 m
$D_2 = M_2 \cdot (N_2 + R_2)$	$1,11 \cdot (6 + 0,82) \text{ m}$	7,57 m
$D_3 = M_3 \cdot (N_3 + R_3)$	$1,01 \cdot (7 + 0,49) \text{ m}$	7,56 m
	Gemittelt	7,563 m

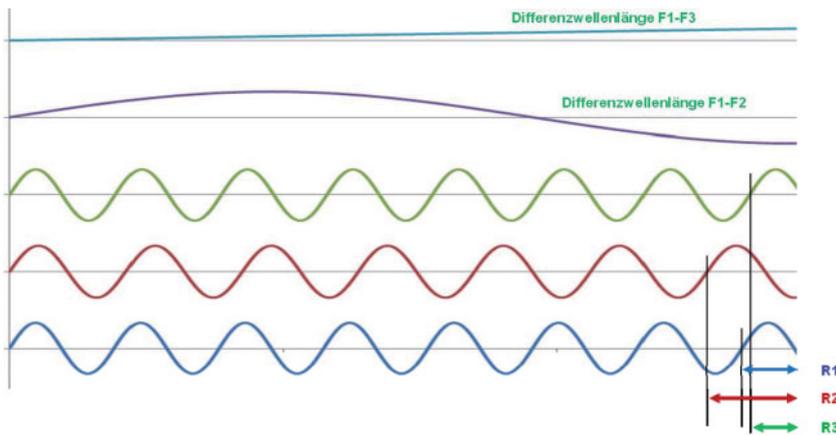


Abb. 12 | Maßstäbe, Differenzen und Reststücke

3.4 Vorteile der Phasendistanzmesser

Höhere Genauigkeit

Phasendistanzmesser haben ein hohes Genauigkeitspotenzial. So ist der High Precision Phasemesser (DR HP) im Trimble S8 mit einer Genauigkeit von 1 mm + 1 ppm spezifiziert, resultierend aus einem Sollstreckenvergleich /Trimble 2011/. Die Wiederholpräzision nach ISO 17123-4 ist im Datenblatt mit 0,8 mm + 1 ppm angegeben.

Höhere Reichweite in der Prismenmessung.

Wenn man die Umgebungsbedingungen außer Acht lässt, ist die maximale Reichweite bei den Phasendistanzmessern nur durch den Eindeutigkeitsbereich (7,3 km) limitiert.

Sichtbarer Messlaser

Das sichtbare Licht der Trägerwelle des Phasennessers kann auch als Laserpointer benutzt werden. Ein separater Laserpointer entfällt.

WYSIWYG: "What you see is what you get".

Die Distanz wird zum Punkt des Laserfleckes gemessen. Eine Dejustierung kann sofort erkannt werden, wenn der rote Laserpunkt nicht in Fadenkreuzmitte liegt.

Zentrische Abstrahlung

Der Laser kann aufgrund seiner kleinen Emissionsfläche koaxial zentrisch durch ein kleines Prisma auf der Rückseite der Objektivlinse emittiert werden.

Kleinerer Laserfleck

Der Laserspot überdeckt bei reflektorloser Messung nur einen kleinen Bereich des Objektes.

Vorteile gegenüber älteren Phasendistanzmessern

Während der gesamten Messzeit werden Feinmessungen auf den 7 Maßstabsfrequenzen durchgeführt, wodurch alle Feinmaßstäbe zur Feingenaugigkeit beitragen können. Grobmaßstäbe werden nur rechnerisch benutzt und belasten damit nicht die Messzeit. Bei großen Unterschieden in den Maßstäben (grob bis fein) war es früher notwendig, ein sehr gutes Signal/Rauschverhältnis zu haben. Ein schlechtes Verhältnis führt zu einer größeren Streubreite des ermittelten Phasenwinkels. Das konnte dazu führen, dass keine Eindeutigkeit zu erreichen war. In modernen Distanzmessern ist durch die kleineren Abstände der Grob frequenzen die Eindeutigkeit auch zu bekommen, wenn das Signal/Rauschverhältnis schlechter ist.

4 KALIBRIERUNGSKONZEPT

Im Fertigungsprozess der Tachymeter werden alle erforderlichen Justierungen am Instrument mit definierter Genauigkeit vorgenommen. Das heißt, es bleiben immer Restfehler übrig, weshalb am Ende der Fertigungslinie immer ein Kalibrierungsprozess steht, der in einer wohldefinierten Reihenfolge abläuft.

Das Kalibrierkonzept für die Distanzmesser in den Trimble Fertigungen schließt die Rückführung der physikalischen Messgrößen *Länge* und *Frequenz* ein. Das heißt, es muss sichergestellt sein, dass sich die Kalibrierung der EDM auf internationale Normale stützt. Ein Maßanschluss bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) macht es möglich, Sollstrecken in der Fertigung bereitzustellen, mit der die Additionskorrektur bestimmt wird. Frequenzzähler werden in einem akkreditierten Prüflabor kalibriert, um den Maßstab rückzuführen.

Bei elektronischen Distanzmessern sind im Allgemeinen drei wesentliche Parameter zu bestimmen, die Maßstabskorrektur, die Additionskorrektur und eine mögliche zyklische Phasenfehlerkorrektur. Alle Parameter werden separat in der Reihenfolge bestimmt, die in der folgenden Tabelle angezeigt ist. Das Verfahren der Bestimmung ist jeweils dem Parameter angepasst. Jeder Parameter kann daher für sich mit der gewünschten Genauigkeit bestimmt werden. Es gibt keine gegenseitige Beeinflussung und auch andere Parameter, wie z.B. die Atmosphäre, werden kompensiert und beeinflussen nicht die jeweilige Bestimmung.

An die Genauigkeit der Messmittel für die Fertigungskalibrierung werden die folgenden Anforderungen gestellt.

Korrekturen	Realisierung	Genauigkeit
Maßstabskorrektur	Frequenzzähler	$\leq 0,01$ ppm
zyklische Phasenfehlerkorrektur	Messbahn	$\leq 0,05$ mm
Additionskorrektur	Referenzstrecken	$< 0,30$ mm

4.1 Maßanschluss in der PTB

Der Maßanschluss erfolgt in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Eine Aufgabe der PTB ist es, die ge-

setzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem weiterzugeben. /Meiners-Hagen, Pollinger 2011/ berichten über einen 50 m langen Längenkomparator, den die PTB zur Rückführung der Messgröße „Länge“ betreibt (Abb. 13). Die Genauigkeit der dort gemessenen Strecken ist in den Zertifikaten der PTB mit 2-sigma = 0,1 mm angegeben.



Abb. 13 | Längenkomparator der PTB

Zur Kalibrierung mit absoluten Strecken wird noch eine mechanische Ankopplung des Messwagens benötigt, auf dem sich einerseits das Prisma für das Interferometer befindet, und auf der anderen Seite ein Reflektor für die Messung mit dem Referenzinstrument angebracht ist. Diese mechanische Ankopplung wird in einem akkreditierten Prüflabor (DKD-Labor) mittels einer Koordinatenmessmaschine mit 2-sigma = 0,1 mm rückgeführt kalibriert.

Die Interferometerbahn wird mit den Referenzinstrumenten nicht in gleichabständigen Stützstellen durchgemessen, sondern es werden *die* spezifischen Längen gemessen, die in den Fertigungen als Kalibrierstrecken eingerichtet sind. Alle Stützstellen werden im Hin- und Rückweg mit jeweils 5 Einzelmessungen erfasst. Die dabei erreichte Messpräzision wird mit 2-sigma = 0,1 mm abgeschätzt.

Aus den genannten 3 Anteilen ergibt sich eine Gesamtgenauigkeit der Ergebnisse der Rückführungsmessung von 2-sigma = 0,17 mm.

Sinnvollerweise wird diese Rückführung mit mehreren geeigneten Referenzinstrumenten durchgeführt, deren Langzeitstabilität durch wiederholte Bestimmung in Braunschweig nachgewiesen ist. Die Referenzinstrumente zeichnen sich zudem durch eine hohe Genauigkeit und eine sehr gute Präzision aus.

Für jedes Referenzinstrument wird von der PTB ein Zertifikat vergeben, das die Rückführung des Distanzmessers auf nationale Nor-

male dokumentiert. Diese Dokumentation enthält eine Liste mit den bestimmten Differenzen zwischen den gemessenen Strecken des Referenzinstruments und den Sollwerten des Längenkomparators. Dazu wird die Unsicherheit der Sollmaße dokumentiert.

Übertragung in die Fertigung

In den Trimble Fertigungen sind jeweils eine Reihe von festen Vergleichsstrecken im Messbereich von 2,5 m bis 50 m eingerichtet. Das sind genau die Streckenlängen, die in der PTB gemessen wurden. Diese Fertigungsstrecken werden mit dem Referenzinstrument mehrfach gemessen. Die Messgenauigkeit wird mit 2-sigma = 0,25 mm abgeschätzt. Damit ergibt sich aus der Unsicherheit der Rückführungsmessung (2-sigma = 0,17 mm) und der Messgenauigkeit eine Gesamtunsicherheit der Fertigungsstrecken von 2-sigma = 0,30 mm.

4.2 Rückführung der Frequenz

Die Rückführung des Maßstabes erfolgt über eine Kalibrierung des Frequenzzählers, z.B. durch ein akkreditiertes Kalibrierlabor (z.B. Carl Zeiss Jena) oder mit einem GPS-Zeitnormal.

In der Fertigung erfolgt dann eine weitere Überwachung des Zählers, z.B. mittels DCF77-Signal oder auch durch andere Normale (GPS, Rubidium). Bei der Überwachung wird nur darauf geachtet, dass die Frequenz langzeitstabil bleibt. Es erfolgt keine neue Kalibrierung des Zählers, solange nicht die Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-8}$ oder der festgelegte Kalibrierzyklus von 12 Monaten überschritten ist. Erst dann muss der Zähler neu kalibriert werden.

4.3 Maßstabskalibrierung

In den Trimble-Fertigungen werden die aktuellen Frequenzen immer über eine interne Messung ermittelt. Externe Kalibrierlabors können dagegen die Frequenzen nur extern im Zielstrahl messen.

Zur externen Kalibrierung der Phasendistanzmesser wird die Maßstabsfrequenz von 400 MHz kontinuierlich abgestrahlt. Beim Pulsdistanzmesser kann man die Pulswiederholfrequenz messen. An die

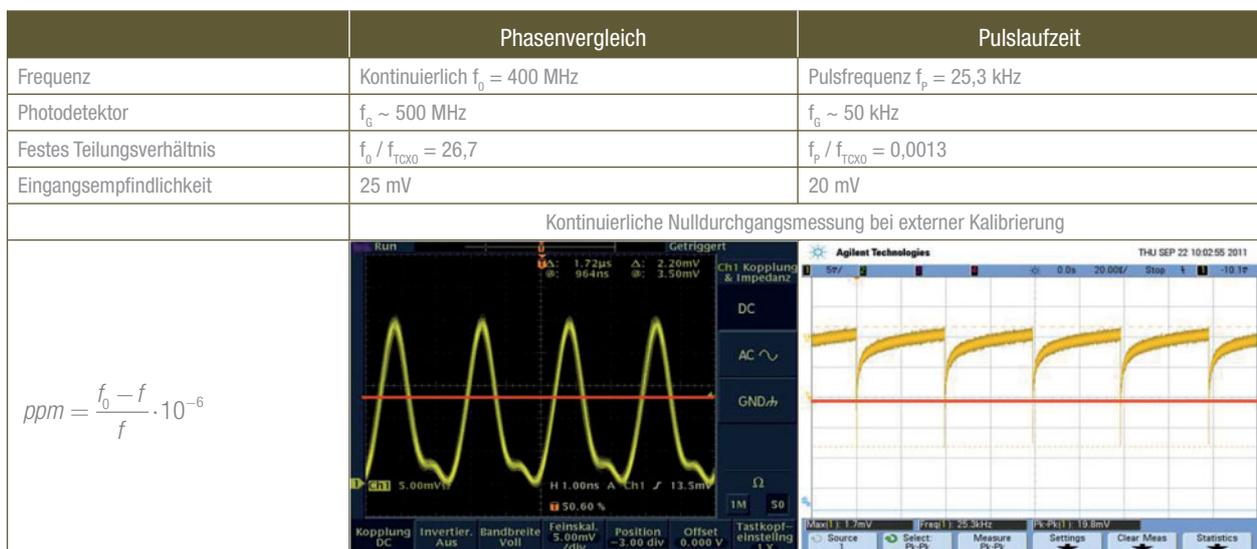
Photodetektoren werden deshalb für die externe Messung etwas unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Grenzfrequenz gestellt (500 MHz bzw. 50 kHz). Wichtig für die externe Frequenzkalibrierung ist immer, dass es ein festes Teilungsverhältnis zwischen der maßstabsbestimmenden TCXO Frequenz und der abgestrahlten Frequenz gibt. Deshalb kann intern oder extern gleichermaßen gemessen werden.

In der letzten Zeile der Tabelle sehen wir digitale Bilder der abgestrahlten Signale bei einer externen Kalibrierung. Es wird eine kontinuierliche Nulldurchgangsmessung über mehrere Sekunden durchgeführt, was durch die roten Triggerlinien angezeigt ist. Die Signalform im unteren Bereich (beim Phasemesser) spielt dabei keine Rolle. Die gemessene Frequenz f wird mit der Sollfrequenz f_0 verglichen, die während des Kalibriervorganges am Instrument angezeigt wird. Daraus kann in einfacher Form die Maßstabskorrektion gerechnet werden. Weicht die gemessene Frequenz z.B. um 50 Hz von der Sollfrequenz 400 MHz ab, ergibt sich eine Frequenzkorrektion von 0,12 ppm.

4.4 Zyklische Phasenfehlerkorrektion

Durch elektrisches Übersprechen entstehen zyklische Fehler, die sich nicht ganz ausschalten lassen. Die zyklische Phasenfehlerkorrektion wird nach der Maßstabskorrektion und vor der Bestimmung der Additionskorrektion ermittelt. Der beste und schnellste Weg der Bestimmung und Verifizierung des zyklischen Fehlers geht über einen Längenkomparator in der Fertigung. Dabei wird folgendes Verfahren eingehalten:

1. Messung einer Anzahl Positionen, die gleichabständig über den Feinmaßstab 0,375 m verteilt sind.
2. Ermittlung der Korrektionswerte durch Messung der Ist-Parameter und Vergleich mit Sollwerten.
3. Die Liste von Korrektionswerten wird im internen Speicher des EDM abgelegt.
4. Kontrollmessung mit Korrekturparametern unter Verwendung anderer Stützstellen.
5. Alle Messungen werden daraufhin geprüft, dass die Restfehler kleiner als 0,5 mm sind.



Fortsetzung auf Seite 304

4.5 Bestimmung der Additionskorrektur

Zur Bestimmung der Additionskorrektur wird eine Reihe von Referenzstrecken in der Fertigung gemessen. Die Anzahl der Strecken ist vom Instrumententyp abhängig. Jede Strecke wird zur Steigerung der Präzision 5-mal gemessen. Für die High Precision Distanzmesser der Trimble S8 wird die Additionskorrektur in 2 Lagen gemessen.

Durch Vergleich mit den Sollstrecken, die im Zuge der Rückführung bestimmt wurden, wird die Additionskorrektur berechnet und im Speicher des Instruments abgelegt. Danach werden weitere Referenzstrecken gemessen, um zu verifizieren, ob der Kalibrierungsprozess erfolgreich war.

5 RESÜMEE

Trimble hat konsequent in den vergangenen Jahren die parallele Entwicklung von Pulsdistanzmessern und Phasendistanzmessern verfolgt. Diese Technologien haben unterschiedliche Eigenschaften, Vorteile und Genauigkeiten. Dadurch wird es möglich, in den breiten Anwendungsbereichen der Trimble Geschäftsbereiche Survey (Vermessung), Heavy & Highway (Maschinensteuerung), Building Construction (Bauvermessung) und Spectra Precision das jeweils passende Instrument für die spezifischen Anforderungen des Marktes bereitstellen zu können.

LITERATUR

Höglund, R.; Large, P. (2005): Direct Reflex Technology for the Surveyor and Civil Engineer. Trimble White Paper. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-208582/022543-010D_TrimbleS6_DR_WP_1104_lr.pdf

Joeckel, R.; Stober, M. (1989): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung. Konrad Wittwer, Stuttgart.

Kludas, T.; Vogel, M.; Donath, B.; Glimm, A.; Göring, H. (2011): Die Focus 30 Totalstation von Spectra Precision – Neue Technologien in der Tachymeterentwicklung. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 118(2011)10, 348-354.

Meiners-Hagen, K.; Pollinger, F. (2012): Rückführbare Messung langer Distanzen in der PTB In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012)8-9, 283-290.

Trimble (2011): Datenblatt Trimble S8 Totalstation. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390413/022543-410F-D_TrimbleS8_DS_1011_sec.pdf.

Dr.-Ing. Martin Koehler

TRIMBLE AB
TRIMBLE NAVIGATION LTD,
E&C GROUP

Rinkebyvägen 17 | SE-18211 Danderyd, Schweden
martin_koehler@trimble.com



Manuskript eingereicht: 11.04.2012 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet