

Die Entwicklung der reflektorlosen Tachymetrie

Evolution of the Reflectorless Tacheometry

Manfred Juretzko

Seit über 30 Jahren wird die reflektorlose Distanzmessung in der praktischen Vermessung eingesetzt. Dabei ist sie kontinuierlich leistungsfähiger und präziser geworden und gehört mittlerweile zur Standardausrüstung moderner Tachymeter. In diesem Artikel werden wichtige Schritte der Verbesserung der Distanzmessung ebenso beschrieben wie die Entwicklung neuer, zum Teil automatisierter Arbeitsmethoden durch die Möglichkeit der reflektorlosen Distanzmessung.

Schlüsselwörter: Tachymeter, reflektorlose Distanzmessung, EDM

For over 30 years reflectorless distance measurement has been used in practical surveying. It has become evolving more powerful and precise and is now part of the standard equipment of modern total stations. In this article, important steps to improve the distance measurement are described as well as the development of new, partly automated methods by the possibility of reflectorless distance measurement.

Keywords: Total station, reflectorless distance measurement, EDM

1 EINFÜHRUNG

Vor nunmehr gut 30 Jahren hat die reflektorlose Distanzmessung, deren Entwicklung die avn kontinuierlich mit wichtigen Beiträgen begleitet hat, Einzug in den Vermessungsalltag gefunden. Wurde diese Technologie anfangs noch in Einzel- bzw. Aufsatzgeräten für (elektronische) Theodolite eingesetzt, stehen seit der Einführung des Zeiss Rec Elta RL im Jahr 1993 reflektorlos messende Tachymeter zur Verfügung, deren Funktionalität kontinuierlich erweitert worden ist. In der Ausgabe 1999 des Fachbuchs „Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung“ /Joeckel & Stober 1999/ wurden lediglich fünf reflektorlos messende Tachymeter aufgelistet. Heutzutage verfügt nahezu jedes auf dem Markt befindliche Instrument über diese Option.

Im Folgenden soll die technische Entwicklung der in Tachymetern verbauten reflektorlosen Distanzmesser ebenso betrachtet werden wie die Fortentwicklung des Tachymeters zu einem autonom agierenden Vermessungsinstrument. Die Kombination von verbesserter EDM-Messung, Motorisierung der Achsen und Integration von Kameras führte zu neuen, effektiveren Aufmaß- und Abstecktechniken, deren Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist.

2 EDM-TECHNOLOGIEN

Die Anfangsjahre der reflektorlosen Tachymetrie waren eng verbunden mit der Entwicklung der Puls-Entfernungsmesser. Genaue und wirtschaftliche Entfernungsmessungen waren bis dahin nur mit Geräten möglich, die nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten. Zu dieser Zeit dauerte eine Distanzmessung bis zu 10 Sekunden, dabei wurde mit einem Feinmaßstab und mehreren Grobmaßstäben gearbeitet. In jedem Fall waren Reflektoren notwendig, bei größeren Distanzen sogar Kombinationen von mehreren Prismen. Puls-Entfernungsmesser dagegen konnten schon damals Einzelmessungen in Sekundenbruchteilen durchführen. Da die Sendeleistung nicht für ein Dauersignal, sondern nur für extrem kurze Einzelimpulse genutzt wird, können diese mit wesentlich höherer Energie abgestrahlt werden und ermöglichen so eine deutlich höhere Reichweite. Die große Herausforderung, neben der eigentlichen Laufzeitmessung, liegt allerdings darin, den zeitsignifikanten Schwellenwert im Send- und Empfangssignal zu finden, wofür die Herstellerfirmen unterschiedliche Technologien angewendet haben. Ab Mitte der 1990er-Jahre führten die Verbesserung der Signalanalyse und Modifikationen im Phasenvergleichsverfahren zu Entfernungsmessern, die sehr

große Verbreitung fanden. Sie wurden sowohl als „Handentfernungsmesser“ als auch in Tachymetern eingesetzt. War die Reichweite dieser Instrumente anfänglich für Innenraumaufnahmen konzipiert, so erhöhte sie sich im Lauf der Jahre bis in den Kilometerbereich. Die folgenden Angaben zur Genauigkeit und zur Reichweite beziehen sich, soweit nicht anders erwähnt, auf die reflektorlose Distanzmessung, auch wenn mit den meisten Instrumenten auch auf Prismen (mit in der Regel höherer Genauigkeit und deutlich größerer Reichweite) gemessen werden kann.

3 PULS-ENTFERNUNGSMESSE ALS AUFSATZGERÄTE

Im Jahr 1980 startete die Entwicklung des Puls-Entfernungsmessers FEN 2000 (Abb. 1) von Geo-Fennel /Hipp 1983/. Dieses Instrument orientierte sich an den Genauigkeitsansprüchen der Landesvermessung ($5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm}$), verfügte über eine Laserdiode der Wellenlänge 905 nm und war für die Messung auf Reflektoren ausgelegt. Die Genauigkeit von 25 cm pro einzelner Messung wurde durch die Möglichkeit der extrem schnellen Messung durch Wiederholungen bis in den Millimeterbereich gesteigert. Zur Detektion der zeitsignifikanten Punkte im Sende- und Empfangssignal wurden



Abb. 1 | Puls-Aufsatzgeräte: Fennel FEN2000 / Prospekt geoFennel 7/1983/ (links), Wild DIOR 3002 (rechts)

deren Amplituden auf Sollwerte geregelt und die Intensitätsschwerpunkte der Impulse herangezogen. Die Zeitmessung erfolgte mithilfe einer Frequenz von ca. 300 MHz .

Auf der technologischen Basis des FEN 2000 wurde das FEN 101 entwickelt /Hipp 1986/. Durch separate Linsen für das Sende- und das Empfangssystem konnte die Empfindlichkeit um das Vierfache gesteigert werden, sodass nun auch reflektorlose Distanzmessungen möglich wurden. Die Strahldivergenz war aus heutiger Sicht mit 1 mrad bei der Version A (Reichweite 50 m) bzw. $2,5 \text{ mrad}$ bei der Version B (Reichweite 100 m) noch recht groß. Die Messgenauigkeit lag bei 1 cm . Zudem gab es eine „Langstreckenversion“ FEN 250 mit einer Reichweite von 250 m und einer Strahldivergenz von $1,8 \text{ mrad}$, mit der Messgenauigkeiten von 3 cm bzw. 10 cm erreicht werden konnten. Da die verwendete Laserwellenlänge außerhalb des sichtbaren Bereichs lag, waren zur Zielmarkierung ein integrierter Laserpointer oder ein Zielfernrohr notwendig. Als Einsatzgebiete wurden Hohlraumvermessungen (Tunnel- und Schiffsinnenvermessung) sowie Vermessungen im Tage- und Bergbau angesehen. In unterschiedlichen Experimenten /Schlichting & Wienefeld 1986/

wurde für diesen Gerätetyp eine Standardabweichung von 6 mm bis 7 mm ermittelt. Dabei wurden Untersuchungsmethoden entwickelt, die fortan zum Standard der Untersuchung reflektorloser Distanzmesser wurden, z. B. die Ableitung des wirksamen Strahldurchmessers durch einen Stufenversuch. Dass die Messung mit unterschiedlicher Ausrichtung der Zielebene und die Messung zu unterschiedlichen Oberflächenmaterialien damals nicht zu signifikanten Distanzunterschieden führte, mag an dem (im Vergleich zu Geräten neuerer Generation) geringeren Auflösungsvermögen des Instruments gelegen haben.

Auch bei der Firma Wild war es zunächst ein für die Prismenmessung ausgelegter Puls-Entfernungsmesser, der als Grundstein für die reflektorlose Technologie diente: Der DI3000 verfügte über eine biaxiale Anordnung von Sende- und Empfangsoptik und nutzte als Strahlungsquelle eine GaAs-Laserdiode mit einer Wellenlänge von 865 nm /Grimm et al. 1986/. Bei einer Impulslänge von 12 ns wird ein „Lichtbalken“ von rund $3,6 \text{ m}$ Länge ausgesendet. Die Detektion der zeitsignifikanten Punkte von Start- und Stoppsignal erfolgt amplitudenunabhängig durch die Nulldurchgangsmethode: Hier wird der Nulldurchgang des nach der Zeit differenzierten Detektorsignals (1. Ableitung) zur Zeitmessung genutzt. Zur eigentlichen Zeitmessung werden dann (wie in Abb. 2 aus /Joeckel & Stober 1999/ schematisch dargestellt) die Takte eines 15-MHz -Oszillators gezählt,

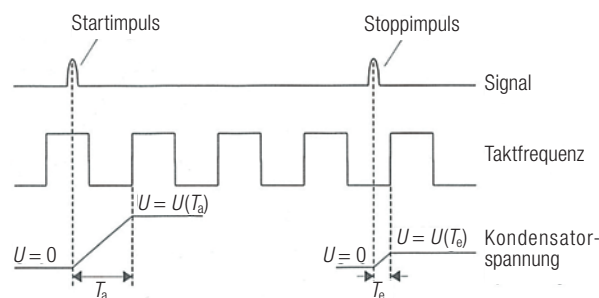


Abb. 2 | Laufzeitverfahren nach /Grimm et al. 1986/, /Joeckel & Stober 1989/

wobei die Restzeiten T_a zwischen dem Startzeitpunkt und dem ersten verwendeten Oszillortakt sowie T_e zwischen dem Stoppzeitpunkt und dem letzten verwendeten Oszillortakt mithilfe eines Kondensators ermittelt werden, dessen Spannung sich zeitproportional zur Ladezeit verhält. Die Genauigkeit einer einzelnen Messung von einigen Millimetern wird durch Hunderte bzw. Tausende Wiederholungsmessungen bis unterhalb eines Millimeters gesteigert, was durch Felduntersuchungen in Form von Netzmessungen bestätigt wurde /Sparla 1987/.

Die reflektorlose Variante des zuvor beschriebenen Distanzmessers, des Wild DIOR 3002 (Abb. 1), hat eine deutlich größere Strahldivergenz von $2,1 \text{ mrad}$ /Grimm et al. 1986/ und eine (reflektorlose) Reichweite von ca. 250 m bei einer Genauigkeit von 5 mm bis 10 mm . Aufgrund der gegenüber den in /Schlichting & Wienefeld 1986/ untersuchten Fennel-Geräten höheren Auflösung konnten nun auch Abhängigkeiten vom Auftreffwinkel und dem Material des Messbereichs festgestellt werden /Kampmann et al. 1989/. Als besonders problematisch haben sich Messungen zu Styropor erwiesen.

4 REFLEKTORLOSE TACHYMETER

Bereits 1989 wird in der Erstausgabe von /Joeckel & Stober 1989/ mit dem Geo-Fennel FET 2 ein tachymeterartiges Instrument mit einer reflektorlosen Reichweite von 100 m aufgeführt. Als erstes reflektorloses Tachymeter in gewohnter Bauweise kann das Zeiss Rec Elta RL (Abb. 3) angesehen werden, bei dem die Sendeoptik eines Puls-Distanzmessers in das Fernrohr integriert wurde /Michelbacher 1993/, die Empfangsoptik aber noch exzentrisch angeordnet ist. Die reflektorlose Reichweite betrug bis zu 200 m, die Reichweite auf ein Prisma bis zu 6 km. Die Auswirkung der Koaxialität von Sende- und Empfangsoptik, insbesondere bei schrägem Auftreffwinkel, wird von /Köhler 1994/ eingehend diskutiert und es wurde darauf hingewiesen, dass sich diese Effekte durch eine Zwei-Lagen-Messung eliminieren lassen.



Abb. 3 | Reflektorlose Tachymeter: Rec Elta RL /www.swisstek.com/ (links), Geotronic 468 DR /www.scherer.de/ (Mitte), Leica TPS 1100 (rechts)

5 REFLEKTORLOSE ROBOT-TACHYMETER

Eine völlig neue Arbeitsweise in der Tachymetrie wurde durch die Motorisierung der Tachymeterachsen geschaffen. Zum einen war es nun möglich, unter Verwendung entsprechender Sensoren zur Positionserkennung des Empfangssignals Prismen zu verfolgen und eine Feinzielung vorzunehmen. Zum anderen konnte ein reflektorlos arbeitendes, motorisiertes Tachymeter jetzt vordefinierte Bereiche selbstständig scannen. Mit entsprechender Steuerungssoftware konnte das Tachymeter sogar „intelligent“ agieren und z. B. Profile an frei definierten Positionen ermitteln /Scherer 1996/, /Buchmann 1996/. Das erste Serien-Tachymeter dieser Art war das Geotronic 468 DR (Abb. 3, mit Kamera bestückte Sonderversion der Ruhr-Universität Bochum) mit einer reflektorlosen Reichweite von 70 m auf Grundlage des Phasenvergleichsverfahrens. Sende- und Empfangsoptik waren jedoch nicht koaxial zur Zielachse des Fernrohrs angeordnet.

Schließlich brachte Leica mit der Serie TPS1100 (Abb. 3) das erste motorisierte, mit sichtbarem koaxialen Zielstrahl reflektorlos messende Tachymeter auf den Markt. Das Instrument verfügte über zwei getrennte Distanzmesser für die Prismenmessung (780 nm, Reichweite bis 3000 m) und die reflektorlose Messung (670 nm, Reichweite bis 80 m), die beide nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiteten. Bei einer Basisfrequenz von 100 MHz ergab sich ein Feinmaßstab von 1,5 m. Der Laserpunkt des reflektorlosen Distanzmessers hatte in einer Entfernung von 50 m eine Größe von ca.

1 cm × 2 cm, die Messgenauigkeit wurde mit 3 mm + 2 ppm angegeben /Zeiske 1999/.

Dieser Instrumententyp eröffnete eine Vielzahl automatisierter Abläufe, z. B. das Scannen von frei begrenzten Oberflächen oder beliebig definierten Profilen. Anders als die sich zu diesem Zeitpunkt etablierenden deutlich schneller arbeitenden terrestrischen Laserscanner eigneten sich reflektorlos messende, motorisierte Tachymeter aber auch zur automatisierten Absteckung auf beliebig definierte Absteckungsebenen /Juretzko 2005/. Mittlerweile haben alle großen Instrumentenhersteller ähnlich ausgestattete Tachymeter im Angebot.

6 VERBESSERUNG DER DISTANZMESSUNG

Die Weiterentwicklung der Distanzmessung hatte vor allem die Steigerung der Reichweite und der Messrate im Blick. Die vormalig klare Abgrenzung zwischen dem Laufzeitverfahren einerseits und dem Phasenvergleichsverfahren andererseits wurde dadurch aufgebrochen, dass die ausgesendeten und empfangenen Signale nunmehr in der Regel vollständig digitalisiert und mit zum Teil kombinierten Verfahren ausgewertet werden, denen man den Oberbegriff „Signalform-Analyseverfahren“ zuweisen kann. Das klassische Phasenvergleichsverfahren mit unterschiedlichen Modulationswellenlängen für den Fein- und den Grobmaßstab ist dabei durch ein phasensensitives Mess- und Auswerteverfahren abgelöst worden, bei dem der Grobmaßstab rein rechnerisch aus mehreren benachbarten Feinmaßstäben abgeleitet wird.

Die Entwicklungen unter dem Namen „PinPoint“-Technologie bei Leica führten dazu, dass statt der bislang zwei unterschiedlichen Lichtquellen für die Messung auf Prismen und die reflektorlose Messung nur noch eine einzige EDM-Laserdiode genutzt wird. Je nach der Stärke des Empfangssignals werden vier bis zehn hohe Frequenzen über 100 MHz verwendet, wobei nicht nur die Phasenlage detektiert, sondern das vollständige Signal digitalisiert und analysiert wird: Somit trägt jede einzelne Frequenz zum endgültigen Ergebnis mit hoher Genauigkeit bei /Bayoud 2006/. Reflektorlose Distanzen können auf diese Weise mit einer Genauigkeit von 2 mm + 2 ppm auf eine Kodak-Weiß-Karte über 500 m bzw. 5 mm + 2 ppm auf Kodak-Grau über 300 m bestimmt werden.

Seine neueste Entwicklung auf dem Gebiet der Distanzmessung bezeichnet Leica als „Wellenform-Digitalisierungstechnologie (WFD)“ /Grimm & Zogg 2013/ nach dem Prinzip der Laufzeitmessung. Start- und Stoppimpuls werden dabei aus akkumulierten, digitalisierten Signalen bestimmt, wobei bis zu 2 Mio. Impulse pro Sekunde ausgesendet, digitalisiert und kontinuierlich analysiert werden. Abb. 4 zeigt exemplarisch die Intensität von Start- und Stoppimpuls bei einfachem Signal und bei akkumulierten Signalen.

Das Messverfahren ist über die Messzeit flexibel konfigurierbar, wobei sich das Signal-Rausch-Verhältnis proportional zur Quadratwurzel der Messzeit verbessert. So erreicht ein mit 1 000 Hz durchgeführter Scan bis zu 300 m ein Messrauschen von 1 mm bei 50 m. Eine reflektorlose Einzelmessung wird typischerweise in 1,5 s mit einer Genauigkeit von 2 mm + 2 ppm durchgeführt. Insgesamt setzt dieses Konzept vor allem auf Geschwindigkeit (bis zu 1 000 Hz) und Reichweite (bis zu 2 000 m bei Einzelmessung) bei reflektorlosem

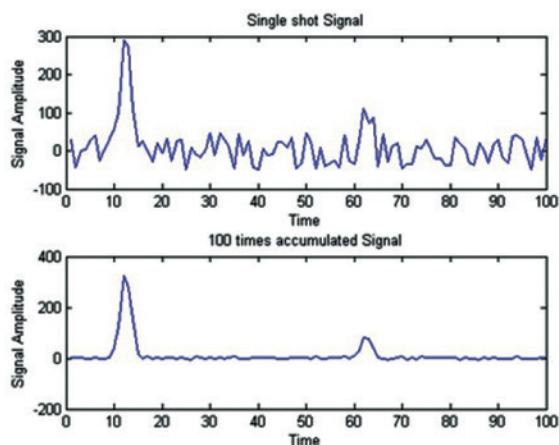


Abb. 4 | Wellenform-Digitalisierungstechnologie /Grimm & Zogg 2013/

Betrieb unter bewusster Vernachlässigung der maximalen Präzision bei der Prismenmessung, wie sie mit einem phasensensitiven Verfahren möglich ist.

Trimble entwickelte für seine Instrumente zwei alternative Technologien: Die „Direct-Reflex-Technologie DR“ setzt in der Standardversion das phasensensitive Verfahren mit sichtbarem Laserstrahl und einer Reichweite von bis zu 70 m ein. In der Version DR+ wird das Laufzeitverfahren mit 20 000 Impulsen/s und einer Reichweite von bis zu 800 m (300 m auf Kodak-Graukarte 18 %) angewendet /Höglund & Large 2004/. Verbesserungen der Trimble-Technologie werden von /Köhler 2012/ beschrieben: Beim phasensensitiven Verfahren wird ein roter Halbleiterlaser mit einer Wellenlänge von 660 nm mit sieben gleichwertigen Maßstabfrequenzen um 400 MHz (Feinmaßstab 0,375 m) moduliert. Die Lösung der Eindeutigkeit erfolgt durch Differenzbildung der Phasenreststücke. Auf diese Weise tragen alle Frequenzen zur Feinmessung bei, Grobmaßstäbe werden nur noch rechnerisch benutzt und belasten nicht die Messzeit. Abb. 5 aus /Köhler 2012/ steht exemplarisch für die modernen phasensensitiven (modulationsbasierten) Mess- und Auswertverfahren. Die Genauigkeit liegt bei 3 mm + 2 ppm, die Reichweite bei mehr als 120 m (Kodak-Graukarte). Diese Technologie kommt auch bei den Instrumenten von Nikon und Spectra Precision zum Einsatz.

Das alternative Laufzeitverfahren von Trimble arbeitet mit einer Pulsweite von 1,2 m (4 ns). Zur Bestimmung der repräsentativen Zeitpunkte von Referenz- und Messpuls werden diese Pulse (vereinfacht ausgedrückt) im Abstand von 200 ps abgetastet und mathematisch beschrieben. Die Genauigkeit wird mit 2 mm + 2 ppm, die Reichweite mit 600 m (Kodak-Graukarte) angegeben.

Sokkia und Topcon setzen für ihre Tachymeter die sogenannte „RED-tech“-Technologie ein, bei der je nach Ausführung drei bzw. vier (benachbarte) Frequenzen gleichzeitig abgetastet werden. Die leistungsfähigste Variante „RED-tech 800“ verwendet Frequenzen bis zu 468 MHz und erlaubt reflektorlose Distanzmessungen bis zu 1 000 m mit Genauigkeiten von 2 mm + 2 ppm /Topcon 2014/.

7 VIDEO-TACHYMETER

Parallel zur Verbesserung der reflektorlosen Distanzmessung vollzog sich eine Aufrüstung der Tachymeter mit Kameras, zunächst als

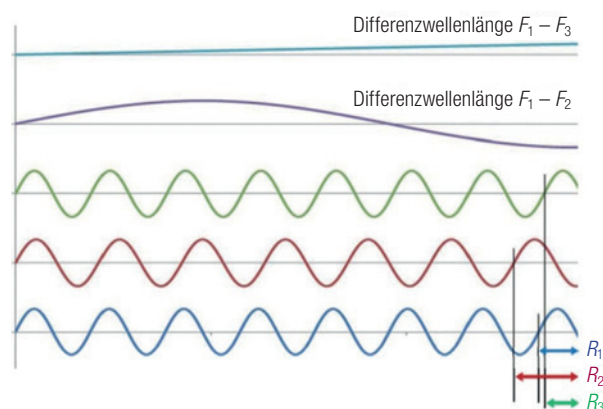


Abb. 5 | Phasensensitives Auswertverfahren nach /Köhler 2012/

Forschungsprojekt /Scherer 1996/ und /Scherer 2004/, im Lauf der Zeit auch als kommerzielles Produkt der großen Hersteller. Neben den Vorteilen der bildhaften Dokumentation der Aufnahmepunkte ergab sich nun auch die Möglichkeit, reflektorlos aufzumessende Punkte über ein Display anzuzielen und aufgenommene Bilder durch direkte Passpunktmessung zu entzerren /Juretzko 2005/. Trimble entwickelte auf der Basis der Robotic-Totalstation S6 die „VX Spatial Station“ (Abb. 6) mit digitaler Messkammer /Müller 2009/. Mit einer Scanrate von 5 bis 15 (P/s) stellt dieses Instrument zwar keine Konkurrenz für echte terrestrische Laserscanner dar, wenn dichte Punktwolken aufgenommen werden sollen. Es hat aber den Vorteil der direkten Georeferenzierung der Punkte während der Aufnahme und eignet sich damit hervorragend z.B. für die Passpunktbestimmung zur Orthophotoherstellung /Rübens 2009/. Ähnlich ausgerüstete Instrumente werden auch von den Firmen Topcon (ImageStation mit einer Scanrate von 20 P/s und einer Reichweite bis 2 000 m, Abb. 6), Pentax (R-400VDN, Reichweite bis 400 m, Abb. 6) und Leica (Viva TS15i mit der oben beschriebenen „PinPoint“-Technologie auf Basis des Phasenvergleichsverfahrens und einer Reichweite bis zu 1 000 m) hergestellt. Leica bietet neuerdings mit der Nova MS50 MultiStation (Abb. 6) ein mit bis zu 1 000 P/s scannendes Instrument an, das mit der oben beschriebenen WFD-Technologie auf Laufzeit-Basis arbeitet. Ähnlich wie bei terrestrischen Laserscannern können bei diesem Instrument die gemessenen Punkte eines Scans mithilfe des Kamerabilds fotorealistisch eingefärbt werden.



Abb. 6 | Robot-Video-Tachymeter: Trimble VX SpatialStation /www.trimble.com/, Topcon ImageStation /www.topcon-positioning.eu/, Pentax R-400VDN /www.pentaxsurveying.com/, Leica Nova MS50 /www.leica-geosystems.de/ (von links nach rechts)

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die reflektorlose Distanzmessung stellt einen entscheidenden Baustein der Weiterentwicklung des „Universalinstruments“ Tachymeter dar. Anfänglich in erster Linie eine Möglichkeit zur Aufnahme schwer zugänglicher Punkte, hat diese Technik durch Kombination mit motorisierten Achsen und Kameras völlig neue Arbeitsweisen eröffnet. Bemerkenswert war dabei der „Wettstreit“ zwischen den grundsätzlichen Distanzmessmethoden. Bot anfangs nur das Laufzeitverfahren überhaupt die technischen Möglichkeiten, ein Signal mit entsprechender Energie für die reflektorlose Distanzmessung auszusenden, etablierte sich das Phasenvergleichsverfahren später aufgrund seiner höheren Genauigkeit. Neueste Entwicklungen der Signalanalyse lassen die vormalig klare Abgrenzung der Messverfahren verschwimmen und setzen aufgrund der hohen Reichweite und der Messgeschwindigkeit wieder vermehrt auf das Grundprinzip der Laufzeitmessung.

Schon jetzt ist es möglich, einen reflektorlos zu vermessenden Objektpunkt über ein Display fernab des Instruments zu markieren und anzusteuern. Das Vorhandensein eines Okulars am Instrument ist damit (wie schon bei der automatischen Prismenverfolgung und Feinzielung) nicht mehr zwingend notwendig. In naher Zukunft wird der Anwender sicherlich bei der Erfassung von charakteristischen Objektpunkten (Ecken, Kanten) durch Bildverarbeitungsalgorithmen weitgehend unterstützt werden.

LITERATUR

- Bayoud, F. (2006): Leica's Pinpoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Optomechanical Features. In: Shaping the Change, XXIII FIG-Kongress, München, 8.–13. Oktober 2006.
- Buchmann, P. (1996): Entwicklung eines Meßsystems zur automatischen polaren Objekterfassung am Beispiel der Bauaufnahme. Dissertation, DGK, Reihe C, 456.
- Grimm, D. E.; Zogg, H.-M. (2013): Leica Nova MS50 – Die neue Dimension in der Messtechnologie. White Paper Leica Nova MS50, Firma Leica Geosystems (www.leica-geosystems.de).
- Grimm, K.; Frank, P.; Giger, K. (1986): Distanzmessung nach dem Laufzeitverfahren mit geodätischer Genauigkeit. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (VPK), 84(1986)12, 627–631.
- Hipp, J. (1983): Eine neue Entfernungsmesserfamilie mit Puls-Laufzeit-Messverfahren (FEN 2000). In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 90(1983)11-12, 461–464.
- Hipp, J. (1986): Reflektorlose Entfernungsmessung mit Pulslaufzeit-Messverfahren (FEN101). In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 93(1986)5, 209–211.
- Höglund, R.; Large, P. (2004): Direct Reflex – Reflektorlose EDM-Technologie für Vermesser und Bauingenieure. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 111(2004)10, 346–350.

Joeckel, R.; Stober, M. (1989): Elektronische Entfernungs- und Richtungs-messung. 3. Auflage. Konrad Wittwer, Stuttgart.

Joeckel, R.; Stober, M. (1999): Elektronische Entfernungs- und Richtungs-messung. 4. Auflage. Konrad Wittwer, Stuttgart.

Kampmann, G.; Sparla, P.; Witte, B. (1988): Möglichkeiten und Probleme der reflektorlosen Distanzmessung gezeigt am Beispiel des Wild DIOR 3002. In: X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, 12.–17. September 1988, A9.

Köhler, M. (1994): Einige theoretische Grundlagen für die reflektorlose Messung mit dem Zeiss-Tachymeter Rec Elta RL. In: Vermessungsingenieur, 45(1994)5, 216–221.

Köhler, M. (2012): Distanzmessverfahren elektrooptischer Tachymeter. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)8-9, 291–304.

Juretzko, M. (2005): Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation, DGK, Reihe C, 588.

Michelbacher, E. (1993): Ein neues elektronisches Tachymeter mit reflektorloser Distanzmessung. In: Vermessungswesen und Raumordnung (VR), 55(1993)5+6, 307–315.

Müller, S. (2009): Anwendungsbeispiele mit der Trimble VX Spatial Station. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)1, 31–35.

Rübens, U. (2009): Einsatzerfahrungen mit der Trimble VX Spatial Station. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)1, 27–30.

Scherer, M. (1996): Automatische Objekterfassung durch Profilschannen. In: XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz, 9.–14. September 1996, B8.

Scherer, M. (2004): Intelligentes Tachymeter und Digitalkamera: Low-Cost aber High-Tech. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 111(2004)10, 325–333.

Schlichting, R.; Wienefeld, W. (1986): Untersuchungen am Impulsentfernungsmesser Fennel FEN 101. In: Vermessungswesen und Raumordnung (VR), 48(1986)7, 333–346.

Sparla, P. (1987): Der Laserimpuls-Distanzmesser Distomat Wild DI3000 – Messprinzip und Genauigkeitsuntersuchung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 94(1987)4, 133–146.

Topcon (2014): RED-tech EDMs. www.topcon.co.jp/en/positioning/sokkia/popup/trademark.html (16.04.2014).

Zeiske, K. (1999): TPS 1100 Professional Series – Eine neue Tachymetergeneration von Leica. In: Vermessungswesen und Raumordnung (VR), 61(1999)2, 82–90.

Dr.-Ing. Manfred Juretzko

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)
GEODÄTISCHES INSTITUT

Englerstraße 7 | 76131 Karlsruhe
manfred.juretzko@kit.edu

