



Gian-Philipp Patri, BSc

# **Untersuchung der Systemeigenschaften moderner Totalstationen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

# Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Vater Salvatore und dessen langjähriger Lebenspartnerin Margit, die mir während der Dauer meines Studiums nicht nur finanziell zur Seite standen, sondern mich im Speziellen psychisch in den sieben Monaten, in denen diese Arbeit entstanden ist, sehr unterstützt haben. Vor allem mein Vater fand stets motivierende Worte und war in dieser stressigen und teils hektischen Zeit ein sehr wichtiger Ruhepol in meinem Leben, ihm widme ich von ganzem Herzen die hier vorliegende Arbeit.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meinem Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart, der trotz seines vollen Terminplans immer die Zeit fand, mir bei meinen Fragestellungen weiterzuhelfen und mir mit den richtigen Ratschlägen die Richtung zur Lösung der Probleme wies.

Ein herzliches Dankeschön auch an die Mitarbeiter des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, allen voran an die Herren Dipl.-Ing. Matthias Ehrhart, Dipl.-Ing. Stefan Lackner und Ing. Rudolf Lummerstorfer. Bei Herrn Lummerstorfer möchte ich mich für die Hilfe bei den praktischen Messungen bedanken. Er bereitete das dafür benötigte Instrumentarium immer bestens vor. Die Universitätsassistenten Matthias Ehrhart und Stefan Lackner gaben mir zahlreiche hilfreiche Hinweise zur erfolgreichen Durchführung der praktischen Messungen, dadurch konnte ich mir viele unnötige Arbeitsstunden ersparen.

Des Weiteren möchte ich mich beim Austrian Institute of Technology (AIT), dem Unternehmen Geodäsie Austria und der Firma Leica Geosystems für die Bereitstellung der Totalstationen Trimble S6 DR Plus, Trimble S8 HP und Leica MS50 vielmals bedanken.

Vielen Dank auch für die Mithilfe an meine Studienkollegen/innen Markus Dorn, Magdalena Grick, Gerhard Kleemaier und Christoph Monsberger, die mir bei der Durchführung der Autokollimation und der Zeitsynchronisation geholfen haben.

Abschließend möchte ich mich noch bei Herrn Mag. Klaus Lukasser für die Korrektur der hier vorliegenden Arbeit bedanken, ebenso bei Frau Mag. Magdalena Heu für die Rechtschreibprüfung des Abstracts.

An alle ein herzliches Vergelt's Gott!

# Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit werden die Systemeigenschaften moderner Totalstationen mit dem Fokus auf der reflektorlosen Distanzmessung und den Systemprinzipien der automatischen Zielerfassung analysiert. Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche zu den Leistungsfähigkeiten aktuell am Markt erhältlicher Totalstationen wird eine Auswahl an zur Verfügung gestellten Geräten praktischen relevanten Messtests unterzogen. Die Versuchsinstrumente Leica MS50, Leica TS15, Trimble S6 DR 300+, Trimble S6 DR Plus und Trimble S8 HP werden je nach Verfügbarkeit sowohl unter Laborbedingungen als auch unter realistischen Messsituationen untersucht. Speziell deren EDM-Spotgröße erweist sich für eine Vielzahl von praktischen Messsituationen als entscheidender und kritischer Parameter und differiert hinsichtlich der Form und Ausdehnung in Abhängigkeit von der Messdistanz signifikant von den Spezifikationen der Hersteller. In Anbetracht der Messkonstellation und des Einfallswinkels resultieren aus der Form und Ausdehnung des Messflecks systematische Abweichungen in den Resultaten der Distanzmessung und diese treten nicht nur im reflektorlosen Messmodus auf, sondern sind auch bei Distanzmessungen auf ein omnidirektionales Prisma präsent. Die unterschiedlichen Charakteristiken zwischen dem kamerabasierten Zielerfassungssystem und jenem eines Quadrantendetektors werden bei Messungen auf ein omnidirektionales Prisma und bei Sichtbehinderung in Form einer Glasscheibe in der Visur deutlich. Fremdreflexionen werden von Quadrantendetektoren als korrekte Signale missinterpretiert und ausgewertet, woraus grobe Fehler in der Richtungskomponente resultieren können. Im Gegensatz dazu erkennt das Zielerfassungssystem basierend auf dem Funktionsprinzip einer Kamera das falsche Signal und berücksichtigt dieses auf Grund des nicht bestandenen Plausibilitätstests nicht im Auswerteprozess. Die Verwendung eines aktiven Zielerfassungssystems zur Gewährleistung einer korrekten Signalidentifikation bedingt den Einsatz von signalgebenden Prismen, die dabei auftretenden Signalmuster werden zur Auswertung der Richtungskomponenten benützt und weichen je nach Einfallswinkel deutlich von den Ergebnissen eines passiven Systems ab. Die periodischen Abweichungen in der Distanz und in der horizontalen Richtungskomponente bei Messungen auf ein 360° Prisma sind in den Resultaten aller untersuchten Totalstationen vorhanden, jedoch variieren sie je nach Systemprinzip der automatischen Zielerfassung und sind abhängig von der zu messenden Distanz.

# Abstract

In this masterthesis the characteristics of modern total stations with focus on the reflectorless distance measurement and the principles of the automatic target aiming system will be analysed. Based on an extensive literature research of currently available totalstations, the performance of a selection of obtainable instruments will be investigated in relevant tests. The test instruments Leica MS50, Leica TS15, Trimble S6 DR 300+, Trimble S6 DR Plus and Trimble S8 HP will be tested under laboratory conditions and also in realistic, practical situations. Especially the spot size of the EDM turned out to be a crucial and critical parameter in many practical situations and differs significantly in shape and extent depending on the distance to be measured from the specifications of the producers. Regarding the constellation and the incidence angle, the shape and the extent of the spot size lead to systematic deviations in the results of the distance measurements. These do not only occur in the reflectorless measurement mode, but also in the distance measurements on an omnidirectional prism. The different characteristics between the automatic target aiming system, based on a camera and on a quadrant detector, will be clear by measurements on an omnidirectional prism and by a line-of-sight obstruction shaped like a glass pane in the sighting. As foreign reflections will be misinterpreted and evaluated by the quadrant detector as correct signals, gross errors can appear in the results of the directional measurements. In contrast, automatic camera-based target aiming systems recognise wrong signals and do not evaluate these due to the failed plausibility test. An active automatic target aiming system in order to guarantee a correct signal identification based on a quadrant detector needs pulse emitting prisms. These results deviate in dependence of the incidence angle clearly from the results of a passive system. The periodical deviations in the results of the distance measurements and in the direction by measuring on a 360° prism are present in all tested total stations, but they vary according to the principle of the automatic target aiming system and are dependent from the measurement distance.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Totalstationen im Wandel der Zeit . . . . .	2
1.2 Motivation und Ziel der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Elektrooptische Distanzmessung</b>	<b>5</b>
2.1 Physikalische Grundlagen elektromagnetischer Wellen . . . . .	5
2.1.1 Kenngrößen elektromagnetischer Wellen . . . . .	5
2.1.2 Elektromagnetisches Spektrum . . . . .	7
2.1.3 Laser als Strahlungsquelle . . . . .	9
2.2 Messprinzipien . . . . .	10
2.2.1 Laufzeitmessung . . . . .	15
2.2.2 Phasenvergleichsmessung . . . . .	18
2.2.3 Wave Form Digitizer . . . . .	25
2.3 Reflektorlose Distanzmessung . . . . .	30
2.3.1 Spotgröße des Lasers . . . . .	31
2.3.2 Einfallswinkel . . . . .	34
2.3.3 Reflexionseigenschaften des Zielobjekts . . . . .	35
2.3.4 Mischsignale . . . . .	36
2.3.5 Genauigkeitsspezifikation . . . . .	38
2.4 Vergleich der Messtechnologien . . . . .	41
2.4.1 Laufzeitmessung . . . . .	41
2.4.2 Phasenvergleichsmessung . . . . .	42
2.4.3 Wave Form Digitizer . . . . .	42
<b>3 Automatische Zielerfassung</b>	<b>44</b>
3.1 Allgemeines Funktionsprinzip . . . . .	44

## Inhaltsverzeichnis

---

3.2	Sensorsysteme . . . . .	47
3.3	Kamerabasierte Systeme . . . . .	48
3.3.1	Differenzbildung zweier Fotos . . . . .	48
3.3.2	Das Prisma im Bildkoordinatensystem . . . . .	50
3.3.3	Transformation vom Bildkoordinatensystem in das lokale Koordinatensystem . . . . .	51
3.3.4	Berechnung von Winkelablagen . . . . .	53
3.3.5	Eigenschaften und Problemstellungen der kamerabasierten Zielerfassung . . . . .	54
3.4	Quadrantendetektor . . . . .	62
3.4.1	Intensitätsdetektion . . . . .	63
3.4.2	Eigenschaften und Problemstellungen der Quadrantentechnologie . . . . .	67
3.5	Prisma . . . . .	72
3.5.1	Prismen typ . . . . .	73
3.5.2	Prismengröße . . . . .	74
3.5.3	Aktives Prisma . . . . .	75
3.5.4	Reflexfolie . . . . .	76
3.6	Genauigkeitsspezifikation . . . . .	77
3.7	Vergleich der Sensorsysteme . . . . .	80
<b>4</b>	<b>Messkonfigurationen zur Untersuchung der Systemeigenschaften</b>	<b>82</b>
4.1	Steuerung der Sensormodule via PC . . . . .	82
4.1.1	GeoCOM . . . . .	82
4.1.2	TPSDK . . . . .	83
4.2	Messung von Objektkanten . . . . .	83
4.3	Reflektorlose Distanzmessung bei variierendem Einfallswinkel . . . . .	85
4.4	Systemverhalten bei einer Glasscheibe in der Visur . . . . .	87
4.5	Messungen auf ein MultiTrack 1000 Prisma . . . . .	88
4.5.1	Untersuchungen im Labor des IGMS . . . . .	89
4.5.2	Messungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>93</b>
5.1	Reflektorlose Distanzmessung . . . . .	93
5.1.1	Messung von Objektkanten . . . . .	93
5.1.2	Variierender Einfallswinkel . . . . .	106
5.1.3	Resümee . . . . .	111
5.2	Systemverhalten bei einer Glasscheibe in der Visur . . . . .	112
5.2.1	Simulation . . . . .	112
5.2.2	Kamerabasierte Systemprinzipien . . . . .	114
5.2.3	Quadrantendetektor . . . . .	117
5.2.4	Resümee . . . . .	124

## *Inhaltsverzeichnis*

---

5.3	Messungen auf ein MultiTrack 1000 Prisma . . . . .	125
5.3.1	Untersuchungen im Labor . . . . .	125
5.3.2	Untersuchungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ . . . . .	134
5.3.3	Resümee . . . . .	145
<b>6</b>	<b>Resümee und Ausblick</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>150</b>



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle (nach [Jäger et al., 2013, Seite 8]) . . . . .	6
2.2	Die Repräsentation der Frequenz $f$ und der Wellenlänge $\lambda$ (im Zeitbereich als Periodendauer $T$ dargestellt) im Zeitbereich (links) und im Spektralbereich (rechts). . . . .	7
2.3	Die für die Distanzmessung verwendeten elektromagnetischen Wellenlängen; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 52],[Leica Geosystems, 2011, Seite 160],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 7],[Topcon, 2012b, Seite 159],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]; k.A. für Sokkia DX 201-AC . . . . .	8
2.4	Warnhinweis für den Laser am Instrument (2.4a) und im Manual (2.4b) (2.4b aus [Trimble, 2010c, Seite vi]). . . . .	9
2.5	Das Messprinzip der Laufzeitmessung (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 18]) .	16
2.6	Eine Zählvorrichtung misst die Anzahl der Takte, die zwischen der Aussendung des Signals und dessen Empfang auftreten (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 20]). . . . .	17
2.7	Darstellung einer amplitudenmodulierten Welle im Zeitbereich (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 9]) . . . . .	19
2.8	Das Messprinzip der Phasenvergleichsmessung (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 38],[Witte und Schmidt, 2006, Seite 313]) . . . . .	20
2.9	Die Messfrequenz moderner Totalstationen für eine 300-sekündige Messdauer	24
2.10	Die Messfrequenz moderner Totalstationen für eine 30-sekündige Messdauer	24
2.11	Das Messprinzip des Wave Form Digitizers (nach [Maar und Zogg, 2014]) . .	26
2.12	Das Signal wird hochfrequent abgetastet (dargestellt als *) (nach [Maar und Zogg, 2014]) . . . . .	26
2.13	Darstellung des SNR für eine Einzelmessung (2.13a) und für ein akkumuliertes Signal (2.13b) (aus [Hardegen, 2014]). . . . .	28
2.14	Ambiguitätenproblem bei der Distanzmessung mittels WFD (aus [Hardegen, 2014]) . . . . .	29
2.15	Lösung des Ambiguitätenproblems durch Kombination von zwei unterschiedlichen Wiederholungsraten (aus [Hardegen, 2014]) . . . . .	30
2.16	Der Laserspot variiert mit der Distanz $D$ , dem Einfallswinkel $\varphi$ und der Strahldivergenz $\gamma$ (nach [Schäfer, 2011, Seite 365]). . . . .	32

2.17	Die spezifizierte Querschnittsfläche des Laserspots bei einer Distanz von $D=100\text{m}$ ; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 11],[Leica Geosystems, 2011, Seite 130],[Donath et al., 2011, Seite 352],[Trimble, 2010b, Seite vii],[Trimble, 2010e, Seiten vi,vii],[Trimble, 2007]; k.A. für Sokkia SX 101T, Sokkia DX 201-AC, Topcon IS301, Topcon PS 101 . . . . .	32
2.18	Die spezifizierte vertikale Ausdehnung des Laserspots in Abhängigkeit von der Distanz; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 11],[Leica Geosystems, 2011, Seite 130],[Donath et al., 2011, Seite 352],[Trimble, 2010b, Seite vii],[Trimble, 2010e, Seiten vi,vii],[Trimble, 2007]; k.A. für Sokkia SX 101T, Sokkia DX 201-AC, Topcon IS301, Topcon PS 101 . . . . .	33
2.19	Die spezifizierte horizontale Ausdehnung des Laserspots in Abhängigkeit von der Distanz; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 11],[Leica Geosystems, 2011, Seite 130],[Donath et al., 2011, Seite 352],[Trimble, 2010b, Seite vii],[Trimble, 2010e, Seiten vi,vii],[Trimble, 2007]; k.A. für Sokkia SX 101T, Sokkia DX 201-AC, Topcon IS301, Topcon PS 101 . . . . .	33
2.20	Der EDM-Spot kann gegenüber dem Fadenkreuz eine Translation ( $\Delta a$ , $\Delta b$ ) und eine Rotation ( $\alpha$ ) aufweisen. . . . .	34
2.21	Anwendungsfälle, bei denen die reflektorlose Distanzmessung grob fehlerhaft ist . . . . .	37
2.22	Die maximal erzielbaren Distanzen und deren Präzision im reflektorlosen Messbetrieb nach Spezifikation des Herstellers; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 53],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 161,162],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seiten 157,158],[Topcon, 2012b, Seite 160],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2013b],[Trimble, 2007] . . . . .	40
3.1	Das aktive Prisma sendet ein Signal aus. . . . .	45
3.2	Die Totalstation detektiert das Signal des Prismas. . . . .	45
3.3	Die Totalstation sendet ein Signal in Richtung des Prismas aus. . . . .	46
3.4	Positionierung des Fadenkreuzes in Richtung des Prismenzentrums . . . . .	46
3.5	Totalstation und Prisma emittieren ein Signal . . . . .	47
3.6	Funktionsprinzip eines semiaktiven Zielerfassungssystems . . . . .	47
3.7	Durch Differenzbildung der Bilder wird die Position des Prismas lokalisiert (nach [Bayoud, 2006b]). . . . .	49
3.8	Der Strahlengang eines kamerabasierten Zielerfassungssystems (nach [Topcon, 2012a]). . . . .	50
3.9	Der reflektierte Intensitätspot im Bildkoordinatensystem (nach [Schlemmer, 1989, Seite 369]). . . . .	51

3.10	Lokales Koordinatensystem und Bildkoordinatensystem sowie deren Relation zueinander (nach [Kahmen, 1992, Seite II 6/7]) . . . . .	52
3.11	Die von einem Prisma reflektierte Intensität unterscheidet sich von Fremdreflexionen (nach [Bayoud, 2006a]). . . . .	55
3.12	Auswahl des korrekten Prismentyps (3.12a) und der momentanen Sichtverhältnisse (3.12b) . . . . .	55
3.13	Die Leica MS50 Totalstation sendet unter der Einstellung „Gut“ (3.13a) ein deutlich stärkeres Signal zur automatischen Prismendetektion aus als unter der Einstellung „Sonne & Reflexionen“ (3.13b). . . . .	56
3.14	Der reflektierte Spot am Kamerasensor bei langen Distanzen (aus [Stempfhuber und Kirschner, 2008]). . . . .	57
3.15	Intensitätsvariation eines neuen verbesserten Lasers (3.15b) und einer älteren Strahlungsquelle (3.15b)(aus [Topcon, 2012a]) . . . . .	57
3.16	Multiple Prismen in einem Tunnel (Prismen in Rot hervorgehoben, Foto aufgenommen vom IGMS) . . . . .	58
3.17	Das Kamerasehfeld der Focus 30 von Spectra Precision ist größer als das visuelle Fernrohrfeld (nach [Donath et al., 2011, Seite 353]). . . . .	59
3.18	Der Messbereich des ATR-Sensors für die Leica MS50 (3.18a) und für die Leica TS15 (3.18b) bei einer Distanz von $D \approx 2.7$ m . . . . .	60
3.19	Die Sehfelder der Leica MS50 und Leica TS15 laut Angaben des Herstellers; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 11,56,57],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 130,168,200] bzw. nach Rücksprache mit dem Hersteller . . . . .	60
3.20	Im Falle von multiplen Prismen im Kamerasehfeld wird jenes als das korrekte identifiziert, das die kürzeste Distanz zwischen Prismenmittelpunkt und Fadenkreuz aufweist (aus [Topcon, 2012a]). . . . .	61
3.21	Der Strahlengang des Zielerfassungssystems bei der Trimble S6 Totalstation (nach [Trimble, 2009b]). . . . .	63
3.22	Schrittweise Nachführung des Teleskops, bis der Prismenspot mit dem Zentrum des Quadrantendetektors zusammenfällt (nach [Trimble, 2009d]) . . . . .	64
3.23	Die Intensität wird in allen Quadranten zeitgleich detektiert (nach [Trimble, 2009a]). . . . .	66
3.24	Die Sehfelder der einzelnen Sensoren bei der Trimble S-Serie; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2009d],[Trimble, 2013b],[Trimble, 2009h],[Trimble, 2010e, Seite vi],[Trimble, 2007] . . . . .	68
3.25	Der Autolock-Messbereich sowie der EDM-Spot der Trimble S6 DR 300+ (3.25a) und der Trimble S8 HP (3.25b) . . . . .	68
3.26	Skizzenhafte Darstellung der Sehfelder und deren Lage gegenüber dem Fadenkreuz . . . . .	69
3.27	Der Quadrantendetektor detektiert alle im Sehfeld der Feinanziehung liegenden Intensitäten und gleicht diese zu einem fiktiven Intensitätsspot aus. . . . .	70

3.28	Jeweils vier Photodioden bilden einen Quadrantendetektor (nach [Stempfhuber, 2009]) . . . . .	71
3.29	Auswahl verschiedener Prismentypen (aus [Mao und Nindl, 2010]),[Trimble, 2012]). . . . .	73
3.30	Die Prismengröße beeinflusst den Strahlengang (nach [Trimble, 2009f]). . . . .	74
3.31	Das MultiTrack 1000 Prisma im aktiven (3.31a) und passiven (3.31b) Zustand	76
3.32	Die Messpräzision der automatischen Zielerfassungssysteme laut Spezifikation der Hersteller; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 54,55],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 165,166],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 156],[Topcon, 2012b, Seite 162],[Trimble, 2013b],[Trimble, 2011a]; k.A. für Trimble S3, Sokkia DX 201-AC, Sokkia SX 101T . . . . .	78
3.33	Signalintensität in Abhängigkeit von der Distanz (nach [Trimble, 2009e]) . . . . .	79
4.1	Aus einer Distanz von $D \approx 26.3$ m wurden die Zieltafeln reflektorlos gemessen.	84
4.2	Grundriss der Messkonfiguration zur Messung der Objektkanten . . . . .	85
4.3	Adaptierte motorisierte Totalstation mit Zieltafel und die zu testende moderne Totalstation . . . . .	86
4.4	Grundriss der Messkonfiguration zur Untersuchung der Auswirkungen des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung . . . . .	86
4.5	Messaufbau zur Untersuchung des Systemverhaltens bei Sichtbehinderung durch eine Glasscheibe . . . . .	87
4.6	Grundriss der Messkonfiguration bei den Tests mit der Glasscheibe als Sichtbehinderung in der Visur . . . . .	88
4.7	Die Leica TM1100 als Prismenträger und eine der zu untersuchenden Totalstationen . . . . .	89
4.8	Die Leica TM1100 mit Adapterplatte und Steckzapfen . . . . .	90
4.9	Die Totalstation Trimble S8 HP am Stativ und das Zielobjekt am Pfeiler. . . . .	91
4.10	Die Messung der Distanz von $D \approx 39.9$ m erfolgte auf den Dächern des Gebäudes in der Steyrergasse 30. . . . .	92
4.11	Die Distanz von $D \approx 155.8$ m wurde vom Dach des Gebäudes der Steyrergasse 30 zum Dach des Gebäudes der Kopernikusgasse 24 gemessen (Funkmodule zur Steuerung der Leica TS15 in Blau hervorgehoben). . . . .	92
5.1	Ergebnis der seitlichen Kantenmessung der Trimble S6 DR 300+ . . . . .	94
5.2	Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in I. Kreislage . . . . .	95
5.3	Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in II. Kreislage . . . . .	95
5.4	Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten im Kreislagenmittel . . . . .	96
5.5	Die infrarote EDM-Spotgröße des Trimble S6 DR 300+ für eine Distanz von $D \approx 2.7$ m (5.5a) und $D \approx 26.3$ m (5.5b) . . . . .	97
5.6	Der sichtbare EDM-Spot der Trimble S8 HP für eine Distanz von $D \approx 2.7$ m (5.6a) und $D \approx 26.3$ m (5.6b) . . . . .	99

## Abbildungsverzeichnis

---

5.7	Messabweichungen zur wahren oberen Kante in beiden Kreislagen . . . . .	100
5.8	Messabweichungen zur wahren oberen Kante im Kreislagenmittel . . . . .	101
5.9	Der sichtbare EDM-Spot der Leica MS50 für eine Distanz von $D \approx 2.7$ m (5.9a) und $D \approx 26.3$ m (5.9b) . . . . .	102
5.10	Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in I. Kreislage . . . . .	103
5.11	Messabweichungen zur Oberkante der Zieltafel in I. Kreislage . . . . .	103
5.12	Der sichtbare EDM-Spot der Leica TS15 für eine Distanz von $D \approx 2.7$ m (5.12a) und $D \approx 26.3$ m (5.12b) . . . . .	104
5.13	Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in I. Kreislage . . . . .	105
5.14	Messabweichungen zur Oberkante der Zieltafel in I. Kreislage . . . . .	105
5.15	Resultate der reflektorlosen Distanzmessgenauigkeit bei variierendem Einfallswinkel; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2011, Seite 162],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]; Standardabweichung mittels Varianzfortpflanzung berechnet . . . . .	106
5.16	Ergebnisse der Trimble S6 DR 300+ für die I. Kreislage, II. Kreislage und für das Kreislagenmittel; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2007]; Standardabweichung mittels Varianzfortpflanzung berechnet . . . . .	108
5.17	Theoretischer Fehleranteil in der Distanzmessung bedingt durch eine exzentrische Ausrichtung des Zielstrahls . . . . .	109
5.18	Darstellung eines asymmetrischen EDM-Spots und dessen Auswirkung auf die reflektorlose Distanzmessung bei einem Einfallswinkel von $\varphi \neq 0$ gon . . . . .	110
5.19	Die theoretischen Simulationsergebnisse für eine Glasscheibe in der Visur . . . . .	112
5.20	Ergebnisse der horizontalen Richtungskomponente der Leica MS50 und Leica TS15 Totalstationen . . . . .	115
5.21	Ergebnisse der Distanzmessungen der Leica MS50 und Leica TS15 Totalstationen . . . . .	116
5.22	Ergebnisse der horizontalen Richtungsmessung und der Distanzmessung der Trimble S6 DR Plus Totalstation . . . . .	117
5.23	Der infrarote Spot der Autolock-Technologie an der Glasscheibe (blau umrandet) . . . . .	118
5.24	Signalreflexion durch die Glasscheibe bei einem Einfallswinkel von $\varphi = -1$ gon (5.24a) und $\varphi = -2$ gon (5.24b) . . . . .	119
5.25	Die Position des Teleskops wird solange verändert, bis sich die detektierte Intensität im Zentrum des Quadrantendetektors befindet. . . . .	120
5.26	Die horizontalen Messabweichungen der Trimble S6 DR Plus (mit einer Aussparung von $\pm 5$ gon) und der Trimble S8 HP . . . . .	122
5.27	Ergebnisse der Distanzmessungen der Trimble S6 DR Plus (mit einer Aussparung von $\pm 5$ gon) und der Trimble S8 HP . . . . .	123
5.28	Resultate der horizontalen Komponente der Trimble S8 HP . . . . .	126
5.29	Bildschirmausgabe der Trimble S8 HP bei automatischer Zielerfassung . . . . .	127
5.30	Messabweichungen des Vertikalwinkels bei automatischer Zielerfassung . . . . .	128
5.31	Differenz zwischen der semiaktiven und der passiven Systemeinstellung betreffend die Richtungskomponenten . . . . .	129

5.32	Abweichungen in der Distanzmessung bei Messung auf ein 360° Prisma . . . .	130
5.33	Differenz zwischen den verschiedenen Systemeinstellungen betreffend die Distanz . . . . .	130
5.34	Differenz zwischen der Autolock- und FineLock-Technologie betreffend die Richtungskomponenten . . . . .	131
5.35	Die Distanzmessergebnisse der Trimble S8 HP, der Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S6 DR Plus . . . . .	133
5.36	Die Distanzvariationen der Leica TS15 (oben) und der Trimble S8 HP (unten) für eine Messdistanz von $D \approx 2.2$ m . . . . .	135
5.37	Die horizontale EDM-Spotgröße der Leica TS15, Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S8 HP in Relation zum MultiTrack 1000 Prisma; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2007],[Trimble, 2013b], bzw. nach Rücksprache mit dem Hersteller . . . . .	136
5.38	Die Distanzvariationen der Leica TS15 (oben) und der Trimble S8 HP (unten) für eine Messdistanz von $D \approx 39.9$ m . . . . .	137
5.39	Die Distanzvariationen der Leica TS15 (oben) und der Trimble S8 HP (unten) für eine Messdistanz von $D \approx 155.8$ m . . . . .	138
5.40	Die Distanzvariationen der Leica TS15 mit der Einstellung „360° Prisma“ (oben) und der Trimble S6 DR 300+ (unten) für eine Messdistanz von $D \approx 2.2$ m	139
5.41	Die Distanzvariationen der Leica TS15 mit der Einstellung „360° Prisma“ (oben) und der Trimble S6 DR 300+ (unten) für eine Messdistanz von $D \approx 39.9$ m	139
5.42	Gegenüberstellung der Distanzvariationen der Trimble S8 HP und der Trimble S6 DR 300+ für eine Messdistanz von $D \approx 39.9$ m . . . . .	141
5.43	Variationen in der horizontalen Richtungskomponente der getesteten Totalstationen bei einer Messdistanz von $D \approx 2.2$ m . . . . .	142
5.44	Variationen in der horizontalen Richtungskomponente der getesteten Totalstationen bei einer Messdistanz von $D \approx 39.9$ m . . . . .	143
5.45	Variationen in der horizontalen Richtungskomponente der getesteten Totalstationen bei einer Messdistanz von $D \approx 155.8$ m . . . . .	144
5.46	Die durchschnittlichen Spannweiten der horizontalen Komponente für die drei getesteten Messdistanzen . . . . .	145

# Tabellenverzeichnis

2.1	Die Einteilung der optischen Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz $f$ bzw. der Wellenlänge $\lambda$ [Deutsche Normen, 1984, Seite 184] . . . . .	8
2.2	Moderne Totalstationen und die Zuordnung zur Laserschutzklasse; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 10,11,52],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 127,129,160],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 158],[Topcon, 2012b, Seiten 7,159],[Trimble, 2010b, Seiten vii,48],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2010c, Seiten vi,100] . . . . .	10
2.3	Der Brechungsindex $n$ für verschiedene Stoffe (bezogen auf Luft von 20 °C und 101.325 kPa bei einer Wellenlänge von 589.3 nm, für Vakuum - Luft ist $n=1.0002724$ , aus [Mende und Simon, 2013, Seite 302]) . . . . .	11
2.4	Atmosphärische Referenzwerte moderner Totalstationen; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 75],[Leica Geosystems, 2011, Seite 210],[Topcon, 2009, Seite 138],[Topcon, 2012b, Seite 124]; Trimble S6 DR 300+ und Trimble S8 HP: Werte direkt den Instrumenten entnommen . . . . .	13
2.5	Die Messpräzision der Laufzeitmessung moderner Totalstationen; Angaben entnommen aus: [Topcon, 2009, Seite 158],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007]	16
2.6	Spezifizierte Messpräzision der Phasenvergleichsmessung moderner Totalstationen; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 52],[Leica Geosystems, 2011, Seite 159],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2012b, Seite 160],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2013b] . . . . .	22
2.7	Die durchschnittliche Messfrequenz moderner Totalstationen . . . . .	25
2.8	Die spezifizierten maximal erzielbaren Reichweiten moderner Totalstationen im reflektorlosen Messmodus; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 53],[Leica Geosystems, 2011, Seite 161],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 157],[Topcon, 2012b, Seite 160],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]	36
3.1	Die automatische Zielerfassung unterschiedlicher Hersteller; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2007],[Sokkia, 2014],[Donath et al., 2011, Seiten 353,354],[Topcon, 2013],[Trimble, 2009a] . . . . .	48

3.2	Die Wellenlängen des infraroten Signals zur Ausleuchtung des Bildausschnitts; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 13],[Leica Geosystems, 2011, Seite 134],[Donath et al., 2011, Seite 353],[Topcon, 2009, Seite 7],[Topcon, 2012b, Seite 161] . . . . .	49
3.3	Die Ausdehnung des Sehfelds der Feinanzielung und des Fernrohrge-sichtsfelds nach Spezifikation der Hersteller; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 56,57],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 168,200],[Sokkia, 2014],[Donath et al., 2011, Seite 353],[Topcon, 2009, Sei-ten 69,156],[Topcon, 2012b, Seiten 159,161] . . . . .	59
3.4	Gegenüberstellung zwischen dem theoretischen und dem gemessenen vertika-len Sehfeld des ATR-Sensors bei einer Distanz von $D \approx 2.7$ m; Angaben ent-nommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 56],[Leica Geosystems, 2011, Seite 168] . . . . .	61
3.5	Die Vorzeichenbelegung für die vier Photodioden des Quadrantendetektors .	64
3.6	Die Sehfelder der Totalstationen der Trimble S-Serie; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2013b],[Trimble, 2009d],[Trimble, 2009h] . . . . .	67
3.7	Der Vergleich zwischen dem theoretischen und dem gemessenen vertikalen Sehfeld bei einer Distanz von $D \approx 2.7$ m; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2009d],[Trimble, 2010e, Seite vi] . . . . .	69
3.8	Nicht alle Hersteller bieten aktive Prismensysteme an. . . . .	76
3.9	Die minimale und maximale Messdistanz der automatischen Zielerfassung; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 54,55],[Lei-ca Geosystems, 2011, Seiten 165,166],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spec-tra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 156],[Topcon, 2012b, Seiten 161,162],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]	79



# Abkürzungsverzeichnis

<b>ADC</b>	Analog to Digital Converter
<b>AM</b>	Amplitudenmodulation
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>ATR</b>	Automatic Target Recognition
<b>CCD</b>	Charge-Coupled Device
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>DR</b>	Direct Reflex
<b>EDM</b>	Elektrooptische Distanzmessung
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>FM</b>	Frequenzmodulation
<b>FOV</b>	Field of View
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>HP</b>	High Precision
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>IGMS</b>	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>LASER</b>	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

## *Abkürzungsverzeichnis*

---

<b>LED</b>	Light-Emitting Diode
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory
<b>PM</b>	Phasenmodulation
<b>ppm</b>	parts per million
<b>RS-232</b>	Radio Sector-232
<b>SHI</b>	Sample and Hold Integrate
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TPSDK</b>	Trimble Precision Software Development Kit
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>WFD</b>	Wave Form Digitizer

# Symbolverzeichnis

$a$	große Halbachse
$A$	erster Quadrant des Quadrantendetektors
$A_f$	erster Quadrant des feinen Quadrantendetektors
$A_g$	erster Quadrant des groben Quadrantendetektors
$A_s$	Amplitude des Signals
$A_{sE}$	Amplitude des Signals zum Empfangszeitpunkt
$A_{sS}$	Amplitude des Signals zum Sendezeitpunkt
$\alpha$	Drehwinkel
$b$	kleine Halbachse
$B$	zweiter Quadrant des Quadrantendetektors
$B_f$	zweiter Quadrant des feinen Quadrantendetektors
$B_g$	zweiter Quadrant des groben Quadrantendetektors
$c$	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

## Symbolverzeichnis

---

$C$	dritter Quadrant des Quadrantendetektors
$C_f$	dritter Quadrant des feinen Quadrantendetektors
$C_g$	dritter Quadrant des groben Quadrantendetektors
$d$	Translationsparameter
$dH_z$	horizontale Winkelablage
$dV$	vertikale Winkelablage
$D$	vierter Quadrant des Quadrantendetektors
$D$	Distanz
$D_f$	vierter Quadrant des feinen Quadrantendetektors
$D_g$	vierter Quadrant des groben Quadrantendetektors
$\Delta$	Differenz
$e$	Exponentialfunktion
$\varepsilon$	Exzentrizität
$\eta$	Ordinate des Bildkoordinatensystems
$f$	Frequenz
$g$	Stärke der Glasscheibe
$\gamma$	Strahldivergenzwinkel
$h$	Luftfeuchtigkeit

## Symbolverzeichnis

---

$H_z$	horizontale Richtungskomponente
$J$	Ausgangsintensität
$J_0$	Anfangsintensität
$\lambda$	Wellenlänge
$n$	Brechungsindex
$N$	Anzahl vollständiger Wellen
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
$p$	Luftdruck
$\varphi$	Einfallswinkel
$\varphi_P$	Phasenwinkel
$\phi$	Rotationsparameter
$q$	Anzahl der Einzelmessungen
$R$	temporäre Restabweichung
$R$	Rauschen
$S$	Signal
$\sigma$	Standardabweichung
$t$	Zeitpunkt
$T$	Periodendauer

## Symbolverzeichnis

---

$T_{On}$	Pulsbreite
$T_{Rep}$	Wiederholungsrate
$\vartheta$	Temperatur
$V$	Vertikalwinkel
$x$	Abszisse des kartesischen Koordinatensystems
$\xi$	Abszisse des Bildkoordinatensystems
$y$	Ordinate des kartesischen Koordinatensystems
$z$	Extinktionskoeffizient

# Kapitel 1

## Einleitung

Das in der Ingenieurgeodäsie verwendete Instrumentarium zur Messung von unterschiedlichsten Zielgrößen ist äußerst umfangreich und gewährleistet für eine Vielzahl von vermessungsspezifischen Anwendungen ein optimales Messergebnis. Dabei erstreckt sich das Einsatzgebiet ingenieurgeodätischer Instrumente über die Schienenvermessung zur Sicherstellung der Spurweite und Überhöhung, das Monitoring von Bauwerken und Rutschhängen, die Errichtung von Portalnetzen bei Tunnelprojekten bis hin zu klassischen Vermessungsaufgaben wie der Absteckung. Diese Projekte können unter der Zuhilfenahme von Gleiswagen mit Spurweitensensor und Neigungssensoren, der Einbettung von faseroptischen Sensoren in das zu observierende Objekt, der dreidimensionalen Positionserfassung mittels Satellitensystemen und der Übertragung von Plankoordinaten in die Natur basierend auf den Messergebnissen eines Tachymeters akkurat und spezifisch realisiert werden.

Eine andere Möglichkeit zur erfolgreichen Durchführung der oben genannten ingenieurgeodätischen Aufgaben ist der Einsatz einer modernen Totalstation. Das breite Einsatzspektrum eröffnet dem Ingenieurgeodäten die Realisierung von mannigfachen vermessungsspezifischen Projekten unter der Verwendung eines einzigen Instruments, sodass alle zuvor genannten Messaufgaben mit einer modernen Totalstation durchgeführt werden können.

Gemäß der Namensgebung ist eine moderne Totalstation das Resultat einer Implementierung vieler Sensoren und Technologien zur Schaffung eines multitaskingfähigen Vermessungsinstruments. Resultierend aus der unmittelbaren Zusammengehörigkeit zwischen den einzelnen Sensorelementen und der Totalstation als Ganzes ist das Potential einer Totalstation immer eine Funktion der verwendeten Sensorik und der damit einhergehenden Technologie. Demzufolge ist die moderne Totalstation das Produkt multipler sensorischer Bausteine, welches durch den technologischen Fortschritt der Subsysteme kurzlebig und raschen Veränderungen unterworfen ist.

Das nachfolgende Subkapitel demonstriert den nicht endenden Veränderungsprozess

der Totalstationen und zeigt deren jahrelangen Reifeprozess bis hin zu den high-end Instrumenten heutiger Zeit.

## 1.1 Totalstationen im Wandel der Zeit

Ein zentrales Kernelement moderner Totalstationen ist die präzise Messung von horizontalen Richtungen und vertikalen Winkeln basierend auf der elektronischen Ablesung von Glaskreisen. Die Anfänge der Winkelmessung in der Vermessung sind auf Theodolite zurückzuführen, die im Jahr 1571 von Leonard Digges in dessen Buch *Pantometria* als *Theodolitus* erstmalig erwähnt werden [Wallis, 2005]. Als erster Repräsentant der optischen Theodolite gilt der von Carl Zeiss 1922 in Jena entwickelte Th1, der mittels Glaskreis und Koinzidenzlibelle eine für die damalige Zeit beachtliche Präzision in der Winkel- und Richtungsmessung ermöglichte [Rüeger, 2006, Seite 465].

Im Jahr 1950 stellte die schwedische Firma AGA den Geodimeter der Öffentlichkeit vor und ermöglichte damit die Messung von Distanzen basierend auf elektrooptischen Messsignalen [Rüeger, 2006, Seite 467]. Die rasante Entwicklung der elektrooptischen Distanzmessung führte einerseits zu einer genaueren Messung von weit entfernten Prismen, andererseits aber auch zu kompakteren Bauteilen. Letzteres war im Jahr 1968 eine entscheidende Voraussetzung, um mit dem Distomat D10 von Wild ein infrarotes Distanzmessgerät zu entwickeln, welches optional einem Theodolit hinzugefügt werden konnte und damit eine Vorgängerversion des Tachymeters darstellt [Rüeger, 2006, Seite 467]. 1970 produzierte die Firma Zeiss mit den Reg Elta 14 das weltweit erste elektronische Tachymeter, sodass die Polarelemente (horizontale Richtung, vertikaler Winkel, Distanz) elektronisch erfasst werden konnten [Rüeger, 2006, Seite 468].

Der nächste Meilenstein in der Historie der Totalstation gelang erneut der Firma AGA, als sie 1983 mit dem Geodimeter 140 ein motorisiertes Tachymeter einführte und auf diese Art und Weise eine zumindest teilweise automatisierte Messung ermöglichte [Rüeger, 2006, Seite 469]. Die Nachfolgeversion, der Geodimeter 140T, ermöglichte im Jahr 1985 die automatische Zielsuche und Zielverfolgung und ersetzte dadurch die visuell-manuelle Anzielung eines Prismas durch den Anwender [Rüeger, 2006, Seite 469],[Stempfhuber, 2009]. Der Geodimeter 140T weist mit Sensorelementen zur Winkelmessung, zur Distanzmessung und zur automatischen Zielsuche und Zielverfolgung alle Kernelemente einer modernen Totalstation auf und kann dadurch als weltweit erste Totalstation bezeichnet werden.

Der Übergang auf kamerabasierte Totalstationen erfolgte fließend, erste Untersuchungen und Feldversuche wurden bereits im Jahr 1972 durchgeführt [Lienhart, 2011]. Es dauerte allerdings bis zum Jahr 1987, bis der erste Videotheodolit, der Kern E2-SE, marktreif war



[Wunderlich, 2005, Seite 31]. Ab diesem Zeitpunkt bildet der Kamerasensor einen integralen Bestandteil in modernen Totalstationen und ermöglicht dem Anwender eine bildgestützte Vermessung.

Die Distanzmessung zu natürlichen beliebigen Objekten wurde im Segment der Tachymeter erstmalig mit dem Zeiss Rec Elta RL 1993 eingeführt. Die reflektorlose Distanzmessung ermöglichte es, das Einsatzgebiet von Totalstationen zu erweitern und ist heutzutage unverzichtbar für eine Vielzahl von Anwendungen [Rüeger, 2006, Seite 468].

Die Kombination aus einer GNSS-Antenne und einer Totalstation wurde im Jahr 2005 unter dem Namen SmartStation von Leica Geosystems realisiert. Durch die Integration satellitengestützter Messergebnisse werden die Vorzüge aus dem jeweiligen System zu einer Gesamtlösung vereint [Hill, 2005].

Aktuell ist die MultiStation MS50 von Leica Geosystems die technologische Speerspitze im Segment der Totalstationen, wenngleich auf Grund ihrer Fähigkeit, Objekte mit bis zu 1 kHz zu scannen, die Bezeichnung MultiStation treffender zu sein scheint. Die im Jahr 2013 vorgestellte MS50 von Leica Geosystems integriert eine Vielzahl von Sensoren und vereint die Welten von GNSS, Photogrammetrie, Laserscanning und klassischer Vermessung in einem Instrument [Grimm und Zogg, 2013].

## 1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Unterschiedlichste Entwicklungswege werden gewählt, um Totalstationen bestmöglich zu konzipieren und so im Sinne des olympischen Mottos *citius, altius, fortius* (schneller, höher, stärker) den Bedürfnissen der Ingenieurgeodäten nach genaueren, schnelleren und weiter messenden Messwerkzeugen nachzukommen.

Die Optimierung jedes einzelnen sensorischen Elements in den Instrumenten führt zu einer Vielfältigkeit an technologischen Möglichkeiten, bestimmte Arbeitsprozesse zu perfektionieren. Basierend auf der kombinatorischen Vielfalt aus Sensorelement und Technologieprinzip können die Aufgaben der einzelnen Subsysteme auf unterschiedliche Art und Weise gelöst werden. Der über mehrere Jahrzehnte andauernde und nicht abgeschlossene Entwicklungsprozess zur Optimierung der Messresultate spiegelt sich in der Variationsbreite an mannigfaltigen Lösungsansätzen wider.

Speziell die Distanzmessung kann aus einem reichhaltigen Repertoire an Lösungsmöglichkeiten schöpfen, aber auch die automatische Zielerfassung basiert auf diversen Lösungskonzepten. Dem Laien ist dies vermutlich nicht bewusst, jedoch sind die

Kennzahlen einer Totalstation wie Messpräzision, Reichweite und Messzeit abhängig von den verwendeten Sensoren und den damit einhergehenden technologischen Lösungsansätzen. Auf Grund dessen ist zur Erzielung optimaler Messresultate für den Anwender ein Verständnis der Funktionsprinzipien der Sensoren notwendig. Allerdings erweist sich dies als nicht ganz so trivial, die Vielfalt sowie die Komplexität der Lösungsansätze erschweren dieses Vorhaben. Besonders die Informationsbeschaffung stellt für den Anwender oftmals ein Hindernis dar, detaillierte Angaben und Spezifikationen zur Funktionsweise der Totalstation und deren Sensoren sind oft schwer zugänglich und in Ausnahmefällen nicht auffindbar, weswegen eine korrekte Inbetriebnahme und je nach Messkonfiguration richtige Einstellung häufig nicht möglich ist.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Systemeigenschaften von modernen Totalstationen mit dem Fokus auf den unterschiedlichen Messprinzipien zur Distanzmessung sowie den diversen Sensormodulen der automatischen Zielerfassung. Damit soll ein Bewusstsein für die Funktionsweise der Distanzmessung und der automatischen Zielerfassung geschaffen und verdeutlicht werden, dass spezielle Arbeitsprozesse der genannten Komponenten spezifisch sind für ihr Sensormodul. Ein Vergleich der jeweiligen Systemeigenschaften ermöglicht es die Vor- und Nachteile eines Systems zu nennen. Dem Anwender soll hiermit eine Hilfestellung gegeben werden, um abhängig von der Messsituation und der verwendeten Totalstation inklusive derer Systemeigenschaften ein optimales Messergebnis in praktischen Anwendungen zu erzielen.

Die Arbeit umfasst eine umfangreiche Literaturrecherche basierend auf Fachbüchern, wissenschaftlichen Artikeln, Patenten, Tagungspräsentationen und Spezifikationen der Hersteller. Die daraus gewonnene Information soll das breite Spektrum unterschiedlicher Technologien verdeutlichen und eine detaillierte Betrachtungsweise aktueller Totalstationen verschiedener Hersteller ermöglichen. Die aus der Literatur erhaltenen Angaben werden anhand ausgewählter praktischer Tests sowohl unter Laborbedingungen als auch unter realen Einsatzbedingungen überprüft. Die Messungen werden mit modernen und dem Stand der Technik entsprechenden Totalstationen durchgeführt und explizieren deren Systemverhalten in anspruchsvollen Messkonfigurationen. Abhängig von ihrer Verfügbarkeit werden die MS50 und TS15 von Leica Geosystems sowie die S6 DR Plus, S6 DR 300+ und die S8 HP von Trimble für die Messungen verwendet, die sich trotz ähnlicher äußerer Abmessungen deutlich in ihren Systemeigenschaften voneinander unterscheiden.

# Kapitel 2

## Elektrooptische Distanzmessung

Die Distanzmessung ist eine zentrale Kernaufgabe moderner Totalstationen. Die Anforderungen an die Distanzmesssysteme sind vielfältig und komplex und nur mit einem sehr hohen technischen Aufwand realisierbar. Dieses Kapitel soll ein Bewusstsein für die Komplexität einer Distanzmessung mittels Totalstationen schaffen, weswegen nach Aufarbeitung physikalischer Grundlagen vor allem die für die Totalstationen relevanten Distanzmesstechnologien beschrieben und erklärt werden. Diese unterscheiden sich markant voneinander und haben einen großen Einfluss speziell auf die reflektorlose Distanzmessung.

### 2.1 Physikalische Grundlagen elektromagnetischer Wellen

Die elektronische Distanzmessung in modernen Totalstationen basiert auf elektromagnetischen Wellen. Diese Signale werden im Instrument von der Sendeeinheit ausgesendet und nach Reflexion am Zielobjekt in der Empfangseinheit des Instruments empfangen.

#### 2.1.1 Kenngrößen elektromagnetischer Wellen

Eine elektromagnetische Welle kann als sinusförmige Schwingung betrachtet werden, die sich mit der linearen Frequenz  $f$ , der Wellenlänge  $\lambda$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  harmonisch ausbreitet. Es besteht der in Gleichung 2.1 dargestellte mathematische Zusammenhang.

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

Die Charakteristik der Sinusschwingung der elektromagnetischen Welle ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

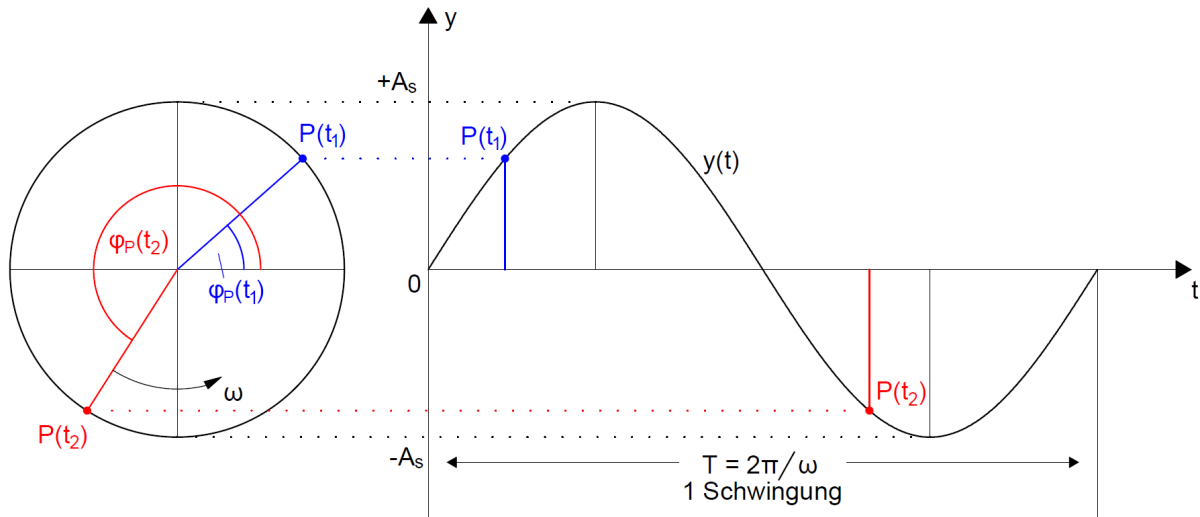


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle (nach [Jäger et al., 2013, Seite 8])

Die Schwingungen werden periodisch wiederholt, wobei die Frequenz  $f$  maßgebend ist für die Periodendauer  $T$  (siehe Gleichung 2.2).

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

Unter Zuhilfenahme der Amplitude  $A_s$  sowie der Winkelgeschwindigkeit (Kreisfrequenz)  $\omega$  kann die elektromagnetische Welle mathematisch definiert werden (siehe Gleichung 2.3).

$$y(t) = A_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.3)$$

Der Zusammenhang zwischen der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und dem Phasenwinkel  $\varphi_P$  ist in Gleichung 2.4 dargestellt und folgt aus der Abbildung 2.1.

$$\varphi_P = \omega \cdot t \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Elektromagnetisches Spektrum

Auf Grund der Tatsache, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  innerhalb eines Mediums konstant ist, ergibt sich ein Dualismus zwischen der linearen Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$ : Eine hohe Frequenz  $f$  hat eine kurze Wellenlänge  $\lambda$  zur Folge und vice versa (siehe Abbildung 2.2).

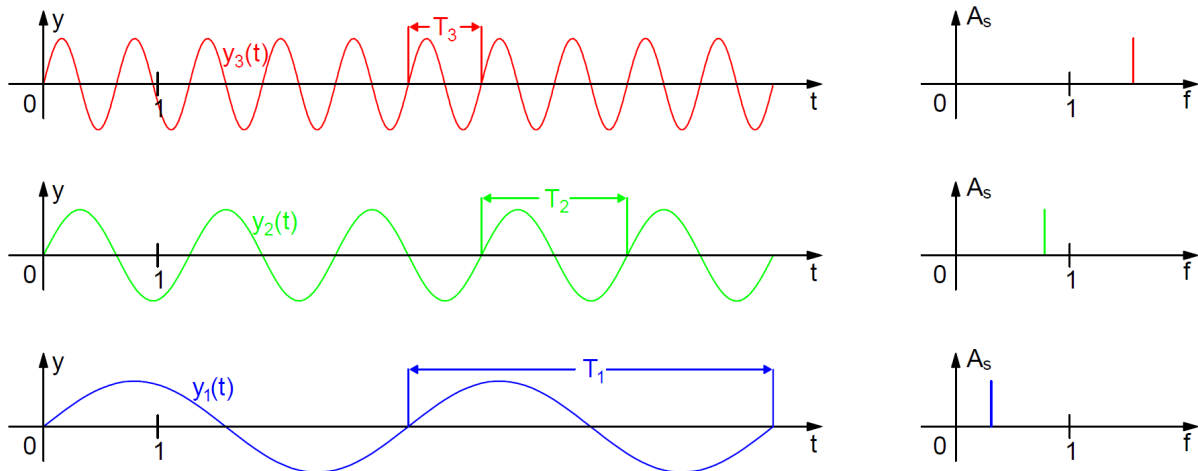


Abbildung 2.2: Die Repräsentation der Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$  (im Zeitbereich als Periodendauer  $T$  dargestellt) im Zeitbereich (links) und im Spektralbereich (rechts).

Die Mannigfaltigkeit an elektromagnetischen Wellen, basierend auf den verschiedenen Kombinationen aus der Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$ , bedingt die Klassifizierung dieser Signale, weshalb sie im elektromagnetischen Spektrum unterschieden werden (siehe Tabelle 2.1).

Relevant für die Wahl des Frequenzbereichs hinsichtlich der Distanzmessung ist die Durchdringbarkeit des elektromagnetischen Signals durch die Atmosphäre. Um möglichst lange Distanzen messen zu können, ist es wichtig, dass die elektromagnetische Welle bei ihrer Ausbreitung durch die Atmosphäre kaum abgeschwächt wird. Ein für elektromagnetische Wellen gut durchdringbarer Frequenzbereich ist im Bereich des sichtbaren Lichtes und der kurzwelligigen Infrarotstrahlung gegeben. Die Distanzmessgeräte moderner Totalstationen verwenden als Messsignale für die Distanzmessung elektromagnetische Wellen aus dem genannten Frequenzbereich und gehören dadurch zur Gruppe der elektrooptischen Entfernungsmesser [Joeckel et al., 2008, Seite 5] (siehe Abbildung 2.3).

Tabelle 2.1: Die Einteilung der optischen Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  bzw. der Wellenlänge  $\lambda$  [Deutsche Normen, 1984, Seite 184]

Benennung der Strahlung		Spektralbereiche			$\lambda$ [nm]		$f$ [THz]				
		Kurzzeichen									
Ultraviolettstrahlung	Vakuum-UV	UV	UV-C	VUV	100	-	200	3000	-	1500	
	Fernes UV		UV-B	FUV	200	-	280	1500	-	1070	
	Mittleres UV		UV-A		280	-	315	1070	-	950	
	Nahes UV				315	-	380	950	-	790	
Sichtbare Strahlung, Licht		VIS			380	-	780	790	-	385	
Infrarotstrahlung	nahes IR	IR	NIR	IR-A	780	-	$14 \cdot 10^2$	385	-	215	
	Mittleres IR		IR-B		$14 \cdot 10^2$	-	$30 \cdot 10^2$	215	-	100	
	Fernes IR		IR-C	MIR		$30 \cdot 10^2$	-	$50 \cdot 10^3$	100	-	6
				FIR		$50 \cdot 10^3$	-	$10^6$	6	-	0.3

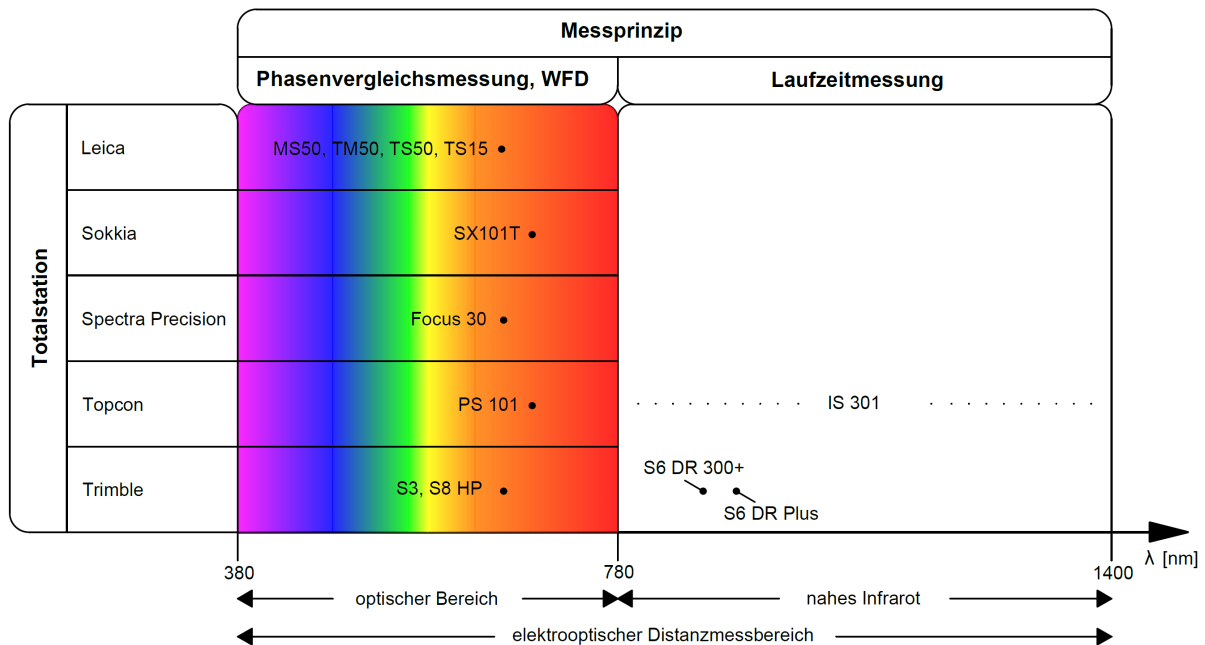


Abbildung 2.3: Die für die Distanzmessung verwendeten elektromagnetischen Wellenlängen; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 52],[Leica Geosystems, 2011, Seite 160],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 7],[Topcon, 2012b, Seite 159],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]; k.A. für Sokkia DX 201-AC

### 2.1.3 Laser als Strahlungsquelle

Um eine elektromagnetische Welle zu erzeugen, bedarf es einer geeigneten Strahlungsquelle, die im Falle von modernen Totalstationen durch einen Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) realisiert wird. Lasersignale eignen sich besonders gut für die Distanzmessung, da sie eine nahezu exakt definierte Frequenz aufweisen und äußerst energiereich sind. In den Totalstationen werden ausschließlich Laserdioden (Halbleiter-Laser) verwendet, um die Signale für die Distanzmessung zu generieren.

Auf Grund der stark gebündelten Energie können Laser erhebliche Schäden anrichten, weswegen Produkte, die einen Laser verwenden, speziell gekennzeichnet sein müssen. Abhängig von der Laserintensität und der verwendeten Wellenlänge wird das Produkt der Laserklasse 1, 2, 3 oder 4 zugeordnet, wobei energiereichere Laser den höheren Laserschutzklassen zugeteilt sind. Diese Zuordnung ist streng genormt und wird durch die IEC (International Electrotechnical Commission) 60825-1 und die EN (Europäische Norm) 60825-1 reglementiert.

Die Kennzeichnung der Laserschutzklasse ist bei modernen Totalstationen einerseits direkt am Instrument angebracht (siehe Abbildung 2.4a), andererseits auch zusätzlich im Handbuch ersichtlich (siehe Abbildung 2.4b).



a) Leica TS15



b) Manual Trimble S8

Abbildung 2.4: Warnhinweis für den Laser am Instrument (2.4a) und im Manual (2.4b) (2.4b aus [Trimble, 2010c, Seite vi]).

Die Tabelle 2.2 verdeutlicht, dass erhebliche Unterschiede bezüglich der Laserklasse zwischen den Messmodi vorhanden sind. Bei der reflektorlosen Distanzmessung muss erheblich mehr Energie abgestrahlt werden, um die suboptimalen Reflexionseigenschaften beliebiger Zielobjekte kompensieren zu können. Hingegen ist eine Distanzmessung zu einem Prisma (Reflektor) nur mit einem sehr geringen Energieaufwand verbunden, da der größte Signalanteil wieder in dieselbe Richtung zum Instrument zurückgestrahlt wird. Totalstationen, deren EDM-Technologie auf der Laufzeitmessung beruht, sind in der Laserschutzklasse 1 eingestuft. Zwar sind die Messimpulse bei der Laufzeitmessung energiereicher, dafür aber nur von sehr

kurzer Dauer, sodass eine niedrigere Laserklasse gegeben ist.

Tabelle 2.2: Moderne Totalstationen und die Zuordnung zur Laserschutzklasse; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 10,11,52],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 127,129,160],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 158],[Topcon, 2012b, Seiten 7,159],[Trimble, 2010b, Seiten vii,48],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2010c, Seiten vi,100]

Totalstation		Messprinzip	Laserschutzklasse	
Hersteller	Modell		Reflektor	Reflektorlos
Leica Geosystems	MS50	Wave Form Digitizer	1	3R
Leica Geosystems	TM50	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Leica Geosystems	TS50	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Leica Geosystems	TS15	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Sokkia	DX 201-AC	k.A.	1	3R
Sokkia	SX 101T	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Spectra Precision	Focus 30	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Topcon	IS 301	Laufzeitmessung	1	1
Topcon	PS 101	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Trimble	S3	Phasenvergleichsmessung	1	3R
Trimble	S6 DR Plus	Laufzeitmessung	1	1
Trimble	S6 DR 300+	Laufzeitmessung	1	1
Trimble	S8 HP	Phasenvergleichsmessung	1	2

## 2.2 Messprinzipien

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Distanz mittels elektromagnetischer Wellen zu messen. Derzeit werden in den modernen Totalstationen drei Messprinzipien angewandt. Die Laufzeitmessung, die Phasenvergleichsmessung und das Wave Form Digitizing vereint die Aufgabe, eine große Entfernung zwischen zwei Punkten akkurat zu bestimmen. Nichtsdestotrotz sind zwischen den Messprinzipien für die Distanzmessung signifikante Unterschiede vorhanden.

### Einflussfaktoren bei der Distanzmessung

Unabhängig vom elektrooptischen Messprinzip ist die zu eruiierende Distanz  $D$  eine Funktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ . Somit hat eine fehlerhafte Bestimmung des Parameters  $c$  zur Folge, dass die Distanz  $D$  nicht exakt bestimmt werden kann.



### Ausbreitungsgeschwindigkeit

Bei der elektrooptischen Distanzmessung breitet sich das vom Laser generierte Messsignal durch die Atmosphäre mit der Geschwindigkeit  $c$  aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  wird dabei von der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  abgeleitet. Im Gegensatz zur Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  eine Naturkonstante und beschreibt die maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit von Masseeteilchen im Vakuum (Gleichung 2.5).

$$c_0 = 299792458 \text{ m/s} \quad (2.5)$$

In einem materiehaltigen Medium (z.Bsp. Luft) werden die elektromagnetischen Teilchen abgebremst, sodass sie sich nicht mit Absolutgeschwindigkeit  $c_0$ , sondern mit der für das Medium maximal erreichbaren Geschwindigkeit  $c$  ausbreiten. Das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  und der Lichtgeschwindigkeit in einem Medium, welches der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  entspricht, wird über den Brechungsindex  $n$  beschrieben (Gleichung 2.6).

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.6)$$

Die Geschwindigkeit  $c$  ist abhängig von der Zusammensetzung des Mediums, in dem sie sich fortpflanzt, und folglich variiert dieser Parameter je nach Medium. Resultierend aus diesem Faktum und der konstanten Größe  $c_0$  ist auch der Brechungsindex  $n$  für verschiedene Medien variabel (siehe Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Der Brechungsindex  $n$  für verschiedene Stoffe (bezogen auf Luft von 20 °C und 101.325 kPa bei einer Wellenlänge von 589.3 nm, für Vakuum - Luft ist  $n=1.0002724$ , aus [Mende und Simon, 2013, Seite 302])

Medium	n
Eis (0 °C)	1.31
Wasser	1.33299
Flintglas F3	1.613
Quarzglas	1.45886
Kronglas K13	1.52238
Diamant	2.4173

Auf Grund der Absolutgeschwindigkeit des Lichts im Vakuum ist  $c_0$  immer größer als  $c$ ,

weswegen aus der Gleichung 2.6 die Schlussfolgerung gezogen werden kann, dass der Brechungsindex  $n$  minimal 1 sein muss (Gleichung 2.7).

$$n \geq 1 \quad (2.7)$$

Der Brechungsindex ist abhängig von den meteorologischen Bedingungen, die in der Atmosphäre herrschen, sowie von der Wellenlänge  $\lambda$  des emittierten Signals. Nach [Rüeger, 1996, Seite 51] ist der Brechungsindex eine Funktion der folgenden Parameter:

- Gasgemisch der Luft (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlenstoffdioxid u.a.)
- Menge des Partialdruckes des Wasserdampfes
- Temperatur der Luft
- Luftdruck
- Wellenlänge des emittierten Signals

Bei der Ausbreitung des Messsignals durch die Luft treffen die Partikel der elektromagnetischen Welle auf die Gaspartikel der Luft, wodurch es einerseits zur Streuung und andererseits zur Absorption kommt. Auf Grund dessen wird das emittierte Signal durch die Luftpartikel abgeschwächt, sodass mit zunehmender Distanz das Messsignal schwächer wird. Die Abschwächung durch Streuung und Absorption in der Atmosphäre (Extinktion) setzt sich aus einem geometrischen (Distanzabhängigkeit, siehe Abbildung 3.33) und einem bezüglich der Lichtdurchlässigkeit relevanten (Zusammensetzung der Luft) Term zusammen. Gleichung 2.8 beschreibt die Strahlungsintensität  $J$  in einer vom Sender entfernten Distanz  $D$ , wobei  $J$  die Ausgangsintensität und  $z$  den Extinktionskoeffizienten darstellt [Rüeger, 1996, Seite 48]. Der Extinktionskoeffizient  $z$  ist eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  des emittierten Signals und wird nach [Joeckel et al., 2008, Seite 6] mit zunehmender Wellenlänge kleiner.

$$J = \frac{J_0}{D^2} e^{-zD} \quad (2.8)$$

Eine hochgenaue Distanzmessung mittels moderner Totalstationen erfordert die Erfassung der meteorologischen Parameter entlang des gesamten Visurstrahls. Bei praktischen Anwendungen ist die Realisierung dieser Aufgabe nur mit außerordentlich hohem Messaufwand

möglich. In den meisten Anwendungsfällen ist eine geringfügig fehlerhafte Bestimmung der meteorologischen Parameter entlang des Visurstrahls zulässig, da die Auswirkungen auf die Distanzbestimmung in den meisten Fällen vernachlässigbar sind (siehe [Joeckel et al., 2008, Seiten 120-125]).

Die Hersteller von modernen Totalstationen kalibrieren die Instrumente auf geeignete atmosphärische Referenzwerte und beziehen ihre Messungen und damit einhergehende Korrekturen auf diese. Die Nichtberücksichtigung der Atmosphäre bleibt nur dann für die Messung insignifikant, wenn sichergestellt werden kann, dass die Diskrepanz zwischen der im Instrument eingestellten Referenzatmosphäre und der tatsächlichen atmosphärischen Zusammensetzung den erlaubten Grenzwert nicht überschreitet.

Tabelle 2.4: Atmosphärische Referenzwerte moderner Totalstationen; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 75],[Leica Geosystems, 2011, Seite 210],[Topcon, 2009, Seite 138],[Topcon, 2012b, Seite 124]; Trimble S6 DR 300+ und Trimble S8 HP: Werte direkt den Instrumenten entnommen

Totalstation		$\vartheta$ [°C]	p [mbar]	h [%]
Hersteller	Modell			
Leica Geosystems	MS50	12	1013.25	60
Leica Geosystems	TM50	12	1013.25	60
Leica Geosystems	TS50	12	1013.25	60
Leica Geosystems	TS15	12	1013.25	60
Sokkia	DX 201-AC	k.A.	k.A.	k.A.
Sokkia	SX 101T	k.A.	k.A.	k.A.
Spectra Precision	Focus 30	k.A.	k.A.	k.A.
Topcon	IS 301	15	1013.25	-
Topcon	PS 101	15	1013.00	50
Trimble	S3	k.A.	k.A.	k.A.
Trimble	S6 DR Plus	k.A.	k.A.	k.A.
Trimble	S6 DR 300+	12	984.50	-
Trimble	S8 HP	12	984.50	-

Die in der Tabelle 2.4 eingetragenen Parameter zeigen die atmosphärischen Referenzwerte, auf die sich die Distanzmessung bezieht, und sind gültig für instrumentenspezifische Gleichungen zur Korrektur der Distanzmessung auf Grund des atmosphärischen Einflusses. Die Korrekturformeln für die Totalstationen Leica MS50<sup>1</sup>, TM50<sup>1</sup>, TS50<sup>1</sup>, TS15<sup>2</sup> (jeweils Gleichung 2.9), Topcon IS301<sup>3</sup> (Gleichung 2.10) und PS101<sup>4</sup> (Gleichung 2.11) sind nachfolgend numerisch dargestellt.

<sup>1</sup>[Leica Geosystems, 2013, Seite 75]

<sup>2</sup>[Leica Geosystems, 2011, Seite 210]

<sup>3</sup>[Topcon, 2009, Seite 138]

<sup>4</sup>[Topcon, 2012b, Seite 124]

$$\Delta D = 286.34 - \left[ \frac{0.29525 \cdot p}{\left(1 + \frac{1}{273.15} \cdot \vartheta\right)} - \frac{4.126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{\left(1 + \frac{1}{273.15} \cdot \vartheta\right)} \cdot 10^{(7.5 \cdot \vartheta / (237.3 + \vartheta)) + 0.7857} \right] \quad (2.9)$$

$$\Delta D = 279.85 - \frac{79.585 \cdot p}{273.15 + \vartheta} \quad (2.10)$$

$$\Delta D = 282.324 - \frac{0.294362 \cdot p}{1 + 0.003661 \cdot \vartheta} + \frac{0.04127 \cdot h \cdot \frac{6.11 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot \vartheta}{\vartheta + 237.3}}}{100}}{1 + 0.003661 \cdot \vartheta} \quad (2.11)$$

mit  $\vartheta$  ... Temperatur in °C  
 $p$  ... Luftdruck in mbar  
 $h$  ... Luftfeuchtigkeit in %

Als Ergebnis der oben dargestellten Gleichungen resultiert ein Korrekturfaktor, der als Maßstabsfaktor (ppm=parts per million= $10^{-6}$ ) an den gemessenen Distanzwert angebracht wird.

## Refraktion

Neben der Auswirkung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit haben die atmosphärischen Einflüsse auch eine Auswirkung auf den Signalweg der elektromagnetischen Welle. Bei gleichbleibenden atmosphärischen Bedingungen breitet sich das Messsignal geradlinig aus, worauf sich auch die Grundgleichungen 2.13 und 2.17 beziehen, was aus den Abbildungen 2.5 und 2.8 ersichtlich ist.

Im Allgemeinen weist die Atmosphäre keine Homogenität auf, weshalb mehrere Luftschichten mit unterschiedlichen meteorologischen Eigenschaften vorhanden sind. Gemäß dem Brechungsgesetz von Snellius kommt es beim Übergang von einem Medium in das andere zu einer Brechung des Lichtstrahls. Durch die wiederholten Brechvorgänge an den Luftschichten entsteht ein gekrümmter Signalweg. Der Einfluss der unterschiedlichen Luftschichten auf die geometrische Form des Signalwegs wird als Refraktion bezeichnet. Refraktive Effekte verfälschen die Messung, wobei die Auswirkungen auf die Winkelmessung stärker ausfallen als auf die Distanzmessung. Der Einfluss der Refraktion auf die Distanzmessung ist im Allgemeinen vernachlässigbar. Für detaillierte Information bezüglich des Einflusses der Refraktion auf die Messung sei auf [Brunner, 1984] verwiesen.

### 2.2.1 Laufzeitmessung

Bei der Laufzeitmessung (Time-of-Flight, Pulsmessung, Impulsmessverfahren) wird die Zeitdifferenz eines elektromagnetischen Signals gemessen, welche zwischen Aussendung und Empfang entsteht. Durch die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals kann die Distanz eruiert werden.

#### Methodik der Laufzeitmessung

Das als Startpuls bezeichnete emittierte kurze elektromagnetische Wellenpaket breitet sich mit der Geschwindigkeit  $c$  durch die Atmosphäre aus, wird an einem beliebigen Zielobjekt reflektiert und als Stoppuls im Empfänger detektiert. Die zeitliche Differenz  $\Delta t$  zwischen der Emittierung des Pulses im Sender (zum Zeitpunkt  $t_1$ ) und dessen Detektion im Empfänger (zum Zeitpunkt  $t_2$ ) ist direkt proportional zur Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ . Der Proportionalitätsfaktor ergibt sich auf Grund der doppelten Distanz  $D$ , die das Signal auf dem Hin- und Rückweg zurücklegt, aus  $\frac{2 \cdot D}{c}$  (Gleichung 2.12)[Witte und Schmidt, 2006, Seite 309].

$$(t_2 - t_1) = \Delta t = \frac{2 \cdot D}{c} \quad (2.12)$$

Durch Umformung der Gleichung 2.12 kann der gesuchte Parameter  $D$  in Abhängigkeit von der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der gemessenen Größe  $\Delta t$  ausgedrückt werden (Gleichung 2.13).

$$D = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.13)$$

Das Verfahren der Laufzeitmessung ist in Abbildung 2.5 dargestellt und stellt das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten schematisch dar.

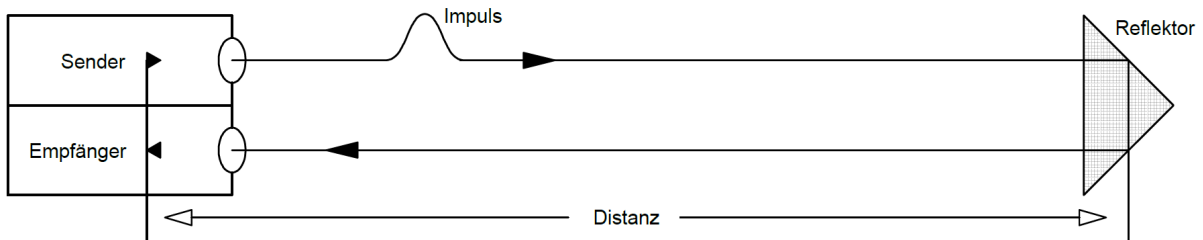


Abbildung 2.5: Das Messprinzip der Laufzeitmessung (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 18])

### Messung der Laufzeit

Die Messpräzision, mit der die Distanz bei der Laufzeitmessung bestimmt werden kann (siehe Tabelle 2.5), ist primär von der Zeitmessung abhängig.

Tabelle 2.5: Die Messpräzision der Laufzeitmessung moderner Totalstationen; Angaben entnommen aus: [Topcon, 2009, Seite 158],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007]

Totalstation		Messpräzision
Hersteller	Modell	
Topcon	IS 301	2 mm + 2 ppm
Trimble	S6 DR Plus	1 mm + 2 ppm
Trimble	S6 DR 300+	3 mm + 2 ppm

Das in Gleichung 2.14 dargestellte Resultat einer Varianzfortpflanzung beweist, dass für eine auf  $\sigma_D = 1.5$  mm präzise Distanzmessung die Zeitdifferenz auf  $\sigma_{\Delta t} = 1 \cdot 10^{-11}$  s präzise erfasst werden muss, wenn die Annahme getroffen wird, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  näherungsweise der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  entspricht und diese fehlerfrei bekannt ist [Joeckel et al., 2008, Seite 19].

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{2 \cdot \sigma_D}{c} = \frac{2 \cdot 0.0015 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}} = 0.01 \text{ ns} \quad (2.14)$$

Im Gegensatz zu anderen Verfahren (z.B. GNSS (Global Navigation Satellite System)) bilden, wie in Abbildung 2.5 ersichtlich, der zur Signalgenerierung benötigte Sender und der zur Signaldetektion benötigte Empfänger eine gemeinsame Einheit, wodurch eine gemeinsame Uhr (Zählvorrichtung) in Verwendung ist. Dadurch bezieht sich die Laufzeitmessung  $\Delta t$  auf einen einheitlichen Referenzzeitpunkt, und Uhrenfehler verfälschen die Zeitnehmung nicht.

Die Messung der Laufzeit erfolgt durch eine elektronische Zählvorrichtung und kann sowohl digital als auch analog-digital erfolgen. Bei beiden Verfahren wird beim Aussenden des Pulses ein Teil desselben Pulses auf die Empfangseinheit gelenkt, wodurch die

Zählvorrichtung zu zählen beginnt und erst bei erneuter Ankunft des tatsächlichen Pulses im Empfänger den Zählvorgang stoppt. Beim Zählvorgang wird die Anzahl der Takte einer Oszillatorfrequenz gezählt (siehe Abbildung 2.6).

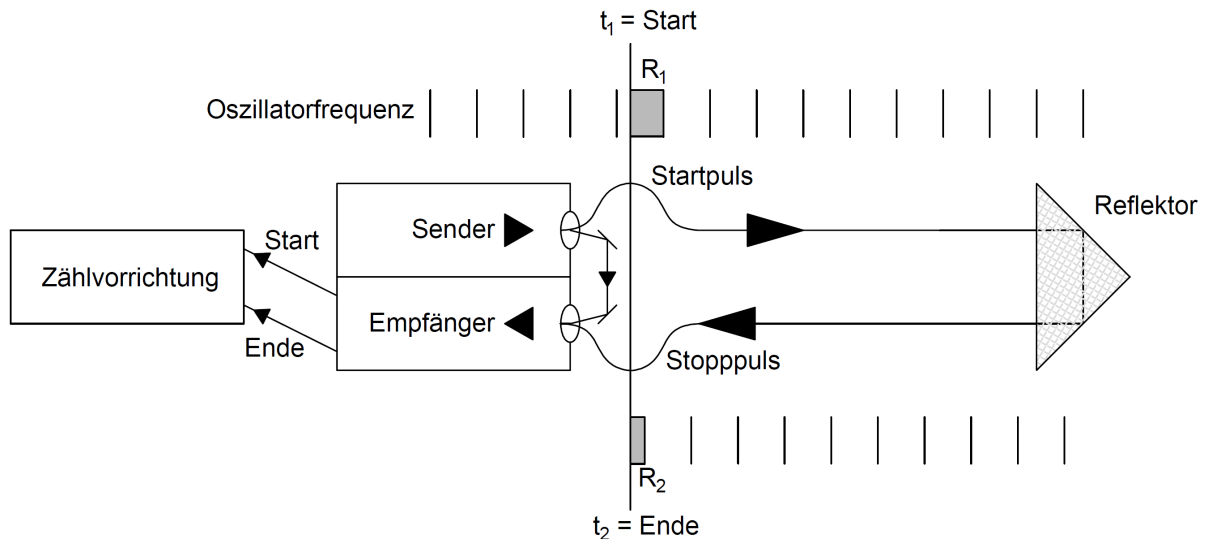


Abbildung 2.6: Eine Zählvorrichtung misst die Anzahl der Takte, die zwischen der Aussendung des Signals und dessen Empfang auftreten (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 20]).

Die digitale Implementierung unterscheidet sich von der analogen dadurch, dass die Oszillatorfrequenz mit  $\approx 300\text{MHz}$  um das 20-fache höher ist und deswegen bei einer Einzelmessung eine Präzision im Submeter-Bereich erfolgen kann. Demgegenüber erfolgt bei der analogen Zählweise zusätzlich eine Bestimmung der Restabweichungen (in Abbildung 2.6 als  $R_1$  und  $R_2$  deklariert), da ansonsten die hohen Genauigkeitsanforderungen der Distanzmessung nicht realisiert werden könnten. Die Restabweichungen werden mittels eines Zeit-Spannungswandlers bestimmt, um durch höchstpräzise Messung einer Spannungsdifferenz auf die Zeitdifferenz schließen zu können [Joeckel et al., 2008, Seite 20,21].

Neben den genannten Verfahren ist es auch möglich, die Laufzeitmessung mittels des Verfahrens der Chirp-Modulation zu bestimmen [Joeckel et al., 2008, Seite 22].

### Laserimpuls

Das bei der Laufzeitmessung verwendete Messsignal ist der Impuls einer elektromagnetischen Welle aus dem nahen Infrarotbereich mit einer Wellenlänge  $> 780\text{nm}$  (siehe Tabelle 2.1 und Abbildung 2.3). Somit ist dieses Messsignal für das menschliche Auge nicht erfassbar [Lienhart et al., 2014].

Der Laserimpuls ist nur sehr kurz, sodass eine möglichst hohe Messfrequenz erreicht

werden kann. Beispielsweise verwendet die DR(Direct Reflex) Plus-Technologie von Trimble einen Laserimpuls von 4 ns (entspricht einer Pulsweite von  $\approx 1.2$  m, Gleichung 2.5) mit einer Wellenlänge von 850 nm [Stempfhuber, 2009]. Pro Sekunde werden 20000 Laserimpulse erzeugt und analysiert [Höglund und Large, 2005]. Die Analyse basiert auf der SHI(Sample and Hold Integrate)-Methode, bei der mittels 2 Kanälen alle 200 ps ein Teil des Referenzimpulses erfasst wird [Göring et al., 2011]. In weiterer Folge werden die anfänglichen 20000 Impulse zu 1000 Impulsen analog downgesampelt. Schlussendlich erfolgt nach der Analog/Digital Konvertierung ein digitales Downsampling auf 20 Hz [Stempfhuber, 2009]. Diese Mittelwertbildung auf nur mehr 20 Messsignale pro Sekunde dient der Präzisionssteigerung (siehe Gleichung 2.15).

$$\sigma_M = \frac{\sigma_E}{\sqrt{q}} \quad (2.15)$$

mit  $\sigma_M$  ... Messpräzision der gemittelten Distanz  
 $\sigma_E$  ... Messpräzision der Einzelmessung  
 $q$  ... Anzahl der Einzelmessungen

Des Weiteren ist es durch die Verwendung von zwei Kanälen möglich, eine interne EDM-Kalibrierung ohne Messlücken durchzuführen (siehe Abbildungen 2.9 und 2.10). Während ein Kanal zur Messung verwendet wird, kann der zweite Kanal für die EDM-Kalibrierung genutzt werden [Stempfhuber, 2009]. Dies dient einer präziseren Messung, hat allerdings den Nachteil einer längeren Messzeit. Abhängig von der eingestellten Messpräzision am Instrument (über Softwareeinstellung regelbar [Trimble, 2010c, Seite 100]) wird die Aufgabe der Kanäle verteilt.

### 2.2.2 Phasenvergleichsmessung

Bei der Phasenvergleichsmessung (Phasenvergleichsverfahren) wird das Messsignal hinsichtlich seiner Phasenlage analysiert. Im Allgemeinen besteht zwischen der ausgesendeten und der reflektierten elektromagnetischen Welle eine Phasenverschiebung. Mit Hilfe der Frequenz und der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann die Phasenverschiebung in ein metrisches Maß umgerechnet werden. Zu dieser Restdistanz muss allerdings noch die Anzahl ganzer Wellenlängen addiert werden, um die gesuchte Distanz zu erhalten.



### Methodik der Phasenvergleichsmessung

Die Phasenvergleichsmessung verwendet als Messsignal eine kontinuierliche, amplitudenmodulierte elektromagnetische Welle. Bei der Amplitudenmodulation (AM) werden gemäß der Namensgebung die Amplituden einer kontinuierlichen Welle periodisch moduliert. Dazu wird eine langwellige Messwelle mit einer kurzwelligen Trägerwelle kombiniert (siehe Abbildung 2.7)[Witte und Schmidt, 2006, Seite 311]. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass das langwellige Messsignal auf Grund der kurzwelligen Trägerwelle deren Eigenschaften übernimmt und somit in einem für die Atmosphäre gut durchdringbaren Fenster liegt [Joeckel et al., 2008, Seite 9].

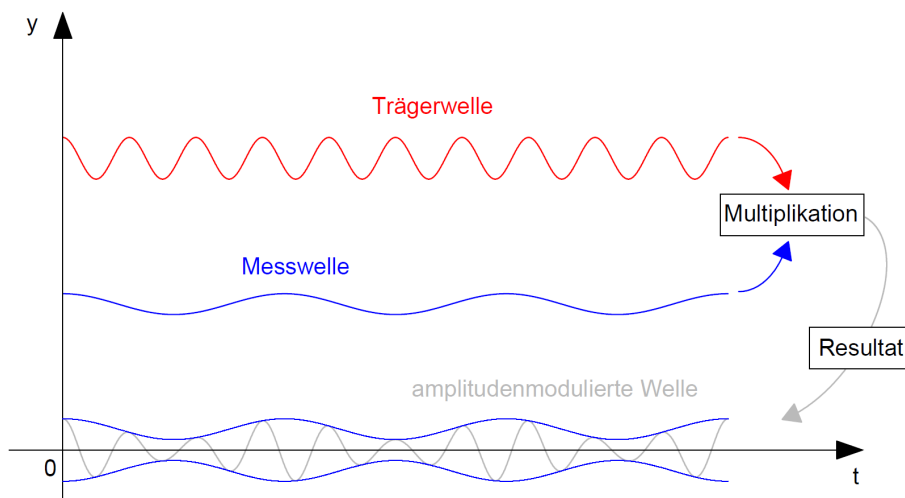


Abbildung 2.7: Darstellung einer amplitudenmodulierten Welle im Zeitbereich (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 9])

Neben der Amplitudenmodulation sind auch die Phasenmodulation (PM) und die Frequenzmodulation (FM) probate Mittel, um die Form einer elektromagnetischen Welle zu ändern. Allerdings ist auf dem Gebiet der elektrooptischen Distanzmessung die Amplitudenmodulation die gängigste Methode, um elektromagnetische Wellen zu modulieren, wenngleich auch andere Verfahren eingesetzt werden. Als Beispiel sei hier die Chirp-Modulation genannt, welche eine spezielle Methodik der Frequenzmodulation ist [Joeckel et al., 2008, Seiten 9-14].

Analog zur Laufzeitmessung wird auch bei der Phasenvergleichsmessung das elektromagnetische Signal von einem Sender abgesandt, an einem beliebigen Zielobjekt reflektiert und dann wieder im Empfänger des Instruments detektiert. Jedoch wird nun nicht die Laufzeit eines Impulses gemessen, sondern die Phasenverschiebung einer kontinuierlichen Welle zwischen deren Aussendung und deren Ankunft. Die Abbildung 2.8 stellt das Prinzip der Phasenvergleichsmessung dar und verdeutlicht, dass auch bei dieser Methodik das Messsignal die doppelte Distanz durchläuft.

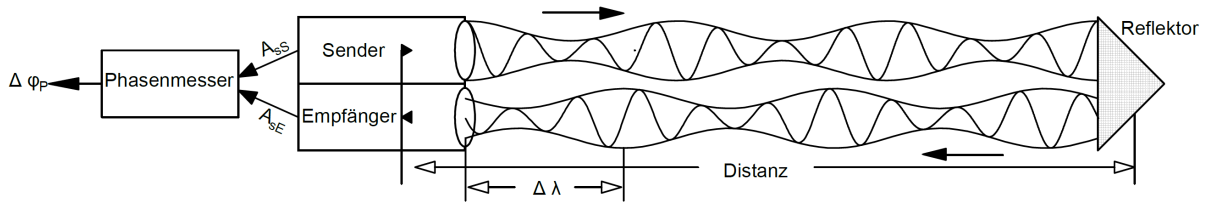


Abbildung 2.8: Das Messprinzip der Phasenvergleichsmessung (nach [Joeckel et al., 2008, Seite 38],[Witte und Schmidt, 2006, Seite 313])

Zwischen der gesuchten Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda$  und der gemessenen Phasendifferenz  $\Delta\varphi_P$  besteht ein sehr einfacher physikalischer Zusammenhang, der in Gleichung 2.16 gezeigt wird und aus Abbildung 2.1 hervorgeht.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\varphi_P}{2\pi} \cdot \lambda \quad (2.16)$$

Aus Abbildung 2.8 ist ersichtlich, dass neben dem Phasenreststück  $\Delta\varphi_P$  auch noch die ganzzahlige Anzahl an Wellenlängen  $N$  (Ambiguitätenproblem, Mehrdeutigkeitsproblem) berücksichtigt werden muss, um die gesuchte Distanz zu eruiieren. Der für die Phasenvergleichsmessung funktionale Zusammenhang zwischen den gesuchten und den gemessenen Größen ist in Gleichung 2.17 dargelegt [Joeckel et al., 2008, Seite 38].

$$D = \frac{\Delta\lambda}{2} + N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.17)$$

Vergleicht man die Abbildung 2.8 und die Gleichung 2.17, so kann festgestellt werden, dass die in der Gleichung 2.17 vorkommenden gesuchten Größen  $\Delta\lambda$  und  $N$  nicht sofort als Ergebnis des Phasennessers resultieren. Der Phasennmesser bildet das mechanische Kernelement bei der Distanzmessung mittels Phasenvergleichsmessung. Dieses Messinstrument berechnet aus der Amplitude zum Sendezeitpunkt (in Abbildung 2.8 als  $A_{sS}$  bezeichnet) und zum Empfangszeitpunkt (in Abbildung 2.8 als  $A_{sE}$  bezeichnet) die Phasenverschiebung  $\Delta\varphi_P$ , mit derer Hilfe unter Berücksichtigung der Gleichung 2.16 die Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda$  berechnet werden kann. Jedoch ist der Phasennmesser nicht in der Lage, das Ambiguitätenproblem zu lösen.

### Ambiguitätenproblem

Aus der Abbildung 2.8 geht hervor, dass bei einer Wellenlänge  $\lambda$  größer als die doppelte zu messende Distanz keine Mehrdeutigkeit ganzer Wellen auftritt. Ist dies der Fall, vereinfacht sich die Gleichung 2.17, sodass der Anteil ganzzahliger Wellenlängen  $N$  entfällt.

Somit ist eine Lösungsmöglichkeit gefunden, mit der das Ambiguitätenproblem gelöst und die Distanz eindeutig berechnet werden kann. Es werden zwei verschiedene Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  emittiert und miteinander kombiniert. Dabei wird der als Grobmaßstab bezeichnete niederfrequente elektromagnetische Signalanteil ( $\Delta\lambda_2$ ) für die Bestimmung der ganzzahligen Wellen  $N$  verwendet (siehe Gleichung 2.18), während der hochfrequente Signalanteil einer zweiten elektromagnetischen Welle  $\Delta\lambda_1$  (Feinmaßstab) der präzisen Bestimmung der Phasendifferenz  $\Delta\varphi_P$  dient (siehe Gleichung 2.19). Für die Totalstation Focus 30 von Spectra Precision wird der Feinmaßstab von einer elektromagnetischen Welle mit einer Frequenz von 400 MHz ( $\lambda \approx 375$  mm) abgeleitet [Donath et al., 2011, Seite 352]. Die Lösung des Ambiguitätenproblems setzt sich somit aus mindestens zwei Differenzmessungen unterschiedlicher Wellen zusammen und ist in Gleichung 2.20 mathematisch definiert [Joeckel et al., 2008, Seite 39].

$$2 \cdot D \approx \Delta\lambda_2 \quad (2.18)$$

$$2 \cdot D = N \cdot \lambda_1 + \Delta\lambda_1 \quad (2.19)$$

$$N \approx \frac{\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1}{\lambda_1} \quad (2.20)$$

Diese Lösungsmethode liefert nur eine Näherungslösung (siehe Gleichung 2.20), weswegen der resultierende Zahlenwert auf die nächste Ganzzahl gerundet werden muss.

Eine andere als die beschriebene traditionelle Mehrdeutigkeitslösung wird beispielsweise bei den Totalstationen von Trimble eingesetzt. Das auf dem Differenzenprinzip basierende Verfahren löst das Ambiguitätenproblem bei der Phasenvergleichsmessung durch Differenzbildung mehrerer Wellenlängen [Göring et al., 2011].

### Einflussfaktoren bei der Phasenvergleichsmessung

Neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ , welche auch bei der Laufzeitmessung fundamental ist, ist vor allem die Frequenz  $f$  und somit die Wellenlänge  $\lambda$  der elektromagnetischen Welle eine entscheidende Kenngröße bei der Phasenvergleichsmessung.

Die Messpräzision ist vor allem davon abhängig, wie genau der Phasenmesser die Phasenverschiebung  $\Delta\varphi_P$  erfassen kann. Dem Stand der Technik entsprechenden Phasenmessern ist es möglich, die Phase  $\varphi_P$  auf ungefähr 1/5000 bis 1/10000 der Wellenlänge  $\lambda$  zu bestimmen [Joeckel et al., 2008, Seite 39]. Moderne Totalstationen, deren Distanzmessung auf dem Prinzip der Phasenvergleichsmessung beruht, verwenden für die Feinmaßstabswelle eine Wellenlänge  $\lambda$  von einigen Dezimetern [Donath et al., 2011, Seite 352],[Göring et al., 2011]. Infolgedessen ist unter Verwendung bester Phasenmesser eine Auflösung der Streckenmessung von einigen hundertstel Millimetern möglich. Die Ausgabe des Distanzmesswertes am Instrumentenbildschirm erfolgt häufig bis zum Zehntelmillimeter [Leica Geosystems, 2010].

Die Tabelle 2.6 zeigt die hohe Messpräzision von modernen Totalstationen basierend auf der Phasenvergleichsmessung. Unter besten Bedingungen ist eine Messpräzision  $< 1$  mm erzielbar.

Tabelle 2.6: Spezifizierte Messpräzision der Phasenvergleichsmessung moderner Totalstationen; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 52],[Leica Geosystems, 2011, Seite 159],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2012b, Seite 160],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2013b]

Totalstation		Messpräzision				
Hersteller	Modell					
Leica Geosystems	TM50	0.6	mm	+	1	ppm
Leica Geosystems	TS50	0.6	mm	+	1.5	ppm
Leica Geosystems	TS15	1	mm	+	1.5	ppm
Sokkia	SX 101T	1.5	mm	+	2	ppm
Spectra Precision	Focus 30	2	mm	+	2	ppm
Topcon	PS 101	1.5	mm	+	2	ppm
Trimble	S3	1.5	mm	+	2	ppm
Trimble	S8 High Precision	0.8	mm	+	1	ppm

### System Analyser

Dieses für die Distanzmessung verwendete Verfahren basiert auf der Phasenvergleichsmessung und wurde von Leica Geosystems entwickelt, sodass mit Ausnahme der Leica MS50

alle modernen Totalstationen des Herstellers diese Technologie für die Distanzmessung verwenden.

Gemäß der Phasenvergleichsmessung werden eine Vielzahl von Maßstabswellen ausgesendet, wobei die Anzahl der Wellen vom reflektierten Signal abhängig ist. Dabei gilt, dass nur hochfrequente Wellen verwendet werden und für schwach reflektierende Objekte die Anzahl an emittierten Wellen höher ist. Darüberhinaus wird auch die Form des eintreffenden Signals analysiert, sodass das Intensitätsmaximum ebenfalls einen Beitrag zur Distanzmessung leistet [Bayoud, 2006a].

Dem Vorteil der Nutzung von nur einer Strahlungsquelle für alle Distanzmesst Modi steht der Nachteil gegenüber, dass durch Verwendung eines Revolverrads Messlücken von ca. 700 ms entstehen. Diese treten auf Grund der internen EDM-Kalibrierung in einem regelmäßigen Abstand von  $\approx 10$ s auf [Stempfhuber und Kirschner, 2008]. Das Revolverrad ist im Strahlengang der EDM-Sensorik installiert und kann drei unterschiedliche Positionen einnehmen [Bayoud, 2006a]:

### 1) Position für die Kalibrierung

Diese Stellung reflektiert den Messstrahl innerhalb der Totalstation, sodass über die bekannte Soll-Distanz eine Kalibrierung getätigt werden kann.

### 2) Position für die Messung zu einem Prisma

Das EDM-Signal wird mittels einer Linse negativ fokussiert um dadurch die Querschnittsfläche des Messstrahls zu vergrößern und diese auf die Reflektionsfläche des Prismas anzupassen.

### 3) Position für die reflektorlose Messung

Das Revolverrad nimmt eine neutrale Stellung ein und lässt das EDM-Signal ungehindert passieren.

Die Abbildungen 2.9 und 2.10 zeigen die Zeitdifferenzen, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Distanzmessungen auftreten. Hierfür wurde der jeweilige kinematische Messmodus mit den Standardeinstellungen verwendet und ein Rundprisma für die Dauer von 5 Minuten gemessen. Es bewahrheitet sich, dass beim System Analyser des TS15 von Leica Geosystems Messlücken festzustellen sind. Zwar sind auch beim WFD des MS50 von Leica Geosystems Unregelmäßigkeiten vorhanden, doch kann dies nicht als eine Kalibrierung des EDM-Sensors interpretiert werden, stattdessen wechselt die Frequenz andauernd zwischen  $\approx 8$  Hz,  $\approx 12$  Hz und  $\approx 20$  Hz. Die Totalstationen S6 DR 300+ und S8 HP von Trimble weisen eine konstante Messfrequenz auf, die in Abbildung 2.10 erkennbaren zeitlichen Schwankungen sind auf ein numerisches Problem, bedingt durch das Auslesen der Systemzeit, zurückzuführen.

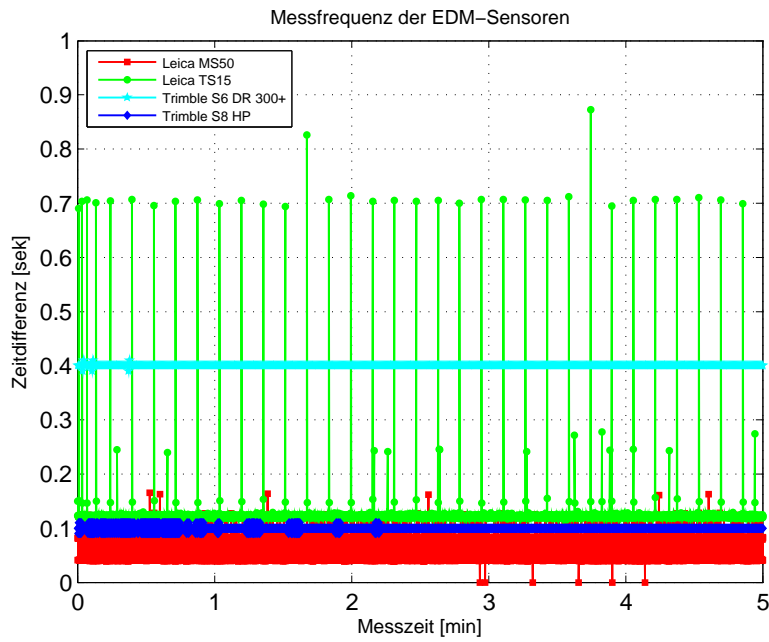


Abbildung 2.9: Die Messfrequenz moderner Totalstationen für eine 300-sekündige Messdauer

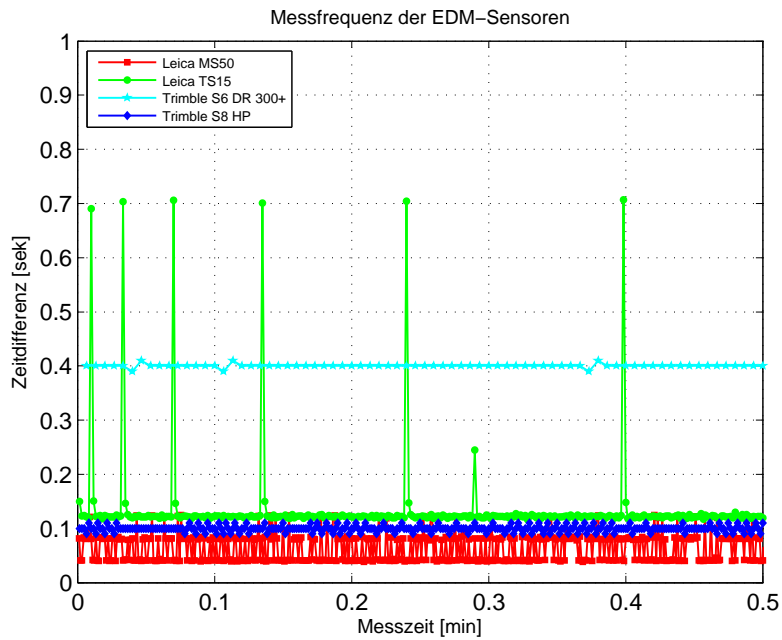


Abbildung 2.10: Die Messfrequenz moderner Totalstationen für eine 30-sekündige Messdauer

Die durchschnittlichen Messfrequenzen der EDM-Sensoren der oben genannten Totalstationen sind der Tabelle 2.7 zu entnehmen. Die Messdaten für die Berechnung der Messfrequenz der Leica MS50 entstammen der Masterarbeit [Grick, 2015].

Tabelle 2.7: Die durchschnittliche Messfrequenz moderner Totalstationen

Totalstation		Messprinzip	Messfrequenz [Hz]
Hersteller	Modell		
Leica Geosystems	MS50	Wave Form Digitizer	≈ 15
Leica Geosystems	TS15	Phasenvergleichsmessung	≈ 8
Trimble	S6 DR 300+	Laufzeitmessung	≈ 2.5
Trimble	S8 HP	Phasenvergleichsmessung	≈ 10

Obwohl dieses Messverfahren auf der Phasenvergleichsmessung beruht, so sind doch auch Merkmale der Laufzeitmessung vorhanden. Auf Grund dessen kann diese EDM-Technologie als eine Mischform aus Laufzeitmessung und Phasenvergleichsmessung betrachtet werden. Nichtsdestotrotz ist diese Technologie dem Messprinzip der Phasenvergleichsmessung unterstellt [Bayoud, 2006a],[Leica Geosystems, 2011, Seite 160].

### 2.2.3 Wave Form Digitizer

Die Distanzmessung mit Hilfe des Wave Form Digitizers (WFD) basiert auf der Erfassung der Laufzeit, die zwischen der Emittierung und dem Empfang hochfrequenter Pulse entsteht. Die komplexe Signalverarbeitung des Start- und Stoppulses stellt besonders hohe technische Ansprüche an dieses Messverfahren, ermöglicht jedoch ein außerordentlich vielseitiges Messprinzip, um Distanzen je nach Anforderungskriterium ideal zu messen. Die Technologie des Wave Form Digitizers weist Merkmale beider zuvor genannten Messprinzipien auf und kann als eine optimale Kombination dieser aufgefasst werden. Die elektrooptische Distanzmessung, basierend auf dem Prinzip des WFD, wird zurzeit im Segment der Totalstationen einzig und allein in der MultiStation MS50 von Leica Geosystems eingesetzt.

#### Methodik des WFD

Das grundlegende Funktionsprinzip des WFD deckt sich in vielerlei Hinsicht mit dem Messprinzip der Laufzeitmessung: Ein Sender emittiert ein Signal, dieses wird am Zielobjekt reflektiert und im Empfänger detektiert. Durch die Messung der Laufzeit zwischen Aussendung und Empfang kann durch Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit die Distanz eruiert werden (siehe Abbildungen 2.11 und 2.12).

Bei der Emittierung des Signals wird ein geringer Teil desselben Signals über einen Referenzweg direkt auf die Empfangsfläche gelenkt und dort als Startpuls interpretiert (siehe Abbildung 2.11, rote Linie). Dieser Referenzimpuls kann zur Distanzevaluierung sowie zur Kalibrierung verwendet werden, da sämtliche Störeinflüsse im Referenzweg eliminiert sind [Stutz et al., 2011, Seite 3]. Der verbliebene energiereichere Signalanteil verlässt das Instrument, wird am Zielobjekt reflektiert und als Stopppuls im Empfänger detektiert. Beide Lichtpulse werden im Empfänger in ein elektrisches Signal umgewandelt, verstärkt und anschließend in ein digitales Signal konvertiert [Stutz et al., 2011, Seite 3].

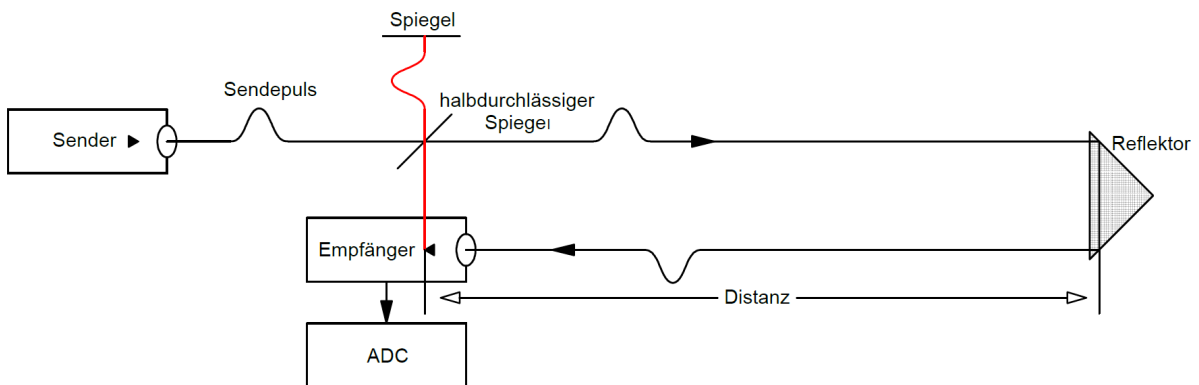


Abbildung 2.11: Das Messprinzip des Wave Form Digitizers (nach [Maar und Zogg, 2014])

Die Analog/Digital-Konvertierung (in Abbildung 2.11 mit ADC bezeichnet) erfolgt im Falle der MS50 von Leica Geosystems mit einer Abtastrate von 500 MHz und ermöglicht dadurch die digitale Repräsentation des Pulses in Form einer Welle, wodurch die Namensgebung dieses Distanzmessprinzips zu erklären ist (siehe Abbildung 2.12) [Stutz et al., 2011, Seite 3],[Hardegen, 2014].

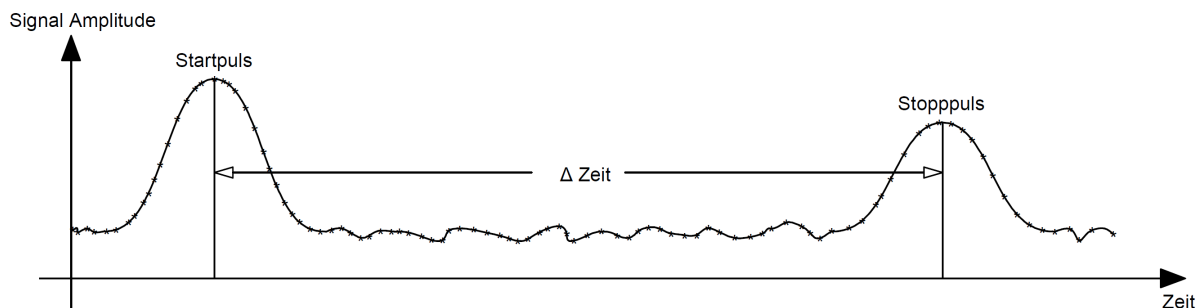


Abbildung 2.12: Das Signal wird hochfrequent abgetastet (dargestellt als \*) (nach [Maar und Zogg, 2014])

Im Gegensatz zur klassischen Laufzeitmessung wird das Messsignal kontinuierlich ausgesendet, sodass bei der MS50 von Leica Geosystems pro Sekunde bis zu 2 Millionen Pulse ausgesendet werden [Maar und Zogg, 2014]. Im Vergleich zur Laufzeitmessung entspricht dies



einer um das 100-Fache höheren Sendefrequenz (siehe Kapitel 2.2.1). Diese hohe Wiederholungsrate führt zwangsläufig zur Problematik der eindeutigen Distanzbestimmung, weshalb analog zur Phasenvergleichsmessung das Ambiguitätenproblem gelöst werden muss.

### Signal-Rausch-Verhältnis

Die Präzision des WFD ist unter anderem von der Genauigkeit, wie exakt die Peaks der Pulse erfasst werden können, abhängig. Um die Pulse möglichst gut zu detektieren, muss das Signal vom Rauschen gut separierbar sein. Das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal to Noise Ratio=SNR) gibt dabei das Verhältnis zwischen dem Signal (S) und dem Rauschen (R) an (Gleichung 2.21).

$$SNR = \frac{S}{R} \quad (2.21)$$

Eine Option, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, ist durch die Möglichkeit der Akkumulation von Messungen gegeben. Dieses mathematische Verfahren wird beim WFD angewendet, da einerseits eine ausreichend hohe Anzahl von Messungen, basierend auf der hohen Wiederholungsrate, gewährleistet ist und andererseits das Signal-Rausch-Verhältnis um einen signifikanten Faktor verbessert werden kann (Gleichung 2.22) [Stutz et al., 2011, Seite 5].

$$SNR_{akk} = \sqrt{q} \cdot SNR_{einzel} \quad (2.22)$$

mit  $SNR_{akk}$  ... Signal-Rausch-Verhältnis des akkumulierten Signals  
 $SNR_{einzel}$  ... Signal-Rausch-Verhältnis eines einzelnen Signals  
 $q$  ... Anzahl der Einzelmessungen

Die in Abbildung 2.13 dargestellte Graphik stellt einen Vergleich zwischen einer Einzelmessung (10 Pulse mit je 0.1 nJ und einer Wiederholungsrate von 10 MHz, siehe Abbildung 2.13a) und einem akkumulierten Signal (siehe Abbildung 2.13b) dar und verifiziert das um den Faktor  $\sqrt{q}$  bessere Signal-Rausch-Verhältnis durch Akkumulation.

Demnach ist das Signal-Rausch-Verhältnis so wie die Signalstärke konfigurierbar und erlaubt durch Akkumulation von Signalen die Modellierung eines der Anwendung entsprechenden Signals. In Funktion der Zeit bzw. der Anzahl der für die Akkumulation verwendeten Einzelmessungen kann die Signalstärke angepasst werden, sodass bedingt durch große Reichweiten

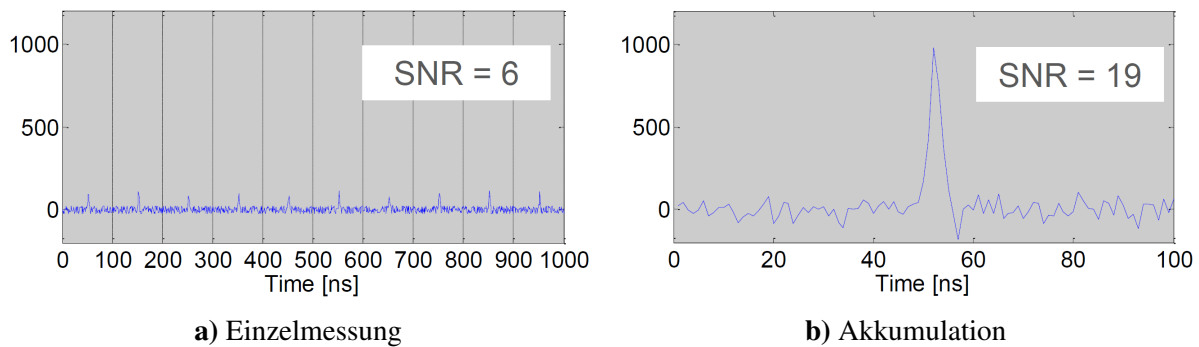


Abbildung 2.13: Darstellung des SNR für eine Einzelmessung (2.13a) und für ein akkumuliertes Signal (2.13b) (aus [Hardegen, 2014]).

die schwach reflektierenden Signale über einen längeren Zeitraum akkumuliert werden und zur Ermittlung der Distanz benutzt werden können [Stutz et al., 2011, Seite 4],[Maar und Zogg, 2014]. Im Gegensatz dazu resultieren aus kurzen Distanzen stark reflektierende Signale und die Akkumulation muss nur über einen sehr kurzen Zeitraum durchgeführt werden.

### Laserimpuls

Die Qualität der Distanzmessungen mittels WFD wird zusätzlich von den Eigenschaften des Laserimpulses bestimmt, welche nach [Maar und Zogg, 2014] die folgenden sind:

- Sendeleistung
- Pulsbreite  $T_{On}$
- Wiederholungsrate  $T_{Rep}$

Das Verhältnis der Pulsbreite und der Wiederholungsrate ergibt das Tastverhältnis des Lasers (Gleichung 2.23) [Hardegen, 2014].

$$\text{Tastverhältnis} = \frac{T_{On}}{T_{Rep}} \quad (2.23)$$

Eine geringe Pulsbreite erlaubt eine genaue Bestimmung des Wellenpeaks und ist somit ein signifikanter Parameter für eine exakte Messung. Zusätzlich wird durch eine niedrige Wiederholungsrate die Sensibilität gesteigert [Maar und Zogg, 2014]. Resultierend aus den zuvor

gennanten Gründen ist ein kleines Tastverhältnis optimal, welches bei der MultiStation MS50 von Leica Geosystems mit 0.2% um das 50-Fache kleiner ist als bei der Totalstation Leica TS15, deren Distanzmessung auf dem Prinzip der Phasenvergleichsmessung beruht [Hardegen, 2014].

### Ambiguitätenproblem

Aus der hohen Wiederholungsrate von bis zu 2 MHz bei der MS50 von Leica Geosystems resultiert ein Eindeutigkeitsbereich von  $\approx 75$  m, dieser wäre somit ungeeignet für eine Vielzahl von Anwendungen [Hardegen, 2014]. Bei einer Messung von Distanzen  $> 75$  m würde ein weiterer Startpuls emittiert werden, noch bevor der Stopppuls der ersten Messung detektiert werden würde. Die Abbildung 2.14a zeigt, dass bei einer Wiederholungsrate  $T_{Rep} = 100$  ns ( $\hat{=} 10$  MHz) ein nach 160 ns nach der Aussendung des Startpulses detektierter Stopppuls mehrdeutig ist. Es kann die gesuchte Distanz nicht eindeutig gelöst werden, multiple Ergebnisse (60 ns, 160 ns, 260 ns, u.s.w.) resultieren daraus (siehe Abbildung 2.14b).

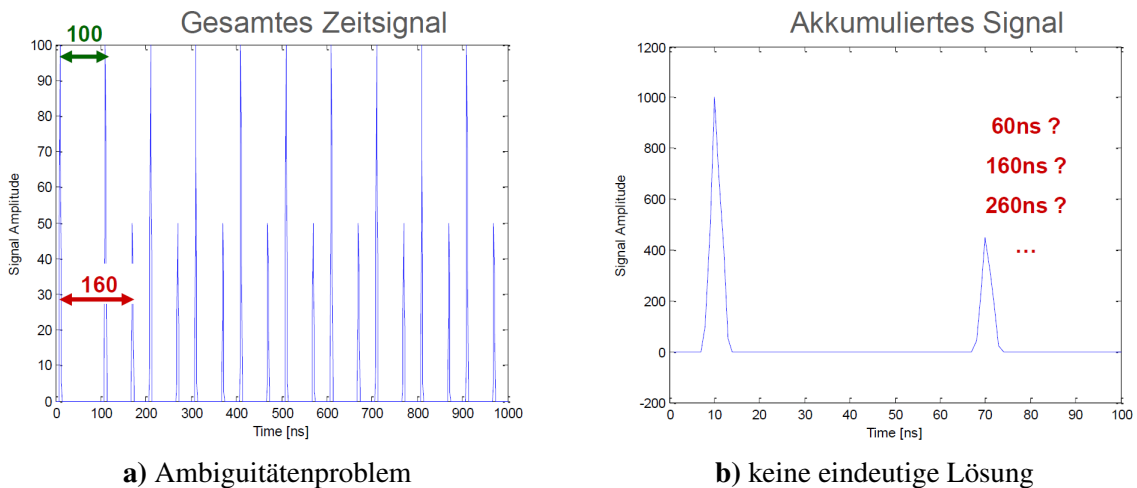


Abbildung 2.14: Ambiguitätenproblem bei der Distanzmessung mittels WFD (aus [Hardegen, 2014])

Die Lösung des Ambiguitätenproblems folgt demselben Lösungsansatz wie bei der Phasenvergleichsmessung (siehe Kapitel 2.2.2). Der Unterschied besteht darin, dass im Gegensatz zur Phasenvergleichsmessung nicht Signale unterschiedlicher Frequenzen miteinander kombiniert werden, sondern Signale mit variierender Wiederholungsrate.

Das in Abbildung 2.15 demonstrierte Fallbeispiel verdeutlicht den Lösungsansatz zur Bestimmung der Ambiguitäten beim Messprinzip des WFD: Die linke obere Graphik stellt die Zeitreihe einer WFD-Messung dar, deren Sendeeinheit Pulse mit einer Frequenz von  $T_{Rep} \approx 10\text{MHz}$  emittiert. Die darunterliegende Abbildung entspricht der oberen, jedoch wird nun eine Wiederholungsrate  $T_{Rep} \approx 11\text{MHz}$  verwendet. Die Empfangseinheit detektiert zusätzlich zu den Startpulsen auch Stopppulse, welche 160 ns nach Emittierung des ersten Pulses im Instrument eintreffen. Die rechte Seite der Abbildung 2.15 zeigt das Resultat der jeweiligen Signale nach der Akkumulation. Die Kombination der beiden Ergebnisse und die Kenntnis der Wiederholungsraten ermöglicht die Bestimmung ganzzahliger Unbekannter. Folglich konnte im hier gezeigten Beispiel die unbekannte Anzahl zwischenzeitlich emittierter Startpulse mit 1 eruiert werden.

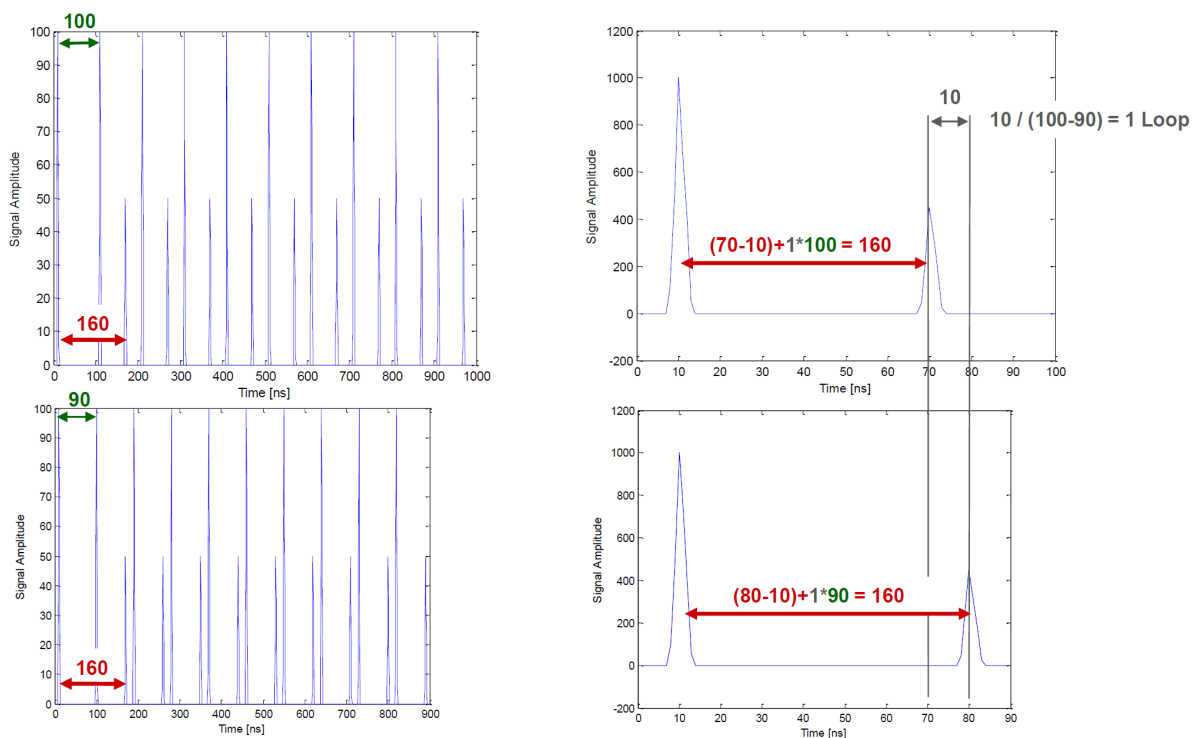


Abbildung 2.15: Lösung des Ambiguitätenproblems durch Kombination von zwei unterschiedlichen Wiederholungsraten (aus [Hardegen, 2014])

## 2.3 Reflektorlose Distanzmessung

Im Gegensatz zur Distanzmessung zu einem Prisma ist die Anforderung an die Messkonfiguration bei der reflektorlosen Distanzmessung deutlich kritischer. Die Erfassung der Distanz auf ein beliebiges Zielobjekt erfordert die Berücksichtigung vieler Faktoren, um die gewünschte

Genauigkeit zu erzielen. Obwohl eine Vielzahl der hier genannten Einflussfaktoren auch bei der Distanzmessung zu einem Prisma auftreten, so sind sie doch vor allem bei der Distanzmessung zu natürlichen Oberflächen potentielle Fehlerquellen. Speziell die unterschiedlichen Absorptions- und Reflexionseigenschaften natürlicher Oberflächen stellen eine zusätzliche Fehlerquelle dar, die ausschließlich die reflektorlose Distanzmessung vehement beeinflussen.

### 2.3.1 Spotgröße des Lasers

Ein sehr wichtiges Merkmal für die elektrooptische Distanzmessung ist die Spotgröße des Lasers. Beim Austritt der elektromagnetischen Welle entsteht auf Grund der Strahldivergenz keine punktförmig gebündelte Strahlung, weshalb das zu messende Ziel nicht punktuell erfasst werden kann. Stattdessen wird das Ziel von einer elliptischen Form abgetastet, deren exakte Größe und Form sowohl distanzabhängig als auch instrumentenpezifisch ist (siehe Abbildungen 2.17, 2.18 und 2.19). Auf Grund des nicht infinitesimal kleinen Messflecks wird nicht die Distanz zu einem Zielpunkt gemessen, vielmehr wird das gesamte Signal des reflektierten Lasers ausgewertet und als Distanz zum Messpunkt interpretiert.

Die Divergenz des Laserstrahls entsteht dadurch, dass die Laserdiode keine exakt punktförmige Strahlungsquelle ist und die Linsen in der Totalstation beim Aussenden des Signals diesen Effekt verstärken können. Der Divergenzwinkel  $\gamma$  bezeichnet dabei das Verhältnis zwischen dem Durchmesser der annähernd punktförmigen Strahlungsquelle und der Brennweite zum Linsensystem [Joeckel et al., 2008, Seite 7]. Die Strahldivergenz kann dabei in Längs- und Querrichtung variieren, wodurch die elliptische Form des Messlasers zu begründen ist [Schäfer, 2011, Seite 365]. Ein Vorhandensein des Divergenzwinkels führt dazu, dass sich die Querschnittsfläche des Lasers (EDM-Spot, Messfleck) mit zunehmender Distanz vergrößert. Als Folge dessen und der konstanten Laserintensität nimmt mit zunehmender Distanz die Intensität pro Flächeneinheit ab, weswegen auch die zum Empfänger reflektierte Energie geringer ausfällt [Joeckel et al., 2008, Seiten 6-8].

Neben der Strahldivergenz und der Messdistanz ist auch der Einfallswinkel entscheidend für die Größe des Laserspots am Objekt. Die Abbildung 2.16 veranschaulicht das Zusammenspiel der zuvor genannten Komponenten und demonstriert deren Auswirkung auf die Querschnittsfläche des Laserspots.

In den Abbildungen 2.18 und 2.19 werden die Spotgrößen verschiedener Totalstationen für unterschiedliche Distanzen dargestellt. Die Angaben beziehen sich auf den reflektorlosen EDM-Spot, die Spotgröße im Prismenmodus kann anders ausfallen. Die Spezifikationen des Laserspots beziehen sich auf den Idealfall einer orthogonalen Distanzmessung auf das Zielobjekt. Folglich ist die hier dargestellte Spotgröße ausschließlich eine Funktion des Strahldivergenzwinkels  $\gamma$  und somit ist ein linearer Funktionsverlauf vorhanden.

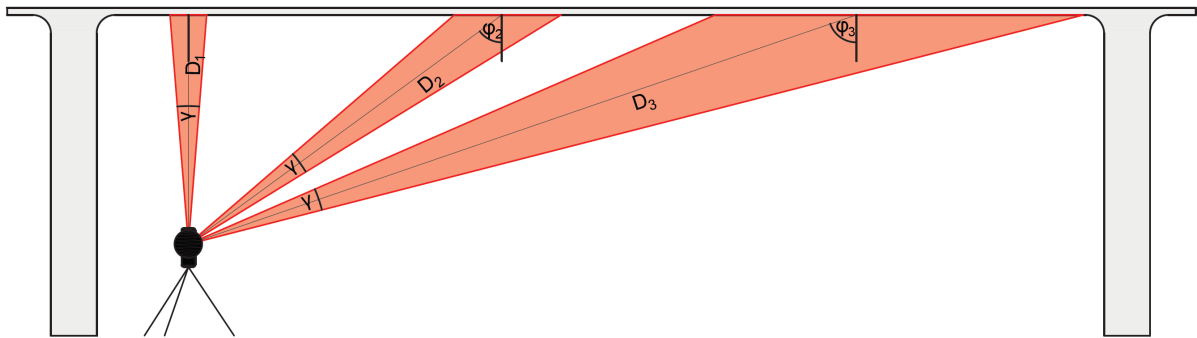


Abbildung 2.16: Der Laserspot variiert mit der Distanz  $D$ , dem Einfallswinkel  $\varphi$  und der Strahldivergenz  $\gamma$  (nach [Schäfer, 2011, Seite 365]).

Des Weiteren wird aus den Abbildungen 2.17, 2.18 und 2.19 ersichtlich, dass die von Trimble verwendete DR(Direct Reflex) Plus-Technologie einen größeren Messfleck in vertikaler Richtung verursacht als die ebenfalls von Trimble eingesetzte HP(High Precision)-Technologie. Dies verifiziert die Tatsache, dass Instrumente, deren Distanzmessung auf der Laufzeitmessung basiert, eine größere Strahldivergenz aufweisen als Instrumente, welche die Phasenvergleichsmessung anwenden [Lienhart et al., 2014],[Höglund und Large, 2005].

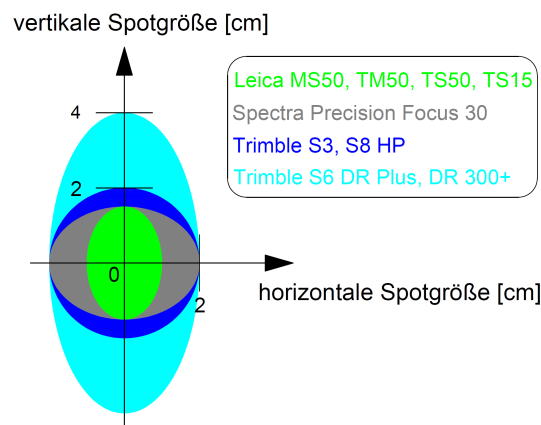


Abbildung 2.17: Die spezifizierte Querschnittsfläche des Laserspots bei einer Distanz von  $D=100\text{m}$ ; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 11],[Leica Geosystems, 2011, Seite 130],[Donath et al., 2011, Seite 352],[Trimble, 2010b, Seite vii],[Trimble, 2010e, Seiten vi,vii],[Trimble, 2007]; k.A. für Sokkia SX 101T, Sokkia DX 201-AC, Topcon IS301, Topcon PS 101

Ein kleiner Messfleck ist insbesondere für die Messung zu Kanten, Ecken und Säulen vorteilhaft. Die Wahrscheinlichkeit von verfälschten Distanzen auf Grund von Mischsignalen ist dadurch äußerst gering (siehe Abschnitt 2.3.4) [Höglund und Large, 2005].

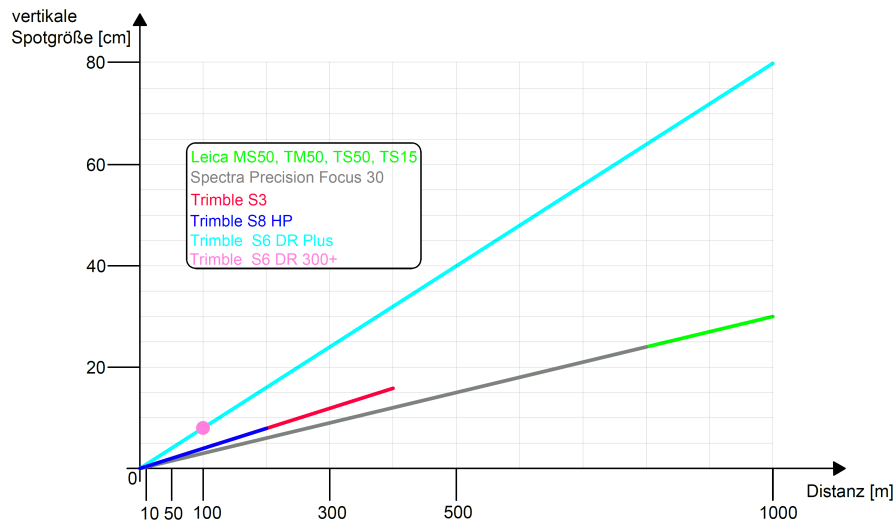


Abbildung 2.18: Die spezifizierete vertikale Ausdehnung des Laserspots in Abhängigkeit von der Distanz; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 11],[Leica Geosystems, 2011, Seite 130],[Donath et al., 2011, Seite 352],[Trimble, 2010b, Seite vii],[Trimble, 2010e, Seiten vi,vii],[Trimble, 2007]; k.A. für Sokkia SX 101T, Sokkia DX 201-AC, Topcon IS301, Topcon PS 101

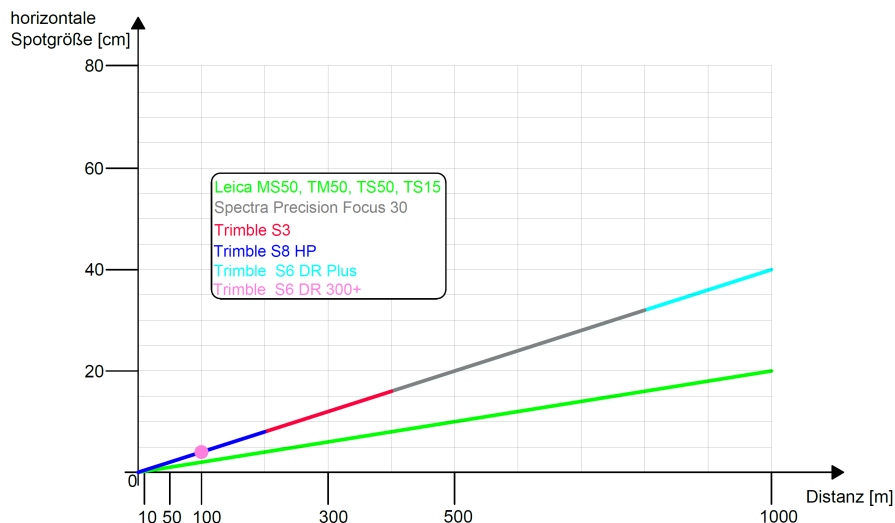


Abbildung 2.19: Die spezifizierete horizontale Ausdehnung des Laserspots in Abhängigkeit von der Distanz; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 11],[Leica Geosystems, 2011, Seite 130],[Donath et al., 2011, Seite 352],[Trimble, 2010b, Seite vii],[Trimble, 2010e, Seiten vi,vii],[Trimble, 2007]; k.A. für Sokkia SX 101T, Sokkia DX 201-AC, Topcon IS301, Topcon PS 101

Ein weiteres Genauigkeitsmerkmal bei der reflektorlosen Distanzmessung ist die Ausrichtung des Laserspots. Zwar sind die zwei Formparameter  $a$  und  $b$  (vertikale und horizontale Ausdehnung) des elliptischen Laserspots für verschiedene Distanzen bekannt, jedoch kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, wie deren Lage gegenüber der Zielachse ist. Ein um den Winkel  $\alpha$  geneigter Laserspot (siehe Abbildung 2.20) und damit einhergehende Asymmetrien sind in bestimmten Messsituationen (z.Bsp. Kantenmessung) potentielle Fehlerquellen und können in Ausnahmefällen durch Zwei-Lagen-Messungen reduziert werden.

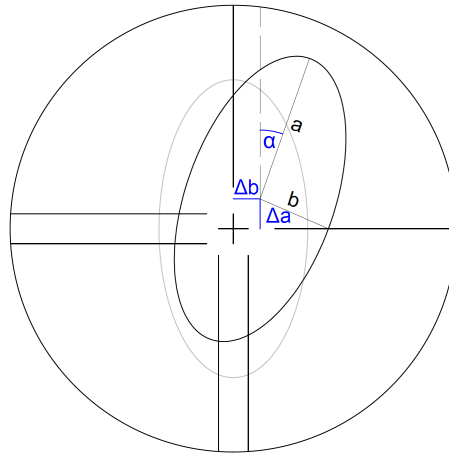


Abbildung 2.20: Der EDM-Spot kann gegenüber dem Fadenkreuz eine Translation ( $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ) und eine Rotation ( $\alpha$ ) aufweisen.

### 2.3.2 Einfallswinkel

Der Einfallswinkel ist nach [Joeckel et al., 2008, Seite 337] und [Schäfer, 2011, Seite 365] definiert als der Winkel zwischen der Zielachse des Instrumentes und der Normalen auf das Zielobjekt (siehe Abbildung 2.16, [Joeckel et al., 2008, Seite 337]) und hat signifikante Einflüsse auf die reflektorlose Distanzmessung. Mit zunehmendem Einfallswinkel entstehen schleifende Schnitte, die das Ergebnis der Distanzmessung in vielerlei Hinsicht beeinflussen.

Das Signal-Rausch-Verhältnis wird bei großem Einfallswinkel sehr klein, da der Großteil der ausgesandten Laserenergie beim Auftreffen am Messobjekt diffus verteilt wird und nur ein sehr kleiner Anteil wieder zum Messinstrument reflektiert wird. Des Weiteren resultieren aus größeren Einfallswinkeln auch größere Messbereiche, sodass die vom eigentlichen Zielobjekt reflektierte Energie nur sehr gering ist [Reda und Bedada, 2012, Seiten 12,13].

Zusätzlich zum schlechten Signal-Rausch-Verhältnis wird die Distanz systematisch verfälscht. Wie in Abbildung 2.16 ersichtlich, ist die Intensitätsverteilung bei einem Einfallswinkel von  $\varphi \neq 0$  gon asymmetrisch, sodass die Bereiche abseits vom zentralen Messstrahl



ein unterschiedliches Intensitätsniveau aufweisen. Folglich ist jener Bereich mit der kleineren Querschnittsfläche energiereicher, weswegen dieser Bereich für die Distanzmessung stärker gewichtet wird und der Bezugspunkt für die Entfernungsmessung dadurch systematisch verkürzt wird [Schäfer, 2011, Seite 365].

### 2.3.3 Reflexionseigenschaften des Zielobjekts

Die hohen technischen Messanforderungen bei der reflektorlosen Distanzmessung sind primär mit den suboptimalen Reflexionseigenschaften beliebiger Zielobjekte zu begründen. Unabhängig vom Messprinzip muss ein ausreichend starkes Signal zum Empfänger gelangen, um daraus die zurückgelegte Distanz zu eruiieren. Das Intensitätsniveau des empfangenen Messsignals ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wobei vor allem Einfallswinkel, Reichweite und Materialeigenschaften des Zielobjekts zu nennen sind. Der Reflexionsgrad einer natürlichen Oberfläche ist unter anderem durch deren Oberflächenstruktur vorgegeben. Insbesondere die Rauheit der Oberfläche ist eine maßgebende Größe für die Reflektivität des Objekts. Eine glatte Oberfläche verursacht hauptsächlich eine direkte Reflexion, während bei einer rauen Struktur eine diffuse Reflexion die Folge ist [Joeckel et al., 2008, Seiten 334,335].

Problematisch sind des Weiteren auch spiegelnde und sehr glatte Flächen bei flach einfallendem Messstrahl. Durch die glatte Oberflächenbeschaffenheit wird das Messsignal nahezu ungehindert in die entgegengesetzte Richtung weitergeleitet. Als Folge dessen kann kein Signal mehr empfangen werden und die Distanzmessung schlägt fehl. Ein zweites mögliches Szenario wäre, dass ein weiteres Objekt in der Nähe des Zielobjekts das Messsignal reflektiert. Demnach würde es zu einer Überlagerung des Haupt- und Nebensignals kommen, wodurch das Ergebnis der Distanzmessung grob fehlerhaft wäre. Eine exakte Bestimmung des Reflexionsgrads bedarf der Erfassung aller für die Materialzusammensetzung relevanten Parameter. Auf Grund dessen und der Tatsache, dass der Reflexionsgrad der für diese Arbeit verwendeten Messobjekte bekannt ist, wird diese Thematik nicht detaillierter erläutert.

#### Reichweite

Im Zusammenhang mit Reflexionseigenschaften gilt es zu erwähnen, dass die erzielbare Reichweite bei der reflektorlosen Distanzmessung je nach Zielobjekt und dessen Oberflächenstruktur variieren kann. Um die suboptimalen Reflexionseigenschaften zu kompensieren und möglichst lange Distanzen zu erzielen, werden starke Lasersignale verwendet. Demzufolge können mit stärkeren Lasern höhere Reichweiten erzielt werden, weswegen mit Totalstationen, die auf der Laufzeitmessung basieren, die längsten Distanzen gemessen werden können [Höglund und Large, 2005] (siehe Tabelle 2.8 und Abbildung 2.22).

Tabelle 2.8: Die spezifizierten maximal erzielbaren Reichweiten moderner Totalstationen im reflektorlosen Messmodus; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 53],[Leica Geosystems, 2011, Seite 161],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 157],[Topcon, 2012b, Seite 160],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]

Totalstation		maximale Reichweite [m]
Hersteller	Modell	
Leica Geosystems	MS50	> 2000
Leica Geosystems	TM50	> 1000
Leica Geosystems	TS50	> 1000
Leica Geosystems	TS15	> 1000
Sokkia	DX 201-AC	1000
Sokkia	SX 101T	1000
Spectra Precision	Focus 30	800
Topcon	IS 301	2000
Topcon	PS 101	1000
Trimble	S3	> 400
Trimble	S6 DR Plus	1300
Trimble	S6 DR 300+	> 800
Trimble	S8 High Precision	> 150

### Eindringtiefe

Zusätzlich zur Oberflächenbeschaffenheit ist die Materialstruktur ein weiterer wichtiger Parameter, der die reflektorlose Distanzmessung beeinflusst. Der auf das Objekt einfallende Laserstrahl wird nicht zur Gänze an der Materialoberfläche reflektiert, vielmehr wird ein Teil des Signals beim Übergang in das optisch dichtere Medium zum Lot hin gebrochen und daraus resultieren weitere Reflexionen im Inneren des Materials [Joeckel et al., 2008, Seite 336]. Die Eindringtiefe des Laserstrahls in das Objekt ist eine Funktion des Einfallswinkels, der Materialeigenschaften (Porosität, Farbe etc.) und der Eigenschaften des Lasersignals (Wellenlänge, Intensität etc.). Untersuchungen mittels reflektorloser Distanzmessgeräte zeigten eine Streuung der Distanzmessergebnisse von  $\approx 1$  cm auf Grund unterschiedlicher Materialien der Zielobjekte [Ingensand et al., 2003].

### 2.3.4 Mischsignale

Spotgröße, Einfallswinkel und Reflexionseigenschaften sind in jeder Messkonstellation Faktoren, die die Genauigkeit der Distanzmessung erheblich beeinflussen. In speziellen Mess-

situationen sind diese jedoch besonders kritisch und können das Ergebnis der Distanzmessung grob verfälschen. Diese Messsituationen vereint die Tatsache, dass die Messung zu einem zur Laserspotgröße kleinen Zielobjekt stattfindet und dadurch Nebensignale das Haupt-signal überlagern. Diese Mischsignale treten vor allem in den nachfolgend genannten Anwendungs-fällen auf und sind in Abbildung 2.21 skizzenhaft ersichtlich.

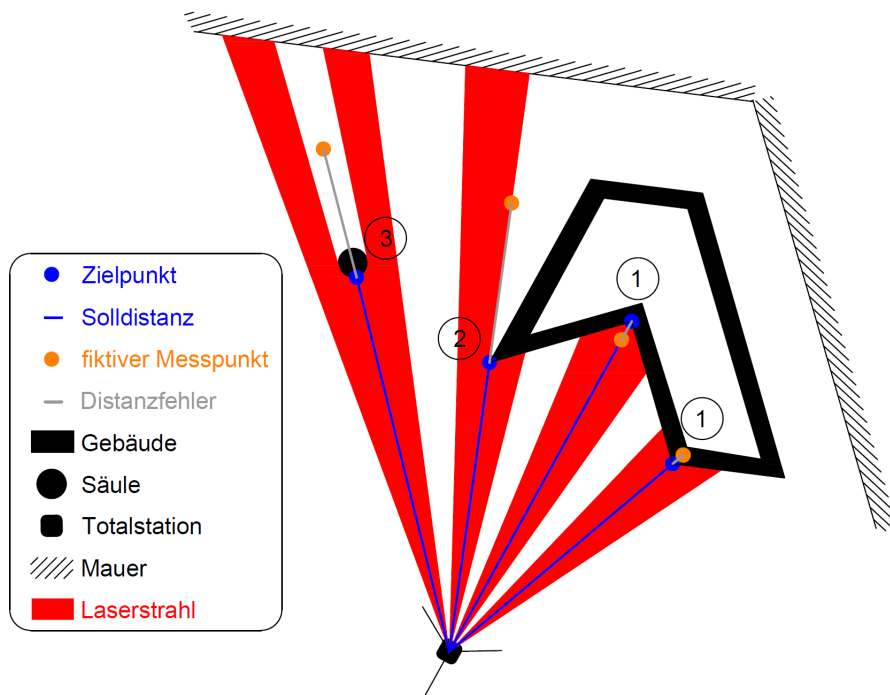


Abbildung 2.21: Anwendungsfälle, bei denen die reflektorlose Distanzmessung grob fehlerhaft ist

### 1) Messung zu Ecken

Resultierend aus der Größe des Laserspots kann keine exakte Distanzmessung zu Eckpunkten erfolgen. Mit zunehmender Distanz zur Ecke wird der Messfleck auf Grund der Strahldivergenz größer, sodass auch die anliegenden Wände das Messsignal reflektieren. Je nachdem, ob die Ecken oder die anliegenden Wände näher am Instrument sind, wird die Distanzmessung systematisch verkürzt oder verlängert.

## 2) Kantenmessung

Die reflektorlose Distanzmessung zu Gebäudekanten ist besonders kritisch und sehr oft mit fehlerhaften Resultaten verbunden. Ähnlich zum vorherigen Anwendungsfall wird auch hier das Hauptsignal von Nebensignalen überlagert, aber mit dem Unterschied, dass die Nebensignale nicht von angrenzenden Wänden kommen, sondern von teilweise weit entfernten Objekten. Daraus resultieren systematisch deutlich zu lange Strecken.

## 3) Messung zu sehr schmalen Objekten

Linienhafte und schmale Objekte (z.Bsp. Säulen) stellen ein besonderes Fehlerpotential für reflektorlose Distanzmessungen dar. Sobald die Querschnittsfläche des Messsignals größer ist als die Fläche des anvisierten Objekts, können zusätzlich Intensitäten reflektiert werden, die von Objekten stammen, die vom Vermesser aus gesehen seitlich hinter dem Zielobjekt platziert sind. Analog zu der Kantenmessung werden auch in diesem Fall die Distanzen verlängert. Sie sind in der Literatur als Kometenschweife bekannt [Schäfer, 2011, Seite 366].

Die aufgezählten Problemfälle sind bekannt und werden auch in den Handbüchern der Hersteller erwähnt und geschildert (z.Bsp. [Topcon, 2009, Seite 82]). Es lässt sich jedoch nur abschätzen, wie fehlerhaft die Distanz gemessen wird, da die Reflexionseigenschaften aller Objekte, die Distanzen zwischen den Objekten und instrumentenbedingte Parameter (speziell Signalintensität und Strahldivergenz) involviert sind.

Die systematischen Fehler der oben beschriebenen Messsituationen können nur eliminiert werden, wenn gewährleistet wird, dass der Messfleck kleiner oder gleich der Querschnittsfläche des zu erfassenden Objekts ist. Dies ist jedoch vom Anwender nur realisierbar, wenn die Strahldivergenz der verwendeten Totalstation bekannt ist.

### 2.3.5 Genauigkeitsspezifikation

Abschließend ist zu klären, wie genau reflektorlose Distanzmessungen mittels moderner Totalstationen durchführbar sind. Dies ist jedoch eine äußerst komplexe Fragestellung, da viele unterschiedliche Komponenten eine entscheidende Rolle spielen. Diese können jedoch im Wesentlichen in vier Gruppen kategorisiert werden:

### 1) Totalstation

Die Distanzmessung und die erzielbare Genauigkeit ist vom verwendeten Instrumentarium abhängig. Messprinzip und damit verbundene Kenngrößen sind ausschlaggebend für eine genaue Distanzmessung.

### 2) Meteorologie

Die meteorologischen Bedingungen sind maßgebend dafür, wie schnell sich das Messsignal tatsächlich ausbreitet und wie stark es abgeschwächt wird. Vor allem die Reichweite ist eine Funktion der jeweiligen Gaspartikel in der Luft, weswegen unterschiedliche Witterungsbedingungen unterschiedliche Reichweiten hervorrufen können.

### 3) Zielobjekt

Materialeigenschaften und Reflexionsverhalten des Zielobjekts bilden eine weitere wichtige Gruppierung.

### 4) Messkonfiguration

Die Geometrie zwischen dem Standpunkt und dem Zielpunkt ist entscheidend, Einfallswinkel beeinflussen die Distanzmessung.

Besonders kritisch ist die Tatsache, dass keine ISO(International Organization for Standardization)-Norm für die Genauigkeitsspezifikation reflektorloser Distanzmessungen vorhanden ist. Demnach können Hersteller ihre Messkonstellation frei wählen. Folglich basieren die Genauigkeitsangaben auf perfekten Messbedingungen, die keine reale Messsituation widerspiegeln, weswegen die Spezifikationen der Hersteller in den meisten praktischen Anwendungsfällen nicht erreicht werden können. Die in den vorherigen Subkapiteln erläuterten Einflussgrößen der reflektorlosen Distanzmessung sind signifikante Parameter für die erzielbare Genauigkeit einer solchen. Demnach beziehen sich die Herstellerangaben auf Messkonstellationen, in denen deren Einfluss möglichst gering ist. Daraus resultieren Distanzmessungen auf das Zentrum von speziellen, stark reflektierenden Oberflächen mit einem Einfallswinkel von  $\varphi=0$  gon. In praktischen Anwendungsfällen ist eine solche Situation jedoch eher die Ausnahme und große Einfallswinkel auf Kanten von Objekten mit suboptimalen Reflexionseigenschaften sind die Regel [Lienhart et al., 2014] (siehe Abbildungen 2.21 und 2.16).

Für Vergleichszwecke müssen gleiche Bedingungen vorherrschen, weswegen viele Hersteller moderner Totalstationen ihre Distanzmessungen zu neutralen Prüfkarten durchführen.

Diese sogenannten Kodak-Cards weisen bekannte Reflexionseigenschaften auf und sind genormte Prüfgrößen in der Photographie und eignen sich deshalb auch sehr gut für Testzwecke mittels Vermessungsinstrumenten. Es wird üblicherweise zwischen der Kodak-Graukarte (18% Reflexionsgrad) und der Kodak-Weißkarte (90% Reflexionsgrad) unterschieden [Höglund und Large, 2005].

Die Abbildung 2.22 zeigt die Genauigkeitsspezifikation für die reflektorlose Distanzmessung verschiedener Totalstationen sowie die maximal erzielbare Reichweite unter besten Messbedingungen. Jene Totalstationen, deren Messtechnologie auf der Laufzeitmessung basiert, erzielen die höchsten Reichweiten und ermöglichen eine reflektorlose Distanzmessung von über 1 km mit einer Messpräzision von einigen Millimetern. Durch den linearen Fehleranteil bei der Genauigkeitsangabe der Distanzmessung vergrößert sich der Messfehler mit zunehmender Distanz. Unter Umständen ist die Genauigkeitsspezifikation auch nur für bestimmte Streckenabschnitte gültig, weshalb, wie in Abbildung 2.22 zu sehen, Sprungstellen auftreten.

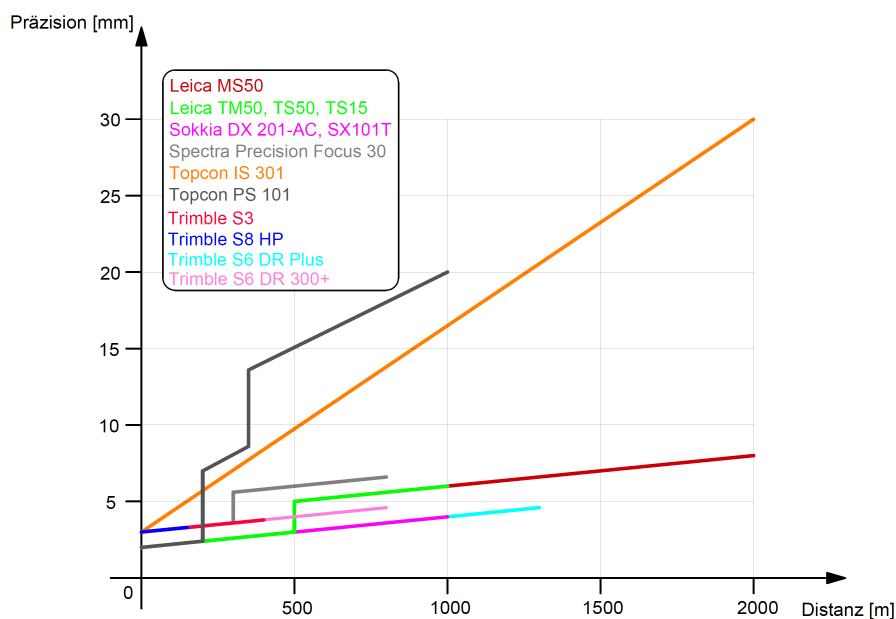


Abbildung 2.22: Die maximal erzielbaren Distanzen und deren Präzision im reflektorlosen Messbetrieb nach Spezifikation des Herstellers; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 53],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 161,162],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seiten 157,158],[Topcon, 2012b, Seite 160],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2013b],[Trimble, 2007]

Die Genauigkeitsangaben für die unterschiedlichen Witterungsbedingungen sind den jeweiligen Manuals der Hersteller zu entnehmen.

## 2.4 Vergleich der Messtechnologien

Die in den modernen Totalstationen eingebauten elektrooptischen Distanzmesser decken ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten ab. Sowohl eine reflektorlose als auch eine reflektorbasierte Distanzmessung kann in kürzester Zeit mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden. Ein entscheidender Faktor für die Distanzmessung mit modernen Totalstationen ist das verwendete Messprinzip. Die Laufzeitmessung, die Phasenvergleichsmessung und das Wave Form Digitizing unterscheiden sich signifikant voneinander und weisen auch unterschiedliche Merkmale auf.

Je nach Messsituation und Anforderung an die Distanzmessung ergeben sich Vorteile für das jeweilige Messverfahren.

### 2.4.1 Laufzeitmessung

- **hohe Reichweite**

Der energiereiche kurze Sendeimpuls ermöglicht eine hohe Reichweite auf beliebige Zielobjekte. Im Vergleich zur Phasenvergleichsmessung kann eine höhere Reichweite erzielt werden [Höglund und Large, 2005].

- **niedrige Laserklasse**

Die Tabelle 2.2 zeigt, dass die für die Laufzeitmessung verwendeten Laser in die niedrigste Laserschutzklasse eingeordnet werden. Dadurch sind gesundheitliche Schäden für den Messstrahl kreuzende Personen ausgeschlossen.

- **kurze Messzeit**

Ein bisher nicht erwähnter, aber für praktische Vermessungen relevanter Faktor stellt die Messzeit dar. Diese ist primär von der Messtechnologie abhängig und sekundär von der zu messenden Distanz. Mittels der Laufzeitmessung kann eine deutlich kleinere Messzeit und somit eine höhere Produktivität erzielt werden als mit der Phasenvergleichsmessung [Höglund und Large, 2005].

- **geringe Ausfallsquote**

Auf Grund des energiereichen Messsignals sind auch reflektorlose Distanzmessungen unter schwierigen Situationen möglich. Große Einfallswinkel, schwach

reflektierende Zielobjekte und starkes Umgebungslicht beeinflussen die Messung nur minimal.

- **unsichtbarer Messlaser**

Es sind Szenarien denkbar, in denen Vermessungsarbeiten möglichst unsichtbar erfolgen sollen. Bei Vermessungsarbeiten im Verkehrsbetrieb (z.Bsp. Überwachungsmessung einer Autobahnbrücke) können visuelle Lasersignale die Fahrer beeinträchtigen und somit im schlimmsten Falle Verkehrsunfälle verursachen. Signale aus dem nahen Infrarot-Bereich sind für den Menschen aber nicht wahrnehmbar (siehe Abbildung 2.3).

## 2.4.2 Phasenvergleichsmessung

- **sichtbarer Messlaser**

Das Messsignal befindet sich im optischen Bereich (siehe Abbildung 2.3). Dadurch besteht für den Vermesser die Möglichkeit zur visuellen Kontrolle. Eine Schnellüberprüfung, ob das anvisierte auch dem gemessenen Ziel entspricht, kann in Echtzeit getätigt werden.

- **sehr hohe Messgenauigkeit**

Eine auf der Phasenvergleichsmessung basierende Distanzmessung ist mit einer hohen Präzision verbunden und liefert sehr gute Messwerte.

- **kleiner Messspot**

Aus der kleinen Strahldivergenz resultiert eine sehr kleine Querschnittsfläche für den Laserspot. Dies ermöglicht eine gute Distanzmessung zu kritischen Messobjekten (siehe Abbildungen 2.18, 2.19 und 2.21).

## 2.4.3 Wave Form Digitizer

- **kurze Messzeit**

Die hohe Wiederholungsrate von Sendeimpulsen ermöglicht sehr kurze Messzeiten. Basierend auf diesen erlaubt der WFD eine kontinuierliche Distanzmessung, sodass dies als Scanning interpretiert werden kann.



- **hohe Messgenauigkeit**

Messungen können mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden und sind nur geringfügig ungenauer als Distanzmessungen, welche die Phasenvergleichsmessung als EDM-Technologie verwenden.

- **kleiner Messspot**

Die MS50 von Leica Geosystems, deren Distanzmessung auf dem Prinzip des WFD beruht, besitzt dieselbe Spotgröße wie jene Totalstationen des Herstellers, die als Messprinzip die Phasenvergleichsmessung verwenden. Damit ist die Spotgröße deutlich kleiner als bei der Laufzeitmessung und gewährleistet genaue Messungen auch bei schwierigen Messkonstellationen (siehe Abbildungen 2.18, 2.19 und 2.21).

- **große Reichweiten**

Sowohl im Prismenmodus als auch im reflektorlosen Messbetrieb können große Reichweiten von bis zu 10000 m bzw. 2000 m erzielt werden [Maar und Zogg, 2014]. Im Gegensatz zur Phasenvergleichsmessung können damit auch sehr weit entfernte Zielobjekte gemessen werden (siehe Abbildung 2.22).

- **Konfigurierbarkeit**

Speziell die hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Messkonstellationen ist ein außergewöhnliches Leistungsmerkmal, das Laufzeitmessung und Phasenvergleichsmessung nicht aufweisen. Je nach Anforderungsprofil der Messaufgabe kann das Augenmerk auf die Messgenauigkeit, die Reichweite, die Messzeit oder auf eine individuelle Konfiguration der drei genannten Kriterien gerichtet werden und so ein für die Anwendung optimales Ergebnis erzielen.

# Kapitel 3

## Automatische Zielerfassung

Moderne Totalstationen sind mit Komponenten für die automatische Zielerfassung und Messung ausgestattet und ermöglichen eine automatisierte Durchführung vieler Messabläufe. Ein Zusammenwirken der Motorisierung mit dem Modul der automatischen Zielerkennung erlaubt des Weiteren die Messung kinematischer Objekte. Diese komplexe Messaufgabe erfordert jedoch die spezielle Berücksichtigung der zeitlichen Komponente, die in üblichen statischen Messaufgaben nahezu vollständig vernachlässigt werden kann. Um die Leistungsfähigkeit moderner Totalstationen zu evaluieren, bedarf es der Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Aspekte. Bezüglich der Systemeigenschaften von Totalstationen sowie deren Leistungsfähigkeit sei auf [Hennes, 1999a],[Hennes, 1999b],[Hennes, 2000],[Hennes, 2003] und [Hennes und Krickel, 2000] verwiesen.

### 3.1 Allgemeines Funktionsprinzip

Das Grundprinzip der automatischen Zielerfassung basiert auf der Detektion eines Signals im Instrument und der damit einhergehenden Schlussfolgerung, aus welcher Richtung das Signal empfangen wurde. Durch die daraus gewonnene Richtungsinformation ist die Position des Ziels bekannt und ermöglicht dem Instrument eine gezielte Positionierung des Teleskops zum Zielobjekt.

Bei der automatischen Zielerfassung muss eine Differenzierung hinsichtlich der Signalgenerierung getätigt werden, weswegen zwischen aktiven, passiven und semiaktiven Systemen unterschieden wird.

### 1) Aktives System

Bei aktiven Systemen sendet das Zielobjekt selbst das Signal aus und nimmt infolgedessen aktiv am Prozess der automatischen Zielerfassung teil (siehe Abbildungen 3.1 und 3.2). Die Emittierung des Signals erfolgt in alle Richtungen, sodass die Signaldetektion im Instrument gewährleistet wird.

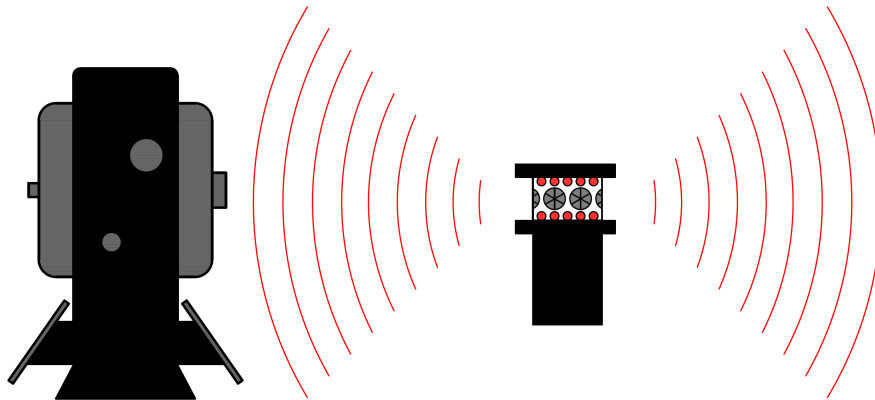


Abbildung 3.1: Das aktive Prisma sendet ein Signal aus.

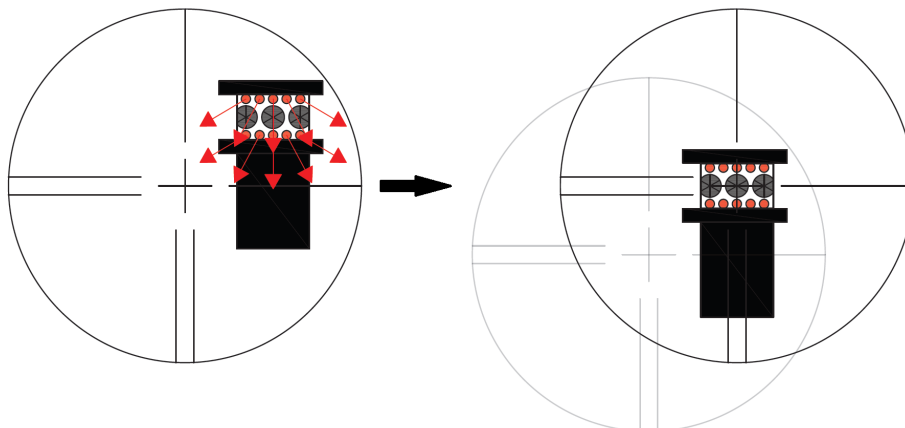


Abbildung 3.2: Die Totalstation detektiert das Signal des Prismas.

### 2) Passives System

Im Gegensatz zu aktiven Systemen wird bei passiven Systemen das zur Lokalisierung des Zielobjekts benötigte Signal von der Totalstation selbst emittiert (siehe Abbildungen 3.3 und 3.4). Das Signal wird nur in einem bestimmten Winkel ausgesendet und im Idealfall vom Zielobjekt reflektiert. Wird das Zielobjekt im gesuchten Bereich nicht lokalisiert, erfolgt eine Suche: Das Signal wird auf Grund der Drehung des Instruments durch die Motorisierung in alle Richtungen gesendet. Das Ziel dient nur als Reflektionsfläche und nimmt daher eine passive Stellung ein.

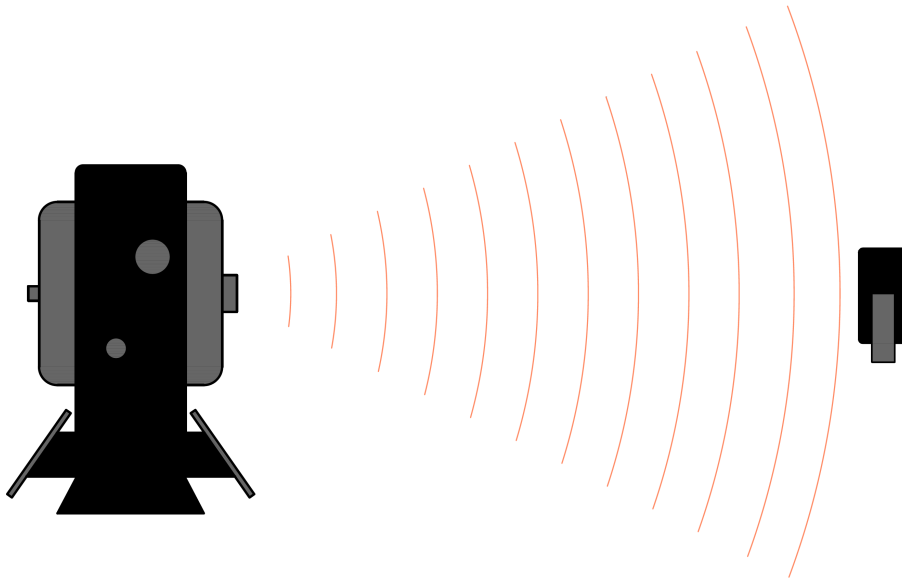


Abbildung 3.3: Die Totalstation sendet ein Signal in Richtung des Prismas aus.

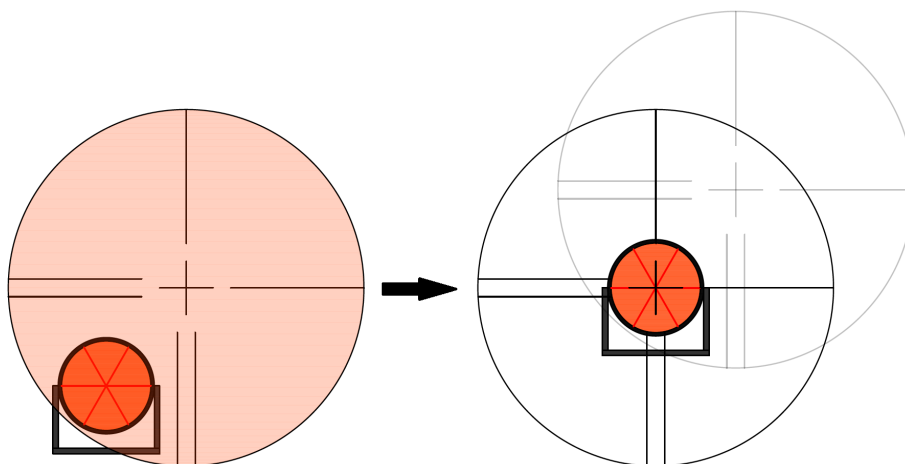


Abbildung 3.4: Positionierung des Fadenkreuzes in Richtung des Prismenzentrums

### 3) Semiaktives System

Semiaktive Systeme können als eine Mischform der zuvor erwähnten Systeme angesehen werden. Sowohl das Zielobjekt als auch das Instrument senden ein Signal zur Zieldetektion aus (siehe Abbildungen 3.5 und 3.6). Demnach erfolgt im Instrument eine Detektion von zwei Signalen, die idealerweise dieselbe Richtungsinformation beinhalten.

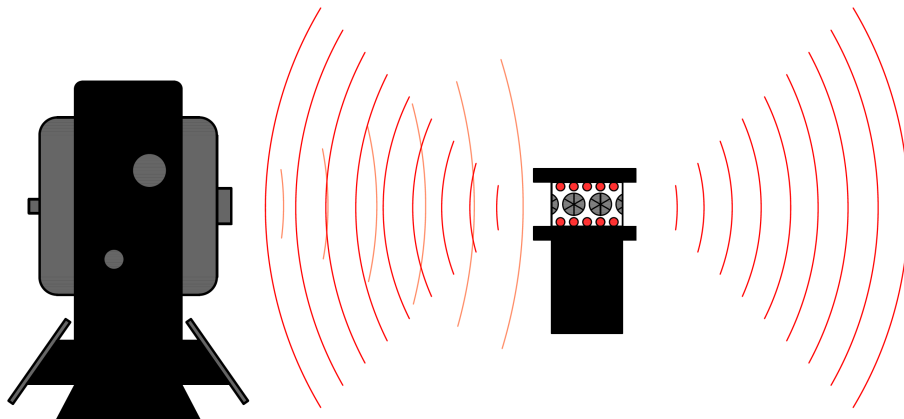


Abbildung 3.5: Totalstation und Prisma emittieren ein Signal

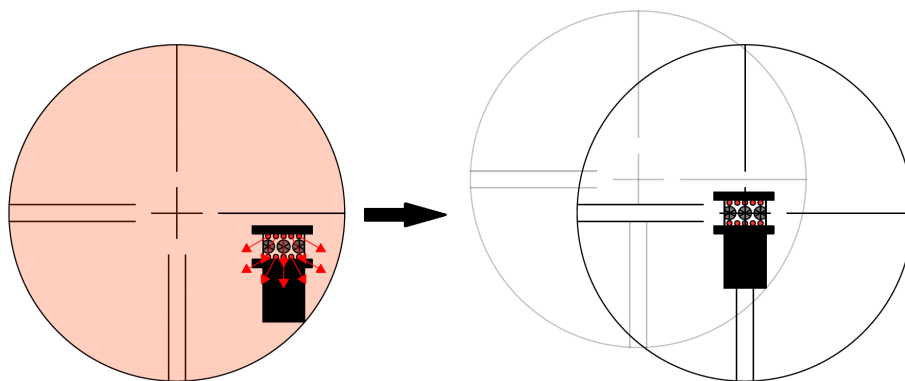


Abbildung 3.6: Funktionsprinzip eines semiaktiven Zielerfassungssystems

## 3.2 Sensorsysteme

Die selbstständige Zielerfassung erfordert neben der Motorisierung vor allem einen geeigneten Sensor, der eine Identifizierung und Lokalisierung des Ziels ermöglicht. Die Tabelle 3.1 stellt die Bezeichnung der automatischen Zielerfassung unterschiedlicher Hersteller dar und verdeutlicht, auf welchem Sensorsystem das Zielerkennungsmodul basiert.

Die Sensoren für die Zielerkennung können in zwei Typen kategorisiert werden, die sich hinsichtlich ihrer technischen Realisierung und ihrer Leistungsfähigkeit für die Zielbestimmung deutlich voneinander unterscheiden.

Tabelle 3.1: Die automatische Zielerfassung unterschiedlicher Hersteller; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2007],[Sokkia, 2014],[Donath et al., 2011, Seiten 353,354],[Topcon, 2013],[Trimble, 2009a]

Hersteller	Bezeichnung	Sensor
Leica Geosystems	Automatic Target Recognition	Kamera
Sokkia	Auto-Pointing	Kamera
Spectra Precision	LockNGo	Kamera
Topcon	X-pointing	Kamera
Trimble	Autolock	Quadrantendetektor

### 3.3 Kamerabasierte Systeme

Das von den Herstellern primär eingesetzte Sensorsystem für die automatische Zielerfassung basiert auf der Verwendung moderner Kameratechnologie. Diese Systeme erfassen mittels einer Kamera den Spot eines reflektierten künstlichen Signals innerhalb des Pixelsystems der Kamera und ermöglichen eine anschließende Transformation in das tatsächliche Koordinatensystem, woraus die gesuchten Winkelwerte des Ziels resultieren.

#### 3.3.1 Differenzbildung zweier Fotos

Das Funktionsprinzip der kamerabasierten Systeme zur automatischen Zielerfassung beruht auf dem Verfahren der Differenzbildung zweier Fotos. Bei diesem Vorgang wird der gesamte Ausschnitt des Arbeitsbereichs (FOV = Field of View) visuell per Foto zweimalig erfasst. Die erste Aufnahme differiert von der zweiten insofern, als dass der Bildausschnitt mit einem Infrarotlicht ausgeleuchtet wird. Das koaxial emittierte infrarote Lichtsignal wird vom Prisma reflektiert und visualisiert somit die Position des Ziels. Die anschließende Differenzbildung der beiden Fotos mittels Bildverarbeitungsalgorithmen erlaubt die eindeutige Lokalisierung des Ziels im Bildkoordinatensystem [Topcon, 2013]. Die Abbildung 3.7 zeigt denselben Bildausschnitt, einmal mit (siehe Abbildung 3.7, rechts oben) und einmal ohne (siehe Abbildung 3.7, links oben) Infrarotbeleuchtung, sowie das Differenzbild, welches für die Weiterverarbeitung benützt wird (siehe Abbildung 3.7, unten).

Als Strahlungsquelle zur Beleuchtung der Szene wird eine Laserdiode eingesetzt. Die Wellenlänge des ausgesandten Lichtes ist herstellerepezifisch und unterscheidet sich je nach Fabrikat geringfügig. Ihnen ist jedoch gemein, dass ausschließlich Lichtsignale aus dem infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verwendet werden (siehe Tabelle 3.2).

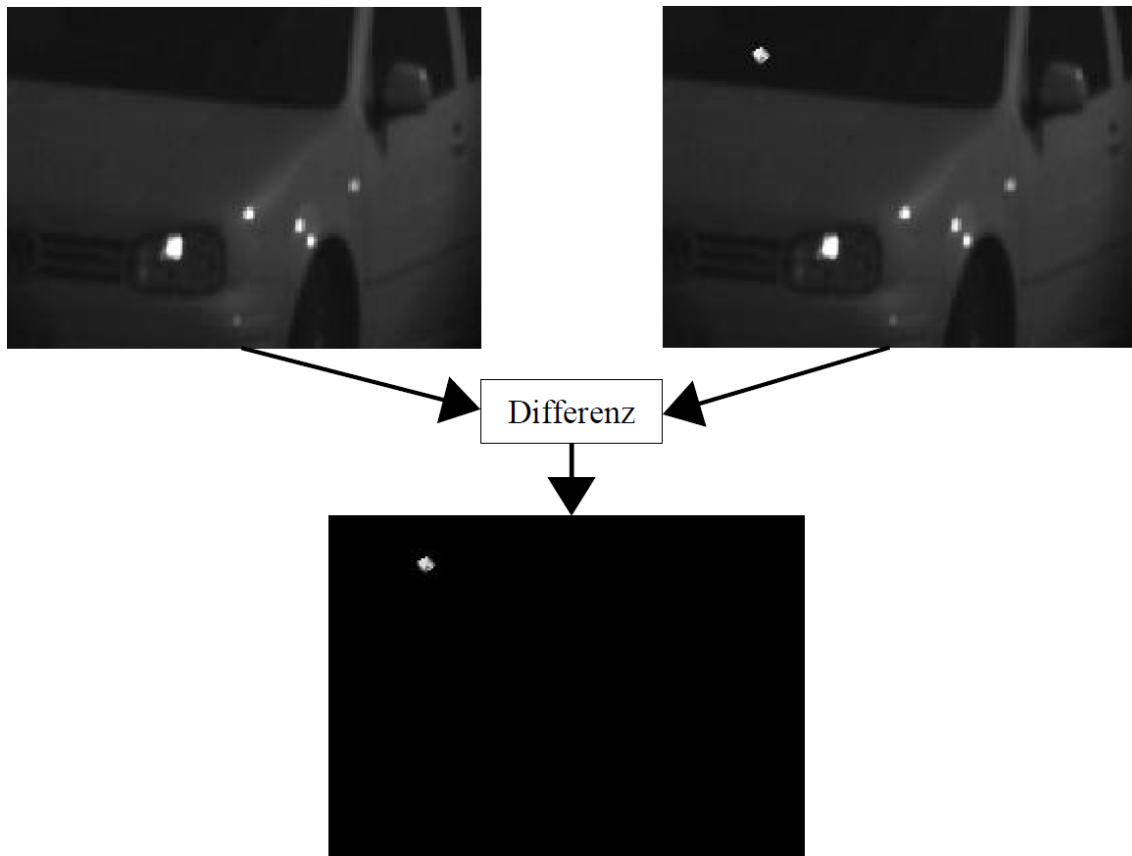


Abbildung 3.7: Durch Differenzbildung der Bilder wird die Position des Prismas lokalisiert (nach [Bayoud, 2006b]).

Tabelle 3.2: Die Wellenlängen des infraroten Signals zur Ausleuchtung des Bildausschnitts; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 13],[Leica Geosystems, 2011, Seite 134],[Donath et al., 2011, Seite 353],[Topcon, 2009, Seite 7],[Topcon, 2012b, Seite 161]

<b>Totalstation</b>		$\lambda$ [nm]	<b>Laserklasse</b>
Hersteller	Modell		
Leica Geosystems	MS50	785	1
Leica Geosystems	TM50	785	1
Leica Geosystems	TS50	785	1
Leica Geosystems	TS15	785	1
Sokkia	SX 101T	k.A.	k.A.
Spectra Precision	Focus 30	850	1
Topcon	IS 301	k.A.	1
Topcon	PS 101	980	1

### 3.3.2 Das Prisma im Bildkoordinatensystem

Die vom Prisma zum Messinstrument zurückreflektierte Infrarotstrahlung wird mit Hilfe einer Objektivlinse auf einen Kamerasensor umgelenkt (siehe Abbildung 3.8). Alle für den Messvorgang relevanten Strahlengänge werden koaxial durch das Teleskop geleitet. Um die einzelnen Messsignale den jeweiligen Detektoren korrekt zuteilen zu können, muss ein dichromatisches Prisma im Strahlengang eingebaut sein. Dieses Prisma filtert das gesuchte infrarote Signal von den restlichen Signalen (Signal für die Distanzmessung, Streulicht im optischen Bereich) [Singh et al., 2002].

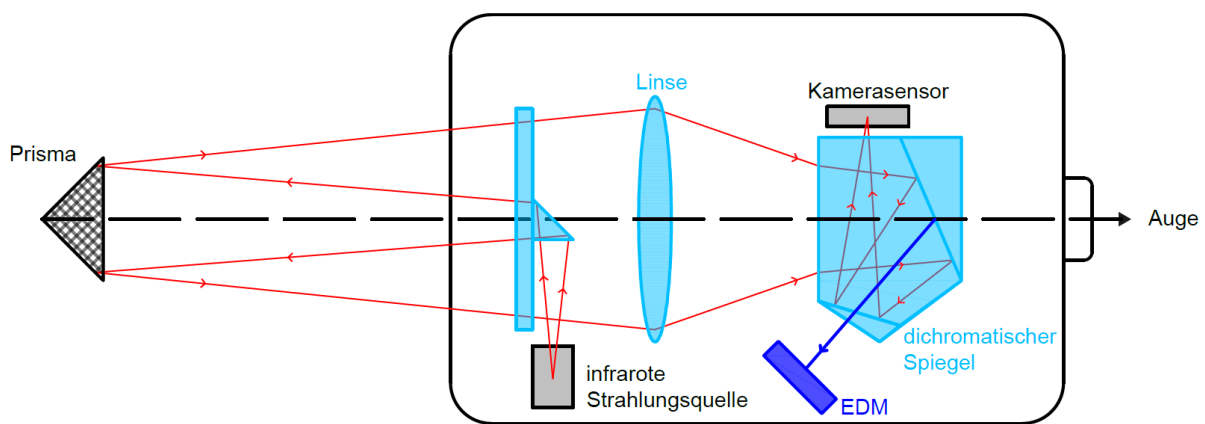


Abbildung 3.8: Der Strahlengang eines kamerabasierten Zielerfassungssystems (nach [Topcon, 2012a]).

Als Kamerasensoren werden ausschließlich zweidimensionale CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor)- oder CCD(charge-coupled device)-Sensoren verwendet. CMOS-Sensoren weisen gegenüber CCD-Sensoren eine höhere Auflösung und eine höhere Dynamik auf. Deswegen eignen sich CMOS-Sensoren besser für die Intensitätsbestimmung des Spots, da einerseits die Pixelgenauigkeit gesteigert werden kann und andererseits weniger Störeinflüsse bei den Helligkeitswerten der Pixel daraus resultieren [Stempfhuber und Kirschner, 2008].

Die Position des Intensitätsspots auf dem Kamerasensor wird dann mittels Bildverarbeitungsalgorithmen in das Pixelkoordinatensystem des Sensors berechnet [Stempfhuber und Kirschner, 2008]. Im einfachsten Fall wird die Prismenposition innerhalb des lokalen Bildkoordinatensystems durch eine Schwerpunktbestimmung eruiert. Die Intensitätswerte der einzelnen Pixel werden hierfür entlang der Zeilen und Spalten der Pixelmatrix summiert, sodass daraus eine zweidimensionale Intensitätsverteilung resultiert. Anschließend werden die jeweiligen Maxima der Grauwertsummationen bestimmt, welche die zweidimensionale Position des Spots im lokalen Bildkoordinatensystem repräsentieren (siehe Abbildung 3.9) [Bayer et al., 2000, Seite 6].



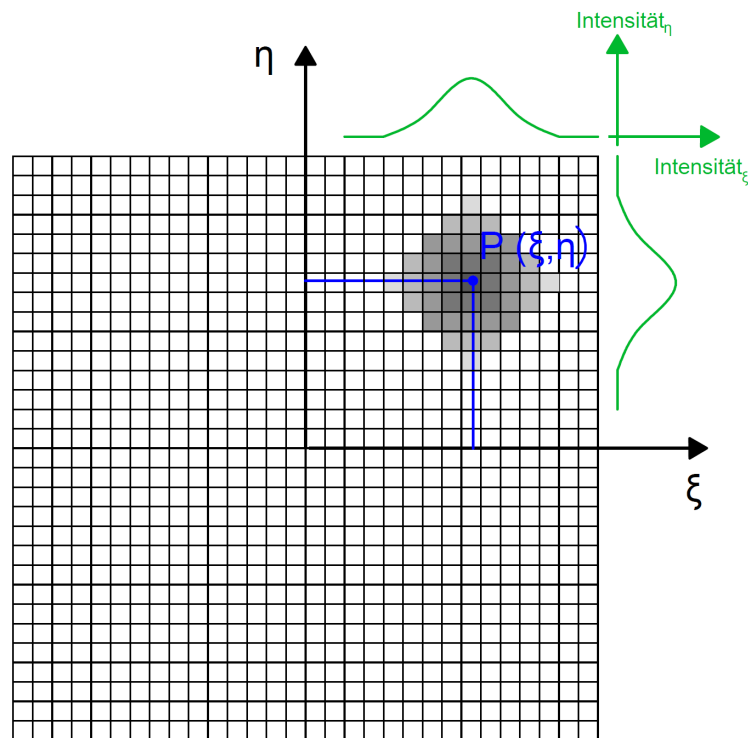


Abbildung 3.9: Der reflektierte Intensitätspot im Bildkoordinatensystem (nach [Schlemmer, 1989, Seite 369]).

### 3.3.3 Transformation vom Bildkoordinatensystem in das lokale Koordinatensystem

Die Prismenposition ist innerhalb des Bildkoordinatensystems bekannt und wird über eine zweidimensionale Transformation in das übergeordnete lokale Koordinatensystem transformiert. Die Transformationsparameter  $d$  und  $\phi$  beschreiben dabei die Lage der beiden Koordinatensysteme zueinander:

- **Translationsparameter  $d$**   
Distanz zwischen dem Koordinatenursprung des Bildkoordinatensystems und dem Koordinatenursprung des lokalen Koordinatensystems.
- **Rotationsparameter  $\phi$**   
Verdrehungswinkel zwischen den beiden Koordinatensystemen

Die numerischen Werte für die Transformationsparameter entstammen der Kalibrierung. Bei der Kalibrierung wird jener Offset eruiert, der zwischen der visuellen Betrachtungsweise des Benützers durch das Okular und der Sichtweise des Kamerasensors auf das Prisma

entsteht. Falsche Kalibrierwerte führen bei der Messung mittels automatischer Zielerfassung zu systematisch falschen Winkeln. Um die Richtigkeit der automatischen Zielerfassung zu gewährleisten, ist eine Kalibrierung in regelmäßigen Abständen unerlässlich [Singh et al., 2002]. Diese kann der Anwender selbst durchführen, spezielle in den Instrumenteneinstellungen auffindbare Messroutinen führen den Benutzer Schritt für Schritt durch die Kalibrierung ([Topcon, 2012b, Seiten 149,150],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 87-91]). Bei der durch den Anwender vorgenommenen Kalibrierung des automatischen Zielerfassungssystems werden ausschließlich die Translationsparameter kalibriert. Die Verdrehung beider Systeme zueinander wird bei der finalen Kalibrierung im Herstellungsprozess eruiert.

Die Relation zwischen den beiden Koordinatensystemen ist in Abbildung 3.10 schematisch dargestellt.

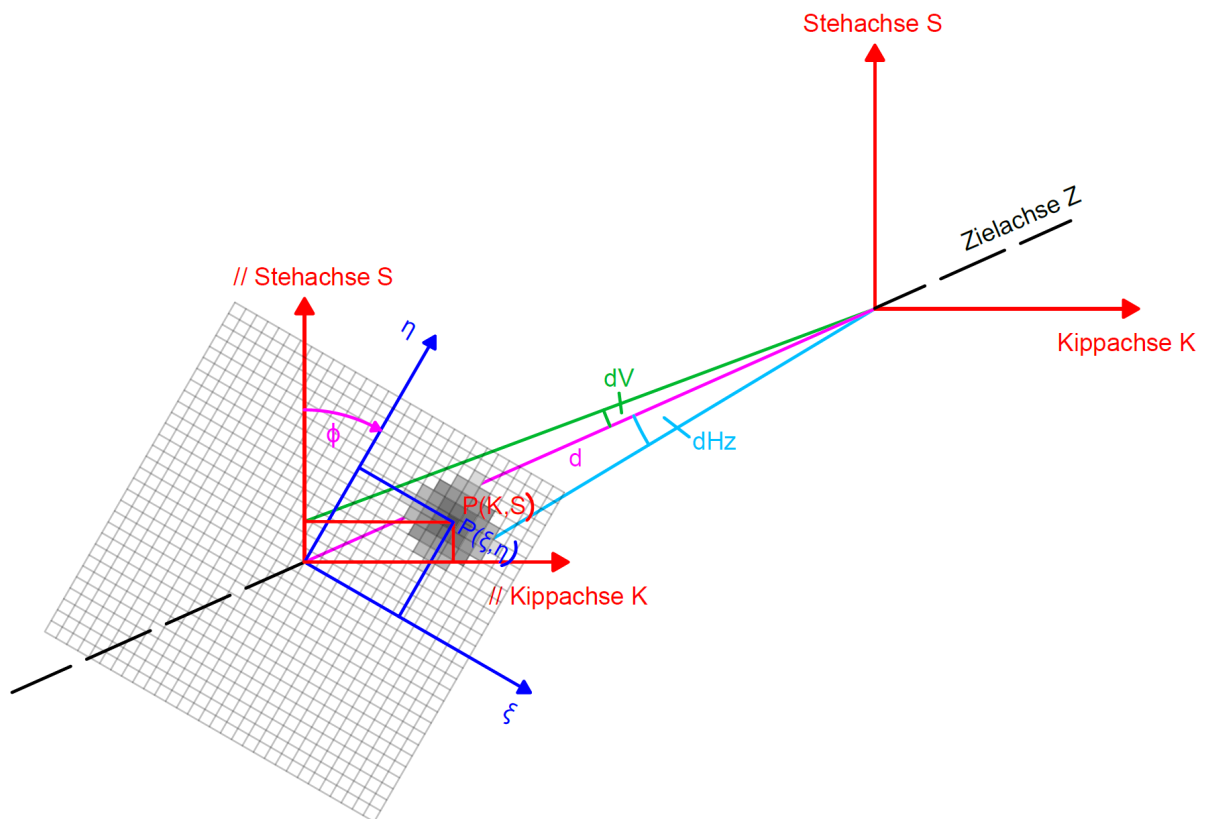


Abbildung 3.10: Lokales Koordinatensystem und Bildkoordinatensystem sowie deren Relation zueinander (nach [Kahmen, 1992, Seite II 6/7])

Die Transformationsgleichung kann aus einer Dreiecksauflösung gewonnen werden und ist in Gleichung 3.1 ersichtlich.

$$\begin{bmatrix} \tan(dHz) \\ \tan(dV) \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Aus der Formel 3.1 und der Abbildung 3.10 wird ersichtlich, dass die Zielachse exakt zum Prismenzentrum weist, wenn der Intensitätsspot des Prismas sich im Ursprung des Bildkoordinatensystems befindet und die Bildkoordinaten  $\xi$  und  $\eta$  exakt 0 sind.

### 3.3.4 Berechnung von Winkelablagen

Theoretisch sollte bei einem Bildkoordinatenpaar  $\xi, \eta \neq 0$  eine motorisierte Nachführung des Teleskops zum Ziel stattfinden. Dieser Prozess aus motorisierter Nachführung und Intensitätsermittlung mittels Kamerasensor müsste im ständigen Wechsel ausgeführt werden und würde ein andauerndes Nachsteuern selbst bei kleinsten Vibrationen am Zielobjekt oder bei Luftturbulenzen zur Folge haben.

Zur Beschleunigung des Messprozesses wird bei kleinen Winkelablagen auf eine exakte Positionierung der Zielachse auf das Prismenzentrum verzichtet und Restabweichungen werden bei der Ausgabe der Winkelwerte mathematisch berücksichtigt. Die Winkelablagen  $dHz$  und  $dV$  werden mittels der Gleichung 3.1 berechnet und zur aktuellen Position des Fernrohrs addiert. Der Beobachter kann somit bei visueller Betrachtung des Prismas durch das Teleskop nach ausgeführter automatischer Zielerfassung eine Abweichung zwischen Prismenzentrum und Fadenkreuz feststellen. Trotz dieser Fehlstellung beziehen sich die Winkelwerte am Display der Totalstation exakt auf das Prismenzentrum.

Die Winkelablagen werden nur innerhalb eines bestimmten Abstands zwischen Position des Fadenkreuzes und Prismenzentrum an die unkorrigierten Winkelwerte angebracht. Bei einer Überschreitung dieser Toleranzgrenze wird die Motorisierung der Totalstation angesteuert und das Fadenkreuz mit dem Prismenzentrum zur Kongruenz gebracht. Die Schwellenwerte sind je nach Hersteller, Instrument und Messmodus unterschiedlich. Die PS 101 von Topcon erlaubt dem Benutzer, einen Schwellenwert von 3", 5", 10", 20", 30" oder 60" für die Exzentrizität zwischen Fadenkreuz und Prismenzentrum zu definieren [Topcon, 2012b, Seite 52]. Für präzise Messungen ist ein kleiner Toleranzbereich, in der die Restabweichungen angebracht werden, empfehlenswert, da Ungenauigkeiten in den Kalibrierwerten bei größeren Ablagen stärker einfließen. Abhängig von der Motorisierung der Totalstation und der Kalibrierung des Kamerasensors ist ab einem bestimmten Toleranzbereich eine motorisierte Nachführung des Teleskops zum Prismenzentrum genauer als eine mathematische Korrektur der Exzentrizität.

### 3.3.5 Eigenschaften und Problemstellungen der kamerabasierten Zielerfassung

#### Spotdetektion

Problematisch ist das Faktum, dass sämtliche elektromagnetische Strahlen durch das Teleskop verlaufen und vor allem im elektromagnetischen Spektrum angrenzende Lichtsignale sehr schwer voneinander zu unterscheiden sind. Zwar kann unter der Zuhilfenahme eines dichromatischen Prismas eine grobe Filterung durchgeführt werden, jedoch sind Restfehler nicht ausgeschlossen (siehe Abbildung 3.8). Vor allem Reflexionen, die dem eines Prismas ähneln, können oft als Prismenreflexion missinterpretiert werden und eine falsche Zielidentifikation zur Folge haben. Besonders stark reflektierende Objekte wie Warnwesten und Verkehrsschilder werden in einigen Fällen von dem Modul der automatischen Zielerfassung als Ziel identifiziert und folglich ein grob falscher Messwert eruiert.

Um diese Gefahrensituation einer falschen Anzielung zu vermeiden, werden in modernen Totalstationen die reflektierten Intensitäten nicht nur detektiert, sondern auch analysiert. Dabei werden die Intensitätsspotspots einem Plausibilitätstest unterzogen, der neben der reflektierten Intensität auch die geometrische Form jedes einzelnen Spots analysiert. Die Abbildung 3.11 zeigt einen fiktiven Funktionsverlauf der Intensität zweier Objekte im Bezug zur Distanz. Befindet sich die Intensität des Spots außerhalb der Toleranzgrenzen, so ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Intensitätsspot nicht von einem Prisma generiert worden [Leica Geosystems, 2007],[Donath et al., 2011, Seite 354].

Allerdings kann auch dieser Analyseschritt ein Fehlverhalten der automatischen Zielerfassung nicht vollständig ausschließen. Moderne Totalstationen werden bei verschiedensten Sichtverhältnissen verwendet, weshalb je nach Sonneneinstrahlung und Atmosphäre die reflektierte Intensität von ein und demselben Objekt unterschiedlich ausfallen kann. Auf Grund dessen kann bei einigen Totalstationen eine Einstellung getroffen werden, die die Schwellenwerte beim Plausibilitätstest an die momentane Situation anpasst (siehe Abbildung 3.12b). Des Weiteren ist eine korrekte Einstellung des Prismentyps unerlässlich, da je nach Prismentyp unterschiedliche Formen des Spots möglich sind und je nach Prismengröße und Prismenform andere Intensitäten daraus resultieren (siehe Abbildung 3.12a).

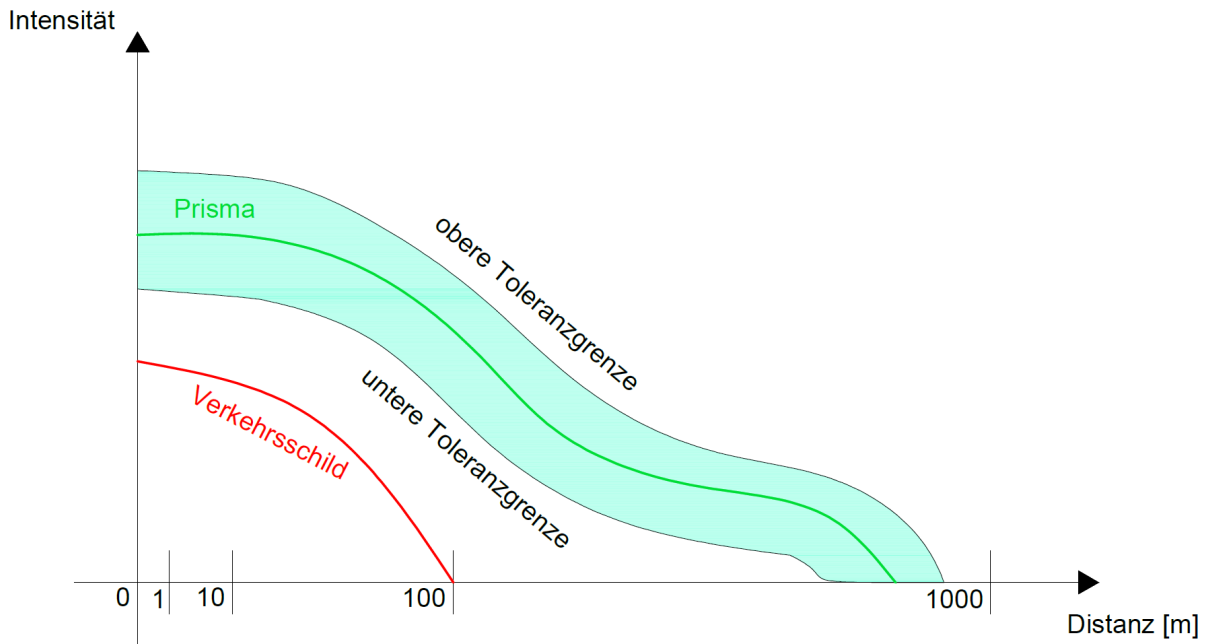


Abbildung 3.11: Die von einem Prisma reflektierte Intensität unterscheidet sich von Fremdre-reflexionen (nach [Bayoud, 2006a]).

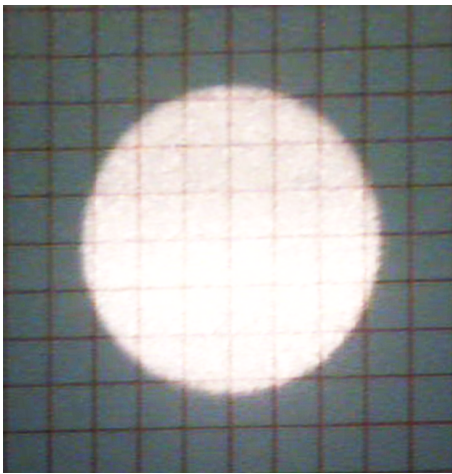


a) Prismenauswahl

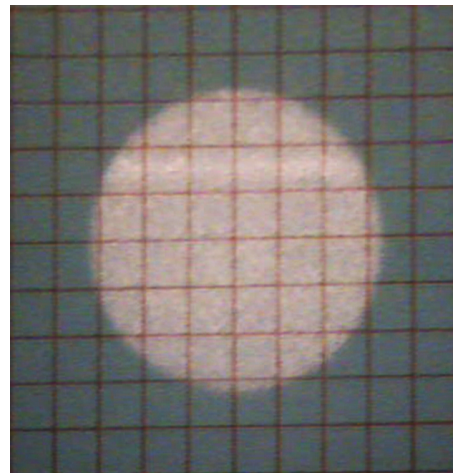
b) Sichtverhältnisse

Abbildung 3.12: Auswahl des korrekten Prismentyps (3.12a) und der momentanen Sichtverhältnisse (3.12b)

Bei den Einstellungen für die Sichtverhältnisse wird neben den Schwellwerten für den Plausibilitätstest auch die Intensität des Infrarotsignals reguliert. Eine spezielle Kamera, deren Infrarotfilter entfernt wurde, visualisiert unterschiedliche Intensitäten für unterschiedliche Einstellungen der Sichtverhältnisse (siehe Abbildung 3.13).



a) Sichtverhältnis: Gut



b) Sichtverhältnis: Sonne & Reflexionen

Abbildung 3.13: Die Leica MS50 Totalstation sendet unter der Einstellung „Gut“ (3.13a) ein deutlich stärkeres Signal zur automatischen Prismendetektion aus als unter der Einstellung „Sonne & Reflexionen“ (3.13b).

Aus der Abbildung 3.11 wird der funktionale Zusammenhang zwischen der reflektierten Intensität und der Distanz ersichtlich. Infolgedessen werden am Kamerasensor unterschiedliche Intensitäten in Abhängigkeit von der Distanz detektiert. Diesbezüglich kann eine Grobunterteilung der detektierten Spots für den Nah- und Fernbereich erfolgen:

### 1) Distanzen > 100m

Das intensitätsarme Signal verteilt die noch verbleibende Energie auf sehr wenige Pixel des Kamerasensors (siehe Abbildung 3.14). Durch das Messrauschen wird die Intensität heterogen auf wenige Pixel verteilt und eine fehlerhafte Position des Spots im Bildkoordinatensystem eruiert.

Dieser Fehler resultiert aus dem Kamerasensor und der Limitierung der Pixelgröße [Stempfhuber und Kirschner, 2008].

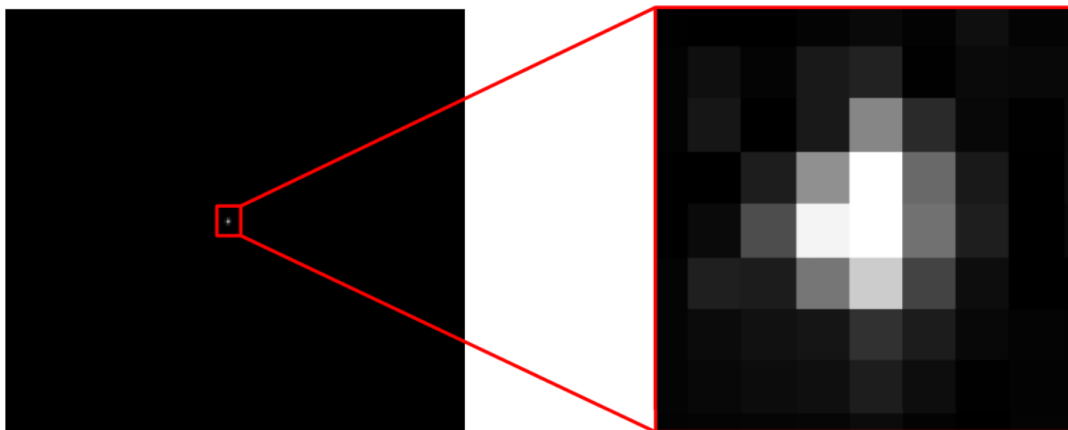


Abbildung 3.14: Der reflektierte Spot am Kamerasensor bei langen Distanzen (aus [Stempfhuber und Kirschner, 2008]).

## 2) Distanzen $< 100\text{ m}$

Im Gegensatz zu Messungen auf große Distanzen wird bei kurzen Distanzen ausreichend infrarotes Signal vom Prisma reflektiert und die Energie verteilt sich nahezu auf alle Pixel des Kamerasensors. Analog zur automatischen Zielerfassung auf weit entfernte Prismen ergibt sich für Messungen im Nahbereich ebenfalls die Problematik eines nicht homogenen Intensitätsspot (siehe Abbildung 3.15).

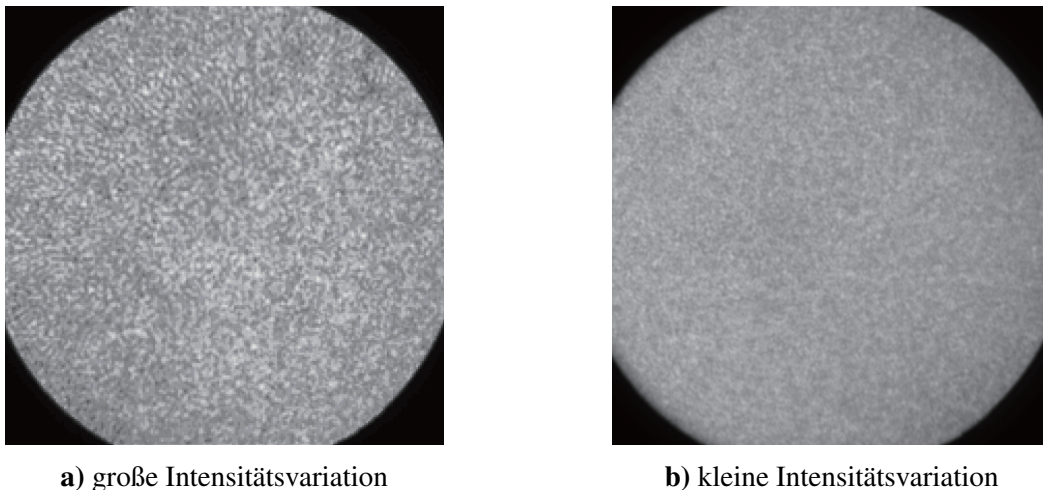


Abbildung 3.15: Intensitätsvariation eines neuen verbesserten Lasers (3.15b) und einer älteren Strahlungsquelle (3.15a)(aus [Topcon, 2012a])

Die heterogene Intensitätsverteilung wird durch den verwendeten Laser hervorgerufen. Aufgrund der hohen Kohärenz sowie der auftretende Divergenzwinkel bei der Signalabstrahlung weist das Prisma keine gleichmäßige Intensitätsverteilung auf [Topcon,

2012a]. Durch Weiterentwicklung der Strahlungsquelle wird eine sukzessive Reduktion dieser Fehlerquelle angestrebt (siehe Abbildung 3.15).

### Multiple Prismen im Kamerasehfeld

Bei Vermessungsarbeiten auf großen Baustellen, insbesondere bei Tunneln, besteht die Gefahr, dass mehrere Prismen gleichzeitig im Kamerasehfeld erscheinen und ein falsches Prisma vom Zielerfassungsmodul detektiert wird (siehe Abbildung 3.16).



Abbildung 3.16: Multiple Prismen in einem Tunnel (Prismen in Rot hervorgehoben, Foto aufgenommen vom IGMS)

Der Kamerasensor lokalisiert im gesamten Kamerasehfeld alle Intensitäten, die von Prismen reflektiert werden. Demnach ist das virtuelle Sichtfeld des Kamerasensors ein essentieller Parameter für die Maximalanzahl an Prismen, die detektiert werden können. Die Größe des Kamerasehfelds kann mit dem Fernrohrsichtfeld ident sein, was aber nicht zwingend notwendig ist (siehe Tabelle 3.3).

Während bei den Instrumenten MS50, TM50, TS50 und TS15 von Leica Geosystems sowie bei den Totalstationen IS 301 und PS 101 von Topcon das Sehfeld der Feinanziehung radialsymmetrisch gestaltet ist, wird bei der Focus 30 von Spectra Precision ein rechteckiges Kamerasehfeld eingesetzt. Des Weiteren ergibt sich durch die Sensorgröße ein in horizontaler Richtung größeres Sichtfeld als beim Fernrohrsichtfeld (siehe Abbildung 3.17).



Tabelle 3.3: Die Ausdehnung des Sehfelds der Feinanzielung und des Fernrohrsehfelds nach Spezifikation der Hersteller; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 56,57],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 168,200],[Sokkia, 2014],[Donath et al., 2011, Seite 353],[Topcon, 2009, Seiten 69,156],[Topcon, 2012b, Seiten 159,161]

Totalstation		Sehfeld der Feinanzielung [°]	Fernrohrsehfeld [°]
Hersteller	Modell		
Leica Geosystems	MS50	1.40	1.50
Leica Geosystems	TM50	0.47	1.50
Leica Geosystems	TS50	1.40	1.50
Leica Geosystems	TS15	1.40	1.50
Sokkia	DX 201-AC	k.A.	1.50
Sokkia	SX 101T	k.A.	k.A.
Spectra Precision	Focus 30	2.10 · 1.40	1.50
Topcon	IS 301	1.50	1.50
Topcon	PS 101	1.50	1.50

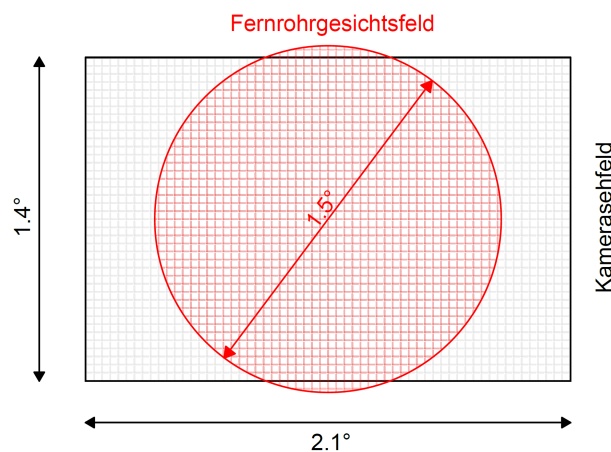
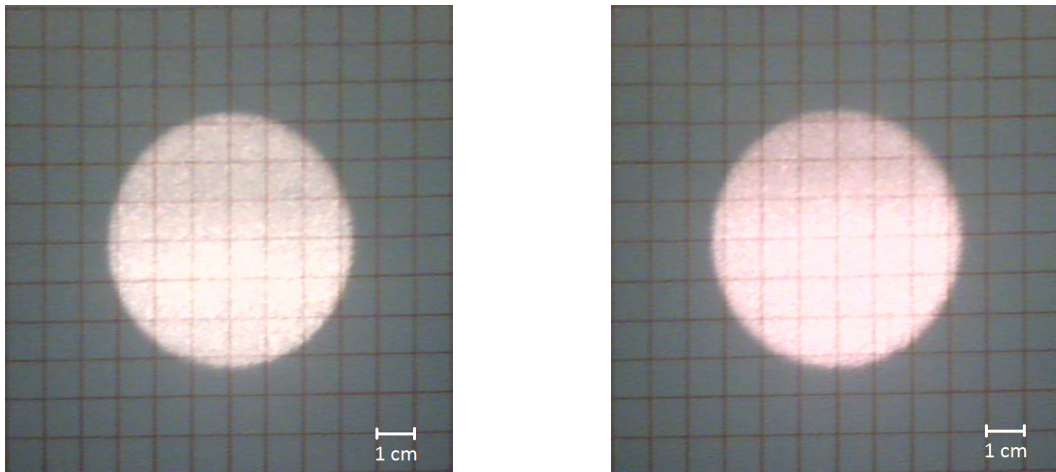


Abbildung 3.17: Das Kamerasehfeld der Focus 30 von Spectra Precision ist größer als das visuelle Fernrohrfeld (nach [Donath et al., 2011, Seite 353]).

Die Abbildung 3.18 verifiziert mit Hilfe einer Infrarotkamera die radialsymmetrische infrarote Ausleuchtung des ATR-Sensors bei den Totalstationen MS50 (3.18a) und TS15 (3.18b) von Leica Geosystems für eine Distanz von  $D \approx 2.7$  m.

In der Abbildung 3.19 werden die Spezifikationen für die Sehfelder der Leica MS50 und Leica TS15 dargestellt, die Tabelle 3.4 beinhaltet die Gegenüberstellung der gemessenen Sehfelder und deren Ausdehnung nach Angaben des Herstellers für eine Distanz von  $D \approx 2.7$  m.



a) Leica MS50

b) Leica TS15

Abbildung 3.18: Der Messbereich des ATR-Sensors für die Leica MS50 (3.18a) und für die Leica TS15 (3.18b) bei einer Distanz von  $D \approx 2.7$  m

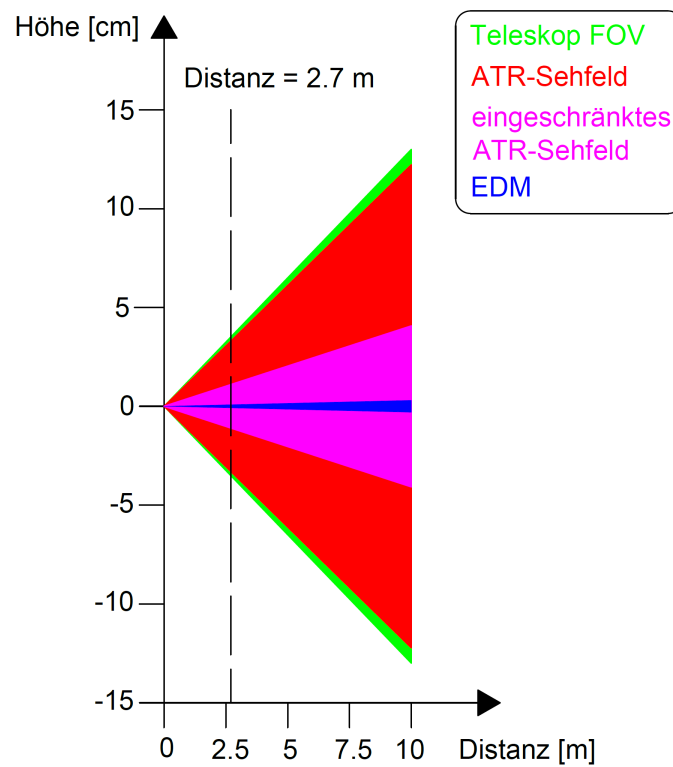


Abbildung 3.19: Die Sehfelder der Leica MS50 und Leica TS15 laut Angaben des Herstellers; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 11,56,57],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 130,168,200] bzw. nach Rücksprache mit dem Hersteller

Tabelle 3.4: Gegenüberstellung zwischen dem theoretischen und dem gemessenen vertikalen Sehfeld des ATR-Sensors bei einer Distanz von  $D \approx 2.7\text{ m}$ ; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seite 56],[Leica Geosystems, 2011, Seite 168]

Sehfeld	Herstellerangabe [cm]		gemessen [cm]		Differenz [cm]	
	MS50	TS15	MS50	TS15	MS50	TS15
ATR	6.6	6.6	$\approx 6.6$	$\approx 6.6$	$\approx 0$	$\approx 0$

Abhängig von der Größe des Kamerasehfelds, der Prismengröße sowie der Distanz zwischen Totalstation und Prisma können multiple Intensitätsspot am Kamerasensor detektiert werden. Falls diese Spots sich nicht überlappen, werden zwei Ziele vom Zielerfassungsmodul registriert. Unterschiedliches Vorgehen ist nun möglich. Topcon z.B. wählt als Ziel den Intensitätsspot, der dem Fadenkreuz am nächsten liegt, aus. Ausschließlich die Distanz zwischen Intensitätsschwerpunkt und Fadenkreuz fließt als Parameter in diesen Lösungsansatz ein, die reflektierte Signalstärke sowie die Intensitätsausdehnung sind irrelevant (siehe Abbildung 3.20) [Topcon, 2012a],[Topcon, 2013]).

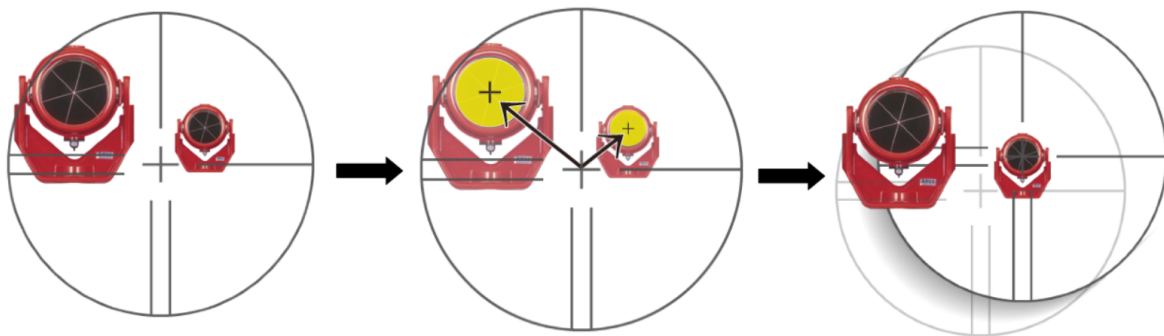


Abbildung 3.20: Im Falle von multiplen Prismen im Kamerasehfeld wird jenes als das korrekte identifiziert, das die kürzeste Distanz zwischen Prismenmittelpunkt und Fadenkreuz aufweist (aus [Topcon, 2012a]).

Diese Lösungsmethode bedingt jedoch einen Mindestabstand zwischen den Prismen. Bei Unterschreitung des Mindestabstands oder Überlappung von Prismen wird die Intensität aller angrenzenden Prismen in die Schwerpunktauswertung einbezogen und folglich ein grob falscher Messwert eruiert. Der Mindestabstand ist von mehreren Faktoren abhängig, doch besonders die relative Geometrie zwischen den Prismen und der Totalstation ist eine signifikante Einflussgröße [Topcon, 2012a].

Ein weiterer Ansatz zur korrekten Zielerfassung bei multiplen Prismen im Kamerasehfeld ist, die Ausdehnung des Kamerasehfelds zu verringern. Nach Rücksprache mit dem Hersteller Leica Geosystems AG kann z.B. bei der Leica TS15 das ATR-Sehfeld auf 1/3 des ursprünglichen Sehfelds reduziert werden (siehe Abbildung 3.19). Durch die Einschränkung des Kamerasehfelds wird die Anzahl an Intensitätsspot reduziert und im Idealfall alle bis

auf das gesuchte Prisma von der Lösungsmenge ausgeschlossen. Ein kleines Kamerasehfeld birgt jedoch die Gefahr, dass bei zu grober manueller Anvisierung des Ziels das Prisma nicht detektiert wird. Eine der Messsituation angepasste Einstellung des Kamerasehfelds sowie eine grobe manuelle Anzielung des Prismas beschleunigen den Prozess der automatischen Zielerfassung erheblich.

### Rechenintensive Differenzbildung

Neben der Richtigkeit der Zielerfassung ist in praktischen Anwendungen die zeitliche Komponente ein entscheidendes Qualitätskriterium für die Leistungsfähigkeit eines Zielerfassungsmoduls. Die Zeitspanne zwischen dem Auslösen der automatischen Zielerfassung und der erfolgreichen Prismendetektion soll so gering wie möglich ausfallen, um eine effiziente Arbeitsweise zu gewährleisten, und ist neben dem Kamerasensor motorenspezifisch. Besonders kritisch ist die Zielerfassung kinematischer Objekte und deren kontinuierliche Verfolgung. Dieser Prozess basiert auf einem hochfrequenten Wiederholvorgang der automatischen Zielerfassung.

Die mit der automatischen Zielerfassung einhergehende Differenzbildung zweier Fotos stellt eine rechenintensive Anforderung an das Sensorsystem dar. Dieser Vorgang wird je nach Totalstation zwischen 80- und 200-mal pro Sekunde durchgeführt, um eine robuste und stabile Zielverfolgung zu gewährleisten ([Stempfhuber und Kirschner, 2008],[Topcon, 2013] und [Donath et al., 2011, Seite 353]).

## 3.4 Quadrantendetektor

Ein in der Konzeption dem kamerabasierten System ähnliches Sensorsystem für die automatische Zielerfassung stellt der Quadrantendetektor dar. Diese Technologie wird in den Totalstationen der Firma Trimble eingesetzt, um sowohl passive als auch aktive Zielprismen automatisch zu lokalisieren (siehe Tabelle 3.1).

### 3.4.1 Intensitätsdetektion

Analog zum kamerabasierten System wird auch beim Quadrantendetektor ein vom Prisma reflektiertes Signal an der Empfangseinheit detektiert. Bei der Erfassung von passiven Prismen wird ähnlich wie bei den Totalstationen mit Kamerasensoren ein infrarotes Licht ausgesandt (Trimble verwendet eine Wellenlänge von  $\lambda = 785 \text{ nm}$  [Trimble, 2009b]), vom zu erfassendem Prisma reflektiert und in der lichtempfindlichen Empfangseinheit registriert. Der Strahlengang des Messsignals ist ähnlich dem aus Abbildung 3.8 und ist in Abbildung 3.21 schematisch visualisiert.

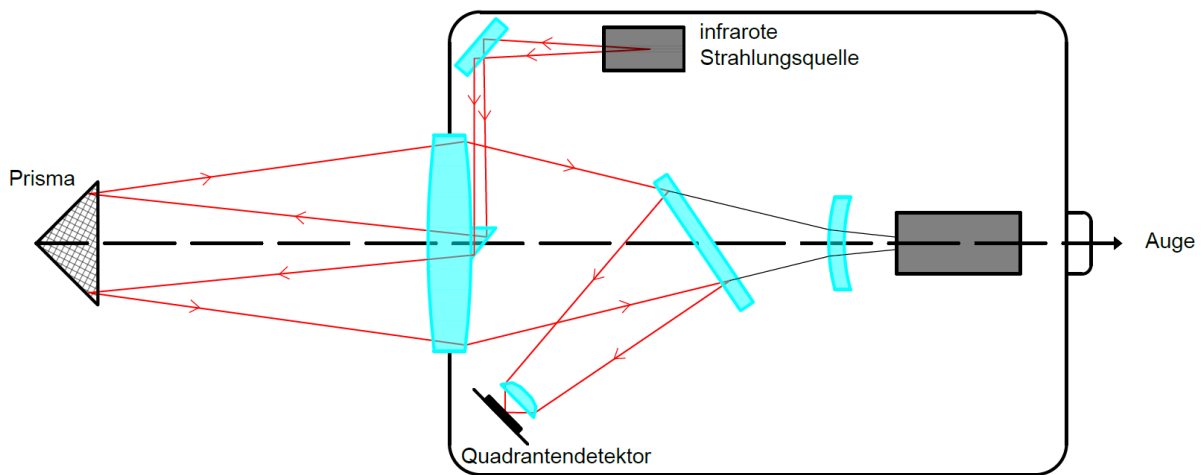


Abbildung 3.21: Der Strahlengang des Zielerfassungssystems bei der Trimble S6 Totalstation (nach [Trimble, 2009b]).

Im Gegensatz zum Pixelsystem der Kamera basiert der Quadrantendetektor auf vier lichtempfindlichen Photodioden, welche quadratisch angeordnet sind. Das vom Prisma ausgehende Lichtsignal wird auf die Photodioden projiziert und in einen elektrischen Impuls umgewandelt, sodass dessen Stromstärke gemessen werden kann [Trimble, 2009a]. Durch die Verwendung von vier Photodioden kann eine Positionsermittlung in vertikaler und horizontaler Richtung erfolgen.

Das Funktionsprinzip wird im Detail anhand der Abbildung 3.22 erklärt und wurde größtenteils [Trimble, 2009d] entnommen: Die linke Graphik zeigt den Quadrantendetektor mit den vier lichtempfindlichen Photodioden A,B,C und D. Die Vorzeichenbelegung der Quadranten ist in Tabelle 3.5 ersichtlich. Der rote Kreis signalisiert die Spotposition des Prismas, das die schwarze Trajektorie verfolgt. Die relative Bewegung zwischen dem Prisma und dem Quadrantendetektor resultiert aus der Nachführung des Teleskops und der damit verbundenen absoluten Positionsänderung des Quadrantendetektors. Auf der rechten Seite der Abbildung 3.22 wird die zeitliche Komponente gegenüber dem Signal der Photodioden dargestellt. Diese können je nach Quadrant positiv oder negativ ausfallen und dies jeweils für die horizontale (grüne Linie) und vertikale (strichlierte blaue Linie) Komponente.

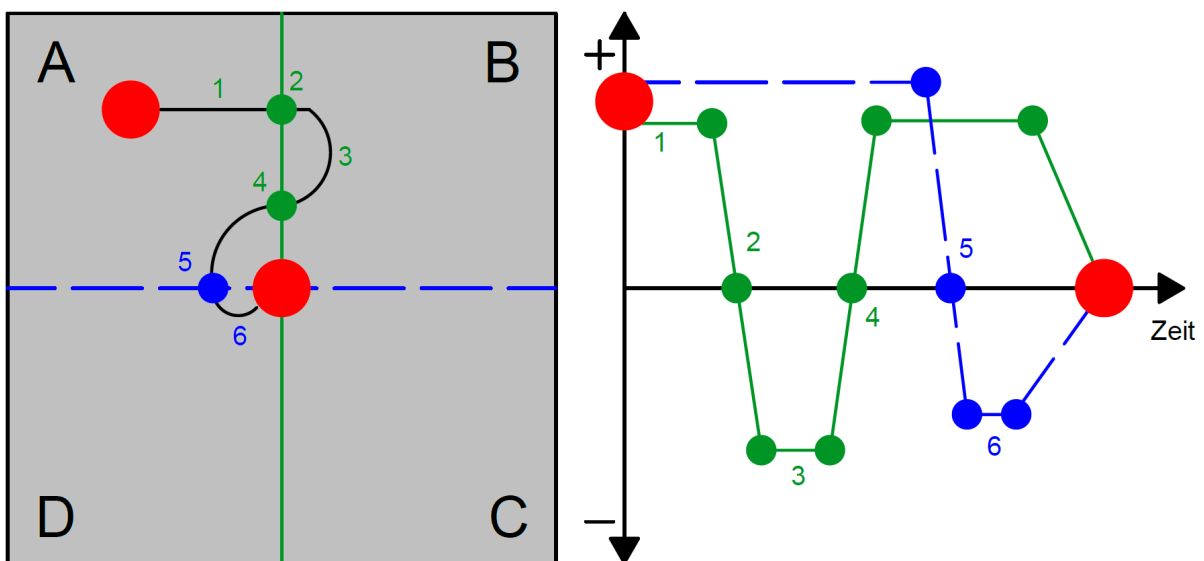


Abbildung 3.22: Schrittweise Nachführung des Teleskops, bis der Prismenspot mit dem Zentrum des Quadrantendetektors zusammenfällt (nach [Trimble, 2009d])

Tabelle 3.5: Die Vorzeichenbelegung für die vier Photodioden des Quadrantendetektors

Quadrant	horizontale Richtung	vertikale Richtung
A	+	+
B	-	+
C	-	-
D	+	-

Die Ausgangssituation im Beispiel der Abbildung 3.22 geht von einer Intensitätsdetektion in der Photodiode des Quadranten A aus. Die Motorisierung versucht das Teleskop so zu positionieren, dass der Spot im Zentrum des Quadrantendetektors lokalisiert wird. Die dafür benötigten Steueranläufe werden simultan in beide Richtungen durchgeführt.

Die nachfolgenden Nummerierungszahlen beziehen sich auf die Abbildung 3.22. Die Beschreibung der Funktionsweise orientiert sich an [Trimble, 2009d].

- 1) Die Motorisierung führt das Teleskop in horizontaler Richtung vom Quadranten A in Richtung des Quadranten B. Dabei wird die gesamte Energie stets im Quadranten A detektiert.
- 2) Das Intensitätsniveau fällt linear vom positiven in den negativen Bereich. Dies resultiert aus der Nachführung des Teleskops und der damit verbundenen Tatsache, dass das Lichtsignal in den Quadranten A und B detektiert wird. Im Punkt 2 der Abbildung 3.22 verteilt sich die Energie im Verhältnis 50% zu 50% auf beide Quadranten. Das Fadenkreuz zeigt in horizontaler Richtung exakt zum Prismenmittelpunkt.
- 3) Die Energie wird zur Gänze im Quadranten B detektiert, weswegen der Befehl an die Motorisierung erfolgt, eine Nachführung in die entgegengesetzte Richtung durchzuführen.
- 4) Es folgen dieselben Schritte wie zuvor, jedoch in die entgegengesetzte Richtung. Ein ständiges Zusammenspiel zwischen Quadrantendetektor und Motorisierung versucht die Intensität auf zwei Photodioden aufzuteilen.
- 5) Bislang wurde nur die horizontale Richtungsinformation betrachtet. Zeitgleich wurde aber auch die vertikale Information analysiert, welche bis jetzt immer auf einen positiven Quadranten fiel. Erst jetzt verteilt sich die Energie auch in vertikaler Richtung auf zwei Quadranten. An der Stelle, wo die Intensität zur Hälfte im Quadranten A und zur Hälfte im Quadranten D detektiert wird, befindet sich das Fadenkreuz in der gesuchten vertikalen Position. Der Übergang zwischen den beiden Quadranten ist erneut linear.
- 6) Das Pendant zu Punkt 3: Es fällt die gesamte Intensität in den Quadranten D, sodass eine Ansteuerung in die entgegengesetzte Richtung erfolgen muss.

Die Arbeitsschritte werden so lange wiederholt, bis sich die detektierte Intensität mit dem Zentrum des Quadrantendetektors überdeckt. Die Motorisierung und das automatische Zielerfassungsmodul bilden beim Verfahren mittels Photodioden einen Regelkreis, der andauernd und hochfrequent durchgeführt werden muss.

### Berechnung des Intensitätsschwerpunkts

Das Funktionsprinzip wurde anhand einer vereinfachten Situation demonstriert und zeigt das Zusammenspiel zwischen Motorisierung und Intensitätsdetektion. In der Praxis kann der Spot allerdings nicht immer eindeutig einem oder zwei Quadranten zugeordnet werden, vielmehr verteilt sich die Energie auf allen Quadranten (siehe Abbildung 3.23).

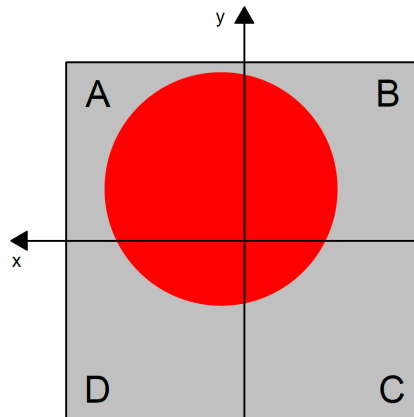


Abbildung 3.23: Die Intensität wird in allen Quadranten zeitgleich detektiert (nach [Trimble, 2009a]).

Auf Grund dessen muss der Schwerpunkt des Intensitätsspots eruiert werden, um eine exakte Positionierung des Teleskops zur Prismenmitte zu gewährleisten. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme der Formeln 3.2 und 3.3. Anschließend kann die Translation in x- und y-Richtung berechnet werden und der Motor das Teleskop zum gesuchten Prismenpunkt nachführen.

$$2x = (A + D) - (B + C) \quad (3.2)$$

$$2y = (A + B) - (C + D) \quad (3.3)$$

Der Intensitätsschwerpunkt kann nur ermittelt werden, wenn alle vier Photodioden simultan ein Signal detektieren (siehe Gleichungen 3.2 und 3.3). Auf Grund dessen kann bei einer Spotdetektion in nur einem Quadranten keine Distanz zwischen dem Intensitätsschwerpunkt und dem Zentrum des Quadrantendetektors berechnet werden und folglich der Motorisierung kein numerischer Wert für die Nachführung des Teleskops übergeben werden. Notwendigerweise muss eine Suche nach dem Schema der Abbildung 3.22 erfolgen, bis der Prismenspot in allen vier Photodioden detektiert werden kann und eine exakte Positionierung des Teleskops zur Prismenmitte möglich ist.



### 3.4.2 Eigenschaften und Problemstellungen der Quadrantentechnologie

#### Multiple Prismen im Sehfeld des Quadrantendetektors

Die Gefahr der Detektion mehrerer Prismen (siehe Abbildung 3.16) ist auch bei der Quadrantentechnologie real und wird durch Limitierung des virtuellen Sehfelds reduziert. Die Totalstationen des Herstellers Trimble weisen, wie die Focus 30 von Spectra Precision, unterschiedlich große Sehfelder auf (siehe Tabelle 3.6)

Tabelle 3.6: Die Sehfelder der Totalstationen der Trimble S-Serie; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2013b],[Trimble, 2009d],[Trimble, 2009h]

<b>Bezeichnung</b>	<b>Ausdehnung [°]</b>
Fernrohrsehfeld	1.50
Autolock	2.30
FineLock	0.23

Während das Sehfeld der Autolock-Technologie einen größeren Sehbereich als das Fernrohr abdeckt, detektiert die FineLock-Technologie in der Defaulteinstellung Intensitäten in einem Bereich, der gegenüber dem Autolock-Sehfenster um das Zehnfache kleiner ausfällt und somit ideal für die automatische Zielerfassung in Arbeitsgebieten mit mehreren Prismen ist [Trimble, 2009a].

Die Abbildung 3.24 stellt die vertikale Ausdehnung des jeweiligen Sichtfelds in Abhängigkeit von der Distanz dar. Zusätzlich sind die Divergenzwinkel der EDM-Laserstrahlen eingezeichnet und verdeutlichen den für die Distanzmessung relevanten Messbereich. Zur Verifikation wurden mit der Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S8 HP Totalstation Messungen auf ein  $\approx 2.7$  m entferntes Rasterblatt (1 cm · 1 cm) (in Abbildung 3.24 als strichlierte schwarze Linie markiert) durchgeführt und diese mittels einer Infrarotkamera visuell erfasst (siehe Abbildung 3.25). Auf Grund der mäßigen Visualisierung mittels der Infrarotkamera wurden die Abbildungen aus 3.25 in den Abbildungen 3.26 skizzenhaft nachgestellt und ermöglichen eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Spots. Des Weiteren repräsentiert die strichlierte schwarze Linie in der Abbildung 3.26 die Position des Fadenkreuzes und verifiziert die Asymmetrie des EDM-Spots der Trimble S6 DR 300+ Totalstation.

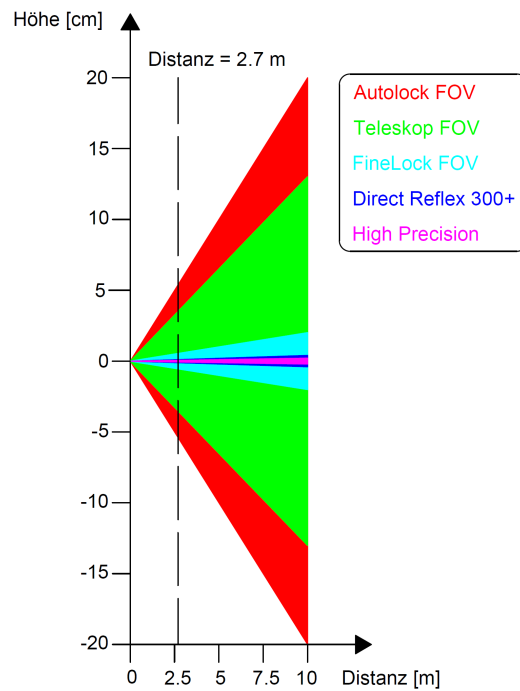
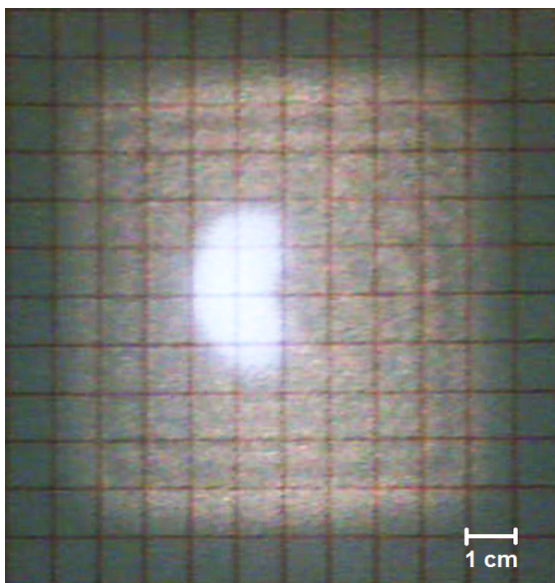
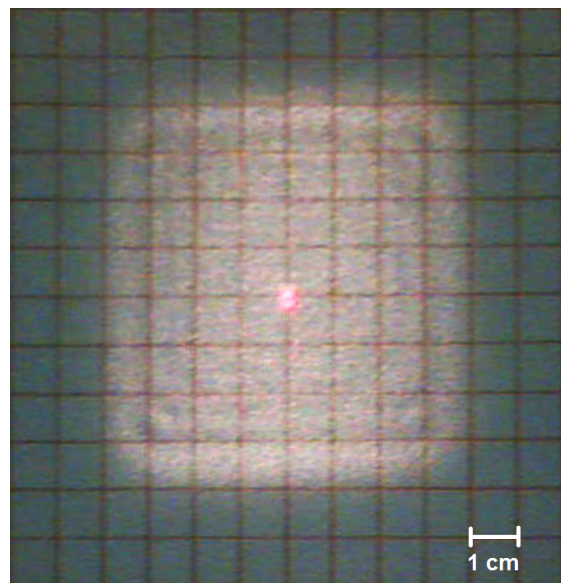


Abbildung 3.24: Die Sehfelder der einzelnen Sensoren bei der Trimble S-Serie; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2009d],[Trimble, 2013b],[Trimble, 2009h],[Trimble, 2010e, Seite vi],[Trimble, 2007]

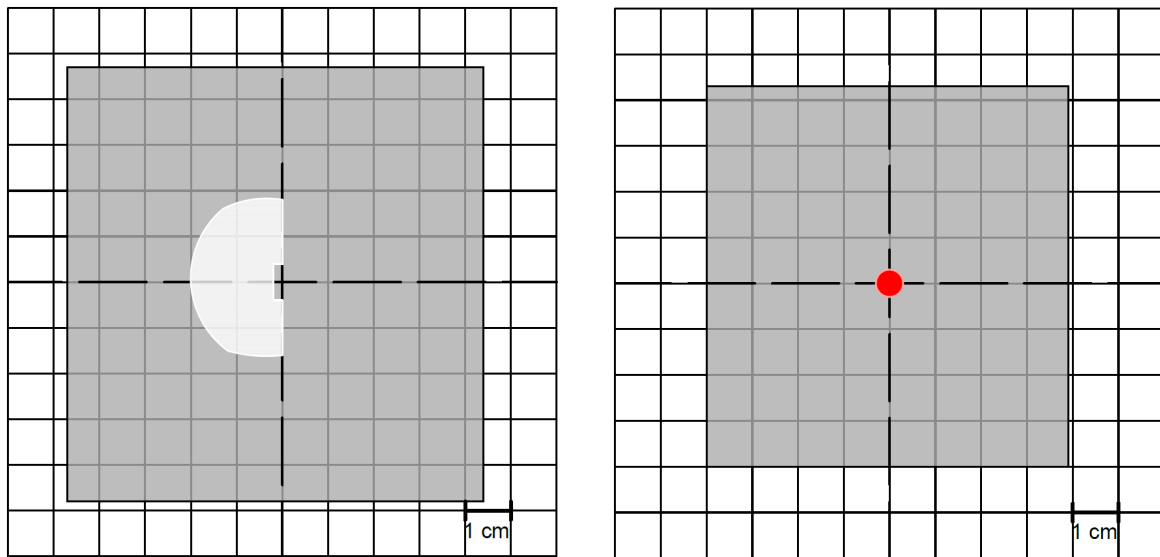


a) Trimble S6 DR 300+



b) Trimble S8 HP

Abbildung 3.25: Der Autolock-Messbereich sowie der EDM-Spot der Trimble S6 DR 300+ (3.25a) und der Trimble S8 HP (3.25b)



a) Trimble S6 DR 300+

b) Trimble S8 HP

Abbildung 3.26: Skizzenhafte Darstellung der Sehfelder und deren Lage gegenüber dem Fadenkreuz

Die Tabelle 3.7 verdeutlicht, dass die theoretischen Angaben des Autolocks (siehe Abbildung 3.24) näherungsweise mit den realen Werten (siehe Abbildung 3.25) übereinstimmen. Demgegenüber weist der EDM-Spot der Trimble S8 HP bei sehr kurzen Distanzen einen gegenüber den Angaben größeren Messfleck auf.

Tabelle 3.7: Der Vergleich zwischen dem theoretischen und dem gemessenen vertikalen Sehfeld bei einer Distanz von  $D \approx 2.7$  m; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2009d],[Trimble, 2010e, Seite vi]

Sehfeld	Herstellerangabe [cm]		gemessen [cm]		Differenz [cm]	
	S8 HP	S6 DR 300+	S8 HP	S6 DR 300+	S8 HP	S6 DR 300+
Autolock	10.8	10.8	$\approx 8.0$	$\approx 9.2$	$\approx 2.8$	$\approx 1.6$
EDM	0.1	k.A.	$\approx 0.5$	$\approx 3.5$	$\approx 0.4$	k.A.

Erforderlich zur Verwendung der FineLock-Technologie ist eine manuelle Anzielung des Prismas oder eine motorisierte Positionierung des Fernrohrs in Richtung des Prismas, sodass das Ziel im Sehfeld der FineLock-Technologie ist. Eine Zielsuche sowie eine Zielverfolgung ist nur mittels Autolock möglich [Trimble, 2010a], [Trimble, 2010d].

Im Gegensatz zu kamerabasierten Systemen (siehe Abbildung 3.20) verfügt die Technologie eines Quadrantendetektors nicht über die Entscheidungskraft, zwischen mehreren detektierten Intensitäten eine spezielle auszuwählen. Folglich werden bei der Detektion von multiplen Intensitäten alle in den Prozess miteinbezogen, sodass eine Ausgleichung aller

Intensitäten erfolgt. Daraus resultiert die Lokalisierung eines fiktiven Prismas und somit ein grob falscher Messwert (siehe Abbildung 3.27).

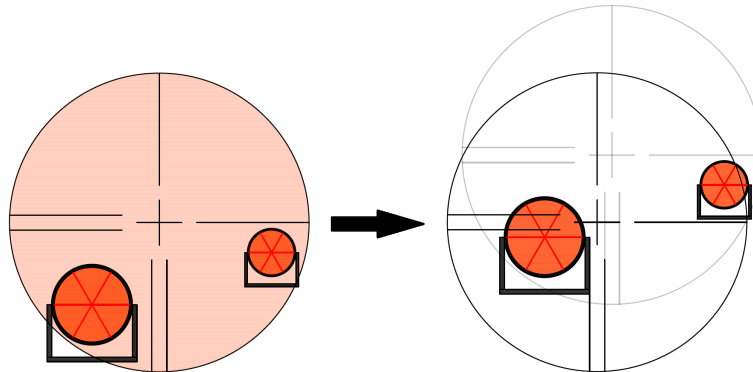


Abbildung 3.27: Der Quadrantendetektor detektiert alle im Sehfeld der Feinanzielung liegenden Intensitäten und gleicht diese zu einem fiktiven Intensitätspot aus.

### Fremdreflexionen

Die Nachführung des Teleskops zur Prismenmitte wird durch die Detektion von Intensitäten am Quadrantendetektor definiert. Im Gegensatz zu den kamerabasierten Systemen erlaubt die Technologie des Quadrantendetektors keine Analyse der detektierten Intensität. Eine Formanalyse und ein Plausibilitätstest können bei der Signalmessung mittels Photodioden nicht angewandt werden.

Stark reflektierende Objekte (z.B. Verkehrsschilder, Warnwesten) können an den Photodioden des Quadrantendetektors als Signal detektiert werden, weswegen ein grob falscher Intensitätsschwerpunkt ermittelt wird und eine falsche Nachführung das Teleskop grob deplatziert. Bei der Detektion mehrerer Spots erfolgt eine Ausgleichung aller detektierten Intensitäten, wenngleich auch nicht sichergestellt werden kann, ob diese von einem Prisma stammen.

Besonders bei starker Sonneneinstrahlung und/oder stark reflektierende Objekte in der Umgebung des Prismas sind Fremdreflexionen eine potentielle Fehlerquelle bei der automatischen Zielerfassung basierend auf der Quadrantentechnologie.

### Acht Photodioden

Das Sensorsystem von Trimble zur automatischen Zielerfassung basiert auf der Detektion von Intensitäten mittels acht Photodioden, wobei jeweils vier Photodioden einen Quadrantende-

tektor bilden (siehe Abbildung 3.28)[Trimble, 2009a]. Die Aufteilung in zwei Sensoren mit je vier Photodioden ist durch die Sensitivitätssteigerung und die daraus resultierende Variabilität bezüglich des Anwendungsbereichs begründet.

- **grober Quadrantendetektor**

Die vier groben Segmente von diesem Quadrantendetektor ( $A_g - D_g$  in Abbildung 3.28) dienen der Zielsuche sowie der Zielerfassung im Nahbereich bis zu einer Distanz von ca. 25 m. Sehr kurze Zielweiten produzieren einen großen Intensitätsfleck am Detektor, sodass ein zu kleiner Detektor das Signal nicht auswerten könnte [Trimble, 2009a].

- **feiner Quadrantendetektor**

Im Zentrum des groben Quadrantendetektors befinden sich vier quadratisch angeordnete Photodioden ( $A_f - D_f$  in Abbildung 3.28) zur Intensitätsdetektion schwacher Signale [Stempfhuber, 2009]. Intensitätsarme Signale resultieren zumeist aus der Messung zu weit entfernter Prismen, weswegen zu deren Detektion hochsensitive Photodioden eingesetzt werden.

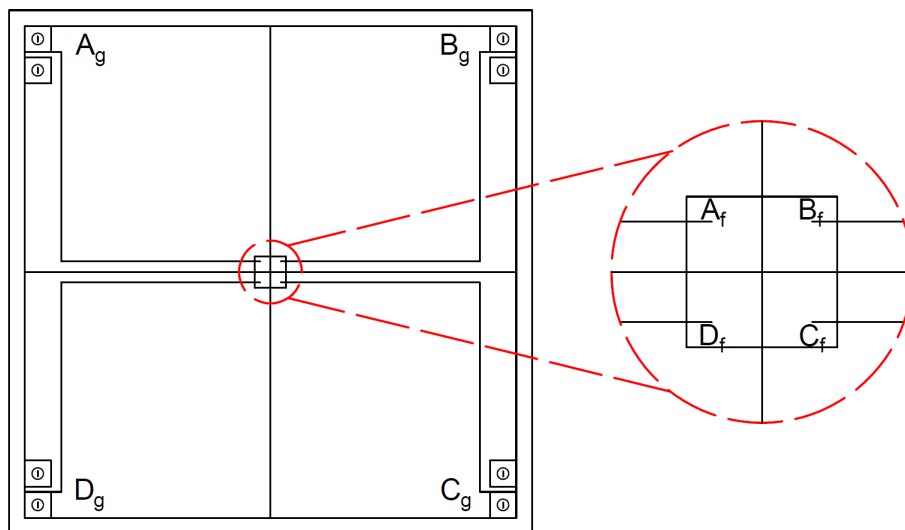


Abbildung 3.28: Jeweils vier Photodioden bilden einen Quadrantendetektor (nach [Stempfhuber, 2009])

Die Kombination zweier unterschiedlicher Quadrantendetektoren erlaubt die automatische Zielerfassung von Prismen im Nahbereich (ab 0.2 m) und im Fernbereich (bis zu 2500 m im LongRange Modus) [Trimble, 2013b].

### **Hochfrequenter Regelkreis**

Der Einsatz eines Quadrantendetektors zur automatischen Zielerfassung benötigt ein hochfrequentes Zusammenspiel zwischen der Motorisierung der Totalstation und deren Zielerfassungsmodul, um den Nachteil der fehlenden Ablagenberechnung zu egalisieren.

Der Quadrantendetektor der Trimble S6 Totalstation detektiert pro Sekunde 333 Lichtsignale. Diese Auswertefrequenz ist deutlich höher als bei den Totalstationen, deren Zielerfassungsmodul auf einem Kamerasensor basiert (siehe Kapitel 3.3.5), und kann durch die fehlende Formanalyse und Plausibilitätsprüfung begründet werden.

Die Auswertefrequenz ist an die Drehgeschwindigkeit des Motors der Totalstation (1 rad/s) und das Field of View des Quadrantendetektors (siehe Tabelle 3.6) angepasst und erlaubt dadurch eine stabile Zielverfolgung sowie eine schnelle Auffindung des Prismas [Trimble, 2009g].

## **3.5 Prisma**

Das Zielerfassungsmodul ist für die automatische Anzielung des Teleskops zu einem Prisma konzipiert. Diesbezüglich ist eine einwandfreie Funktionalität des Zielerfassungssystems nur in Kombination mit einem Prisma gewährleistet und rechtfertigt den hohen Stellenwert des künstlichen Ziels bei der automatischen Zielerfassung.

Die Prismen weisen je nach Typ besondere Eigenschaften auf und sind für verschiedene Anwendungsbereiche optimiert, jedoch ist allen Prismen die Eigenschaft gemein, ein Lichtsignal in dieselbe Richtung zu reflektieren, aus der es empfangen wurde.

### 3.5.1 Prismentyp

- **Rundprisma**

Rundprismen werden schon seit längerer Zeit von den Herstellern als ideales Ziel für Totalstationen produziert. Infolgedessen sind diese Prismentypen technologisch sehr weit entwickelt und ermöglichen äußerst präzise Messungen. Rundprismen weisen allerdings nur einen eingeschränkten Bereich auf, aus der Lichtsignale empfangen werden können, und müssen daher an die Zielachse der Totalstation ausgerichtet sein [Mao und Nindl, 2010].

- **360° Prisma**

Die Bezeichnung dieses Prismentyps deutet auf seine besondere Eigenschaft hin: Es kann aus allen horizontalen Richtungen ein Signal reflektieren und hat diesbezüglich keinerlei Einschränkungen. Demnach ist es ideal für die Zielverfolgung und die Messung zu kinematischen Objekten. Dem Vorteil der omnidirektionalen Anzielung stehen das höhere Gewicht, die Größe sowie die geringe Genauigkeit gegenüber [Mao und Nindl, 2010]. Speziell im Zusammenhang mit dem Zielerfassungsmodul ergeben sich periodische Effekte in den Messungen, die den Einsatz von 360° Prismen für ingenieurgeodätische Aufgaben limitieren (siehe [Stempfhuber und Kirschner, 2008]).

Während die Hersteller bei der Entwicklung von Rundprismen (siehe Abbildung 3.29a) eine einheitliche Strategie verfolgen, werden bei den 360° Prismen unterschiedliche Konzeptionen gewählt. Möglichkeiten sind gegeben durch die Ringanordnung von kleinen Rundprismen (siehe Abbildungen 3.29c und 3.29d) oder durch Anordnung von Tripelprismen (siehe Abbildung 3.29b).



a) Rundprisma



b) 360° Tripelprisma



c) 360° Ringprisma



d) 360° aktives Prisma

Abbildung 3.29: Auswahl verschiedener Prismentypen (aus [Mao und Nindl, 2010]), [Trimble, 2012]).

### 3.5.2 Prismengröße

Bedingt durch denselben Divergenzwinkel des emittierten und reflektierten Signals sowie die Tatsache, dass das Zielerfassungsmodul auf die Emittierung des infraroten Signals abgestimmt ist, ist die Prismengröße ein signifikanter Einflussfaktor bei der automatischen Zielerfassung.

Die korrekte Prismengröße ist eine Funktion des Durchmessers (große Halbachse) der Objektivlinse der Totalstation und wird anhand der Abbildung 3.30 deutlich.

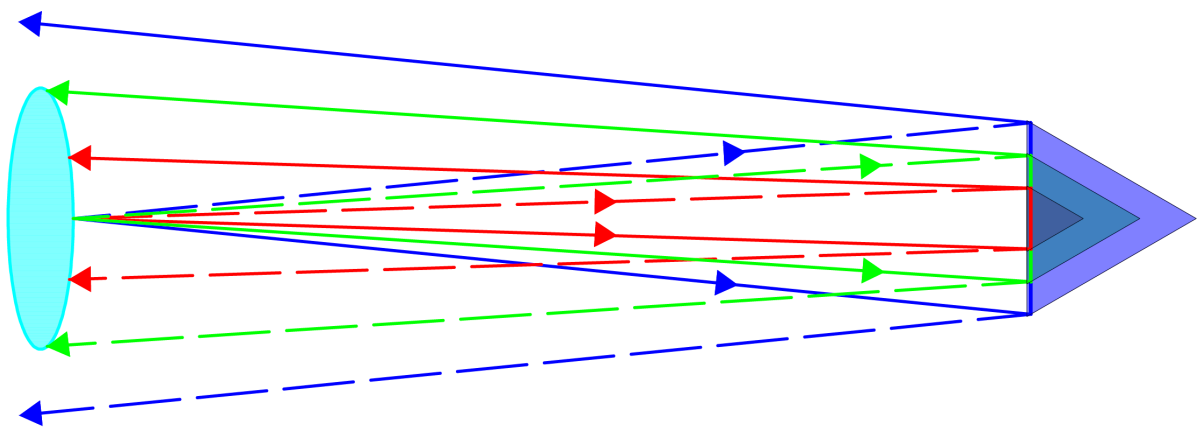


Abbildung 3.30: Die Prismengröße beeinflusst den Strahlengang (nach [Trimble, 2009f]).

Es wird zwischen drei Fällen unterschieden (die Farbcodierung bezieht sich auf Abbildung 3.30):

**1) Prismengröße < halber Durchmesser der Objektivlinse (rot)**

Es wird nicht die maximal mögliche Detektionsfläche des Zielerfassungssensors genutzt und die Auswertung der Prismenposition erfolgt suboptimal.

**2) Prismengröße > halber Durchmesser der Objektivlinse (blau)**

Nur ein Teil des ausgesandten Signals kann detektiert werden und erneut geht Information bezüglich der Prismenposition verloren.



### 3) Prismengröße = halber Durchmesser der Objektivlinse (grün)

Das ausgesandte Signal verteilt sich großflächig auf die Detektionsfläche des Sensors und die Prismenposition kann bestmöglich detektiert werden.

Die in Abbildung 3.30 dargestellten Strahlengänge und deren anschließende Erklärung im Zusammenhang mit der großen Halbachse der Linse stellen den theoretisch einfachsten Fall dar. Reale Messsignale werden durch optische Effekte (z.B. Refraktion) beeinflusst, weswegen die beste Größe für ein Prisma geringfügig von dem halben Durchmesser der Objektivlinse abweichen kann [Trimble, 2009f].

### 3.5.3 Aktives Prisma

Aktive Prismen senden ein Signal aus, um die Lokalisierung für die Totalstation zu erleichtern (siehe Abbildung 3.29d). Demnach nehmen diese Prismentypen aktiv an der automatischen Zielerfassung teil und sind im Gegensatz zu passiven Prismen nicht ausschließlich Reflektoren.

Im Falle des MultiTrack-Systems von Trimble sendet das Prisma einen infraroten Strahl in alle Richtungen aus (siehe Abbildung 3.31a), wird von der Totalstation empfangen und die Position, aus der das Signal kommt, wird detektiert. Zusätzlich wird aber von der Totalstation selbst auch noch bei der automatischen Zielerfassung ein infrarotes Signal generiert, am Prisma reflektiert und empfangen (siehe Abbildungen 3.5, 3.6 und 3.21), sodass der Sensor des Zielerfassungsmoduls zwei Signale parallel prozessieren muss. Je nach gewählter Einstellung werden die Signale ausgewertet und im optimalen Fall das aktive Signal des Prismas für die horizontale Position und das passive Signal des Prismas für die vertikale Position verwendet [Trimble, 2009c].

Der Vorteil von aktiven Zielerfassungssystemen liegt in der eindeutigen Zielidentifikation. Das Fehlerpotential multipler Prismen im Sehfeld des Zielerfassungsmoduls kann zwar mittels verschiedener Einstellungsmöglichkeiten reduziert, aber bei Verwendung eines passiven Prismas nicht eliminiert werden. Die Kombination aus einer Totalstation und einem aktiven Prisma löst die Prismenidentifikation, indem ein codiertes Signal verwendet wird. Diesbezüglich akzeptiert die Totalstation nur jenes Signal, das vom gesuchten Prisma ausgeht, und ignoriert alle anderen Signale. Die Codierung erfolgt über eine einfache Frequenzmodulation [Trimble, 2009g].



a) aktiv



b) passiv

Abbildung 3.31: Das MultiTrack 1000 Prisma im aktiven (3.31a) und passiven (3.31b) Zustand

Die Signalgenerierung bei aktiven Prismen erfordert eine Stromversorgung und führt zur Notwendigkeit eines Akkus am Prisma. Dadurch wird das Prisma deutlich schwerer, was vor allem im Ein-Personen-Betrieb negativ auffällt, zudem wird auch die Einsatzdauer limitiert.

In Abwägung der Vor- und Nachteile bieten nicht alle Hersteller aktive Prismensysteme an (siehe Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Nicht alle Hersteller bieten aktive Prismensysteme an.

Hersteller	aktives Prismensystem
Leica Geosystems	×
Sokkia	✓
Spectra Precision	×
Topcon	✓
Trimble	✓

### 3.5.4 Reflexfolie

Der gegenüber natürlichen Objekten stärkere Reflexionsgrad von Reflexfolien führt zu einer größeren Reichweite und besseren Messpräzision bei der Distanzmessung. Reflexfolien sind kostengünstiger als Prismen und werden daher oft als Ersatz für diese verwendet, jedoch kann die Messpräzision sowie die Reichweite von Distanzmessungen zu Prismen nicht

erreicht werden. Reflexfolien reflektieren das Eingangssignal diffus in alle Richtungen und unterscheiden sich somit signifikant von Prismen.

Auf Grund ihrer starken Reflexion können auch die automatischen Zielerfassungssysteme die von der Reflexfolie reflektierten Infrarotsignale auf kurze Distanzen (bis ca. 50 m) detektieren. Die Qualität der automatischen Messung zu Reflexfolien ist erheblich schlechter als zu Prismen und ist insbesondere vom Einfallswinkel abhängig.

### 3.6 Genauigkeitsspezifikation

Die Genauigkeit, die mit der automatischen Zielerfassung erzielt werden kann (siehe Abbildung 3.32), ist eine Funktion vieler Faktoren, die im Wesentlichen in drei Gruppen unterteilt werden können und ähnlich denen aus Kapitel 2.3.5 sind.

#### 1) Totalstation

Das Sensorsystem zur automatischen Zielerfassung ist ein entscheidendes Qualitätskriterium. Der zur Intensitätsdetektion notwendige Detektor kann sowohl auf Basis einer Kamera als auch auf Basis von vier lichtsensitiven Photodioden beruhen. Des Weiteren werden verschiedene Laser zur Signalgenerierung verwendet, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

#### 2) Umgebungsbedingung

Die unterschiedlichen Luftschichten in der Atmosphäre bewirken keinen geraden Strahlengang, refraktive Effekte mindern die Genauigkeit der automatischen Zielerfassung. Insbesondere eine starke Sonneneinstrahlung schmälert die Leistungsfähigkeit der automatischen Zielerfassung, denn zusätzliche Reflexionen beliebiger Objekte können als Störsignale am Sensormodul detektiert werden.

#### 3) Zielobjekt

Prismen sind wegen ihrer gerichteten und starken Reflexion prädestinierte Zielobjekte für die automatische Messung mittels Totalstationen. Form und Größe der Prismen beeinflussen die Intensität und Ausdehnung des Spots wesentlich und sind daher mitentscheidend im Funktionsprinzip der automatischen Zielerfassung.

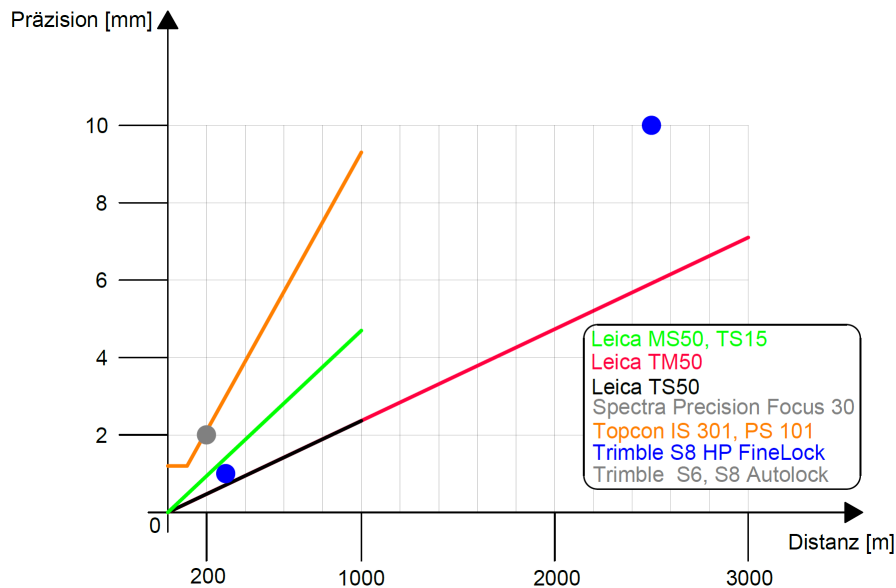


Abbildung 3.32: Die Messpräzision der automatischen Zielerfassungssysteme laut Spezifikation der Hersteller; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 54,55],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 165,166],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 156],[Topcon, 2012b, Seite 162],[Trimble, 2013b],[Trimble, 2011a]; k.A. für Trimble S3, Sokkia DX 201-AC, Sokkia SX 101T

### Reichweite

Das Konzept der automatischen Zielerfassung beruht auf der Detektion eines von dem zu erfassenden Objekt stammenden Signals. Folglich funktioniert dieses Prinzip, solange die Möglichkeit einer Signaldetektion gegeben ist.

Die Intensität eines Signals ist invers proportional zur quadratisch zurückgelegten Distanz und ist schematisch in Abbildung 3.33 dargestellt.

Die rapide Abnahme der Signalstärke mit zunehmender Distanz verkompliziert die Messung zu Prismen auf lange Distanzen. Doch vor allem der große Einsatzbereich der automatischen Zielerfassung ist bemerkenswert. Betrachtet man die Tabelle 3.9 und vergleicht die dort eingetragenen Distanzbereiche mit den zugehörigen Signalstärken (siehe Abbildung 3.33), so wird deutlich, welche hohen technischen Anforderungen an das Sensormodul gestellt werden. Demnach müssen Kameramodul und Quadrantendetektor auf einer Messdistanz von  $D=1$  m ein 250000-mal so starkes Signal verarbeiten und auswerten können wie auf einer Distanz von  $D=500$  m [Trimble, 2009e].

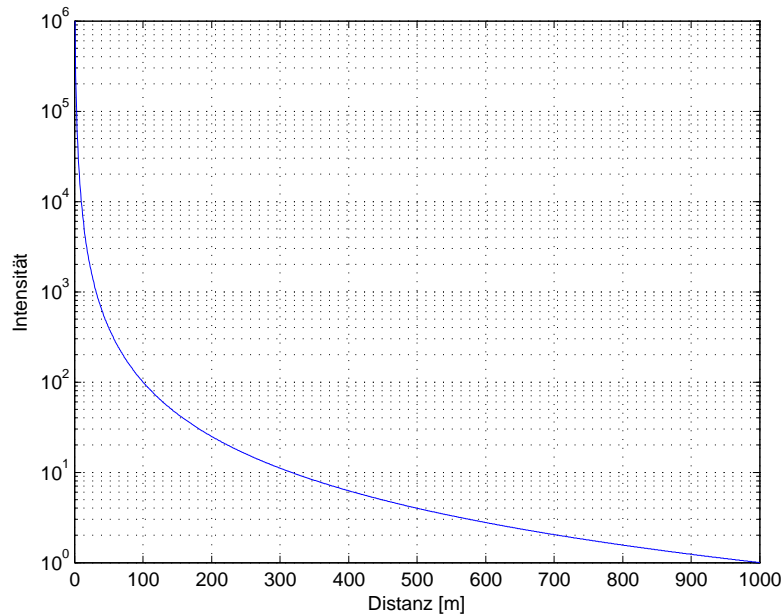


Abbildung 3.33: Signalintensität in Abhängigkeit von der Distanz (nach [Trimble, 2009e])

Tabelle 3.9: Die minimale und maximale Messdistanz der automatischen Zielerfassung; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2013, Seiten 54,55],[Leica Geosystems, 2011, Seiten 165,166],[Sokkia, 2014],[Sokkia, 2012],[Spectra Precision, 2012],[Topcon, 2009, Seite 156],[Topcon, 2012b, Seiten 161,162],[Trimble, 2013a],[Trimble, 2011a],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]

Totalstation		Reichweite [m]	
Hersteller	Modell	minimal	maximal
Leica Geosystems	MS50	1.5	1000
Leica Geosystems	TM50	1.5	3000
Leica Geosystems	TS50	1.5	1000
Leica Geosystems	TS15	1.5	1000
Sokkia	DX 201-AC	1.3	1000
Sokkia	SX 101T	1.3	1000
Spectra Precision	Focus 30	k.A.	800
Topcon	IS 301	1.5	1000
Topcon	PS 101	1.3	1000
Trimble	S3	0.2	500
Trimble	S6 DR Plus	0.2	800
Trimble	S6 DR 300+	0.2	800
Trimble	S8 High Precision	0.2	800

## 3.7 Vergleich der Sensorsysteme

Das Zielerfassungsmodul ist ein integraler Bestandteil moderner Totalstationen und beschleunigt den Messprozess in den meisten Situationen um ein Vielfaches. Eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten erlauben dem Benutzer eine individuelle Anpassung der automatischen Zielerfassung an die jeweilige Messsituation. Trotz der hohen Variabilität sind einige Faktoren des Zielerfassungsmoduls konstant und lassen sich auf die speziellen Eigenschaften des verwendeten Sensorsystems zurückführen.

### Kamera

- **Signalanalyse**

Das detektierte Signal wird einem Plausibilitätstest unterzogen, sodass Fremdrelexionen vom wahren Signal separierbar sind (siehe Abbildung 3.11). Infolgedessen kann auch bei Fremdrelexion, solange sich diese nicht mit der Reflexion des Prismas überlagert, eine korrekte Arbeitsweise des Zielerfassungssystems gewährleistet werden. Ein Fehlverhalten auf Grund multipler Prismen im Sehfeld (siehe Abbildung 3.16) kann, solange die Reflexionsbilder trennbar sind, mittels der Signalanalyse ebenso reduziert werden.

- **Berechnung von Winkelablagen**

Durch die Verwendung eines Matrix-Pixel-Systems (Bildkoordinatensystem) kann eine Transformation zum lokalen System unter Berücksichtigung der Transformationsparameter getätigt werden (siehe Abbildung 3.10). Folglich ist eine zentrale Spotposition am Detektor nicht zwingend notwendig. Die Detektion eines dezentralisierten Spots wird mathematisch über Ablagen berücksichtigt. In der Praxis bedeutet dies eine schnellere Messung, da nicht auf die Nachführung des Teleskops gewartet werden muss.

- **rechenintensive Bildverarbeitung**

Die Signalanalyse und die Differenzbildung der beiden Fotos ist vergleichsweise rechenintensiv. Diesbezüglich kann nur eine mäßige Messfrequenz (siehe Kapitel 3.3.5) erzielt werden. Dies ist vor allem bei der Zielverfolgung kinematischer Objekte von Nachteil.

## Quadrantendetektor

- **Signaldetektion**

Die Detektion des Signals mittels vier lichtsensitiver Photodioden ermöglicht keine weitere Analyse. Eine Unterscheidung zwischen dem wahren Signal vom Prisma und einer Fremdreflexion ist nicht durchführbar, weswegen unter Umständen stark reflektierende Objekte fälschlicherweise als Ziel detektiert werden können.

- **hochfrequenter Arbeitsprozess**

Die vergleichsweise einfache Signaldetektion erlaubt eine hochfrequente Messfrequenz. Basierend auf dieser können auch sich schnell bewegende Objekte bei kurzen Messdistanzen stabil und robust verfolgt und gemessen werden.

- **Permanente Nachführung des Teleskops**

Resultierend aus einem fehlenden sekundären Koordinatensystem kann eine dezentrale Spotposition mathematisch nicht korrigiert werden, sodass eine ständige Nachführung des Teleskops notwendig ist. Kleinste Erschütterungen und Vibrationen sowie atmosphärisches Flimmern führen zu einer ständigen Ansteuerung der Motorisierung.

# Kapitel 4

## Messkonfigurationen zur Untersuchung der Systemeigenschaften

Dieses Kapitel enthält die Versuchsaufbauten der durchgeführten praktischen Messungen und beschreibt sowohl den Messaufbau als auch die detaillierte Vorgehensweise bei den jeweiligen Messungen. Im Anschluss an eine kurze allgemeine Erläuterung zur Steuerung der Totalstationen per PC widmen sich die einzelnen Subkapitel den unterschiedlichen Messkonfigurationen, verdeutlichen deren Sinnhaftigkeit und explizieren, welche Systemeigenschaft der Totalstation im Speziellen untersucht werden soll.

### 4.1 Steuerung der Sensormodule via PC

Allen hier durchgeführten Versuchen ist die Steuerung der Instrumente via externen Programmierumgebungen gemein. Dies ermöglicht ein spezifisches Ansteuern der einzelnen Sensormodule und erlaubt es dem Benutzer, ein individuelles Setup zu programmieren, welches die Messungen autonom und automatisiert durchführt.

#### 4.1.1 GeoCOM

Die Instrumente von Leica Geosystems werden über die Programmierschnittstelle GeoCOM mittels ASCII-Befehlen angesprochen und können beispielsweise, wie es in der vorliegenden Arbeit realisiert wurde, in die Programmierumgebung MATLAB implementiert werden. Infolgedessen kann die Programmierung der Messroutinen sowie deren Exekution nur dann in MATLAB erfolgen, wenn gewährleistet wird, dass sowohl die GeoCOM Befehle korrekt auf-



gerufen werden als auch eine einwandfreie Verbindung zwischen PC und Totalstation unter Berücksichtigung der richtigen Verbindungsparameter besteht.

### **4.1.2 TPSDK**

Die Totalstationen des Herstellers Trimble benötigen einen anderen Zugang zur Ausführung externer Steuerungsbefehle. Hierfür bietet Trimble die Programmierschnittstelle Trimble Precision Software Development Kit (TPSDK) an. TPSDK ist objektorientiert und basiert auf der Microsoft .NET Software Plattform, welche eine Sammlung von Klassenbibliotheken, Programmierschnittstellen und Dienstprogrammen bereitstellt. Zur Exekution der einzelnen Funktionen der Sensormodule der Totalstationen von Trimble kann die objektorientierte Programmiersprache C# verwendet werden. Die in C# programmierten Befehle können in weiterer Folge in einer .dll Bibliothek gespeichert werden. Die Sammlung der Steuerungsbefehle in einer .dll Bibliothek ermöglicht es dem Anwender, die Programmbefehle in anderen Programmierumgebungen einzubinden und dort auszuführen. Infolgedessen können in C# die Steuerungsbefehle programmiert werden und z.B. mittels MATLAB ausgeführt werden. Resultierend daraus kann eine konsistente Programmierumgebung realisiert werden, weswegen alle Automatismen für die hier durchgeführten Tests in MATLAB programmiert wurden.

Die Programmcodes zur Steuerung der Totalstationen wurden freundlicherweise vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) zur Verfügung gestellt. Die Programmroutinen wurden größtenteils unverändert zur Durchführung der Messungen verwendet und nur stellenweise zur Ausführung spezieller Sensoreigenschaften adaptiert.

## **4.2 Messung von Objektkanten**

In Kapitel 2.3.4 ist die Problematik von Mischsignalen bei der reflektorlosen Distanzmessung erläutert worden und soll hier durch die Messung von Objektkanten verifiziert werden. Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Distanzmessprinzipien wurde im Labor des IGMS eine Zieltafel (Kodak Grey Card) mit den zu untersuchenden Totalstationen aus der maximal möglichen Distanz von  $D \approx 26.3\text{m}$  reflektorlos gemessen. Eine zweite Zieltafel (Kodak Grey Card) wurde in einem Abstand von  $\approx 16\text{cm}$  zur ersten links, rechts oder oberhalb platziert, sodass zwischen beiden Zieltafeln eine Stufe vorhanden war und eine Kantenmessung getätigt werden konnte (siehe Abbildung 4.1).

Beide Zieltafeln wurden an speziellen Adaptern angebracht, welche in Dreifüßen posi-

tioniert werden konnten. Durch den hydraulischen Adapter, der die von der Totalstation aus gesehen hintere Zieltafel hielt, konnte die Zieltafel beliebig positioniert werden, während der Adapter der vorderen Zieltafel nur eine Rotation um die vertikale Achse zuließ. Die vordere Zieltafel wurde orthogonal zur Visur der Totalstation ausgerichtet und die hintere Zieltafel mittels Maßband an die vordere unter Berücksichtigung der  $\approx 16$  cm seitlich oder oberhalb angepasst (siehe Abbildung 4.2).

Die Totalstationen Leica MS50 (siehe Abbildung 4.1), Leica TS15, Trimble S6 DR 300+ und Trimble S8 HP wurden jeweils einzeln am Pfeiler 8 des IGMS-Labors positioniert.

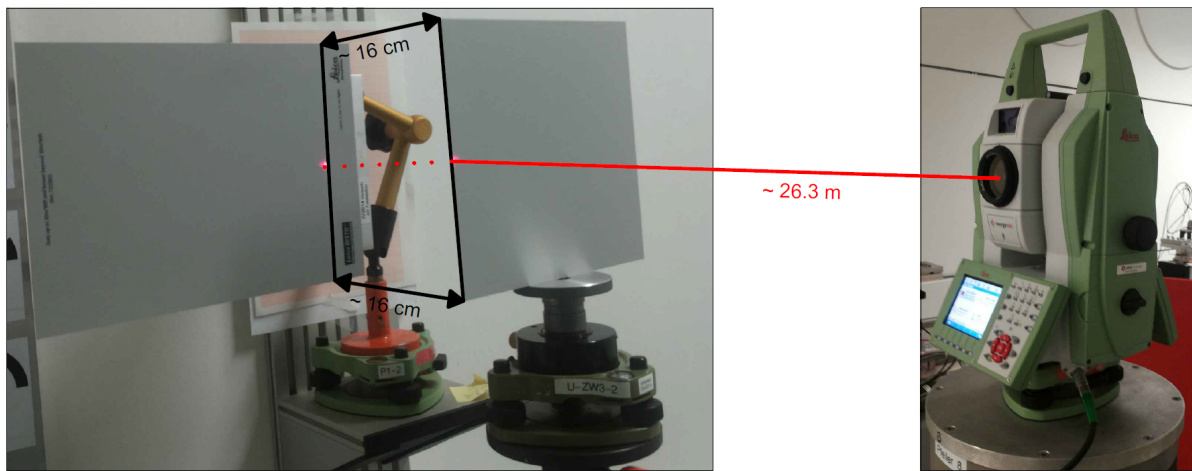


Abbildung 4.1: Aus einer Distanz von  $D \approx 26.3$  m wurden die Zieltafeln reflektorlos gemessen.

Zur exakten Erfassung der Kante wurde die vordere Zieltafel beginnend mit der zentralen Position der Zieltafel reflektorlos redundant dreimal pro Position gemessen, anschließend wurde die horizontale Position der Totalstation um  $1.3$  mgon ( $\hat{=} \approx 0.5$  mm) in Richtung der Kante gedreht. Basierend auf der halben Breite der Zieltafel von  $10.5$  cm und der Distanz von  $D \approx 26.3$  m konnten dadurch 200 Distanzen zur vorderen Zieltafel gemessen werden. Unter gleichbleibenden Einstellungen wurden weitere 80 Distanzen zur hinteren Prüfkarte reflektorlos gemessen, wobei der Übergang zwischen den beiden Zieltafeln nahtlos und fließend gemessen wurde, sodass die Erfassung der Kantenstruktur gewährleistet war.

Die Vorgangsweise bei den Messungen ist in Abbildung 4.2 schematisch im Grundriss für die linke Kante der vorderen Zieltafel dargestellt. Die Kantenmessung der rechten Kante der vorderen Zieltafel erfolgte in analoger Weise. Im Gegensatz zu den seitlichen Kanten wurde zur Messung der oberen Kante bei konstanter Horizontalrichtung der Vertikalwinkel um  $1.3$  mgon kontinuierlich verändert.

Die exakte Position der Kante zwischen den beiden Zieltafeln wurde präzise über Winkelmessungen erfasst.

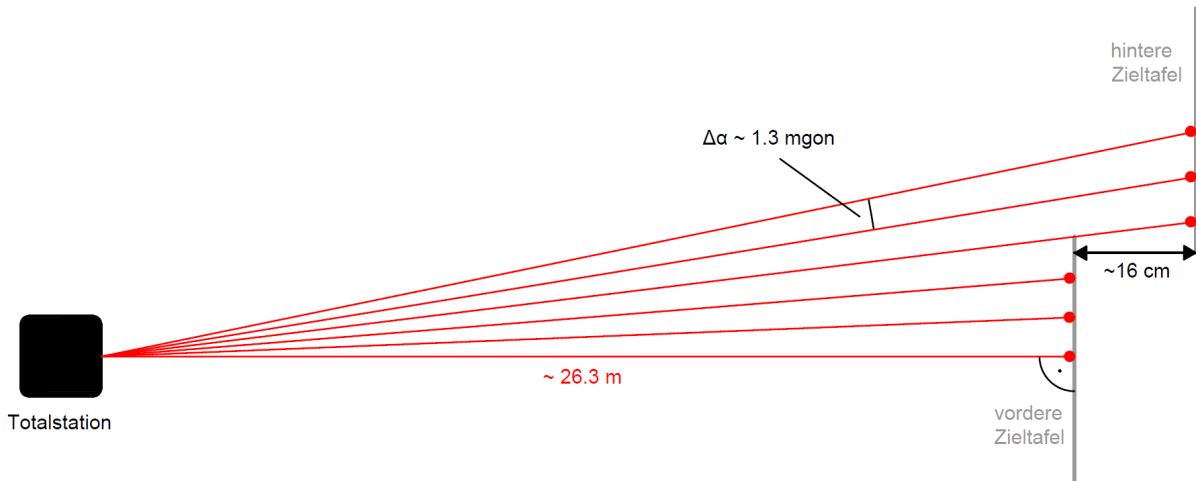


Abbildung 4.2: Grundriss der Messkonfiguration zur Messung der Objektkanten

### 4.3 Reflektorlose Distanzmessung bei variierendem Einfallswinkel

Die Qualität der Messungen im reflektorlosen Messbetrieb ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, besonders der Einfallswinkel ist eine relevante Einflussgröße (siehe Kapitel 2.3.2).

Zur Untersuchung des Einflusses des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung wurde im IGMS-Labor vom Pfeiler 8 aus, unter Berücksichtigung einer Distanz von  $D \approx 26.0\text{m}$ , zu einer Zieltafel (Kodak Grey Card) reflektorlos gemessen. Dabei wurde die Zieltafel der motorisierten und für Testzwecke adaptierten Totalstation TM1100 von Leica Geosystems aufgesetzt, welche ebenfalls per PC via GeoCOM extern gesteuert werden kann. Diese Kombination aus Zieltafel und motorisierter Totalstation ermöglichte es die horizontale Ausrichtung der Zieltafel zur Visur durch automatisierte Drehung der Totalstation um die Stehachse schrittweise präzise zu verändern (siehe Abbildung 4.3).

Daraus resultierten unterschiedliche Einfallswinkel, ohne die Position des Zielobjekts sowie der zu testenden Totalstation zu wechseln. Infolgedessen und auf Grund der im IGMS-Labor gleichbleibenden Umgebungsbedingungen können Distanzvariationen ausschließlich auf den Einfallswinkel zurückgeführt werden.

Die Null-Position der Zieltafel entspricht einer optimalen Ausrichtung zur Visur und wurde mittels Autokollimation realisiert. Gemäß dieser Ausgangslage wurde der Einfallswinkel mit fortschreitender Rotation größer (siehe Abbildung 4.4). Die Rotationsschrittweite wurde mit 1 gon festgesetzt und pro Rotationsschritt bzw. Einfallswinkel wurde die Distanz im reflektorlosen Messmodus redundant dreimal gemessen.



Abbildung 4.3: Adaptierte motorisierte Totalstation mit Zieltafel und die zu testende moderne Totalstation

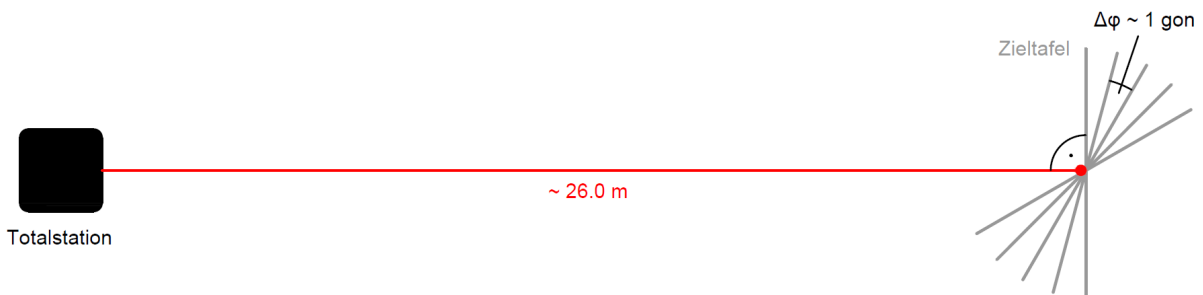


Abbildung 4.4: Grundriss der Messkonfiguration zur Untersuchung der Auswirkungen des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung

Die Messkonfiguration zur Untersuchung der Auswirkungen des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung ist in der Abbildung 4.4 skizzenhaft für den Grundriss dargestellt. Die Zieltafel wurde gleichermaßen in die entgegengesetzte Richtung gedreht, sodass sowohl positive als auch negative Einfallswinkel die reflektorlose Distanzmessung beeinflussten. Die Abbildung 4.4 zeigt die kontinuierliche Änderung des positiven Einfallswinkels im Uhrzeigersinn. Der negative Einfallswinkel basiert auf demselben Schema, jedoch mit der Drehrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn.

Der Test wurde mit den Totalstationen TS15 von Leica Geosystems (siehe Abbildung 4.3), der S8 HP und der S6 DR 300+ von Trimble durchgeführt und lässt Rückschlüsse auf die

Eigenschaften des jeweiligen Messprinzips mitsamt dessen Charakteristiken in Abhängigkeit vom Einfallswinkel zu.

#### 4.4 Systemverhalten bei einer Glasscheibe in der Visur

Für Langzeitüberwachungsmessungen werden Totalstationen zum Schutz vor Umgebungseinflüssen oftmals in Messhütten untergebracht und sind dort meist durch eine Glasscheibe oder einer Plexiglasplatte von den zu messenden Objektpunkten abgeschirmt, sodass die Messungen durch die durchsichtigen Schutzscheiben erfolgen müssen. Die Auswirkungen einer Glasscheibe in der Visur auf das Systemverhalten der automatischen Zielerfassung sowie auf die Leistungsfähigkeit des Distanzmessverfahrens wurden im IGMS-Labor untersucht.

Hierfür wurde die Leica TM1100 erneut adaptiert und deren Plattform als Träger für eine Glasscheibe verwendet, sodass unterschiedliche horizontale Auftreffwinkel des Visurstrahls auf die Glasscheibe getestet werden konnten. Für einen möglichst realitätsnahen Testaufbau wurde die Leica TM1100 mitsamt der Glasscheibe  $\approx 0.5\text{m}$  entfernt von der am Pfeiler 8 positionierten zu testenden Totalstation platziert und die Glasscheibe mittels Autokollimationsokular unter Berücksichtigung eines Vertikalwinkels von  $\approx 100\text{gon}$  orthogonal auf die Visur ausgerichtet (siehe Abbildung 4.5). In einer Distanz von  $D \approx 26.5\text{m}$  zur Totalstation wurde ein Rundprisma als Zielobjekt verwendet (siehe Abbildung 4.5).

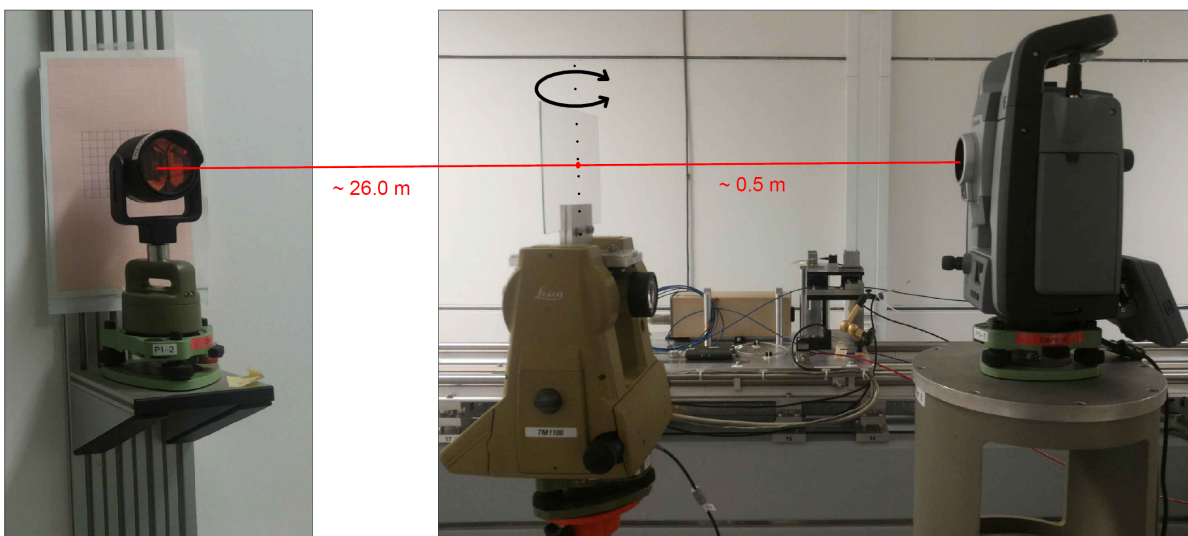


Abbildung 4.5: Messaufbau zur Untersuchung des Systemverhaltens bei Sichtbehinderung durch eine Glasscheibe

Als Referenzmesswerte wurden fünf Messungen auf das Rundprisma ohne Glasscheibe in der

Visur durchgeführt, hierfür wurde lediglich die Glasscheibe heruntergeklappt. Die Referenzmessungen wurden zu Vergleichszwecken stets vor und nach der eigentlichen Testmessung durchgeführt. Der Einfluss einer Glasscheibe in der Visur wurde für unterschiedlichste Einfallswinkel und in verschiedenen Rotationsschrittweiten untersucht, jeder Messwert wurde dreimal pro Position ermittelt. Die Messkonfiguration ist schematisch in Abbildung 4.6 für den Grundriss dargestellt.

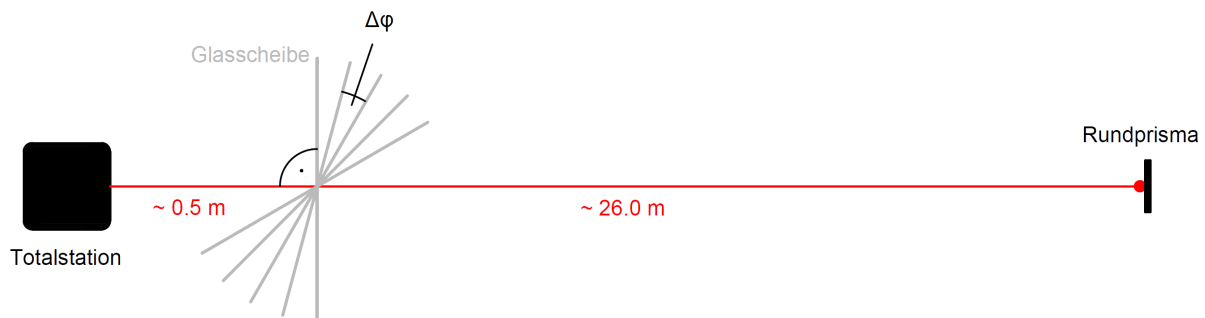


Abbildung 4.6: Grundriss der Messkonfiguration bei den Tests mit der Glasscheibe als Sichtbehinderung in der Visur

Die Messungen wurden sowohl mit den Totalstationen MS50 und TS15 von Leica Geosystems als auch mit den Totalstationen S6 DR Plus und S8 HP (siehe Abbildung 4.5) von Trimble durchgeführt, sodass sowohl das Systemverhalten kamerabasierter Systeme (Leica Geosystems) als auch die Leistungsfähigkeit eines Quadrantendetektors (Trimble) erfasst werden konnte, was einen direkten Vergleich beider Systemarten ermöglichte.

## 4.5 Messungen auf ein MultiTrack 1000 Prisma

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der automatischen Zielerfassung bei 360° Prismen wurden Messungen auf ein 360° MultiTrack 1000 Prisma von Trimble durchgeführt. Das in Abbildung 3.29d dargestellte Prisma besteht aus acht in einem Ring angeordneten Mini-Prismen mit einem Durchmesser von jeweils 20 mm [Trimble, 2012]. Insbesondere das 360° MultiTrack 1000 Prisma zeichnet sich durch den oberhalb der Prismenfacetten angeordneten LED-Ring aus, der ein infrarotes Signal zur Prismenidentifikation omnidirektional aussendet und dadurch ein aktives Prisma realisiert (siehe Abbildung 3.31). Ein Schalter am Prisma erlaubt dem Anwender die Aktivierung der LEDs, weswegen das 360° MultiTrack 1000 Prisma sowohl im aktiven als auch im semiaktiven oder passiven Zustand verwendet werden kann. Somit können auch Totalstationen, deren automatisches Zielerfassungssystem nicht für ein aktives System ausgelegt ist, dieses Ziel für Messungen nützen.

### 4.5.1 Untersuchungen im Labor des IGMS

Die Messkonfiguration ähnelt dem in Kapitel 4.3 erläuterten Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung. Die zu untersuchenden Totalstationen führten vom Pfeiler 8 Messungen zu einem  $\approx 26.3\text{m}$  entfernten, am TM1100 von Leica Geosystems montierten  $360^\circ$  MultiTrack 1000 Prisma aus, wobei die horizontale Ausrichtung des Ziels durch ferngesteuerte Rotation der Leica TM1100 kontinuierlich um  $1\text{ gon}$  verändert wurde (siehe Abbildung 4.7). Pro Rotationsschritt wurde eine auf der automatischen Zielerfassung basierende Winkelmessung und Distanzmessung unter Berücksichtigung eines Vertikalwinkels von  $\approx 100\text{ gon}$  dreimalig durchgeführt, wobei die Rotation vollständig um die Stehachse der Leica TM1100 realisiert wurde und einen Bereich von null bis  $400\text{ gon}$  abdeckte. Die Programmbefehle an die Leica TM1100 und an die zu testenden Totalstationen wurden wie in den Versuchen 4.4 und 4.3 von einem PC unter Verwendung von RS-232 und USB Kabeln gesendet und erlaubten eine aufeinander abgestimmte Exekution der jeweiligen Steuerungsbefehle.



Abbildung 4.7: Die Leica TM1100 als Prismensträger und eine der zu untersuchenden Totalstationen

Zur Gewährleistung der Richtigkeit der Messergebnisse muss die Rotationsachse der Leica TM1100 ident mit der zentrischen vertikalen Achse des Prismas sein, ansonsten verfälschen Exzentrizitäten in Form einer  $2\pi$ -periodischen langwelligen Schwingung die Messresultate. Hierfür wurde der Steckzapfen visuell unter Verwendung einer Totalstation an die Rotationsachse ausgerichtet (siehe Abbildung 4.8). Es zeigte sich allerdings im Nachhinein, dass beim Aufsetzen des Prismas auf den Steckzapfen die zentrische Ausrichtung der Prismenfacetten nicht mehr gewährleistet war, weswegen in weiterer Folge die Prismenfacetten des  $360^\circ$  MultiTrack 1000 Prismas direkt an die Rotationsachse der Leica TM1100 ausgerichtet wurden.



Abbildung 4.8: Die Leica TM1100 mit Adapterplatte und Steckzapfen

Die Laboruntersuchungen wurden ausschließlich mit Totalstationen des Herstellers Trimble durchgeführt, da vor allem das unterschiedliche Systemverhalten der automatischen Zielerfassung im aktiven, semiaktiven und passiven Zustand des Prismas analysiert werden sollte und deshalb Totalstationen verwendet werden müssen, die diese Modi unterstützen. Auf Grund dessen wurden die Totalstationen S6 DR 300+, S6 DR Plus (siehe Abbildung 4.7) und S8 HP von Trimble für diesen Test verwendet. Zusätzlich wurden auch die Einstellungen der automatischen Zielerfassung an der Trimble S8 HP untersucht und ermöglichten einen direkten Vergleich zwischen der Autolock- und der FineLock-Technologie.

#### 4.5.2 Messungen am Prüffeld „Dach Steyergasse 30“

Die in Kapitel 3.5.1 erwähnten und in Kapitel 5.3 dargestellten und erläuterten periodischen Fehler bei Messungen auf ein  $360^\circ$  Prisma sind auf die geometrische Form des Ziels zurückzuführen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese systematischen Fehleranteile konstant sind oder ob deren Größenordnung eine Funktion der zu messenden Distanz ist. Zur Klärung dieser Fragestellung muss der zuvor beschriebene Testversuch auf mehrere Distanzen erweitert werden und soll auch größere Distanzbereiche ( $D \geq 100\text{m}$ ) mit einschließen. Auf Grund der Limitation von Distanzmessungen im Labor des IGMS wurden die Messungen am Prüffeld „Dach Steyergasse 30“ durchgeführt. Das Prüffeld ist mit Pfeilern ausgestattet und erlaubt die Messung von Distanzen  $D > 200\text{m}$ . Die exakten Distanzen zwischen den Pfeilern sowie weitere Informationen zum Prüffeld „Dach Steyergasse 30“ sind [Fleckl, 2007] zu entnehmen.

Die Testversuche wurden für Distanzen von  $D \approx 2.2\text{m}$ ,  $D \approx 39.9\text{m}$  und  $D \approx 155.8\text{m}$  durchgeführt und geben Aufschluss über die Größenordnung der systematischen Fehler bei



Messungen auf ein 360° Prisma für den Nahbereich und den mittleren Distanzbereich.

Zur Realisierung eines Distanzbereichs, der knapp oberhalb der minimalen Reichweite der automatischen Zielerfassung liegt (siehe Tabelle 3.9), musste zur Halterung der getesteten Totalstationen ein Stativ verwendet werden, da der minimale Pfeilerabstand am Prüffeld deutlich größer ist (siehe Abbildung 4.9). Zur Messung der Distanzen von  $D \approx 39.9\text{m}$  und



Abbildung 4.9: Die Totalstation Trimble S8 HP am Stativ und das Zielobjekt am Pfeiler.

$D \approx 155.8\text{ m}$  konnten sowohl für die Totalstationen als auch für das an der Leica TM1100 montierte 360° MultiTrack 1000 Prisma Pfeiler zur Stabilisierung verwendet werden (siehe Abbildungen 4.10 und 4.11). Die Steuerung der Totalstationen des Herstellers Trimble wurden auf Grund der großen Distanzen nicht wie im Labor unter Verwendung eines PCs durchgeführt. Stattdessen wurden zwei PCs genutzt, von denen einer die Befehle an die Totalstation sendete und der andere die Aufforderung zur Drehung an die Leica TM1100 übermittelte. Die Programmbefehle wurden mit Zeitstempeln versehen, wodurch in der Nachbearbeitung die Resultate synchronisiert werden konnten. Die PCs wurden zum Witterungsschutz in rote Boxen gegeben (siehe Abbildungen 4.9 und 4.11).

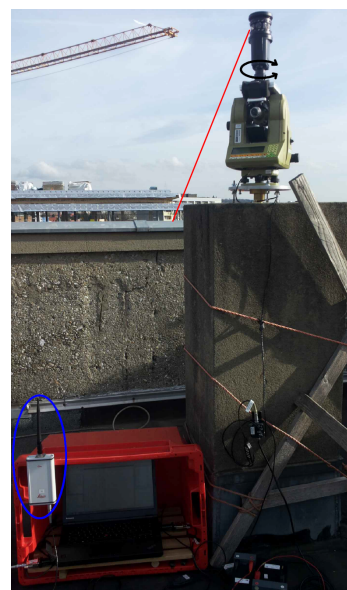
Die Leica TS15 Totalstation wurde per Funkmodul gesteuert (siehe Abbildung 4.11). Diese Technik ermöglicht es, Programmbefehle an die Totalstation über mehrere hundert Meter zu senden. Auf Grund dessen musste nur ein PC verwendet werden, der mittels RS-232 die Leica TM1100 steuerte und via Funk die Befehle zur Messung an die Leica TS15 sendete. Eine Nachbearbeitung der Dateien bezüglich Synchronisation ist somit hinfällig.



Abbildung 4.10: Die Messung der Distanz von  $D \approx 39.9\text{m}$  erfolgte auf den Dächern des Gebäudes in der Steyrergasse 30.



a) Totalstation: Steyrergasse 30



b) 360° Prisma: Kopernikusgasse 24

Abbildung 4.11: Die Distanz von  $D \approx 155.8\text{m}$  wurde vom Dach des Gebäudes der Steyrergasse 30 zum Dach des Gebäudes der Kopernikusgasse 24 gemessen (Funkmodule zur Steuerung der Leica TS15 in Blau hervorgehoben).

Während der Fokus bei den Messungen auf das 360° MultiTrack 1000 Prisma im Labor auf die Charakteristiken der unterschiedlichen Modi des Prismas gesetzt wurde, diente das 360° MultiTrack 1000 Prisma unter realen Bedingungen ausschließlich als Reflektor. Diese Tatsache ermöglichte es den Kreis der zu testenden Totalstationen um die Leica TS15 zu erweitern.

# Kapitel 5

## Ergebnisse

### 5.1 Reflektorlose Distanzmessung

#### 5.1.1 Messung von Objektkanten

##### Trimble S6 DR 300+

Die Abbildung 5.1 zeigt das Ergebnis der reflektorlosen Distanzmessung zu den seitlich versetzten Zieltafeln unter Verwendung der Trimble S6 DR 300+ Totalstation. Es zeigt sich, dass die Distanz zur näher gelegenen oder zur weiter entfernten Zieltafel präzise gemessen werden kann, jedoch der Übergang zwischen den beiden Zieltafeln nicht exakt erfasst werden kann.

Die Kantenmessung ist in doppelter Hinsicht systematisch fehlerhaft:

**1) Verbreiterung der Kante**

Die linienhafte Kante zwischen den beiden Zielobjekten wird um ein Vielfaches verbreitert.

**2) Versatz der Kante**

Die aus den reflektorlos gemessenen Distanzen erhaltene Kante ist gegenüber der Position der tatsächlichen Kante versetzt.

Eine detailliertere Betrachtung im Bereich der linken und rechten Objektkante für die I. Kreislage, die II. Kreislage und das Kreislagenmittel ist in den Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.4 gegeben.

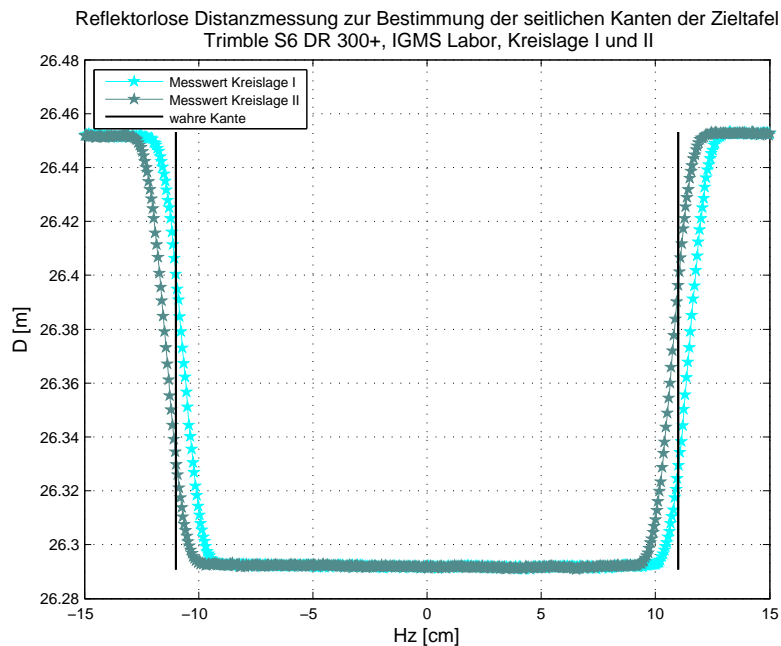


Abbildung 5.1: Ergebnis der seitlichen Kantenmessung der Trimble S6 DR 300+

Das Resultat der Messungen für die I. Kreislage (siehe Abbildung 5.2) verifiziert die zuvor geäußerten Fehler eindeutig. Beide Seitenkanten des Objekts werden auf  $\approx 3$  cm verbreitert, wobei der Übergang zwischen den Zieltafeln annähernd linear verläuft. Die ermittelte Kantenbreite basiert auf der  $3\sigma$ -Methode, sodass mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.7% Distanzen, die nicht zur vorderen oder hinteren Zieltafel zählen, Mischdistanzen zwischen den beiden Zieltafeln sind und als eine Teilmenge der Kante zu interpretieren sind.

Des Weiteren ist auch der seitliche Versatz der Kanten deutlich erkennbar. Die Messungen in I. Kreislage detektieren die seitlichen Objektkanten  $\approx 4$  mm rechts von den tatsächlichen Kanten.

In Kreislage II (siehe Abbildung 5.3) zeigen die reflektorlosen Messungen der Trimble S6 DR 300+ Totalstation mit  $\approx 3$  cm dieselbe Verbreiterung der Kante wie in Kreislage I. Den seitlichen Versatz der Kanten betreffend werden gegenüber der I. Kreislage die Kanten in die entgegengesetzte Richtung seitlich versetzt. Zwar werden erneut beide Seitenkanten in derselben Größenordnung wie zuvor seitlich falsch versetzt, jedoch werden in Kreislage II die Kanten des Objekts nach links versetzt.

Durch Verwendung der Ergebnisse beider Kreislagen (siehe Abbildung 5.4) kann im Kreislagennittel der seitliche Versatz nahezu perfekt korrigiert werden, wenngleich auch die Verbreiterung der Kante verstärkt wird.

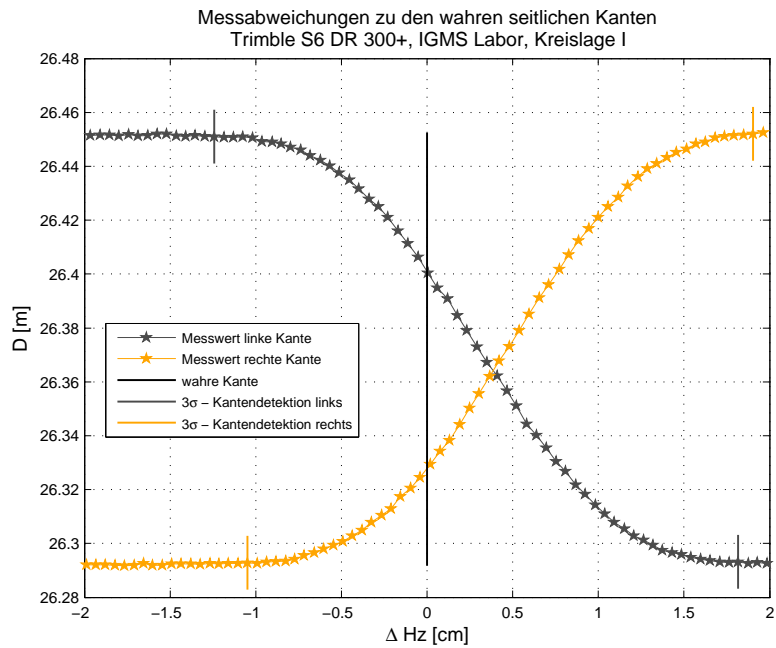


Abbildung 5.2: Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in I. Kreislage

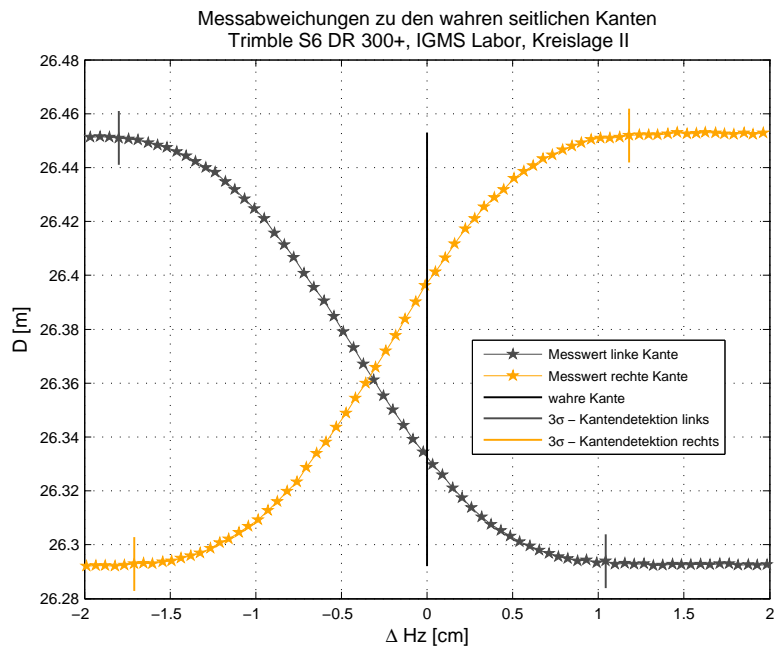


Abbildung 5.3: Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in II. Kreislage

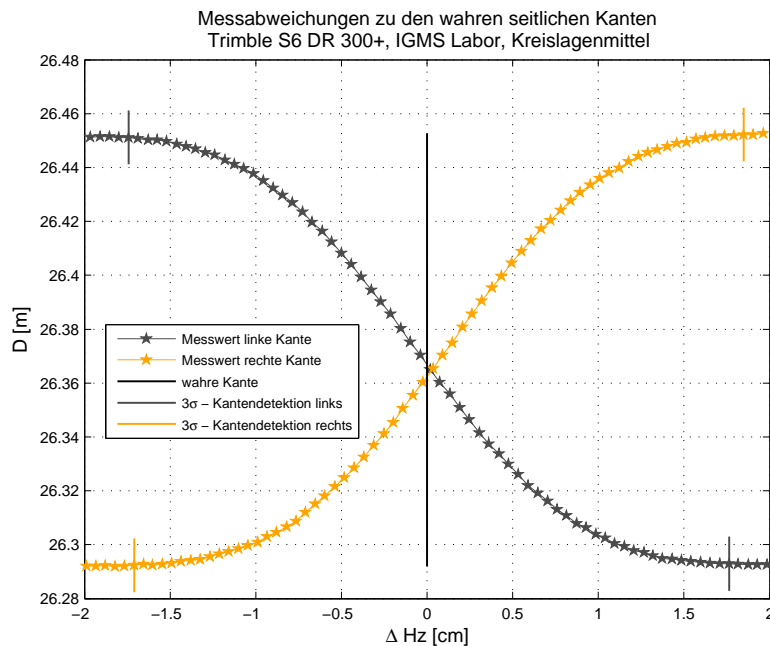
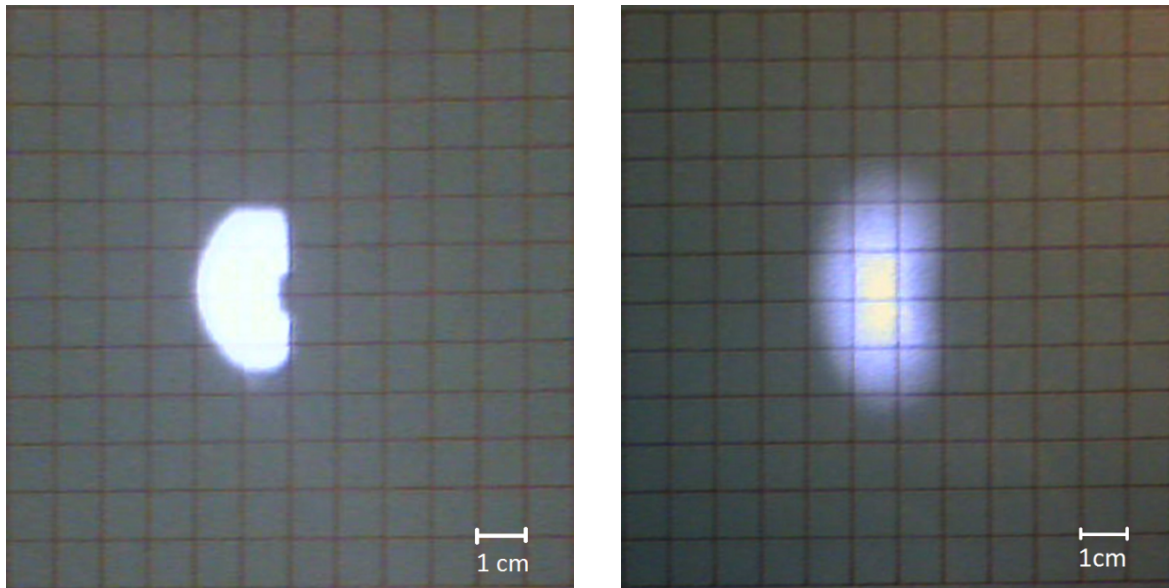


Abbildung 5.4: Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten im Kreislagenmittel

Die Resultate der Kantenmessung und die dazugehörigen Fehler sind eindeutig einer Fehlerquelle geschuldet, sowohl die Verbreiterung der Kante als auch der Versatz der Kante korrelieren mit der Form und Größe des EDM-Spots (siehe Abbildungen 5.5a und 5.5b).

Auffallend ist neben der relativ großen Ausdehnung des infraroten EDM-Spots der Trimble S6 DR 300+ Totalstation vor allem die asymmetrische Form des reflektorlosen Distanzmesslasers. Der Schwerpunkt des EDM-Spots ist nicht kongruent mit dem Fadenkreuz des Teleskops, sodass die Distanz zu jenem Objektpunkt, der vom Anwender angezielt wurde, nicht gemessen werden kann. Anstelle dieser wird die Distanz zu einem Objektpunkt gemessen, der seitlich neben dem Fadenkreuz im Teleskop erscheint. Die Seite ist dabei abhängig von der Kreislage, im Falle von reflektorlosen Distanzmessungen in I. Kreislage mittels der Trimble S6 DR 300+ wird die Distanz zu einem Ziel gemessen, das sich links neben dem anvisierten Objektpunkt befindet. In Kreislage II zeigt sich dasselbe Verhalten, jedoch in die entgegengesetzte Richtung. Dies erklärt das gegenläufige Verhalten der Kantenmessung in den Abbildungen 5.2 und 5.3.

Die Abbildungen 5.5a und 5.5b bestätigen auch die in Kapitel 2.3.1 dargelegten Behauptungen des größer werdenden Messflecks mit zunehmender Distanz. Zusätzlich wird auch eine Formänderung des EDM-Spots ersichtlich. Bei sehr kurzen Distanzen verteilt sich die gesamte infrarote Strahlung auf eine vertikale Seite des Teleskops (siehe Abbildung 5.5a), während sich bei mittlerer Distanz (z.B. 26.3 m) die Intensität des Lasers auf beide Hälften des Teleskops verteilt (siehe Abbildung 5.5b). In einer Distanz von  $D \approx 26.3$  m verteilt sich die



a) Distanz  $D \approx 2.7$  m

b) Distanz  $D \approx 26.3$  m

Abbildung 5.5: Die infrarote EDM-Spotgröße des Trimble S6 DR 300+ für eine Distanz von  $D \approx 2.7$  m (5.5a) und  $D \approx 26.3$  m (5.5b)

Intensität bei einer horizontalen Gesamtausdehnung von  $\approx 3$  cm in Kreislage I zu  $\approx 2/3$  auf die linke Seite und zu  $\approx 1/3$  auf die rechte Seite des Teleskops. Diese Relationen spiegeln sich auch in den zuvor dargestellten Ergebnissen wider: In Abbildung 5.2 wird z.B. bei Messung der rechten Kante die vordere Zieltafel um den Faktor  $\approx 2/3$  verstärkt vom EDM forciert und die hintere Zieltafel versetzt zu weit rechts gemessen. Dabei ergibt sich dieser Versatz aus den Differenzen zwischen den beiden Verhältnissen des EDM-Spots, weshalb der Versatz mit  $\approx 1/6$  der Gesamtbreite des Messflecks gegeben ist und numerisch mit  $\approx 4$  mm eruiert werden kann.

Aus der Größe des EDM-Spots resultiert auch direkt die Verbreiterung der Kante. Beide Objekte, die die zu messende Kante bilden, weisen unterschiedliche Distanzen zur Totalstation auf, sodass bei Signalüberlagerung beider Distanzen eine den Intensitäten entsprechende Mittelung zu einer Mischdistanz erfolgt. In einer Distanz von  $D \approx 26.3$  m ergibt sich eine infrarote EDM-Spotgröße der Trimble S6 DR 300+ Totalstation von  $\approx 3$  cm in horizontaler Richtung, weswegen auch die Verbreiterung der seitlichen Kanten diesen Wert aufweist (siehe Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3). Auf Grund der konstanten horizontalen Richtungsänderung der Visur erfolgt ein linearer Übergang zwischen den beiden Zieltafeln, weswegen die Mischdistanzen, die die Kante darstellen, einen annähernd linearen Verlauf aufweisen.

Die oben erwähnten Erläuterungen beziehen sich auf die seitlichen Kanten, basierend

auf der horizontalen Form und Größe des EDM-Spots. Analog sind die Resultate der Kantenmessung der Oberkante der Zieltafel von der Form und Größe des EDM-Spots in vertikaler Richtung abzuleiten. Entsprechend der gegenüber der horizontalen Achse des Fadenkreuzes gegebenen symmetrischen Form des EDM-Spots ist kein Versatz in den Ergebnissen der Oberkante vorhanden, jedoch ist die Verbreiterung der Oberkante mit  $\approx 4.5$  cm größer als bei den seitlichen Kanten.

Die auf der Laufzeitmessung basierende Direct Reflex(DR) 300+-Technologie der Trimble S6 DR 300+ Totalstation ist nicht die aktuellste Distanzmesstechnologie basierend auf der Laufzeitmessung des Herstellers, das Verfahren wurde weiterentwickelt und kommt als Direct Reflex(DR) Plus-Technologie in der Trimble S6 DR Plus Totalstation zum Einsatz. Deren EDM-Spotgröße konnte auf Grund der nur kurzen Verfügbarkeit des Instruments nicht analysiert werden, jedoch kann basierend auf Schnittbildern des Herstellers von einer ähnlichen asymmetrischen EDM-Spotform ausgegangen werden wie bei der Trimble S6 DR 300+ Totalstation.

Ein stark asymmetrischer EDM-Spot ist kein Charakteristikum von Totalstationen basierend auf der Laufzeitmessung, sondern eine Eigenheit der Trimble S6 DR 300+ Totalstation. Demnach ist der asymmetrische EDM-Spot nicht nur für die hier getestete Totalstation zutreffend, vielmehr eine Eigenart aller Trimble S6 DR 300+ Totalstationen.

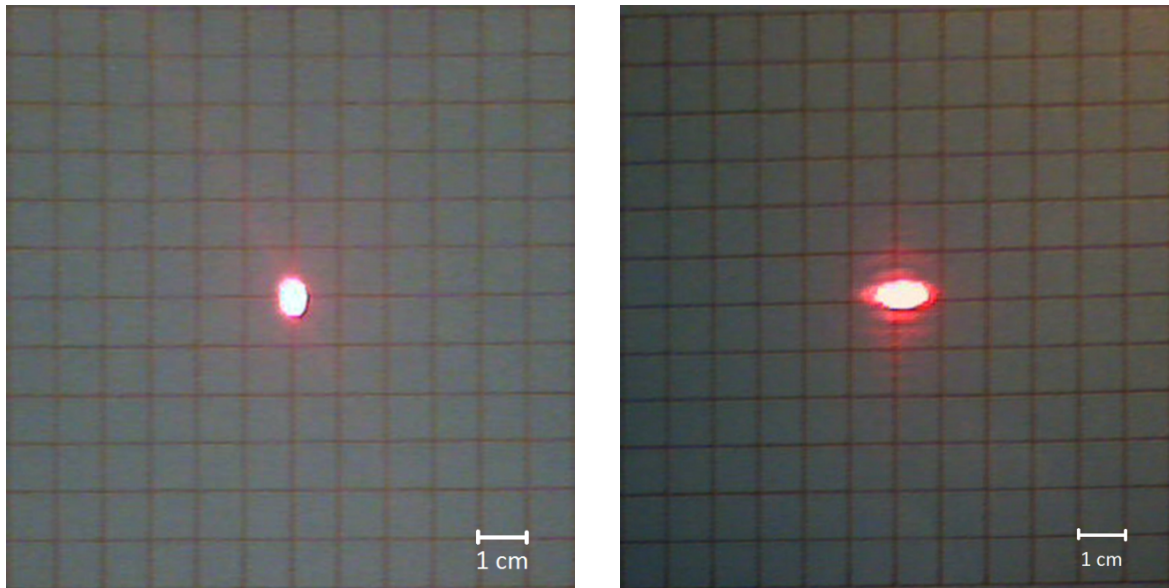
### **Trimble S8 HP**

Die High Precision-Technologie der Trimble S8 HP Totalstation erlaubt präzise Messungen sowohl zu Prismen als auch zu natürlichen Zielobjekten. Ein Grund dafür ist die Form und Größe des sichtbaren EDM-Spots (siehe Abbildung 5.6).

Im Vergleich zum infraroten EDM-Spot der Trimble S6 DR 300+ Totalstation ist die Ausdehnung des optisch sichtbaren EDM-Spots der Trimble S8 HP Totalstation um ein Vielfaches kleiner und verifiziert somit die in Kapitel 2.4 erwähnte Aussage, dass der Messfleck von Totalstationen basierend auf der Laufzeitmessung größer ist als jener, der auf der Phasenvergleichsmessung beruht.

Erneut kann auch hier eine Zunahme der für die Distanzmessung relevanten EDM-Querschnittsfläche mit größer werdender Distanz festgestellt werden. Des Weiteren ist auch eine von der Distanz abhängige Form in den Abbildungen 5.6a und 5.6b ersichtlich. Während bei sehr kurzen Distanzen die vertikale Ausdehnung des EDM-Spots größer ist als in horizontaler Richtung (siehe Abbildung 5.6a), zeigt die elliptische Form des Messflecks bei mittlerer Distanz eine in horizontaler Richtung stärkere Ausprägung (siehe Abbildung 5.6b). Eine für kurze Distanzen annähernd vorhandene Deckungsgleichheit des Schwerpunkts





a) Distanz  $D \approx 2.7$  m

b) Distanz  $D \approx 26.3$  m

Abbildung 5.6: Der sichtbare EDM-Spot der Trimble S8 HP für eine Distanz von  $D \approx 2.7$  m (5.6a) und  $D \approx 26.3$  m (5.6b)

des EDM-Spots und der Fadenkreuzmitte des Teleskops ist für mittlere Distanzen nicht mehr gültig.

Resultierend aus dem Faktum der gegenüber der vertikalen und horizontalen Ausrichtung des Fadenkreuzes asymmetrischen Ausdehnung des EDM-Spots bei einer Distanz von  $D \approx 26.3$  m weisen die Resultate der Kantenmessung mittels der Trimble S8 HP Totalstation einen Versatz gegenüber der wahren Position der Kante auf. Obwohl der Messfleck der Trimble S8 HP Totalstation sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung eine Asymmetrie aufweist und folglich die Ergebnisse der seitlichen Kanten und der Oberkante gegenüber den tatsächlichen Kanten versetzt sind, werden hier ausschließlich die Ergebnisse der Messungen zur Oberkante der Zieltafel detailliert betrachtet.

Die Abbildung 5.7 beinhaltet die Resultate der reflektorlosen Distanzmessung zu den in vertikaler Richtung versetzten Zieltafeln und stellt diese als Differenz gegenüber der tatsächlichen Oberkante der Zieltafel in Abhängigkeit von der Distanz dar.

Die Form des EDM-Spots in Kreislage I (siehe Abbildung 5.6b) deutet auf den ersten Blick einen größeren Signalanteil in der oberen Hälfte der horizontalen Achse des Fadenkreuzes an, weshalb bei Messung der Oberkante in Kreislage I die obere hintere Zieltafel bei exakter Anzielung der wahren Kante mittels Fadenkreuz mehr zur Distanzmessung beitragen müsste als die vordere Zieltafel. Dies kann allerdings in Abbildung 5.7 nicht bestätigt werden,

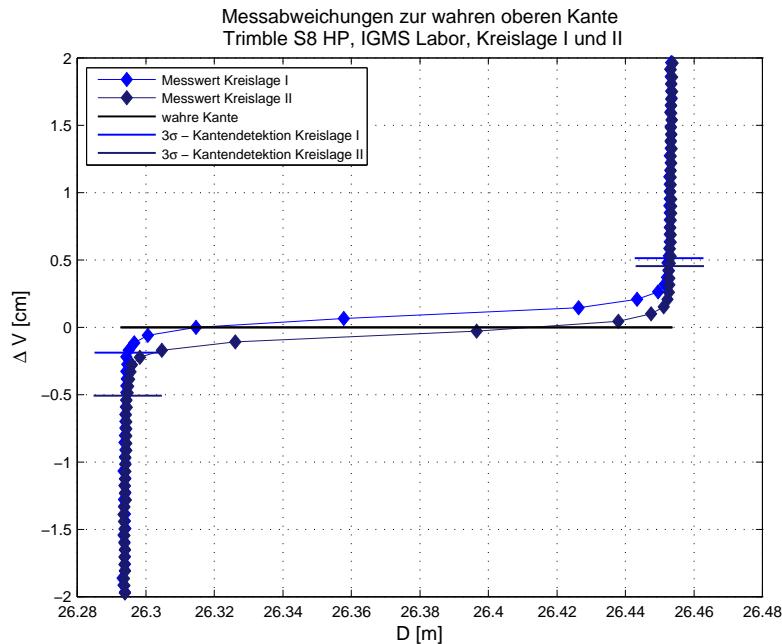


Abbildung 5.7: Messabweichungen zur wahren oberen Kante in beiden Kreislagen

stattdessen lassen die erzielten Ergebnisse die Hypothese zu, dass in der unteren Hälfte des EDM-Spots der überwiegende Signalanteil vorhanden sein muss. Ein Kreislagenwechsel führt zu demselben Versatz, jedoch in die entgegengesetzte Richtung. Auffallend sind des Weiteren die für Kreislage I und II unterschiedlich eruierten Spotgrößen des EDM und die daraus resultierenden Kantenbreiten. Während in Kreislage I eine Kantenbreite von  $\approx 0.7$  cm festgestellt werden kann, ergibt sich in Kreislage II eine Kantenbreite von  $\approx 0.9$  cm. Dies deutet auf die statistische Unsicherheit des  $3\sigma$ -Tests und die damit verbundene Möglichkeit einer falschen Ergebniszuordnung hin. Eine detaillierte Betrachtung des EDM-Spots (siehe Abbildung 5.6b) visualisiert an den Rändern des elliptischen hellroten Spots dunklere Signalanteile, die ebenfalls einen Beitrag zur Distanzmessung leisten. Deren exakte Ausrichtung gegenüber dem Fadenzentrum sowie deren Intensität ist mit den hier durchgeführten Versuchen nicht bestimmbar, jedoch fließen auch diese Signalanteile in die Ergebnisse der reflektorlosen Distanzmessung mit ein. Auf Grund dessen liegt es durchaus im Bereich des Wahrscheinlichen, dass in der unteren Hälfte des EDM-Spots der überwiegende Signalanteil vorhanden ist.

Die in diesem Subkapitel dargestellten und erläuterten Resultate sind ausschließlich für das untersuchte Instrument gültig. Eine Generalisierung, wonach alle Totalstationen des Typus S8 HP die zuvor beschriebene asymmetrische EDM-Spotform aufweisen wäre unzulässig.

Unabhängig von der asymmetrischen Ausrichtung des EDM-Spots und der damit einhergehenden asymmetrischen Signalgewichtung korrigiert eine Messung in beiden Kreislagen

mögliche Abweichungen des Schwerpunkts des EDM-Spots gegenüber der Fadenkreuzmitte. Im Kreislagenmittel ist kein Versatz der Kante erkennbar, jedoch resultiert daraus eine Verbreiterung der Kante (siehe Abbildung 5.8).

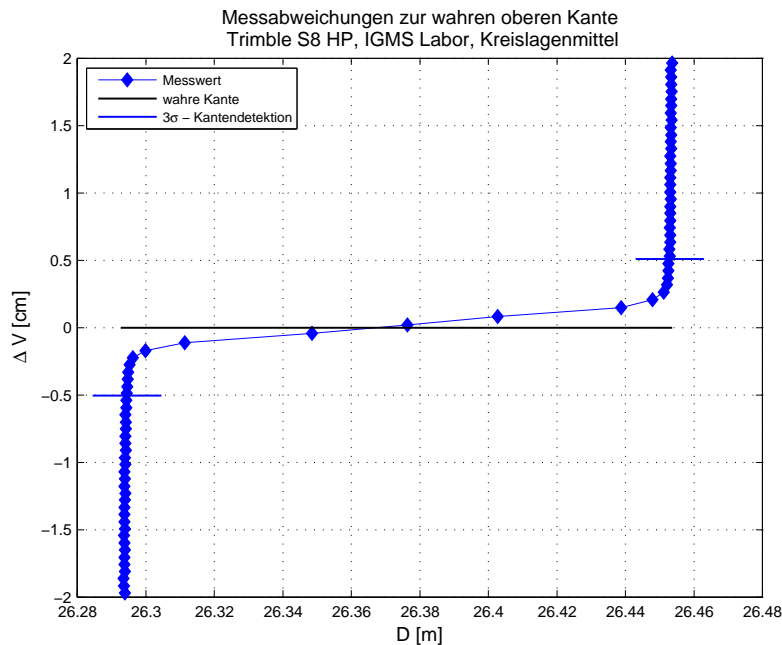


Abbildung 5.8: Messabweichungen zur wahren oberen Kante im Kreislagenmittel

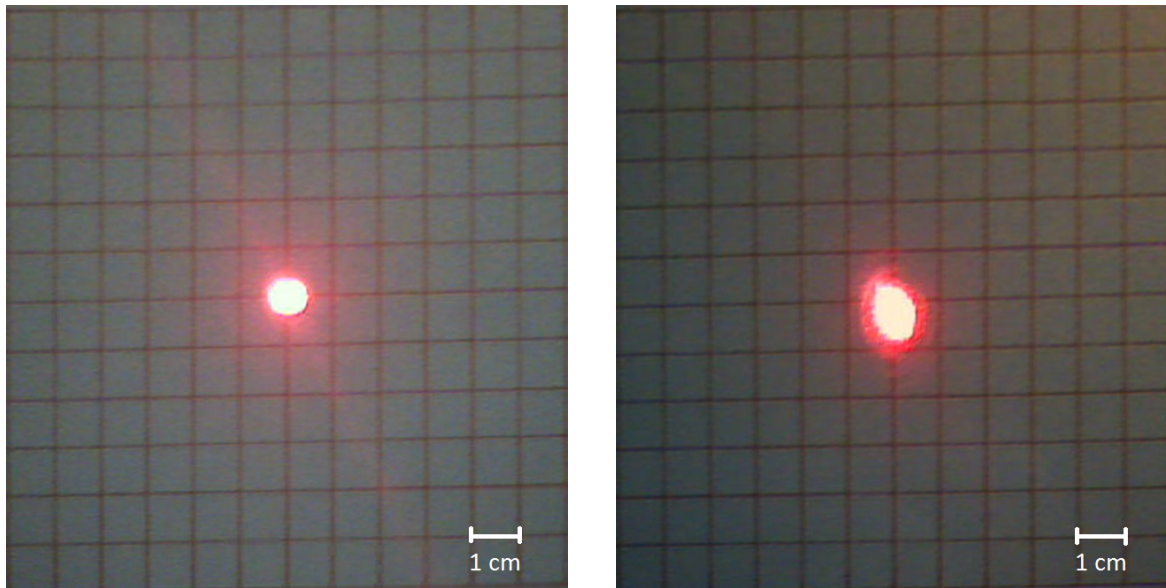
Die Verbreiterung der Kante ist im Falle der Trimble S8 HP Totalstation wegen des kleinen EDM-Messflecks sehr gering, wodurch eine gute Messung von Objektkanten gewährleistet ist.

Auf Grund der Tatsache, dass Messungen zu Objektkanten in Kreislage II dieselben Charakteristiken aufweisen wie Messungen in I. Kreislage, jedoch in entgegengesetzter Richtung, werden in den nachfolgenden Subkapiteln ausschließlich die Detailergebnisse der reflektorlosen Distanzmessungen zu Objektkanten in I. Kreislage gezeigt.

### Leica MS50

Der reflektorlose sichtbare EDM-Spot der MS50 von Leica Geosystems ist bezüglich seiner Fläche zwischen den EDM-Spots der Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S8 HP Totalstation einzuordnen und zeigt ebenfalls eine Flächenvariation und Formänderung in Abhängigkeit von der Distanz (siehe Abbildung 5.9).

Die Messabweichungen zur linken und zur rechten Kante weisen leicht unterschiedliche Ergebnisse auf. Im Gegensatz zu den Messungen der rechten Kante zeigen die Distanzmesswerte



a) Distanz  $D \approx 2.7$  m

b) Distanz  $D \approx 26.3$  m

Abbildung 5.9: Der sichtbare EDM-Spot der Leica MS50 für eine Distanz von  $D \approx 2.7$  m (5.9a) und  $D \approx 26.3$  m (5.9b)

zur linken Kante einen sehr leichten Versatz und daraus resultierend wird die linke Objektkante um  $\approx 1$  mm zu weit links gemessen (siehe Abbildung 5.10). Des Weiteren folgen auch für die Kantenbreiten zwei verschiedene Ergebnisse, wobei erneut die Richtigkeit der Messwertzuordnung basierend auf der  $3\sigma$ -Methode hinterfragt werden muss. Im Anbetracht der Spotgröße (siehe Abbildung 5.9b) scheint das Ergebnis der linken Kante mit einer eruierten Kantenbreite von  $\approx 1.6$  cm das richtige zu sein.

Bezüglich der vertikalen Form und Ausrichtung des EDM-Spots der Leica MS50, deren Distanzmesstechnologie auf dem WFD-Verfahren beruht, kann visuell aus der Abbildung 5.9b eindeutig auf eine Asymmetrie geschlossen werden. Diese Tatsache wird auch in der Abbildung 5.11 verifiziert, demnach wird auf Grund des in der unteren Hälfte des EDM-Spots höheren Signalanteils die Kante gegenüber der wahren Oberkante der Zieltafel zu weit oben gemessen. Dieser vertikale Versatz kann mit  $\approx 3$  mm numerisch wiedergegeben werden und folgt direkt aus der vertikalen Abweichung des EDM-Spots gegenüber der Fadenkreuzmitte.

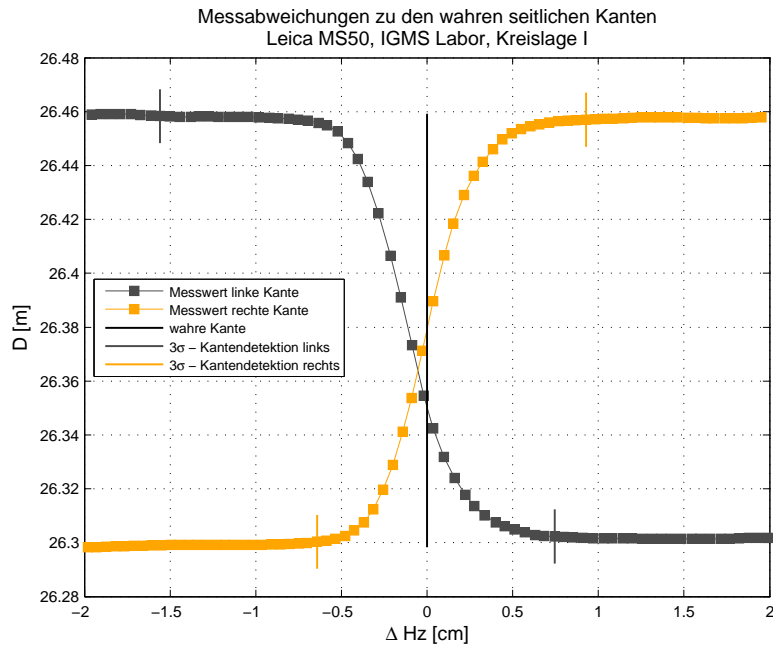


Abbildung 5.10: Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in I. Kreislage

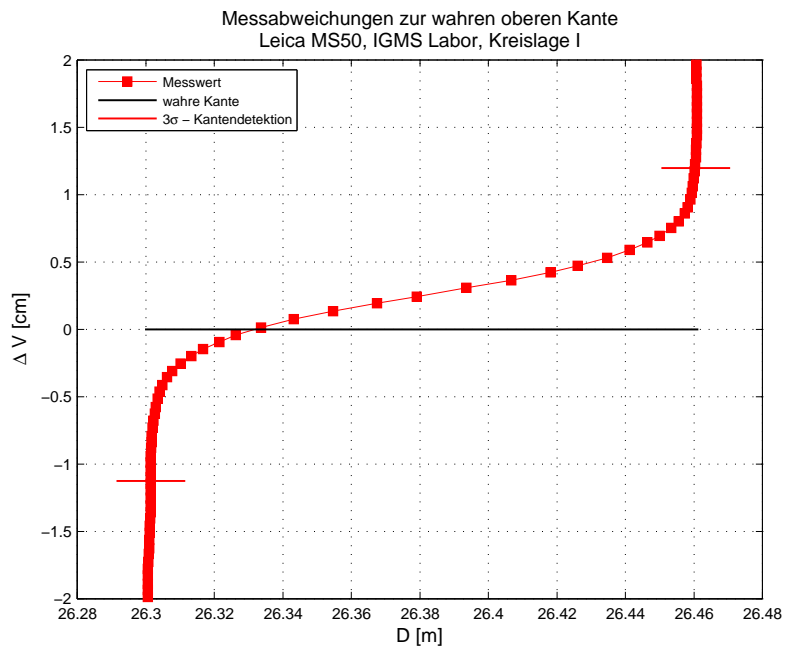
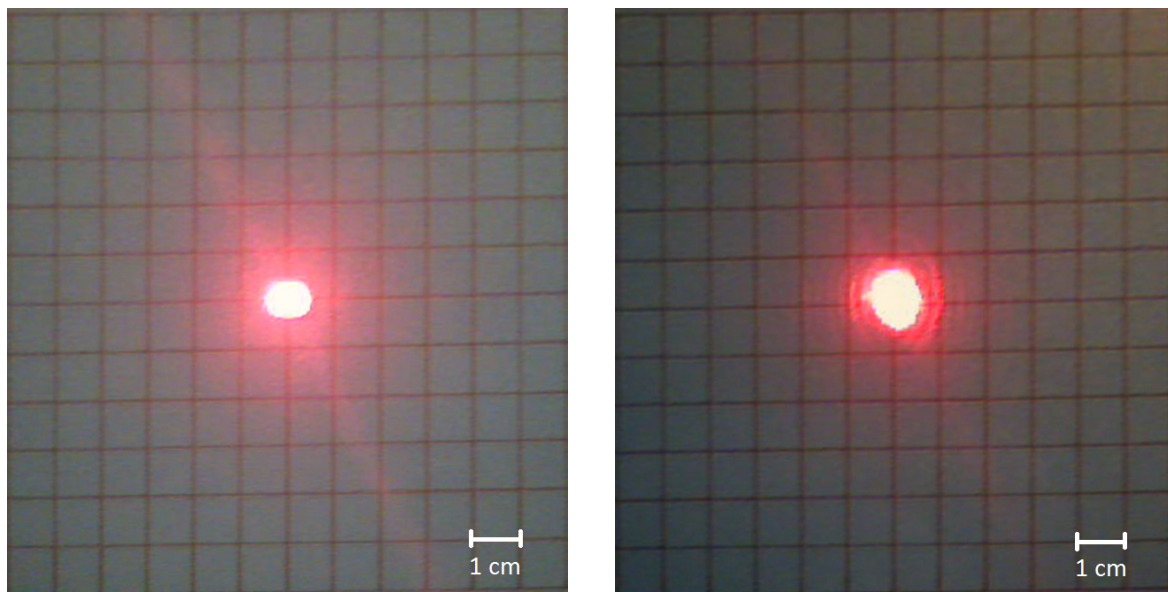


Abbildung 5.11: Messabweichungen zur Oberkante der Zieltafel in I. Kreislage

### Leica TS15

Die TS15 von Leica Geosystems verwendet ebenso wie die Trimble S8 HP für die Distanzmessung das Messprinzip der Phasenvergleichsmessung, wenngleich die Form und Größe des EDM-Spots sehr dem Messfleck der MS50 von Leica Geosystems ähneln. Sowohl bei kurzen als auch bei mittleren Distanzen ist eine Unterscheidung zwischen den beiden Instrumententypen basierend auf den EDM-Spots schwierig, ein Rückschluss auf die verwendete Messtechnologie äußerst diffizil (siehe Abbildungen 5.9a,5.9b,5.12a und 5.12b).



a) Distanz  $D \approx 2.7$  m

b) Distanz  $D \approx 26.3$  m

Abbildung 5.12: Der sichtbare EDM-Spot der Leica TS15 für eine Distanz von  $D \approx 2.7$  m (5.12a) und  $D \approx 26.3$  m (5.12b)

Die Messung von seitlichen Objektkanten weist dieselben Eigenschaften auf wie bei der Messung mittels der Leica MS50. Die gegenüber der vertikalen Achse des Fadenkreuzes nahezu exakt symmetrische Form des Messflecks ermöglicht eine Messung der Kante des Objekts mit einem nur sehr geringen seitlichen Versatz (siehe Abbildung 5.13). Analog zur vorherigen Totalstation wird die linke Kante gegenüber der wahren Kante  $\approx 1$  mm zu weit links detektiert.

Bezüglich der vertikalen Ausrichtung des EDM-Spots differiert der sichtbare Messfleck der Leica TS15 deutlich vom EDM-Spot der Leica MS50. Im Gegensatz zur Leica MS50 zeigt sich bei der Leica TS15 keine asymmetrische Form des EDM-Spots gegenüber der horizontalen Achse des Fadenkreuzes (siehe Abbildung 5.12b). Diese Tatsache spiegelt sich auch in den Messresultaten der Oberkante der Zieltafel wider, sodass bereits mit Messungen in einer Kreislage die mittlere Position der gemessenen Kante sehr gut mit der wahren Kante übereinstimmt (siehe Abbildung 5.14).

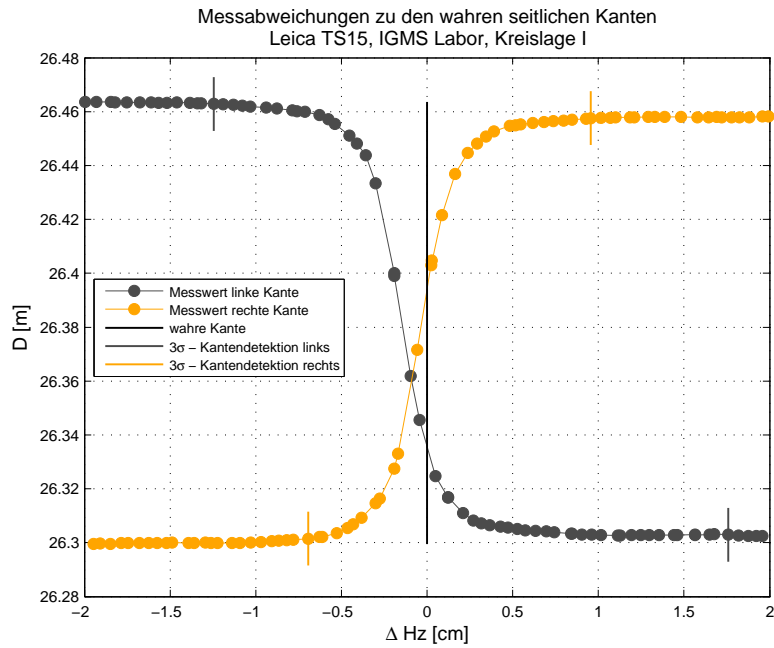


Abbildung 5.13: Messabweichungen zu den wahren seitlichen Kanten in I. Kreislage

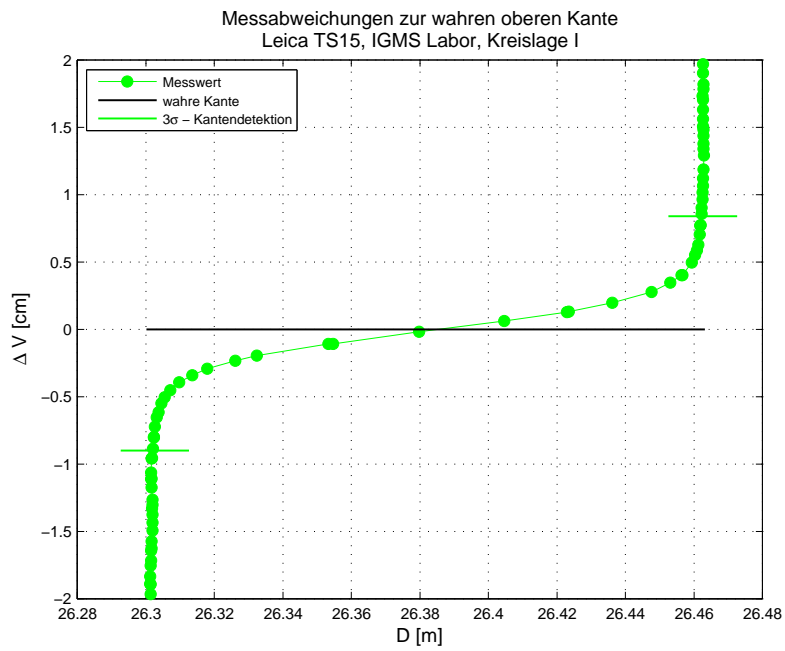


Abbildung 5.14: Messabweichungen zur Oberkante der Zieltafel in I. Kreislage

### 5.1.2 Variierender Einfallswinkel

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Abhängigkeit der reflektorlosen Distanzmessung vom Einfallswinkel der Visur auf das Zielobjekt beweisen eindeutig eine Abnahme der Distanzmessgenauigkeit bei größer werdendem Einfallswinkel (siehe Abbildung 5.15) und verifizieren ein Vorhandensein des in Kapitel 2.3.2 erwähnten systematischen Fehlereinflusses des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung.

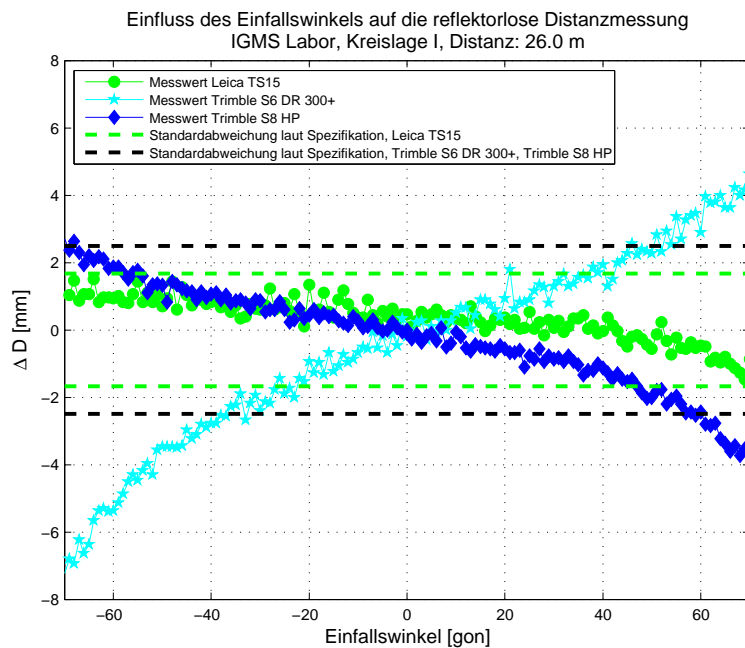


Abbildung 5.15: Resultate der reflektorlosen Distanzmessgenauigkeit bei variierendem Einfallswinkel; Angaben entnommen aus: [Leica Geosystems, 2011, Seite 162],[Trimble, 2007],[Trimble, 2013b]; Standardabweichung mittels Varianzfortpflanzung berechnet

Zusätzlich zu den dort erläuterten Systematiken ist erneut die Form und Ausdehnung des EDM-Spots und die daraus resultierende Intensitätsverteilung des Messflecks signifikant für die Messgenauigkeit der Distanz zum natürlichen Zielobjekt bei einem Einfallswinkel von  $\varphi \neq 0$  gon.

#### Leica TS15

Die Distanzmesswerte der Leica TS15 Totalstation zeigen kleine Abweichungen zum Referenzmesswert, der auf einer optimalen Ausrichtung der Zieltafel zur Visur basiert, und



gewährleisten auch für große Einfallswinkel jenseits von  $\pm 50$  gon gute Ergebnisse, sodass bis zu einem Einfallswinkel von  $\pm 70$  gon alle Distanzmesswerte innerhalb von  $\pm 2$  mm variieren (siehe Abbildung 5.15). Infolgedessen muss der EDM-Spot der Leica TS15 Totalstation eine annähernd symmetrische Form und homogene Intensitätsverteilung gegenüber der Rotationsachse der Zieltafel ( $\hat{=}$  dem Fadenkreuz des Telekops) aufweisen (siehe Abbildung 5.12b).

### **Trimble S8 HP**

Die in Abbildung 5.15 in blauer Farbe dargestellten Messwerte der Trimble S8 HP Totalstation lassen die Schlussfolgerung einer heterogenen Intensitätsverteilung des Messflecks gegenüber der Rotationsachse der Zieltafel zu. Dabei ist dieser systematische Fehleranteil auf die gegenüber der Rotationsachse der Zieltafel asymmetrische Form des EDM-Spots zurückzuführen. Bei größer werdendem positiven Einfallswinkel wird die Distanzmessung gegenüber der Referenzmessung systematisch verkürzt, für negative Einfallswinkel folgt eine Zunahme der Distanz. Dies resultiert aus dem Faktum, dass einerseits der positive Einfallswinkel in Richtung des Uhrzeigersinns definiert wurde, und dass andererseits der EDM-Spot der Trimble S8 HP Totalstation in Kreislage I in einer Distanz von  $D \approx 26$  m einen höheren Signalanteil in der rechten Hälfte aufweist (siehe Abbildung 5.6b). Folglich wird jeweils der rechte Objektanteil höher gewichtet als der linke, und durch die Tatsache, dass bei positivem Einfallswinkel der rechte Objektanteil der Totalstation näher gelegen ist, resultiert aus dieser Konstellation eine zu kurz gemessene Distanz. Im Gegensatz dazu ist bei negativem Einfallswinkel der rechte Objektanteil der Totalstation ferner, und folglich werden die Distanzen systematisch verlängert.

### **Trimble S6 DR 300+**

Die Ergebnisse der Trimble S6 DR 300+ Totalstation weisen die größten Variationen aller hier getesteten Instrumente auf. Basierend auf der stark asymmetrischen Form des EDM-Spots (siehe Abbildung 5.5b) und der daraus folgenden heterogenen Intensitätsverteilung des Messflecks sind selbst bei mäßigen Einfallswinkeln ( $\approx \pm 40$  gon) die Distanzmessungen um  $\approx \pm 2$  mm verfälscht. Im Gegensatz zur Trimble S8 HP Totalstation ist der überwiegende Signalanteil gegenüber der Fadenkreuzmitte in der linken Hälfte vorhanden, weswegen die annähernd linearen Systematiken beider Totalstationen entgegengesetzt verlaufen und sich im Vorzeichen des Distanzmessfehlers voneinander unterscheiden (siehe Abbildung 5.15). Demnach wird der linke Objektanteil höher gewichtet als der rechte und verlängert bei positivem Einfallswinkel die gemessene Distanz gegenüber der Referenzmessung, während bei einem negativen Einfallswinkel die Distanz systematisch zu kurz gemessen wird.

Systematische Fehler, welche auf die asymmetrische Form des EDM-Spots gegenüber dem Fadenkreuz und die daraus resultierenden heterogenen Intensitätsverteilungen zurückzuführen sind, können in gegebenen Fällen mittels einer Zwei-Lagen-Messung eliminiert werden. Eine Änderung der Kreislage führt zu einer gegenüber der horizontalen und vertikalen Achse des Fadenkreuzes gespiegelten Form des EDM-Spots. Analog zu den in Kapitel 5.1.1 demonstrierten Ergebnissen kann auch der Einfluss des Einfallswinkels auf die reflektorlose Distanzmessung durch Mittelung der Distanzmesswerte beider Kreislagen eliminiert werden (siehe Abbildung 5.16).

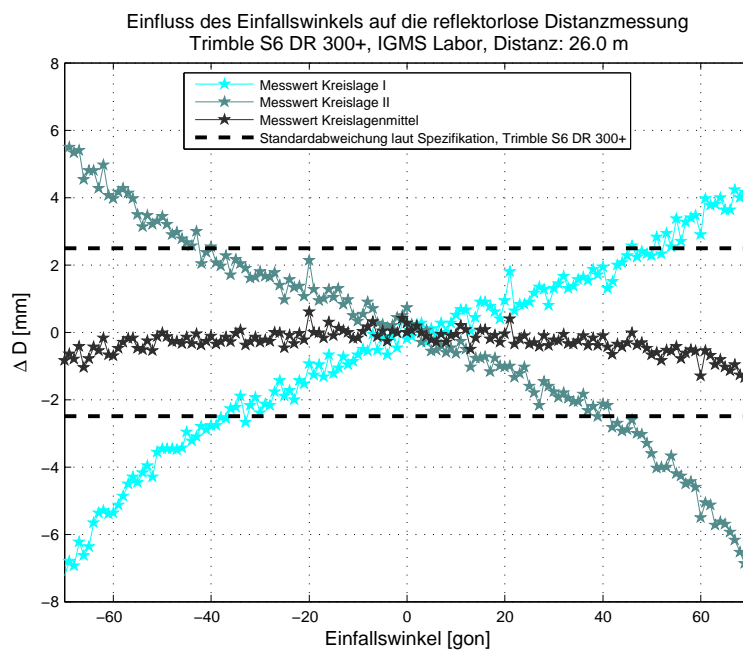


Abbildung 5.16: Ergebnisse der Trimble S6 DR 300+ für die I. Kreislage, II. Kreislage und für das Kreislagenmittel; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2007]; Standardabweichung mittels Varianzfortpflanzung berechnet

Die annähernd lineare Abhängigkeit der reflektorlosen Distanzmessung vom Einfallswinkel ist für alle in diesem Versuch untersuchten Instrumente durch die konstante Rotationsschrittweite und die daraus resultierende konstante Änderung des Einfallswinkels zu begründen.

### Exzentrizität des Zielstrahls

Die Untersuchung der Auswirkungen des Einfallswinkels auf die Genauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung bedingt eine korrekte Messkonfiguration, bei der der Messstrahl bei einem Einfallswinkel von  $\varphi=0$  gon orthogonal auf das Zentrum der Zieltafel treffen muss (siehe Abbildung 4.4). Das Zentrum der Zieltafel muss sich dabei in einer vertikalen Linie

mit der Drehachse der adaptierten Totalstation befinden, da ansonsten eine exzentrische Messkonfiguration vorhanden wäre und diese die Ergebnisse signifikant beeinflussen würde.

Die Abbildung 5.17 zeigt den Einfluss einer fehlerhaften exzentrischen Ausrichtung des Messstrahls gegenüber der vertikalen Drehachse der Zieltafel in Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Die Simulation berücksichtigt dabei sechs unterschiedliche Exzentrizitäten ( $\epsilon$ ), von 2 mgon ( $\hat{=}$  einem lateralen Versatz von  $\approx 0.8$  mm) bis zu 12 mgon ( $\hat{=}$  einem lateralen Versatz von  $\approx 4.9$  mm), und wurde mittels Gleichung 5.1 berechnet.

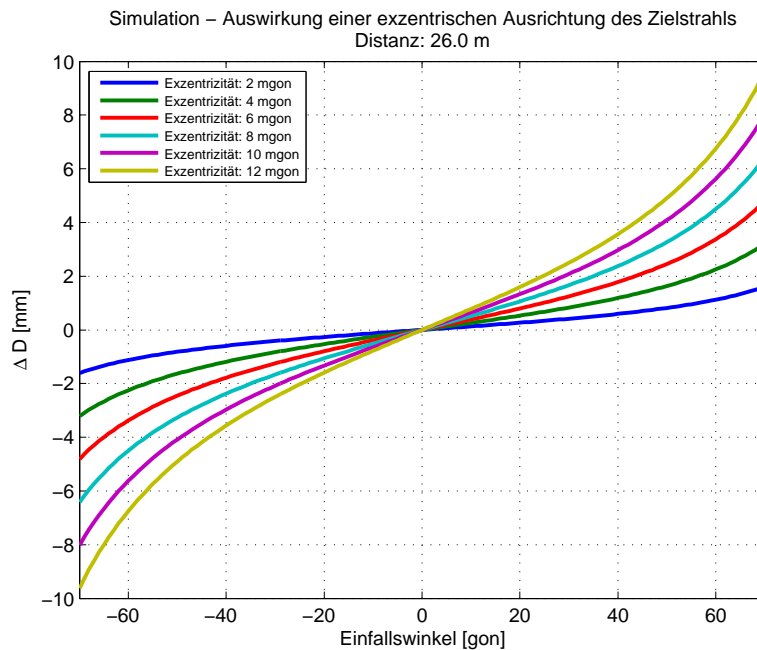


Abbildung 5.17: Theoretischer Fehleranteil in der Distanzmessung bedingt durch eine exzentrische Ausrichtung des Zielstrahls

$$\Delta D = \tan(\varphi) \cdot \epsilon \cdot D \quad (5.1)$$

Es wird in Abbildung 5.17 ersichtlich, dass der Fehler in der Distanzmessung mit Zunahme des Einfallswinkels größer wird und bereits bei kleinen seitlichen Versätzen von einigen wenigen Milligon gegenüber der Drehachse Fehler von mehreren Millimetern in der Distanz resultieren.

Die Simulationsergebnisse berücksichtigen eine infinitesimale kleine Strahlungsquelle, sodass der EDM-Spot als Punktobjekt mit minimaler Querschnittsfläche auf die Zieltafel trifft. In der Realität ist dies jedoch nicht der Fall, auf Grund des Strahldivergenzwinkels  $\gamma$

ergeben sich in Abhängigkeit von der Distanz verschiedene Formen und Größen des EDM-Spots (siehe Abbildungen 2.17, 2.18 und 2.19). Bei exakt symmetrischer EDM-Spotform, sowie einer korrekten Ausrichtung des Zielstrahls auf das Zentrum der Zieltafel, verursacht die Ausdehnung des EDM-Spots nur minimale Fehleranteile, da sich die zu lang und zu kurz gemessenen Distanzanteile annähernd aufheben. Problematisch ist die Situation bei asymmetrischen EDM-Spots, da die Intensitätsanteile abseits vom Fadenkreuz unterschiedlich stark gewichtet werden und daraus resultierend sich die Fehleranteile nicht gegenseitig aufheben.

Diese Situation ist für den EDM-Spot der Trimble S6 DR 300+ in Abbildung 5.18 skizziert. Wie im vorherigen Subkapitel gezeigt, ergibt sich bei einer Messdistanz von  $D \approx 26.3$  m bei der Trimble S6 DR 300+ ein deutlich asymmetrischer Spot, wobei in Kreislage I bei einer horizontalen Gesamtausdehnung von  $\approx 3$  cm die Intensität zu  $\approx 2/3$  auf die linke und zu  $\approx 1/3$  auf die rechte Seite fällt (siehe Abbildung 5.5b).

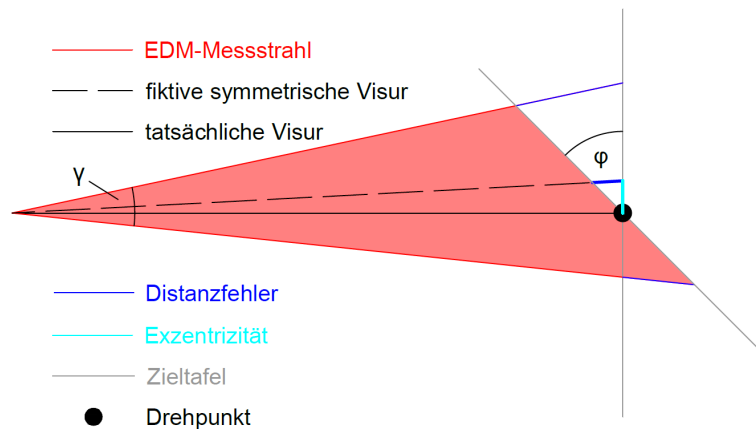


Abbildung 5.18: Darstellung eines asymmetrischen EDM-Spots und dessen Auswirkung auf die reflektorlose Distanzmessung bei einem Einfallswinkel von  $\varphi \neq 0$  gon

Ein asymmetrischer EDM-Spot erzielt denselben Effekt wie eine exzentrische Ausrichtung des Messstrahls. Im Falle der Trimble S6 DR 300+ Totalstation ist auf Grund des Verhältnisses der horizontalen Ausdehnung des Spots von  $\approx 1$  cm auf der rechten Seite zu  $\approx 2$  cm auf der linken Seite der Spot auf einer Distanz von  $D \approx 26.3$  m um  $\approx 0.5$  cm exzentrisch ausgerichtet. In den Simulationsergebnissen aus Abbildung 5.17 ergibt sich für einen lateralen Versatz von 12 mgon ( $\hat{=}$   $\approx 4.9$  mm) ein Fehler in der Distanzmessung von bis zu 1 cm. Dieser Maximalwert wird bei den realen Ergebnissen der Trimble S6 DR 300+ (siehe Abbildung 5.16) nicht ganz erreicht und ist mit  $\approx 7$  mm geringer als in der Simulation. Allerdings wurde die Asymmetrie des EDM-Spots mit  $\approx 0.5$  cm nur grob geschätzt, zudem ist die exakte Intensitätsverteilung innerhalb des Messflecks nicht bekannt.

Für die Trimble S8 HP zeigt sich ein gegenüber der Vertikalachse des Fadenkreuzes schwach asymmetrischer EDM-Spot (siehe Abbildung 5.6b), wobei die Asymmetrie mit  $\approx 2$  mm numerisch angegeben werden kann. Dieser Versatz resultiert aus einem Winkelfehler

von  $\approx 5$  mgon für eine Distanz von  $D \approx 26.0$  m. Vergleicht man die Resultate der Trimble S8 HP (siehe Abbildung 5.15) mit den Simulationsergebnissen, so wird ersichtlich, dass der reale Funktionsverlauf sich innerhalb der grün und rot markierten Linie der Abbildung 5.17 wiederfindet.

Auf Grund der zuvor erläuterten Zusammenhänge zwischen der Auswirkung eines asymmetrischen EDM-Spots und der exzentrischen Ausrichtung der Visur, sowie der gut übereinstimmenden Ergebnisse aus realer Messung und theoretischer Simulation, kann eine grob fehlerhafte Ausrichtung des Zielstrahls auf die Drehachse der Zieltafel ausgeschlossen werden.

### 5.1.3 Resümee

Die Ergebnisse veranschaulichen die Komplexität der reflektorlosen Distanzmessung und verdeutlichen, welche Aspekte der Anwender zur Erzielung guter Ergebnisse zusätzlich zu den bekannten Fehlerquellen (z.B. Atmosphäre, Refraktion) beachten muss. Bei Nichtberücksichtigung stellen diese ein Fehlerpotential dar und addieren sich signifikant zu den sonstigen auftretenden Fehlern.

Zur Gewährleistung der Richtigkeit der Messresultate der reflektorlosen Distanzmessung ist die Position der Totalstation in Relation zum zu messenden Objektpunkt entscheidend, sowie die Kenntnis über die exakte Form und Ausdehnung des EDM-Spots. Vor allem die Kenntnis über die exakte Form und Ausdehnung des EDM-Spots stellt ein Problem dar. Die Mehrheit der Hersteller spezifiziert zwar die Spotgröße unter Angabe des Strahldivergenzwinkels  $\gamma$ , doch ist diese meist nicht ident mit der tatsächlichen Ausdehnung des Messflecks. Trotz der Angabe über die Größe der EDM-Spots hat der Anwender keinerlei Kenntnis über die Lage des EDM-Spots gegenüber dem Fadenkreuz (siehe Abbildung 2.20). Diese ist jedoch signifikant entscheidend und kann Messwerte grob verfälschen (siehe Kapitel 5.1.1 und 5.1.2). Die in den vorherigen Subkapiteln getesteten Totalstationen verfügen alle, mit Ausnahme der Leica TS15, über einen EDM-Spot, dessen Schwerpunkt nicht kongruent ist mit der Fadenkreuzmitte. Eine Zwei-Lagen-Messung behebt zwar Asymmetrien des EDM-Spots, jedoch hat dies nur Gültigkeit für den Fall, dass das zu messende Objekt eine entsprechende Geometrie gegenüber der Visur aufweist. Durch den in bestimmten Messbedingungen positiven Effekt der Elimination von systematischen Distanzfehlern basierend auf der Asymmetrie des EDM-Spots erweist sich die Zwei-Lagen-Messung bei der wahren Positionsermittlung von Kanten insofern als Nachteil, als dass die gemessenen Kanten verbreitert werden. Demnach fließen verstärkt Signalanteile der kantenbildenden Objektteile in die Distanzmessung ein. Dies kann durch einen sehr kleinen EDM-Spot eingeschränkt, jedoch nicht verhindert werden. Demnach sollten Totalstationen mit sehr kleinen EDM-Spots verwendet werden (z.B. Trimble S8 HP) oder die zu messende Distanz zum Objektpunkt

sehr gering gehalten werden. Zusätzlich sollte ein möglichst kleiner Einfallswinkel zum Objektpunkt eingehalten werden, da selbst kleinere Einfallswinkel im Bereich von  $\approx \pm 30$  gon bereits zu Fehlern führen können, die je nach Totalstation mehrere Millimeter betragen können.

## 5.2 Systemverhalten bei einer Glasscheibe in der Visur

### 5.2.1 Simulation

Eine Glasscheibe in der Visur bricht je nach Einfallswinkel den Laserstrahl, sodass dieser vom korrekten Signalweg abweicht und daraus resultierend systematisch falsche Messwerte eruiert werden. Die Abbildung 5.19 zeigt den theoretischen Einfluss einer Glasscheibe auf die Messung der Distanz und der horizontalen Richtung, wobei für die Kalkulation die Parameter des Messaufbaus sowie Brechungsindizes von  $n_{Glas} = 1.5$  und  $n_{Luft} = 1$  verwendet wurden. Der Einfluss auf die Distanzmessung wurde unter Zuhilfenahme der Gleichung 5.2 eruiert, jener auf die horizontale Richtung basiert auf der Gleichung 5.3.

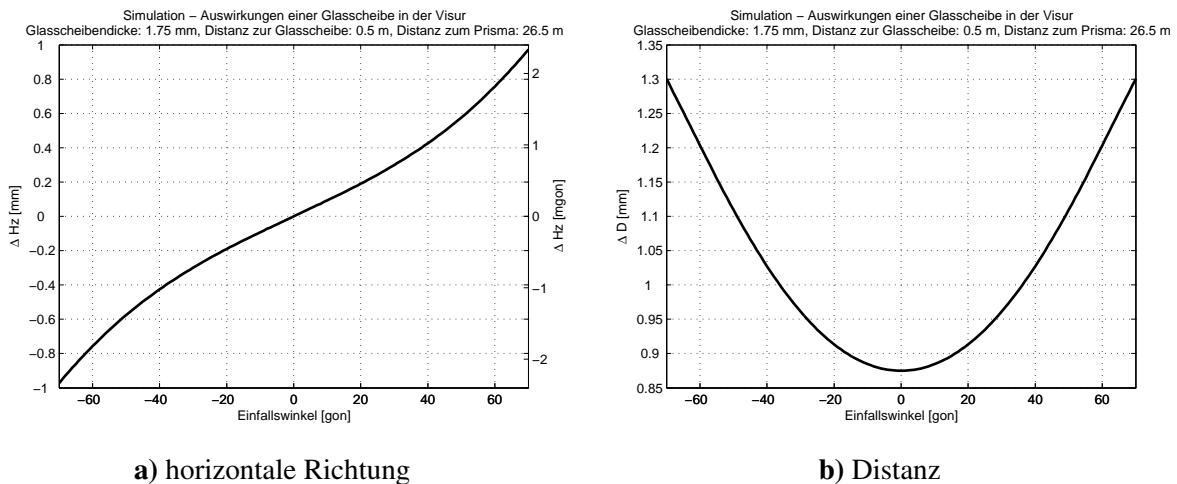


Abbildung 5.19: Die theoretischen Simulationsergebnisse für eine Glasscheibe in der Visur

$$\Delta D = g \cdot \left( \frac{1}{\cos \left( \operatorname{asin} \left( \frac{n_{Luft} \cdot \sin(\varphi)}{n_{Glas}} \right) \right)} - 1 + \left( \frac{n_{Glas} - n_{Luft}}{n_{Luft}} \right) \right) \quad (5.2)$$

$$\Delta Hz = \sin \left( \varphi - a \sin \left( \frac{n_{Luft} \cdot \sin(\varphi)}{n_{Glas}} \right) \right) \cdot \frac{g}{\cos \left( a \sin \left( \frac{n_{Luft} \cdot \sin(\varphi)}{n_{Glas}} \right) \right)} \quad (5.3)$$

Theoretisch ergibt sich für den horizontalen Richtungsfehler ein schiefssymmetrischer Funktionsverlauf, wobei mit Zunahme des Einfallswinkels der horizontale Versatz stärker ausfällt (siehe Abbildung 5.19a). Bei orthogonaler Stellung der Glasscheibe, entspricht einem Einfallswinkel von  $\varphi=0$ gon, wird der Laserstrahl nicht gebrochen, sodass der horizontale Messwert nicht von der Glasscheibe beeinflusst wird.

Die Distanz wird in der Theorie systematisch zu lang gemessen, wobei dieser Fehler unabhängig vom Vorzeichen des Einfallswinkels ist und sich somit ein symmetrischer Funktionsverlauf in Form einer Parabel ergibt (siehe Abbildung 5.19b). Anstelle der tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c = \frac{c_0}{n_{Glas}}$  innerhalb der Glasscheibe wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit unverändert mit  $c = \frac{c_0}{n_{Luft}}$  angenommen, weswegen die Glasscheibe das Signal abbremst und dadurch eine zu lang gemessene Distanz zur Folge hat. Dieser als Offset in den Daten ersichtliche Fehler ergibt sich direkt aus der Relation beider Brechungsindizes und ist abhängig von der Stärke des zu durchdringenden Mediums.

Das folgende Beispiel (Gleichung 5.4 bis Gleichung 5.7) zeigt den Distanzfehler auf Grund der falschen Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der Glasscheibe anhand einer Laufzeitmessung und basiert auf Gleichung 2.12.

**gemessene Laufzeit für die Stärke der Glasscheibe:**

$$\Delta t = \frac{2 \cdot g \cdot n_{Luft}}{c_0} \quad (5.4)$$

**tatsächliche Laufzeit für die Stärke der Glasscheibe:**

$$\Delta t = \frac{2 \cdot g \cdot n_{Glas}}{c_0} \quad (5.5)$$

**Fehler in der Laufzeitmessung:**

$$\Delta\Delta t = \frac{2 \cdot g \cdot n_{Glas}}{c_0} - \frac{2 \cdot g \cdot n_{Luft}}{c_0} = \frac{2 \cdot g}{c_0} \cdot (n_{Glas} - n_{Luft}) \quad (5.6)$$

**Fehler in der Distanzmessung:**

$$\Delta D = \frac{c_0 \cdot \Delta\Delta t}{2 \cdot n_{Luft}} = g \cdot \left( \frac{n_{Glas} - n_{Luft}}{n_{Luft}} \right) \quad (5.7)$$

Die Rotation der Glasscheibe um die vertikale Achse tangiert nicht den vertikalen Einfallswinkel, weswegen bei korrekter vertikaler Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur die vertikale Komponente unabhängig ist von der horizontalen Ausrichtung der Glasscheibe.

## 5.2.2 Kamerabasierte Systemprinzipien

Das kamerabasierte Zielerfassungssystem der Totalstationen Leica MS50 und Leica TS15 wird durch die Glasscheibe in der Visur in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt, fehlerhafte Messwerte sind die Folge. Die Abbildung 5.20 stellt die Differenzen der horizontalen Messwerte der Leica MS50 und Leica TS15 zum Referenzwert, der aus einer Messung ohne Sichthinderung resultiert, gegenüber. Die Ergebnisse aus den praktischen Messungen weichen deutlich von den Simulationsergebnissen aus Abbildung 5.19a ab und unterscheiden sich in mehrerer Hinsicht von den theoretischen Berechnungen: Zum einen ist kein schief-symmetrischer Funktionsverlauf vorhanden, die horizontale Richtung wird systematisch in eine Richtung verfälscht, dabei ist der auftretende Fehler um ein Vielfaches größer als in der Theorie. Zum anderen sind die Messabweichungen nicht um Null zentriert, vielmehr ist ein Offset von mehreren Millimetern in den Daten ersichtlich. Des Weiteren ist bei genauer Betrachtung festzustellen, dass bei exakt  $\varphi=0$  gon keine Messwerte vorhanden sind.

Redundante Messreihen und neue Messkonfigurationen führten stets zu Verhaltensmustern (siehe Abbildung 5.20), die stark von den Simulationen abweichen. Die Ursachen für das gegenüber den Simulationen atypische Verhalten der Messabweichungen in horizontaler Richtung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel sind mit den durchgeführten Tests nicht erklärbar. Auf Grund der Tatsache, dass dieses Fehlverhalten auch mittels Totalstationen, deren Zielerfassungssystem auf dem Funktionsprinzip eines Quadrantendetektors beruht, eruiert wurde (siehe Abbildung 5.26), sind die Messabweichungen in der horizontalen Komponente nicht spezifisch für das jeweilige Systemverhalten des automatischen Zielerfassungssystems,



sondern vielmehr als ein generelles Problem bei Messungen durch Glasscheiben anzusehen. Auf Grund dessen wurden keine weiteren Analysen bezüglich des Einflusses einer Glasscheibe auf die Qualität der Messungen getätigt, der Fokus wurde auf die spezifischen Verhaltensmuster der jeweiligen Zielerfassungssysteme gesetzt.

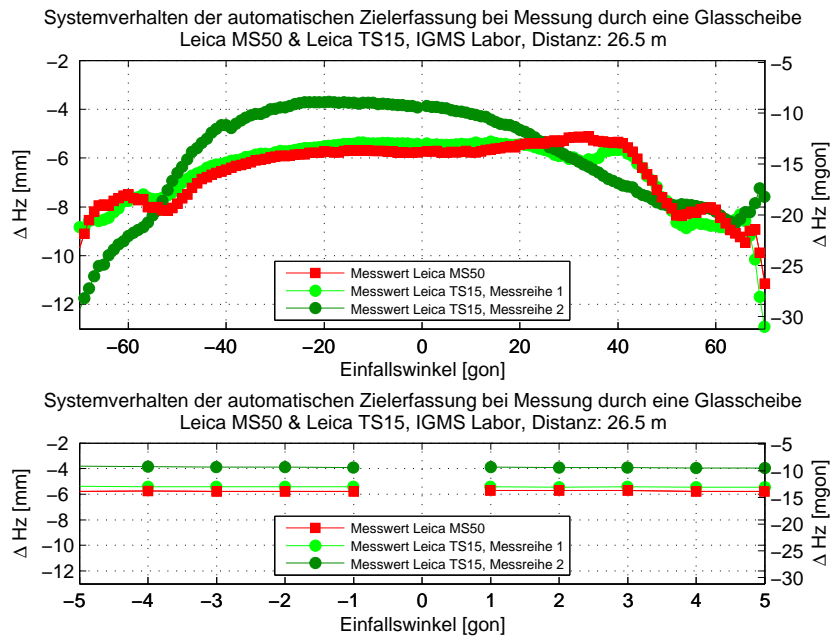


Abbildung 5.20: Ergebnisse der horizontalen Richtungskomponente der Leica MS50 und Leica TS15 Totalstationen

Eine Besonderheit, die zweifelsohne dem Funktionsprinzip kamerabasierter Zielerfassungssysteme geschuldet ist, stellt die Impossibilität einer automatischen Messung durch eine orthogonal zur Visur ausgerichteten Glasscheibe dar. Während bei einem Einfallswinkel von  $|\varphi| \gg 0$  gon die Auswertearithmetik des Kamerasystems eindeutig den Intensitätsspot des Prismas von dem durch die Glasscheibe reflektierten Intensitätsspot unterscheiden kann, überlagern sich entweder bei  $\varphi \approx 0$  gon beide Spots und führen zu einer kumulierten Intensität, oder die im Kamerasystem detektierte Intensität wird ausschließlich von der Reflexion an der Glasscheibe hervorgerufen. In beiden Fällen kann die Intensität nicht als von einem Prisma reflektiertes Signal identifiziert werden, weswegen in weiterer Folge der Plausibilitätstest (siehe Abbildung 3.11) nicht bestanden wird. In einigen Messreihen konnte zwar bei  $\varphi = 0$  gon ein Messwert ermittelt werden, jedoch lieferte die Totalstation stets eine Fehlermeldung, dass dieser Wert nicht als gültig angesehen werden kann. Infolgedessen wurde die Schrittweite verkleinert, um zu analysieren, ab welchem Grenzwert die automatische Zielerfassung basierend auf der Kamera nicht mehr in der Lage ist, einen gültigen Messwert zu eruieren. Dieser Grenzwert konnte mit einem Einfallswinkel von  $\varphi \approx 0.2$  gon bzw.  $\varphi \approx -0.2$  gon festgestellt werden und verifiziert neben der symmetrischen Funktionsweise der Kamera unter anderem auch die korrekt orthogonale Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur. Resultierend aus dem

Faktum, dass eine Distanzmessung zu einem automatisch erfassten Prisma erst nach erfolgreicher Detektion des Zielobjekts möglich ist, kann die Distanz zum Rundprisma bei einem Einfallswinkel von  $-0.2 \text{ gon} \leq \varphi \leq 0.2 \text{ gon}$  zur Glasscheibe ebenfalls nicht erfasst werden. Zwar ist die Distanzmessung prinzipiell unabhängig vom Subsystem der automatischen Zielerfassung, im Falle der Totalstationen MS50 und TS15 von Leica Geosystems ist jedoch bei einer Distanzmessung zu einem automatisch erfassten Prisma die EDM-Sensorik der Kamerasensorik zeitlich nachfolgend.

Im Gegensatz zur horizontalen Komponente zeigen die Variationen in der Distanzmessung, bedingt durch die Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur, einen den Simulationsergebnissen ähnelnden Verlauf (siehe Abbildungen 5.21 und 5.19b).

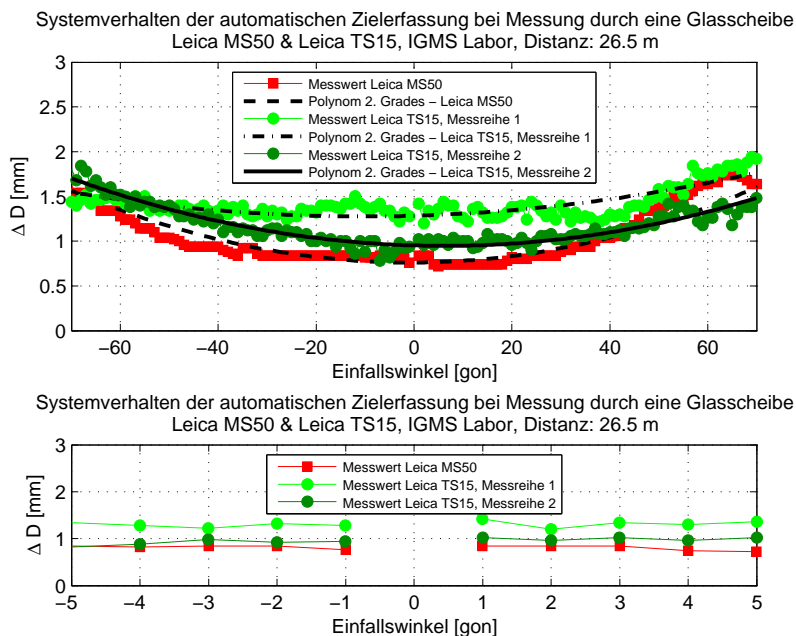


Abbildung 5.21: Ergebnisse der Distanzmessungen der Leica MS50 und Leica TS15 Totalstationen

Im Speziellen deuten die Resultate der Leica MS50, basierend auf dem Messprinzip des WFD, auf einen deutlich parabelförmig ausgeprägten Verlauf hin. Eine Glasscheibe in der Visur verursacht, wie in den Ergebnissen der Simulationsrechnungen einsehbar, einen Offset in den Distanzmesswerten, sodass selbst ohne Brechung des Laserstrahls, ausschließlich resultierend aus dem dichteren Medium Glas, die Distanz signifikant zu lang gemessen wird. Die Distanzmesswerte der Leica TS15 variieren analog zu den Horizontalwerten je nach Messreihe, dennoch ist auch bei den Ergebnissen aus der Phasenvergleichsmessung eine Abhängigkeit vom Einfallswinkel erkennbar. Im Vergleich zu den Resultaten des WFD-Messprinzips streuen die benachbarten Distanzmesswerte der Leica TS15 stärker, weswegen die einzelnen Messreihen eindeutig dem jeweiligen Messprinzip zugeordnet werden können (siehe Abbildung 5.21).

### 5.2.3 Quadrantendetektor

Die Abbildung 5.22 zeigt das Ergebnis der Distanzmessung und der horizontalen Richtungsmessung der Trimble S6 DR Plus Totalstation bei Einschränkung der Sicht zwischen Totalstation und Prisma durch eine Glasscheibe und visualisiert grobe Messfehler resultierend aus dem Funktionsprinzip eines Quadrantendetektors. Im Gegensatz zu den Abbildungen 5.20 und 5.26 werden in Abbildung 5.22 anstelle der zur Referenzmessung relativen Distanzmesswerte die Absolutwerte für die Distanz dargestellt, des Weiteren unterscheiden sich die Abbildungen in der Skalierung der geodätischen x-Achse, sodass die relativen horizontalen Messwerte der Trimble S6 DR Plus in der Einheit gon bzw. meter angegeben werden.

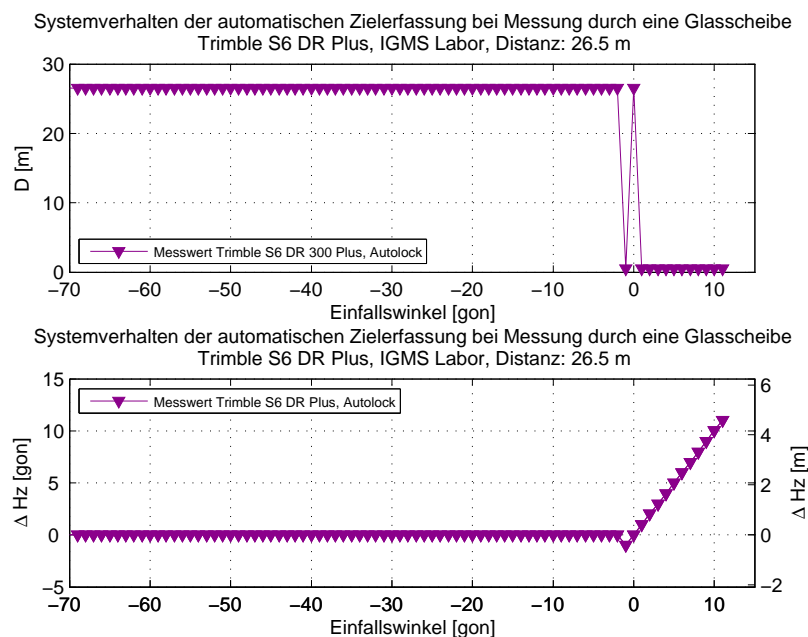


Abbildung 5.22: Ergebnisse der horizontalen Richtungsmessung und der Distanzmessung der Trimble S6 DR Plus Totalstation

Es ist ersichtlich, dass die Distanzmessung für einen Einfallswinkel von  $\varphi = -70$  gon bis einschließlich  $\varphi = -2$  gon zum Rundprisma erfolgt und die gesuchte Distanz von  $D \approx 26.5$  m erfolgreich gemessen wird. Bei einem Einfallswinkel von  $\varphi = -1$  gon wird eine Distanz von  $D \approx 0.5$  m von der EDM-Sensorik eruiert, die mit der Distanz zwischen Glasscheibe und Totalstation korreliert, sodass die EDM-Sensorik den von der Glasscheibe reflektierten infraroten Signalpuls auswertet. Bei exakt orthogonaler Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur befinden sich, resultierend zum einen aus der Reflexion am Prisma und zum anderen aus der Reflexion an der Glasscheibe, zwei Signalpulse auf demselben Signalweg, wobei die Empfangsoptik der EDM-Sensorik den später detektierten und vermutlich stärkeren Puls auswertet, weshalb die Distanz zum Prisma gemessen wird. In weiterer Folge wird mit

zunehmendem Einfallswinkel bis zu einem Einfallswinkel von  $\varphi = 11$  gon ständig die Distanz zur Glasscheibe gemessen, ab einem Einfallswinkel von  $\varphi = 12$  gon kann kein Distanzmesswert mehr eruiert werden. Auf Grund der Tatsache, dass im Regelkreis der automatischen Zielerfassung erst nach erfolgreicher Zielfindung eine Distanzmessung ausgelöst wird, ist dieses Fehlverhalten unabhängig vom Messprinzip der EDM-Sensorik und ist stattdessen auf die Funktionsweise des Zielerfassungssystems eines Quadrantendetektors zurückzuführen.

Analog zu den Resultaten der Distanzmessung zeigt sich für die horizontale Richtungskomponente dasselbe Verhalten in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur: In jenen Messkonstellationen, bei denen die Glasscheibe in einem Winkel von  $\varphi = -70$  gon bis  $\varphi = -2$  gon zur Visur der Totalstation steht, kann der horizontale Messwert zum Rundprisma erfasst werden. Die Ursache hierfür ist, dass auf Grund der Konstellation sowie der Parameter des Quadrantendetektors das von der Glasscheibe reflektierte infrarote Signal nicht am Quadrantendetektor detektiert wird (siehe Abbildung 5.23 bzw. 5.24b), sondern ausschließlich das vom Rundprisma reflektierte Signal zur Auswertung vorhanden ist.

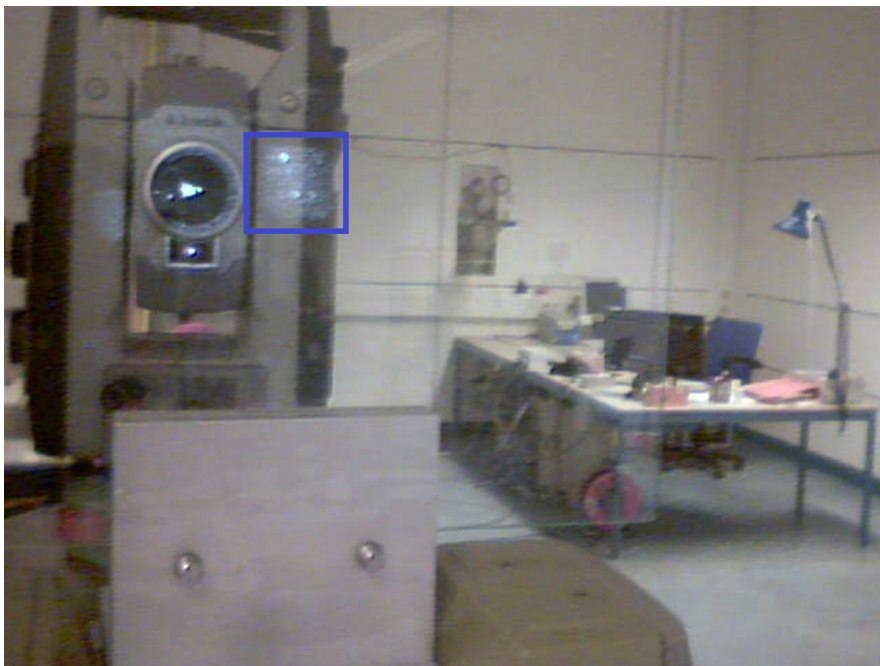


Abbildung 5.23: Der infrarote Spot der Autolock-Technologie an der Glasscheibe (blau umrandet)

In der vorliegenden Messkonstellation ist die Glasscheibe  $\approx 0.5$  m von der Totalstation entfernt, sodass das infrarote Signal des Autolocks mit einer Ausdehnung von  $2.30^\circ$  (siehe Tabelle 3.6) theoretisch ein  $\approx 2$  cm  $\cdot$   $\approx 2$  cm großes quadratisches Signalmuster an der Scheibe erzeugt. Jedoch zeigten Untersuchungen, dass auf kurze Distanzen das infrarote Signal einen deutlich kleineren Bereich abdeckt, als in den Spezifikationen angegeben wird (siehe Tabelle 3.7). Infolgedessen ist ein Signalbereich von  $\approx 1.5$  cm  $\cdot$   $\approx 1.5$  cm auf eine Entfernung von 0.5 m realis-

tischer. Dieses Signalmuster wird von der Glasscheibe reflektiert und ab einem Einfallswinkel von  $\varphi \approx -1$  gon am Quadrantendetektor mit einer Ausdehnung von  $\approx 3 \text{ cm} \cdot \approx 3 \text{ cm}$  detektiert (siehe Abbildung 5.24a). Bei einem Einfallswinkel von  $\varphi = -1$  gon entsteht durch die Verdopplung des Winkels auf Grund der Spiegelung an der Glasfront auf einem Signalweg von 0.5 m ein Versatz von  $\approx 1.6 \text{ cm}$  (siehe Abbildung 5.24a). Dieser Versatz ist klein genug, um einen Überlappungsbereich zwischen dem Autolock-Signalbereich und der Empfangsfläche des Quadrantendetektors zu erzeugen, sodass das von der Glasscheibe reflektierte infrarote Signal ausgewertet werden kann. Ein Einfallswinkel von  $\varphi = -2$  gon verursacht einen horizontalen Versatz von  $\approx 3.2 \text{ cm}$ , sodass die von der Glasscheibe reflektierten Intensitäten nicht am Quadrantendetektor detektiert werden und ausschließlich die Prismenreflektion detektiert wird (siehe Abbildung 5.24b). Es sei darauf hingewiesen, dass die Abbildung 5.24 einen schematisch vereinfachten und keinen maßstabstreuen Zusammenhang zeigt und ausschließlich dem Verständnis der erläuterten Funktionsweise dient. Diese Darstellung ist in ihrer Konzeption dennoch gültig, da gemäß den Angaben aus [Trimble, 2009b] der Divergenzwinkel des Empfängers ( $\hat{=}$  Quadrantendetektor) auf den Divergenzwinkel der Sendeoptik ( $\hat{=}$  Ausdehnung des Autolock-Bereichs) abgestimmt ist, weswegen der in Abbildung 3.21 dargestellte Strahlengang für die schematische Darstellung in Abbildung 5.24 vernachlässigbar ist.

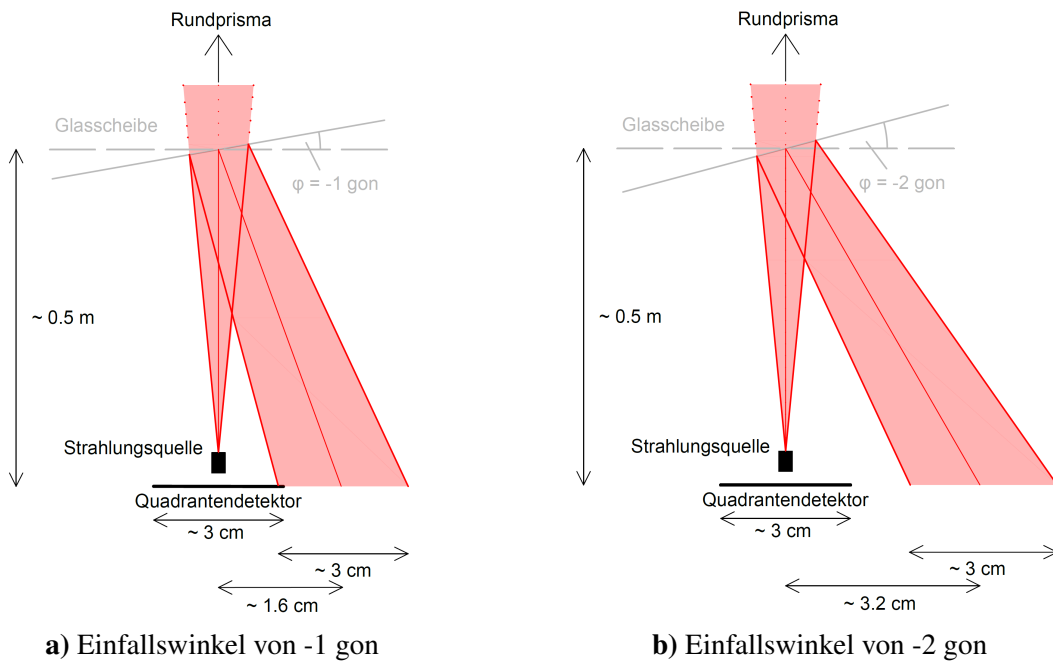


Abbildung 5.24: Signalreflexion durch die Glasscheibe bei einem Einfallswinkel von  $\varphi = -1$  gon (5.24a) und  $\varphi = -2$  gon (5.24b)

Durch die symmetrische Bauweise der Sende- und Empfangsoptik bei der automatischen Zielerfassung mittels Quadrantendetektor ist der Einfallswinkel unabhängig vom Vorzeichen, ein Einfallswinkel von  $\varphi = 1$  gon führt ebenfalls zur Detektion des an der Glasscheibenfront reflektierten Signals und wurde in mehreren Versuchsreihen verifiziert.

Das Faktum, dass bei einem Einfallswinkel von  $\varphi = 1$  gon das Signal der Glasscheibe detektiert wird erklärt noch nicht die Abweichung in der horizontalen Komponente von 1 gon, jedoch ist auch dies ein Resultat der Funktionsweise des Quadrantendetektors und ist in Abbildung 5.25 ersichtlich.

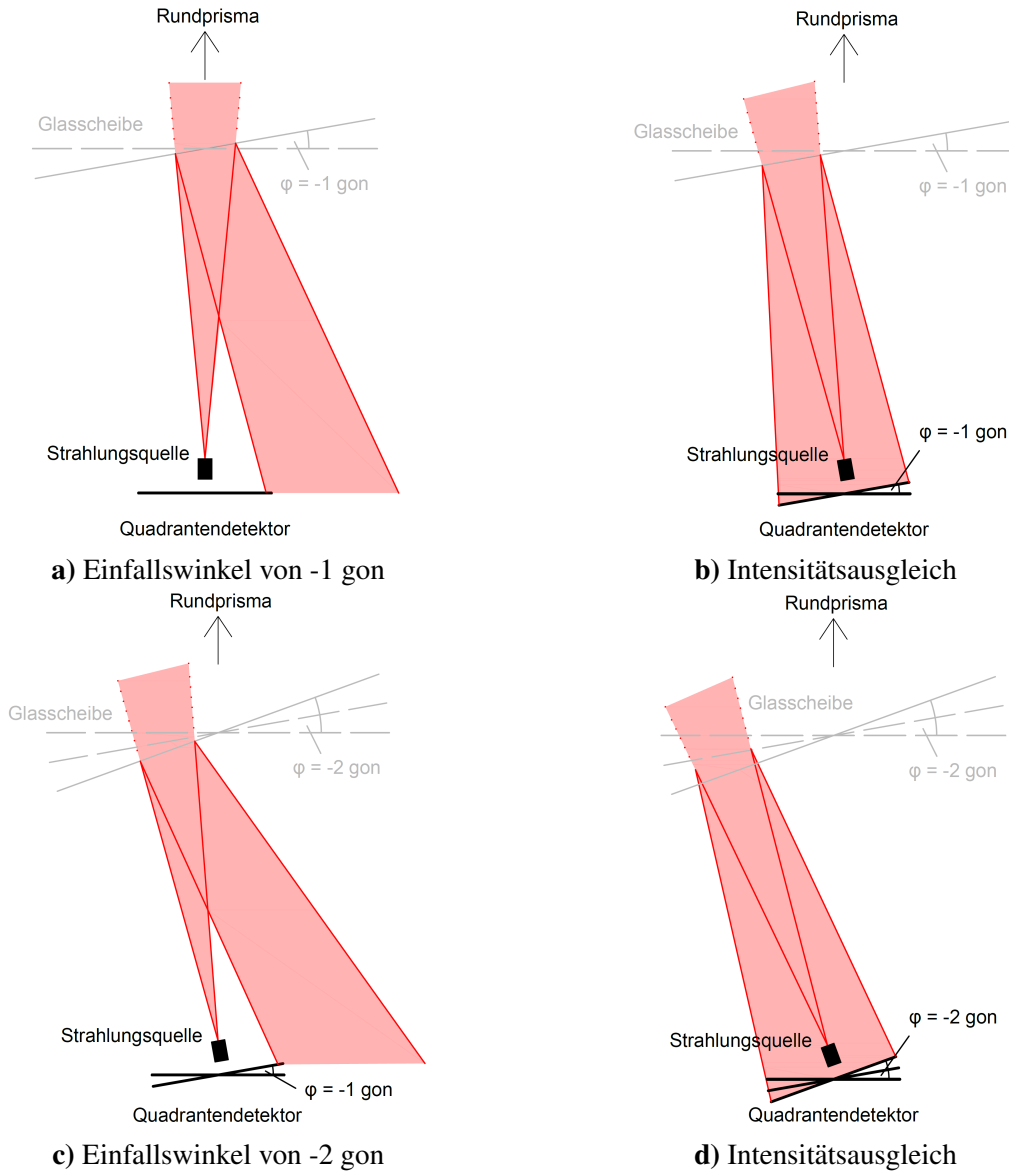


Abbildung 5.25: Die Position des Teleskops wird solange verändert, bis sich die detektierte Intensität im Zentrum des Quadrantendetektors befindet.

Bei einem Einfallswinkel von  $\varphi = -1$  gon wird ein von der Glasscheibe reflektierter Signalanteil am Quadrantendetektor detektiert (siehe Abbildung 5.25a). Gemäß dem Funktionsprinzip eines Quadrantendetektors (siehe Abbildung 3.22) wird die Position des Teleskops so lange in seiner Position verändert, bis die Signalintensität zentral am Quadrantendetektor registriert

wird. Dies ist genau dann der Fall, wenn die Visur orthogonal zur Glasscheibe ausgerichtet ist, weswegen das Teleskop mit demselben Winkel in der horizontalen Ausrichtung verändert wird, wie die Fehlstellung gegenüber der Ausgangslage ( $\hat{=}$  Einfallswinkel) beträgt (siehe Abbildung 5.25b). Ausgehend von dieser Situation wird die Glasscheibe erneut um  $-1$  gon in horizontaler Richtung verändert, sodass in der Gesamtheit betrachtet ein Einfallswinkel von  $\varphi = -2$  gon zur Visur der Ausgangstellung der Totalstation vorhanden ist. Auf Grund der vorherigen horizontalen Richtungsänderung des Teleskops wird auch bei dieser Konfiguration der von der Glasscheibe reflektierte Spot am Quadrantendetektor detektiert (siehe Abbildung 5.25c) und nach demselben zuvor erläuterten Prinzip zur Kongruenz mit dem Zentrum des Quadrantendetektors gebracht (siehe Abbildung 5.25d). Dieser Vorgang wird andauernd bis zu jener Messkonstellation wiederholt, an der kein Signal mehr am Empfänger detektiert wird. Die Abbildung 5.25 zeigt, dass auf Grund des sich ändernden Einfallswinkels von  $\Delta\varphi \approx -1$  gon und der daraus resultierenden horizontalen Richtungsänderung der Totalstation die Visur zum einen von der Richtung zum Rundprisma kontinuierlich immer stärker abweicht, und zum anderen kontinuierlich immer stärker an den Rand der Glasscheibe gedrängt wird. Bei einem Einfallswinkel von  $\varphi \approx 12$  gon gegenüber der Ausgangsstellung ist die Visur und somit das ausgesandte infrarote Signal  $\approx 9.4$  cm seitlich vom Zentrum der Glasscheibe und dadurch außerhalb der Glasscheibenfront, weswegen keine Reflexion an der Glasscheibe erfolgt. Gleichzeitig ist auch in einer Entfernung von  $D \approx 26.5$  m das Rundprisma  $\approx 5$  m lateral von der Visur entfernt und dadurch ebenfalls nicht fähig das Signal zu reflektieren. Folglich kann kein Ziel gefunden werden und die Messungen schlagen fehl (siehe Abbildung 5.22).

Der lineare Verlauf des Fehlers in der horizontalen Richtung resultiert folglich aus der Schrittweite, mit der die horizontale Ausrichtung der Glasscheibe verändert wird, und aus der intensitätsausgleichenden Nachführung des Teleskops. Mit kleineren Rotationsschrittweiten von  $\Delta\varphi \approx 0.2$  gon konnte dieses Resultat verifiziert und ein lineares Fehlverhalten bestätigt werden. Dieses Fehlverhalten resultiert allein aus der Signaldetektion des von der Glasscheibe reflektierten Spots, interessanterweise spielt die Reflexion des Prismas in dieser Messkonfiguration keine signifikante Rolle.

Bei exakt orthogonaler Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur und folglich einem Einfallswinkel von  $\varphi = 0$  gon wird der von der Glasscheibe reflektierte infrarote Spot direkt im Zentrum des Quadrantendetektors empfangen, eine Nachführung des Teleskops ist nicht notwendig und folglich wird kein grober horizontaler Fehler ermittelt (siehe Abbildung 5.22).

Die Tatsache, dass der Quadrantendetektor der Instrumente Trimble S6 DR Plus, Trimble S6 DR 300+ und Trimble S8 HP die durch die Glasscheibenfront reflektierten infraroten Signale detektiert und auswertet, ist durch die fehlende Intensitätsanalyse begründet (siehe Kapitel 3.4.2). Im Gegensatz zu den kamerabasierten Systemen kann der Anwender nicht, wie im vorherigen Subkapitel erläutert, durch eine Fehlermeldung gewarnt werden, der Quadrantendetektor kann Fremdre reflexionen nicht von Prismenreflexionen unterscheiden.

Bei korrekter Systemeinstellung kann für die vorliegende Messkonfiguration das Fehlverhalten des Quadrantendetektors eliminiert werden. Die Verwendung der FineLock-Technologie ist gemäß den Angaben aus [Trimble, 2010d] nur für passive Prismen in einer Entfernung von  $\geq 20\text{m}$  konzipiert, sodass Signale, die von kürzeren Prismen reflektiert werden, in der Auswertung ignoriert werden. Die Abbildung 5.26 zeigt, dass die zuvor vorhandene Problematik der Glasscheibenreflexion bei der Trimble S8 HP und der Verwendung der FineLock-Technologie nicht präsent ist.

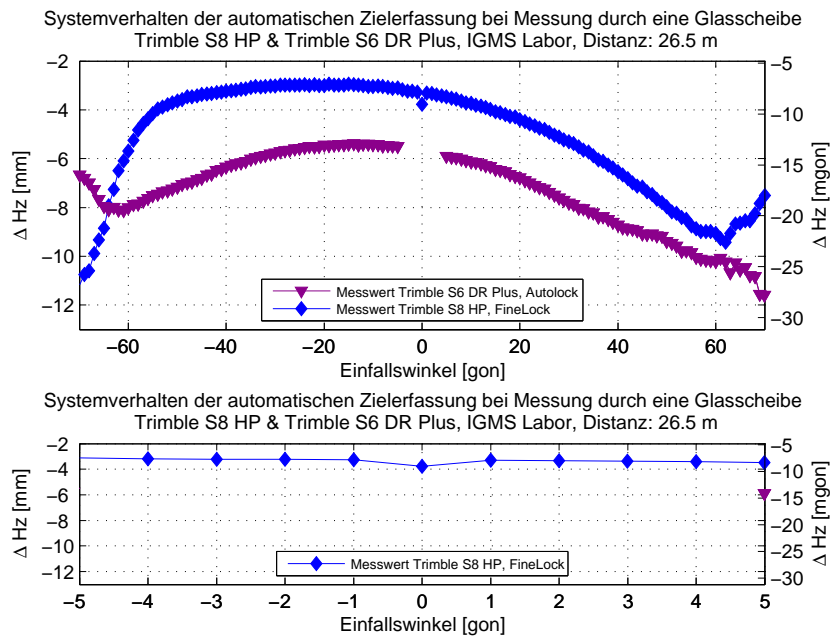


Abbildung 5.26: Die horizontalen Messabweichungen der Trimble S6 DR Plus (mit einer Ausparung von  $\pm 5$  gon) und der Trimble S8 HP

Zwar wird durch die gegebene Konstellation bei Einfallswinkeln von  $\varphi \leq 1$  gon das von der Glasscheibenfront reflektierte Signal am Quadrantendetektor empfangen, dieses jedoch nicht im Auswerteprozess berücksichtigt, sondern ausschließlich das vom Prisma reflektierte Signal zur Positionierung des Teleskops verwendet. Bei der Standardeinstellung „Autolock“ ergeben sich für die Trimble S8 HP Totalstation in dieser Messkonfiguration analog zu den Totalstationen der Trimble S6-Serie die Probleme von Fremdreflexionen. Auf Grund der Tatsache, dass die FineLock-Technologie demselben Funktionsprinzip unterworfen ist wie die Autolock-Technologie, ist von einer Detektion von Fremdreflexionen weiter als 20 m entfernter Objekte auszugehen. Infolgedessen würde eine idente Messkonfiguration mit einem Abstand von  $\geq 20\text{m}$  anstatt der getesteten Distanz von  $D \approx 0.5\text{m}$  zwischen Totalstation und Glasscheibe zu demselben Fehlverhalten führen, wie dies unter Verwendung der Autolock-Technologie der Fall ist. Dabei ist neben der neuen Messkonstellation auch der kleinere Signalbereich der FineLock-Technologie zu beachten (siehe Tabelle 3.6).



Die Resultate der automatischen Zielerfassung, deren Sensorsystem ein Quadrantendetektor ist, sind in derselben Art und Weise auf Grund der Brechung des Laserstrahls durch die Glasscheibe verfälscht wie jene Ergebnisse, die aus dem Funktionsprinzip einer Kamera resultieren (siehe Abbildungen 5.26 und 5.20). Demnach werden auch mit den Instrumenten Trimble S6 DR Plus, Trimble S6 300+ und Trimble S8 HP Messwerte für die horizontale Richtungskomponente eruiert, die deutlich von den Ergebnissen der Simulationskalkulation abweichen (siehe Abbildung 5.19a). Zur Analyse des Einflusses der Glasscheibe auf die Genauigkeit der Messungen des automatischen Zielerfassungssystems der Trimble S6 DR Plus wurde ein Bereich von  $\pm 5$  gon zur orthogonalen Stellung der Glasscheibe zur Visur ausgespart. Im Gegensatz zu den Totalstationen mit kamerabasierter Zielerfassung ist die Trimble S8 HP fähig einen Messwert bei orthogonaler Stellung der Glasscheibe zur Visur zu eruiern, wengleich dieser sich signifikant von den benachbarten Messwerten unterscheidet (siehe Abbildung 5.26).

Die Resultate der Distanzmessungen der Totalstationen Trimble S8 HP und Trimble S6 DR Plus deuten auf einen ähnlichen systematischen Einfluss der Glasscheibe hin, wie es bei den Totalstationen Leica MS50 und Leica TS15 der Fall und in den Simulationsrechnungen näherungsweise dargelegt ist (siehe Abbildungen 5.27, 5.21 und 5.19b).

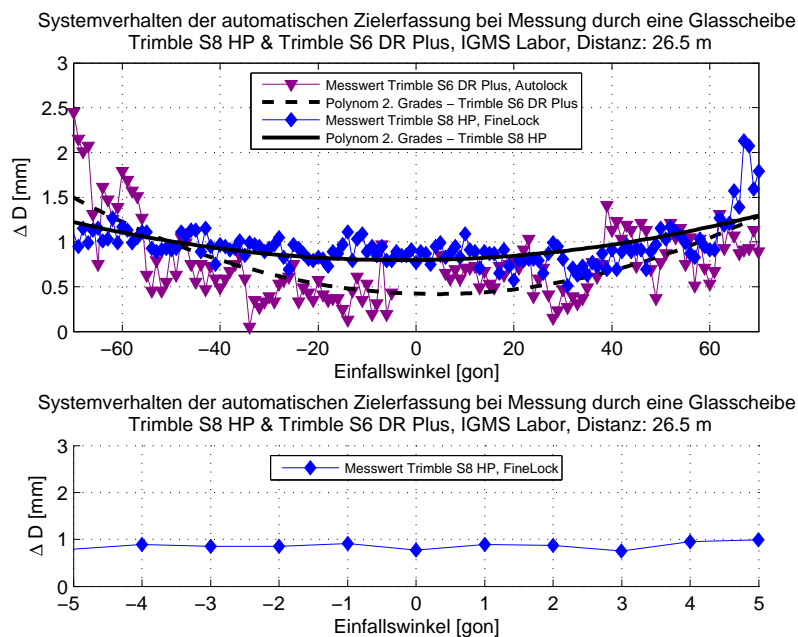


Abbildung 5.27: Ergebnisse der Distanzmessungen der Trimble S6 DR Plus (mit einer Aussparung von  $\pm 5$  gon) und der Trimble S8 HP

Während die Messreihe der Trimble S6 DR Plus stärker an die Form einer Parabel angelegt ist, wird der schwach quadratische Verlauf der Trimble S8 HP erst durch ein Polynommodell Zweiten Grades ersichtlich. Auffallend sind die stark streuenden Distanzmesswerte der

Trimble S6 DR Plus Totalstation, jene der Trimble S8 HP zeigen eine vergleichsweise bessere Präzision. Diese Tatsache ist durch die unterschiedliche EDM-Sensorik erklärbar und verifiziert erneut die bessere Messpräzision der Phasenvergleichsmessung im Vergleich zur Laufzeitmessung (siehe Kapitel 2.4).

### 5.2.4 Resümee

Eine Sichtbehinderung in der Visur in Form einer Glasscheibe beeinflusst gravierend die Performance des automatischen Zielerfassungssystems und die Leistungsfähigkeit der EDM-Sensorik in modernen Totalstationen. Sie beeinträchtigt die korrekte Funktionsausübung der sensorischen Elemente, sodass abhängig vom Systemprinzip teils grob falsche Messwerte eruiert werden.

Entgegen den Prognosen aus den Simulationskalkulationen zeigen die Ergebnisse der automatischen Zielerfassungssysteme eine systematische Abweichung der horizontalen Richtungskomponente in ausschließlich eine laterale Richtung, deren Größenordnung ein Vielfaches der Messpräzision ist und zudem einen Offset von mehreren Millimetern aufweist (siehe Abbildungen 5.20 und 5.26). Eine Differenzierung der Systemprinzipien ergibt sich hinsichtlich der Leistungsfähigkeit bei nahezu orthogonaler Ausrichtung der Glasscheibe zur Visur: Kamerabasierte Systeme können Fremdreflexionen von Prismenreflexionen unterscheiden und eruieren bei Signalintensitäten eines Fremdobjekts entweder keinen Messwert oder warnen den Anwender mittels einen Fehlercodes (siehe Abbildung 5.20). Dahingegen detektiert ein Quadrantendetektor den von einer Glasscheibe reflektierten Intensitätspot und wertet diesen aus, sodass unter Umständen grobe Messfehler in den Daten vorhanden sind und der Anwender erst im Nachhinein Kenntnis von diesen hat (siehe Abbildung 5.26).

Die Distanzmessungen sind durch das Vorhandensein einer Glasscheibe zwischen der Totalstation und dem Zielobjekt ebenfalls systematisch verfälscht, auf Grund des dichteren Mediums der Sichtbehinderung werden die Distanzen zu lang gemessen (siehe Abbildungen 5.21 und 5.27). Die Fehler in der Distanzmessung sind deutlich kleiner als in der horizontalen Komponente, dennoch können sie je nach Einfallswinkel und Messprinzip mehrere Millimeter betragen. Es bestätigt sich dabei erneut das Faktum der besseren Messpräzision der Phasenvergleichsmessung im Vergleich zur Laufzeitmessung, jedoch weisen auch die Resultate der WFD-Technologie eine gute Messpräzision auf (siehe Abbildungen 5.21 und 5.27).

Die Verwendung einer Glasscheibe in der Visur verfälscht die Messresultate, eine solche Konfiguration ist auf keinen Fall zu empfehlen. Ein passendes Korrekturmodell für die automatischen Richtungsmessungen ist auf Grund der unerwarteten Ergebnisse schwierig realisierbar, ebenso stellt eine Korrektur der Distanzmesswerte den Anwender vor eine aufwendige, aber lösbare Aufgabe: Der korrekte Brechungsindex des Materials der Sichtbe-

hinderung ist gleichermaßen ein entscheidender Parameter wie die Dicke des Sichtschutzes, dessen Abstand zur Totalstation sowie die Entfernung des Zielpunkts.

## 5.3 Messungen auf ein MultiTrack 1000 Prisma

Zur besseren Visualisierung der periodischen Effekte auf Grund des omnidirektionalen Ziels werden als Ergebnisse nicht die Absolutwerte, sondern die zur ersten Messung relativen Messwerte in den Abbildungen dargestellt. Des Weiteren sind die Resultate mittelwertszentriert, da ansonsten Variationen des jeweiligen Referenzmesswerts der Messreihe zu einem Offset zwischen den Datenreihen führen würden und weitere Analysen um diesen verfälscht wären.

### 5.3.1 Untersuchungen im Labor

#### Systemprinzip der automatischen Zielerfassung: aktiv — semiaktiv — passiv

Die unterschiedlichen Verhaltensweisen der automatischen Zielerfassung je nach eingestelltem Zielerfassungsmodus sind in den Abbildungen 5.28 und 5.30 deutlich zu erkennen. Die Systematik der geometrischen Anordnung der Prismenfacetten spiegelt sich in den Messreihen für den passiven und semiaktiven Zielerfassungsmodus in der horizontalen Komponente wider (siehe Abbildung 5.28). Die in Abbildung 5.28 mit den Kleinbuchstaben a, b, c und d gekennzeichneten Stellen beziehen sich auf die vier Abbildungen der Graphik 5.29, wenngleich für die Messkonfiguration der Abbildung 5.29 eine Messdistanz von  $D \approx 7\text{ m}$  gewählt wurde. Die Datenreihen zeigen ein periodisches Muster mit einer Frequenz von acht Schwingungen pro vollständiger Rotation des  $360^\circ$  Prismas um die vertikale Achse, welches aus den acht rotationssymmetrisch angeordneten Prismenfacetten des MultiTrack 1000 Prismas resultiert.

Auffallend ist vor allem der nahezu sprunghafte Übergang von Signalminima zu Signalmaxima eines Wellenpakets im Bereich von  $\approx 25\text{ gon}$  und  $50\text{ gon}$ -Vielfache davon. Dies ergibt sich aus der Messkonfiguration, der Prismenfacettenanordnung und speziell aus dem Funktionsprinzip des Quadrantendetektors. Die Referenzmessung wurde unter optimaler Ausrichtung einer Prismenfacette zum Visurstrahl getätigt (siehe Abbildung 5.29a), alle weiteren Messwerte resultieren aus einer Messung zum Ziel, welches sich kontinuierlich um  $\approx 1\text{ gon}$  im Uhrzeigersinn um die vertikale Achse des Prismas im Vergleich zur Ausgangsstellung verdreht hat. Auf Grund der rotationssymmetrischen oktogonalen Prismenfacettenanordnung und der genannten Ausgangsstellung ergibt sich mit fortschreitender Verdrehung im Uhrzeigersinn ein Übergewicht an Facettenanteilen in der linken Hälfte der Visur. Gemäß dem Funk-

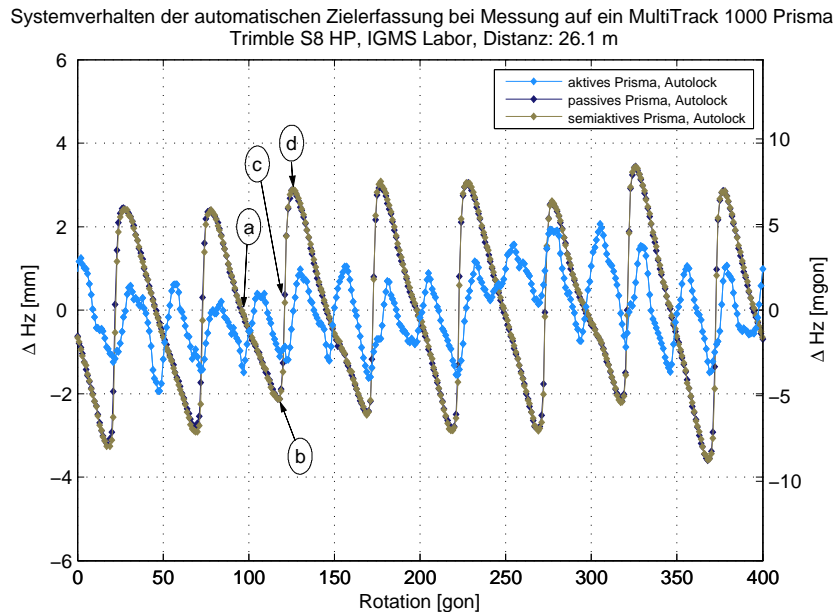


Abbildung 5.28: Resultate der horizontalen Komponente der Trimble S8 HP

tionsprinzip des Quadrantendetektors, alle sichtbaren Intensitäten auszugleichen (siehe Kapitel 3.4.1), driftet die horizontale Visur nach links und resultiert in einem kleineren Horizontalwinkel gegenüber der Ausgangsstellung. Dieser Vorgang wird kontinuierlich fortgeführt, bis das Maxima an Übergewicht von Facettenanteilen in der linken Hälfte erreicht ist (siehe Abbildung 5.29b) und folglich eine maximale Abweichung des Horizontalwinkels zum Horizontalwinkel der Ausgangsstellung aufweist. Bei annähernd symmetrischer Aufteilung der Prismenfacetten gegenüber der vertikalen Achse des Quadrantendetektors (siehe Abbildung 5.29c) entsteht ein fiktiver Messwert, und Mischsignale verhindern einen sprunghaften Facettenwechsel in den Messreihen (siehe Abbildung 5.28). Im Anschluss an den Facettenwechsel ist der überwiegende Facettenanteil in der rechten Hälfte zu finden, sodass die Horizontalwerte im Vergleich zur Ausgangslage zu groß ausfallen (siehe Abbildung 5.29d). Dieser Vorgang wiederholt sich durch die oktagonale Facettenanordnung insgesamt achtmal innerhalb eines vollständigen Rotationsszyklus des  $360^\circ$  Prismas um die vertikale Achse. Die Graphik 5.28 deutet an, dass im semiaktiven Modus die Horizontalmessung auf den passiven Modus beruht. Dies steht jedoch im Widerspruch zu [Trimble, 2009c], wonach die Horizontalrichtungen aus dem aktiven Signal resultieren.

Gegenüber dem passiven und semiaktiven Zielerfassungsmodus weisen die horizontalen Messergebnisse des aktiven Prismas eine völlig andere Charakteristik auf (siehe Abbildung 5.28). Zum einen sind die Abweichungen deutlich kleiner, zum anderen ist die periodische Wiederholung von acht Schwingungen nicht mehr detektierbar. Beides resultiert aus der Tatsache, dass für die horizontale Winkelmessung bei der automatischen Zielerfassung eines

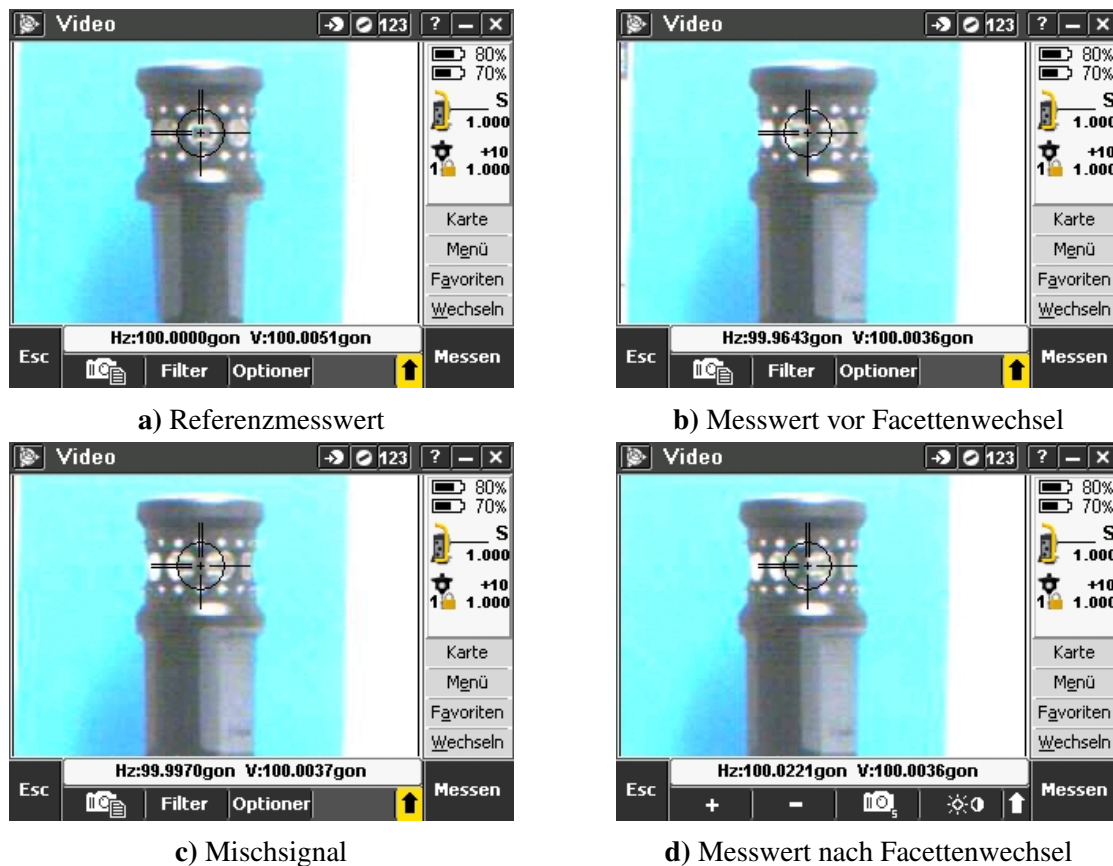


Abbildung 5.29: Bildschirmausgabe der Trimble S8 HP bei automatischer Zielerfassung

aktiven MultiTrack 1000 Prismas die infraroten Signale maßgebend sind, welche von 16 rotationssymmetrischen LEDs ausgesendet werden (siehe Abbildung 3.31a). Demzufolge weisen die Messresultate der horizontalen Komponente für die aktive Prismeneinstellung eine Schwingung auf, welche sich innerhalb einer vollständigen Rotation des Prismas um die vertikale Achse 16-mal wiederholt (siehe Abbildung 5.28). Außerdem resultiert durch die Mehrzahl an LEDs gegenüber Prismenfacetten ein geometrisch in horizontaler Richtung kleinerer Abstand zwischen den LEDs als zwischen den Prismenfacetten, weshalb die maximalen horizontalen Abweichungen zur Referenzmessung deutlich kleiner ausfallen.

Die Ergebnisse der vertikalen Komponente differieren signifikant von den horizontalen Messresultaten. In Abbildung 5.30 wird deutlich, dass die Messwerte bei einer aktiven Prismeneinstellung um ein Vielfaches stärker variieren als im passiven oder semiaktiven Modus. Des Weiteren ist der Verlauf der Messreihe im aktiven Prismenmodus keiner erkennbaren Systematik unterworfen, das Verhalten der Messwerte lässt auf einen zufälligen Prozess schließen.

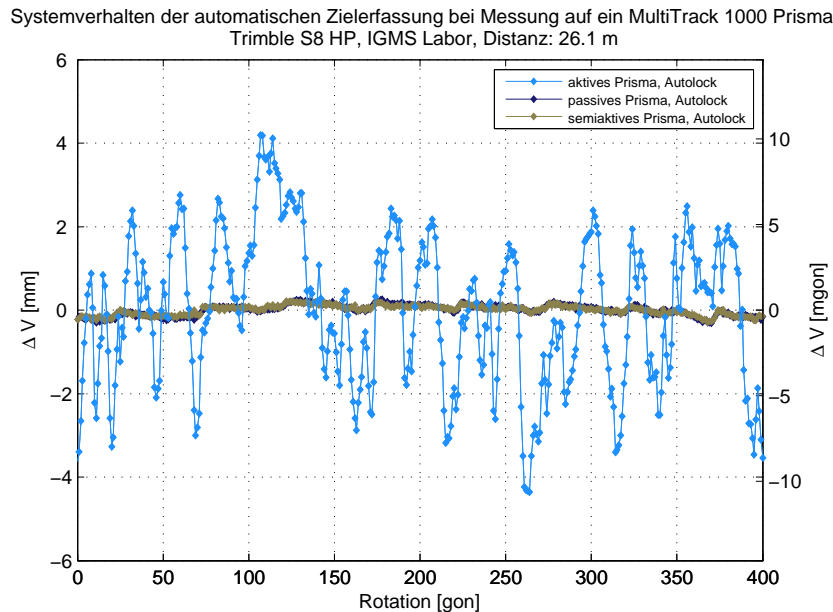


Abbildung 5.30: Messabweichungen des Vertikalwinkels bei automatischer Zielerfassung

Die präzisere Messung von Vertikalwinkeln im semiaktiven Modus wird in [Trimble, 2011b, Seite 373] vom Hersteller erwähnt. Der Quadrantendetektor detektiert und prozessiert sowohl das passive als auch das aktive Signal simultan, wobei nach [Trimble, 2009c] das passive Signal für die vertikale und das aktive Signal für die horizontale Komponente verwendet wird. Dies zeigt, dass im passiven Modus Vertikalwinkel und im aktiven Modus horizontale Richtungen besser bestimmt werden können. Offen ist aber die Frage, warum in den durchgeführten Tests im semiaktiven Modus nicht beide Signalanteile zur Auswertung benutzt wurden.

Die Unterschiede zwischen dem aktiven und passiven bzw. aktiven und semiaktiven Modus sind klar und deutlich erkennbar, es stellt sich die Frage, wie sehr sich die Messresultate des semiaktiven und passiven Modus voneinander unterscheiden. Diesbezüglich werden die Differenzen zwischen beider Messreihen in Abbildung 5.31 dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Messresultate sich nicht signifikant voneinander unterscheiden und nur in der Größenordnung des Messrauschens voneinander abweichen. Einzig in der horizontalen Komponente sind einzelne Peaks detektierbar, die aber an den Stellen des Facettenwechsels auftreten und somit durch Mischsignale hervorgerufen werden.

Bisher wurde ausschließlich die Leistungsfähigkeit der automatischen Zielerfassung betrachtet, jedoch ergeben sich auch für die Distanzmessresultate des EDM-Sensors systematische Fehler auf Grund der geometrischen Form des MultiTrack 1000 Prismas. Erneut

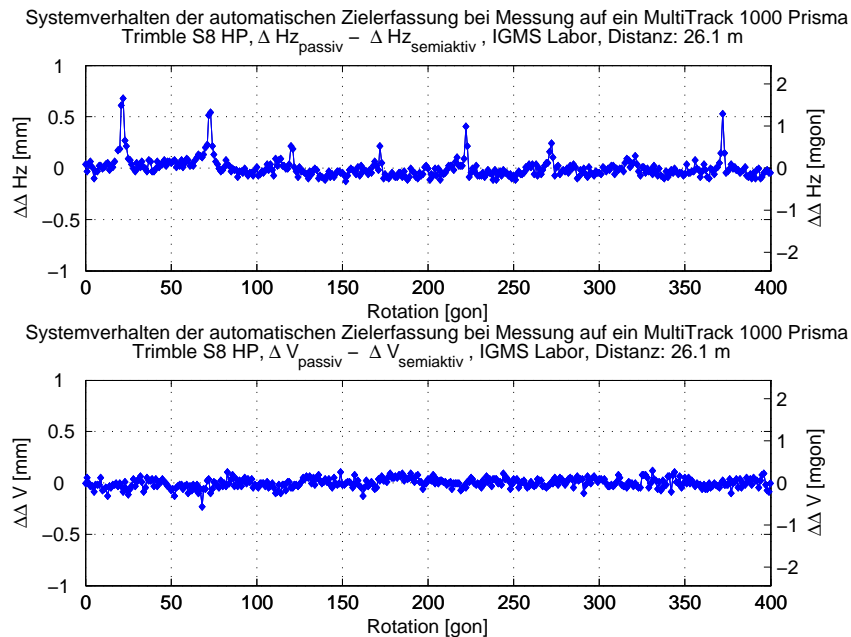


Abbildung 5.31: Differenz zwischen der semiaktiven und der passiven Systemeinstellung betreffend die Richtungskomponenten

ist der Einfluss der acht einzelnen Prismenfacetten sowie deren kontinuierlicher Übergang deutlich erkennbar (siehe Abbildung 5.32). Die Zunahme des Einfallswinkels auf Grund der Verdrehung des  $360^\circ$  Prismas führt zu einer gegenüber der Referenzmessung zu lang gemessenen Distanz, wobei der maximale Distanzfehler beim Facettenwechsel zu beobachten ist. Eine detailliertere Interpretation bezüglich den Distanzvariationen bei der Messung auf  $360^\circ$  Prismen ist dem Kapitel 5.3.2 zu entnehmen.

Die Abbildung 5.32 lässt die Hypothese zu, dass alle drei Einstellungen (aktiv, passiv, semiaktiv) dieselben Distanzvariationen aufweisen. Dies wird durch die Abbildung 5.33, welche die Differenzen der Distanzvariationen aus Abbildung 5.32 darstellt, verifiziert und sie visualisiert, dass die Differenzen in der Größenordnung des Messrauschens liegen.

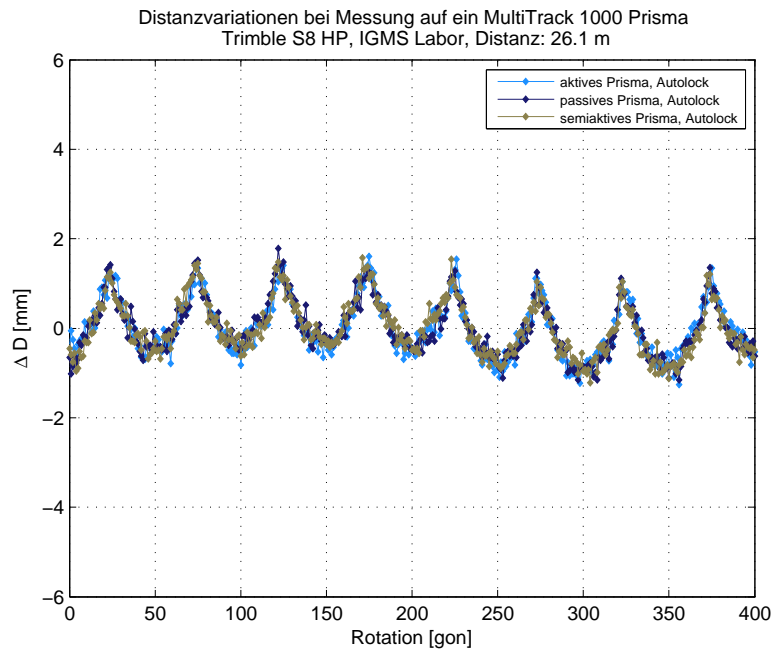


Abbildung 5.32: Abweichungen in der Distanzmessung bei Messung auf ein 360° Prisma

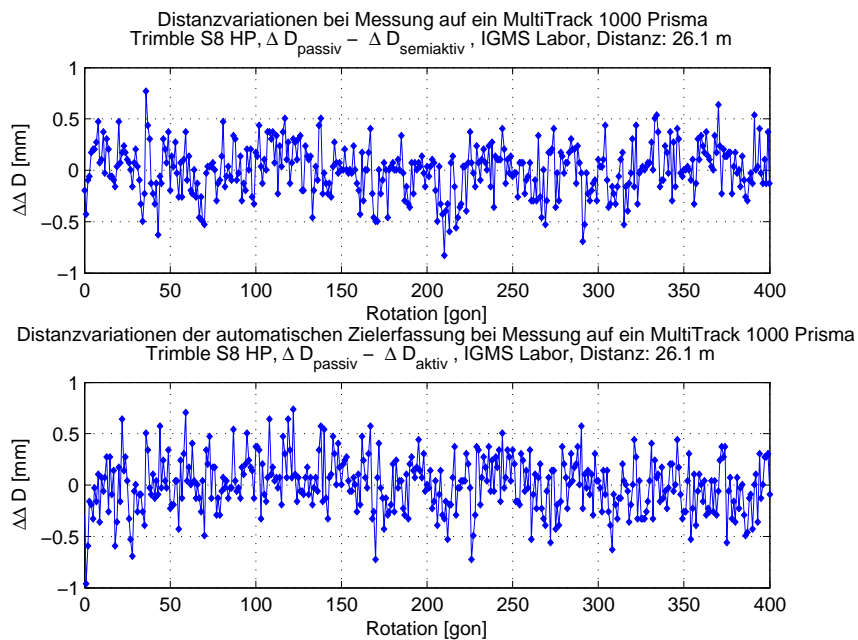


Abbildung 5.33: Differenz zwischen den verschiedenen Systemeinstellungen betreffend die Distanz



**Sichtfeld der automatischen Zielerfassung: Autolock — FineLock**

Alle im vorigen Subkapitel dargestellten Messergebnisse wurden mittels der Standardeinstellung Autolock erzielt. Die Totalstation Trimble S8 HP bietet im Modus FineLock dem Anwender jedoch zusätzlich die Möglichkeit, das Sichtfenster der automatischen Zielerfassung zu minimieren, um dadurch die Wahrscheinlichkeit einer Falschanzielung eines passiven Prismas zu minimieren (siehe Kapitel 3.4.2). Die FineLock-Technologie ist gemäß [Trimble, 2010d] nur für passive Prismen in einer Entfernung weiter als 20m von der Totalstation ausgelegt, weswegen der Vergleich zwischen der Autolock- und der FineLock-Technologie ausschließlich durch Messungen zum MultiTrack 1000 Prisma im passiven Zustand durchgeführt wurde. Im Gegensatz zur Autolock-Technologie wird im Modus FineLock ausschließlich der feine Quadrantendetektor verwendet [Trimble, 2009h] (siehe Abbildung 3.28).

Die Differenzen zwischen den unterschiedlichen Modi, erneut bezogen auf den jeweiligen Referenzmesswert, sind in Abbildung 5.34 für die vertikale und horizontale Komponente dargestellt.

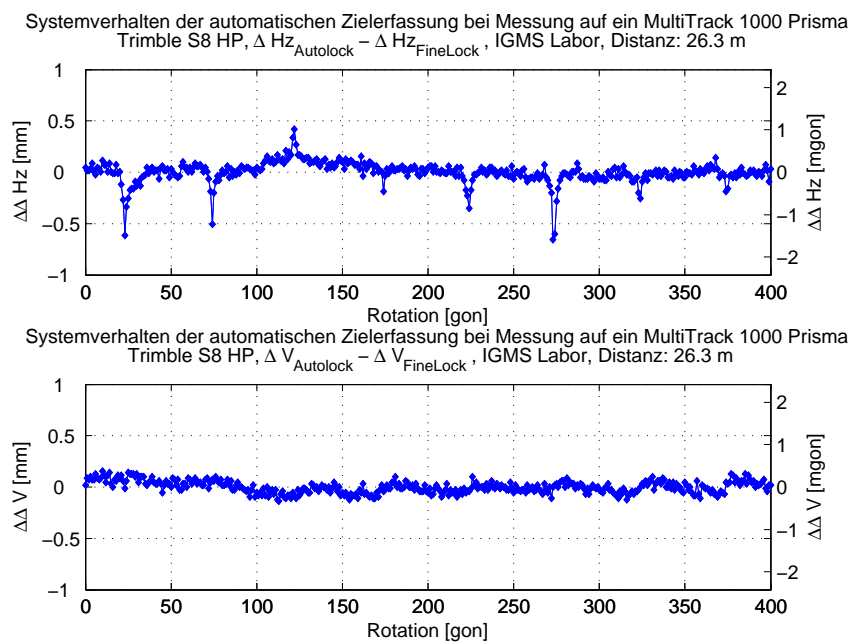


Abbildung 5.34: Differenz zwischen der Autolock- und FineLock-Technologie betreffend die Richtungskomponenten

Die Resultate ähneln sehr den Ergebnissen des Vergleichs zwischen passiver und semiaktiver Einstellung (siehe Abbildung 5.31), deren Interpretation auch für den Vergleich zwischen der Funktionsweise des Autolock und des FineLock gültig ist: Die Differenzen zwischen bei-

den Technologien sind nicht signifikant, einzelne markante Abweichungen in der horizontalen Komponente sind durch den schwach variierenden Intensitätsausgleich beim Prismenfacettenwechsel begründbar. Demnach wird durch Verwendung der FineLock-Technologie einzig und allein das Sichtfeld der automatischen Zielerfassung limitiert, die Messpräzision wird jedoch dadurch nicht erhöht.

#### **Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Instrumente: Trimble S8 HP — Trimble S6 DR 300+ — Trimble S6 DR Plus**

Die zuvor dargestellten Abbildungen und Erläuterungen bezüglich dem Systemverhalten der automatischen Zielerfassung für das MultiTrack 1000 Prisma beziehen sich allesamt auf die Totalstation Trimble S8 HP. Zusätzlich wurde die Leistungsfähigkeit der Totalstationen Trimble S6 DR 300+ und Trimble S6 DR Plus unter derselben Messkonfiguration evaluiert.

Gegenüber der Trimble S8 HP kann die automatische Zielerfassung der Trimble S6 Totalstationen ausschließlich die Autolock-Technologie einsetzen. Die Messresultate für die horizontale und vertikale Komponente der Trimble S6 Totalstationen weisen allerdings im jeweiligen Prismenmodus dasselbe Verhalten auf wie die Ergebnisse der Trimble S8 HP Totalstation (siehe Abbildungen 5.28 und 5.30). Die Differenzen der Messergebnisse der Trimble S6 Totalstationen zu den Messergebnissen der Trimble S8 HP liegen im Bereich des Messrauschens, weshalb diese Resultate nicht explizit erläutert werden. Infolgedessen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sowohl die Trimble S8 HP Totalstation als auch die Trimble S6 Totalstationen denselben Quadrantendetektor verwenden, wenngleich auch die Trimble S8 HP Totalstation die Zusatzeinstellung FineLock anbietet.

Eine deutliche Differenzierung ist hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des jeweiligen EDM-Sensors und der daraus resultierenden Distanzmessergebnissen festzustellen. Die Ergebnisse der Abbildung 5.35 stellen die Distanzvariationen der Trimble S8 HP, der Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S6 DR Plus im direkten Vergleich gegenüber. Obwohl in allen Messreihen die aus der Anordnung der Prismenfacetten resultierende Systematik erkennbar ist, sind die Variationen der Trimble S6 DR 300+ um ein Vielfaches größer als jene der Trimble S8 HP und Trimble S6 DR Plus Totalstation. Es ist augenscheinlich, dass die High Precision-Technologie basierend auf der Phasenvergleichsmessung eine deutlich präzisere Distanzmessung ermöglicht als die auf der Laufzeitmessung basierende Direct Reflex-Technologie, und das verifiziert die in Kapitel 2.4 getätigte Aussage, dass Distanzmessungen basierend auf dem Messprinzip der Phasenvergleichsmessung deutlich präziser durchgeführt werden können als mit Totalstationen die die Distanz mittels der Laufzeitmessung eruieren.

Zusätzlich zur größeren Streuung weicht auch das periodische Signalmuster der Trimble S6 DR 300+ von den spitzer zulaufenden Wellenpaketen der Trimble S8 HP ab und deutet

auf eine harmonische Schwingung hin. Bezüglich der Interpretation und Ursache dieser Erscheinungsform sei auf die Ergebnisse des Kapitels 5.3.2 verwiesen.

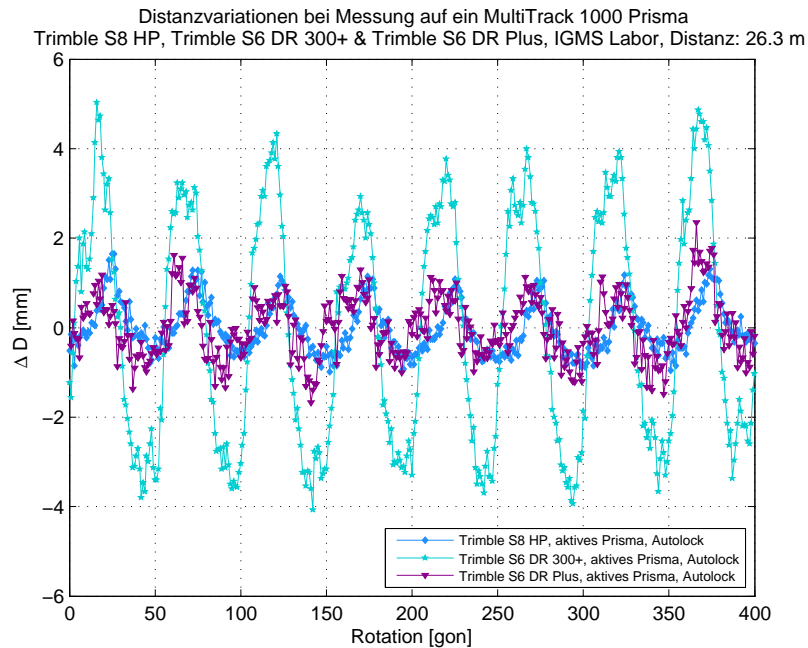


Abbildung 5.35: Die Distanzmessergebnisse der Trimble S8 HP, der Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S6 DR Plus

Die Trimble S6 DR Plus Totalstation besitzt ähnliche Systemeigenschaften wie die Trimble S6 DR 300+, unterscheidet sich jedoch gemäß der Namensgebung hinsichtlich des EDM-Sensors signifikant vom Pendant. Die Direct Reflex(DR) Plus-Technologie kann als eine Weiterentwicklung der Direct Reflex(DR) 300+-Technologie aufgefasst werden und basiert ebenso wie die Technologie des Vorgängers auf das Messprinzip der Laufzeitmessung. Die Weiterentwicklung spiegelt sich in der deutlich besseren Messpräzision wider (siehe Abbildung 5.35). Die Messresultate der Trimble S6 DR Plus Totalstation sind hinsichtlich ihrer Präzision zwischen den Ergebnissen der Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S8 HP einzuordnen, wenn gleich die systematische Form der Messreihe und die Abweichungen der Messwerte zueinander eine stärkere Anlehnung an den Ergebnissen der Trimble S8 HP Totalstation finden.

### 5.3.2 Untersuchungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“

#### Distanzvariationen unterschiedlicher Instrumente: Leica TS15 — Trimble S8 HP — Trimble S6 DR 300+

Die Abbildungen 5.36, 5.38, 5.39, 5.40 und 5.41 zeigen die Distanzvariationen in Abhängigkeit des Einfallswinkels auf das 360° Prisma für die Totalstationen Leica TS15, Trimble S8 HP und Trimble S6 DR 300+ für Messdistanzen von  $D \approx 2.2$  m,  $D \approx 39.9$  m und  $D \approx 155.8$  m. Zusätzlich sind die Messreihen mit einer harmonischen Schwingung approximiert, wobei das Schwingungsmodell mit Hilfe der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten berechnet wurde, und einen Aufschluss über die Amplitude, die Winkelfrequenz und den Phasenoffset der Distanzvariationen ermöglicht. Zur besseren Visualisierung der exakten Form der Messreihe und deren Übereinstimmung mit dem Schwingungsmodell wird die geodätische x-Achse des Koordinatensystems, mit Ausnahme der unteren Graphik in Abbildung 5.41, auf  $\pm 2$  mm beschränkt.

Im Subkapitel 3.3.5 wird erläutert, dass für eine kamerabasierte Zielerfassung der korrekte Prismentyp eingestellt werden muss. Mit Auswahl des Prismas wird ein bestimmtes Reflexionsmuster hinterlegt, welches von der Software erwartet wird. Bei der Nutzung von Prismen anderer Hersteller kann das aufgenommene Muster vom Referenzmuster abweichen und daher potentiell schlechtere Ergebnisse liefern. Auf Grund der Tatsache, dass im Repertoire der Prismentypen von Leica Geosystems kein 360° Ringprisma, das dem MultiTrack 1000 Prisma entspricht, vorhanden ist, wurde als Prismentyp ein Mini-Prisma oder ein 360° Tripelprisma gewählt. Es wurden beide Einstellungen mit der Leica TS15 untersucht. Die Abbildungen, in denen die Messresultate der Leica TS15 der Trimble S8 HP gegenübergestellt sind, zeigen die Ergebnisse der Einstellung „Mini-Prisma“.

In Abbildung 5.36 wird ersichtlich, dass auch unter realen Bedingungen auf sehr kurze Distanzen die Auswirkungen der acht Prismenfacetten des MultiTrack 1000 Prismas auf die Distanzresultate erkennbar sind. Die Abweichungen zum jeweiligen Referenzmesswert weisen für die Leica TS15 und die Trimble S8 HP annähernd dieselbe Größenordnung auf, wenngleich benachbarte Messresultate bei den Ergebnissen der Trimble S8 HP stärker streuen als jene bei den Distanzmessergebnissen der Leica TS15. Beiden Instrumenten ist jedoch gemein, dass die Messreihen deutlich vom harmonischen Schwingungsmodell abweichen und die Form der Messreihen nicht durch eine harmonische Schwingung approximiert werden kann.

Das periodische Muster, das sich durch Messungen auf ein MultiTrack 1000 Prisma auf kurze Distanzen ergibt, ist gekennzeichnet durch einen spitzen Peak, der beim Übergang von einer Prismenfacette auf die andere entsteht. Dies ist begründet durch das Faktum,

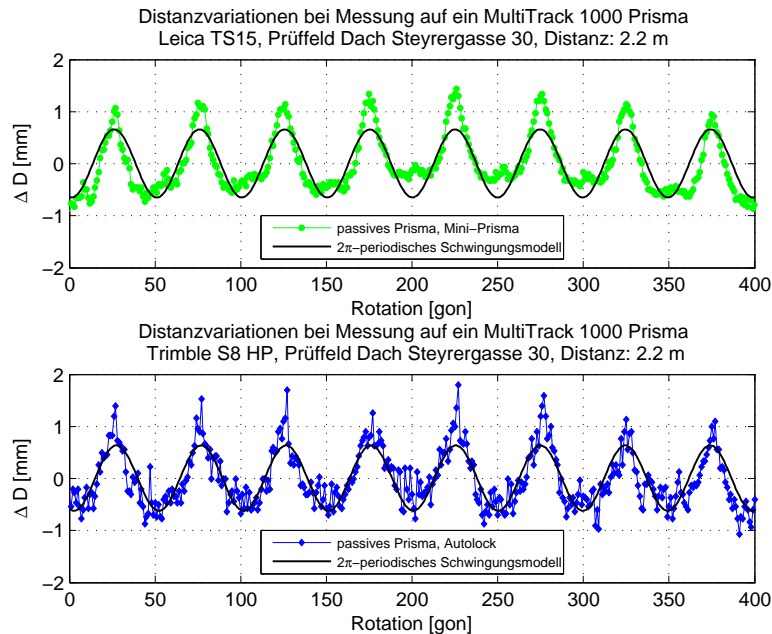


Abbildung 5.36: Die Distanzvariationen der Leica TS15 (oben) und der Trimble S8 HP (unten) für eine Messdistanz von  $D \approx 2.2$  m

dass bei sehr kurzen Distanzen der EDM-Spot beider Totalstationen kleiner ist als der Durchmesser der Prismenfacette und folglich zur Gänze auf eine Prismenfacette fokussiert ist (siehe Abbildung 5.37). Auf Grund dessen kann die Distanzmessung auf das rotierende MultiTrack 1000 Prisma als eine Distanzmessung zu einem Mini-Rundprisma betrachtet werden, wobei der Einfallswinkel kontinuierlich verändert wird. Das Mini-Rundprisma kann als eine Realisierung des Standard-Rundprismas aufgefasst werden, sodass die Charakteristiken eines Standard-Rundprismas auch für Mini-Rundprismen gültig sind. Demzufolge führt eine inkorrekte Ausrichtung des Prismas zur Totalstation nach [Mao und Nindl, 2010] zu Abweichungen in der Distanzmessung von einigen Millimetern. Dieser Effekt ist eindeutig in Abbildung 5.36 erkennbar, eine Zunahme des Einfallswinkels führt zu einer zu lang gemessenen Distanz, wobei der Distanzmessfehler proportional zum Einfallswinkel ist. Der maximale Fehler in der Distanzmessung ist kurz vor bzw. nach Prismenfacettenwechsel detektierbar und resultiert aus dem maximal möglichen Einfallswinkel zwischen Prismenfacette und Visur. Des Weiteren ist auch direkt die zulässige Abweichung der Prismenausrichtung von der Idealkonfiguration aus den Messreihen der Abbildung 5.36, die im Falle der Leica TS15 und der Trimble S8 HP mit  $\approx \pm 15$  gon gegeben ist, erkennbar, bevor der Distanzmessfehler deutlich die Messresultate verfälscht. Dieser Wert korreliert auch mit den Angaben der Abbildung 17 aus [Mao und Nindl, 2010], wobei der dort gezeigte Funktionsverlauf für ein Standard-Rundprisma gilt.

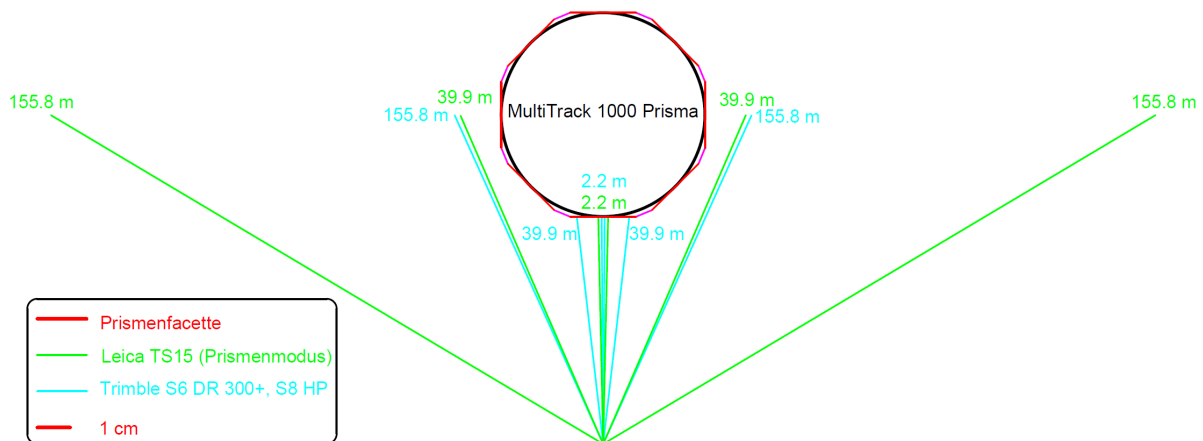


Abbildung 5.37: Die horizontale EDM-Spotgröße der Leica TS15, Trimble S6 DR 300+ und der Trimble S8 HP in Relation zum MultiTrack 1000 Prisma; Angaben entnommen aus: [Trimble, 2007],[Trimble, 2013b], bzw. nach Rücksprache mit dem Hersteller

Im Gegensatz zu den Messungen auf das  $\approx 2.2$  m entfernte rotierende MultiTrack 1000 Prisma zeigt sich bei einer mittleren Distanz von  $D \approx 39.9$  m bei den Messresultaten der Leica TS15 eine markant andere, und bei den Ergebnissen der Trimble S8 HP eine ähnliche Struktur der Distanzvariationen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (siehe Abbildung 5.38). Während die Resultate der Trimble S8 HP nahezu dieselbe Charakteristik aufweisen wie zuvor, jedoch eine schwächere Ausprägung der spitz zulaufenden Wellenpakete erfahren, ist bei den Resultaten der Leica TS15 ein Funktionsverlauf in Form einer harmonischen Schwingung feststellbar. Die Ursache ist erneut mit der Spotgröße des EDM-Messlasers erklärbar: Bei einer Distanz von  $D \approx 39.9$  m deckt die horizontale Ausdehnung des EDM-Spots der Leica TS15 einen Bereich ab, der größer ist als der Durchmesser der Prismenfacette des MultiTrack 1000 Prismas, sodass Intensitäten des Lasers auch auf die zwei benachbarten Prismenfacetten fallen. Infolgedessen wird die Intensität von drei Prismen zum Instrument reflektiert und zu einer Distanz gemittelt, wobei der Distanzmessfehler daraus resultiert, dass die Prismen unterschiedlich weit vom Instrument entfernt sind (siehe Abbildung 5.37).

Eine Mittelwertbildung wird in der Zeitreihenanalyse als Tiefpassfilter verwendet und führt zu einem glatteren Funktionsverlauf. Der Effekt der Glättung durch Mittelung der verschiedenen Distanzen zu den drei Prismenfacetten resultiert bei den Distanzvariationen eines  $360^\circ$  Prismas in eine harmonische Schwingung. Die spitz zulaufenden Peaks bei Messung zu  $360^\circ$  Prismen aus kurzer Distanz (siehe Abbildung 5.36) werden durch die Messung der Distanz auf drei Prismenfacetten eliminiert, da durch die geometrische Form der Prismenfacettenanordnung ein kleiner Einfallswinkel zu einer Prismenfacette gleichzeitig einen großen Einfallswinkel zu einer anderen Prismenfacette bedeutet.

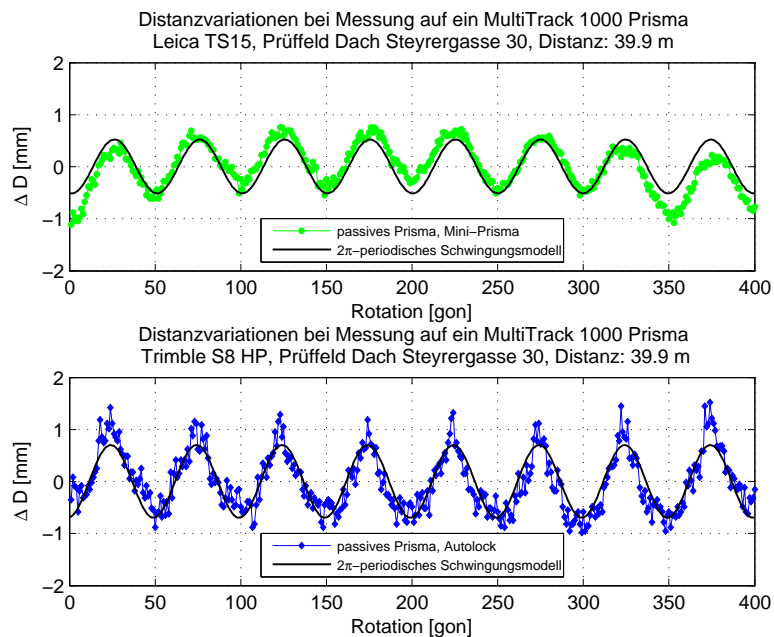


Abbildung 5.38: Die Distanzvariationen der Leica TS15 (oben) und der Trimble S8 HP (unten) für eine Messdistanz von  $D \approx 39.9$  m

Die Ergebnisse der Trimble S8 HP sind sowohl für eine Distanz von  $D \approx 2.2$  m als auch für eine Distanz von  $D \approx 39.9$  m ähnlich, eine Glättung des Funktionsverlaufs ist in Abbildung 5.38 nicht erkennbar. Im Gegensatz zur Leica TS15 besitzt die Trimble S8 HP einen signifikant kleineren EDM-Spot im Prismenmodus, sodass die horizontale Ausdehnung in einer Distanz von  $D \approx 39.9$  m näherungsweise dem Durchmesser der Prismenfacette des MultiTrack 1000 Prismas entspricht. Infolgedessen werden die Intensitäten nahezu ausschließlich von einer Prismenfacette reflektiert und zur Auswertung der Distanz verwendet.

In einer Entfernung von  $D \approx 155.8$  m ist der EDM-Spot beider Totalstationen deutlich größer als der Durchmesser des MultiTrack 1000 Prismas, weswegen die Distanzmessung stets zu den drei sichtbaren Prismenfacetten erfolgt und folglich die drei unterschiedlichen Distanzen zu einer Gesamtlösung gemittelt werden. Das Resultat ist in Abbildung 5.39 dargestellt und verifiziert die harmonische Form der Messreihen, wenngleich durch das Messrauschen auf Grund der Distanz von  $D \approx 155.8$  m der Verlauf nicht denselben Grad der Glättung aufweist wie die Resultate der Leica TS15 in Abbildung 5.38.

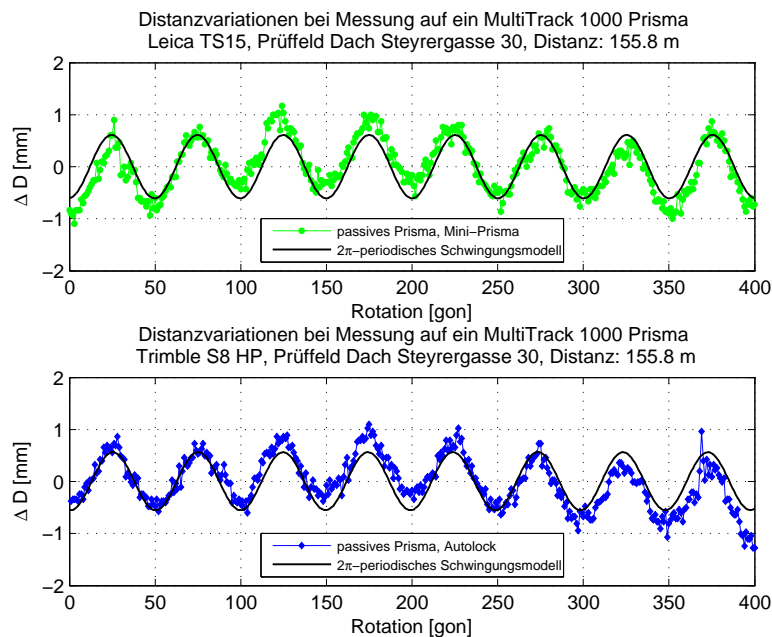


Abbildung 5.39: Die Distanzvariationen der Leica TS15 (oben) und der Trimble S8 HP (unten) für eine Messdistanz von  $D \approx 155.8$  m

Die Abbildungen 5.40 und 5.41 visualisieren die Ergebnisse für die kurze und die mittlere Distanz der Trimble S6 DR 300+ und der Leica TS15, jedoch mit der Einstellung „360° Prisma“ als Prismentyp für die kamerabasierte Zielerfassung.

Die Einstellung „360° Prisma“ ermöglicht in derselben Art und Weise die Distanz zu messen wie die Einstellung „Mini-Prisma“, ein Hypothesentest bezüglich der Amplituden der harmonischen Schwingung aus den Abbildungen 5.38 und 5.41 zeigt keine signifikante Differenz bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%. Auf Grund der Tatsache, dass die Distanzvariationen nur sehr bedingt mit dem Funktionsprinzip der automatischen Zielerfassung korrelieren, vielmehr auf die Größe des EDM-Spots zurückzuführen sind, muss das Ergebnis der Distanzvariationen durch Messungen auf ein 360° Prisma zwangsläufig unabhängig von der Einstellung des Prismentyps bei kamerabasierten Systemen sein.

Die Trimble S6 DR 300+ unterscheidet sich bezüglich der EDM-Spotgröße, basierend auf der Laufzeitmessung, deutlich von der Konkurrenz (siehe Kapitel 5.1.1). Deren Ausdehnung bei einer Distanz von  $D \approx 2.2$  m entspricht dem Durchmesser der Prismenfacetten des MultiTrack 1000 Prismas (siehe Kapitel 5.1.1). Infolgedessen sind in Abbildung 5.40 Peaks erkennbar, jedoch weist die Messreihe, bedingt durch den markant größeren EDM-Spot, eine deutlich harmonischere Form auf als bei den Resultaten aus Abbildung 5.36.



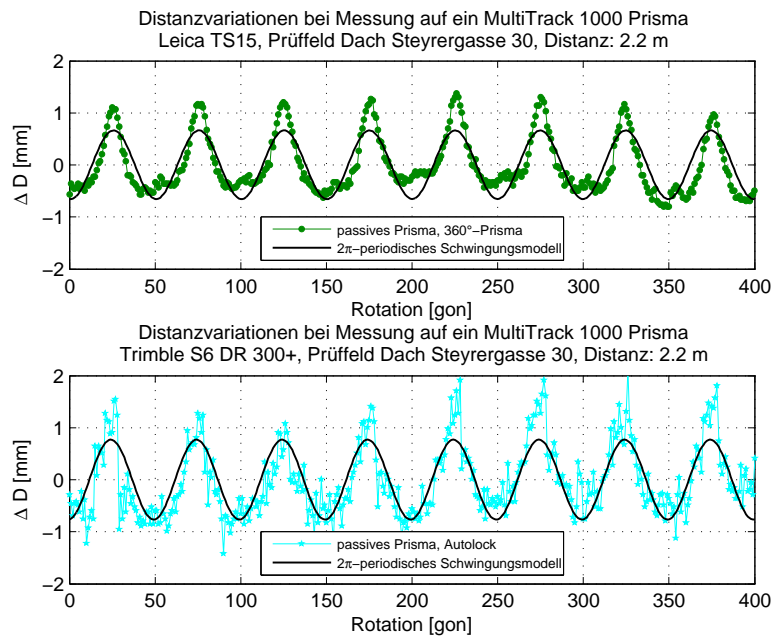


Abbildung 5.40: Die Distanzvariationen der Leica TS15 mit der Einstellung „360° Prisma“ (oben) und der Trimble S6 DR 300+ (unten) für eine Messdistanz von  $D \approx 2.2$  m

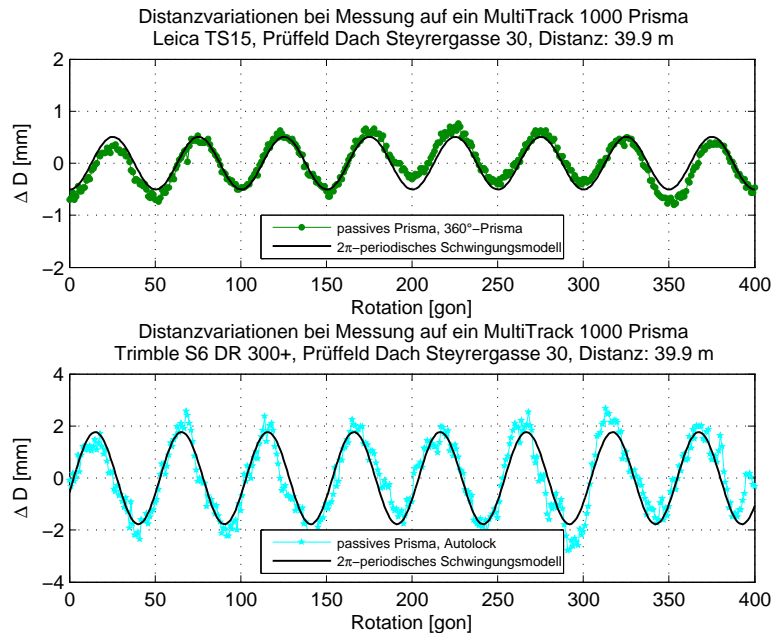


Abbildung 5.41: Die Distanzvariationen der Leica TS15 mit der Einstellung „360° Prisma“ (oben) und der Trimble S6 DR 300+ (unten) für eine Messdistanz von  $D \approx 39.9$  m

Die Ergebnisse der Messungen zum MultiTrack 1000 Prisma auf die mittlere Distanz zeigen erneut die Struktur einer harmonischen Schwingung, basierend auf dem Faktum, dass die horizontale Ausdehnung des EDM-Spots signifikant größer ist als der Durchmesser einer Prismenfacette und folglich die unterschiedlichen Distanzen zu drei Prismen zu einer Gesamtlösung gemittelt werden.

In Abbildung 5.42 ist ein direkter Vergleich zwischen den Resultaten der Trimble S8 HP und der Trimble S6 DR 300+ für die mittlere Distanz gegeben. Begründet durch die Tatsache, dass beide Totalstationen demselben Funktionsprinzip der automatischen Zielerfassung folgen (Quadrantendetektor), können Unterschiede allein auf die EDM-Sensorik zurückgeführt werden.

Die Resultate der Trimble S8 HP, deren Distanzmessprinzip auf der Phasenvergleichsmessung beruht, unterscheidet sich deutlich von den Ergebnissen der Trimble S6 DR 300+, welche zur Lösung der Distanzmessung eine veraltete Technik der Laufzeitmessung verwendet (siehe Abbildung 5.42).

Folgende drei Differenzierungen sind zu nennen:

**1) periodisches Muster**

Während die Trimble S8 HP kein harmonisches Schwingungsmuster aufweist, ist dies bei den Ergebnissen der Trimble S6 DR 300+ deutlich ersichtlich.

**2) Amplituden**

Die Amplituden bei den Ergebnissen der Trimble S6 DR 300+ sind markant größer als bei der Trimble S8 HP, die Abweichungen fallen deutlich höher aus.

**3) Signalverschiebung**

Durch den stark asymmetrischen EDM-Spot der Trimble S6 DR 300+ (siehe Kapitel 5.1.1) werden die maximalen und minimalen Abweichungen zum Referenzwert verschoben, während bei der Trimble S8 HP keine Verschiebung der Signalmaxima und Signalminima feststellbar ist.

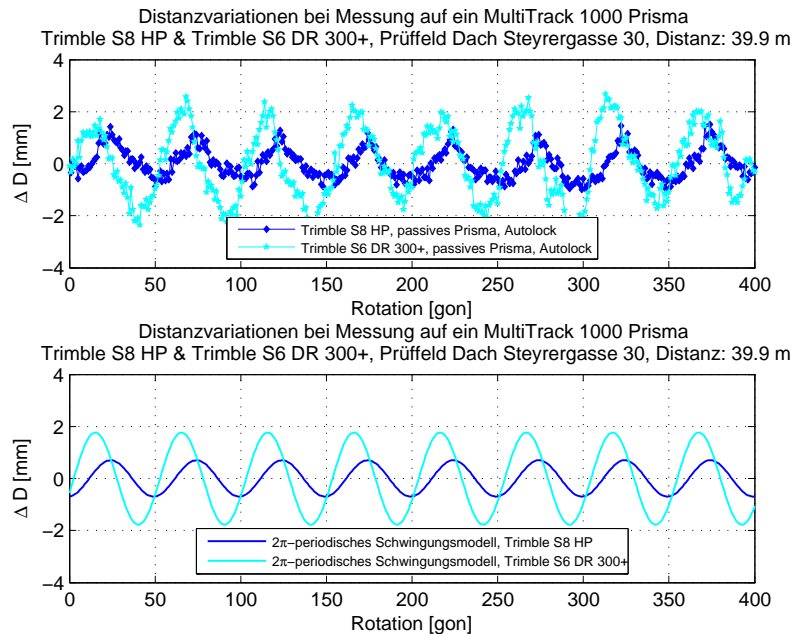


Abbildung 5.42: Gegenüberstellung der Distanzvariationen der Trimble S8 HP und der Trimble S6 DR 300+ für eine Messdistanz von  $D \approx 39.9$  m

### Systemverhalten der automatischen Zielerfassung in Abhängigkeit von der Distanz

Das Funktionsprinzip des Quadrantendetektors wird auch bei den Messergebnissen unter realen Bedingungen bei kurzen Distanzen ersichtlich (siehe Abbildung 5.43). Die Resultate der Trimble S8 HP und der Trimble S6 DR 300+ sind nahezu ident, beide Totalstationen verwenden dieselbe Technologie zur automatischen Zielerfassung. Das periodische Signalmuster ist ähnlich dem aus Abbildung 5.28, dessen Interpretation ist auch für die hier dargestellten Variationen in den horizontalen Richtungen geltend. Dennoch sind zwei Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den Abbildungen 5.28 und 5.43 feststellbar: Zum einen sind die maximalen Abweichungen zum Referenzwert bei der kurzen Distanzmessung deutlich größer, zum anderen findet ein sprunghafter Übergang von einer Prismenfacette zur anderen statt, fiktive Mischsignale (siehe Abbildung 5.29c) sind in Abbildung 5.43 nicht detektierbar.

Die Ergebnisse der kamerabasierten Zielerfassung visualisieren ebenfalls eine Variation in den Werten der horizontalen Komponente, die auf die oktagonale Prismenfacettenanordnung des MultiTrack 1000 Prismas zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.43). Auffallend sind vor allem die gegenüber den Ergebnissen des Quadrantendetektors vielfach kleineren Abweichungen zum Referenzwert, sodass die Abweichungen in einem Bereich von  $\pm 1$  mm zum Referenzwert liegen. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Abweichungen in der horizontalen Richtungskomponente der Leica TS15 Totalstation entgegengesetzt zu den Ab-

weichungen der Instrumente des Herstellers Trimble verlaufen und sich somit im Vorzeichen, trotz derselben Rotationsrichtung des MultiTrack 1000 Prismas, voneinander unterscheiden. Interessanterweise werden bei der Position, an dem der Prismenfacettenwechsel stattfindet, die Winkelablagen exakt berechnet und an den rohen Winkelwert angebracht, sodass zum Referenzwert keine Abweichungen auftreten. Beide Einstellungen, sowohl „Mini-Prisma“ als auch „360° Prisma“, liefern dieselben Messergebnisse bei einer Distanz von  $D \approx 2.2$  m.

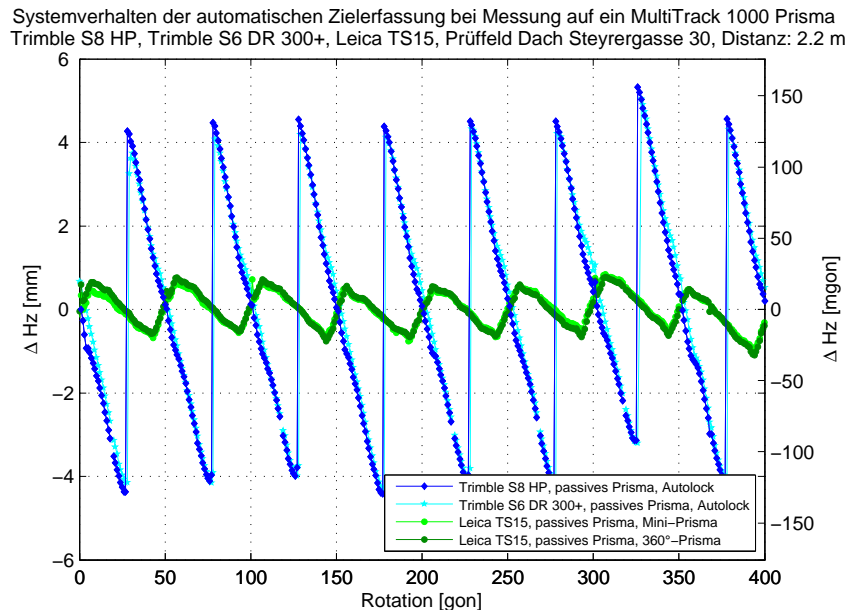


Abbildung 5.43: Variationen in der horizontalen Richtungskomponente der getesteten Totalstationen bei einer Messdistanz von  $D \approx 2.2$  m

Bei Messung auf ein rotierendes 360° Prisma auf mittlerer Distanz ( $D \approx 39.9$  m) ergibt sich im Falle des kamerabasierten Zielerfassungssystems der Leica TS15 eine völlig andere Charakteristik. Eine eindeutige Form der Messreihe, welche auf die oktagonale Prismenanordnung des MultiTrack 1000 Prismas zurückzuführen wäre, ist nicht erkennbar (siehe Abbildung 5.44). Erneut resultiert aus den Einstellungen des Prismentyps bei der kamerabasierten Zielerfassungsmethodik dieselbe Form der Messreihe, wenngleich sich die Werte vereinzelt um bis zu 1 mm unterscheiden.

Die Ergebnisse, die auf dem Funktionsprinzip eines Quadrantendetektors beruhen, sind bei einer Messdistanz von  $D \approx 39.9$  m den Resultaten der sehr kurzen Distanz ähnlich, keinesfalls aber ident. Die Abbildung 5.44 verdeutlicht, dass die Abweichungen zum Referenzmesswert deutlich kleiner sind als in der zuvor dargestellten Graphik. Des Weiteren resultieren aus dem Übergang von einer Prismenfacette zur anderen vermehrt Mischsignale, weswegen der Facettenwechsel durch eine rundere Form in den Daten erkennbar ist und keinen spitzen Übergang erfährt.

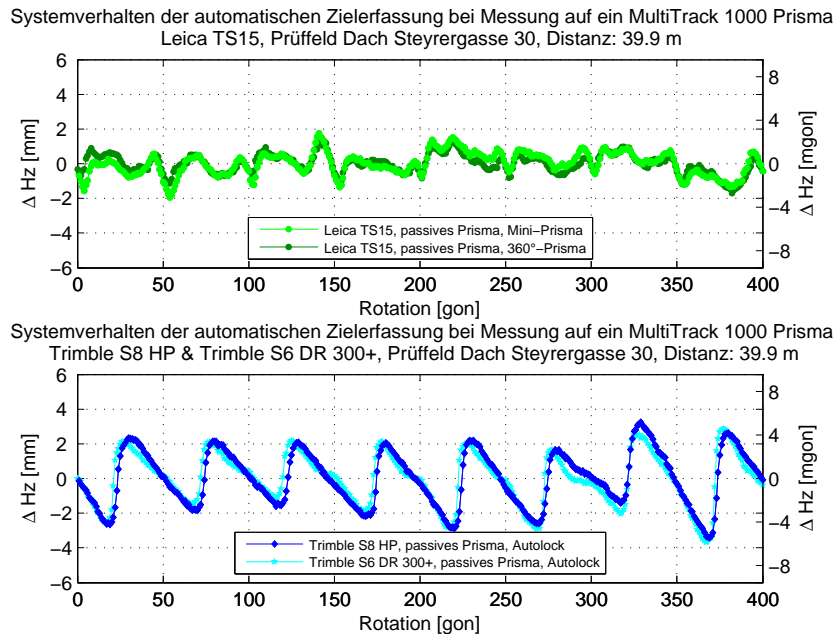


Abbildung 5.44: Variationen in der horizontalen Richtungskomponente der getesteten Totalstationen bei einer Messdistanz von  $D \approx 39.9$  m

Die Abbildung 5.45 visualisiert die Messergebnisse für die horizontale Komponente für die Distanz von  $D \approx 155.8$  m. Die Messwerte des kamerabasierten Zielerfassungssystems sind im Vergleich zu den vorherigen Resultaten markant anders, die Charakteristik der acht Prismenfacetten ist eindeutig in den Messreihen ersichtlich. Zudem sind die Abweichungen zum Referenzmesswert signifikant größer, Abweichungen von bis zu 4 Millimeter sind in den Daten detektierbar. Erstmals ist auch eine signifikante Unterscheidung zwischen der Einstellung „360° Prisma“ und „Mini-Prisma“ feststellbar, die Einstellung „360° Prisma“ zeigt einen glatteren Funktionsverlauf, jedoch Abweichungen in derselben Größenordnung wie die Einstellung „Mini-Prisma“.

Die Resultate der Trimble S8 HP für eine Messdistanz von  $D \approx 155.8$  m sind ähnlich den vorherigen, wenngleich die Streuung der Messwerte durch das verstärkte Rauschen, begründet durch die Distanz, größer ausfällt. Als Folge der Distanzzunahme sind auch vermehrt Mischsignale in der Messreihe detektierbar und ein runder Übergang in den Daten beim Facettenwechsel feststellbar. Die Messergebnisse der Trimble S6 DR 300+ folgen überwiegend derselben Charakteristik wie die Messwerte der Trimble S8 HP, wenngleich nur noch sieben Wellenpakete erkennbar sind (siehe Abbildung 5.45).

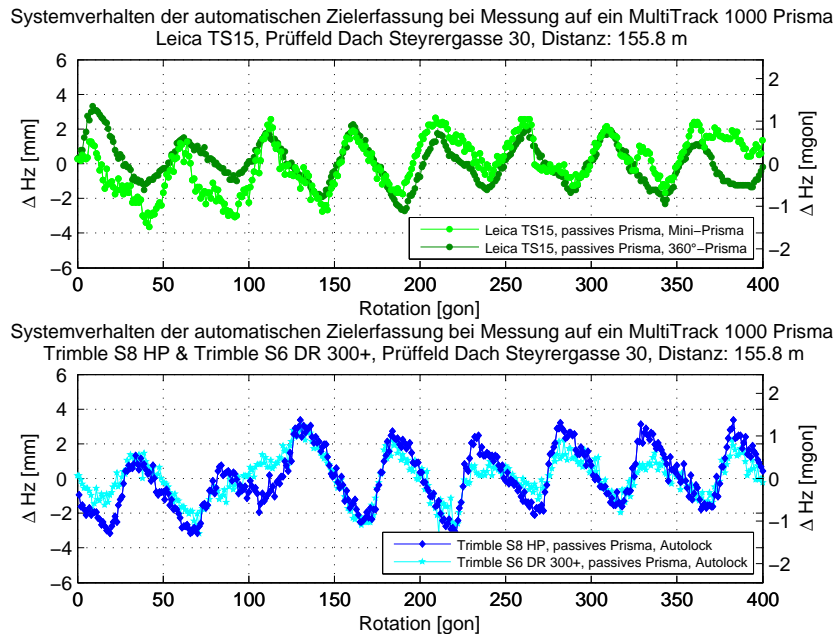


Abbildung 5.45: Variationen in der horizontalen Richtungskomponente der getesteten Totalstationen bei einer Messdistanz von  $D \approx 155.8$  m

In Abbildung 5.46 werden die durchschnittlichen Spannweiten der Prismenfacettensprünge für die horizontale Komponente für jede Totalstation in Abhängigkeit von der Distanz dargestellt, wobei die Ergebnisse der Leica TS15 je nach Einstellung des Prismentyps getrennt betrachtet werden. Der gravierendste Unterschied zwischen den beiden Zielerfassungssystemen ist bei der kürzesten aller getesteten Messdistanzen feststellbar, der durchschnittliche Sprung vom minimalen Horizontalwert zum maximalen ist bei den quadrantenbasierten Instrumenten um das  $\approx 7$ -fache größer als bei den Ergebnissen des kamerabasierten Instruments. Bei einer Distanz von  $D \approx 39.9$  m sind die Sprünge der Leica TS15 nur unwesentlich größer, jedoch sind die Facettensprünge nicht direkt einsehbar, weswegen diesem Wert keine allzu großes Vertrauen entgegengebracht werden darf. Die Resultate der Trimble S8 HP und S6 DR 300+ zeigen eine deutliche Verkleinerung der Abweichungen, sodass der Fehler in horizontaler Richtung bei einer Distanz von  $D \approx 39.9$  m gegenüber den Abweichungen bei einer Distanz von  $D \approx 2.2$  m nahezu halbiert werden konnte. Für die größte Distanz von  $D \approx 155.8$  m haben sich die maximalen Fehler im Durchschnitt gegenüber der kürzesten Distanz bei der Leica TS15 fast verdreifacht, der Fehler bei den quadrantenbasierten Instrumenten ist in derselben Größenordnung wie jener der mittleren Distanz. Des Weiteren ist ersichtlich, dass zwischen den unterschiedlichen Einstellungen bei der Leica TS15 bzw. den unterschiedlichen Instrumententypen des Herstellers Trimble keine markanten Unterschiede erkennbar sind, wenngleich die Resultate der Trimble S8 HP und der Trimble S6 DR 300+ für die Distanz von  $D \approx 155.8$  m um  $\approx 1$  mm voneinander differieren. Dies ist jedoch unter anderem damit zu erklären, dass die Messreihe der Trimble S6 DR 300+ nur sieben Sprünge beinhaltet.

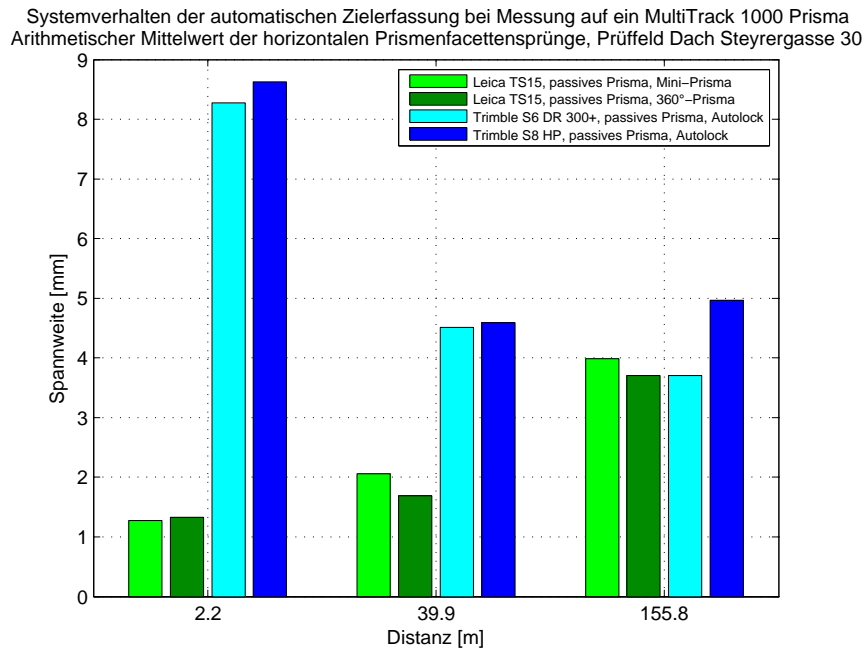


Abbildung 5.46: Die durchschnittlichen Spannweiten der horizontalen Komponente für die drei getesteten Messdistanzen

Die Variationen in der vertikalen Komponente sind signifikant kleiner als die Variationen in der horizontalen Komponente und in der Distanzmessung, weswegen diese nicht näher analysiert wurden.

### 5.3.3 Resümee

Die unterschiedlichen Prismenmodi spiegeln sich in den Messresultaten wider und beeinflussen daher signifikant die Ergebnisse. Ein aktives bzw. semiaktives Prisma gewährleistet dem Anwender zwar die korrekte Prismenidentifikation, jedoch sind je nach gewählter Einstellung entweder die Messwerte des Vertikalwinkels oder die der Horizontalrichtung fehlerbehaftet, wobei die Größe des Fehlers vom Einfallswinkel abhängig ist (siehe Abbildung 5.28). Allerdings sind auch bei Benützung des MultiTrack 1000 Prismas im passiven Modus die Ergebnisse nicht fehlerfrei, vielmehr ist die Anordnung der Prismenfacetten sowie der Einfallswinkel ausschlaggebend für Messgenauigkeiten in der horizontalen Richtungskomponente. Die Verwendung von 360° Prismen führt zu periodischen Signalmustern in den Ergebnissen der horizontalen Komponente bei automatischer Zielerfassung, wobei dies vom Systemprinzip der automatischen Zielerfassung und von der zu messenden Distanz abhängig ist. Die kamerabasierten Messresultate zeigen auf kurzer Messdistanz eine deutlich bessere Leistungsfähigkeit als Instrumente, welche das System eines Quadrantendetektors

in Verwendung haben (siehe Abbildung 5.43). Bei mittlerer Distanz zeigt sich ein gegensätzliches Verhalten der Systeme, die Abweichungen in der horizontalen Komponente werden bei der Trimble S8 HP und der Trimble S6 DR 300+ kleiner, jene der Leica TS15 größer (siehe Abbildung 5.46). Ohne den Einfallswinkel zu kennen, ist es für den Anwender in praktischen Situationen nahezu unmöglich, die systematischen Fehler in der horizontalen Richtungskomponente zu eliminieren. Eine der Situation angepasste Systemeinstellung sowie die Verwendung eines kamerabasierten Zielerfassungssystems führen zu nur minimalen Abweichungen.

Die Distanzmessung unterliegt ebenfalls der Systematik der Prismenfacettenanordnung des  $360^\circ$  Prismas. Wie im vorherigen Subkapitel gezeigt wurde, ist der Distanzmessfehler zum einen vom Einfallswinkel und zum anderen von der zu messenden Distanz abhängig, wobei letztere in Relation zur EDM-Spotgröße zu betrachten ist. Bei Reflexion der Intensität des Messlasers von nur einer Prismenfacette ist das periodische Muster in den Messreihen durch spitz zulaufende Wellenpakete gekennzeichnet, bei Signalmittelung durch die Distanzmessung zu mehreren Prismenfacetten, bedingt durch den im Vergleich zur Prismenfacette größeren EDM-Spot, zeigt sich der Verlauf einer harmonischen Schwingung. Die Abweichungen der Totalstationen, welche das Messprinzip der Phasenvergleichsmessung verwenden, sind kleiner als jene, die auf das Messprinzip der Laufzeitmessung setzen, wenngleich modernste Technologien der Laufzeitmessung ebenfalls gute Ergebnisse liefern (siehe Abbildung 5.35). Auf Grund der Tatsache, dass die systematischen Fehler in den Distanzmessungen ebenfalls vom Einfallswinkel abhängig sind, ergibt sich für den Anwender nahezu keine Möglichkeit, diese Fehler zu eliminieren. Einzig eine korrekte Prismenausrichtung zur Visur gewährleistet korrekte Messergebnisse.



# Kapitel 6

## Resümee und Ausblick

Die Spezifikationen der Hersteller und fachspezifische Literatur ermöglichen dem Anwender teils tiefe Einblicke in das Systemverhalten moderner Totalstationen, weswegen die Leistungsfähigkeit der Instrumente und infolgedessen die erzielbaren Resultate zumeist prädiktabel sind, ergo kann ein Fehlverhalten der Systeme in den überwiegenden praktischen Messsituationen vermieden werden und grob fehlerhafte Messresultate werden reduziert. Ein für den Anwender prekärer Umstand ergibt sich durch die Tatsache, dass die Angaben der Hersteller in den Handbüchern nicht vollkommen sind, wertvoller Informationsgehalt zur Erzielung korrekter Messresultate bleibt für den Benutzer meistens im Verborgenen. Dies resultiert aus den höchst komplexen Systemeigenschaften moderner Totalstationen und den daraus folgenden nahezu unzähligen Spezifikationen für jede erdenkliche Systemeinstellung, unterschiedlichste Witterungsverhältnisse und verschiedenste Messkonstellationen.

Als Beispiel für einen zur Erzielung korrekter Messwerte wissenswerten, jedoch in den Spezifikationen der Hersteller nur unzureichend erwähnten Parameter sei hier die EDM-Spotgröße genannt. Die Untersuchungen zeigten, dass speziell im reflektorlosen Messbetrieb, jedoch auch für Messungen zu Prismen, die EDM-Spotgröße ein entscheidendes Kriterium zur Erzielung richtiger Messwerte darstellt. Die exakte Form und Ausdehnung des Messflecks in Abhängigkeit von der Distanz ist hierfür maßgebend, dennoch sind in den Spezifikationen entweder lineare Funktionsverläufe, die, wie sich zeigte, oftmals von den realistischen Ausmaßen deutlich abweichen, oder für eine bestimmte Distanz die Form und Ausdehnung erwähnt. Des Weiteren fehlt gänzlich eine Angabe bezüglich der Symmetrie des Messflecks gegenüber dem Fadenkreuz, ein fehlerhafter Messwert in bestimmten Messsituationen für den Anwender ohne deren Kenntnis dadurch nicht vermeidbar. Die reflektorlosen Distanzmesser moderner Totalstationen erlauben dem Benutzer ein breites Einsatzspektrum und eruiert die Distanzen zu natürlichen Oberflächen unter Berücksichtigung gewisser Aspekte wie Spotgröße und Einfallswinkel mit guter Messpräzision. Speziell die Phasenvergleichsmessung ist hierfür ein geeignetes Messprinzip, dennoch sind hochpräzise Messungen nicht möglich und ein vollständiger Verzicht auf den Einsatz von Prismen aktuell nicht denkbar.

Zu den Funktionsprinzipien der automatischen Zielerfassung verlieren die Hersteller in ihren Spezifikationen kein Wort, lediglich das verwendete Sensorsystem findet eine kurze Erwähnung. Im Allgemeinen ist dies für den Anwender uninteressant, doch in Ausnahmefällen ist ein Fehlverhalten der automatischen Zielerfassung auf das jeweilige Funktionsprinzip zurückzuführen und bei entsprechender Kenntnis vermeidbar. Auf Grund dessen ist es ratsam, sich detaillierter mit dieser Thematik auseinanderzusetzen, hilfreiche Informationen und verständliche Erklärungen zu den Funktionsweisen der automatischen Zielerfassungssysteme sind meistens den Internetseiten der Hersteller zu entnehmen. Die nicht vorhandene Intensitätsanalyse im Auswerteprozess eines Quadrantendetektors erweist sich in bestimmten Situationen als Nachteil, im Gegensatz zu kamerabasierten Sensorsystemen können Fremdre reflexionen nicht von Prismenreflexionen differiert werden. Diesbezüglich schaffen aktive Prismen Abhilfe, doch resultieren daraus komplexe Signalmuster, die ebenfalls einen Beitrag zu Messabweichungen leisten können.

Das in den Untersuchungen verwendete omnidirektionale aktive Prisma verursacht gemäß den Literaturangaben abhängig vom Einfallswinkel und dem geometrischen Aufbau Messabweichungen in den Messwerten, allerdings erwiesen sich diese systematischen Fehler nicht als konstant, vielmehr konnte eine Abhängigkeit der periodischen Messabweichungen von der Messdistanz nachgewiesen werden. Davon sind sowohl die horizontalen Richtungswerte als auch die Distanzmessungen betroffen und folglich die Subsysteme der automatischen Zielerfassung und der EDM-Sensorik involviert. Auf Grund dessen konnten Variationen in den Messabweichungen je nach Messprinzip der Distanzmesstechnologie und Funktionsprinzip des Zielerfassungssystems festgestellt werden. In Abhängigkeit von der Distanz ergeben sich Vor- und Nachteile des jeweiligen Systems, dennoch sind Messungen auf ein 360° Prisma stets mit Messungenauigkeiten verbunden, weswegen dieser Prismentyp ausschließlich für den erdachten Zweck einer kinematischen Messung verwendet werden soll, und nicht für hochpräzise ingenieurgeodätische Messaufgaben.

Zusammenfassend stellt das automatische Zielerfassungssystem trotz teils negativer Aspekte wie Fremdre reflexionen und komplizierter Systemeinstellung einen adäquaten Ersatz für das manuelle Anzielen durch eine Person dar und ist in Hinblick auf den ökonomischen Gesichtspunkt diesem weit überlegen.

Eine Prädiktion betreffend der Weiterentwicklung moderner Totalstationen kann durch die Kenntnis der Entstehung dieser Instrumente getroffen werden. Zukünftige Messprinzipien und Sensorintegration werden das Einsatzfeld von modernen Totalstationen erheblich erweitern. Dabei ist der Einsatz von neuen Messprinzipien mit dem Ziel verbunden, die Schwachstellen der bisherigen Technologien zu reduzieren und im besten Fall zu eliminieren. Die in den Totalstationen verwendeten Messprinzipien der Laufzeitmessung und Phasenvergleichsmessung weisen ein teilweise konträres Systemverhalten auf, sodass die Vorteile des einen Messprinzips die Nachteile des anderen sind und vice versa. Als erfolgreiches neues Messprinzip in der Distanzmessung erweist sich die WFD-Technologie, die Charak-

teristiken beider zuvor genannten Messprinzipien besitzt, und resultierend daraus nahezu optimale Distanzmesseigenschaften aufweist. Folglich können für zukünftige Technologien die elementaren Bausteine bisheriger Messprinzipien miteinander kombiniert und adaptiert werden, sodass in spe voraussichtlich eine Vielzahl der Messprinzipien auf grundlegende Systemprinzipien aktueller moderner Totalstationen zurückzuführen sind.

# Literaturverzeichnis

- Bayer, G., Hinderling, J., und Ghesla, H. *Process and device for rapid detection of the position of a target marking*. Google Patents, Feb. 29 2000. URL <http://www.google.com/patents/US6031606>. US Patent 6,031,606.
- Bayoud, F. *Leica's Pinpoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Optomechanical Features*. XXIII FIG Congress Munich, Germany, October 8-13, 2006a.
- Bayoud, F. *White Paper: Total Station series TPS1200*. Leica Geosystems AG, 2006b.
- Brunner, F. *Geodetic refraction*. Springer Berlin Heidelberg, 1984.
- Deutsche Normen. *DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Größen, Bezeichnungen, Einheiten*. Beuth, 1984. Teil 7.
- Donath, B., Glimm, A., Göring, H., Kludas, T., und Vogel, M. *Die Focus 30 Totalstation von Spectra Precision — Neue Technologien in der Tachymeter Entwicklung*. AVN, 2011. pp.348-354.
- Fleckl, J. *Präzisionsbestimmung des Prüffeldes 'Dach, Steyrergasse 30' zur Überprüfung von geodätischen Instrumenten*. Masterarbeit TU Graz, 2007.
- Grick, M. *Dynamisches Brückenmonitoring mit automatisierten Totalstationen*. Masterarbeit TU Graz, 2015.
- Grimm, D. E. und Zogg, H.-M. *Leica Nova MS50 White Paper*. Leica Geosystems AG, 2013.
- Göring, H., Grässer, C., Kirchner, M., Köhler, M., und Lekas, J. *Distanzmessverfahren elektrooptischer Tachymeter — Stand der Trimble Technik*. GKGM-Workshop: Kalibrierung Geodätischer Messmittel, Neubiberg 27. + 28.Oktober, 2011.
- Hardegen, W. *Leica Nova MS50 — 'MultiStation'*. 30. Januar, 2014.
- Hennes, M. *Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern*. AVN Heft 11/12, 1999a.
- Hennes, M. *On the Determination of the Performance of Tracking Tacheometers*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Turkish German Joint Geodetic Days, Istanbul, 1.-5.6., 1999b.

- Hennes, M. *Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit trackender Totalstationen*. Beitrag zum XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München, 13.-17.3., 2000.
- Hennes, M. *Systemeigenschaften von Robottachymetern im Nahbereich — Untersuchungen am Beispiel von Leica-Instrumenten*. Flächenmanagement und Bodenordnung (FuB), 2003. Heft 6, pp. 300–310.
- Hennes, M. und Krickel, B. *Zur Entwicklung von Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robot-Tachymetern*. 2000.
- Höglund, R. und Large, P. *Direct Reflex — reflektorlose EDM-Technologie für Vermesser und Bauingenieure*. Trimble GmbH, 2005.
- Hill, C. D. *Leica SmartStation — The integration of GPS and total station technologies*. Leica Geosystems AG, 2005.
- Ingensand, H., Ryf, A., und Schulz, T. *Performances and experiences in terrestrial Laser-scanning*. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, 2003.
- Jäger, H., Mastel, R., und Knaebel, M. *Technische Schwingungslehre*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- Joekel, R., Stober, M., und Huep, W. *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Wichmann, 2008. 5. Auflage.
- Kahmen, H. *Hochpräzise Zielerfassung durch Robotertheodolite*, volume Band 1. Beiträge zum XI. internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, 1992. pp. II 6/1 - II 6/13.
- Leica Geosystems. *Leica TPS1200+ — a telescope with new opto-mechanical design*. Leica Geosystems AG, 2007.
- Leica Geosystems. *Leica Viva TS15 Datenblatt*. Leica Geosystems AG, 2010.
- Leica Geosystems. *Leica TS11/TS15 Gebrauchsanweisung*. Leica Geosystems AG, 2011. Version 2.0.
- Leica Geosystems. *Leica MS50/TS50/TM50 User Manual*. Leica Geosystems AG, 2013. Version 1.1.
- Lienhart, W. *The impact of image assisted surveying and image based documentation on traditional surveying workflows*. Leica Geosystems AG, 2011.
- Lienhart, W., Ehrhart, M., und Lackner, S. *Richtiges Arbeiten mit modernen Totalstationen*. Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, 2014. 17. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Tutorialsunterlagen.

- Maar, H. und Zogg, H.-M. *WFD — Waveform Digitizer Technology*. Leica Geosystems AG, 2014.
- Mao, J. und Nindl, D. *Vermessungsreflektoren — White Paper*. Leica Geosystems AG, 2010.
- Mende, D. und Simon, G. *Physik: Gleichungen und Tabellen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2013. ISBN 9783446438613. URL <http://books.google.at/books?id=VLlPAgAAQBAJ>.
- Reda, A. und Bedada, B. *Accuracy analysis and Calibration of Total Station based on the Reflectorless Distance Measurement*. Masterthesis, School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, 2012.
- Rüeger, J. *Electronic Distance Measurement*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996. 4<sup>th</sup> edition.
- Rüeger, J. *75 years of change in survey technology*, volume 38. Survey Review, 2006. pp. 459-473.
- Schäfer, T. *Simulation der Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt*. AVN, Heft 11/12, 2011. pp. 363-367.
- Schlemmer, H. *Anforderungen, Stand und Entwicklung von Industrie-Meßsystemen*. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 7/8, 1989. pp. 365-372.
- Singh, R., Artman, D., Brinton, D., und Brown, L. *Compensators, Stability Check, and Automatic Target Recognition*. Geometronics, 2002.
- Sokkia. *SX Series — The new definition of robotics*. Sokkia Corporation, 2012. URL <http://us.sokkia.com/products/optical-instruments/motorizedrobotic/sx-robotic-total-station>.
- Sokkia. *Sokkia DX series — direct aiming X-ellence station*. Sokkia Corporation, 2014.
- Spectra Precision. *Focus 30 Total Station — Verbesserte Messeffizienz im Feld mit einer Robotic-Totalstation*. Spectra Precision Division, 2012.
- Stempfhuber, W. *Verification of the Trimble Total Station (UTS) performance for kinematic applications*. Optical 3-D Measurement Techniques IX, Vienna, FIG Commission 5 and 6, IAG Special Commission 4, ISPRS Commission 5, 2009. pp. 211-221.
- Stempfhuber, W. und Kirschner, H. *Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern — Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel der Leica TPS1200+*. AVN, 2008. pp. 216-223.

- Stutz, R., Fritsch, R., Hinderling, J., und Rohner, M. *Highly accurate distance measurement device*. Leica Geosystems AG, 2011. International Publication Number WO2011/076907 A1.
- Topcon. *Topcon Instruction Manual Imaging Station*. Topcon Corporation, 2009. Rev. 2.
- Topcon. *White Paper: MS05AX, MS1AX — MS Measuring Station*. Topcon Corporation, 2012a.
- Topcon. *Topcon Instruction Manual Power Station*. Topcon Corporation, 2012b.
- Topcon. *White paper for: Topcon DS series Automatic Aiming Total Stations — X-pointing Technology*. Topcon Corporation, 2013.
- Trimble. *Trimble S6 Total Station Datasheet*. Trimble Navigation Limited, 2007.
- Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station: Principles of the Tracker System*. Trimble Navigation Limited, 2009a. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456300/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Principles%20of%20the%20Tracker%20System%20-%20English.htm?&iphl=tracker%20system:Principles:principles:principle:>
- Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station: Tracker Lightpath*. Trimble Navigation Limited, 2009b. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456296/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Tracker%20Lightpath%20-%20English.htm?&iphl=lightpath:tracker:>
- Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station: Parallel Processing with MultiTrack Technology*. Trimble Navigation Limited, 2009c. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456324/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Parallel%20Processing%20with%20MultiTrack%20Technology%20-%20English.htm?&iphl=processing:parallele:processes:parallels:parallele:processed:parallell:processe:parallel:process:>
- Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station and Autolock Technology: Locking a Target with the Tracker System*. Trimble Navigation Limited, 2009d. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456315/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Locking%20a%20Target%20with%20the%20Tracker%20System%20-%20English.htm?&iphl=targeting:targeted:locking:targets:target:locked:locks:lock:>
- Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station: Autolock Range — Searching and Tracking*. Trimble Navigation Limited, 2009e. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456342/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Autolock%20Range%20-%20Searching%20and%20Tracking%20-%20English.htm?&iphl=autolock:range:searching:tracking>

20-%20Trimble%20S6%20-%20Autolock%20Range%20in%20Searching%20and%20Tracking%20-%20English.htm?&iphl=autolock:ranging:ranged:ranges:rangs:range:rang:.

Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station: Influence of Prism Size on Tracker Signal Strength.* Trimble Navigation Limited, 2009f. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456348/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Influence%20of%20Prism%20Size%20on%20Tracker%20Signal%20Strength%20-%20English.htm?&iphl=influencing:influenced:influences:influence:prism:>

Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S6 Total Station: Searching a target with the Trimble Tracker System.* Trimble Navigation Limited, 2009g. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456309/TechTip%20-%20Trimble%20S6%20-%20Searching%20a%20Target%20with%20the%20Trimble%20Tracker%20System%20-%20English.htm?&iphl=tracker%20system:>

Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S8 Total Station: Locking with FineLock Technology onto a Passive Target.* Trimble Navigation Limited, 2009h. URL <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-456319/TechTip%20-%20Trimble%20S8%20-%20Locking%20with%20FineLock%20Technology%20onto%20a%20Passive%20Target%20-%20English.htm?&iphl=targeting:targeted:locking:targets:target:locked:locks:lock:>

Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble Access Software: The FineLock tolerance window.* Trimble Navigation Limited, 2010a. URL [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-522685/Trimble%20Access\\_What%20is%20the%20meaning%20of%20the%20Finelock%20tolerance%20window.htm?&iphl=tolerancing:tolerances:tolerance:windowing>windowse:finelock:toleranc:windows>window:](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-522685/Trimble%20Access_What%20is%20the%20meaning%20of%20the%20Finelock%20tolerance%20window.htm?&iphl=tolerancing:tolerances:tolerance:windowing>windowse:finelock:toleranc:windows>window:)

Trimble. *Trimble S3 Totalstation Benutzerhandbuch.* Trimble Navigation Limited, 2010b. Version 2.0.

Trimble. *Trimble S8 Total Station User Guide.* Trimble Navigation Limited, 2010c. Version 4.0.

Trimble. *Trimble Tech Tip: Trimble S8 Total Station: Comparison of Autolock and FineLock Technology.* Trimble Navigation Limited, 2010d. URL [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-522687/Trimble%20S8\\_Differences%20between%20Autolock%20and%20FineLock.htm?&iphl=comparisons:comparison:autolock:finelock:](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-522687/Trimble%20S8_Differences%20between%20Autolock%20and%20FineLock.htm?&iphl=comparisons:comparison:autolock:finelock:)



- Trimble. *Trimble S Series Totalstation User Guide*. Trimble Navigation Limited, 2010e. Version 7.0.
- Trimble. *Trimble S6 Total Station Datasheet*. Trimble Navigation Limited, 2011a.
- Trimble. *Trimble Access Software General Survey*. Trimble Navigation Limited, 2011b. Version 1.70, Revision A.
- Trimble. *Product Bulletin — Trimble 360° prisms*. Trimble Navigation Limited, 2012.
- Trimble. *Trimble S3 Total Station Datenblatt*. Trimble Navigation Limited, 2013a.
- Trimble. *Trimble S8 Total Station Datasheet*. Trimble Navigation Limited, 2013b.
- Wallis, D. A. *History of Angle Measurement*. From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, Egypt April 16-21, 2005.
- Witte, B. und Schmidt, H. *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Wichmann, 2006. 6. Auflage.
- Wunderlich, T. A. *Automatisches Zielen mit Tachymetern und Theodoliten*. Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen Veröffentlichung des Instituts für Geodäsie und Geophysik Forschungsgruppe Ingenieur-geodäsie , TU Wien, 2005. pp. 29-42.