Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten





1 Einleitung

In den letzten Jahren hat die reflektorlose Distanzmessung immer größere Bedeutung im Vermessungsalltag gewonnen. Insbesondere bei der Fassaden- und Gebäudeinnenaufnahme ergeben sich vielfältige Vorteile für den Anwender. Durch die Möglichkeit, objektbeschreibende, nichtkooperative Ziele ohne den Einsatz eines Retro-Reflektors zu erfassen, kann zum einen Personal eingespart werden, zum anderen können auf diese Weise überhaupt erst unzugängliche Punkte aufgemessen werden. Verfügt das Instrument zudem noch über motorbetriebene Achsen, ist es auch möglich, Oberflächen und Profile automatisch zu erfassen und Oberflächenpunkte automatisch abzustecken [JURETZKO 2005]. Doch gerade bei der Auswahl der objektbeschreibenden Punkte gerät der Anwender in ein Dilemma: Zur Modellbildung eignen sich insbesondere die Ecken und Kanten eines Objekts. Werden diese Punkte aber scharf angezielt, trifft der Laserstrahl des Entfernungsmessers nicht auf eine ebene Fläche. Dabei kommt es, je nach Art der Ecke bzw. Kante, zu systematischen oder zu groben Fehlern (Abb. 1): Außenkanten werden systematisch zu lang, Innenkanten zu kurz und freie Kanten oftmals grob falsch gemessen [BUCHMANN 1995].

2 Phänomene und Vorinformationen

2.1 Fehlerursachen

Die Ursache der Fehlmessung liegt darin, dass ein Teil des ausgesandten Signals vom Vordergrund, der restliche Teil vom Hintergrund reflektiert wird. Das Distanzmessteil wertet dann dieses Mischsignal aus. Bei Kanten einer Stufe mit geringer Tiefe wird dabei eine Distanz ermittelt, die entsprechend des Flächenanteils von Vorder- und Hintergrund am "wirksamen Strahlenquerschnitt" des Laserflecks (bei identischen Reflexionseigenschaften von Vorder- und Hintergrund) *zwischen* Vorder- und Hintergrund liegt. Unter "wirksamer Strahlquerschnitt" soll entsprechend [SCHERER 1996] der Querschnitt durch den Messstrahl bezeichnet werden, der zum Streckenmessergebnis maßgeblich beiträgt. Überschreitet die Tiefe der Stufe eine bestimmte kritische Größe, so setzt sich das auszuwertende Mischsignal bei Geräten, die nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten, aus Intensitäten zweier verschiedener Phasenlagen zusammen. So kann es zu dem grotesk erscheinenden Effekt kommen, dass die ermittelte Distanz kürzer ist als die Distanz zum Vordergrund oder länger als die zum Hintergrund.

Zur Abschätzung der Auswirkung dieses Fehlers ist die Kenntnis der Strahldivergenz und der Intensitätsverteilung über den Signalquerschnitt ebenso entscheidend wie die Kenntnis über das Systemverhalten an freien Kanten. So ist es gerade die Divergenz, die bestimmt, wie stark kleinere Objektstrukturen bei der Aufnahme verwischt werden und wie exakt eine Kante angezielt werden kann, ohne fehlerhafte Ergebnisse zu erhalten. Bereits bei der Einführung des ersten kommerziellen Tachymeters mit integrierter Impulsmessung und einem koaxial (d. h. nahezu parallaxenfrei) justierbaren Zielstrahl, dem Zeiss Rec Elta RL [Köhler 1994], wurde dieses Gerät am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe im Hinblick auf die Ausdehnung der Messkeule untersucht [MEIER-HIRMER 1996]. Seit diesen Anfängen der reflektorlosen



Abb. 1: Messverhalten an Kanten

Tachymetrie hat es erhebliche Weiterentwicklungen in Richtung Punktschärfe, Reichweite und Fehlersicherheit gegeben. Aussagen zur Strahldivergenz kann man zum einen aus der sichtbaren Größe des Laserflecks und der direkten Messung der Strahlungsintensität des Laserstrahls in verschiedenen Entfernungen ableiten. Zum anderen kann aber die Tatsache, dass es bei Messungen zu freien Kanten aufgrund der beschriebenen Ursachen zu (systematischen) Fehlmessungen kommt, dazu genutzt werden, die Größe des "wirksamen Strahlenquerschnitts" und darüber hinaus die Intensitätsverteilung innerhalb des Laserflecks in verschiedenen Entfernungen zu bestimmen.

Warum aber ist die Intensitätsverteilung überhaupt von Interesse? Der definierte Ursprung des Laserstrahls liegt in dessen Fokuspunkt in der Diode. Der Fokuspunkt kennzeichnet den Ort des geringsten Strahldurchmessers ("Strahltaille"). Je schmaler die Strahltaille ist, desto größer ist aber die – unerwünschte – Divergenz des Laserstrahls. Beim Verlassen der Laserdiode wird der Laserstrahl zu einem Interferenzmuster mit mehreren Intensitätsmaxima und -minima gebeugt, dabei ist die Beugung an der Diodenkante um ein Vielfaches stärker als orthogonal zur Kante. Den Effekten von Divergenz und Beugung wird mit den entsprechenden optischen Bauteilen entgegengewirkt: so lässt sich etwa mittels modenselektiver Elemente ein Beugungsmuster auf das erste Hauptmaximum beschränken, welches dann im Idealfall die Form einer zweidimensionalen Gaussverteilung annimmt [SCHLEMMER 1996]. Tatsächlich hat der untersuchte Strahl eine Verteilung, die in geringem Abstand vom Tachymeter in vertikaler Richtung noch die Form einer Gaußverteilung, in horizontaler Richtung näherungsweise die einer abgeschrägten Gleichverteilung besitzt. Wie später noch zu sehen sein wird, erfährt das Profil mit wachsender Entfernung vom Tachymeter erhebliche Formänderungen. Zusätzlich wird das Intensitätsprofil additiv überlagert durch ein weiteres Interferenzmuster, in dem sich einzelne Strahlteile gegenseitig auslöschen bzw. verstärken. Eine an sich schon inhomogene und mit zusätzlichen Interferenzen überlagerte Intensitätsverteilung ist aber von Nachteil, da die Intensitätsverteilung die Gewichtung vorgibt, mit der ein rückstreuender Flächenanteil zur gemessenen Distanz beiträgt [SCHUTZRECHT EP 0 987 564 A1]. Zielt der Nutzer nun mit dem Strichkreuz einen Objektpunkt an, so liegt dabei der Schwerpunkt der Verteilung möglicherweise neben der angezielten Stelle. Dann wird bei der Streckenmessung nicht der vom Strichkreuz angezielte Punkt am höchsten gewichtet, sondern ein links oder rechts davon liegender, je nachdem, welcher Strahlteil den größeren Gewichtsanteil besitzt. Bei einer inhomogenen oder gegenüber dem Tachymeter geneigten Fläche führt dies zu einem Verlängern oder Verkürzen der Strecke.

2.2 Herstellerangaben

Das hier untersuchte Tachymeter Leica TCRP1201 R300 ist das Spitzenmodell der TPS1200er Serie. Das Instrument realisiert zwei Möglichkeiten der Entfernungsmessung: Der IR-EDM dient zur Messung auf Prismen und Reflexfolien mit einem unsichtbaren Laserstrahl der Wellenlänge 780 nm, der mit einer Basisfrequenz von 100 MHz moduliert wird. Der im Folgenden untersuchte reflektorlose Entfernungsmesser PinPoint R300 arbeitet mit einem sichtbaren Laserstrahl der Wellenlänge 670 nm. Beides Mal wird der Laserstrahl in der selben Diode erzeugt. Für die Messung auf Prismen wird eine Negativlinse in den Laserstrahl hineingedreht, um den Strahl etwas aufzuweiten. Ein nachgeordnetes Filterrad stellt sich in beiden Fällen automatisch auf die Intensität des zurückkommenden Strahls ein [BAYOUD 2006]. Die Distanz wird durch eine Signalauswertung berechnet, die auf dem Prinzip der größten Wahrscheinlichkeit beruht. Der Hersteller bezeichnet das EDM als "PinPoint R300", bei dem ein "System Analyzer" für eine "drastisch erhöhte Sensibilität, eine erhöhte Reichweite und eine sehr hohe Messqualität und Zuverlässigkeit" [LEICA 2005] sorgt. Die Analyse umfasst dabei das System aus Sende- und Empfangseinheit, Messstrecke und Zielobjekt und dessen Einfluss auf das Signal, das im System Verstärkung, Abschwächung und Phasenverschiebung erfährt. Das lineare System und seine Parameter - u.a. auch die Signallaufzeit und damit die Strecke - lassen sich über die Impulsantwort des Systems beschreiben [SCHUTZRECHT EP 1 450 128 A1]. Die Impulsantwort ist ein frequenzabhängiges Ausgangssignal, das sich ergibt, wenn in den Eingang des Systems ein Signal gelegt wird, das zu einem einzigen Zeitpunkt einen (theoretisch) unendlich großen Wert annimmt (Diracimpuls). Die Impulsantwort dient rein zur Beschreibung des Systemverhaltens. Reales Eingangssignal in das System sind frequenzmodulierte Impulse von kurzer Zeitdauer. Zur Ermittlung der Strecke sind Modulationen mit mindestens zwei, besser aber mit einer Schar von Frequenzen notwendig [SCHUTZRECHT EP 1 450 128 A1]. Es werden Modulationsfrequenzen von 100 MHz bis 150 MHz verwendet. Der Messbereich des R300 wird von 1.5 m bis 760 m angegeben, die Reichweite bei mittleren atmosphärischen Bedingungen zwischen 300 m und 500 m (abhängig von der Reflektivität des Objektes). Die Standardabweichung liegt nach Herstellerangaben bei 3 mm + 2 ppm für Entfernungen bis 500 m und 5 mm + 2 mm2 ppm für Entfernungen über 500 m [LEICA 2005]. Untersuchungen, welche die Herstellerangaben belegen und auf die Problematik verschiedener Reflexionsmaterialien hinweisen finden sich in [JURETZKO 2006].

Der Hersteller gibt in seinen technischen Beschreibungen folgende Größen für den Laserpunkt an:

Entfernung	Punktgröße
20 m	$7\text{mm} \times 14\text{mm}$
100 m	12mm imes40mm
200 m	25mm $ imes$ $80mm$

2.3 Sichtbare Größe des Laserflecks

Die für das menschliche Auge sichtbare Größe des Laserflecks auf einem Objekt ist stark von der Umgebungsbeleuchtung und den Materialeigenschaften des Objekts abhängig. Während im Außenbereich bei Sonnenlicht das Erkennen der Form des Laserflecks auf einer verputzten



Abb. 2: Optisch sichtbarer Laserfleck



Wand nur bis etwa 10 m möglich ist, kann die Form bei dunkler Umgebung noch in 200 m erkannt werden. Mit zunehmender Distanz verliert die Abgrenzung des Flecks an Schärfe und es werden Interferenzerscheinungen sichtbar.

Abb. 2 zeigt die Form des Laserflecks in verschiedenen Entfernungen (zur besseren Darstellung wurden die Grauwerte der digitalen Bilder invertiert). Hierbei ist deutlich der Unterschied zwischen besonders intensiven Bereichen in der Mitte des Laserflecks und Interferenzerscheinungen an der Peripherie zu erkennen.

Die vier Passpunkte im Bild bilden dabei ein Quadrat mit der Seitenlänge von 5 cm.

2.4 Profile gescannter Stufen und Spalte

Trifft ein Teil des Laserstrahl auf den Vordergrund einer Stufe, der andere Teil auf den Hintergrund, so ergibt sich ein Mischsignal und es wird weder die korrekte Entfernung zum Vordergrund noch die korrekte Entfernung zum Hintergrund, sondern ein Zwischenwert ermittelt. Dieser Zwischenwert entspricht den aus den in Bezug auf die jeweiligen Auftreffflächen gewichteten Signalanteilen gemittelten Strecken zum Vorder- und zum Hintergrund, vgl. auch [MEIER-HIRMER 1996]. Ein derartiges Verhalten konnte bei dem untersuchten Gerät für Stufen bis zu einer Tiefe von ca. 50 cm beobachtet werden. Bei tieferen Stufen treten, wie später erläutert, andere bemerkenswerte Erscheinungen auf.

Als klar definierte Kante diente zum einen ein 30×30 cm großes, mit einer Kodak-Graukarte beklebtes Zielzeichen, auf das ein 15×15 cm großer, ebenfalls mit einer Graukarte beklebter Vordergrund befestigt wurde (Abb. 3). Die Entfernung zwischen Vorder- und Hintergrund betrug 20 cm.

Über diese Stufe wurde sowohl ein horizontaler als auch ein vertikaler Scan mit einem Punktabstand von 0,5 mm



Abb. 4: Versuchsaufbau Spaltscan. Beobachtungen an jedem Punkt: Strecke s_i und Vertikalverschiebung z_i

bis 3 mm durchgeführt. Die Steuerung des Tachymeters erfolgte dabei mit dem Programm TOTAL [JURETZKO 2005]. Abb. 3 zeigt exemplarisch das Ergebnis eines solchen Scan-Vorgangs für die Entfernung von 21 m.

Desgleichen wurde die bereits in [MEIER-HIRMER 1996] benutzte Holzstruktur mit zwei je 25 mm hohen und 40 mm tiefen Spalten entsprechend dem damaligen Versuchsaufbau mit einem Vertikalschlitten verfahren und dabei Profilscans über die Spalte durchgeführt. Der durchschnittliche Punktabstand betrug 0,2 mm.

Aus Abb. 4 ist der prinzipielle Versuchsaufbau ersichtlich. Die Spalte liessen sich für weitere Vergleichsmessreihen verengen auf 9 mm bzw. 6 mm.

Der Übergang vom Vorder- zum Hintergrund war anders als bei der Graukartenstufe mit Material ausgefüllt, was zu einer zusätzlichen unerwünschten Rückstreuung bei schrägem Signaleinfall führen konnte. Dies konnte mit entsprechender Signalausrichtung verhindert werden. Beim Stufenscan war die Strahlrichtung nur in einem Scanpunkt orthogonal zur Objektfläche, was bei allen anderen Punkten theoretisch zu einer unerwünschten Strahlreflexion weg von der Empfangsoptik führt. Dieser Effekt war aber wegen der minimalen Abweichungen in der Auswertung nicht nachweisbar.



Abb. 5: Phasenverschiebung eines Mischsignals

3 Kritische Stufentiefe

Sobald, wie oben beschrieben, Signalanteile an verschiedenen Flächen reflektiert werden, tritt der aus Photogrammetrie und Laserscanning bekannte Effekt der Mischpixel auf, dessen Wirkung mit dem zyklischen Phasenfehler zu vergleichen ist. Die Signalanteile werden teilweise auf ein und dasselbe Pixel der Empfangsdiode zurückgelenkt. Beim Übergang der Streckenmessung vom Vorder- zum Hintergrund überlagern sich also Signalanteile, die völlig unterschiedliche Phasenlage zueinander haben können. Die Phasenlage des resultierenden Mischsignals ist abhängig von der Distanz zwischen Vorder- und Hintergrund sowie von den sich durch das Scannen kontinuierlich ändernden Intensitätsanteilen auf den jeweiligen Flächen [Scherer 1996]. Die empfangenen Intensitäten ihrerseits hängen außer von der Entfernung auch von den Oberflächeneigenschaften ab, insbesondere von Reflektivität und Neigungswinkel. Da insbesondere die Reflektivität i. A. nicht bekannt ist, ist der daraus resultierende Fehler nicht zu beseitigen [Wölfelschneider et al. 2005]. Die Wirkung verstärkt sich, je schwächer die Intensität ist (Rauschen nimmt zu) und je schlechter der Arbeitsbereich des Empfängers auf die eintreffenden Intensitäten abgestimmt ist [HEBERT et al. 1992]. Dies wird aber mit den wachsenden Intensitätsdifferenzen im geteilten Messstrahl immer schwieriger. Im vorgenommenen Versuch wurde nur einheitliches Material benutzt und die Oberfläche orthogonal zum Zielstrahl ausgerichtet, um die oberflächenabhängigen Intensitätsdifferenzen so gering wie möglich zu halten.

Zur Verdeutlichung der entfernungsabhängigen Effekte werden hier einige Überlegungen zu Mischsignalen grafisch dargestellt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen schematisch die Modulationswelle (3 m Wellenlänge entsprechend 100 MHz) eines Sendestrahls, der zum einen





Abb. 6: Variable Stufentiefe

Teil vom Vordergrund, zum anderen Teil vom Hintergrund reflektiert wird (Abb. 5). Das aus den beiden reflektierten Wellen resultierende Mischsignal wird zur Ermittlung der Phasenverschiebung zwischen Sende- und Empfangssignal und somit zur Ermittlung der (Rest-)Strecke innerhalb einer Modulationswelle benutzt. Vereinfachend wurde davon ausgegangen, dass keinerlei Intensitätsverluste auftreten.

Liegen Vorder- und Hintergrund weniger als ein Viertel der Modulationswellenlänge auseinander, so wird die resultierende Distanz entsprechend der jeweils linken Grafiken ermittelt. Dies führt bei einem Scan zu einer "natürlichen" Abbildung der Stufe, vergleichbar mit den vorgestellten Scans über die Stufe mit geringer Tiefe: Die aus dem Mischsignal resultierende Strecke liegt dabei zwischen dem Vorder- und dem Hintergrund, wie durch den Pfeil in der Grafik verdeutlicht wird. Die Differenz



Abb. 7: Experimentell ermitteltes Messverhalten (herkömmliche Technologie) an einer Kante



Abb. 8: Experimentell ermitteltes Messverhalten (PinPoint R300) an einer Kante

zum Vorder- bzw. Hintergrund ist dabei abhängig vom Anteil der Strahlungsintensität auf der jeweiligen Fläche. Beträgt der Unterschied dagegen zwischen einem Viertel und der Hälfte der Modulationswellenlänge, so liegt die aus dem Mischsignal resultierende Strecke (entsprechend der jeweils rechten Grafiken) entweder vor dem Vordergrund oder hinter dem Hintergrund. Dieses Messverhalten wiederholt sich periodisch mit der halben Modulationswellenlänge.

Zur experimentellen Bestätigung der vorangestellten Überlegungen wurden Scans über Kanten mit variablem Abstand zwischen Vorder- und Hintergrund durchgeführt (Abb. 6).

Die Ergebnisse der Kantenscans mit einem älteren Leica TCRA1103, der nicht über die moderne Signalverarbeitung des PinPoint R300 Moduls verfügt, bestätigen die Modellvorstellungen zur Signalüberlagerung (Abb. 7). Auch konnte experimentell nachgewiesen werden, dass sich das gezeigte Kantenverhalten bei noch tieferen Kanten periodisch mit der halben Modulationswellenlänge (1,5 m) wiederholt.

Bei Verwendung des Leica TCRP1201 mit dem "System Analyzer" des R300 Entfernungsmessteils traten diese Effekte nur noch in den Randbereichen des wirksamen Strahlquerschnitts auf (Abb. 8). Aufgrund des sehr großen Unterschiedes zwischen dem Strahlungsintensitätsanteil von Vorder- und Hintergrund sind die resultierenden Fehler in den Randbereichen aber recht klein, in der Regel unter 1 cm. Je mehr sich die Messung dem Zentrum der Kante nähert und je ausgeglichener somit das Verhältnis von Vordergrund- und Hintergrundsignal ist, desto sicherer wird in der Regel erkannt, dass eine gestörte Messung vorliegt und es kommt richtigerweise zu einer Fehlermeldung. Trotzdem sind vereinzelt Fehlmessungen von einigen Dezimetern zu beobachten, die dem oben beschriebenen Schema der Signalüberlagerung folgen.



Abb. 9: Integration über den Strahlungsquerschnitt mit Flächenanteilen auf Vordergrund V bzw. Hintergrund H



Abb. 10: Ansatz zur Berechnung einer ,gemessenen ' Strecke s aus Distanzen t bzw. Oberflächengeometrie und Gewichtungen/Intensitäten p

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass sowohl die Fehler in den Randbereichen als auch die Zahl der nicht erkannten Fehlmessungen im Zentrum des Strahls mit zunehmender Entfernung des Hintergrundes vom Vordergrund abnahmen, die grundsätzliche Systematik jedoch erhalten blieb.

4 Homogenität des Messstrahls

Die Intensitätsverteilung im Messstrahl gleicht nur theoretisch einem zweidimensionalen Gaußprofil. Es lässt sich bereits mit bloßem Auge erkennen, dass die Verteilung davon abweicht. Im Folgenden werden zwei Ansätze aufgezeigt, wie mit einfachen Mitteln das wahre Intensitätsprofil ermittelt werden kann – unter der Annahme, dass das Intensitätsprofil bei allen Messungen eines Scans stabil bleibt. Die Ergebnisse werden durch direkte Intensitätsmessungen mit einem Strahlanalysesystem verifiziert.

4.1 Intensitätsprofile aus Differenzenquotienten

Der erste Ansatz, die Bestimmung des Intensitätsprofils aus Differenzenquotienten, beruht darauf, dass das in Abb. 3 dargestellte Ergebnis eines Scans über eine Kante als Integration über das Intensitätsprofil des Messstrahls interpretiert werden kann. Wie in Abb. 9 veranschaulicht, führen die unterschiedlichen Intensitätsanteile beim Übergang vom Vorder- auf den Hintergrund zu einer ausgerundeten Stufe. Folglich kann aus dieser gemessenen Kurve (durch Bildung der Differenzenquotienten) das Intensitätsprofil des Messstrahls abgeleitet werden.

4.2 Intensitätsprofile aus Gewichtungsansatz

Im zweiten Ansatz, dem Gewichtungsansatz, wird ausgenutzt, dass sich die Messflecke entlang einer Scanlinie mehrfach überlappen. Das bedeutet, dass jeder Objektpunkt bei mehreren Streckenmessungen mit in die Distanzbildung eingeflossen ist. Kennt man die jeweilige Gewichtung, mit der der schmale Strahlabschnitt Δz um einen Objektpunkt herum am Gesamtergebnis einer Streckenmessung beteiligt war, kann man bei bekannten Entfernungen zwischen Objektpunkten und Tachymeter zurück schließen auf die Gewichtung der einzelnen Strahlanteile, was im Folgenden demonstriert wird.

Für die *i*-te Beobachtung liegen bei einem Vertikalscan nach Abb. 4 die gemessene Horizontalstrecke s_i und die dazugehörige Vertikalverschiebung z_i seit dem Start am Nullpunkt vor. Im Ansatz zur Berechnung einer Intensitätsverteilung über die Höhe des Messflecks (Berechnung über die Breite analog) wird jedem Teilabschnitt des Messflecks mit der Höhe Δz eine Intensität bzw. Gewichtung p_i zugeordnet (Abb. 10).

Gewichtet man die wahre Distanz *t* zwischen Tachymeter und Oberfläche des Scanobjekts an jedem Objektpunkt *i* mit ihrem zugehörigen p_j , so erhält man aus dem gewichteten Mittelwert aller Distanzen die modellierte Strecke s_i , die nach diesem Ansatz der gemessenen Strecke entsprechen soll. Die wahren Distanzen t_i sind um den Abstand zwischen Tachymeter und Objektvorderfläche t_0 jeweils auf die Kanten/Spalttiefe $t_{r,i}=t_i-t_0$ reduziert, um die Berechnung zu erleichtern. Die Messwerte $s_{r,i}=s_i-s_1$ sind ebenfalls reduzierte Werte. Sie werden jeweils auf den Messwert s_1 reduziert, da dessen Messfleck immer ganz auf der ebenen, unverkippten Vorderfläche des Objekts liegt. Die gewichtete Mittelbildung mit reduzierten Entfernungswerten lautet dann

$$s_{r,i} = \frac{\sum_{j=-n}^{n} (p_{n+j+1} \cdot t_{r,i+j})}{\sum_{j=-n}^{n} p_{n+j+1}}$$
(1)

Die Zahl n beschränkt die Anzahl der beteiligten Distanzen symmetrisch nach oben und unten. Je mehr der Messfleck sich bei wachsender Entfernung zwischen Tachymeter und Objekt aufweitet, desto größer wird n, gleiche Scan-Schrittweite vorausgesetzt. Innerhalb eines Messflecks liegen 2n+1 Messpunkte und damit Gewichte. Die Gleichung gilt in diesem Ansatz nun für jeden gemessenen Punkt auf dem Scanobjekt. In (1) sind die reduzierten Distanzen t, die einem theoretisches Intensitätsprofil und der Sollform der Kante entstammen, den gemessenen, reduzierten Strecken s gegenübergestellt. Die Ausgleichungsbedingung lautet, dass die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Strecken minimiert werden sollen. Dann gilt

$$s_{r,i} + v_{s_{r,i}} - \frac{\sum_{j=-n}^{n} \left(\left(p_{n+j+1,0} + d\hat{p}_{n+j+1} \right) \cdot t_{r,i+j} \right)}{\sum_{j=-n}^{n} \left(p_{n+j+1,0} + d\hat{p}_{n+j+1} \right)} - > \min!$$
(2)

mit

 s_r = reduzierte Beobachtung

 v_s = anzubringende Verbesserung in der Beobachtung p = zu schätzender Parameter: Gewichtung bzw. Intensität $d\hat{p}$ = Zuschlag zum Parameter

t = Kanten- bzw. Spalttiefe (als bekannt vorausgesetzt)

Durch Bildung des totalen Differentials erhält man die linearisierte Form von (2):

$$\sum_{j=-n}^{n} p_{n+j+1} \cdot v_{s_i} + (s_{r,i} - t_{r,i-n}) \cdot d\hat{p}_1 + (s_{r,i} - t_{r,i-n+1}) \cdot d\hat{p}_2 + \dots + (s_{r,i} - t_{r,i+n}) \cdot d\hat{p}_{2n+1} = -w_i$$
(3)

Zusammengefasst für alle Messpunkte i = 1...m wird daraus das funktionale Modell in Matrizenschreibweise

$\mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{A}\mathbf{d}\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{w}$

Die Matrix der Bedingungsgleichungen **B** ist dabei eine Einheitsmatrix mit der Summe aller Gewichte als Vorfaktor. Die Designmatrix **A** enthält die Differenzen zwischen reduzierten *beobachteten* und *modellierten* Strecken. Der Vektor **w** ist eine Funktion von Beobachtungen und geschätzten Parametern und bezeichnet den Widerspruch des Modells im aktuellen Iterationsschritt. Als erste Iteration wurde von einer Rechteckverteilung der Intensitäten *p* über die gesamte Ausdehnung des Messstrahls ausgegangen, deren Verbesserung am Ende im differentiellen Parametervektor **dx̂** zu finden ist. Dieses gemischte Modell einer bedingten Ausgleichung mit Unbekannten (Gauß-Helmert-Modell) hat als Lösung für den geschätzten Parametervektor **x̂**, der die verbesserten Intensitäten enthält,

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \mathbf{d}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_{ww}^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_{ww}^{-1}(-w)$$
 (4)

Unter der Voraussetzung, die Beobachtungen seien alle gleich zu gewichten, ist die Kovarianzmatrix der Beobachtungen eine Einheitsmatrix ($Q_{ll} = I_m$) und die Kovarianzmatrix der Widersprüche lautet

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{WW}} = \mathbf{B}\mathbf{Q}_{\mathbf{II}}\mathbf{B}^{\mathbf{T}} = \left(\sum_{j=-n}^{n} p_{n+j+1}\right)^{2} \cdot \mathbf{I}_{m}$$
(5)

Mit \mathbf{Q}_{ww} eingesetzt in (4) erhält man die gesuchten Intensitäten \hat{p}_i der einzelnen Profilabschnitte. Diese Intensitäten bilden kein Profil im Sinne eines Längs- oder Querschnitts durch den Messstrahl, sondern repräsentieren die Summe über alle Intensitäten quer zur jeweiligen Profilrichtung! Sie sind enthalten im Vektor $\hat{\mathbf{x}}$ zu

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}(-\mathbf{w})$$

Kehrt man das Verfahren um, so kann man bei bekanntem und stabilem Intensitätsprofil aus einem Scan mit sich überlappenden Messflecken die wahre Objektgeometrie in Auflösung der Messabstände berechnen. Das Gleichungssystem hat zwar anfangs mehr Unbekannte als Gleichungen, dieses Problem besteht aber nicht mehr, sobald ein gewisser Teil der Geometrie als bekannt vorgegeben werden kann.

4.3 Direkte Intensitätsmessung

Zur Verifizierung der beiden Ansätze zur Profilberechnung eignet sich ein Strahlanalysesystem, mit dem sich Intensitätsprofile eines Laserstrahls messen lassen. Das verwendete Strahlanalysesystem "Spiricon" besteht aus einer verzerrungsfreien monochromatischen CCD-Kamera mit einer Aufnahmefläche von $8.8 \times 6.6 \text{ mm}^2$ bei einer Bildpunktgröße von 11.5 (Hz) \times 27 (V) μ m². Vor die Kamera ist ein Beam Sampler, bestehend aus Strahlteiler und Filterelementen, montiert. Eine zusätzliche Linse, die den Strahlquerschnitt vierfach verkleinert, ermöglicht die Erfassung des gesamten Strahlquerschnitts aus Entfernungen von bis zu 20m. Die Messungen wurden im Freien durchgeführt und das Tachymeter in verschiedenen Entfernungen zum Spiricon aufgebaut. Zur Ansteuerung der Kamera und zur späteren Auswertung der Aufnahmen wurde die Spiricon Strahlanalysesoftware genutzt. Mit dieser Software lassen sich Aufnahmen wahlweise zu Beginn oder Ende eines Messintervalls des Tachymeters auslösen. Die Aufnahmen repräsentieren also nicht den Intensitätsverlauf über das gesamte Messintervall, sondern nur eine Momentaufnahme! Außerdem ist zu beachten, dass das Spiricon in größeren Abständen triggert als der R300-Laser moduliert wird. So werden also nicht immer im gleichen Moment der Messung die Werte abgegriffen. Wird die Momentaufnahme zu Beginn eines Messintervalls gemacht, kommen inhomogene Strahlquerschnitte zustande, die im rechten oberen Bereich besonders schwache Intensität aufweisen. (Abb. 11)



Abb. 11: Aufnahme zu Beginn einer Messung (Abstand Spiricon-Tachymeter = 162 cm). Je heller der Farbton, desto höher die Intensität.



Abb. 12: Der charakteristisch gezackte Verlauf des horizontalen Profils bleibt bestehen, die Intensitätsstärke variiert. (Messdistanz 14m, drei Messungen in Folge)



Abb. 13: Perspektivische Ansicht der Intensitätsverteilung, Messdistanz 20 m



Abb. 14: Ansicht von unten, Messdistanz 20 m

Bei einem Vergleich fallen drei Spiricon-Aufnahmen, die nacheinander vom selben Standpunkt aus aufgenommen wurden, vermutlich wegen der erwähnten geringeren Triggerrate des Spiricon sehr unterschiedlich aus. Es sind Unterschiede in den Intensitätsmaxima von bis zu 50% zu verzeichnen, wobei die Grundform des Intensitätsprofils aber immer dieselbe bleibt (Abb. 12).

In einer Entfernung von rund 20 m geschieht eine deutliche Trennung des Strahls in zwei Hälften. (Abb. 13 und Abb. 14) Dabei behält der linke Teil – wie bisher schon – eine deutlich stärkere Intensität als der rechte.

Im Außenbereich des Profils tauchen zudem die ersten Streifen des Beugungsmusters auf.



Abb. 15: Horizontale Intensitätsprofile aus Kantenscan/ Gewichtungsansatz und Kantenscan/Ansatz Differenzenquotient, Messdistanz ca. 7 m

4.4 Verifizierung der berechneten Intensitätsprofile

Nun können Intensitätsprofile aus verschiedenen Messverfahren und Auswertemethoden einander gegenübergestellt werden. Die maximale Intensität ist immer auf den Wert 10 normiert, da eine Berechnung nur relative Werte für die Intensitätsverteilung ergibt. (Aus den direkten Intensitätsmessungen sind ebenfalls keine absoluten Werte gegeben, da die Kamera nicht dahingehend kalibriert war.) Zu beachten ist, dass es sich bei den folgenden Intensitätsprofilen eigentlich um Summenbilder handelt.

Für 7 m Entfernung lassen sich die Methoden 'Differenzenquotient' und 'Gewichtungsansatz' für das horizontale Intensitätsprofil aus einem Kantenscan gegenüberstellen. Der weite Stützpunktabstand bedingt die grobe Auflösung der berechneten Profile. Abgesehen davon ist festzustellen, dass der aufwendigere Gewichtungsansatz hier keinen signifikanten Unterschied zur Berechnung mittels Differenzenquotienten bietet. Das Profil weist in beiden Fällen ein Übergewicht in der rechten Profilhälfte auf und hat verglichen mit einem Gaußprofil noch zwei auffällige Intensitätsabfälle in den Flanken (Abb. 15). Prinzipiell sind alle Profile im horizontalen Schnitt (Abb. 13, Abb. 14) deutlich inhomogener als im vertikalen.

Für eine Distanz von 14 m werden das Resultat eines Scans über einen Spalt der Höhe 6 mm und einen Spalt von 25 mm Höhe, ausgewertet mittels Gewichtungsansatz, verglichen, wonach die beiden Profile sehr gut übereinstimmen (Abb. 16). Bei zusätzlicher Überlagerung mit dem Summenbild aus einer Spiricon-Aufnahme lässt sich die Qualität des Ansatzes feststellen: es fällt lediglich der unruhigere Verlauf des berechneten Profils auf, was sich evtl. dadurch erklären lässt, dass nur eine begrenzte Anzahl Stützstellen zur Verfügung steht und sich die Berechnung im Gegensatz zur Momentaufnahme des Spiricon aus der Gesamtheit aller Messwerte zusammensetzt.

Für das vertikale Profil aus 20 m Entfernung lassen sich einmal alle Mess- und Berechnungsverfahren für das Intensitätsprofil gegenüberstellen. (Abb. 17) Es ist festzustellen, dass sich weder die in Abschnitt 2.4 genannten



Abb. 16: Vertikale Intensitätsprofile aus Spaltscans/ Gewichtungsansatz und Messung, Messdistanz 14 m

Unterschiede in den Oberflächen und Scanverfahren, noch die unterschiedlichen Auswerteverfahren auffällig in den berechneten Profilen niederschlagen. Nach Einbeziehung des wahren Profils aus der Spiriconaufnahme lässt sich nicht eindeutig ein Verfahren als besonders geeignet herausstellen, abgesehen davon, dass prinzipiell natürlich dem einfacheren Auswerteverfahren der Vorzug zu geben ist.

Für die horizontale Intensitätsverteilung aus etwa 20 m Entfernung lässt sich mit beiden Auswertemethoden trotz der geringen Stützpunktdichte sehr schön die schon mit Spiriconaufnahmen belegte Zweiteilung des Strahls in dieser Entfernung erkennen (Abb. 14, Abb. 18)

Mit genügend dicht aufeinanderfolgenden Messungen konstanter Schrittweite lässt sich also aus einem Scan über eine strukturierte Oberfläche mit bekannter Geometrie das effektive Intensitätsprofil des Lasermessstrahls näherungsweise rekonstruieren. Bei den Profilen handelt es sich um relative Angaben, die absoluten Intensitätswerte sind nicht ableitbar. Somit ist ein Vergleich der absoluten Intensitätsstärke zwischen ausgehendem und zurückkommendem Messstrahl aus dieser Ausgleichungsrechnung heraus nicht möglich.

Im Gegensatz zum gemessenen Profil ist das berechnete Profil dasjenige, das beim Empfang im Tachymeter wirksam ist. Der Vergleich der Profile zeigt, dass die Messabstände ausreichend waren, um den zurückkommenden Strahl (von Interferenzerscheinungen in den äußeren Randbereichen abgesehen) ganz auf dem Empfänger abzubilden. Das berechnete Profil bildet einen zeitlichen Querschnitt über das gesamte Messintervall und erfasst nicht nur einen Ausschnitt davon, wie es bei Messung mit dem Strahlanalysesystem geschieht. Bei Vergleich der Intensitätsverteilungen aus beiden Methoden wurden aber abgesehen von den Profilen bei 20m keine signifikanten Differenzen festgestellt. Bei dieser Entfernung differieren aber auch schon die berechneten Profile untereinander um bis zu 2 mm, was vermutlich auf die Normierung der Intensitätswerte zurückzuführen ist: bei einer Auswertung, die das tatsächliche Maximum eines Profils



Abb. 17: Vertikale Intensitätsprofile aus Kanten- und Spaltscans/Gewichtungsansatz, Kantenscan/Ansatz Differenzenquotient und Messung, Messdistanz ca. 20 m



Abb. 18: Horizontale Intensitätsprofile aus Kantenscan/ Gewichtungsansatz, Kantenscan/Ansatz Differenzenquotient und Messung, Messdistanz ca. 20 m

nicht erkannt hat, wird auf einen anderen, niedrigeren Wert normiert und dann deren ganze Profillinie überhöht dargestellt.

Was sagt nun die gefundene Form der Profile über die Bauweise des Systems aus? Die Intensitätsverteilungen im horizontalen Schnitt bis 20 m Entfernung weisen überlagerte Interferenzmuster und eine starke Inhomogenität auf. Die offensichtlich nicht kantengebeugten vertikalen Strahlanteile zeigen ein nahezu ideales Gaußprofil. Aufgrund der Argumentationen in verschiedenen Leica-Patenten (z. B. [SCHUTZRECHT EP 1 517 415 A1]) ist zu vermuten, dass als Messstrahl ein Single-Mode-Strahl verwendet wird, da dessen Strahlprofil über große Entfernungen stabiler ist als das einer mehrmodig emittierenden Diode. Ein Single-Mode-Strahl lässt sich z. B. durch eine kantenemittierende Laserdiode erstellen: die Diode strahlt mehrmodiges Licht aus, das durch Blenden oder Single-Mode-Fasern auf eine Mode herunterreduziert wird. Als Verstärker kann sich eine zweite Laserdiode anschliessen. Diese Bauweise ist nur eine von vielen möglichen, am Ausgang steht aber jeweils ein Single-Mode-Strahl. Dieser wird orthogonal zur Emissionskante stark gebeugt, weshalb zwischen Diode und Kollimationslinse noch eine Zylinderlinse und Umlenkelemente liegen können, auf die treppenartige Beugungsstrukturen aufgetragen sind, und die die Divergenz vermindern, indem sie weit gefächerte Teilstrahlen einander überlagern [SCHUTZ-RECHT EP 1 150 097 A1]. Der Intensitätsabfall zur rechten Strahlhälfte hin (vgl. Abb. 11, Abb. 12) hat seine Ursache vermutlich in einer Schräglage zwischen Diode und Optik oder zwischen optischen Elementen untereinander. Um dies genauer untersuchen zu können, wären aber besser abgesicherte Einblicke in die Bauweise notwendig.

Einfacher lässt sich dagegen auf die Folgen der inhomogenen Intensitätsverteilungen für eine Messung eingehen: Sie hängen von der Symmetrie des angezielten Objekts gegenüber dem Intensitätsschwerpunkt und der Lage des Strichkreuzes in der Intensitätsverteilung ab: Wird z.B. eine rechtwinklige Hausecke angezielt, von einem Gerätestandpunkt aus, der auf der Winkelhalbierenden der Verlängerung beider Hauswände liegt, und das Strichkreuz teilt die Fläche unter dem horizontalen Intensitätsprofil in ein Verhältnis links:rechts von 60:40, so wird die wahre Strecke nicht nur aufgrund der Ausdehnung des Messflecks verlängert gemessen, sondern es wird auch die Objektgeometrie aus der linken Strahlhälfte viel stärker gewichtet als die rechte. Bei Anzielung eines Punktes auf der rechten Hauswand wird demzufolge der gemessene Punkt zum Tachymeter hin vor die Wand "gezogen", bei Messung auf der linken Hauswand hinter die Wand "geschoben". Der Anwender sollte bei hohen Genauigkeitsanforderungen dann auf jeden Fall die Möglichkeit zur Justierung der Strahlrichtung nutzen [LEICA 2005], damit zumindest diese Fehlerquelle beseitigt ist. Der Einfluss der Strahlinhomogenität lässt sich damit aber nicht beseitigen. Rechnet man mit einem der ermittelten Profile für eine Entfernung von 20 m das oben genannte Beispiel eines Scans der Hausecke durch, ergibt sich eine maximale theoretische Abweichung zwischen Sollstrecken zu den Wandflächen und "gemessenen" Strecken von immerhin 1 mm, unabhängig von der Lage des Fadenkreuzes! Die Justierung ist also kein Garant für fehlerfreie Messungen. An der Hausecke selbst geschieht natürlich zusätzlich eine Ausrundung, hier von (berechnet!) maximal 2 mm.

5 Effektive Größe des Messstrahls

Alle Profile lassen sich aber auch hervorragend mit Gaußschen Glockenkurven beschreiben, um deren jeweilige Varianz zur Beschreibung der wirksamen Strahlbreite heranzuziehen. Als streckenwirksame Ausdehnung des Messstrahls in horizontaler und vertikaler Richtung wird hier ein Bereich von $\pm 3\sigma$ definiert. Somit liegen 99,7% der Strahlungsintensität innerhalb dieses Bereichs. Etwaige Intensitätsanteile außerhalb dieses Bereichs haben praktisch keinen Einfluss mehr auf die Streckenmessung. Abb. 19 zeigt die abgeleiteten Gaußkurven aus Kantenscans/Ansatz Differenzenquotient bei verschiedenen Entfernungen. Für 7 m und 21 m wurden Messungen unter Laborbedingungen, für 52 m, 87 m und 180 m Messungen in einem wenig frequentierten Parkhaus durchgeführt. In der linken Spalte ist jeweils der sichtbare Laserfleck abgebildet. Wie bereits erwähnt, bilden die Markierungs-

punkte im Bild ein Quadrat von 5×5 cm. In Abb. 20 sind die streckenwirksamen Dimensionen des Laserstrahls zusammengestellt, die weitgehend mit der subjektiv sichtbaren Größe übereinstimmen. Deutlich zu erkennen ist, dass der Laserfleck bei Entfernungen bis 50 m kleiner ist als 2 \times 2 cm.

6 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen geben dem Anwender einen Eindruck von der Intensitätsverteilung und der streckenwirksamen Größe des Laserflecks, auch in größeren Entfernungen. Durch die Größe des Laserflecks wird die Aufnahmeschärfe eines zu vermessenden Objektes limitiert. Eine inhomogene Intensitätsverteilung erzeugt selbst auf ebener, geneigter Fläche zusätzliche Abweichungen, besonders wenn die Gewichtungssumme links und rechts des mit dem Strichkreuz angezielten Punktes unterschiedlich ist. So verursacht die horizontale Inhomogenität des Messstrahls bei Anzielung einer Hauswand unter einem Winkel von 45° nach theoretischer Berechnung 1 mm Fehler bei 20 m Messdistanz. Für viele praktische Anwendungen mittlerer Genauigkeit, wie Gebäudeeinmessungen oder Aufnahmen für ein Facility-Management-System, sind Ausdehnung und Inhomogenität des Laserflecks aber vernachlässigbar klein, insbesondere dann, wenn mit kurzen Zielweiten gearbeitet wird. Trotz Fortschritten in der Signalverarbeitung besteht aber immer noch die Problematik des Messens zu "freien Kanten", insbesondere dann, wenn nur wenige Zentimeter zwischen Vorder- und Hintergrund liegen. Eine solche Situation tritt z.B. häufig bei Mauervorsprüngen auf. Wie gezeigt, wird bei solchen Kanten fälschlicherweise eine Mischdistanz zwischen Vorder- und Hintergrund ermittelt. Bei Stufen mit größerem Abstand reagiert das R300 Modul wesentlich besser als seine Vorgängermodelle: Liegen Vorder- und Hintergrund weiter als 50 cm auseinander, so wird in den meisten (aber nicht allen) Fällen eine Fehlermeldung angezeigt. In beiden Fällen ist der Anwender gefordert, durch entsprechende Aufnahmestrategien ein Aufspalten des Laserstrahls zu vermeiden.

Literatur:

- BAYOUD, FADI (2006): Leica's Pinpoint EDM Technology with System Analyser Signal Processing and Novel Optomechanical Features. Proceedings of the XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8–13, 2006
- [2] BUCHMANN, PETER (1996): Entwicklung eines Meßsystems zur automatischen polaren Objekterfassung am Beispiel der Bauaufnahme. DGK Reihe C, Heft 456, München 1996



Abb. 19: Scans über eine Kante (20 cm) in verschiedenen Entfernungen



Abb. 20: Streckenwirksame Dimensionen des Laserstrahls

- [3] HEBERT, MARTIAL / KROTKOV, ERIC (1992): 3-D Measurements from Imaging Laser Radars: How Good Are They? Intl. Journal of Image and Vision Computing, vol. 10, no. 3, April 1992, pp. 170-178.
- [4] JURETZKO, MANFRED (2005): Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. DGK Reihe C, Heft 588, München 2005, ISBN 3 7696 5027 1
- [5] JURETZKO, MANFRED (2006): Leistungsfähigkeit des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Tachymeterserie TPS1200 von Leica. FuB, 2/2006, S. 90–95
- [6] Köhler, MARTIN (1994): Einige theoretische Grundlagen für die reflektorlose Messung mit dem Zeiss-Tachymeter RecElta RL. Der Vermessungsingenieur 5/1994, S. 216– 221
- [7] LEICA (2005): Bedienungsanleitung TPS1200 Series, Leica-Geosystems, Heerbrugg
- [8] MEIER-HIRMER, BIRGIT/MEIER-HIRMER, ROBERT (1996): Untersuchungen zum Reflexionsverhalten des Zeiss-Tachymeters RecElta RL an strukturierten Oberflächen. AVN 6/1996, S. 233–240
- [9] SCHERER, MICHAEL (1996): Automatische Objekterfassung durch Profilscannen. XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz, 9.–14. September 1996, Dümmler Verlag, Bonn
- [10] SCHLEMMER, HARALD (1996): *Grundlagen der Sensorik*. Wichmann Verlag, Heidelberg 1996, S.18

- [11] SCHUTZRECHT EP 0 987 564 A1(22.03.2000). Leica Geosystems AG. Pr.: DE 19840049 02.09.1998
- [12] SCHUTZRECHT EP 1 150 097 A1(31.10.2001). LEICA Geosystems AG. Pr.: 26.04.2000
- [13] SCHUTZRECHT EP 1 450 128 A1(25.08.2004). LEICA Geosystems AG. Pr.: 19.02.2003
- [14] SCHUTZRECHT EP 1 517 415 A1(23.03.2005). LEICA Geosystems AG. Pr.: 18.09.2003
- [15] WÖLFELSCHNEIDER, HARALD et al. (2005): Schnelle Entfernungsmessung für Laserscanner. tm 72/2005, S. 455– 467

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Eva Richter Universität Karlsruhe Geodätisches Institut 76128 Karlsruhe

Dr.-Ing. Manfred Juretzko Universität Karlsruhe Geodätisches Institut 76128 Karlsruhe

Abstract

Zur einfacheren Erfassung von Punkten auf natürlichen Oberflächen (nichtkooperativen Zielen) werden zunehmend reflektorlos messende Tachymeter eingesetzt. Diejenigen neuerer Bauart weisen schmalere Strahlkeulen auf und erreichen größere Distanzen als ihre Vorgänger. Aber auch bei geringerem Strahlquerschnitt bleibt bei Messung auf Kanten das Problem, dass neben der gesuchten Distanz auch Entfernungen zu anderen innerhalb der Strahlkeule liegenden Punkten mit in die Messung einfließen. Der Artikel untersucht daraufhin Intensitätsverteilung und Ausdehnung des Messstrahls des reflektorlosen Entfernungsmessmoduls R300 von Leica.