

# Visualisierung und simultane Erfassung der Geometrie mit Tachymeter und Digitalkamera - Eine Alternative zum Laserscannen in der Bauaufnahme –

Schlüsselwörter / Keywords: Tachymetrie, Laserscannen, Bauaufnahme, Phototachymetrie, intelligente Tachymetrie, Architekturvermessung, Baudokumentation

## Zusammenfassung

Der Vermessungsingenieur von heute verfügt i. Allg. über eine reflektorlos messende Totalstation, eine gute Amateur-Digitalkamera und ein Notebook. Damit hat er das Rüstzeug, Phototachymetrie zu betreiben. Diese umfasst die Aufnahme der Bauwerksgeometrie und die Visualisierung durch enge Verknüpfung und Wechselwirkung zwischen Foto und tachymetrischer Messung. Da dies einfach, preiswert und schnell durchzuführen ist, bietet sich hiermit eine Alternative zum immer noch sehr teuren und bezüglich der Auswertung aufwändigen Laserscannen. Überspitzt könnte man auch sagen: „Machen Sie Ihre Digitalkamera zum Gefährten Ihres Tachymeters“.

## 1. Motivation

Zwei Geräte spielen derzeit im Vermessungswesen eine hervorragende Rolle: Auf der einen Seite das universell einsetzbare Tachymeter zur Aufnahme und Absteckung und auf der anderen Seite der Satellitenempfänger, der teils in ähnlicher Funktion, aber eher großräumig eingesetzt wird und nicht bei der dreidimensionalen Erfassung im Zuge von Baudokumentation und Architekturaufnahme zum Einsatz kommt. Offenbar liegt in der individuellen Ausgestaltung des prinzipiell äußerst einfachen, flexiblen, polaren Tachymeters und der unterschiedlichen Kombination mit anderen Features seine unverminderte Stärke. Zahlreich sind die speziellen Weiterentwicklungen und entsprechenden Gerätebezeichnungen: Robottachymeter, zielverfolgendes Tachymeter, reflektorlos messende Totalstation, motorisiertes Tachymeter, inzwischen kommerziell auch das Tachymeter mit integrierter Satellitenempfangsantenne und im Hochgenauigkeitsbereich der Lasertracker. Bei genauerem Hinsehen erkennt man, dass die unmittelbare Dreidimensionalität der Methode einerseits und die Punktorientierung der Tachymetrie andererseits Grund für die Erfolgsgeschichte sind: Der Nutzer sucht den Punkt, der ihn wirklich interessiert, vor Ort auf (automatisch beispielsweise bei der Robottachymetrie und der Zielverfolgung), während die anderen in der Baudokumentation eingesetzten Methoden - Photogrammetrie oder Laserscannen - nicht sofort reagieren: Hier ist zuerst ein Auswerteprozess vor der unmittelbaren Punktnutzung erforderlich. Auch hat man bei beiden Methoden von Haus aus nur die eine Seite der Medaille: die Aufnahme. Die Tachymetrie bedient beide, Aufnahme **und** Absteckung. Diese universellen Fähigkeiten nutzt die intelligente Tachymetrie, d.h. die Tachymetrie mit rechnergesteuertem, motorisch betriebenen, reflektorlos messendem Tachymeter ganz konsequent. In der Interaktion zwischen Objekt und Messgerät geht sie soweit, dass das Objekt das Gerät steuert (SCHERER, 2004a). Auch dieser neuere Gerätetyp, das reflektorlos messende Tachymeter, hat in den letzten Jahren eine beträchtliche Erweiterung erfahren (s. Abb. 1).

1968	erste Totalstation, d.h. elektronisches Tachymeter mit Messung zum Reflektor und Datenregistrierung: Zeiss RegElta 14
1993	erste Totalstation zur reflektorlosen Messung: Zeiss RegElta RL
1995	Prototyp der ersten reflektorlos messenden, rechnergesteuerten motorisierten „intelligenten“ Totalstation: Ruhr-Universität Bochum
1999 2001	erste kommerzielle intelligente Totalstation: Leica TCRM erstes entsprechendes Gerät der Firma Zeiss/Trimble
2000	Phototachymetrie mit externer Kamera: Ruhr-Universität Bochum
2001	Prototyp der ersten Video-Totalstation (im Fernrohrtube integrierte Kameras): Ruhr-Universität Bochum
2003	Umrüstung einer Totalstation für hochauflösendes Scannen mit kleinem Spot: Ruhr-Universität Bochum
2004	erste kommerzielle Video-Totalstation: Firma TOPCON

**Abbildung 1: Entwicklung der reflektorlosen tachymetrischen Messverfahren**

Im vorliegenden Artikel wird die Intelligente Tachymetrie nur gestreift, dagegen steht die Beziehung zwischen der Totalstation und einem Bild des Objektes, aufgenommen mit einer einfachen, d. h. nicht photogrammetrischen Digitalkamera, im Vordergrund. Bei dieser als Phototachymetrie bezeichneten Vorgehensweise kommt nur ein kleiner Ausschnitt aus der terrestrischen photogrammetrischen Bildnutzung zum Tragen. Die Phototachymetrie beruht auf einer engen Wechselwirkung vom Foto des Objektes und punktwiser, dreidimensionaler Objektaufnahme mit der berührungslos messenden Totalstation, verbunden über die auf dem Notebook installierte Steuer- und Bearbeitungssoftware. Es wird ein durchgehender Datenfluss vom Bauwerk über die Aufnahme zum dreidimensionalen geometrisch-visuellen Abbild hergestellt. Phototachymetrie erfolgt vor Ort und ist unmittelbar überprüfbar.

Da das Tachymeter weit verbreitet ist, galt es, seine Universalität zu erhöhen. Die Möglichkeiten zur Nutzung der in den Messprozess eingebundenen Fotos sind bis heute kaum bekannt, geschweige denn in angemessener Weise eingesetzt. Im Rahmen dieses Artikels können nur exemplarische Beispiele aufgezeigt und Anregungen für den Einsatz der Phototachymetrie gegeben werden. Diese wurde an der Ruhr-Universität Bochum entwickelt (s.u.). Es ist aber nicht allein die breite Verfügbarkeit des Instrumentariums Totalstation plus Digitalkamera maßgebend dafür, dass man Neues ausprobieren sollte. In Zeiten knapper Aufträge müssen wir uns Nischen zuwenden, z.B. den Mehrwert einer Visualisierung ausspielen, zumal diese sozusagen ein Nebenprodukt der einfachen Methodik zur Bestimmung der Geometrie sein kann.

Über Funktionsweise und Vorteile der intelligenten Tachymetrie, intelligentes Scannen und Videotachymetrie wurde schon mehrfach berichtet, wobei die Schwerpunkte unterschiedlich gelegt und neuere Veröffentlichungen den Fortschritten auf diesen Gebieten angepasst wurden (SCHERER, 2005; JURETZKO, SCHERER, 2000). Hier wird fokussiert auf die Erweiterung des Spektrums der Arbeitsmöglichkeiten des Vermessungsingenieurs durch konsequente Nutzung des allseits verfügbaren Instrumentariums eines modernen Vermessungsbüros.

Man benötigt

- keine zusätzlichen teuren Auswertprogramme,
- keine aufwändige photogrammetrische Ausrüstung,
- keine besonderen photogrammetrischen Kenntnisse.
- Die Geometrie erhält man auf einfache Weise und gewinnt eventuell ein texturiertes

3D Modell.

- Das modular aufgebaute Instrumentarium passt sich den Erfordernissen der Baudokumentation und der Aufnahme zum Bauen im Bestand vorzüglich an.

## 2. Phototachymetrie – eine einfache Erweiterung der reflektorlosen Tachymetrie

Phototachymetrie mit Digitalkamera und reflektorlos messender (möglichst, aber nicht zwingend) motorisierter Totalstation funktioniert auf der Grundlage der konsequenten Interaktion zwischen dem aufzunehmenden Objekt (Außenmauern des Gebäudes, Fassade, Innenräume), der Totalstation und der Digitalkamera. Abbildung 2 zeigt schematisch den Weg vom Objekt zum Ergebnis.

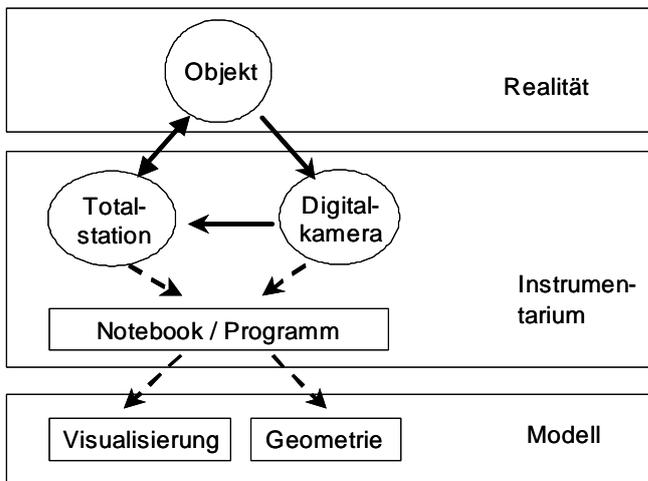


Abbildung 2: Vom Objekt zum Produkt

Die Pfeile deuten die im Folgenden detailliert dargestellten Abläufe bei der Erfassung des realen Objektes und bei seiner Abbildung an. Die Verbindung von Bauwerk, Totalstation und Kamera, d.h. von Tachymetrie und von Elementen der Photogrammetrie ist so eng, dass es angebracht erschien, den Begriff der Phototachymetrie zu prägen. Dabei ist die Vorgehensweise an sich sehr einfach. Sie soll nun – quasi in Form eines Kochrezeptes – an einem Beispiel demonstriert werden. Wegen der enormen Flexibilität des Verfahrens kann die hier dargestellte Vorgehensweise nur exemplarisch gelten. Der Nutzer der Phototachymetrie wird merken, dass eine evtl. modifizierte Vorgehensweise seinen persönlichen Bedürfnissen noch mehr entgegenkommen könnte.

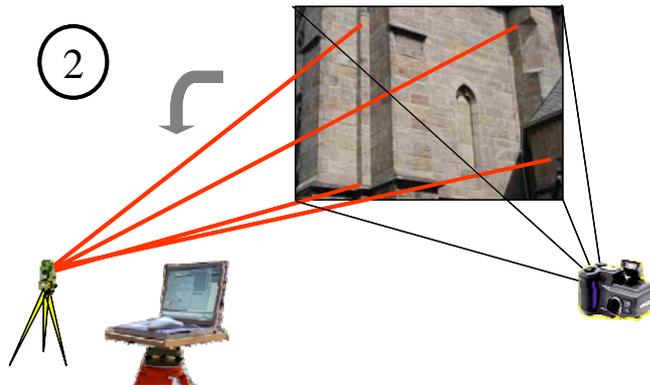
### 1. Schritt: Fotografieren des Objektes mit der Digitalkamera

Der Innenraum, die Fassade oder das Bauwerk als Ganzes wird mit Einzelbildern erfasst. Diese müssen sich nicht, wie man es aus der Photogrammetrie als Voraussetzung zur Bündelblockausgleichung kennt, stark überdecken. Es muss nicht auf auswertbare Bildpaare bzw. -verbände geachtet werden, sondern es müssen lediglich alle Oberflächen einmal im Bild festgehalten werden. Die Bilder werden in das Notebook übertragen.

**Ergebnis:** ein Satz von Bildern des Objektes (Eine andere Vorgehensweise wäre es, die Bilder nicht im Vorhinein alle aufzunehmen, sondern so, wie man sie während des Arbeitsfortschrittes gerade benötigt.)

## 2. Schritt: Parametrische Orientierung (s. Abb. 3)

Die Totalstation – eingebunden in das Objektkoordinatensystem - wird so aufgestellt, dass man einen guten Überblick vom Bauwerk hat. Ein erstes Foto wird auf den Bildschirm des Notebooks geladen. Die folgende Interaktion zwischen Foto und Tachymeter dient der Ermittlung des Kamerastandpunktes und der Aufnahmerichtung der Kamera, also der Bestimmung der äußeren Orientierung.

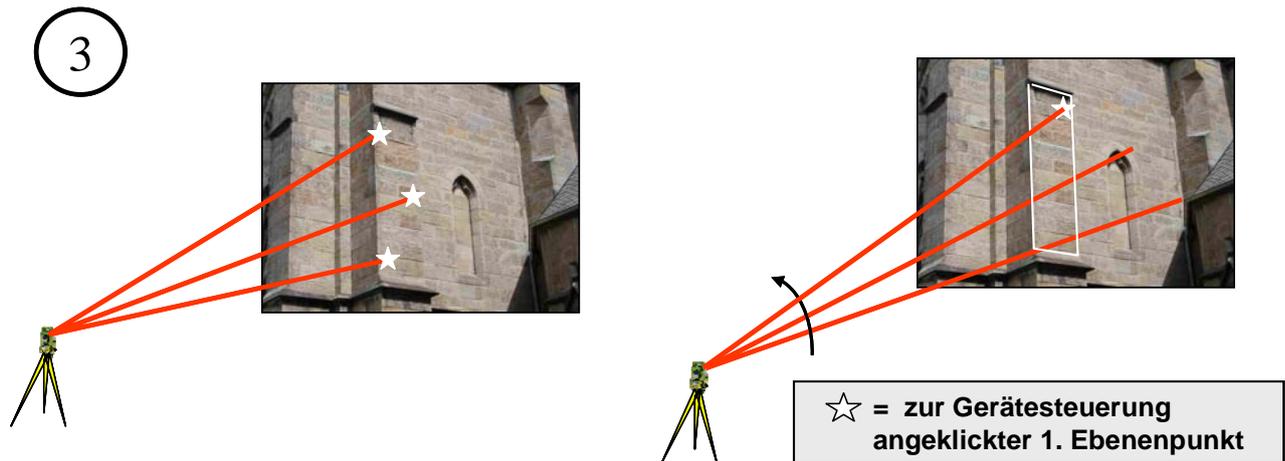


**Abbildung. 3: Parametrische Orientierung, d.h. Bestimmung der äußeren Orientierung des Bildes durch Verknüpfung von Bildkoordinaten mit dreidimensionalen Bauwerkskoordinaten**

Vier oder mehr Punkte am Objekt, die im Bild gut identifiziert werden können, werden Zug um Zug mit dem Tachymeter vermessen und die entsprechenden Bildpunkte werden angeklickt. Automatisch erfolgt anschließend die äußere, man sagt auch die parametrische Orientierung des Bildes. Diese Daten bleiben für spätere Anwendungen mit dem Bild verknüpft. Dieses ist so fest mit dem Objektkoordinatensystem verbunden und kann auf vielfältige Art und Weise genutzt werden, ohne dass sich der Nutzer hierzu weitere Gedanken machen muss.

## 3. Schritt: Bestimmung von ebenen oder von regelmäßig gekrümmten Objektoberflächen

Abbildung 4 zeigt ein einfaches Beispiel, wie vorgegangen werden kann. Man sucht sich eine offensichtlich ebene Bauwerksfläche aus. Eine Ebene wird bestimmt durch drei Punkte. Zur Ermittlung der Ebenenparameter im Bauwerkskoordinatensystem sind also drei Punkte, die nicht in einer Linie liegen, mit dem distanzmessenden Laserfleck des Tachymeters anzuzielen und deren Koordinaten sind zu bestimmen. Im Programm werden automatisch die beschreibenden Parameter ermittelt (vgl. Abb. 4 links).



**Abbildung. 4: Bestimmung einer „Ebene“ über drei Punkte; links: über manuelle Ausrichtung der Totalstation, rechts: über Klick ins Bild mit nachfolgender automatischer Steuerung des Messstrahls**

Dieser Vorgang lässt sich mit dem motorisierten Tachymeter auf elegantere Art durchführen (Abb. 4 rechts): Man richtet nicht das Fernrohr zum Bauwerk aus, sondern arbeitet mit dem Bild des Objektes auf dem Bildschirm des Notebooks. Mit dem Cursor werden die drei Ebenenpunkte nacheinander angeklickt, und die interne Steuerung sorgt dafür, dass automatisch der Laserstrahl zu den entsprechenden drei Punkten am Objekt geführt wird. Das heißt, wo auch immer die letzte Messung mit dem Tachymeter zum Objekt geschah: Der Laserstrahl wird automatisch nacheinander zu den drei die Ebene bestimmenden Punkten geführt. Die gesamte Messung läuft also ab, ohne dass das Tachymeter berührt werden muss. In der Abbildung ist dieser Ablauf der Lenkung des Laserstrahls vom Ausgangspunkt zum ersten Ebenenpunkt schematisch dargestellt. Die Ebenenbestimmung erfolgt so äußerst zeitextensiv.

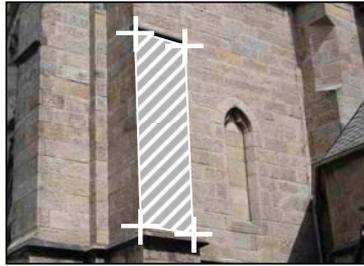
**Ergebnis:** Die Parameter zur Beschreibung einer Objektoberfläche wurden bestimmt.

#### **4. Schritt:** Ermittlung der Koordinaten der Flächenecken und Ausschneiden von Bildausschnitten für eine Visualisierung

Auch dieser Arbeitsschritt spielt sich alleine am Notebook ab: Mit dem Cursor wird die Objektoberfläche, von der bisher nur die Ebenengleichung bekannt ist, durch Anklicken der Ecken (z.B. im Uhrzeigersinn) umgrenzt. Die Erzeugung dieses in Abbildung 5 dargestellten Polygons liefert

1. die dreidimensionalen Koordinaten der Eckbegrenzungspunkte und
2. die Umgrenzung des Bildausschnittes, die als Textur für die Visualisierung verwandt werden kann.

4



⊕ = Klick ins Bild zur Bestimmung von Koordinaten und zum Ausschneiden von Textur

#### **Abbildung 5: Ermittlung der Geometrie und Vorbereitung der Visualisierung ausschließlich am Notebook**

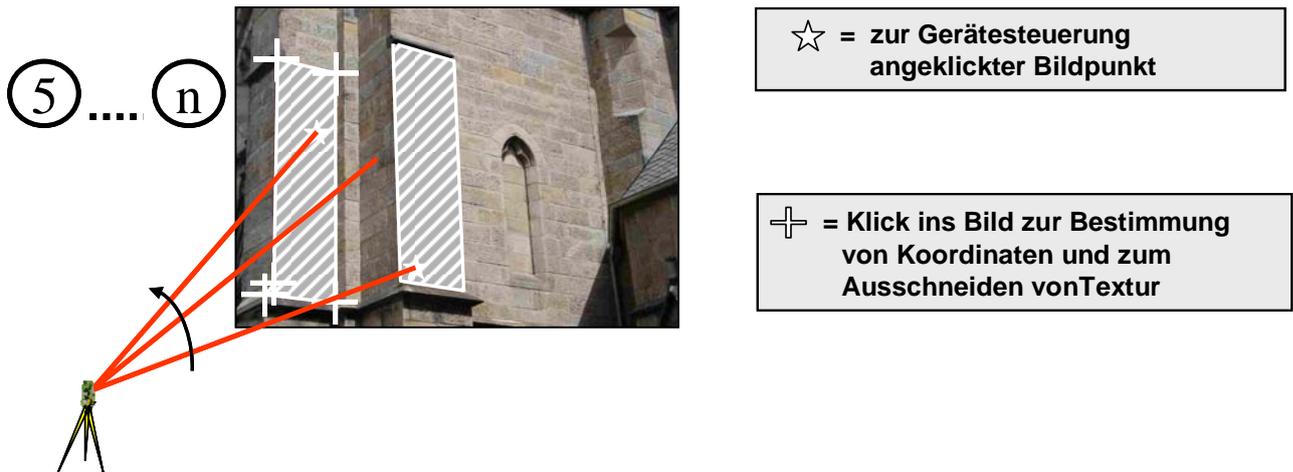
Die Berechnung der Koordinaten geschieht programmintern auf der Grundlage der in Schritt 2 behandelten parametrischen Orientierung, also der Einbindung des Bildes in das Bauwerkssystem. Da Standpunkt und Ausrichtung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme des aktuellen Bildes bekannt sind, können nun die räumlichen Richtungen von Bestimmungsstrahlen, die von diesem Standpunkt aus zu beliebigen Objektpunkten verlaufen, berechnet werden, nachdem sie im Bild mit dem Mauszeiger ausgewählt sind. Die Bestimmungsstrahlen werden mit der zuvor bestimmten Ebene geschnitten. Man erhält also dreidimensionale Bauwerkskoordinaten. Bei dieser äußerst einfachen Bestimmung der Geometrie muss das Tachymeter nicht bewegt werden. Probleme beim Anmessen von Gebäudeecken und -kanten, zu deren exakter Bestimmung die intelligente Tachymetrie über entsprechende Tools verfügt (SCHERER, 2004b), treten evtl. erst gar nicht auf.

**Ergebnis:** 3D-Koordinaten der Flächeneckpunkte und Textur für die Visualisierung (3D-Modell oder Orthophoto).

#### **5. ...n. Schritt: Fortgang der Arbeiten**

Weitere Flächen und Koordinaten können bei einem Bauwerk, das, wie vielfach, aus parallelen und zueinander senkrechten Ebenen aufgebaut ist, auf einfache Art und Weise bestimmt werden.

Wenn man die Aufnahme so anlegt, dass die im Schritt 3 bestimmte Ebene für ganze Bauwerksbereiche repräsentativ ist, so genügt es, weitere parallele oder rechtwinklige Ebenen mit einem Minimum an Messaufwand zu bestimmen. Beispielsweise ist eine Parallelebene durch eine einzige tachymetrische Messung zu definieren. Hierzu braucht man nur im Bild auf irgendeinen Punkt dieser Parallelebene zu klicken, das intelligente Tachymeter steuert sich wieder automatisch dort hin, die Punktkoordinate wird gemessen und aus der Kenntnis der vorliegenden Ebenendaten und dem Abstand des neu ermittelten Punktes zur alten Ebene wird die neue „abgeleitete“ Ebene berechnet.



**Abbildung 6: Steuerung des Messstrahls nach Klick auf eine Parallelebene und nachfolgende Geometrie- und Ausschnittbestimmung am Notebook**

In dieser Parallelebene läuft die Flächenbestimmung durch Anklicken und Begrenzen des neuen Polygons auf die gleiche Art und Weise ab wie in Schritt 4, nämlich durch Anklicken der Begrenzungspunkte. Ähnlich sparsam ist der Messaufwand, wenn nicht parallele sondern zur Ebene rechtwinklige Flächen ermittelt werden.

Da alle Punkte des rasch wachsenden Datensatzes im Notebook verwaltet werden, ist sofort zu erkennen, ob Punkte bereits bestimmt wurden, sei es direkt tachymetrisch, indirekt durch Klicken ins Bild (also mit Hilfe der parametrischen Orientierung und Schnitt von Gerade und Ebene) oder aber durch andere hier nicht erwähnte Tools zur Realisierung der Intelligenten Tachymetrie.

So ist unter Ausnutzung von bereits vorhandenen Punkten das gesamte Bauwerk schnell und redundanzlos zu modellieren. Die Schritte 1 und 2, die einzigen, bei denen das Tachymeter manuell ausgerichtet werden muss, (Aufnahme und parametrische Orientierung) fallen bei einem Projekt pro Bild nur ein einziges Mal an.

Wenn man sich mit dem Verfahren auseinandersetzt, erkennt man, dass es eine große Vielfalt von Möglichkeiten für Beschleunigung und rationelle Arbeitsweise gibt, d.h. dass wenig Aufwand schnell zu brauchbaren Ergebnissen führen kann. Die bisher nicht realisierte Erweiterung des Programms von der Arbeit mit Ebenen auf die Einbindung von Zylindern, Kegel- und Kugelflächen steht noch aus.

Die Phototachymetrie funktioniert auch mit konventionellen, also nicht über das Notebook motorisch gesteuerten Tachymetern. Dann entfällt allerdings die häufig einzusetzende zeitsparende Steuerung über das Bild, und der Messfleck muss manuell auf den jeweiligen Objektpunkt eingestellt werden.

### 3. Qualität und Qualitätsprüfung

Bei Messverfahren hat man stets die Fragen zu beantworten: Wie ist die Fehleranfälligkeit, wie die Qualität des Ergebnisses, reicht das Instrumentarium für den angestrebten Zweck aus, kann man die Ergebnisse im Felde kontrollieren?

Einige der genauigkeitsrelevanten Aspekte werden im Folgenden behandelt. Es ist

voraus zu schicken, dass man eine ausgezeichnete Qualitätskontrolle stets selbst durchführen kann, mit dem motorisierten Tachymeter quasi automatisch. Kritisch sind die Koordinaten, die über die Bildnutzung, also durch Pixelauswahl im Bild gemäß Schritt 4 mit nachfolgender interner Schnittbildung des Strahls vom Kamerastandpunkt mit der Ebene ermittelt werden. Ungenauigkeiten, sowohl bei der Bestimmung des Standpunktes und der Ausrichtung – also der äußeren, der parametrischen Orientierung – als auch Einflüsse der inneren Orientierung, wie Bestimmung von Brennweite, Bildhauptpunkt und Verzeichnung des Objektivs fließen ebenso ein wie Unsicherheiten bei der Definition der Ebene.

Natürlich gilt auch hier: Je besser die Kamera (Stabilität der inneren Orientierung, Fehler des Objektivs, Auflösung), desto genauer werden die Koordinaten der Punkte ermittelt. Eine Kontrolle der über den Klick ins Bild bestimmten Koordinaten ist jederzeit durch eine Messung zum entsprechenden Objektpunkt mit dem Tachymeter unmittelbar gegeben. Denn es müssen für einen Punkt des Objektes die Koordinaten, die durch Nutzung des Bildes bestimmt sind, im Rahmen der erforderlichen Messgenauigkeit mit denen übereinstimmen, die man mit dem Tachymeter direkt messen kann. Somit ist eine durchgreifende Kontrolle des gesamten Prozesses der Kameraeinbindung möglich.

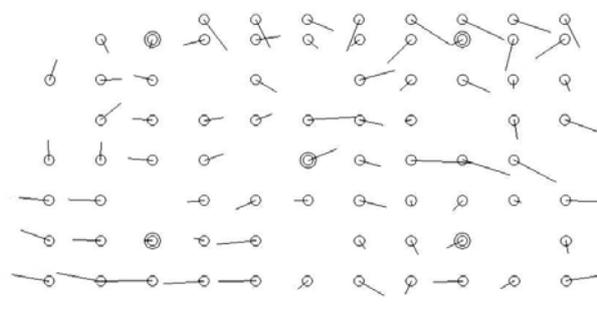
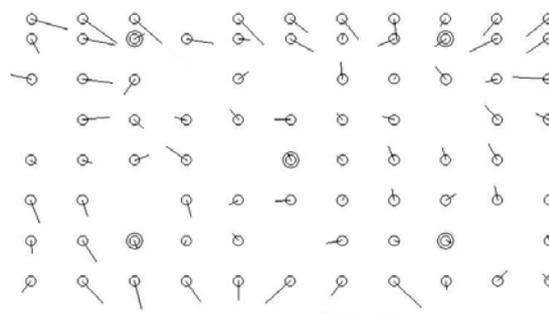
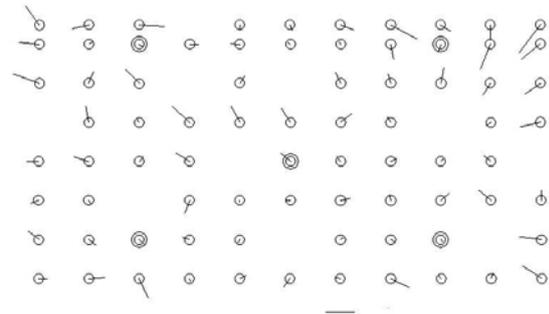
Eine weitgehend automatische Kontrolle funktioniert folgendermaßen: Nach dem Klick ins Bild werden dreidimensionale (Eck)koordinaten bestimmt. Das Programm berechnet die zugehörigen polaren Einstelldaten für die Totalstation, und automatisch richtet sich die Totalstation zu diesem Punkt. Der Nutzer am Notebook kann sofort kontrollieren, inwieweit der Laserfleck am realen Ziel von dem Objektpunkt abliegt, der im Bild angeklickt wurde.

Erste Voraussetzung für ein zufrieden stellendes Ergebnis ist eine gute Bestimmung der inneren Orientierung der Aufnahmekamera. Eine stabile innere Orientierung ist generell nur von Kameras mit Objektiven fester Brennweite zu erwarten. Benutzt man eine Kamera mit Vario-Objektiv, so ist dafür zu sorgen, dass die Vergrößerungseinstellung reproduzierbar ist (Anschlag in Weitwinkel- bzw. Telestellung). Stehen keine photogrammetrischen Hilfsmittel zur Kalibrierung (dreidimensionales Testfeld, entsprechendes Auswerte-Programm) zur Verfügung, wird zur Bestimmung der inneren Orientierung über ein Programm (z.B. PhotoModeler) in der Regel eine zweidimensionale Testtafel aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen. Die Ergebnisse der Kalibrierung mit derartigen Programmen müssen professioneller Kalibrierung nicht nachstehen (WIGGENHAGEN, 2002). Die Kalibrierdaten werden im Programm bei der parametrischen Orientierung automatisch berücksichtigt.

Die Berechnung von Eckengeometrie nach Klicken ins Bild anstelle der Messung mit dem Tachymeter hat zwar den Nachteil, dass Ungenauigkeiten im Prozess der Bildnutzung die Geometrie beeinflussen und das Ergebnis verfälschen können, andererseits ist aber die exakte Zuordnung der Bildausschnitte zur Geometrie durch den Vorgang der Koordinatenberechnung und Texturbeschneidung, die in einem Arbeitsgang ablaufen, gewährleistet. Wenn also die Visualisierung im Vordergrund steht, ist selbst bei qualitativ schlechterer Kamera dieser Verknüpfung der Vorzug zu geben. Auch die Aufnahmeanordnung kann in gewissem Umfang die Koordinatengenauigkeit beeinflussen; bessere Ergebnisse liefern Aufnahmen möglichst normal zu den Hauptebenen des Bauwerks. Schrägaufnahmen führen zu

stärker schleifendem Schnitt des koordinatenbestimmenden Strahls mit der Objektebene, also zu größeren Koordinatenverschiebungen innerhalb der Schnittfläche. Ist man unsicher, ob die gewählte Objektebene ausreichend plan ist, kann die Bildung von Teilflächen ratsam sein (auch z.B. Dreiecksbildung). Auch die Punkte zur Bestimmung der Ebene lassen sich entsprechend auswählen (s.u.). Auf die Vielfalt der Möglichkeiten zur Verbesserung der Kantenbestimmung kann hier nicht eingegangen werden (SCHERER, 2005)

Zur praxisnahen Untersuchung der Genauigkeit wurde ein Testfeld mit ca. 80 Punkten auf einer ebenen Wandfläche unter verschiedenen Einfallswinkeln mit einer (Amateur)kamera Nikon Coolpix 995 in Weitwinkelstellung fotografiert (Keramikwand von Victor Vasarely, ohne Titel, 1971). Es erfolgte die parametrische Orientierung (analog zu den Schritten 1 und 2) und die Berechnung der dreidimensionalen Koordinaten der Testpunkte durch Schnittbildung (s. Schritt 4). Die Differenzen zwischen den tachymetrisch ca.  $\pm 3\text{mm}$  genau bestimmten Punkten und den aus der Schnittbildung ermittelten sind bezogen auf die Ebene als Vektoren in den Abbildungen 7 a, b, c aufgetragen.



Fläche 4,50 m x 7,50 m ; je 5 Passpunkte:  $\odot$  , Maßstab der Vektoren: — = 1 cm

Aufnahmeabstand normal zur Wand ca. 15 m

**Abb. 7 a: Senkrechtaufnahme      b: Einfallswinkel ca. 80°      c: Aufnahmerichtung ca. 45°**  
Zur Berechnung der parametrischen Orientierung wurden vier Punkte in den Ecken

und ein zentraler Punkt heran gezogen. In diesen Passpunkten hat man erwartungsgemäß kleine Abweichungen. Auf Restfehler in der Orientierung deuten die zu den Bildrändern hin zunehmend gerichteten Vektoren wachsender Länge hin. Erkennbar ist auch der Einfluss der ungünstigeren geometrischen Konstellation mit zunehmender Schrägaufnahme - insbesondere als Folge von geringen Orientierungsdefiziten bei schleifenden Schnitten. Trotz der Restfehler ist bei dieser Gegenstands Entfernung aber offenbar eine Genauigkeit weitaus besser als ein Zentimeter zu erzielen. Dabei ist zu beachten, dass die Vektoren ja alle Abweichungen enthalten: die aus der Bildkoordinatenmessung, der Kamerakalibrierung, der parametrischen Orientierung und der tachymetrischen Passpunktbestimmung.

Ein besonders erwähnenswertes Hilfsmittel zur Qualitätskontrolle und zur Kontrolle von Richtigkeit und Vollständigkeit der Aufnahme bietet das dynamische visuelle Messungsprotokoll: Während die Objekterfassung abläuft, werden im Bild auf dem Notebook alle tachymetrisch gemessenen und die durch Pixelauswahl im Bild koordinatenmäßig bestimmten Punkte eingeblendet. Die Punktverbindungen aus der polygonalen Umfahrung können ebenfalls mit dargestellt werden (vgl. Abb. 5,6). So kann Zug um Zug ein visuelles Protokoll erstellt werden. Es ist besonders hilfreich, wenn nach Ausschöpfung des Bildinhaltes für Geometrieerfassung und Visualisierung ein neues, weiteres Bild des Objektes, aufgenommen gemäß Schritt 1, hinzugenommen wird. Nach parametrischer Orientierung dieses neuen Bildes lassen sich die Daten, die bereits ermittelt sind, auch diesem Bild direkt überlagern. So wird gleich kontrolliert, wie gut das neue Bild in den bestehenden Koordinatenrahmen passt.

Das folgende Beispiel soll den Stellenwert von intelligenter Steuerung und dynamischem visuellem Messprotokoll noch einmal besonders hervorheben: Ist zu befürchten, dass die berechnete Ebene nicht repräsentativ ist, so führt die vorstehend ausführlich und exemplarisch beschriebene Vorgehensweise – Schnitt Bildstrahl/Ebene – zu Punktverschiebungen innerhalb der Ebene, die umso größer sind, je mehr der Einfallsstrahl von der Normalen abweicht. Dennoch kann man – automationsunterstützt – ein richtiges Ergebnis erhalten: Nach Anklicken des Bildpunktes auf dem Notebook wird der Schnittpunkt Ebene/Strahl berechnet. Das intelligente Tachymeter steuert diesen wegen des Versatzes der Ebene virtuellen Punkt an und ermittelt in der anschließenden Messung eine davon abweichende reale Objektkoordinate. Der Abstand dieses gemessenen Punktes von der Rechenebene wird ermittelt und die Ebene parallel in den Punkt verschoben. Die Koordinaten des Schnittpunktes des Bildstrahls mit der verschobenen Ebene sind i. a. dann repräsentativ für den realen Punkt. - Auch in komplizierteren Fällen, (ungünstige Ecksituation) führen ähnliche Varianten unter Ausnutzung der vielfältigen Koordinatenredundanz (reale Messpunkte; virtuelle, aufgrund vom Klick ins Bild berechnete Punkte; Bildpunkte) schnell zum richtigen Ergebnis. Für den Benutzer gestaltet sich der vergleichsweise komplexe Vorgang also sehr einfach: Pixelauswahl mit dem Mauszeiger im Foto, gefolgt von unmittelbarer Kontrolle, ob die Abweichung tolerabel ist. - Gegebenenfalls wird eine weitere automatische Iteration nachgeschaltet, stets sichtbar in Ablauf und Ergebnis im Protokoll. Abschließend sei noch einmal betont, dass die Verifizierung der individuell erreichten Genauigkeit jederzeit möglich ist.

#### **4. Entwicklungsstand, Fazit, Ausblick**

## Entwicklungsstand

Eine reflektorlos messende Totalstation, eine gute Digitalkamera, Notebook und Programm reichen aus, um Phototachymetrie zu betreiben. Der Weg dorthin führte über die intelligente Tachymetrie und erwuchs aus praktischen Erfahrungen bei der Erfassung von Bauwerken zum Bauen im Bestand, für Renovierung, aus der Zusammenarbeit mit Denkmalpflege, Archäologie und Bauforschung. Konsequenterweise wurde im Programm TOTAL (Tachymetrische Objektorientierte TeilAutomatische Laservermessung, JURETZKO, 2005) die flexible Nutzung des reflektorlos messenden motorisierten Tachymeters durch Automation und Interaktion zwischen Bauwerk und Messinstrument verwirklicht. Dabei hat sich die Bildnutzung als äußerst hilfreich herauskristallisiert: das Bild in seiner Funktion zur Dokumentation bzw. Archivierung, zur Steuerung des Gerätes und als Textur zur Entzerrung, Orthophotobildung und zum Aufbau eines Modells.

Die Steuerung des intelligenten Tachymeters erfolgt im Programm TOTAL auf verschiedene Weise, nicht nur manuell oder im Regelkreis oder über das Bild, sondern auch über die grafische Darstellung der Geometrie am Notebook. Es zeigte sich in der weiteren Entwicklung, dass die Nutzer (insbesondere Architekten und Bauforscher) gerade das grafische Koordinatengerüst zur weiteren Bearbeitung der Bauaufnahme benötigen und dass die Nutzung im Allgemeinen unter dem Programmsystem AutoCad erfolgt. Daher wuchs der Entschluss, die Software zur intelligenten Tachymetrie und zur Phototachymetrie neu zu programmieren, so dass vor Ort Bearbeitung und Gerätesteuerung direkt unter AutoCad möglich sind. Derzeit wird das Programm neu erstellt.

## Fazit

Die Erfahrungen mit der hier dargestellten Nutzung der Tachymetrie innerhalb der Phototachymetrie bewiesen, dass die konsequente Bildnutzung eine äußerst rationelle Aufnahme ermöglicht. Erkennbar ist aber auch, dass das Potenzial noch nicht ausgeschöpft ist; die Effektivität lässt sich weiter steigern. Dies auszuloten, suchen wir die Zusammenarbeit mit potenziellen Anwendern. Die besonderen Stärken der Phototachymetrie zeigen sich im Vergleich zu Photogrammetrie und Laserscannen:

Vorteile gegenüber den beiden Verfahren:

- Die Kontrolle von Qualität (Genauigkeit, Vollständigkeit, Detaillierungsgrad) erfolgt unmittelbar im Zuge der Messung.
- Die Auswertung bis zum fertigen Ergebnis kann direkt vor Ort stattfinden.

Besondere Vorteile gegenüber der Photogrammetrie:

- Man benötigt nicht zwei Bilder, die sich überdecken und die von einer ausreichend langen Basis aufgenommen sein müssen.
- Photogrammetrische Erfassungen können im Allgemeinen nur vom Fachmann richtig gemacht werden.
- Man benötigt keine teure Auswertesoftware.

Besondere Vorteile gegenüber dem Laserscannen:

- Es entstehen keine Kosten für Hardware, wenn das universell verwendbare Tachymeter verfügbar ist.
- Kamera und Notebook sind im Allgemeinen vorhanden.
- Man benötigt keine teure Auswerte-Software.
- Gleichzeitig werden die Geometrie erfasst und eine Visualisierung durchgeführt.

## **Ausblick**

Die Phototachymetrie mit dem universell einsetzbaren Tachymeter im Zentrum sollte weiter Einzug in die Praxis halten. Sie bietet häufig nicht nur eine preiswerte Alternative zum Laserscannen, sondern auch ein äußerst rationell einzusetzendes Verfahren, gleichzeitig nutzbar zur Koordinatenbestimmung und besonders chancenreich hinsichtlich des wachsenden Bedarfs an Visualisierungen. Man kann sie in Verbindung zur Videotachymetrie sehen, einem verwandten Verfahren, dessen breite Nutzung derzeit jedoch noch nicht möglich ist.

Die Videotachymetrie arbeitet mit einer reflektorlos messenden Totalstation, in die Kameras eingebaut sind. Der Prototyp wurde von der Ruhr-Universität Bochum vorgestellt und praktisch erprobt (vgl. Abb. 1) (JURETZKO, 2005). Hat man die Kameras, z.B. Weitwinkel- und Okularkamera direkt im Tachymeter, so kommt man ohne externe Digitalkamera, wie hier beschrieben, aus. Es entfallen einige Arbeitsschritte, und es ist stets der Blick aus Sicht des Tachymeters auf dem Rechner verfügbar. Ein erstes kommerzielles derartiges Gerät wurde von der Firma TOPCON auf der Messe INTERGEO 2004 vorgestellt; die Funktionalitäten reichten aber noch nicht an die des erprobten Prototypen heran. Dennoch ist zu erwarten, dass in der Zukunft alle renommierten Hersteller von Totalstationen ihre Geräte optional mit Kameras ausrüsten werden, um die Vorteile der integrierten Bilderfassung zu nutzen. In der Videotachymetrie und der hier dargestellten Phototachymetrie dient das Bild

- zur Erfassung der Geometrie,
- zur Dokumentation bei herkömmlichen Vermessungs- und Ingenieurvermessungsaufgaben und als Beweismittel,
- als Hilfsmittel für Punktfestlegung und spätere Punktsuche,
- zur Archivierung - Hier ist zu unterscheiden zwischen eher weitwinkligen und Tele-Bildern, wobei die Bilder wie gezeigt mit zusätzlicher Grafik zur Punktmarkierung bzw. Bezeichnung von Punktzusammenhängen überlagert sein können,
- zur Gerätesteuerung - Feineinstellung ohne lästiges Visieren und Fokussieren, ohne Herumgehen um das Gerät, ohne Steilsicht-Okular und mit besonders sicherer Identifizierung bei Überlagerung mit Zusatzgrafik,
- zur Orthophoto-Bildung, für Entzerrung und Virtual-Reality.

Es ist zu hoffen, dass der eine oder andere Leser dieses Artikels den Mut aufbringt, die Phototachymetrie zu erproben. Wir stehen gerne helfend und beratend zur Seite.

## 5. Literaturverzeichnis

- Juretzko, M. & Scherer, M. (2000): Ein System zur hochgenauen polaren Fassadenvermessung, Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, München 2000, S. 400 - 405, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart
- Juretzko, M. (2005): Reflektorlose Video-Tachymetrie - ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation Ruhr-Universität Bochum; DGK Reihe C, Heft-Nr. 588, München, 126 S.
- Scherer, M. (2004a): How to optimize the recording of geometrical data and image data for the purpose of architectural surveying. XX<sup>th</sup> ISPRS Congress Istanbul, Turkey, 12.-23. July 2004, CD-ROM
- Scherer, M. (2004b): Intelligentes Tachymeter und Digitalkamera: Low-Cost aber High-Tech. Zeitschrift Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 2004, S. 325-333
- Scherer, M. (2005): Präzise, schnell und kostengünstig: Visualisierung mit Digitalkamera und intelligentem Tachymeter. Von Handaufmaß bis High Tech II, Interdisziplinäres Kolloquium, 23. - 26. 02. 2005, Cottbus, im Druck
- Wiggenhagen M. (2002): Calibration of digital consumer cameras for photogrammetric applications, IntArchPhRS, Com.III, Graz, Vol.XXXIV 2002, Part 3b, pp 301-304

### **Anschrift des Verfassers:**

Prof. Dr.-Ing. Michael Scherer  
Ruhr-Universität Bochum  
Arbeitsgruppe Geodäsie  
Universitätsstrasse 150; IA 4/49  
44780 Bochum  
GERMANY  
Tel. +49 (0)234 32-26070  
Fax +49 (0)234 32-14373  
Email: michael.scherer@rub.de  
Web site: [www.ruhr-uni-bochum.de/geodaesie](http://www.ruhr-uni-bochum.de/geodaesie)