

Entwicklung und Analyse eines Low-Cost-Systems für die Facility Management (FM)-Datenerfassung

Andreas Rietdorf, Sten Höpfner und Lothar Gründig

Zusammenfassung

Die Erfassung der Geometrie von Innenräumen in Gebäuden (Liegenschaften) ist die Grundlage für den Aufbau eines Facility Management - Systems.

Vorgelegt wird in diesem Beitrag die Entwicklung eines preisgünstigen, schnellen und automatisch arbeitenden Meßsystems auf Grundlage eines schrittmotorengesteuerten Laserentfernungsmessers. Unter Verwendung eines mobilen Computers oder Laptops und eines Steuerungsprogramms lassen sich so in kurzer Zeit Punktwolken von aufzumessenden Objekten generieren. Genauigkeitsbetrachtungen zum entwickelten Meßsystem werden vorgestellt und die anschließende Aufbereitung und on-line Auswertung sowie die daraus abgeleitete strukturierte Geometrieerfassung mit Mitteln der Ausgleichsrechnung werden erläutert.

Summary

Acquisition of geometrical data are fundamentals for building up and introducing of a Facility-Management-System (FM or CAFMS). This paper deals with the development of a self-controlled and low-priced measuring system built on the basis of standard components, like stepping motors and hand-held distance meter. An overview of the accuracy is given and the determination of structured object qualities with the assistance of adjustment techniques are outlined.

Key words

Datenerfassung, Ebenenausgleichung, Einzelpunktbestimmung, Lasertachymeter, Scannen, Schrittmotoren

1 Motivation

„ Facility Management ist die Betrachtung, Analyse und Optimierung aller kostenrelevanten Vorgänge rund um ein Gebäude oder bauliches Objekt...“ [Nävy, 1998].

Diese Definition des Facility Managements zeigt unter geodätischen Gesichtspunkten, dass die Geometrieinformationen den Rahmen bilden, auf den alle Sachinformationen referenziert werden. Das Gebäudeaufmaß ist die strukturelle Grundlage der Datenverwaltung im Facility Management. Der Bedarf an Bestandserfassungen von Gebäuden für Sanierung, Facility Management oder Denkmalpflege wächst beständig und bietet ein weites Betätigungsfeld für den Berufsstand des Geodäten.

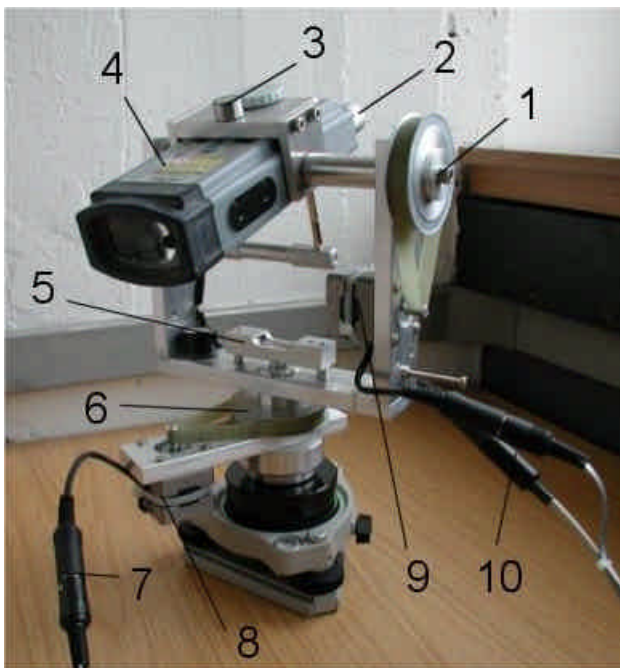
Beim Aufbau eines CAFMS (computergestütztes Facility-Management-System) stehen in den allerwenigsten Fällen Geometrieinformationen über Liegenschaften bereit. Die zur Verfügung stehenden vermessungstechnischen Methoden für die notwendigen Bestandsaufnahmen der Geometriedaten reichen vom Scannen analoger Vorlagen, über die einfache Zollstockmessung, die Tachymeteraufnahme und photogrammetrische Auswertung bis zum Einsatz hochgenauer Laserscanner, die zusätzlich zur photoähnlichen Abbildung der gescannten Oberfläche Geometriedaten im Millimeterbereich liefern. Diese Messsysteme ermöglichen in einer kurzen Zeit das komplette Aufmaß von komplexen Innenräumen mit einer sehr hohen Datendichte. Diese technischen Möglichkeiten gehen jedoch über die Anforderungen eines Facility Managements hinaus.

Die für die Ingenieurvermessung von mehreren Firmen entwickelten reflektorlosen Tachymeter, z.B. Leica TPS System 1100 - Professional Series, liefern wie die sehr teuren Laserscannermesssysteme die Funktionalität, sind aber auch in Bezug auf die Kosten für diese Aufgabe überdimensioniert. Eben dieser Aufwand hält viele potentielle Nutzer davon ab, ein CAFMS zu etablieren [Gründig et al, 2000].

Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Entwicklung ist es, ein einfach zu bedienendes, preiswertes (Kosten max. € 1500,-) und schnell messendes System zu entwickeln, mit dem eine Gebäudeinnenaufmessung durchführbar und durch eine nachfolgende Bearbeitung der gewonnenen Messwerte die Lieferung von strukturierten Geometrieinformationen möglich ist.

2 Meßsystem

2.1. Hardware



Aufbau:

- 1 Zahnriemengetriebe Vertikalkreis
- 2 Ausgleichsgewichte
- 3 Dosenlibelle
- 4 Handlaser Disto Pro (LEICA)
- 5 Röhrenlibelle
- 6 Zahnriemengetriebe
Horizontalkreis
- 7 Verbindungskabel Schrittmotor
- 8 Schrittmotor Horizontaltrieb
- 9 Schrittmotor Vertikaltrieb
- 10 Verbindungskabel der Schrittmotoren und des Lasers

Abb. 1: Aufbau Lasertachymeter

Der Aufbau des hier vorgestellten Meßsystems ist eine Weiterentwicklung und Modifizierung des am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin entstandenen schrittmotorengesteuerten Laserentfernungsmessers (SLEG) [Krüger, 1999], jedoch wurde eine vollständige Neukonstruktion auf Grundlage von zwei Schrittmotoren durchgeführt. Dabei gelang es, eine einfache und wirtschaftliche Lösung für einen Lasertachymeter zu entwickeln, wie es aus Abb. 1 ersichtlich ist.

Als Material für den Stützkörper wurde Aluminium gewählt, da es korrosionsarm und zudem sehr leicht ist. Für die Übersetzungen und Lagerung der Achsen wurden handelsübliche Bauelemente genutzt, d.h. die Vertikal- als auch die Kippachse sind in axialen Rillenkugellagern gelagert, die den reibungs- und spielarmen Lauf der zwei Achsen ermöglichen. Die Konstruktion und Endmontage erfolgte in der institutseigenen Werkstatt. Nachfolgend werden die Hauptkomponenten des Lasertachymeters näher erläutert.

Laserentfernungsmesser

Der nach dem Prinzip des Phasenvergleichs arbeitende Handentfernungsmesser Disto Pro der Firma LEICA GEOSYSTEMS GMBH erfüllt alle nötigen Anforderungen für die Verwendung im entwickelten Lasertachymeter. Die Messungen können bis 30 m Zielweite ohne Reflektor durchgeführt werden und haben laut Herstellerangaben eine Genauigkeit von 2 mm. Der an einem Messobjekt auftreffende Zielstrahl ist durch den Reflexionspunkt der Laserstrahlung gut sichtbar. Der DISTO Pro verfügt über ein robustes Gehäuse mit Photostativgewinde, wodurch er sich einfach fixieren lässt. Aufgrund der Transparenz der seriellen Schnittstelle und der Steuerungsbefehle ist es möglich, eine den jeweiligen Ansprüchen angepasste Gerätesteuerung zu entwickeln.

Schrittmotoren

Um das Meßsystem in der Horizontal- bzw. Vertikalebene zu drehen, wurden je ein Hybridschrittmotor der Firma RS ELECTRONICS vom Typ RS 191-8299 eingesetzt. Dieser Typ des Schrittmotors vereinigt die Vorzüge eines großen Dreh- und Rastmoments mit der Möglichkeit, kleine Schrittwinkel zu steuern.

Die Motoren arbeiten mit einer Betriebsspannung von 12 V und einer Stromstärke von 400 mA [RS Electronics, 1998]. Das Dreh- und Haltemoment der beiden Motoren beträgt 100 mNm. Ein Vollschritt führt zu einer Winkeländerung der Antriebsachse von 2 gon, ein Halbschritt dementsprechend zu einer minimalen Änderung von 1 gon. Die praktischen Tests zeigten, dass die Motoren im Halbschrittverfahren einen ruhigeren Lauf aufweisen.

Durch den Einsatz eines Zahnriemengetriebes an beiden Antriebsachsen mit einer Übersetzung von 1:10 können so kleinste Schrittweiten von 0,1 gon realisiert werden. Die innere Genauigkeit der Schrittmotoren wird von den Herstellern mit ca. 5 % angegeben. Der aus diesem Winkelfehler resultierende Lagefehler beträgt bei einer Zielweite von 20 Metern etwa 3 mm am Objekt.

Zur Steuerung der beiden Schrittmotoren kommt das Schrittmotoreninterface SMI der Firma ELV zum Einsatz. Das über die parallele Schnittstelle (Druckerport) eines PC oder Laptops ansprechbare Gerät ermöglicht die gleichzeitige Ansteuerung zweier Schrittmotoren. Das Interface hat eine variable Betriebsspannung von 7-20 Volt und kann Motoren mit einer Stromaufnahme von je maximal 750 mA betreiben. Die im Lasertachymeter verwendeten Schrittmotoren benötigen beide maximal je 400 mA und schöpfen somit die Leistungsfähigkeit des Interfaces nicht aus.

2.2. Software

Die Entwicklung der Steuerungssoftware für den Lasertachymeter und verschiedene Untersuchungen hinsichtlich der Gerätegenauigkeit erfolgten in einer Diplomarbeit am Fachgebiet Geodäsie und Ausgleichsrechnung der TU Berlin [Höpfner, 2000]. Die Software wurde unter *Borland Delphi 5.0* für Windows 95/98 bzw. Windows NT/2000¹ entwickelt und umfasst die Steuerung des Lasertachymeters sowie eine Aufbereitung und Vorauswertung der gespeicherten Messdaten.

¹ Unter den Betriebssystemen Windows NT und Windows 2000 muss ein spezieller Treiber installiert werden, der den direkten Zugriff auf die verschiedenen Ports ermöglicht, andernfalls werden die Zugriffe ohne Fehlermeldung und Erfolg abgefangen.

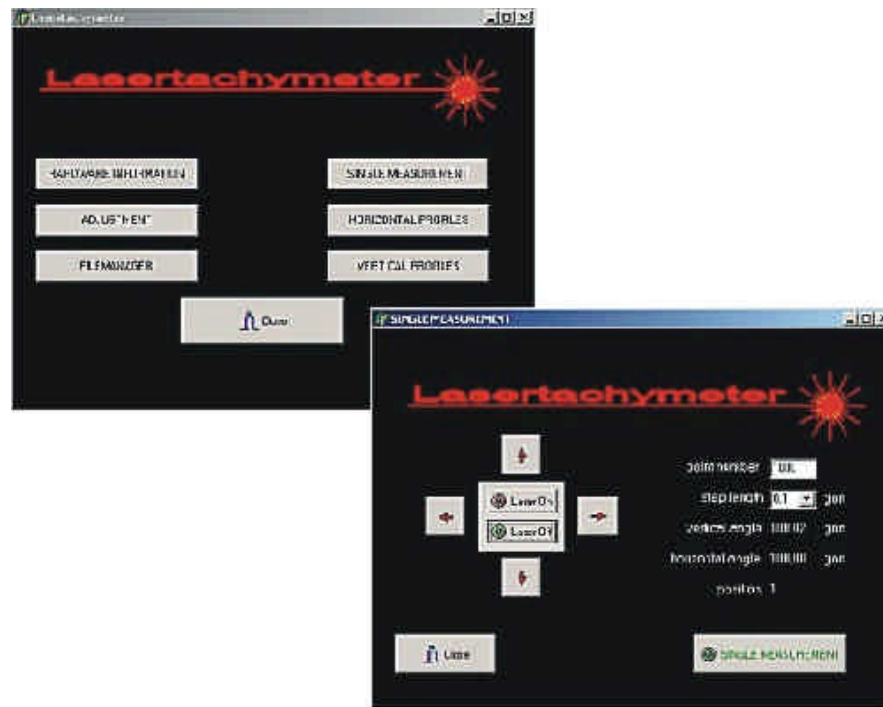


Abb. 2: Hauptmenü (oben), Justier- und Messmenü (unten)

Über verschiedene Unterprogramme, die zentral von einem Hauptprogramm aufgerufen werden, gelingt die komplette Steuerung des Messgerätes von einer Abfrage der Hardware über die Horizontierung des Lasers bis zur Messung von vertikalen oder horizontalen Profilen. Das „Scannen“ einer Oberfläche, z.B. die Begrenzungsebenen eines Raumes, ist durch Auswahl eines horizontalen bzw. vertikalen Rasters ebenfalls in der Software implementiert.

Die Horizontierung des Lasertachymeters erfolgt über eine Röhrenlibelle, die eine Genauigkeit von 30' besitzt. Der aufgesetzte Laserentfernungsmesser Disto Pro wird über die Software horizontiert, indem mittels Bewegen der Schrittmotoren die Dosenlibelle auf der Gehäuseoberseite eingespielt wird. Dabei sind die Schrittweiten frei wählbar, die kleinste mögliche Schrittweite beträgt 0,1 gon. Nach Abschluss der Horizontierung werden dem Lasertachymeter jeweils 100 gon für die Horizontal- und Vertikalrichtung vorgegeben und durch eine Auswahl des Messmodus (Einzelpunktbestimmung, Messung von horizontalen und vertikalen Profilen) gelingt eine schnelle und automatische Messung.

3 Genauigkeitsuntersuchungen und Bestimmung von Korrekturwerten

Um eine Angabe für die mit diesem System zu erreichende Messgenauigkeit zu erhalten, wurden unter Laborbedingungen verschiedene Messkonfigurationen verwirklicht. Unter Zuhilfenahme der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden die Gerätefehler des Lasertachymeters bestimmt. Für die systematischen Fehler können so Korrekturwerte berechnet werden, die gemessenen Richtungen und Strecken werden von der Software korrigiert.

3.1. Streckenmessgenauigkeit / Additionskonstante

Um die eingesetzten Schrittmotoren nicht zu überlasten, musste beim Bau des Lasertachymeters darauf geachtet werden, dass die Konstruktion möglichst leicht ist und sich bezüglich der zwei Drehachsen im Gleichgewicht befindet. Die dadurch entstehende Additionskonstante, die die Strecke zwischen dem Bezugspunkt des Entfernungsmessers und der Kippachse bezeichnet, kann durch die spezielle

Anordnung von Streckenmessungen mit dem Lasertachymeter bestimmt werden. Durch eine Analyse der Messungen in einer aus sieben Stativen bestehenden Eichstrecken-ähnlichen Anordnung (vermittelnde Ausgleichung), wurde im Messbereich von max. 30 Metern eine Additionskonstante von 133 mm mit einer Genauigkeit von ± 1 mm bestimmt.

3.2. Zentrierung und Horizontierung der Zielachse

Es wird in der Ebene, die durch die Steh- und Zielachse aufgespannt wird, die Exzentrizität bezüglich der Kippachse, die Abweichungen der horizontierten Zielachse (Ebene der Grundplatte) von der wahren Horizontalrichtung, sowie die Abweichung des Laserstrahls zur Ebene der Grundplatte ermittelt. Mit dieser Untersuchung soll die räumliche Lage der Zielachse zum Achsenkreuz des Lasertachymeter in der Vertikalen bestimmt werden.

Unter Zuhilfenahme eines Kompensatornivellierers, das die horizontale Bezugsebene realisiert, wurden auf mehreren Standpunkten der vertikale Abstand des Laserstrahlzentrums zur Horizontalebene des Nivelliers gemessen. Aus diesen Höhendifferenzen lässt sich die Neigung des Laserstrahls gegenüber der Horizontalebene berechnen. Als Ergebnis dieser Untersuchungen lässt sich festhalten, dass die Abweichung der horizontierten Grundplatte des Lasers zur Horizontalen 0,01 gon beträgt, Abhilfe schafft nur der Einsatz einer genaueren Libelle. Ebenfalls kann festgehalten werden, dass der Laserstrahl um 0,02 gon von der mittleren Bezugsebene, die durch die Grundplatte des Lasers realisiert ist, abweicht. Dieser ermittelte Korrekturwert muss bei jeder Messung entsprechend der Instrumentenlage rechnerisch berücksichtigt werden.

Die Exzentrizität zwischen der Ebene der horizontierten Grundplatte und der Kippachse kann bei einem bestimmten Wert von 0,3 mm hingegen vernachlässigt werden.

3.3. Zielstrahlzentrierung und Zielachsenfehler



Abb. 3: Exzentrizität

Der verwendete Entfernungsmesser ist so konstruiert, dass die horizontale Lage des abgesendeten Laserstrahls nicht mit der Längsachse des Disto Pro zusammenfällt. Die Laserstrahlachse ist seitlich versetzt und bildet einen Winkel mit der Längsachse des Gehäuses. Zur Überprüfung, welchen Einfluss dieser konstruktionsbedingte Fehler auf die Messungen hat, wurde eine lotrecht aufgestellte Zieltafel in beiden Lagen des Lasertachymeters angezielt und mit einer vorher bestimmten Sollrichtung verglichen. Durch Auswertung dieser einfachen Dreiecksbeziehungen lässt sich nachweisen, dass die Exzentrizität α des Lasertachymeters und

ihr Einfluss auf die Richtungsmessung so klein sind, dass sie für die Messwertkorrektur und weitere Fehlerbetrachtung nicht berücksichtigt werden müssen.

3.4. Kippachsenfehler

Durch die Korrelation des Kippachsenfehlers mit dem Zielachsenfehler, der mechanisch nicht beseitigt werden kann, und der großen Schrittweite des Lasertachymeters, ist die Bestimmung des Kippachsenfehlers sehr kompliziert. Die Anzielung eines Punktes in zwei Lagen ist aufgrund des minimalen Drehungswinkels von 0,1 gon nicht möglich. Der Winkelfehler kann nicht direkt gemessen werden und muss über Dreiecksbeziehungen berechnet werden. Grundlage der Berechnungen ist die Messung von mindestens zwei Richtungen (konstanter Vertikal- und Horizontalwinkel) in beiden Lagen des

Lasertachymeters an einer lotrechten Projektionsfläche, die durch ein Fadenlot geschaffen wurde. Durch Anhalten einer Zieltafel an diese Ebene konnte die lotrechte Projektionsfläche in jeder beliebigen Höhe realisiert werden. Zusätzlich wurde die Distanz zu diesen Auftreffpunkten mit dem Laserentfernungsmesser bestimmt. Durch Auflösen der Dreiecksbeziehungen gelingt es nun, den Einfluss des Zielachsenfehlers c rechnerisch zu beseitigen, und eine direkte Berechnung des Kippachsenfehlers i wird ermöglicht. Eine Messkonfiguration mit sechs unterschiedlichen Vertikalwinkeln ergab mit 0,22 gon einen repräsentativen Wert für den Kippachsenfehler i .

3.5. Getriebeispiel

Bei dieser Untersuchung wurde eine wohldefinierte Richtung mehrfach automatisch durch eine Vielzahl von Bewegungen des Lasertachymeters eingestellt. Es entstand eine Punktwolke, deren Ausdehnung in vertikaler und horizontaler Richtung gleich groß ist. Diese Messungen wurden in drei verschiedenen Zielweiten durchgeführt, wodurch eine verlässliche Aussage über den Öffnungswinkel des Fehlerkegels gemacht werden konnte. Anhand dieser Untersuchungen konnte der vom Hersteller angegebene Wert von 0,01 gon bestätigt werden, d.h. bei der verwendeten Übersetzung von 1:10 beträgt das Getriebeispiel ca. 5 % der kleinsten Schrittweite.

3.6. Zusammenstellung der Korrekturwerte für die Beobachtungen

Die **Horizontalrichtung** wird durch die Korrelation von Kipp- und Zielachsenfehler stark beeinflusst. Unter Umständen erfordert die Aufnahme eines Raumes sehr steile Visuren. In diesem Grenzbereich beeinflussen sich die beiden Fehler gegenseitig und haben einen sehr großen Einfluss auf die Winkelmessung. Um dieser Korrelation über den gesamten Messungsbereich Rechnung zu tragen, wurden die von *Stahlberg* entwickelten Formeln zum Einfluss $k_{c,i}$ beider Fehlergrößen auf die Winkelmessung herangezogen. Abgeleitet wurden diese Korrekturformeln aus der vektoriellen Betrachtung der beiden Fehlergrößen (Stahlberg, 1997):

$$k_{c,i} = \arctan \frac{\cos i \tan c}{\sin v_{\text{gem}}} + \frac{\sin i}{\tan v_{\text{gem}}} \quad (1)$$

Die **Vertikalrichtung** muss ebenfalls vom Einfluss des Kipp- und Zielachsenfehlers bereinigt werden (Stahlberg, 1997):

$$\cos v = \cos i \cos c \cos v_{\text{gem}} - \sin i \sin c \quad (2)$$

Der zu korrigierende Fehler entsteht durch den Einfluss des Zielachsenfehlers auf den Kippachsenfehler. Ergänzt werden muss die Gleichung (2) noch um den Korrekturterm φv , der die Abweichung des Laserstrahls von der Gerätehauptachse darstellt.

Die **Streckenmessung** wird nur um die Additionskonstante φs von 133 mm für den verwendeten Disto Pro korrigiert.

$$s = s_{\text{gem}} + \varphi s \quad (3)$$

Um eine Aussage über die Genauigkeit des entwickelten Lasertachymeters treffen zu können, werden im Folgenden die größten Fehlereinflüsse abgeschätzt. Der Einfluss des Motoren- und Getriebeispiels kann aufgrund der Untersuchungen mit $\pm 0,01$ gon abgeschätzt werden. Die fehlertheoretische Untersuchung der berechneten Korrekturwerte der Horizontal- und Vertikalrichtungen für den Kipp- und Zielachsenfehler nach obigen Gleichungen zeigte, dass bei einem Vertikalwinkel, der größer bzw. gleich 3 gon ist, alle Korrekturwerte mit einer Genauigkeit unter $\pm 0,05$ gon bestimmt werden. Der Einfluss der Stehachsenschiefe aufgrund ungenügender Horizontierung wurde mit einem Wert von $\pm 0,01$ gon geschätzt. Dieser Wert wurde bei der Untersuchung der Zielstrahlhorizontierung ermittelt und ist in Anbetracht der Verwendung von Libellen ein wahrscheinlicher Wert. Diese Stehachsen-

schiefe bewirkt bei einer Visur von 3 gon einen Vertikalwinkelfehler von $\pm 0,01$ gon und einen maximalen Horizontalwinkelfehler von $\pm 0,02$ gon.

Die Messung und Korrektur der Strecken ist dem Gerätefehler und dem Fehler der Additionskonstante unterworfen. Der Gerätefehler beträgt laut Herstellerangaben 2 mm. Die Messungen zeigten, dass unter normalen Bedingungen dieser Wert meist unterschritten wurde. Unter diesen Annahmen lassen sich für polar aufgemessene Punkte Genauigkeitsangaben ableiten. Die Tab. 1 enthält die maximalen Fehlereinflüsse in Abhängigkeit von der Zielweite.

Zielweite [m]	m_x [mm]	m_y [mm]	m_z [mm]	m_{xyz} [mm]
1	$\pm 1,4$	$\pm 1,4$	$\pm 1,9$	$\pm 2,8$
5	$\pm 4,4$	$\pm 4,4$	$\pm 4,3$	$\pm 7,6$
10	$\pm 8,5$	$\pm 8,5$	$\pm 8,0$	$\pm 14,4$
15	$\pm 12,6$	$\pm 12,6$	$\pm 11,8$	$\pm 28,4$
20	$\pm 16,8$	$\pm 16,8$	$\pm 15,7$	$\pm 28,2$
30	$\pm 25,1$	$\pm 25,1$	$\pm 23,4$	$\pm 42,5$

Tab. 1: Abgeschätzter maximaler Punktlagefehler in Abhängigkeit von der Zielweite

3.7. Überprüfung durch ein unabhängiges Messverfahren

Die aus den vorstehenden Untersuchungen abgeleiteten Genauigkeiten für das Messsystem sollen im folgenden unabhängig bestätigt werden. Zu diesem Zweck wurden mit dem Lasertachymeter im Lichtsaal des Hauptgebäudes der TU Berlin ca. 35 Punkte in drei Ebenen aufgemessen. Parallel dazu wurden diese Messpunkte in ein kombiniertes Strecken- und Richtungsnetz eingebunden, dass mit einem Ingenieurtachymeter beobachtet wurde.

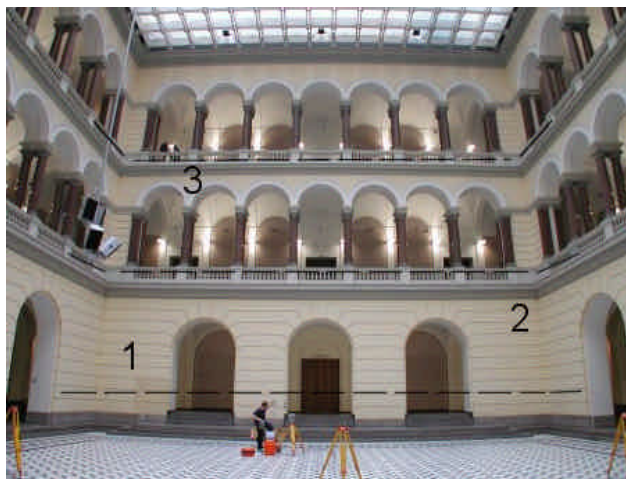


Abb. 4: Lichtsaal der TU Berlin²

Der Lichtsaal (siehe Abb. 4), eignet sich hervorragend für diese Genauigkeitsuntersuchungen, da er über eine lichte Höhe von ca. 25 Metern verfügt, und somit auch sehr steile Visuren und maximale Zielweiten des Lasers ermöglicht. Das Tachymeternetz, dessen Konfiguration der Abb. 5 zu entnehmen ist, wurde frei ausgeglichen. Als Ergebnis ergaben sich mittlere Punktfelder in der Größenordnung von unter einem Millimeter.

Die vom Lasertachymeter aufgenommenen Punkte befinden sich in einem aufnahmespezifischen lokalen Koordinatensystem \mathbf{x} , dessen Ursprung im Achsenkreuz des Lasertachymeters liegt. Die Stehachse repräsentiert die Hauptrichtung und durch die zufällige Position der Nullrichtung beim Anschalten des Lasertachymeters wird die Nebenrichtung gebildet. Die ungenaue

Ausrichtung der Stehachse und der Horizontalen, als Bezugspunkt für die Zenitdistanz, haben großen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Lasertachymeters.

² Die Zahlen kennzeichnen die Ebenen, auf den die 36 Punkte vermarktet wurden

Um den Einfluss der einzelnen Fehlerquellen bestimmen zu können, wurden verschiedene Ausgleichungen mit unterschiedlichen Ansätzen durchgeführt. Die Lagekoordinaten der Passpunkte im übergeordneten Koordinatensystem \mathbf{X} und im Lasersystem \mathbf{x} bilden die funktionale Grundlage des Ausgleichungsmodells.

Die für eine Koordinatentransformation übliche 7-Parametertransformation wurde hier nicht angewendet, da dieser Ausgleichungsansatz keine Aussagen über die möglichen Fehler des lokalen Koordinatensystems ermöglicht. Die Translation des Ursprungs vom übergeordneten kartesischen Koordinatensystem in das Achsenkreuz des Lasertachymeters wurde durch eine einfache Koordinatenreduktion erreicht und fließt nicht in die Ausgleichung ein.

Die Ausgleichung basiert auf der Transformation des übergeordneten Bezugssystems \mathbf{X} in das lokale Lasersystem \mathbf{x} über eine Transformationsmatrix \mathbf{R} mit neun Elementen, d.h. für die Bestimmung der Achsfehler des lokalen Bezugssystems wurde eine Transformation mit neun Parameter durchgeführt.

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \quad \text{mit} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Diese Matrix kann auf unterschiedliche Weisen interpretiert werden. Die Darstellung dieser Matrix als räumliche Drehmatrix ist die häufigste Auslegung, in einer anderen Interpretation bilden die Spaltenvektoren der Matrix \mathbf{R} die Vektorkomponenten der Einheitsvektoren des lokalen Systems \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y und \mathbf{e}_z im übergeordneten System \mathbf{X} . Mit Hilfe der Vektorrechnungen kann so auf die innere und äußere Orientierung des lokalen Systems geschlossen werden.

Für die Untersuchung des Lasersystems werden im ersten Ausgleichungsschritt keine Anforderungen an das Zielsystem gestellt, d.h. es wurden keine Bedingungen formuliert. Die Verwendung aller neun Parameter als unbekannte Größen liefert ein lineares Ausgleichungsproblem mit den folgenden Verbesserungsgleichungen für die im lokalen System beobachteten Lagekoordinaten:

$$\begin{aligned} x_i + v_{x_i} &= r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z \\ y_i + v_{y_i} &= r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z \\ z_i + v_{z_i} &= r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z \end{aligned} \quad (5)$$

Die berechneten Transformationsparameter der Matrix \mathbf{R} unterliegen keinen internen Bedingungen und werden durch die Ausgleichung so modelliert, dass die Lageabweichungen der transformierten Punkte möglichst gering werden. Die so berechneten Werte für die Transformationsmatrix dienen als Näherungswerte für die anschließende Ausgleichung mit Bedingungen zwischen den Parametern, mit denen das lokale System genau definiert werden kann.

Bei einer Ausgleichung mit sechs Bedingungen (orthogonales und maßstabsfreies System) verbleiben drei freie Parameter, welche die Rotationswinkel darstellen, die benötigt werden, um zwei kartesische Koordinatensysteme ineinander zu überführen.

Diese Drehung entspricht der Lagerung der lotrechten Z- Achse in die stehachsenschiefe z- Achse des Lasersystems. Durch diese Transformation kann der Einfluss der Stehachsenschiefe eliminiert werden.

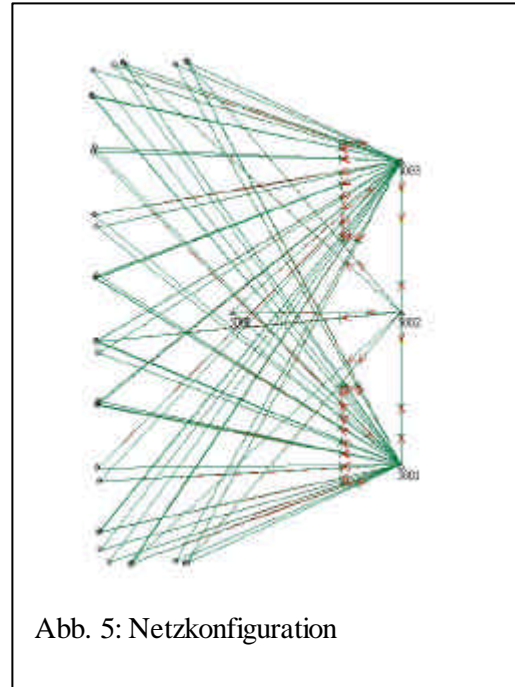


Abb. 5: Netzkonfiguration

Die abschließende Transformation mit acht Bedingungen zwischen den Parametern ermöglicht die Berechnung der Lagefehler unter der Annahme einer lotrechten Stehachse des Lasertachymeters. Dabei werden die sechs Bedingungen um jene zwei Parameter ergänzt, die die Drehwinkel um die x- und y-Achse des Systems darstellen. Mit diesen Drehungen wurde in der vorhergehenden Ausgleichung die Stehachsenschiefe nachgedreht.

Mit diesen acht Bedingungen existiert nur noch ein freier Parameter. Dieser Parameter ist der Drehwinkel um die z-Achse, der als Orientierungsunbekannte der Richtungsmessungen interpretiert werden kann. Somit wird eine Ausgleichung mit neun Parametern durchgeführt, wobei acht Bedingungen zwischen den Unbekannten bestehen (lokales, orthogonales und maßstabsfreies System).

Die aus der Ausgleichung erhaltenen Verbesserungen der Beobachtungen können hier als Lagefehler der lokal gemessenen Punkte interpretiert werden. Die entstandenen Fehler beinhalten nun zusätzlich zu den internen Gerätefehlern den Fehler der äußeren Orientierung der Stehachse.

Ebene	Anzahl der Punkte	Zenitwinkel [gon]	Mittlerer Punktfehler [mm]
1	12	25 – 50	18,5
2	12	50 – 70	11,2
3	12	99 - 101	7,4

Tab. 2: Lagefehler der Lasermesspunkte nach einer Ausgleichung mit 8 Bedingungen

Eine eingehendere Analyse dieser Punktlagefehler lässt keine Systematiken erkennen. Die Abweichungen treten sowohl in der Lage- als auch in der Höhenkomponente mit wechselndem Vorzeichen auf. Es gelingt somit auch unter steilen Visuren, einen mittleren Punktfehler von unter 2 cm zu realisieren. Befinden sich die gemessenen Vertikalwinkel in einem mittleren Bereich (Ebene 2), so werden Punktfehler in der Größenordnung von 1 cm erreicht.

Zusätzlich lassen sich aus oben beschriebenen Ausgleichungen die tatsächlichen Gerätegenauigkeiten ableiten, die in Tab. 3 zusammengefasst werden.

Messelement	Genauigkeit im lokalen stehachsenschiefen Lasersystem	Genauigkeit im übergeordneten lotrechten Bezugssystem
Streckenmessung	± 3 mm	± 3 mm
Horizontalrichtung	$\pm 0,07$ gon	$\pm 0,13$ gon
Vertikalrichtung	$\pm 0,06$ gon	$\pm 0,09$ gon

Tab. 3: Durch Ausgleichung bestimmte Gerätegenauigkeiten des Lasertachymeters

4 Strukturierte Geometrieerfassung

Mit dem Lasertachymeter lassen sich Koordinaten von beliebig vielen Punkten einer aufgenommenen Punktwolke im Bezugssystem des Messgerätes ermitteln. Die Aufgabe besteht nun darin, aus dieser Datenmenge strukturierte Geometrieinformationen abzuleiten. Vorgestellt werden soll hier die Ableitung von Ebenen, da es sich hier um den einfachsten Fall der Geometriebeschreibung handelt.

In einem ersten Schritt wird die Menge an Punkten herausgefiltert, die eine gemeinsame Ebene bilden. Dazu werden die polaren Messdaten für die Definition einer Beobachtungsmatrix herangezogen, die als Index für Zeile und Spalte durch die Zenitdistanz bzw. Horizontalrichtung gekennzeichnet ist. Aus dieser Matrix werden für jeden Punkt, der nicht auf dem Rand liegt, die Differenzvektoren zu seinen Nachbarpunkten gebildet. Mit diesen Differenzvektoren können über das Vektorprodukt eine Vielzahl von Normalenvektoren berechnet werden. Über geeignete Auswahlkriterien können anschließend

mittlere Normalenvektoren berechnet werden. Punkte mit Normalenvektoren, die innerhalb einer gewählten Toleranz in die gleiche Richtung zeigen, liegen auf einer gemeinsamen oder zueinander parallelen Ebene. Diese Punkte werden aus der Punktwolke als mögliche Ebenenpunkte für eine anschließende Ausgleichung separiert. Diese Ausgleichung beruht auf dem Grundgedanken, dass jede ausgleichende Ebene durch den Schwerpunkt der sie beschreibenden Punkte verläuft und sich die Bestimmung des Normalenvektors als Eigenwertproblem (\mathbf{n} ist Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert) formulieren lässt.

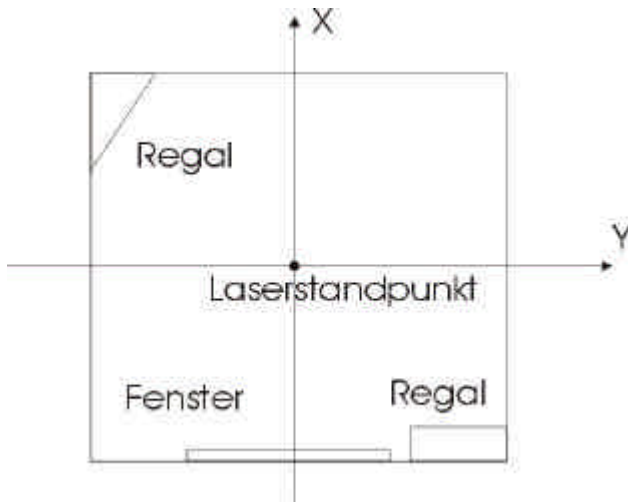


Abb. 6: Testraum (nach Höpfner, 2000)

In einem Testlauf des Lasertachymeters wurde ein Raum von ca. 15 m^2 aufgenommen (Abb. 6), der einem durchschnittlichen Wohnraum entspricht. Durch eine horizontale Profilaufnahme wurde eine Punktwolke erzeugt, die aus ca. 450 Punkten besteht. Mit einer horizontalen bzw. vertikalen Schrittweite von 6 bzw. 10 gon dauerte der Scannvorgang etwa 20 Minuten. Aus diesen Messdaten wurden 32 Punkte eliminiert, für die keine Streckenmessung vorlag. Die verbliebenen Punkte nahmen an der Ebenenbestimmung teil, dabei wurden fünf Ebenen erkannt, die aus unterschiedlich vielen Punkten gebildet wurden.

Ebene:	1	2	3	4	5
Punktzahl:	56	51	76	45	6 ³

5 Fazit und Ausblick

In den vorstehenden Kapiteln wurde die Entwicklung und Analyse eines preiswerten und einfach zu bedienenden Messgerätes vorgestellt, mit dem ein wirtschaftliches Gebäudeinnenaufmaß möglich ist. Bei der Bestimmung von polar aufgemessenen Punkten kann eine Genauigkeit mit diesem System von ca. 2 cm erreicht werden.

Jedoch besteht zur Zeit die Vermutung, dass die eingesetzten Schrittmotoren den Anforderungen der gewählten Aufgabenstellung bisher nicht gerecht werden. Bei einer zweimaligen Anmessung ausgewählter Punkte auf der obersten Galerie im Lichtsaal der TU Berlin war es zwar möglich, die markierten Punkte mit den Schrittmotoren im Bereich des Getriebeispiels wieder einzustellen, aber die Messwerte für Horizontal- und Vertikalwinkel wiesen einen Offset auf. Dies lässt vermuten, dass die Schrittmotoren oder das Schrittmotoreninterface die Steuerbefehle des Software nicht korrekt umsetzen, die Messwerte verfälscht werden und so die Ungenauigkeiten bei der Punktbestimmung zu erklären wären. Um dieses Phänomen zu untersuchen, sind Testreihen geplant, die klären sollen, ob eine Systematik zwischen dem „Verschlucken“ einzelner Schritte bei der Ansteuerung der Schrittmotoren und der gewählten Horizontal- bzw. Vertikaleinstellung vorliegt.

3 Aufgrund des vorhandenen Fensters ist die Punktzahl wesentlich geringer als bei den anderen Ebenen

Die bisher erreichten Gerätegenauigkeiten lassen sich noch verbessern, wenn geeignete Verfahren entwickelt werden, mit denen eine genauere Bestimmung der Gerätefehler (Kipp- und Zielachsfehler) möglich und eine Verringerung des Getriebespiel durch Einsatz anderer Riementriebe verwirklicht ist.

Des weiteren sind die Auswerte- und Visualisierungsmethoden zu verfeinern. Dazu gehört eine Verschneidung der Ebenen, mit der sich die Eckpunkte des Raumes und somit die geometrischen Begrenzungen ableiten lassen und dargestellt werden können.

Schrifttum

- [1] Nävy, J.: „Facility Management“, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- [2] Gründig, L., Gielsdorf, F.: „Facility management systems, transportation and utility lines“, Joint Seminar of FIG Commissions 2, 4, 5, 6 and 7, Malta, 8–21 Sept. 2000
- [3] Krüger, T.: „Entwicklung und Erprobung eines automatisierten Systems zur lasergestützten Tunnelprofilmessung“, Diplomarbeit, TU Berlin (unveröffentlicht), 1999
- [4] Krüger, T., Milev, I., Gründig, L.: „Ein automatisiertes System zur lasergestützten Tunnelprofilaufnahme“, ZfV (in Vorbereitung)
- [5] Höpfner, S.: „Entwicklung eines automatisierten lasergestützten Aufnahmesystems zur Bereitstellung und Aufbereitung von Geometriedaten für die Verarbeitung in einem Facility Management - System“, Diplomarbeit, TU Berlin (unveröffentlicht), 2000
- [6] RS ELECTRONICS: „Bedienungsanleitung für Hybrid-Schrittmotoren“, 1998
- [7] Stahlberg, C.: „Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung“, ZfV Heft 5/1997, S. 225 ff.