

# Anwendung des tachymetrischen Laserscannings in der Überwachung eines historischen Bauwerkes

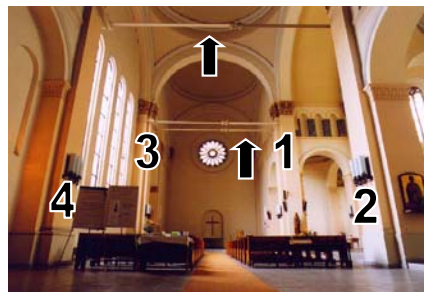
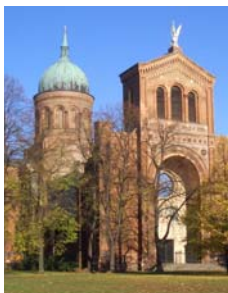
Frank NEITZEL und Lars JOHANNES

## Zusammenfassung

Es wird gezeigt, dass sich motorisierte Tachymeter mit reflektorloser Entfernungsmessung für ein tachymetrisches Laserscanning einsetzen lassen. Dies wird anhand der Überwachung eines historischen Bauwerkes demonstriert. Die einzelnen Arbeitsschritte von der Festlegung aufzumessender Bauteile über die Instrumentenuntersuchung bis hin zur Auswertung der Messungen und Präsentation der Ergebnisse werden aufgezeigt.

## 1 Einführung

Bei dem zu überwachenden Bauwerk handelt es sich um die 1851 erbaute St. Michael-Kirche in Berlin-Mitte in unmittelbarer Nähe des Verlaufs der ehemaligen Berliner Mauer. Im Zweiten Weltkrieg wurde die Kirche durch Brand- und Sprengbomben schwer beschädigt und das Mittelschiff vollständig zerstört. Um 1950 wurde das Querschiff saniert und seitdem für Gottesdienste genutzt, das Mittelschiff wurde nicht wieder aufgebaut. Um die aufgrund des zerstörten Mittelschiffes fehlenden Gegenkräfte aufzunehmen, wurden Stahlbänder in das Querschiff eingezogen. Abb. 1 a) zeigt die Kirche in ihrem heutigen Zustand, das Querschiff mit dem Kuppeldach ist im hinteren Teil der Abbildung zu erkennen. Eine Innenansicht des Querschiffes, in der auch die eingezogenen Stahlbänder zwischen den Säulen 1 und 3 sowie 2 und 4 zu erkennen sind (siehe Pfeile), zeigt Abb. 1 b).



**Abb. 1:** St. Michael-Kirche in Berlin-Mitte,  
a) Außenansicht, b) Innenansicht des Querschiffes

Trotz der eingezogenen Stahlbänder haben sich in den Rundbögen des Kreuzgewölbes Risse gebildet. Da sich diese in den letzten Jahren geweitet haben und zusätzliche Risse in bis dahin unbeschädigten Rundbögen aufgetreten sind, ergab sich die Notwendigkeit von Überwachungsmessungen, um das Bewegungsverhalten des Querschiffes zu beurteilen.

## 2 Rahmenbedingungen, Modellannahmen und Messkonzept

Bei einer Ortsbegehung mit Bausachverständigen wurde festgelegt, die Neigungen der Säulen 1, 2, 3 und 4, siehe Abb. 1 b), zu überwachen. Diese weisen eine Höhe von ca. 9,5 m über dem Fußboden auf, die Seitenflächen laufen jeweils um ca. 2,5 mm pro 1 m konisch nach oben zu. Die Anbringung dauerhafter Zielzeichen an den Säulen war nicht erlaubt, die Anbringungen von Punktmarkierungen auf dem Fußboden war zulässig. Das Messgebiet zwischen den Säulen weist eine Ausdehnung von ca. 10 m x 10 m auf. Die aus den geodätischen Messungen abzuleitenden Ergebnisse wurden wie folgt festgelegt:

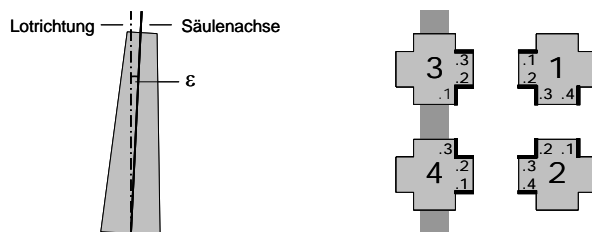
- Aus den Ergebnissen der ersten Messung (Referenzepoche) sollen Neigungen  $\varepsilon$  der Säulen gegenüber der Lotrichtung festgestellt werden, siehe Abb. 2 a).
- Aus Folgemessungen sollen Neigungsänderungen der Säulen gegenüber der Referenzepoche festgestellt werden. Diese sind auf ihre Signifikanz zu testen.
- Alle Säulen sollen sich in einem gemeinsamen Koordinatensystem darstellen lassen.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen wurden folgende Modellannahmen getroffen:

- Eine planare Approximation der Niveauflächen des Erdschwerefeldes ist zulässig.
- Die Seitenflächen der Säulen können jeweils als eine durchgängige Ebene angesehen werden.
- Gegenüberliegende Seitenebenen laufen in gleichem Maße konisch zu.
- Die Säulen werden als Starrkörper betrachtet.
- Die Mittelachsen der Säulen waren ursprünglich lotrecht ausgerichtet.

Aus den Rahmenbedingungen und den Modellannahmen resultierte folgendes Messkonzept:

- Anlage eines 3D-Festpunktfeldes durch tachymetrische Messungen und Nivellements.
- Flächenhafte Erfassung gegenüberliegender Seitenebenen der Säulen mit einem berührungslosen Messverfahren. Die aufzumessenden Seitenebenen sind in Abb. 2 b) in dickerer Strichstärke dargestellt.



**Abb. 2:** a) Neigung gegenüber der Lotrichtung, b) aufzumessende Seitenflächen

Für die berührungslose flächenhafte Erfassung der Säulen fiel die Entscheidung auf die Aufmessung mit Hilfe der reflektorlosen Tachymetrie, die im Folgenden als „tachymetrisches Laserscanning“ bezeichnet wird. Über den erfolgreichen Einsatz der reflektorlosen Tachymetrie für Deformationsmessungen wird bereits in (WUNDERLICH et al. 2005) am Beispiel der Schadenserkenkung an einer Spannbetonbrücke berichtet. Für die Überwachungsmessungen in der Kirche wurde das Instrument Leica TPS 1100 ausgewählt.

### 3 Vorbereitende Messungen und Untersuchungen

#### 3.1 Schaffung eines Festpunktfeldes

Um in allen Messepochen einen einheitlichen Beobachtungsplan einhalten zu können, wurde festgelegt, dass die Festpunkte zugleich als Instrumentenstandpunkte für das tachymetrische Laserscanning dienen sollen. Die Festpunkte waren daher so festzulegen, dass möglichst günstige Auftreffwinkel für die Laserstrahlen resultieren, d.h. Vermeidung von sehr steilen Visuren, Doppelreflexionen und Messschatten.

Die Festpunkte wurden als überbestimmtes 3D-Netz aufgemessen. Die tachymetrischen Messungen wurden mit der Totalstation Leica TCA 2003 durchgeführt, zusätzlich wurden die Höhenunterschiede zwischen den Punkten mit Hilfe von Nivellements mit einem Zeiss Ni 2 mit Planplatte und einer Invarlatte mit Doppelteilung bestimmt. Die Ausgleichung aller Messelemente in einer freien 3D-Netzausgleichung lieferte für die Koordinaten eine Standardabweichung von durchschnittlich 0,24 mm in der Lage und 0,27 mm in der Höhe.

#### 3.2 Instrumentenuntersuchung

Da die Messungen beim tachymetrischen Laserscanning in einer Fernrohrlage ausgeführt werden, ist das Instrument, hier Leica TPS 1100, auf das Vorhandensein eines Ziel- und Kippachsenfehlers zu überprüfen. Deren Bestimmung aus einer Minimalkonfiguration oder aus einer überbestimmten Konfiguration ist in (NEITZEL 2006) beschrieben. Der Höhenindexfehler kann ebenfalls aus einer Minimalkonfiguration oder einer überbestimmten Konfiguration bestimmt werden. Ob eine Korrektur der Richtungs- und Winkelmessungen um den Einfluss der Achsenfehler und des Höhenindexfehlers erforderlich ist, kann durch eine numerische Abschätzung der resultierenden Koordinatenabweichung beurteilt werden. Übersteigt diese die geforderte Genauigkeit, sind die Instrumentenfehler zu berücksichtigen. Dadurch erhält man die gesuchten Kugelkoordinaten  $\varrho$  und  $\lambda$ .

Des Weiteren ist zu untersuchen, ob der rote, reflektorlos messende Laserstrahl mit der visuellen Zielachse zusammen fällt. Dazu ist eine Zieltafel mit reflexionsverstärkter Oberfläche in ca. 20 m Entfernung vom Instrument aufzustellen. Mit der visuellen Zielachse wird das Zentrum  $Z$  der Zieltafel angezielt. Fällt der Mittelpunkt  $R$  des Messflecks nicht mit dem Punkt  $Z$  zusammen, kann beim Leica TPS 1100 die Strahlrichtung mit Hilfe von Justierschrauben am Instrument so verändert werden, dass die Abweichungen  $d_h$  und  $d_v$  beseitigt werden und der Punkt  $R$  mit dem Punkt  $Z$  zusammenfällt, siehe hierzu Abb. 3. Nach dieser mechanischen Justierung beziehen sich alle polaren Messelemente auf den Punkt  $Z$ .

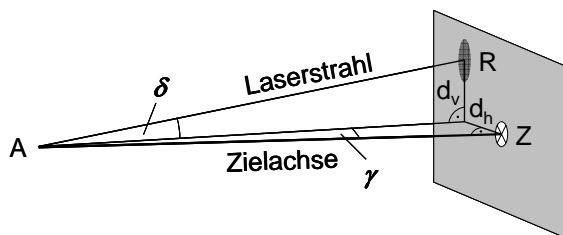


Abb. 3: Abweichung der Strahlrichtung von der visuellen Zielachse

Eine weitere Möglichkeit zur Berücksichtigung der Abweichung des Laserstrahls von der visuellen Ziellinie besteht darin, dass man die Winkel  $\gamma$  und  $\delta$  durch Messungen bestimmt. Zielt man Punkt  $Z$  dabei unter einem Kippwinkel von 100 gon an, kann  $\gamma$  als Zielachsenfehler interpretiert werden. Der Winkel  $\delta$  kann als Höhenindexfehler betrachtet werden. Aus

$$\vartheta_R = \vartheta - \delta \quad \text{und} \quad (1)$$

$$\lambda_R = \lambda - f_R \quad \text{mit} \quad \tan f_R = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma \sin \vartheta_R} = \frac{\tan \gamma}{\sin \vartheta_R}, \quad (2)$$

vergleiche (STAHLBERG 1997), erhält man die Kugelkoordinaten  $\vartheta_R$  und  $\lambda_R$ , die sich auf den Punkt  $R$ , siehe Abb. 3, beziehen. Aus praktischen Gründen erscheint jedoch die mechanische Justierung des Laserstrahls ratsamer.

## 4 Messung und Auswertung der Referenzepeche

### 4.1 Tachymetrisches Scannen der Seitenebenen

Zu Beginn der Messung der Referenzepeche, die bei einer Außentemperatur von 4 Grad und einer Temperatur in der Kirche von 11 Grad Celsius erfolgte, wurde das Instrument Leica TPS 1100 jeweils auf einem Festpunkt aufgestellt, danach erfolgten Orientierungsmessungen zu mehreren Festpunkten. Für die flächenhafte Erfassung der Säulen stand das Programm „Scannen von Oberflächen“ zur Verfügung, das nach Festlegung von zwei Eckpunkten sowie des horizontalen und vertikalen Gitterabstandes eine automatische Aufmessung aller Gitterpunkte ermöglicht. Bei einer Rasterweite von 4 cm (horizontal) und 15 cm (vertikal) ergab sich bei einer Seitenebene von 27 cm Breite und 9,5 m Höhe eine Anzahl von 448 aufzumessenden Punkten. Bei einer Messzeit von 3 Sekunden pro Punkt (Herstellerangabe) plus 1 Sekunde für das Anfahren eines Punktes ergab sich eine Messzeit von 30 Minuten pro Ebene, was bei insgesamt 14 Ebenen zu einem Zeitaufwand von 7 Stunden führte. Hinzu kamen ca. 2 Stunden für den Wechsel der Aufnahmestandpunkte.

Aus den Messwerten wurden für alle Seitenebenen die 3D-Koordinaten sowie deren Varianzen und Kovarianzen berechnet, wobei die Herstellerangaben der Winkelmessgenauigkeit von 0,5 mgon (Hz und V) und die Genauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung von 3 mm + 2 ppm verwendet wurden. Die Koordinaten und deren Genauigkeitsangaben wurden verwendet, um die Parameter ausgleichender Ebenen zu berechnen.

### 4.2 Berechnung ausgleichender Ebenen

Beliebige Punkte einer Ebene im Raum erfüllen die allgemeine Ebenengleichung

$$Ax_i + By_i + Cz_i + D = 0 \quad , \quad (3)$$

mit  $i = 1, \dots, k$  (Anzahl der Punkte auf der Ebene), wobei die Koeffizienten  $A$ ,  $B$  und  $C$  nicht alle zugleich null sein dürfen. Da man diese Gleichung mit einer beliebigen Zahl ungleich null multiplizieren kann, gibt es unendlich viele solcher Gleichungen, die die Ebene beschreiben. Für eine eindeutige Beschreibung der Ebene wird daher die Bedingung

$$\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = 1 \quad (4)$$

eingeführt, womit der Normalenvektor der Ebene die Länge 1 annimmt. Liegen  $k > 3$  Punkte auf der Ebene, sind die Unbekannten mit Hilfe einer Ausgleichung zu bestimmen, woraus folgende Aufgabe resultiert: Bestimme die Parameter  $A$ ,  $B$ ,  $C$  und  $D$  unter der Voraussetzung, dass es sich bei den Werten  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  um mit zufälligen Fehlern behaftete Beobachtungen handelt. Die Varianzen und Kovarianzen der Beobachtungen sind zu berücksichtigen. Bei dieser Aufgabe sind die Verbesserungen  $v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i}$  einzuführen und man erhält

$$\Psi(\mathbf{v}, \mathbf{x}) = A(x_i + v_{x_i}) + B(y_i + v_{y_i}) + C(z_i + v_{z_i}) + D = \mathbf{c}_1 . \quad (5)$$

$$\gamma(\mathbf{x}) = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = \mathbf{c}_2 . \quad (6)$$

mit  $\mathbf{c}_1 = \mathbf{0}$  und  $\mathbf{c}_2 = 1$ . Fasst man die Verbesserungen im Vektor

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{x_1} & \cdots & v_{x_k} & v_{y_1} & \cdots & v_{y_k} & v_{z_1} & \cdots & v_{z_k} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

und die Genauigkeitsrelationen der Beobachtungen in einer Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  zusammen, lautet die zu minimierende Zielfunktion einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} . \quad (8)$$

Dies führt zu einer nichtlinearen „bedingten Ausgleichung mit Unbekannten und Bedingungen zwischen den Unbekannten“, die auch als nichtlineares verallgemeinertes Gauß-Helmert-Modell (GH-Modell) bezeichnet werden kann. Um eine sachgerechte iterative Lösung zu ermöglichen, muss die Linearisierung der Bedingungsgleichungen korrekt und somit sowohl an der Stelle der Näherungswerte  $\mathbf{x}^0$  für die Unbekannten als auch an der Stelle der Näherungswerte  $\mathbf{v}^0$  für die Verbesserungen erfolgen (alternativ kann die Linearisierung an der Stelle  $\mathbf{1} + \mathbf{v}^0$  vorgenommen werden). Führt man eine Linearisierung an der Stelle  $\mathbf{v}^0 = \mathbf{0}$  durch, erhält man lediglich eine Näherungslösung, die leider in vielen populären Fachbüchern dargestellt ist, ohne auf deren Näherungscharakter hinzuweisen, siehe hierzu (LENZMANN & LENZMANN 2004) und (NEITZEL & PETROVIC 2008).

Durch Einführung geeigneter Näherungswerte  $\mathbf{v}^0$  und  $\mathbf{x}^0$  können die linearisierten Bedingungsgleichungen

$$\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{x}) = \mathbf{B}(\mathbf{v} - \mathbf{v}^0) + \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) + \Psi(\mathbf{v}^0, \mathbf{x}^0) = \mathbf{c}_1 \quad (9)$$

und die linearisierten Bedingungen zwischen den Unbekannten

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) + \gamma(\mathbf{x}^0) = \mathbf{c}_2 \quad (10)$$

angegeben werden. Die Matrizen der partiellen Ableitungen sowie die Widerspruchsvektoren, die jeweils an der Stelle der Näherungswerte  $\mathbf{v}^0$  und  $\mathbf{x}^0$  zu bilden sind, ergeben sich zu

$$\mathbf{A}(\mathbf{v}, \mathbf{x}) = \left. \frac{\partial \Psi(\mathbf{v}, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{v}^0, \mathbf{x}^0} , \quad \mathbf{B}(\mathbf{v}, \mathbf{x}) = \left. \frac{\partial \Psi(\mathbf{v}, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}^0, \mathbf{x}^0} , \quad \mathbf{C}(\mathbf{x}) = \left. \frac{\partial \gamma(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}^0} , \quad (11)$$

$$\mathbf{w}_1 = -\mathbf{B}\mathbf{v}^0 + \Psi(\mathbf{v}^0, \mathbf{x}^0) - \mathbf{c}_1 , \quad \mathbf{w}_2 = \gamma(\mathbf{x}^0) - \mathbf{c}_2 . \quad (12)$$

Die Lösung für die Unbekannten  $\hat{\mathbf{x}}$  erhält man aus dem linearen Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{A}^T (\mathbf{BQB}^T)^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^0 \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T (\mathbf{BQB}^T)^{-1} \mathbf{w}_1 \\ -\mathbf{w}_2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

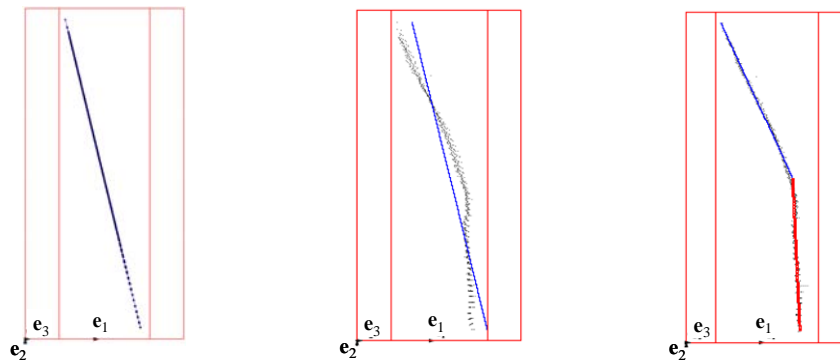
wobei mit  $\mathbf{Q}$  die Kofaktorenmatrix der Beobachtungen und mit  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$  die Korrelatenvektoren bezeichnet sind. Die Verbesserungen erhält man aus

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{QB}^T \mathbf{k}_1 \quad \text{mit} \quad \mathbf{k}_1 = (\mathbf{BQB}^T)^{-1} (-\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) - \mathbf{w}_1) . \quad (14)$$

Die Lösungen  $\hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{x}}$  sind solange als neue Näherungswerte  $\mathbf{v}^0, \mathbf{x}^0$  einzusetzen, bis ein sinnvoll gewähltes Abbruchkriterium erreicht ist.

### 4.3 Ergebnisse der Referenzmessung und Präsentation der Ergebnisse

Die Ausgleichung lieferte für alle Ebenen zunächst ein sehr überraschendes Ergebnis, da für eine Vielzahl der Beobachtungen normierte Verbesserungen mit dem Wert  $NV > 3$  auftraten. Auch der Schätzwert für die Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der Ausgleichung  $\hat{\sigma}_0$  überstieg den a priori-Wert  $\sigma_0$  deutlich. Ein daraufhin durchgeführter  $\chi^2$ -Test, siehe hierzu (NIEMEIER 2008, S. 84 ff), zeigte an, dass eine fehlerhafte mathematisch-stochastische Modellbildung vorliegen muss. Eine Antwort auf dieses Problem lieferte letztendlich eine graphische Darstellung der Punktwolken und der ausgleichenden Ebenen, in der die Lagekoordinaten mit einer 50-fachen Überhöhung gegenüber der  $z$ -Achse dargestellt wurden. Während in Abb. 4 a) bei einer Darstellung der ausgleichenden Ebene und der ausgeglichenen Punktwolke keine Auffälligkeiten zu erkennen sind, so ändert sich dies, wenn man die ausgleichende Ebene zusammen mit der originären Punktwolke darstellt, siehe Abb. 4 b). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Annahme einer durchgängigen Ebene nicht zutrifft und dass vielmehr die Zerlegung in Teilebenen erforderlich ist. Nach dieser Zerlegung verlief die Ausgleichung ohne Probleme. Abb. 4 c) zeigt die ausgleichenden Teilebenen und die originäre Punktwolke.



**Abb. 4:** a) Ausgleichende Ebene und ausgeglichene Punktwolke,  
 b) ausgleichende Ebene und originäre Punktwolke,  
 c) ausgleichende Teilebenen und originäre Punktwolke

Für die weitere Bearbeitung wurden somit folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Die Annahme durchgängiger Seitenebenen ist zu verwerfen, was zur Folge hat, dass eine Aussage zur Schiefstellung der Säulen gegenüber der Lotrichtung nicht möglich ist.
- Für alle Säulen ist eine Zerlegung der Seitenflächen in Teilebenen erforderlich.
- Zur Abgrenzung der Teilebenen sind Trennungshöhen festzulegen.
- Für jede Säule sind Ausgleichungen von Teilebenen durchzuführen.

Aus den Parametern jeder Teilebene wurden mit Hilfe des Skalarproduktes von Vektoren die Neigungen des Normalenvektors berechnet und graphisch dargestellt, siehe Abb. 5.

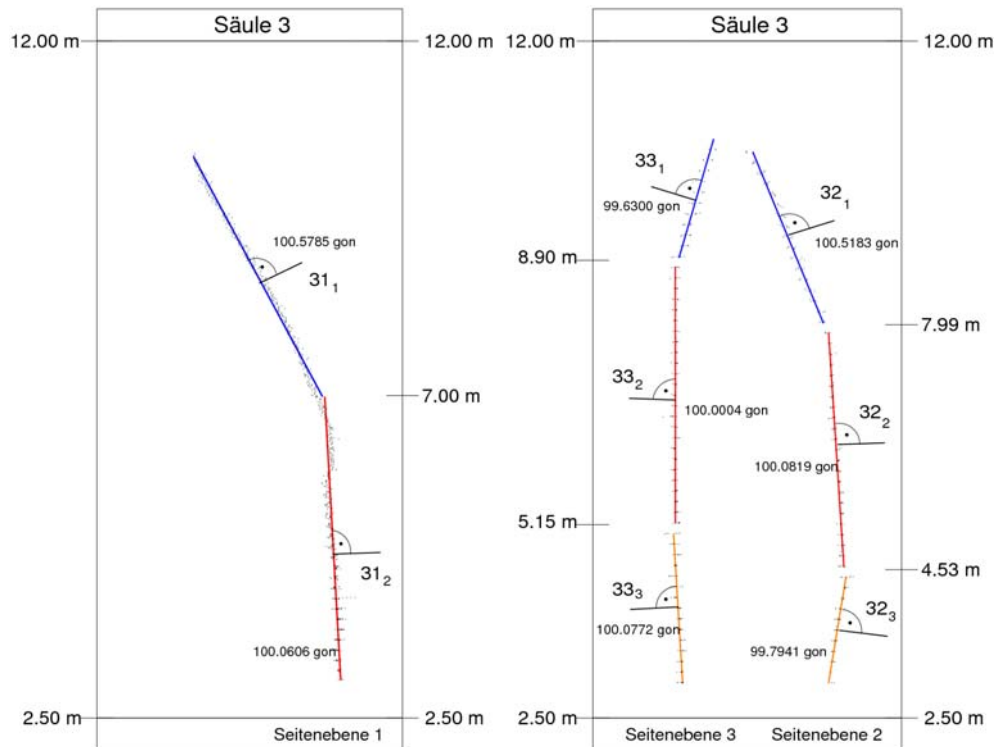


Abb. 5: Teilebenen und Neigungswinkel für Säule 3

## 5 Messung und Auswertung der ersten Folgeepoche

Die Messung der ersten Folgeepoche erfolgte 2 Jahre nach der Referenzepoche. Um möglichst gleiche äußere Bedingungen vorzufinden, fand die Folgemessung zur gleichen Jahreszeit wie die Referenzmessung statt. Die Außentemperatur betrug -2 Grad, die Temperatur in der Kirche 12 Grad Celsius. Für die Folgemessung wurde dasselbe Instrument wie in der Referenzmessung verwendet.

Vor der Messung wurden die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Instrumentenuntersuchungen durchgeführt, der Beobachtungsplan zur Aufmessung der Seitenflächen wurde identisch zu dem der Referenzmessung festgelegt.

Die Auswertung der Messungen erfolgte wie in den Abschnitten 4.1 und 4.2 beschrieben. Bei der Ausgleichung der Teilebenen wurden die Trennungshöhen berücksichtigt. Als Ergebnis lagen für alle Teilebenen die Neigungswinkel und deren Standardabweichungen vor. Aus den Neigungen der Teilebenen in der Referenzepoche  $w_0$  und denen in der Folgeperiode  $w_1$  wurden die Neigungsdifferenzen

$$\Delta w = w_1 - w_0 \quad (15)$$

und deren Standardabweichungen berechnet, die mit Hilfe eines  $t$ -Tests, siehe z.B. (NIE-MEIER 2008, S. 398), mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  auf Signifikanz getestet wurden. Abb. 6 zeigt die Säule 2, bei der keine signifikanten Neigungsänderungen festgestellt werden konnten. Die signifikanten Neigungsänderungen für Säule 3 sind in Abb. 7 dargestellt. Die Ergebnisse für alle Säulen wurden den Bausachverständigen zur Beurteilung des Bauwerksverhaltens übergeben.

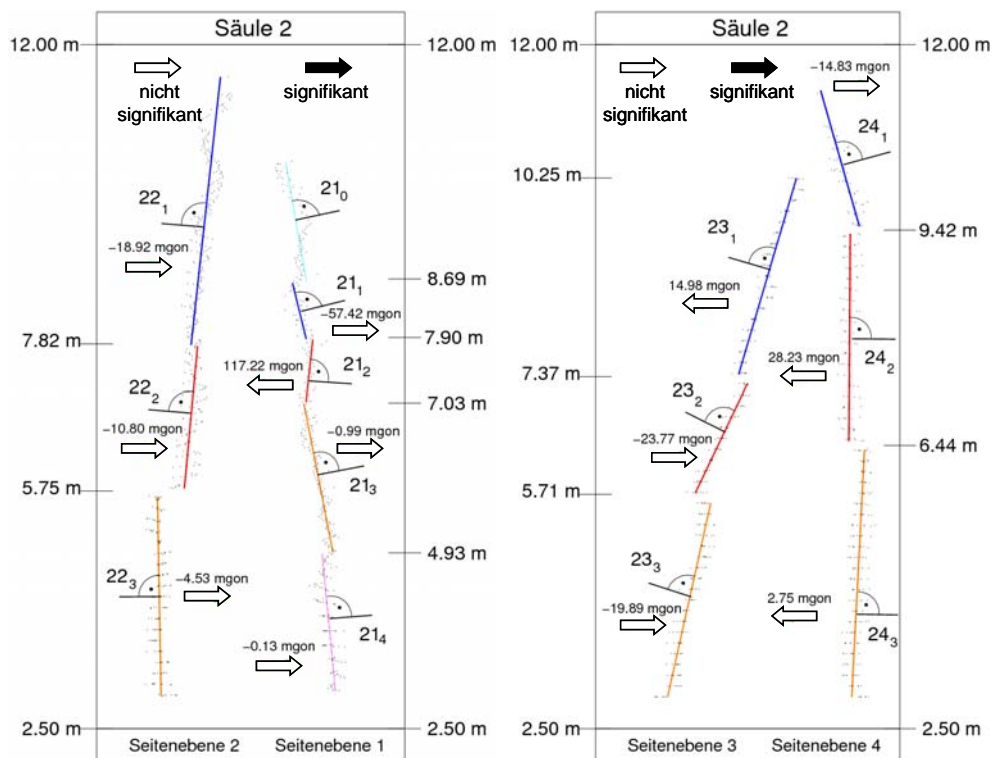


Abb. 6: Neigungsänderungen für Seitenebenen der Säule 2



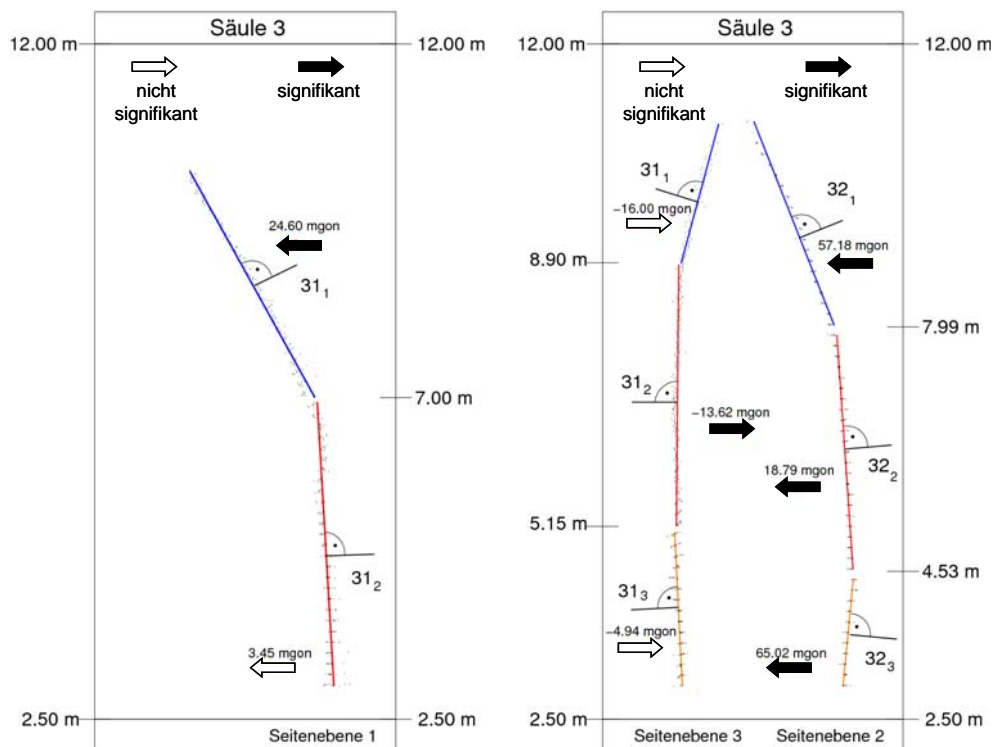


Abb. 7: Neigungsänderungen für Seitenebenen der Säule 3

## 6 Schlussbetrachtung

Da motorisierte Tachymeter mit reflektorloser Entfernungsmessung in vielen Ingenieurbüros zur Standardausrüstung gehören, bietet es sich an, diese Instrumente auch für ein tachymetrisches Laserscanning einzusetzen. Eine Einsatzmöglichkeit in der Bauwerksüberwachung wurde in diesem Beitrag aufgezeigt.

Die Vorteile des tachymetrischen Laserscannings liegen darin, dass die Messgenauigkeit in verwerthbarer Weise von den Herstellern angegeben wird, so dass eine strenge Varianzfortpflanzung möglich ist. Zudem ist die Überprüfung und Justierung instrumenteller Fehler auf bekannte Weise möglich. Des Weiteren sind eine einfache Stationierung und Messungen mit direktem Bezug zur Lotrichtung möglich. Das tachymetrische Laserscanning kann nahtlos in den Ablauf „klassischer“ Vermessungsaufgaben integriert werden.

Der Nachteil des tachymetrischen Laserscannings liegt in der geringen Messgeschwindigkeit, so dass sich ein wirtschaftlicher Einsatz auf die Erfassung von Objekten mit geringer Ausdehnung oder die Erfassung mit geringer Punktdichte beschränkt. Es ist jedoch festzustellen, dass inzwischen motorisierte Totalstationen angeboten werden, die ein Rasterscanning mit bis zu 20 Punkten pro Sekunde ermöglichen, wodurch der in Abschnitt 4.1 beschriebene Zeitaufwand deutlich reduziert werden kann.

Um die Softwarekosten für die Datenauswertung möglichst gering zu halten, bietet sich der Einsatz selbst erstellter Programme oder die Verwendung kostenfreier Software an. So ist die in Abschnitt 3.1 beschriebene 3D-Netzausgleichung nicht nur mit kommerziellen Softwarepaketen möglich, sondern ebenso mit dem Programm Xdesy, das als Freeware kostenfrei unter [www.xdesy.de](http://www.xdesy.de) zum Download bereitgestellt wird.

Die Berechnung ausgleichender Ebenen kann mit Hilfe selbst erstellter Programme erfolgen, wobei es sich empfiehlt, eine Softwarebibliothek zur linearen Algebra, wie z.B. LAPACK (Linear Algebra PACKage) einzubinden. Hierbei handelt es sich um eine in Fortran geschriebene Softwarebibliothek mit effizienten Routinen zur Lösung linearer Gleichungssysteme. Diese kann auch in C/C++- und Java-Programmen verwendet werden. Die Softwarebibliothek steht unter [www.netlib.org/lapack/](http://www.netlib.org/lapack/) kostenfrei zum Download bereit.

Eine Möglichkeit, auch ohne umfangreiche Programmierkenntnisse Programme für die numerische Lösung von z.B. Ausgleichungsaufgaben zu erstellen, bietet das kommerzielle Programm MatLab™. Aber auch hierzu ist mit GNU Octave eine kostenfreie Alternative verfügbar, die unter [www.gnu.org/software/octave](http://www.gnu.org/software/octave) zum Download bereitsteht. Ganz ohne Programmierkenntnisse kann die Berechnung ausgleichender geometrischer Objekte (Kreis, Kugel, Ebene, Zylinder) mit dem Programm Xdesy erfolgen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass das tachymetrische Laserscanning mit einer Messgeschwindigkeit von bis zu 20 Punkten pro Sekunde kein Ersatz für das „echte“ terrestrische Laserscanning mit Messgeschwindigkeiten von bis zu 500 000 Punkten pro Sekunde sein kann. Für die 3D-Erfassung von Objekten mit geringer Ausdehnung sind moderne Totalstationen mit reflektorloser Entfernungsmessung jedoch hervorragend geeignet und bieten zusätzliche Geschäftsmöglichkeiten z.B. im Bereich der Überwachungsmessungen, wie in diesem Beitrag gezeigt wurde.

## 7 Literatur

- Lenzmann L. & E. Lenzmann (2004): *Strenge Auswertung des nichtlinearen Gauß-Helmert-Modells*. AVN 111, S. 68-73
- Neitzel F. (2006): *Bestimmung von Ziel- und Kippachsenfehler polarer Messsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen*. ZfV 131, Nr. 3, S. 132-140
- Neitzel F. & S. Petrovic (2008): *Total Least Squares (TLS) im Kontext der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten am Beispiel der ausgleichenden Geraden*. ZfV 133, Nr. 3, S. 141-148
- Niemeier W. (2008): *Ausgleichsrechnung*. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- Stahlberg C. (1997): *Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung*. ZfV 122, Nr. 5, S. 225-235
- Wunderlich Th., Th. Schäfer, K. Zilch, E. Penka, V. Cetl (2005): *Schadenserkennung an einer Spannbetonbrücke durch reflektorlose Deformationsmessungen*. In: Festschrift aus Anlass des 60. Geburtstags Prof. Bancila, S. 60-68, Technische Universität „Politehnica“ Timisoara, Rumänien, 6. Mai 2005