



Flächenhaftes Monitoring an einer Freiformbrücke der Koralmbahn

Surface based monitoring on a freeform shell at the Koralmbahn

Claudius Schmitt und Hans Neuner, Wien

Kurzfassung

Im Rahmen eines neuen Bauverfahrens einer Wildbrücke für die Koralmbahn des ÖBB-Bauabschnitts Aich-Mittlern ist der Forschungsbereich Ingenieurgeodäsie an der TU Wien mit der baubegleitenden geometrischen Erfassung und Auswertung des Objekts betraut worden. Dabei lautet die gestellte Hauptanforderung: Entwicklung eines redundanten und autarken Monitoringsystems, das flächenhafte Veränderungen der Geometrie während der einzelnen Bauphasen detektiert und ein geometrisches Ist-Modell auf Basis einer Freiformflächen für strukturelle Berechnungen zur Verfügung stellt.

Schlüsselwörter: Flächenhaftes Monitoring, Freiformflächen, Approximation

Abstract

During the construction process of a deer pass at the ÖBB Koralmbahn-construction stage Aich-Mittlern, over a new two-lane railway track, the research group engineering geodesy of the TU Wien provides the geometric monitoring. The main task was to develop a redundant and independent monitoring system to detect surface-based deviations between the different construction processes and to produce a geometric model based on freeform surfaces for the structural analysis.

Keywords: surface-based monitoring, freeform surfaces, approximation

1. Einleitung

Das neue Bauverfahren „Pneumatik forming of hardened concrete“, welches am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien entwickelt wurde, kam bei der Wildbrücke der Koralmbahn erstmalig in den realen Einsatz. Bei diesem Verfahren wird eine ebene ausgehärtete Betonplatte durch Hebung mittels aufblasbarem Pneu und Zugspannlitzen am unteren Rand in eine zweifach gekrümmte Betonkuppel verformt, siehe Abbildung 1. Diese erste Betonkuppel wird im Bereich der späteren Brücke um das dreifache der Schalendicke verstärkt in herkömmlicher Betonbauweise. Aufgrund der verbesserten strukturellen Eigenschaften dieser Kuppel basierend auf einer

optimierten Geometrie für den Lastendzustand lässt sich eine Materialersparnis von bis zu 30% erreichen [1].

Infolge der geometrischen Formoptimierung reagiert die Wildbrücke sensibler auf geometrische Imperfektionen als herkömmliche Brückenbauwerke. Dabei unterscheiden sich die maximal zulässigen Formabweichungen je nach Bauprozess und Position am Objekt.

Bei einer Überschreitung der maximal zulässigen Formabweichung ist das Tragverhalten der Wildbrücke mit der IST-Geometrie neu zu berechnen, um geeignete Ausgleichsmaßnahmen einleiten zu können.

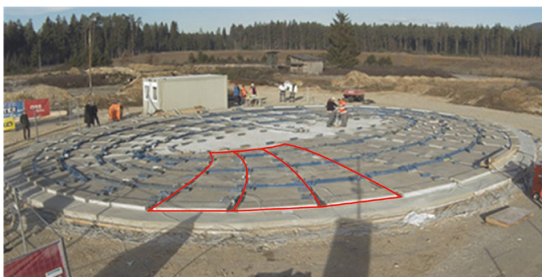


Abb. 1: Schale in ebenem (links) und in gehobenem (rechts) Zustand

Die einzelnen Kapitel spiegeln den grundsätzlichen Workflow in diesem Projekt aus geodätischer Sicht wieder, angefangen mit der Vorstellung des Monitoring Konzepts und den Anforderungen an die Messaufgabe erläutert in Kapitel 2 und weiter geführt in Kapitel 3 mit der Definition der genutzten Koordinatensysteme. Kapitel 4 beschreibt das Monitoringkonzept mit der punktbezogenen und der flächenhaften Aufnahme gefolgt von Kapitel 5, welches die punktbezogene Auswertung und Validierung der Messdaten enthält. Kapitel 6 zeigt die Aufbereitung der flächenhaften Messungen für die strukturelle Berechnung. Die Zusammenfassung und ein kurzer Ausblick bilden den Abschluss in Kapitel 7.

2. Monitoringkonzept

Aufbauend auf den Anforderungen des Projekts an die Ingenieurgeodäsie ist das Monitoringsystem konzipiert worden. Diese Anforderungen lassen sich durch 5 Punkte beschreiben:

1. Analytische Beschreibung der aktuellen Geometrie für die Verwendung in strukturellen Berechnungen
2. Flächenhafte Beschreibung der Verformung
3. Toleranzwert für die zu erfassende geometrische Verformung: $10\text{ cm} \rightarrow 1\sigma \sim 2\text{ cm}$
4. Verfügbares Zeitfenster von einem Tag für
 - Messung
 - Auswertung (Verformung und Flächenapproximation)
5. Autark operierende Sensoren über einen Zeitraum von 2 Monaten (keine Zugangsmöglichkeit).

Zur Einhaltung dieser Anforderungen ist aus geodätischer Sicht folgendes einzurichten:

1. Definition von Koordinatensystemen, insbesondere eines Referenzkoordinatensystems, realisiert durch den Aufbau und die Einmessung eines klassischen Festpunktfeldes.
2. Objektmonitoring
 - Manuelle Netzmessung
 - Autarkes Monitoring (Automatische Erfassung und automatische/semiautomatische Auswertung)

3. Festlegung der Koordinatensysteme und deren Realisierung

Zusätzlich zum Referenzkoordinatensystem sind drei weitere Koordinatensysteme einzuführen, um einerseits den Einfluss der Lasten aus den verschiedenen Abschnitten des Bauprozesses auf die Geometrie direkt darstellen zu können und andererseits den Anforderungen an die Geometrie für die strukturelle Berechnung gerecht zu werden.

3.1. Globales Koordinatensystem

Das Festpunktdesign hat einen hierarchischen Aufbau von Punktgruppen entsprechend ihrer Stabilitätseigenschaften, angefangen mit gesicherten Beobachtungspunkten (1), ungesicherten Beobachtungspunkten (2) und Objektpunkten (3), [2].

Realisiert ist das Referenzkoordinatensystem als Baustellennetz basierend auf vier ÖBB-Festpunkten (1) in einer nahezu quadratischen Anordnung um die Wildbrücke. Dieses ist definiert als

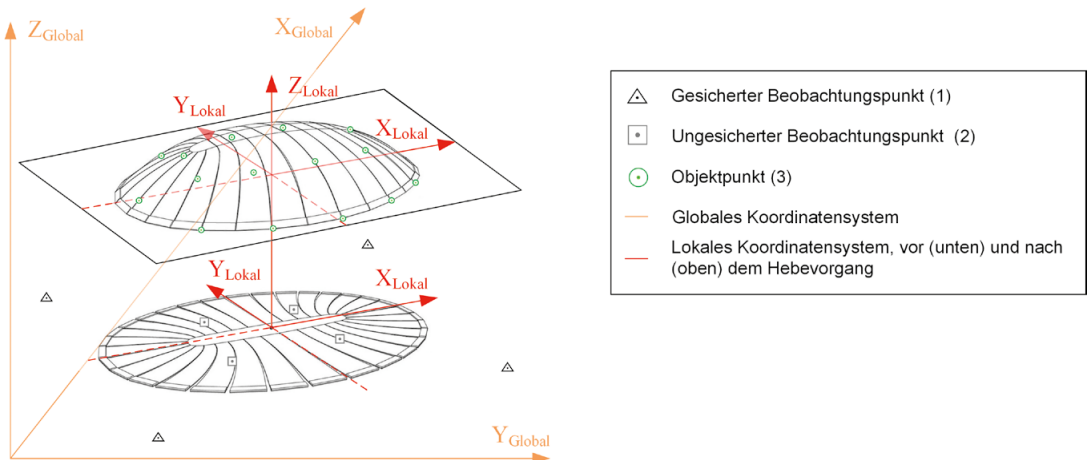


Abb. 2: Schematischer Überblick der Koordinatensysteme, der Beobachtungs- und Objektpunkte

kartesisches 3D Koordinatensystem und gelagert als horizontbezogenes 2,5D auf den vier ÖBB-Festpunkte mit zusammengeführten 2.5D-Koordinaten aus Lage und Höhe ohne Berücksichtigung von geometrischen Reduktionen. Das Netzdesign resultierte infolge einer a priori Netzoptimierung mit Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten unter Berücksichtigung der äußeren Einflüsse (Sichtverbindung, Bauprozessablauf, geometrisch relevante Objektpunkte, ...).

Um im Inneren der Schale für das spätere Monitoring der Objektpunkte (3) den Anschluss ans Baustellenetz zu gewährleisten, ist die Netzgeometrie der Festpunkte um Kugelprismenaufnahmen (2) (Nester) auf der Bodenplatte erweitert worden. Eine zusätzliche Stützung dieses sogenannten „inneren“ Netzes erfolgte durch weitere Nester auf Höhe der Fundamente an den inneren Rändern der Schale, siehe Abbildung 2. Der Grund für den Einsatz von Kugelprismen besteht in der optimalen Verknüpfung zweier Messsysteme, der tachymetrischen Prismenmessung auf den Kugelmittelpunkt und des Nivellements über die Kugelaußenseite. Dabei ist lediglich beim Letzteren die Reduktion um den Kugelradius auf den Mittelpunkt erforderlich.

In diesem Koordinatensystem lassen sich die absoluten Abweichungen gegenüber dem SOLL Zustand des Objektes ableiten. Diese absoluten Abweichungen resultieren aus einer Kombination von Einflüssen aus den einzelnen Abschnitten des Bauprozesses:

- Absteckung und Schalungsbau
- Starrkörperbewegung während des Hebevorgangs
- Lokale geometrische Veränderungen während des Hebevorgangs

3.2. Lokales Koordinatensystem zur Beschreibung der SOLL-Geometrie

Das lokale Koordinatensystem orientiert sich an den Hauptachsen des Objektes, wobei die untere Kante der Schale die X-Y Ebene definiert und die Ausrichtung der Achsen den Hauptachsen der Schalenfigur entsprechen. Der Hauptachsenschnittpunkt definiert den Nullpunkt des Koordinatensystems mit der Z-Achse senkrecht auf der X-Y Ebene, siehe Abbildung 2. Auf dieses Koordinatensystem bezieht sich das Design und die Optimierung der Geometrie für den Bauprozess und die strukturelle Belastungen.

3.3. Lokale Koordinatensysteme zur Beschreibung der IST-Geometrie

Zur Beschreibung der IST-Geometrie sind zwei Koordinatensysteme definiert worden, deren Datum im folgenden Kapitel erläutert wird. Das erste Koordinatensystem, mit Restriktionen, wird für die Beschreibung der IST-Geometrie in der strukturelle Berechnung verwendet, da dieses eine klare Unterkante der IST-Geometrie und somit einen klaren Anschluss zum Fundament festlegt. Das Datum zwischen den beiden genannten Koordinatensystemen entspricht der Starrkörperbewegung der Schale während des Hebevorgangs.

Das zweite Koordinatensystem, ohne Restriktionen, wird zur Darstellung relativer geometrischer Veränderungen der Schale gegenüber der SOLL-Geometrie ohne die Anteile der Starrkörperbewegung verwendet. Das Datum entspricht einer bestmöglichen Anpassung der IST-Geometrie gegenüber der SOLL-Geometrie.

3.4. Beziehung zwischen den Koordinatensystem der SOLL- und IST-Geometrie

Die Elemente des Datums des ersten Koordinatensystems mit Restriktionen werden getrennt voneinander festgelegt. Dabei spannt die Ebene, geschätzt aus der Punktwolke der Bodenplatte, die X-Y Ebene des Koordinatensystems auf und definiert die Rotation um die X- und Y-Achse, sowie den Nullpunkt in Z Richtung, der auf der Ebene liegt. Die Rotation um die Z-Achse und die Translationen der X- und Y-Richtung werden flächenhaft mithilfe eines Teilausschnittes der Punktwolke bestimmt. Der Ausschnitt entspricht einem ein Meter hohem horizontalem Bad beginnend von der Bodenplatte. Dieser Ausschnitt entspricht überdies dem verformungsärmsten Bereich der Schale, sodass mithilfe des ICP (Iterative closest point algorithm) zwischen der SOLL- und IST-Punktwolke jeweils mit gleicher Auflösung die genannten Parameter geschätzt werden können. Die Bestimmung der Datumparameter erfolgt stufenweise äquivalent zu der Abfolge im Text.

Das Datum des zweiten Koordinatensystems ohne Restriktionen wird über eine flächenhafte bestmögliche Anpassung der gesamten Punktwolke an die SOLL-Geometrie festgelegt. Dabei werden alle Datumselemente, die drei Rotationen und drei Translationen, auf einmal geschätzt. Dies erfolgte mittels ICP unter Verwendung der vollständigen IST-Punktwolke und einer Sollpunktwolke mit gleicher Objektauflösung. Eine bestmögliche

Anpassung über die Prismen allein ergab kein repräsentatives Ergebnis aufgrund des geringen Diskretisierungsgrades der Schale.

4. Realisierung des Objekt Monitoring

Zur geometrischen Untersuchung des Objekts wurden während der Bauphase epochale Messungen in Form von manuellen Einzelmessungen und dauerhaften Messungen, die automatisch durch stationäre Sensoren erfolgten (autarkes Monitoring), durchgeführt. Die Messungen erfolgten jeweils flächenhaft durch einen terrestrischen Laserscan und punktuell durch definierte Prismen. Erfasst wurde jeweils die Unterseite der Schale im gehobenen Zustand. Die Referenzierung beider Messverfahren erfolgte über die Nester am Boden (siehe Kapitel 3.1).

Die erste Formkontrolle (0. Epoche) wurde nach der Stabilisierung der gehobenen Schale und nach dem Einbringen des Monitoringequipments erstellt. Mit der anschließenden Herstellung der Erdrampen fand, bedingt durch den täglich veränderten Lastzustand infolge der kontinuierlichen Aufschüttmaßnahmen, das zwei monatige Monitoring statt. Danach sind einzelne Messungen im größeren zeitlichen Abstand jeweils nach Veränderung des Lastzustandes ausgeführt worden. Beispielhaft hierfür sei die Fertigstellung der Sichtschutzfundamente mit 77 t streifenförmiger direkter Auflast, der Abbruch der Bodenplatte mit der Durchtrennung des Zugbandes und die Schlussvermessung des Bauwerkes genannt. Der

Abbruch der Bodenplatten mit dem enthaltenen Zugband erforderte einen gesonderten Messaufbau, da die Anforderungen an die Genauigkeit zur signifikanten Detektion von Fundamentverschiebungen quer zur Durchgangsrichtung um den Faktor 10 ($1\sigma \sim 2\text{ mm}$) höher waren als in den bisherigen Abschnitten. Zur Vergleichbarkeit der Datensätze erfolgte die Referenzierung über das eingerichtete Baustellenfestpunktfeld.

Besondere Anforderungen waren an die Zuverlässigkeit des autarken Monitoringsystems gestellt, die entsprechend eine redundante Auslegung des Gesamtsystems implizierte. Die Redundanz zur Erfassung der Geometrie bildeten zwei Messmethoden: Einerseits die punktbezogene Erfassung über 28 Prismen und zwei Tachymetern und andererseits eine reflektorlose flächenhafte Aufnahme mit einer scannenden Totalstation.

Die Ansteuerung geschah wahlweise über eine Funk- (WLAN) oder Kabelverbindung von zwei miteinander verbundenen mini PC's aus. Darüber hinaus gab es weitere Komponenten zur Kommunikation zwischen den Geräten und der Erfassung der atmosphärischen Bedingungen. Alle Komponenten erhielten ihre Energie über einen 12V Stromkreis, der mit Notstromkomponenten ausgestattet war und im Falle eines Ausfalls des Baustellengenerators einen Ein-Tagesbetrieb des Systems sicherstellte. Die Erfassung und ersten Schritte der Datenauswertung erfolgten vollautomatisch. Es bestand die Möglichkeit eines Fernzugriffs zur Wartung und Steuerung des Systems.

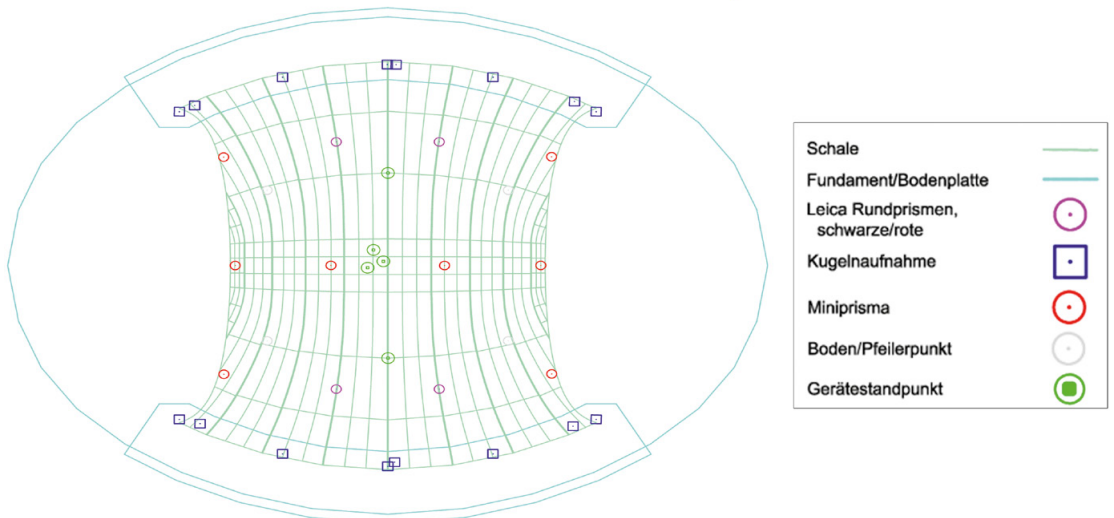


Abb. 3: Prismenanordnung innerhalb der Schale

Das gesamte Mess- und Auswertesystem ist eine Eigenentwicklung der TU Wien und bietet Erweiterungsmöglichkeiten für weitere Sensoren. Die Zuordnung des Baufortschritts zu resultierenden Geometrieveränderungen zeigten Webcamaufnahmen im Außenbereich der Schale.

Alle erzeugten Daten innerhalb eines Monitorings sind über die Ethernet Schnittstelle und NTP zeitlich referenziert. Dies ist wichtig, um die Daten aller Sensoren miteinander vergleichen und um den zeitlichen Verlauf der Messungen mit ggf. aufgetretenen Verformungen abbilden zu können.

Der Messaufbau für das Monitoring und für die epochalen Messungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Die zwei Tachymeter Leica TS16 und die scannende Totalstation Leica MS60 sind in der Nähe des Nullpunkts des Lokalen Koordinatensystems positioniert. Dies bietet einerseits den Vorteil kleiner Auftreffwinkel bei der reflektorlosen Distanzmessung und andererseits die Möglichkeit mit allen drei Geräten die gleichen Referenzpunkte am Boden für die Stationierung anzumessen. Die 28 Prismen wurden in vier Höhen homogen auf die Fläche verteilt: Auf der Bodenplatte, 0,5 m über der Bodenplatte, in ca. 4 m Höhe und an der höchsten Stelle der Schale in ca. 8 m Höhe. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass die Prismen entlang der späteren Portalkanten verlaufen. Die restlichen Monitoringkomponenten wurden möglichst in den Außenbereich der Schale verlagert, um unmittelbaren Zugriff zu gewährleisten, da das Innere der Schale nach dem Einbringen des Equipments nicht mehr betreten werden durfte.

Die Messzyklen während des zweimonatigen Monitorings wurden für die Prismenmessungen bei einer Messdauer von 10 Minuten auf 1 Stunde festgelegt. Dabei wurden die beiden Tachymeter um 30 Minuten versetzt gestartet, um gegenseitige Beeinflussung während der Messung zu vermeiden. Somit stand alle 30 Minuten eine punkt-basierte Messepoche zur Verfügung. Die Prismenmessungen wurden unmittelbar vollautomatisch ausgewertet. Meldungen auf signifikante Verschiebungen wurden automatisch erstellt und an die Bereitschaftsstelle weitergeleitet.

Die flächenhafte Messung fand im 12 h-Intervall statt und wurde jeweils um 7 und 19 Uhr gestartet. Die Messzeit betrug 8,5 h bei einer Objektauflösung von maximal 3 cm.

In den Einzelepochen ist jeweils eine punkt-basierte Messung auf Prismen und eine flächenhafte

Aufnahme durchgeführt worden. Zur Beschleunigung der flächenhaften Aufnahme kam eine 2-Standpunktlösung zum Einsatz, die über das Referenzfestpunktfeld verknüpft wurde. Die Kombination der Messmethoden war schnell genug, um auf geometrische Veränderungen im Bauprozess reagieren zu können.

Schwierigkeiten während der Messung sind bei äußeren Bedingungen mit anhaltend hoher Luftfeuchtigkeit aufgetreten. Diese führte vereinzelt zur Kondenswasserbildung auf den Prismen und auf der Innenseite der Schale. Folglich konnten weder Prismen noch die Oberfläche reflektorlos angemessen werden, was zu Fehlstellen in der Punktwolke führte. Die Größe der Fehlstellen stellte für die Verformungsanalyse kein Problem dar. Sie war jedoch für die Flächenmodellierung und die strukturmechanische Berechnung relevant, da diese auf ein geschlossenes geometrisches Modell beruhen (siehe Kapitel 6).

5. Auswertung

Die Auswertung erfolgte in drei Schritten. Der erste bezieht sich auf die klassische geodätische Ausgleichung des Baustellennetzes (des Referenzrahmens), während der zweite die Verformungsanalyse als Zielsetzung hat. Der dritte Schritt beinhaltet die Modellierung der Punktwolke für die strukturmechanische Berechnung und wird gesondert im 6. Kapitel behandelt.

Die Netzausgleichung erfolgte in drei Schritten mit der Software Panda beginnend mit einer Lageausgleichung (2D) zur Bestimmung der Lagekoordinaten der Bodenpunkte. Als zweites wurden die Nivellementbeobachtungen von den ÖBB Pfeilern über die Bodenpunkte separat als Höhennetz ausgeglichen. Die beiden Ergebnisse wurden anschließend in einer dritten 3D-Netzausgleichung zusammengeführt, wobei die Höhen auf den Kugelmittelpunkt der Kugelprismen reduziert wurden. Die Lagerung in den 1D und 2D Ausgleichungen erfolgte mit Teilspurminimierung der ÖBB-Punkte. Das 3D-Netz wurde hingegen weich auf diese Punkte gelagert, da eine Einzelkomponentenlagerung nicht unterstützt wird. Das erzielte Ergebnis lag innerhalb der Genauigkeitsanforderungen mit der maximalen Standardabweichung aller Netzpunkt von $\rightarrow 1 \sigma_{apost} \sim 0.4 \text{ mm}$. Dies konnte durch eine Kontrollmessung vor dem Abbruch der Bodenplatte bestätigt werden.

Die Verformungsanalyse auf Basis der punkt-basierten Prismen-Messungen erfolgte nach dem Kongruenzmodell der Deformationsanalyse [2].

Hierbei werden die Verschiebungen zwischen den definierten Prismenpunkten und die zugehörigen Kovarianzmatrizen geschätzt und mithilfe des Hypothesentests auf eine signifikante Verschiebung hin untersucht. Nach Abschluss jeder gemessenen Epoche erfolgte ein Kongruenztest mit den Ergebnissen der 0. Epoche sowie mit denen der letzten Epoche aller Punkte vollautomatisch.

Die flächenhafte Abweichung ist abgeleitet aus der rohen Punktwolke. Im Vergleich zur Prismenuntersuchung konnte keine Analyse nach dem Kongruenzverfahren durchgeführt werden, da keine direkte Punktzuordnung möglich ist und das stochastische Modell für die reflektorlose Distanzmessung aktueller Forschungsgegenstand ist [3], [4]. Als erstes Auswertergebnis ist eine Abweichung zwischen der geplanten SOLL-Geometrie und der IST-Geometrie berechnet worden.

Die SOLL-Geometrie ist durch ein flächenhaftes Modell (B-Spline Fläche, siehe Kapitel 6) beschrieben, während die IST-Geometrie durch die gemessene Punktwolke repräsentiert wird. Analog zur Prismenauswertung fanden auf Basis der erstellten Punktwolken Vergleiche zur IST-Geometrie der 0. bzw. der letzten Epoche statt. Zur Bestimmung der Abweichungen kam der M3C2 Algorithmus [5] zum Einsatz. Dieser schätzt in der Nachbarschaft eines jeden Punktes der Referenzgeometrie eine Ebene. Der Normalenvektor wird in diesem Punkt als Richtung für die Abweichung verwendet. Der Betrag resultiert als Abstand zwischen der Ebene und dem zum Normalenvektor nächstgelegenen Punkt der zu vergleichenden Punktwolke. Das Vorgehen entspricht einem Lotfußpunktverfahren.

Über die Modellierung der Punktwolke wäre ein Vergleich auf Basis der Kongruenzanalyse realisierbar. Ein entsprechendes Flächenmodell wäre jedoch für die strukturmechanische Berechnung nicht verwendbar. Der größte Unterschied besteht in der Erstellung einer generalisierten oder geglätteten Oberfläche, die zu Informationsverlust der Oberfläche führt und die Deformationsanalyse beeinträchtigt. Darüber hinaus gibt es weitere Merkmale, die in Kapitel 6 ausführlich beschrieben werden. In dieser Arbeit lag der Schwerpunkt auf der Modellierung der Geometrie für strukturmechanische Berechnungen. Die Feststellung der Abweichungen aus den rohen Punktwolken nach der oben beschriebenen Vorgehensweise war für die Einschätzung einer erforderlichen Neuberechnung der Statik auf Basis der IST-Geometrie ausreichend.

Eine Vorgehensweise zur Gegenüberstellung der flächenhaften Abweichungen, die auf Basis modellierter Punktwolken hergeleitet wurden, und Abweichungen aus der Prismenmessung wurde in der Masterarbeit von Johannes Falkner vorgestellt. Die Grundidee ist dem M3C2 Algorithmus angelehnt, wobei die Abweichungsrichtung diesmal aus der ersten Ableitung ($k=1$, $h=1$) der modellierten B-Spline Fläche,

$$\frac{\partial^{k+h}}{\partial^k u_C \partial^h v_C} C(u_C, v_C) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p_{u_C}}^{(k)}(u_C) N_{j,p_{v_C}}^{(h)}(v_C) P_{i,j} \quad (5.1)$$

berechnet wird. $N_{i,p_{u_C}}$ und $N_{j,p_{v_C}}$ beschreiben die Basisfunktionen, p_{u_C} und p_{v_C} den Grad der jeweiligen Basisfunktionen, $n+1$ und $m+1$ die Anzahl von Kontrollpunkten $P_{i,j}$, jeweils in u und v Richtung. $C(u_C, v_C)$ entspricht dem ausgeglichenen Punkt auf der B-Spline Fläche.

Der berechnete Lotfußpunkt des Prismas liegt ebenfalls auf der modellierten B-Spline Fläche. Approximiert wurde die B-Spline Fläche aus der Punktwolke, genauer beschrieben im nachfolgenden Kapitel. Die Bestimmung des Lotfußpunktes erfolgt iterativ. Dabei wird der Lotfußpunkt so lange auf der B-Spline Fläche verschoben, bis die Lotrichtung durch den Prismenpunkt verläuft. Danach steht pro Epoche ein Prismenpunkt und ein Lotfußpunkt auf der B-Spline Fläche zur Verfügung. Verglichen werden nun die epochalen Differenzen zwischen den Lotfußpunkten bzw. zwischen den Prismenpunkten. Der Betrag und die Verschiebungsrichtung wurde wie in Abbildung 4 beispielhaft gegenübergestellt [6].

Auffällig ist die gute Übereinstimmung der Verschiebungsbeträge. Dies zeigt, dass das Verfahren grundsätzlich vielversprechend ist. Wie Abbildung 4 rechts zeigt, kann es jedoch vorkommen, dass sich die Verschiebungsrichtung bei kleinen Verschiebungswerten grob unterscheidet. In zukünftigen Arbeiten gilt es solche Diskrepanzen näher zu analysieren. In einem ersten Schritt soll die Einbeziehung der stochastischen Eigenschaften der Messungen eine Beurteilung dieser Richtungsabweichung in Bezug dazu ermöglichen.

6. Strukturmechanische Berechnung

Die Aufbereitung der IST-Geometrie erfolgte über die Approximation der Punktwolke durch eine kontinuierliche B-Spline Fläche. Die Anforderungen an diese Fläche ergaben sich einerseits

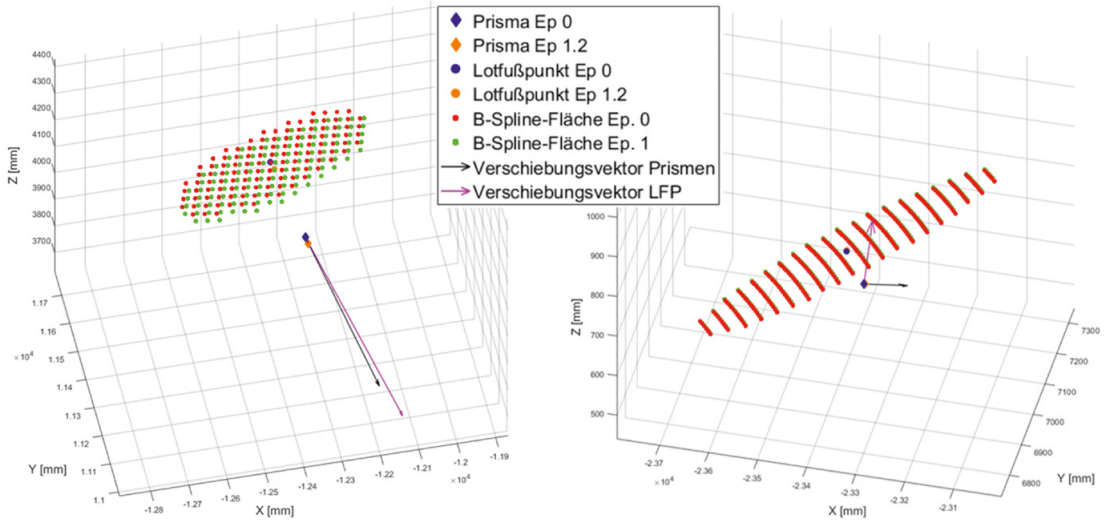


Abb. 4: Vergleich modellierte Punktwolke zu Prismenmessung, links: Δ Punktwolke: 11,3 mm – Δ Prisma: 9,3 mm rechts: Δ Punktwolke 1,5 mm – Δ Prisma: 1,4 mm

aus den notwendigen Eigenschaften im Finite Elemente Modell (FEM) und andererseits aus der eingesetzten Software.

Als Schätzverfahren für die Flächenparameter ist das klassische Gauß-Markov Modell zum Einsatz gekommen [7]. Approximiert wird die mittels scannender Totalstation gemessene Punktwolke durch das B-Spline Flächenmodell unter Zuhilfenahme der parametrischen Darstellung. Bei dieser Form ist jedem gemessenen Punkt C in kartesischen Koordinaten (x, y, z) ein homologer Punkt im Parameterraum (u_C, v_C) zugeordnet:

$$\hat{C}(u_C, v_C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p_{u_C}}(u_C) N_{j,p_{v_C}}(v_C) P_{i,j} \quad (6.1.)$$

Als Beobachtungen im Schätzverfahren dienen die Einzelpunkte C der Punktwolke. Geschätzt werden die Kontrollpunkte der B-Spline Fläche $P_{i,j}$. Zuvor werden für jeden Punkt mithilfe der Projektion auf die Soll-Fläche homologe Parameter (u_C, v_C) abgeleitet. Der Grad der Basisfunktionen in beiden Richtungen wurde auf drei festgelegt. Die Anzahl der Kontrollpunkte ist von der FEM Software auf 100 begrenzt. Um die Anforderung der strukturmechanischen Berechnung an eine klare Fundamentkante zu erfüllen, sind entsprechende Nebenbedingungen für den Flächenrand eingeführt worden. Diese zwingen die Flächen-

ränder auf einen Horizont, der wie in Kapitel 3.4 beschrieben, in der Ebene $Z=0$ liegt.

Das stochastische Modell fließt als Einheitsmatrix in das Gauß-Markov-Modell ein.

Die in der Abbildung 5 dargestellten Residuen resultieren aus zwei Quellen:

- Messabweichungen
- Abweichungen der IST-Geometrie von einer B-Spline Fläche aufgrund der generalisierten/geglätteten Geometrie

Die Messabweichung bezieht sich auf die immanente zufällige Abweichung einer Beobachtung. Der geometrische Fehler entspricht dem Generalisierungsfehler, der eine Geometrieabweichung aufgrund der geglätteten Oberfläche aufweist. Diese spiegeln sich in regelmäßigen wellenartigen Mustern in den Residuen wieder. Trotz der Residuenbeträge von bis zu 8 cm entlang der Elementkanten der Schale erfüllt das Ergebnis die gesetzten Anforderungen. An diesen Stellen verbirgt sich ein zurückversetzter Freiraum, der die kontinuierliche Oberfläche unterbricht und durch die Approximation interpoliert werden muss. Die geschätzte kontinuierliche Fläche ist in Abbildung 6 dargestellt.

Aufgrund der Schalenform wird die so erzeugte Geometrie als Schalentragswerk berechnet und nicht als geometrisches Volumenmodell. Diese Schale entspricht einer mittleren Niveaufläche des

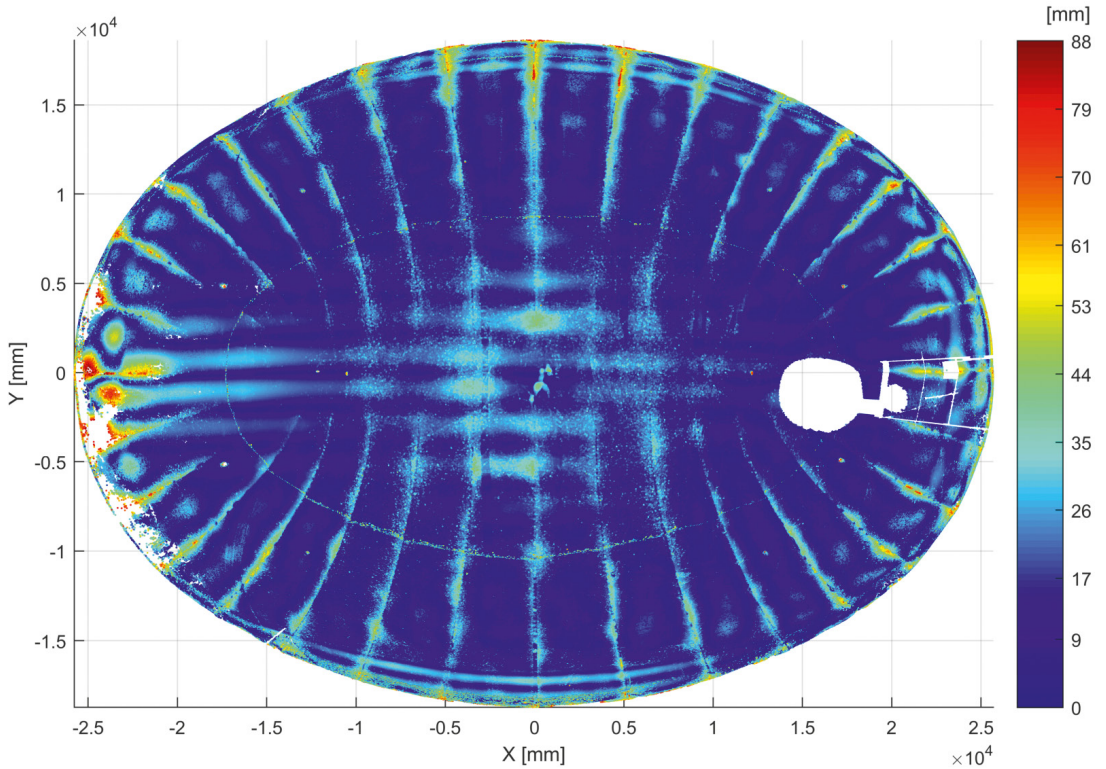


Abb. 5: Residuen der B-Spline Approximation

Baukörpers und repräsentiert dessen statische Eigenschaften. Im Vergleich zur gemessenen Oberfläche entspricht diese einer generalisierten oder geglätteten Oberfläche verschoben ins Innere des Baukörpers, die in einem lotrechten Koordinatensystem definiert ist, um die Belastung (Eigengewicht und externe Belastung) entsprechend der Schwerkraft im FEM modellieren zu können.

Über die FE-Netzgenerierung wird die Geometrie in das FEM eingebracht. Dieser Schritt des Netzdesigns ist entscheidend für eine zuverlässige Tragwerksanalyse im Belastungsfall. Die Bausteine sind eine kontinuierliche Fläche mit klaren Kanten zu den Lastübergangspunkten (Fundamente). Auf dieser kontinuierlichen Fläche erzeugt der Netzgenerator automatisch ein FE-Netz mit möglichst hoher analytischer Lösungsstabilität.



Abb. 6: CAD Darstellung der Approximierten B-Spline Fläche

Das Netz kann je nach Verformung des Objektes und den Schwellwertdefinitionen eine andere Geometrie (Dreiecks-, Vierecksvermaschung, ...) oder einen anderen Diskretisierungsgrad (Kantenlänge der Einzelobjekte) erreichen. Kanten werden dabei immer direkt von der Geometrie abgegriffen, sodass Löcher auf Grund von fehlenden Messwerten trotz kontinuierlichem Objektverlauf durch die Flächenapproximation interpoliert werden müssen. Die Definition der Schwellwerte hängt meist von dem eingesetzten Softwareprodukt ab und muss bei Bedarf angepasst werden. Gleiches gilt für die Schnittstelle zum Einlesen der Geometrie. Diese Schnittstelle stellte hier das „iges“ oder „iges“ Dateiformat dar. Der Vorteil dieses Dateiformats ist die vollständige parametrische Unterstützung der B-Spline Flächenfunktion ohne vorherige Interpolationen der Geometrie, wie diese z.B. beim „.stl“ Dateiformat als Repräsentation der B-Spline Fläche durch eine eigens gewählte Dreiecksvermaschung geschieht. Eine weitere Rahmenbedingung der eingesetzten Software RFEM der Firma Dlubal ist die Beschränkung der maximalen Anzahl von Kontrollpunkten der B-Spline Fläche auf 100 ($m * n = 100$).

7. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt konnte ein leistungsstarkes autarkes Monitoringsystem für die baubegleitende ingenieurgeodätische Formüberwachung einer Freiformschale entwickelt und unter realen Bedingungen zur Anwendung gebracht werden.

Gleichzeitig wurden aktuelle Forschungsinhalte zu flächenhaften Auswerteverfahren in der Praxis eingesetzt. Diese beziehen sich insbesondere auf die Ableitung von kontinuierlichen B-Spline Flächen aus Punktwolken. Für die Verwendung dieser Flächen in strukturmechanischen Berechnungen ist ein Workflow von der Aufnahme über die Modellierung und Berücksichtigung der Software-schnittstelle hin zur strukturmechanischen Berechnung entwickelt worden. Berücksichtigt wurden dabei von Beginn an die Anforderungen der strukturmechanischen Berechnungen an die zu erstellende Geometrie in Form von festgelegten Koordinatensystemen und der gewählten geometrischen Modellierungselemente.

Abschließend sind Ansätze eines Verfahren gezeigt worden, um Aussagen zur Qualität der approximierten B-Spline Fläche im Vergleich zu klassischen Prismenmessungen treffen zu können. Dieses Verfahren ist aktueller Forschungsgegenstand und wird in der Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie weiterentwickelt.

Referenzen

[1] *B. Kromoser*: Pneumatisches Verformen von ausgehärtetem Beton. TU Wien Vienna, 2015.

- [2] *O. Heunecke, H. Kuhlmann, W. Welsch, A. Eichhorn, und H. Neuner*: Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann Verlag, 2013.
- [3] *D. Wujanz, M. Burger, M. Mettenleiter, und F. Neitzel*: An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., März 2017, 125, 146–155.
- [4] *M. Zamecnikova und H.-B. Neuner*: Investigation of the distance dependence of the combined influence of the incidence angle and the surface roughness on the reflectorless distance measurement of a scanning total station. Allg. Vermess.-Nachrichten AVN Begutachtete Beitr., 2017, 124, 11–12, 353–361.
- [5] *M. R. James, S. Robson, und M. W. Smith*: 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. Earth Surf. Process. Landf., Sep. 2017, 42, 12, 1769–1788.
- [6] *J. Falkner*: Flächenhaftes Monitoring einer Freiformschale. Wien, 2017.
- [7] *C. Schmitt, H. Neuner, I. Neumann, J. Piehler, M. Hansen, und S. Marx*: Erstellung von Ist-Geometrien für strukturmechanische Berechnungen. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, A. Wieser, Hrsg. Heidelberg, Wichmann Verlag, 2014, 37–48.

Anschrift der Autoren

Univ.-Ass. Claudius Schmitt MSc., Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, Gußhausstraße 27-29/ E120.5, 1040 Wien.
E-Mail: claudius.schmitt@geo.tuwien.ac.at

Univ.Prof. Dr.-Ing. Hans Neuner, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, Gußhausstraße 27-29/ E120.5, 1040 Wien.
E-Mail: hans.neuner@geo.tuwien.ac.at