

# **TLS im Olympiapark**

## **– Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten des terrestrischen Laserscannings (TLS) im modernen Bauwesen**

Karl FOPPE, Thomas SCHÄFER und Thomas WEBER

*Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Organisationskomitee als „reviewed paper“ angenommen.*

### **Zusammenfassung**

Anhand dreier Pilotprojekte im Olympiapark München unter Federführung des Lehrstuhls für Geodäsie der Technischen Universität München wird gezeigt, welche Möglichkeiten der Einsatz des terrestrischen Laserscannings (TLS) im modernen Bauwesen bietet. Neben den eigentlichen Vermessungsarbeiten und der entsprechenden Auswertung und Modellierung, werden die sich ergebenden baubegleitenden Aufgabenstellungen für den Vermessungsingenieur präsentiert. Darüber hinaus wird am konkreten Beispiel gezeigt, dass sich aus den modellierten Daten ungewöhnliche Folgeprodukte ableiten lassen, die der Ingenieurgeodät dem Auftraggeber als zusätzliche Leistung anbieten kann. Dem interessierten Praktiker werden Anregungen gegeben, wie sich durch konsequente Nutzung des TLS in Kombination mit anderen, sowohl klassischen als auch modernen Messverfahren die Ingenieurgeodäsie in den gesamten Bauprozess integrieren lässt.

## **1 Motivation**

### **1.1 Terrestrisches Laserscanning im modernen Bauwesen**

Terrestrisches Laserscanning höchster Präzision (TLS) hat sich in den letzten fünf Jahren insbesondere im Architektur- und Bauwesen zu einem universellen Messverfahren zur Aufnahme von Bauten entwickelt. Standardeinsatz ist die dreidimensionale Vermessung von Gebäuden bzw. Teilen von Gebäuden und die Erstellung digitaler Pläne. Dabei beschränkt sich das Aufgabenspektrum normalerweise auf die eigentliche Datenerfassung, die häusliche Datenaufbereitung sowie die spätere Visualisierung in digitaler Form. Diese reinen Dienstleistungen werden zunehmend auch von Anbietern außerhalb der Geodäsie und des Vermessungswesens übernommen.

Dabei bietet sich durch den Einsatz der modernen TLS-Verfahren für den Vermessungsingenieur mehr und mehr die Möglichkeit, sich aktiv in den Bauprozess einzubringen. Längst beschränken sich die Obliegenheiten nicht mehr auf die Überprüfung der geometrischen

Qualität der aufgenommenen Daten und der erstellten Pläne als Endprodukt. Vielmehr werden Vorgaben für die Fertigung gegeben durch Modellierung bestehender und anzufer-tigender Bauteile als beispielsweise mehrfach gekrümmte Flächen oder Freiformkörper (DRIXLER 1993). Der Vermessungsingenieur wird also aktiver Posten innerhalb des Pro-duktionsprozesses (STAIGER & WUNDERLICH, 2006).

## 1.2 Olympiapark München

Nach den Olympischen Spielen von München 1972 hat sich aus den Sportstätten rund um den Olympiaturm ein weltweit beachtetes Freizeit- und Veranstaltungszentrum entwickelt, das jährlich über fünf Millionen zahlende Besucher zu sportlichen, touristischen oder künst-lerischen Veranstaltungen anzieht. Dazu kommen tausende Spaziergänger oder Jogger, so dass der Olympiapark München also nicht nur einen Anziehungspunkt für Touristen oder für Architekturliebhaber darstellt, sondern auch immense Bedeutung für die Münchner Bevölkerung hat. (OLYMPIAPARK-MÜNCHEN GMBH. 2006)

Den Lehrstuhl für Geodäsie der TU München und die Olympiapark München GmbH als Betreibergesellschaft verbindet eine langjährige wissenschaftliche Kooperation. Somit wurde es möglich, Forschungsarbeiten und Pilotprojekte, die zum Teil im Rahmen von studentischen Aktivitäten realisiert wurden, an nicht alltäglichen Architekturobjekten durchzuführen. Im Rahmen aktueller Projekte hat der Lehrstuhl für Geodäsie im Olympia-park München Möglichkeiten aufgezeigt, wie sich die Integration der Geodäsie in den aktu-ellen Bauprozess praktisch umsetzen lässt.

## 1.3 Verwendetes Instrumentarium

### 1.3.1 Laserscanner



Der eingesetzte *LEICA Cyrax 2500* ist ein so genannter Camera-View-Scanner mit einem Sichtfenster von  $40^\circ \times 40^\circ$ . Über zwei Umlenkspiegel wird das Messobjekt mittels eines grünen Laserstrahls über den voreingestellten Scanbereich mit einer maximalen Abtastfrequenz von 1000 Punkten pro Sekunde erfasst. Zu jedem Koordinatentripel wird auch die Intensität des reflektierten Signals detektiert und als Falschfarbencode gespeichert (STAIGER 2002).

Winkelmessung  $\sigma_w = 60 \mu rad / 60 \mu rad$

Distanz (Impuls)  $\sigma_D = 4 mm$

Position ( $D=1,5...50m$ ):  $\sigma_P = 6 mm$

Werksangaben (LEICA GEOSYSTEMS AG 2006)

**Abb. 1:** Laserscanner *LEICA ScanStation*

Seit Oktober 2006 steht für diese Art Projekte das Nachfolgergerät die *LEICA ScanStation* (Abb. 1) zur Verfügung, mit deren Neuheiten bereits eine enorme Produktivitätssteigerung erreicht werden konnte.

### 1.3.2 Tachymeter



Netzmessung benötigter Passpunkte sowie die Erfassung von Kontrollpunkten erfolgte mit Hilfe eines Tachymeters *LEICA TCRP 1201* (Abb. 2).

Richtungsmessung:  $\sigma_r = \pm 0,3 \text{ mgon}$

EDM mit Reflektor:  $\sigma_p = \pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$

EDM Reflektorlos:  $\sigma_{RL} = \pm (3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$

Werksangaben (LEICA GEOSYSTEMS AG 2006)

**Abb. 2:** Tachymeter *LEICA TCRP 1201*

## 2 Erneuerung bauphysikalisch schadhafter Stahlbetonteile großen Ausmaßes im Münchener Olympiastadion

### 2.1 Problemstellung



**Abb. 3:** Blick in das Münchener Olympiastadion

Die Tribünen des Münchener Olympiastadions (Abb. 3) wurden 1972 in Stahlbetonweise ausgeführt. Die westliche Haupttribüne wird auf gesamter Länge durch einen Hohlkasten begrenzt, an dem sich bauphysikalische Schäden zeigten. Dieser Hohlkasten mit seiner sehr

komplexen Geometrie ist durch eine moderne, exakt eingepasste Stahlkonstruktion zu ersetzen (Abb. 4). Die geforderte Genauigkeit liegt bei 0,5 cm bis 1 cm in Lage und Höhe.



**Abb. 4:** Teil des Hohlkastens, der die Begrenzung der Haupttribüne darstellt

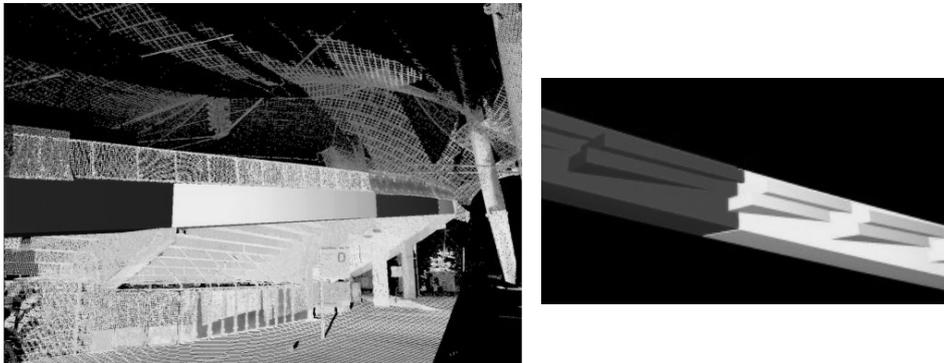
## 2.2 Vermessungsarbeiten

Die Bestimmung der Passpunkte im vorhandenen Gebäudeachsensystem des Stadions erfolgte tachymetrisch. Die Erfassung der 25 Einzelemente des Hohlkastens mit ihrer komplexen Geometrie sowie der angrenzenden Teile der Tribüne geschah mittels Laserscanning mit einer Auflösung von ca. 2 cm auf dem Messobjekt. Zur Kontrolle der Scannerdaten wurden die Eckpunkte der einzelnen Hohlkastenelemente sowie die an den Hohlkasten anbetonierten Bauteile (wie z.B. Tribünenstufen bzw. die sogenannten „Stummelstufen“) zusätzlich tachymetrisch bestimmt (Abb. 5).

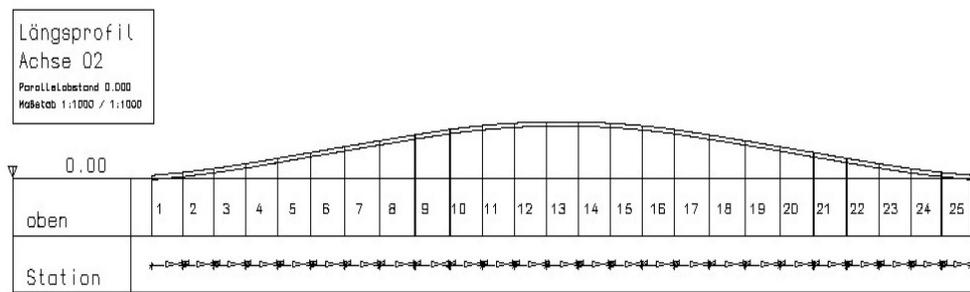


**Abb. 5:** Ober- und Unterseite der Hohlkastenkonstruktion an der Haupttribüne (oben links und rechts) sowie anbetonierte „Stummelstufen“ (unten links)

### 2.3 Auswertung und Modellierung



**Abb. 6:** Punktwolke und modellierter Hohlkasten an der Tribüne des Olympia-Stadions



**Abb. 7:** Längsprofil des modellierten Hohlkastens

Die Registrierung der insgesamt 125 Einzelscans in das Gebäudeachsensystem des Stadions erfolgte in der Scannersoftware Cyclone (LEICA GEOSYSTEMS AG 2006). Die erforderlichen Passpunkte wurden mittels schwarz-weißer Zieltafeln signalisiert und tachymetrisch eingemessen. Über den „Iterative Closest Point“-Algorithmus (ICP)“ (BESL & MCKAY 1992) und die Passpunkte konnten die einzelnen Punktwolken zueinander orientiert werden. Anschließend wurde die entstandene Gesamtpunktwolke auf den Bereich des Randbalkens und angrenzende Bauelemente reduziert (Abb. 6).

Aus der reduzierten Punktwolke waren die Innen- und Außenradien der einzelnen Hohlkastenträger zu bestimmen. Da jeder Hohlkasten mit einem anderen Radius betoniert worden war, musste die Oberfläche jedes einzelnen Kastens durch Dreiecksvermaschung separat ermittelt werden. Die vermaschte Hohlkastenfläche wird mittig mit einer Ebene orthogonal verschnitten. Daraus ergibt sich an der Innen- und an der Außenfläche jeweils eine Polylinie, aus denen im GAUß-HELMERT-Modell die Radien der Flächen ermittelt werden können. Über Verschneidung von Ebenen der Kastenoberfläche wurden die Auflagepunkte sowie der nötigen Dehnfugen zwischen den einzelnen Elementen ermittelt. Mit den so

gewonnenen geometrischen Parametern (Radien, Geraden, Eckpunkte usw.) wurden die einzelnen Kastenelemente in mehreren Teilen mittels CAD konstruiert und über boolesche Operationen miteinander vereinigt, verschnitten oder subtrahiert. Auf diese Weise können z.B. die anbetonierten Stummelstufen an die Kastenform modelliert werden. Das Ergebnis ist ein 3D-Volumenkörper, der an das einzelne Bauelement optimal angepasst ist. Aus diesen Modellen lassen sich beliebige Längs- (Abb. 7) und Querprofile ableiten, aus denen weitere Informationen zu entnehmen sind. Beispielsweise lässt sich die leichte Verwindung (Torsion) durch die jeweiligen Kastenobjekte ermitteln.

Die aufgenommene Punktwolke enthält jedoch noch weitere wichtige Daten, die unter anderem zur Optimierung des Bauprozesses genutzt werden können. So lassen sich beispielsweise mit den vorliegenden Informationen die optimalen Standpunkte und Höhen der während des Umbauprozesses erforderlichen Kräne planen. Dazu werden aus den modellierten Pylonen, Abstreberungen und Teilen der Zeltdachkonstruktion die entsprechenden Abstände zum Bauobjekt ermitteln. Diese betragen im oberen Teilbereich der Stadiontribünen oftmals weniger als 3 m und beschränken den Zugang zum Hohlkasten. Diese Einschränkungen erfordern eine sehr präzise Planung der Krananlagen.

Der Einbau des neu gefertigten Randbalkens hat derzeit noch nicht begonnen. Nach dem letzten Stand ist er im Laufe des Jahres 2007 vorgesehen.

## **2.4 Baubegleitende Tätigkeiten**

- Das dreidimensionale Modell der 25 Hohlkastenelemente des bestehenden Stahlbetonbauteils bildete die Grundlage der neuen Stahlkonstruktion
- Finden optimaler Standpunkte zum Aufstellen der Kräne
- Formkontrolle der angelieferten Segmente des neuen Randbalkens
- Einrichtung bzw. Absteckung beim Einbau

Nach dem Einbau der neuen Stahlkonstruktion muss diese zur Endkontrolle der Gewerke erneut aufgenommen werden.

# **3 Erneuerung der Dachmembran in der Olympiaschwimmhalle**

## **3.1 Problemstellung**

Eine unter der gesamten Dachfläche der Olympiaschwimmhalle zu erneuernde Folienmembran ließ sich nach der Aufnahme mittels TLS derart modellieren, dass optimierte Maße für den Zuschnitt der neuen Membran entwickelt wurden. Der Einbau der neuen Membran sowie deren ebenfalls erneuerten Aufhängung wurde schrittweise durch den Einsatz von TLS begleitet.



**Abb. 8:** Olympia-Schwimmhalle im Parkgelände

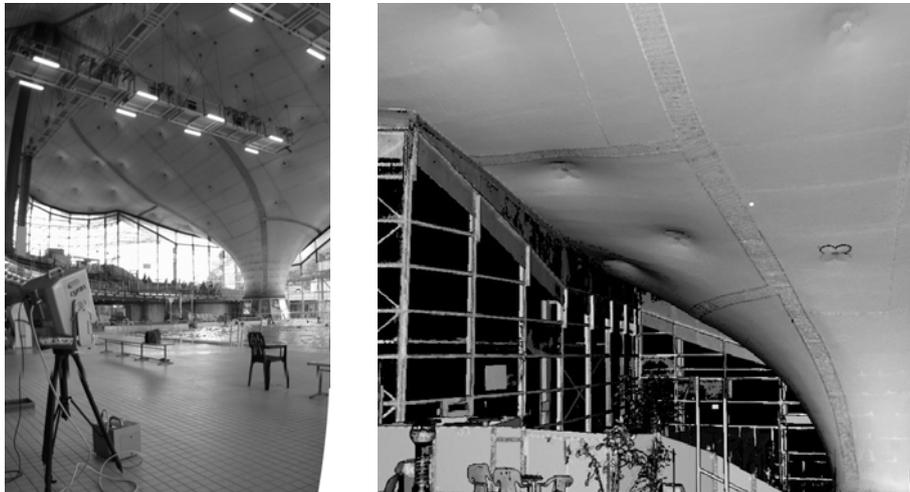
Die weltweit bekannte Zeltdachkonstruktion der Olympiaschwimmhalle besteht aus zwei Hochpunkten, die über einen Pylon von außen und einen zweiten im Innenraum gestützt werden (Abb. 8). Des Weiteren beinhaltet die Form zwei kreisförmige Tiefpunkte (Trichter). Nach außen hin wird das Dach über sieben Pylone und fünf bodennahe Verankerungen mittels Stahlseilen abgespannt. Unterhalb des Stahlseilnetzes verläuft eine über 219 Punkte abgehängte bzw. über 258 Punkte nach außen hin abgespannte Membran als Wärmeisolierung des Hallenkörpers, da die Fassade nicht bündig mit der „schwebenden“ Zeltdachkonstruktion abschließen kann (OLYMPIAPARK-MÜNCHEN GMBH. 2006).

Erste Aufgabe war die Bestimmung der komplexen Geometrie der abgehängten Decke (Membran) im Innen- und Außenraum inklusive der dreidimensionalen, geometrischen Lage aller Verbindungen der einzelnen Membran-Bahnen, wie Verschnürungen, Alunähte und Verschweißungen. Gleichzeitig waren alle Aufhängepunkte der Membran an die tragende Stahlkonstruktion des Zeltdachs, deren Abspannpunkte im Außenraum sowie die begrenzende Linien zwischen der Membran und der Stahlfassade zu erfassen. Während der Vermessungstätigkeiten sollte der laufende Badebetrieb nicht gestört oder beeinträchtigt werden. Die dreidimensionale Lage jedes einzelnen Punktes auf der Membran sollte mit einer Standardabweichung von besser als 2 cm ermittelt werden.

### 3.2 Vermessungsarbeiten

Zunächst wurde ein aus 11 Polygonpunkten bestehendes Grundlagennetz benötigt, welches den Innen- und Außenraum der Halle abdeckt, um sämtliche anfallenden Messungen in ein einheitliches Koordinatensystem überführen zu können. Als Bezugssystem wurde ein freies Koordinatensystem gewählt, das sich nach den Achsen des Wettkampfbeckens der Halle ausrichtet.

Die dreidimensionale Bestimmung der geometrischen Form der Membran geschah mittels Laserscannings, nachdem in Testmessung nachgewiesen wurde, dass alle Verbindungen zwischen den einzelnen Membranstücken miterfasst werden. Die Verbindungen konnten vor allem über die Intensität des reflektierten Laserstrahls eindeutig in der geforderten Genauigkeit erkannt werden (Abb. 9). Da auf dem Messobjekt selbst keine Markierungen angebracht werden konnten, musste auf die Messung mit Passpunkten nahezu vollständig verzichtet werden. Deshalb war es notwendig, die Verknüpfung von Punktwolken ausschließlich über den „Iterative Closest Point“-Algorithmus (ICP)“ (BESL & MCKAY 1992) zu verwirklichen. Das Ergebnis der Verknüpfungen wurde überprüft, indem ausgewählte, markante Punkte im Nachhinein nochmals tachymetrisch aufgemessen und mit den Scannerdaten verglichen wurden. Insgesamt wurden 36 Scans im Außenbereich und 30 Scans innerhalb der Olympiaschwimmhalle mit einer Auflösung von 2,0 cm bis 3,5 cm durchgeführt und dabei nahezu vierzig Millionen Punkte abgetastet. Sämtliche Aufhänge- bzw. Abspannpunkte, die auch als Passpunkte zur Orientierung der einzelnen Scanneraufnahmen dienten, sowie Punkte am Fassadenabschluss wurden über reflektorlose Tachymetrie erfasst (insgesamt 972 Einzelpunkte). (WEBER, 2005)



**Abb. 9:** Messung und Punktwolke (Intensitätsbild mit extrahierten Details)

### 3.3 Auswertung und Modellierung

Die Ausgleichung des lokalen Festpunktfeldes erfolgte mittels der Netzausgleichungssoftware Panda und ergab eine durchschnittliche Standardabweichung von ca. 2 mm für die dreidimensionale Punktlage. Die gescannten Punktwolken wurden mit der Software Cyclone über ihre Überlappungsbereiche mit einer mittleren Standardabweichung von 1 cm zueinander orientiert und dann über Passpunkte in das Bezugssystem überführt. Es ergaben sich maximale Restklaffungen von 7 mm. Daraufhin erfolgte eine Datenreduktion der Gesamtpunktwolke auf die für die Auswertung relevanten Messpunkte. Die Bestimmung der Verbindungen zwischen den Membranstücken erfolgte unter Zuhilfenahme der RGB-Farbinformationen der internen Scanner-Kamera. Für das digitale Oberflächenmodell (DOM) der abgehängten Isolierplane wurden die einzelnen Punkte vermascht und nochmals

ausgedünnt (siehe dazu auch SCHÄFER, WEBER, KYRINOVIČ & ZÁMEČNIKOVÁ 2004). Die Dreiecksvermaschung wurde nur noch durch 117.060 Punkte repräsentiert. Dennoch sind die „Dellen“, bedingt durch die 219 Aufhängepunkte, noch eindeutig in der Oberflächenstruktur zu erkennen (Abb. 10).



**Abb. 10:** Digitales Modell der aufgenommenen Membran in der Olympia-Schwimmhalle

Nach dem Varianz-/Kovarianzfortpflanzungsgesetz lassen sich die Einzelpunkte auf der Membran aus dem DOM im Sinne eines Helmert'schen Punktfehlers mit einer Standardabweichung von weniger als 2 cm ableiten, womit die Vorgaben eingehalten werden konnten. Ein exakteres Aufmaß würde mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden sein. Detaillierte Beschreibung der Auswertungen und Modellierungen finden sich in WEBER 2005.

### 3.4 Baubegleitende Tätigkeiten

- Das dreidimensionale Modell der Membran dient als Grundlage zur Bestimmung optimierter Maße für den Zuschnitt der neuen Membran.
- Die modellierten Kanten der Membran und der Stahlfassade dienten dazu, die zuvor aus Plexiglasplatten zwischen der Membran und der Fassade bestehende Abdichtung des Raumes durch ein Luftkissensystem zu ersetzen.
- Zur Erneuerung der im Inneren abgehängten Beleuchtungskonstruktionen waren aus den erfassten Hoch- und Tiefpunkten der Membran und der dort angebrachten Stahlkonstruktionen die entsprechenden Ebenen zu konstruieren.

- Die durch TLS erfasste Geometrie des während der Sanierungsarbeiten freigelegten Stahlseilnetzes lieferte die Grundlage zur Optimierung der neuen, wesentlich leichteren Membran und Beleuchtungsstege unter größtmöglicher Beibehaltung der Ursprungsgeometrien. Somit wurden die Positionen neuer Aufhängepunkte bestimmt, deren Anzahl von 219 Punkten auf 74 reduziert werden konnte. Die endgültige Absteckung der neuen Aufhängepunkte erfolgte tachymetrisch.
- Nach Einbau der neuen Membran war an den beiden Hochpunkten, wo die neue Membran über zwei große Metallringe gespannt und befestigt wurde, der Winkel zwischen den Spannseilen und dem Bauteil mit einer Standardabweichung von  $1^\circ$  aus aktualisierten Scannerdaten zu bestimmen. Nach diesen Winkeln wurden anschließend Laschen für die Stahlrossen an den Stahlring geschweißt. Die exakte Ausrichtung vor Ort war notwendig, da die Drahtseile aufgrund ihres kurzen Abspannweges nicht viel an Umlenkung in Zugrichtung aufnehmen können (WEBER, 2005).

Nach den Umbauarbeiten wurde die gesamte Dachhaut als Endkontrolle der Gewerke erneut aufgemessen.

## 4 Erneuerung der Radrennbahn in der Olympiahalle

### 4.1 Problemstellung

Die Olympiahalle wird multifunktionell genutzt. Hier wechseln sich Ausstellungen und Kongresse mit Pop- und Rock- sowie klassischen Konzerten oder sportlichen Großveranstaltungen ab. Dementsprechend muss die Ausstattung der Halle permanent schnell veränderbar sein. Seit 1972 ist die Olympiahalle Austragungsort des bekannten Münchener 6-Tage-Radrennens, zu dem neben der entsprechenden Gastronomie auch der Aufbau des mobilen Teils der Radrennbahn erforderlich wird.



**Abb. 11:** Bisherige, fest installierte Radrennkurve in der Olympiahalle

Die westliche Radrennkurve war bisher fest in der Olympiahalle installiert (Abb. 11). Diese Kurve sollte im Jahr 2006 durch eine neuere Konstruktion ersetzt werden, die schnell ein- bzw. wieder ausgebaut werden kann. Jedoch sollte die Geometrie der Fahrbahnoberfläche natürlich identisch wiederhergestellt werden.

Bisherige Werbeschriftzüge wurden vor Ort von Plakatmalern erzeugt. Der neue Hauptsponsor der Veranstaltung wünschte eine großflächige (9,60 m × 2,50 m) photorealistische Darstellung seines Produktes als bedruckte Klebefolie direkt auf der Bahnkurve. In diesem Zusammenhang war das aufzubringende Werbebanner entsprechend der Bahngeometrie zu verzerren.

## 4.2 Vermessungsarbeiten

Nach exaktem tachymetrischen Anschluss an vorhandene Referenzpunkte des Hallensystems, wurden spezielle Passmarken zur Verknüpfung der einzelnen Scanner-Szenen sowie zusätzliche Profile zur späteren Kontrolle der Laserscannerdaten über reflektorlose Tachymetrie erfasst. Ebenfalls tachymetrisch aufgenommen wurden die unteren Bahnbegrenzungen beider Radbahnkurven sowie die unterhalb der Bahn bestehenden Wände, Betonränge und Betonträger. Des Weiteren war der Versatz zwischen Hallenbodenniveau und der Fußbodenoberfläche unterhalb der Fahrbahn zu erfassen.

Die Form der Fahrbahnoberfläche sowie die Passmarken wurden mit dem Präzisions-Laserscanner in vier Aufstellungen mit sich überlappenden Scans mit einer Auflösung auf dem Messobjekt von ca. 1,0 cm erfasst.

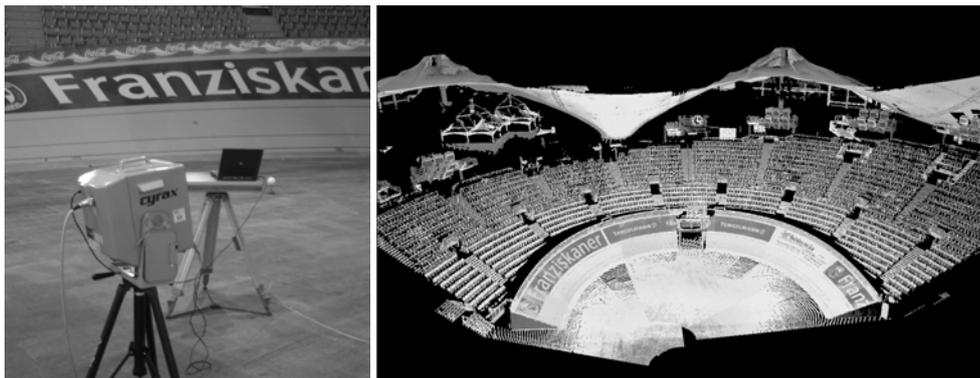


Abb. 12: Messung und Punktwolke der westlichen Radrennbahnkurve in der Olympiahalle

## 4.3 Auswertung und Modellierung

Mittels der Scannersoftware Cyclone wurden die einzelnen Punktwolken über die Passmarken und den ICP-Algorithmus fusioniert und in das lokale Hallensystem überführt (Abb. 12). Anschließend wurden alle Punkte, die nicht auf der Kurvenoberfläche lagen, eliminiert. Die nun übrig gebliebenen Punkte wurden über eine ASCII-Schnittstelle ausgelesen, um sie für die folgenden Berechnungsschritte in der Vermessungssoftware CAPLAN (CREMER PROGRAMMENTWICKLUNG GMBH 2006) verwenden zu können. In CAPLAN wurden die

Achsen der Radrennbahn modelliert und anhand dieser Profile im Abstand von einem halben Meter auf der Kurvenoberfläche berechnet. Die Daten der Profile sowie der Hauptachse der Radrennbahn und deren Lage im Hallenbezugssystem wurden für die weiterführende Planung in einem CAD-File „Nemetschek ALLPLAN“ (NEMETSCHKE AG 2006) inklusive der Umrandung der Fahrbahnoberfläche, der dreidimensionalen Position der Wände, Träger, Ränge und der Position des Handlaufs übergeben.

#### 4.4 Baubegleitende Tätigkeiten

- Das dreidimensionale Modell der Radrennbahn und des Unterbaus sowie sämtlicher Betonteile der Ränge dient als Grundlage zur Neukonstruktion der demontierbaren Radrennkurve.
- Ermittlung eines einheitlichen Höhenniveaus zur Angleichung des gesamten Hallenbodens.
- Die 44 Stahlstützen der neuen Kurvenkonstruktion waren tachymetrisch abzustecken und nach deren Einbau zu kontrollieren. Nachdem sich Abweichungen zur Sollposition zeigten, wurden die Ablagen dem Stahlbauer zur Nachrichtung übermittelt.

Nach den Umbauarbeiten wurde die gesamte Radrennkurve als Endkontrolle der Gewerke erneut aufgemessen.

#### 4.5 Projektive Verzerrung eines photorealistischen Werbebanners

Die Problematik, dass auf den modellierten Freiformen später Werbung in Form von Klebefolien anzubringen seien, wurde durch den Auftraggeber während des laufenden Projektes eher beiläufig formuliert. Die ebenen Selbstklebefolien waren derart verzerrt zu bedrucken, dass sich nach deren Aufbringen für den Betrachter ein unverzerrtes Bild ergab. Da die erforderlichen Transformationsparameter direkt aus den Modellierten Scannerdaten abgeleitet werden konnten, erfolgte die Bereitstellung der benötigten verzerrten Druckvorlagen durch den Ingenieurgeodäten.

Um ein Werbebanner mit einer Länge von ca. 10 m drucken zu können, war zunächst eine Unterteilung in zehn gleich breite Einzelstreifen erforderlich. Da im aufgeklebten Zustand der obere Bannerrand (Außenkurve) länger als der untere Rand sein muss, war für jedes Einzelbild eine trapezförmige Verzerrung zu erreichen, welche über eine projektive Transformation (1) mit ausreichender Genauigkeit realisiert wurde.

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \\ Y &= \frac{b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \end{aligned} \quad (1)$$

Durch Multiplikation mit dem Nenner und Umstellung kann diese Transformationsvorschrift in eine lineare Form überführt werden (2), die sich als Bedingungsgleichung für eine Ausgleichung im GAUß-HELMERT-Modell eignen (LUHMANN, 2000):

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y - c_1xX - c_2yX \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y - c_1xY - c_2yY \end{aligned} \quad (2)$$

Zur Bestimmung der acht Koeffizienten müssen vier identische Punkte vorliegen, welche durch die Eckpunkte der Einzelbilder repräsentiert sind. Die aus den Scannerdaten ermittelte Bahngeometrie lieferten hierfür die zugehörigen oberen und unteren Bogenlängen, welche sich um insgesamt 85 cm unterscheiden. Aufgrund der geringen Einzelbreite von 96 cm konnten daraus die Koordinaten der vier Eckpunkte im Zielsystem abgeleitet werden. Als Ergebnis wurde eine Druckvorlage (Siehe Abb. 13) an die Werbeagentur weitergeleitet.



**Abb. 13:** Verzerrte photorealistische Druckvorlage (ca. 8000 × 2000 Pixel<sup>2</sup>)

## 5 Resümee

Die drei präsentierten Pilotprojekte im Olympiapark München zeigen beispielhaft die Möglichkeiten für den Vermessungsingenieur auf, sich aktiv in den Bauprozess einzubringen. Auf Basis der mittels moderner Verfahren des TLS in Kombination mit klassischen geodätischen Messmethoden gewonnenen Daten lassen sich dreidimensionale Modelle komplexer Geometrien entwickeln, die als Vorgaben für die Fertigung neuer Bauteile dienen können. Deren Einbau (und evtl. Produktion) wird ebenfalls ingenieurgeodätisch unterstützt und abschließend kontrolliert. Der Vermessungsingenieur kann also tatsächlich aktiver Posten innerhalb des Produktionsprozesses werden. Belegt wird diese Aussage durch die Tatsache, dass einige der gezeigten Methodiken bereits bei Folgeaufträgen, die jeweils durch niedergelassene Ingenieurbüros vor Ort übernommen wurden, Eingang in die tägliche Praxis gefunden haben.

## Literatur

- Besl, P.J. & McKay, N.D. (1992): A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, 1992, S. 239-256.
- Cremer Programmentwicklung GmbH (2006): Vermessungssoftware zur Auswertung und Planerstellung CAPLAN, [www.capentw.de](http://www.capentw.de) - Offizielle Webseite des Herstellers

- Drixler, E. (1993): Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C: Dissertationen, Heft Nr. 409
- Leica Geosystems AG (2006): HDS Auswerte- und Steuerungssoftware CYCLONE, [www.leica-geosystems.de](http://www.leica-geosystems.de) - Offizielle Webseite des Herstellers
- Luhmann (2000): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Wichmann Verlag, Heidelberg, ISBN 3-87907-321-X
- Nemetschek AG (2006): CAD-Software ALLPLAN, [www.nemetschek.de](http://www.nemetschek.de) - Offizielle Webseite des Herstellers
- Olympiapark-München GmbH. (2006): [www.olympiapark-muenchen.de](http://www.olympiapark-muenchen.de) - Offizielle Webseite der Betreiber Gesellschaft
- Schäfer, T. & Weber, T. (2004): Von der Punktwolke zum CAD, Ingenieurvermessung 2004, 14th International Conference on Engineering Surveying ETH Zürich, 16.03.2004
- Schäfer, T., Weber T., Kyrinovič, P. & Zámečnicková, M. (2004): Deformation Measurement using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo, INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, 11.-13. Nov. 2004
- Staiger, R. (2002): Laser Scanning in an Industrial Environment. FIG – Congress, Washington, D.C. USA, April 2002
- Staiger, R. & Wunderlich, T. (2006): Terrestrisches Laser Scanning 2006 – technische Möglichkeiten und Anwendungen, Beitrag zum 72. DVW-Seminar „Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006) in Fulda 2006
- Weber, T. (2005): Olympia-Schwimmhalle München – Geometriebestimmung der inneren Dachhaut, Beitrag zum 65. DVW-Seminar „Terrestrisches Laserscanning (TLS) in Fulda 2005, Schriftreihe des DVW, Band 48, Wißner-Verlag, ISBN 3-89639-511-4