

Original 3D-Punktwolken oder Approximation mit B-Splines: Verformungsanalyse mit CloudCompare

DR. GAËL KERMARREC, DR. HAMZA ALKHATIB & DR. JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ

In diesem Beitrag wird anhand von 3D-Punktwolken gezeigt, wie sich Verformungen bzw. Deformationen mithilfe von Flächenmodellierung beschreiben lassen. Exemplarisch werden hierfür 3D-Punktwolken eines terrestrischen Laserscanner (TLS) genutzt, die im Zuge eines Belastungsversuch an einer historischen Eisenbahnbrücke bei Verden (Aller), Niedersachsen, erfasst wurden. Zur Approximation der 3D-Punktwolken in unterschiedlichen Epochen werden B-Spline-Flächen genutzt. Im Rahmen der Schätzung von B-Spline-Flächen mit der Methode der kleinsten Quadrate werden neben Informationen über den Knotenvektor, auch die optimale Anzahl von Kontrollpunkten benötigt. Diese Kontrollpunkte bilden eine konvexe Hülle, innerhalb der die approximierte Fläche oder Kurve liegt. Ihre Anzahl hat somit einen starken Einfluss auf die gesamte Approximation und die sich anschließende Bestimmung von Verformungen (Deformationsanalyse). Zur Bestimmung der optimalen Anzahl der Kontrollpunkte werden Informationskriterien genutzt unter der Voraussetzung, dass das Messrauschen einer Normalverteilung entspricht. Eine verbesserte stochastische Beschreibung der polaren Messelemente: Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägstrecke des TLS liefert die Möglichkeit einer zuverlässigeren Beurteilung der Genauigkeit der Flächenmodellierung von verrauschten, diskreten 3D-Punkten. Dies führt zu aussagekräftigeren Testgrößen, wie der Kongruenztestgröße in der Deformationsanalyse. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Diskussion der Ergebnisse basierend auf der Approximation mit B-Spline Flächen gegenüber den Ergebnissen aus rein punktwolkenbasierten Verfahren unter Nutzung der Open-Source Software CloudCompare (CC). Es wird gezeigt wie lokale Verfeinerung der Approximation vorteilhaft ist.

Schlüsselwörter – Terrestrische Laserscanner, Monitoring, B-Spline, Approximation, stochastisches Modell, Kontrollpunkte, AIC, BIC

1. Einleitung

Terrestrische Laserscanner (TLS) erlauben die Erfassung von dreidimensionalen (3D)-Punktwolken von stationären Standpunkten oder eingebunden in Multi-Sensor-Systeme aus der Bewegung heraus. Die Nutzung dieser 3D-Punktwolken im Bereich des geodätischen Monitorings zur Bestimmungen von flächenhaften Deformationen zeigen u.a. GORDON ET AL. (2004), GRIMM-PITZINGER ET AL. (2005), TOURNAS UND TSAKIRI (2008), WUJANZ ET AL. (2018), YANG ET AL. (2016) und XU ET AL. (2018). Oft werden die Verformungen bzw. Deformationen anhand von Standard-Software wie z. B. CloudCompare (CloudCompare 2019) über Vergleiche von 3D-Punktwolken bestimmt. Registrierte oder georeferenzierte 3D-Punktwolken (PAFFENHOLZ ET AL. 2018) werden zwischen Epochen verglichen, wobei der in der Regel Vergleich punktwolkenbasiert (Cloud-to-Cloud, Multiscale-model-to-Model-Cloud-Vergleich (LAGUE ET AL. 2013)) oder oberflächenbasiert (Cloud-to-Mesh oder Mesh-to-Mesh) erfolgt, siehe auch Holst et al. 2017 für einen Überblick.

Eine vielversprechende Alternative zur punktwolkenbasierte Methode liefert die Berechnung von Freiformflächen. Hiermit werden aus der großen Punktmenge eine mathematische Approximation abgeleitet, sodass die Flächen analytisch beschrieben werden (Neuner et al. 2016). Die Deformationen werden in diesem Fall anhand der approximierten Flächen berechnet. Die sogenannte „Regression B-Splines“ werden in der Geodäsie üblicherweise angewendet (KOCH 2009, BUREICK ET AL. 2016), da sie gleichzeitig eine flexible und genaue Approximation von verrauschte 3D-Punktwolken ermöglichen. Es ergeben sich somit neue Herausforderungen wie z. B. die optimale flächenhafte Beschreibung eines Objektes und seiner stochastischen Eigenschaften, um Testgrößen (wie z. B. Kongruenztestgrößen) zuverlässig ableiten zu können. Alle möglichen Ungenauigkeiten der Approximation können in der Deformationsanalyse hineinfließen.

In diesem Beitrag wird die Berechnung von B-Spline-Kurven und Flächen anhand von 3D-Punktwolken im Kontext von Deformationsmessungen erklärt und diskutiert. Es wird gezeigt, dass die Anzahl an Kontrollpunkten einen starken Einfluss auf die Approximation hat. Es werden Möglichkeiten und Schwächen von Informationskriterien gezeigt, um die optimale Kontrollpunktanzahl zu bestimmen. Ein Fokus wird in dieser Hinsicht auf die Nützlichkeit von stochastischen Informationen gelegt, wie z. B. eine bessere Beschreibung der Distanzvarianz basierend auf dem Intensitätsmodell nach WUJANZ ET AL. (2017). Die Anwendung der zuvor skizzierten theoretischen Ausführungen zur B-Spline-Flächen Approximation im Kontext von Deformationsmessungen erfolgt auf 3D-Punktwolken eines Belastungsversuches an einer Gewölbebrücke bei Verden (Aller), Niedersachsen (u.a. SCHACHT ET AL. 2016, PAFFENHOLZ ET AL. 2018). Die Ergebnisse basierend auf der Approximation mit B-Spline Flächen werden denen aus rein punktwolkenbasierten Verfahren unter Nutzung der OpenSource Software CloudCompare (CC) gegenübergestellt. Die Vorteile einer lokale gegenüber globale Approximation werden gezeigt.

2. Approximation von Kurven und Flächen mit B-Splines

2.1. Einführung

Viele Anwendungen der graphischen Datenverarbeitung lassen sich anhand von Freiformflächen modellieren und darstellen und somit auch 3D-Punktwolken aus der Erfassung mit einem TLS. Der Einfachheit halber werden wir uns auf die mathematische Beschreibung von Kurven, wobei eine Verallgemeinerung zu Flächenmodellierung in 2.3. gezeigt wird. Allgemeine Kurven können in der Regel durch eine analytische Darstellung, d.h. eine Formel, definiert werden, wobei solche Definitionen oft schwer verständlich sind. Eine Alternative bietet die Angabe von Stützpunkten oder Kontrollpunkten, die den Verlauf der Kurve bestimmen. Kurven können entweder interpolieren oder approximieren werden. Im ersten Fall werden sie durch die Stützpunkte verlaufen, wohingegen im zweiten Fall die Kontrollpunkte neben der Kurve liegen (DE BOOR 2001). Der Stetigkeitsgrad an die Kurvenverbindungen ist eine wichtige Eigenschaft, um möglichst glatte Kurven zu erhalten.

Der globale Einfluss der Kontrollpunkte auf die ganze Kurve ist der Hauptnachteil von sogenannten Bezierkurven: jede Veränderung der Kontrollpunkte wie Einfügen, Entfernen oder Verschieben verändert das Aussehen der Kurve an allen Stellen. Durch die Verwendung von B-Spline-Polynomen anstatt von Bernsteinpolynome werden diese Eigenschaft aufgehoben. Das Wort „Spline“ bezeichnet eine Funktion n -ten Grades, die stückweise aus Polynomen mit maximalem Grad n zusammengesetzt ist. Das Wort selbst kommt aus dem Schiffbau wobei dünne, elastische Holz- oder Metalllatten zur Festlegung der Kontur unter Spannung benutzt werden und an einzelnen Punkten durch Nägel fixiert werden. B-Splines sind die meist genutzten Funktionen um Splines anzunähern. Die gemessenen Punkte werden mit Hilfe von einer lineare Kombination aus zu bestimmenden Gewichtsfunktionen (die $N + 1$ Kontrollpunkte p_0, \dots, p_n) und B-Splines approximiert. Eine möglichst glatte Kurve (C^2 stetig, wo sich die Richtung und Krümmung stetig ändern) wird gesucht die in der Nähe der Kontrollpunkte verlaufen und sich durch Verschieben der Kontrollpunkte lokal ändern. Eine lokale Kontrolle der approximierten Kurven ist somit möglich sodass sich eine höhere Flexibilität in der Approximation ergibt.

2.2. Mathematische Beschreibung von B-Spline Kurven

Parametrisierte Kurven werden als Ansatz für die B-Spline Kurven genommen. Die Parametrisierung wird in zweidimensionalen (2D) wie folgt definiert: in der (x, y) Ebene wird der Vektor \mathbf{R} in Abhängigkeit eines Parameters dargestellt.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}.$$

Der Parameter t kann verstanden werden als die Zeit einer Partikel brauchen wurde um die Kurve durchzulaufen. In diesem Beitrag erfolgt die Parametrisierung der 3D-Punktwolken anhand der 2D Chord-Length Method (PIEGL UND TILLER 1997). Die Kurvendarstellung von der 3D-Punktwolke lautet:

$$S(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,k}(t) p_i, t \in [0, 1] \quad (1)$$

wobei $B_{i,k}(t)$ die B-Spline Basisfunktionen der Ordnung k bezeichnet. Die Kurve $S(t)$ ist somit eine gewichtete Summe der n Kontrollpunkte. Die B-Spline Basisfunktionen besitzen die wichtige Eigenschaft:

$$\sum_{i=0}^n B_{i,k}(t) = 1, \quad (2)$$

sodass für jeden Kurvenpunkt die Summe der B-Spline Funktionen genau 1 ist. $S(t)$ ist somit eine sogenannte Linearkombination oder Konvexkombination dieser Punkte.

Alle B-Spline Basisfunktionen der Ordnung k können rekursiv aus der Basisfunktionen der Ordnung $k - 1$ gewonnen werden (de Boor 2001):

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, t \in [t_i, t_{i+1}] \\ 0 \text{ sonst} \end{cases}$$

und

$$B_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} B_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(t) \quad (3)$$

Das Intervall $[0, 1]$ wird dabei in $n + k$ Teilintervalle geteilt. Die $\mathbf{t} = \{t_i\}$ bilden den sogenannten Knotenvektor der aus reellen Zahlen besteht und mindestens $k + 1$ Elemente hat, derart, dass $\dots \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_i < t_{i+k}$. Der Knotenvektor kann äquidistante Werte enthalten und wird somit häufig wie folgt definiert:

$$t_i = \begin{cases} 0, i < k \\ i - k + 1, k \leq i < n \\ n - k + 2, i > n \end{cases} \quad (4)$$

Um die Gleichung 2 erfüllen zu können, muss gelten:

$$t_0 = t_1 = \dots = t_{k-1} = 0 \text{ und } t_{n+1} = t_{n+2} = \dots = t_{n+k} = 1.$$

Andere Möglichkeiten zur Bestimmung des Knotenvektors, wie z. B. die Monte Carlo Methode, diskutiert BUREICK ET AL. (2016). Aus dem Knotenvektor lassen sich mit Gleichung (3) die B-Spline Basisfunktionen berechnen. Beispielweise sind die B-Spline Basisfunktionen der Ordnung 1 $B_{i,1}(t)$ Rechteckfunktionen, die den Werte 1 im Intervall $[t_i, t_{i+1}]$ besitzen und außerhalb Null sind. Sie sind stückweise konstant.

B-Spline Basisfunktionen der Ordnung 2 sind Dreieckfunktionen über dem Intervall $[t_i, t_{i+2}]$. Sie sind stückweise linear und außerhalb des Intervalls identisch Null.

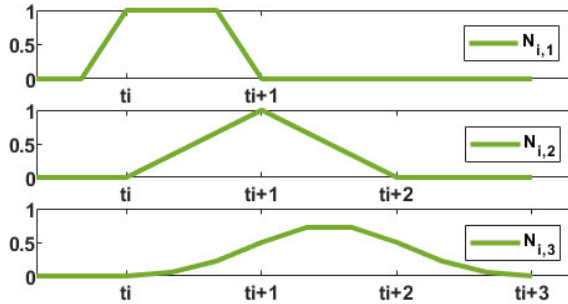


Abbildung 1: Verlauf der B-Spline Basisfunktionen der Ordnung 1 bis 3

B-Spline Basisfunktionen der Ordnung 3 ($k = 2$) sind Hütchenfunktionen, die stückweise quadratisch sind und an den Grenzen glatt werden. Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Verlauf der B-Spline Basisfunktionen der Ordnung 1 bis 3.

Alle anderen Basisfunktionen werden vergleichbar stückweise polynomial sein. Der Punkt p_i mit dem Koeffizient $B_{i,k}(t)$ aus Gleichung 2 hat somit nur einen Einfluss auf das Intervall $[t_i, t_{i+k}]$. Umgekehrt, für $t \in [t_i, t_{i+1}]$, sind nur die Punkte p_{i-k+1}, \dots, p_i wichtig. B-Splines der Ordnung 3 sind als kubisch bezeichnet und ein Kontrollpunkt hat Einfluss auf max. 4 Kurvensegmente. Üblicherweise wird die Ordnung 3 gewählt, da die Kurve somit zweimal stetig differenzierbar und glatt ist. Sie lässt sich somit ohne viel Rechenaufwand beschreiben, was mit höheren Ordnungen nicht der Fall ist. Beispielsweise wird bei $i = 3$ die Kurve aus Gleichung 1 durch:

$$S(t) = \frac{(1-t)^3}{6} p_0 + \frac{3t^3 - 6t^2 + 4}{6} p_1 + \frac{-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1}{6} p_2 + \frac{t^3}{6} p_3$$

definiert und hängt von den „Koordinaten“ der Kontrollpunkte ab. Die Konvexkombination von p_1, \dots, p_n bilden die konvexe Hülle von p_1, \dots, p_n . Die Kurve $S(t)$ für $t \in [t_i, t_{i+1}]$ liegt dadurch in der konvexe Hülle von p_{i-k+1}, \dots, p_i .

2.3. Mathematische Beschreibung von B-Spline Flächen

B-Spline Flächen werden als Erweiterung der Kurven definiert, d.h. als Tensorprodukt von B-Spline Basisfunktionen:

$$F(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,k}(v) \mathbf{p}_{ij}, 0 \leq i, j \leq m \tag{5}$$

Für die Berechnung von Flächen werden B-Splines in einer Parameterrichtung u definiert und anschließend in der anderen Parameterrichtung v wiederum mit B-Splines zu einer Fläche komplettiert (Koch 2009). Die Kontrollpunkte werden wie bei den Kurven festgelegt, wobei die Anzahl n in u -Richtung unterschiedlich sein kann von der Anzahl m in v -Richtung. Es ist darauf hinzuweisen, dass, spezifisch bei Flächenapproximation, Änderungen der Knotenvektor oder Kontrollpunkte ein stärkerer Einfluss auf die gesamte Approximation haben werden als bei Kurven. Folglich müssen lokale Verfeinerung bevorzugt werden (Forsey and Bartels 1988).

2.4. Schätzung der B-Spline Kurven im linearen Gauß-Markov-Modell

2.4.1. Bestimmung der Kontrollpunktanzahl durch ein Informationskriterium

Für die Approximation der 3D-Punktwolken mit B-Spline Basisfunktionen wird die Distanz zwischen den gemessenen 3D-Punkten und der Kurve oder der Fläche minimiert. Wenn der Knotenvektor im Vorfeld bestimmt ist und der Anzahl an Kontrollpunkte gegeben ist, führt die Minimierungsaufgabe zu einem linearen Gleichungssystem, was um einen Strafterm zur Einhaltung einer Glättung erweitert werden kann (sogenannte penalized Splines, EILERS UND MARX 1996). Die Methode der kleinsten Quadrate kann benutzt werden, um die „Koordinaten“ der Kontrollpunkte zu bestimmen, sodass die Kurve oder Fläche aus Gleichung 1 oder Gleichung 5 vollständig definiert wird. Folglich können Ergebnisse aus dem Global Test (TEUNISSEN 2000) benutzt werden, um die Güte des Gauß-Markov-Modell (GMM) zu beurteilen. Die Residuen können auch analysiert werden, um mögliche Bereiche zu identifizieren, wo die 3D-Punktwolke schlechter approximiert wird (z. B. Ecken oder starke Krümmungsveränderungen). Möglicherweise kann die Ordnung der B-Spline Funktionen lokal geändert werden. Neben der Parametrisierung, dem Knotenvektor und der Ordnung der B-Splines, spielt die Kontrollpunktanzahl eine wichtige Rolle in der Approximation. Oft wird die Anzahl heuristisch gewählt, in der Hoffnung, dass durch höhere Werte eine genauere Approximation erreicht werden kann. Leider ist diese Annahme falsch. Wenn Rauschen oder Korrelationen in den Daten vorhanden sind, können zu viele Kontrollpunkte dazu führen, dass dieses Rauschen gefittet wird und nicht die Kurve bzw. Fläche. Dies kann zu künstlichen Oszillationen führen, die die Bewertung der Approximation und ggf. die nachgeschaltete Deformationsanalyse verfälschen. Im gegenteiligen Fall approximieren zu wenig Kontrollpunkte die Kurve nicht mehr. Dementsprechend muss eine Balance gefunden werden, da der Global Test nicht ausreichend ist, um eine Überanpassung zu detektieren. Versteht man die Auswahl von n und m als eine Modelselektion wie bei der Regression, so kann das Informationskriterium (hier IC abgekürzt) benutzt werden, um die optimale Anzahl an Kontrollpunkten zu bestimmen. Hiermit werden n und m variiert und die entsprechende Kurve oder Fläche berechnet. Häufig verwendete ICs sind das Akaike (AIC) und das Bayesische (BIC), siehe Burnham and ANDERSON (2002), vgl. auch HARMENING UND NEUNER, 2016 und 2017. Die Berechnung erfolgt nach:

$$\begin{aligned} AIC &= 2[l(\hat{\mathbf{x}})] - 2n \\ BIC &= 2[l(\hat{\mathbf{x}})] - \log(D)n \end{aligned} \quad (6)$$

wobei l die logarithmierte Likelihood Funktion der geschätzten n Kontrollpunkte $\hat{\mathbf{x}}$ ist. D ist die Anzahl an Beobachtungen. Die Herleitung von AIC basiert auf der sogenannten Kullback-Leibler Distanz und wird tendenziell Modelle mit verhältnismäßig vielen Parametern vorteilhaft erscheinen lassen. BIC ist aus der Bayesschen Statistik hergeleitet. Der Strafterm wächst logarithmisch mit der Anzahl der Beobachtungen, sodass das Modell mit wenig Parametern gewählt wird. Es ist allerdings unmöglich zu sagen, welche IC die beste Lösung darstellt. Für beide IC wird davon ausgegangen, dass die Residuen/Beobachtungen einer Normalverteilung folgen (Korrelation und Heteroskedastizität werden vernachlässigt), was eine starke Annahme ist.

Dementsprechend, wenn beide IC unterschiedliche Ergebnisse liefern, muss die Approximation näher analysiert werden.

2.4.2. Stochastisches Modell

In der Schätzung der Kontrollpunkte mit dem GMM werden die kartesischen Koordinaten der 3D-Punktwolke eingeführt. Im Gegensatz zur Schätzung von z. B. Ebenen in einem Gauss-Helmert Modell wird hier eine Transformation von den originären polaren Messelementen des TLS in ein kartesisches 3D-Koordinatensystem durchgeführt. Durch die Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung entstehen somit mathematische Korrelationen, die berücksichtigt werden müssen, d.h. die Benutzung der Varianz Kovarianz Matrix der Beobachtungen in der Ausgleichung ist inkorrekt.

Außerdem sollte ein stochastisches Modell für die polaren Messelemente: Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägstrecke des TLS bestimmt werden, um ein korrektes Ergebnis aus der Schätzung zu erhalten und keinen Bias in die Testgrößen einzuführen. Dies würde für den Fall der Kongruenztestgröße im Zuge der Detektion von Deformationen zu Fehlinterpretationen führen. Da der Kleinst-Quadrat-Schätzer erwartungstreu ist, werden allerdings die geschätzten B-Spline-Kurven oder Flächen bei einer großen Punktzahl in der 3D-Punktwolke wenig beeinflusst, wenn das stochastische Modell der Identitätsmatrix entspricht (KOCH 1999).

Die stochastischen Information der polaren Messelemente Horizontalrichtung und Vertikalwinkel werden als konstant angenommen und die entsprechende Werte aus den Datenblättern des TLS-Herstellers entnommen. Für die stochastische Information der Schrägstrecke wird der Zusammenhang zwischen Signalstärke und Messrauschen genutzt, um intensitätsbasierte stochastische Modelle für die Distanzmessungen zu bestimmen (z. B. WUJANZ ET AL. 2017):

$$\sigma_r = a + bInt^c \quad (7)$$

σ_r , Int sind die Standardabweichung der Distanz und der Intensität. Die entsprechenden Parameter a , b und c können mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen nach WUJANZ ET AL. (2017) bestimmt werden und erlauben eine punktweise Gewichtung. Somit wird die Annahme identischer Standardabweichung aufgehoben, wobei Vereinfachungen von 7 möglich sind, wenn die gescannten Objekte eine gewisse Intensität-Homogenität besitzen (KERMARREC ET AL. 2018).

Korrelationen oder Kreuz-Korrelationen zwischen Messelementen werden bisher nicht berücksichtigt, da kein Modell vorhanden ist, um dies ausreichend zu beschreiben. KERMARREC ET AL. (2019) schlagen die erste theoretische Ansätze vor, wie ein Korrelationsmodell für TLS aus der Erfahrung mit GPS Daten herleiten werden kann.

Zusätzlich sollte nicht vergessen werden, dass die mathematischen Korrelationen (falls berücksichtigt) zu einer vollbesetzten Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{MC} der kartesischen Beobachtungen führen, d.h.

$$\mathbf{Q}_{MC} = \mathbf{F}\mathbf{Q}_{\text{ohne_MC}}\mathbf{F}^T \quad (8)$$

wo die Matrix \mathbf{F} die jacobische Matrix mit den Ableitungen der Punktkoordinaten in Bezug auf Entfernung und Winkel. $\mathbf{Q}_{\text{ohne_MC}}$ ist die Kofaktormatrix der polaren Messelemente, die mit den Varianzen aus 7 für die Distanz und konstanten Werte für die Varianzen der Horizontalrichtung und Vertikalwinkel besetzt werden kann.

$$\mathbf{Q}_{\text{ohne_MC}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_r & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{HA} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{VA} \end{bmatrix}$$

\mathbf{Q}_r ist die diagonale Kofaktormatrix, die die Distanzvarianz enthält -ein Wert pro Punkt, ev. mit Gleichung 7 berechnet- und \mathbf{Q}_{HA} , \mathbf{Q}_{VA} die Matrix für die Varianzen der Horizontalrichtung und Vertikalwinkel.

2.5. Deformationen aus B-Splines Approximation

Wenn 3D-Punktwolken in mehreren Epochen aufgenommen werden und registriert sind, eignen sich B-Splines, um Verformungen zu detektieren. Da es sich um parametrische Kurven oder Flächen handelt, lassen sich mit Gleichung 1 beliebige Punkte berechnen. Somit ist man nicht, wie bei Messungen mit einem hochgenauen Lasertracker auf bestimmte gemessenen Punkte festgelegt. Es entsteht eine große Flexibilität, was den Hauptvorteil einer mathematischen Modellierung darstellt (NEUNER ET AL. 2016).

Die Deformation können einfach visualisiert werden, indem man die Differenzen zwischen den Flächen an unterschiedlichen Epochen bildet, genau wie wenn man mit 3D-Punktwolken arbeiten würde. Um die Deformationsmagnitude zwischen Flächen anzugeben zu können, besteht die Möglichkeit,

die Hausdorff-Distanz zu berechnen (CHEN ET AL. 2010). Alternativ werden die B-Spline Flächen diskretisiert, indem man Punkte in einem festen Raster einer vorgegebenen Rasterweite berechnet (PAFFENHOLZ ET AL. 2018). Somit entsteht eine glatte „3D-Punktwolke“, die frei vom Messrauschen ist. Um die Epochendifferenz zu berechnen kann die Differenz zwischen den einheitlichen Rastern gebildet.

Eine Alternative bietet das Bearbeiten der diskretisierten B-Spline Fläche in einem Standard-Software wie CC. Somit kann die Distanz zwischen Flächen mittels vorgegebenen Methoden mit oder ohne mathematische Modellierung verglichen werden. Exemplarisch ermöglicht CC die Berechnung von Cloud-to-Cloud (C2C), Cloud-to-Mesh (C2M) oder die etwas anspruchsvollere MultiscaleModel-to-ModelCloud Methode (M3C2) (LAGUE ET AL. 2013) die in Tabelle 1 verglichen werden; siehe auch HOLST ET AL. (2017).

Tabelle 1: Vergleich Algorithmus zur Berechnung von Deformationen in CC

Methode	C2C	C2M	M3C2
Prinzip	<ul style="list-style-type: none"> -punktwolkenbasierte Zuordnung -korrespondierender Punkte -Abstandsberechnung zwischen den Punkten 	<ul style="list-style-type: none"> -Vergleich der Vermaschung mit einer 3D-Punktwolke -kürzester Abstand eines Punktes der 3D-Punktwolke zu den Dreiecksflächen der vermaschten 3D-Punktwolke -Punkte werden in eine Ebene projiziert 	<ul style="list-style-type: none"> -Reduzierung der Referenz-3D-punktwolke auf eine gewisse Anzahl von Kernpunkten -Schätzung einer Ebene, die in einem definierten Radius um den Punkt herum liegt -Projektion des Punkt i entlang des Normalenvektors und Berechnung der Differenz
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> -Einfach zu berechnen -Optionen möglich durch lokale Modellierung 	<ul style="list-style-type: none"> -gut bei ebenen Flächen (Lague et al. 2013) -Durch Triangulierung der 2D Punkte, wird die MeshStruktur auf die 3D-Punkte angewendet -Glättung der 3D-Punktwolke notwendig (ohne Berücksichtigung des Messrauschen Struktur) 	<ul style="list-style-type: none"> -Möglichkeit der Prüfung signifikanter Abweichungen durch Registriergenauigkeit und Angabe der Messunsicherheit -wird als genauer im Vergleich zu den anderen Methode beurteilt
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> -Rauschen: empfindlich -Zuordnungsproblem: falsche Distanz wird berechnet 	<ul style="list-style-type: none"> -Ergebnisse sind abhängig von der Deformation (horizontale, vertikal) 	

3. Deformationen aus B-Splines und 3D-Punktwolken: ein Vergleich

3.1. Daten



Abbildung 2: Blick in die historische Gewölbebrücke über die Aller bei Verden während der Installation der Messtechnik. Der geweitete Bereich an der Gewölbeunterseite kennzeichnet den Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung, die durch die vier Hydraulikzylinder oberhalb und die senkrecht nach unten verlaufenden Gewindestangen und schlussendlich die Verpresspfähle realisiert ist. Im Vordergrund die geodätischen Sensoren des GIH (von links): Laserscanner Z+F Imager 5006, Lasertracker Leica AT960-LR und Präzisionstachymeter Leica TS30 (Paffenholz et al. 2018).

Um einen Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Deformationsberechnung durchführen zu können, sowie zu zeigen, dass lokale Approximation vorteilhaft sind, werden Daten aus einem Belastungsversuch benutzt. Die historische Eisenbahnbrücke über die Aller bei Verden, Niedersachsen, wurde im Jahr 2015 außer Betrieb genommen. Die Geometrie der Brücke wird wegen der Gewölbestruktur als „unkompliziert“ bezeichnet. Abbildung 2 zeigt exemplarisch ein Blick von Westen auf einen Bogen der Brücke. Vier Hydraulikzylinder zur Lastaufbringung auf der Brücke sind zu sehen, wobei der Fokus auf der Bestimmung von Vertikalverformungen lag (Schacht et al. 2016). Das Geodätische Institut Hannover (GIH) hat einen Laserscanner Zoller+Fröhlich (Z+F) Imager 5006 zur Erfassung der 3D-Punktwolke der vollständigen Gewölbeunterseite benutzt mit dem Ziel, vertikale Verformungen (Deformationen) zu identifizieren, die durch die Last hervorgerufen worden. Der Standpunkt war stationär für den gesamten Belastungsversuch. Die Referenzepoche ohne Belastung wird als E00RW bezeichnet und die exemplarische Belastungsepoche mit ca. 4700kN als E55LW. Für Details zur Versuchsdurchführung, Aufbereitung der Daten (hier 3D-Punktwolken) und bereits prozessierte Ergebnisse wird auch (Paffenholz et al. 2018a und b und Wujanz et al. 2018).

Um die B-Spline-Fläche berechnen zu können, wurde die 3D-Punktwolke aufbereitet und Störobjekten wie Sensorik und Installationen der Baumesstechnik wurden eliminiert. Ein Puffer sorgte für die Reduktion der 3D-Punktwolke an den Rändern, um mit den vorliegenden Datenlücken besser umgehen zu können. Für die Berechnung der B-Spline-Fläche wird die 3D-Punktwolke in quadratische Rasterzellen überführt und je Rasterzelle der Mittelwert gebildet. Die Parametrisierung der Kurve erfolgt anhand der Sehnenlänge Methode, wobei Datenlücken aufgefüllt werden mussten. Die Bestimmung des Knotenvektors erfolgte nach der Methode von Piegl und Tiller (1997), die Ähnlichkeit mit einem äquidistanten Knotenvektor (Gleichung 4) für die Flächenberechnung aufweist. Kubische B-Splines werden genommen und der Anzahl an Kontrollpunkte durch BIC und AIC berechnet (Gleichung 6). Für die Berechnung der gesamten Brücke weisen diese Werte Unterschiede auf. Hier wurde in Paffenholz et al. (2018) nur das BIC benutzt, um die Anzahl an Kontrollpunkte auf nicht zu hohe Werte festzulegen. Für lokale Approximation, als in diesem Beitrag gezeigt, wurden für beide ICs ein Wert von 3 in beide Richtungen als optimal gefunden. Allerdings muss dadurch geachtet werden, dass

die ICs unter der Annahme dass das Rauschen Gaussian ist berechnet werden, sodass Vorsicht immer notwendig ist, besonders wenn Korrelationen durch z.B. schlechte Geometrie (Distanz oder Winkeln) vermutet werden.

Da für diesen Beitrag die Berechnung der gesamten Fläche nicht notwendig war, sonst nur Abschnitte davon, werden mögliche auftretende Probleme der globalen Approximation hier nicht weiter diskutiert. Ein stochastisches Modell nach Gleichung (7) mit der Berücksichtigung mathematischer Korrelationen wurde anschließend für die Berechnung der Regressionsfläche benutzt, wobei die Vereinfachung aus KERMARREC ET AL. (2018) angewandt wurde, begründet durch die Intensitätshomogenität der kleinen Flächen unter Berücksichtigung.

In diesem Beitrag werden nur drei kleiner quadratischer Ausschnitt des gesamten Brückenbogens betrachtet ($25\text{cm} \times 25\text{cm}$) um den Mittelwert der Magnitude der Deformation berechnen zu können. Die Ausschnitte befindet sich um die Punkte L8, L10, und L13 (siehe Abbildung 3), die zusätzlich mit Lasertracker gemessen. Somit wird ein Vergleich mit den Deformationsmessungen aus (i) Punktwolken, (ii) mit B-Splines approximierte Punktwolken und (iii) hochgenauer Lasertracker möglich. Es wird deutlich hervorgehoben, dass in diesem Beitrag nur eine lokale Approximation mit B-Splines durchgeführt wurde. Das funktionale Model kann somit als optimal festgelegt werden (Knotenvektor, Anzahl der Kontrollpunkte). Es wurden 100 3D-Punkte aus der 3D-Punktwolke durch B-Spline-Flächen approximiert für die zwei Epoche E00 (Referenz) und E55 (maximale Belastung). Diese Flächen wurden in CC geladen und deren Deformation berechnet mit den in Tabelle 1 vorgestellten Algorithmus. Anschließend wurde diese Deformationsmessung verglichen mit der aus den entsprechenden 3D-Punktwolken. Die Ergebnisse werden in Tabelle 2 präsentiert. Der Mittelwert sowie die Streuung der Deformationsmagnitude in mm werden angegeben (eine Gauss-Verteilung wird angenommen).

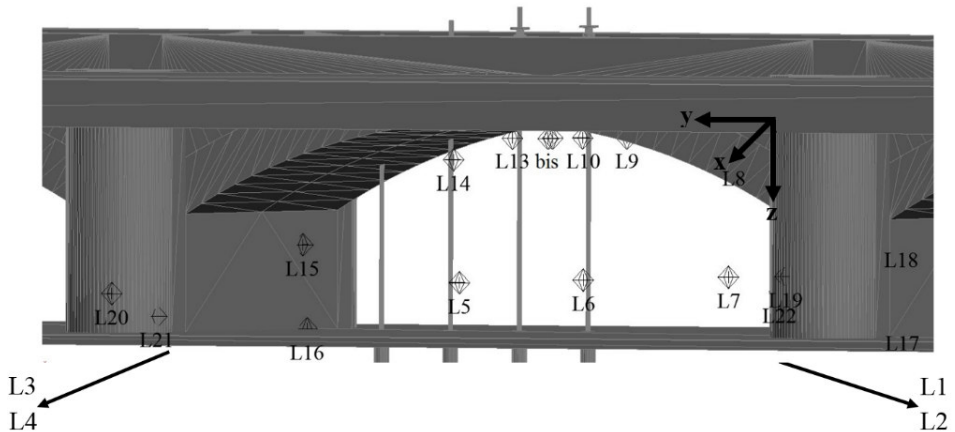


Abbildung 3: Brücke (aus Paffenholz et al. 2018) und die 3 Punkte L8, L10 und L13

3.2. Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die Unterschiede zwischen die von CC berechnete Deformationsmessungen für die 3 Algorithmus C2C, C2M und M3C2 und die 3 exemplarische ausgewählte Punkte (siehe Abb. 3). Für diese Punkte liegen eine hochgenaue Lasertracker Messung vor, sowie ein Vergleich mit Ergebnisse aus einer globalen B-Spline Approximation (PAFFENHOLZ ET AL. 2018).

Deutlich wird es klargestellt, dass die C2C Alternative mit B-Splines in allen Fälle die beste Näherung zur Lasertracker Messung gibt. Dieses Ergebnis kann durch 2 Faktoren erläutert werden: (i) durch

Tabelle 2: Vergleich Berechnung von Deformationen: B-Spline-3D-Punktwolke [mm]

	C2C (Mittelwert, std) [mm]	C2M (Mittelwert, std) [mm]	M3C2 (Mittelwert) (d=1mm, max depth 0.1, kein Registrierungs- fehler, kein subsample)	Lasertracker
L8				4.07
B-Splines	4.01 / 0.3	3.05 / 1.3	3.5 / 0.001	
Punktwolken	5.06 / 1.6	3.4 / 1.2	3.6 / 0.05	
L10				10.92
B-Splines	11.1 / 0.3	11.1 / 0.3	11.3 / 0.01	
Punktwolken	11.3 / 1.1	11.3 / 0.9	11.4 / 0.2	
L13				4.96
B-Splines	4.8 / 0.2	4.6 / 0.9	4.7 / 0.3	
Punktwolken	4.5 / 0.9	4.4 / 0.7	4.6 / 0.4	

die angewendete Rasterisierung der Punktwolken für die B-Splines Approximation vereinfacht sich die Erkennung von korrespondierten Punkte in den 2 Epochen. Außerdem wird durch die mathematische Modellierung das Rauschen der Punktwolke weiterhin eliminiert. (ii) Das C2C basiert auf der Hausdorff Distanz, i.e. hier der Mittelwert der euklidischen Norm zwischen Punktkoordinaten in den 2 Epochen. Dadurch ist das Verfahren vergleichbar mit einer Deformationsmessung aus Lasertracker Punkte, sobald die approximierte Fläche klein und die Deformation kontinuierlich sind. Für alle 3 Punkte sind die C2C Werte mit B-Splines Flächen nur 0.1 mm unter oder über die Lasertracker Deformationsmessung. Die Standard Abweichung liegt bei 0.3 mm.

Das C2M Algorithmus bietet die schlechteste Deformationsmessung, sowohl in den Werten als in Ihren Genauigkeiten. Für der L8 Punkt, die M3C2 Alternative unterschätzt die Lasertracker Werte bei mehr als 0.5 mm. Für eine kleine Deformation unter schlechte Geometrie scheint das Algorithmus suboptimal zu sein. Es ist allerdings deutlich zu erwähnen, dass M3C2 eine andere Verfahren ist als C2C, sodass es nicht erstaunlich wird, dass unterschiedliche Werte gefunden werden (was logisch vorkommt da M3C2 Werte „signed“ Distanzen sind, haben i.e. negative und positive Werte). Da das M3C2 eine Art „Glättung“ der Punktwolke benutzt, ergeben sich für B-Splines Flächen und Punktwolken für alle 3 Punkte gleiche Werte. Dieses Beispiel zeigt dadurch, dass nur vergleichbare Distanzmessungen verglichen werden dürfen.

Unser Beispiel zeigt außerdem ist eine lokale Approximation vorteilhaft für die Deformationsmessung. Exemplarisch, für L8, eine Unterschiede von 0.3 mm wurde gefunden im Vergleich zu dem Ergebnis für eine globale Approximation der Brücke (Tab.2 Paffenholz et al. 2018).

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ausführlich das Prinzip der B-Spline Kurven und Flächen Modellierung erklärt. 3D-Punktwolken lassen sich somit mit einer hohen Flexibilität approximieren. Die Anzahl der Kontrollpunkte muss im Kontext der Regressions-B-Spline festgelegt werden, wofür das Informationskriterium einen guten Ansatz bildet. Stochastische Informationen mittels Intensitätsmodellen können außerdem berücksichtigt werden, um die Vertrauenswürdigkeit der Regression B-Splines zu erhöhen.

Genauso wie Punktwolken eignen sich B-Spline Flächen um Deformationsmessungen durchzuführen. Durch die Glättung der Punktwolken dank der mathematischen Modellierung vereinfacht sich die Identifikation von korrespondierende Punkte in den 2 Epochen. In diesem Beitrag wurde anhand eines Datensatzes von einem Belastungsversuch gezeigt, dass die Deformationsmessung aus der B-Spline Approximation mit der aus Lasertracker Messungen vergleichbar ist, unter die Voraussetzungen dass (i) eine lokale Approximation durchgeführt wird und (ii) das C2C Algorithmus angewendet wird. Somit wird die Nützlichkeit der B-Spline Approximation hervorgehoben.

Literatur

- BUREICK, J., ALKHATIB, H. & NEUMANN, I. (2016): Robust spatial approximation of laser scanner points clouds by means of free-form curve approaches in deformation analysis. *J Appl Geodesy* 10(1):27 – 35.
- BURNHAM, K.P.& ANDERSON, D.A. (2002): Model selection and multimodel inference. Second edition, Springer, New York.
- CHEN X.D., MA W., XU G. & PAUL J.C.: (2010) Computing the Hausdorff distance between two B-Spline curves, *Computer-Aided Design*, 42(12):1197 – 1206
- CLOUDCOMPARE (2019): User Manuel. www.cloudcompare.org, letzter Zugriff 11.01.2019.
- DE BOOR, C. (2001): A Practical Guide to Splines, Springer, New York. Revised Edition, 2001
- EILERS P. H. C.& MARX B. D. (1996): Flexible Smoothing with B-Splines and Penalties, *Statistical Science*, 11(2):89 – 121.
- FORSEY D. R. & BARTELS R. H. (1988): Hierarchical B-Spline refinement. *Comput. Graph.* 22, 205 – 212.
- GORDON S. J., LICHTI D. D., STEWART M. P. & FRANKE J. (2004): Modelling point clouds for precise structural deformation measurement. In *Proceedings of ISPRS congress, Istanbul, Turkey*.
- GRIMM-PITZINGER A. & RUDIG, S. (2005) Laserscannerdaten für flächenhafte Deformationsanalysen. In *Proceedings of 13th international geodetic week, Obergurgl, Austria*.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2016): Choosing the optimal number of B-Spline control points. Part 1: Methodology and Approximation of Curves. *Journal of Applied Geodesy* 10(3). DOI: 10.1515/jag-2016-0003.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2017): Choosing the optimal number of B-Spline control points. Part 2 Approximation of surfaces and applications. *Journal of Applied Geodesy* 11(1). DOI: 10.1515/jag-2016-0036.
- HOLST, C., SCHMITZ, B., SCHRAVEN, A. & KUHLMANN, H. (2017): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Stauwand. In: *zfv* 142 (2), 98 – 110.
- KERMARREC G., ALKHATIB H. & NEUMANN I. (2018): On the Sensitivity of the Parameters of the Intensity-Based Stochastic Model for Terrestrial Laser Scanner. Case Study: B-Spline Approximation. *Sensors*, 18(9):2964

- KERMARREC G., NEUMANN I., ALKHATIB H. & SCHÖN S. (2019): The stochastic model for Global Navigation Satellite Systems and terrestrial laser scanning observations: A proposal to account for correlations in least squares adjustment. *Journal of Applied Geodesy*, doi:10.1515/jag-2018-0019
- KOCH K. R. (1999): *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*; Springer: Berlin, Germany, 1999
- KOCH K. R. (2009) Fitting free-form surfaces to laserscan data by NURBS, *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)* 116(4):134 – 140
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, S. 10–26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
- NEUNER H., HOLST C. & KUHLMANN H. (2016): Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis. *AVN* 123(2016)11-12:328 – 339.
- PAFFENHOLZ J. A. , HUGÉ J. & STENZ U. (2018): Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen. *AVN* 125(2018)4: 75 – 89.
- PAFFENHOLZ, J. A., STENZ, U., NEUMANN, I., DIKHOFF, I. & RIEDEL, B. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung. In: Jäger, W. (Hrsg.): *Mauerwerk-Kalender 2018*, Ernst & Sohn: Berlin, 2018, S. 205-219, doi: 10.1002/9783433608050.ch9.
- PIEGL L. & TILLER W. (1997): *The NURBS Book*; Springer Science & Business Media: Berlin, Germany.
- SCHACHT G., PIEHLER J., MÜLLER J. Z. A. & MARX S. (2017): Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke. *Bautechnik*, 94:125 – 130.
- TEUNISSEN P. J. G. (2000): *Testing Theory; An Introduction*; VSSD Publishing: Delft, The Netherlands.
- TOURNAS E. & TSAKIRI M. (2008): Deformation Monitoring Based on Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Registration, 13th Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, Portugal.
- WUJANZ D., BURGER M., METTENLEITER M. & NEITZEL F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 125:146 – 155.
- WUJANZ, D., BURGER, M., NEITZEL, F., LICHTENBERGER, R., SCHILL, F., EICHHORN, A., STENZ, U., NEUMANN, I. & PAFFENHOLZ, J.-A. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung. In: Jäger, W. (Hrsg.): *Mauerwerk-Kalender 2018*, Ernst & Sohn: Berlin, 2018, S. 221–239, 10.1002/9783433608050.ch10.
- XU X., BUREICK J., YANG H., NEUMANN I. (2018): TLS-based composite structure deformation analysis validated with laser tracker, *Composite Structures*, 202:60 – 65
- YANG H., OMIDALIZARANDI M., XU X., NEUMANN I. (2016): Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures, *Journal of Composite Structure* 2016. 169(1):173 – 179