

Lokale Modellierung zur Bestimmung von Flächenformabweichungen mittels terrestrischer Laserscanner¹

Local Modeling for the Identification of Form Deviations of Surfaces by Terrestrial Laser Scanners

Michael Geist, Martin Meister, Lisa Knaack, Fabian Gierschner

In dem Beitrag werden die Untersuchungen zur Verwendung terrestrischer Laserscanner bei der Formprüfung von Freiformflächen vorgestellt. Es werden zwei Methoden zur Weiterentwicklung der aus der geodätischen Deformationsanalyse bekannten Blockmittelwertbildung präsentiert. Die Ergebnisse werden an einer realen Prüfaufgabe evaluiert und dargestellt.

Schlüsselwörter: Terrestrisches Laserscanning, lokale Approximation, radiale Basisfunktion, Moving Least Square

The article presents the analysis of terrestrial laser scanners for the inspection of freeform surfaces. Two methods are described for further development of the geodetic deformation analysis. The results will be evaluated and presented on a real testing task.

Keywords: Terrestrial laser scanner, local approximation, radial basis function, moving least square

1 EINLEITUNG

Terrestrische Laserscanner zur Erfassung großer, industriell gefertigter Strukturen haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch die fallenden Anschaffungskosten sowie die steigende Zuverlässigkeit und Aufnahmegeschwindigkeiten werden insbesondere Phasenvergleichsscanner für produktionsbegleitende Qualitätssicherungsaufgaben, Steuerung von Fertigungsprozessen oder die Vorfertigung von Anbauteilen attraktiver. Bei Objektgrößen, in denen kleinvolumige Digitalisierungsgeräte, wie Streifenlichtprojektoren und Handscanner, nicht mehr mit vertretbarem Aufwand eingesetzt werden können, bieten Laserscanner den Vorteil einer umfassenden, fast vollständigen Erfassung der sichtbaren Objektstrukturen mit minimalem Eingriff in die fertigungstechnischen Abläufe. Die zu erfassenden Strukturen im Schiffbau, Offshore- und Windkraftbereich bestehen zu einem Großteil aus hydro- bzw. aerodynamisch optimierten Freiformflächen. Für die Erfüllung oder Optimierung von aerodynamischen, hydrodynamischen und ästhetischen Anforderungen

ist es notwendig, dass die Flächen einen möglichst harmonischen Verlauf aufweisen. Im Schiffbau und anderen Industriezweigen wird hierzu der Begriff „strakend“ beziehungsweise „Strak“ verwendet /Bonitz 2009/. Der Begriff leitet sich von der Verwendung von Straklatten und Gewichten zur Konstruktion harmonisch verlaufender Kurven ab. Die Konstruktion strakender Kurven erfolgt heute nicht mehr mittels Straklatten und -gewichten, sondern es werden rechnergestützte Methoden in den CAD-Programmen genutzt, um die Solloberflächen zu erzeugen. Deren Konstruktion kann mit verschiedensten Algorithmen erfolgen. Ausgegangen wird dabei von Punktmengen oder Kurvennetzen, die die Fläche beschreiben. Wenn diese Fläche genau durch die Stützpunkte verläuft, bezeichnet man sie als interpolierende Freiformfläche, während man eine möglichst glatte, aber nur näherungsweise durch die Stützpunkte verlaufende Fläche als approximierende Freiformfläche bezeichnet /Vajna et al. 1994/. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen zur Generierung der gewünschten harmonischen Kontur-

¹ Überarbeitete Fassung des im Tagungsband „Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015“ (Hrsg. Th. Luhmann, Ch. Müller) veröffentlichten Beitrags.

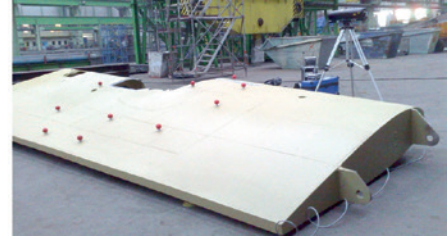
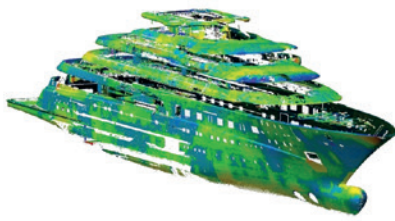


Abb. 1 | Anwendungen von 3D-Laserscannern. Links: Spachtelsimulation an einer Megayacht, Mitte: Konturprüfung eines Windkraftbauteils, rechts: Bestimmung der Fertigungsabweichungen eines Ruders

verläufe, z.B. natürliche Polynome, Lagrange-Polynome, Hermite-Polynome, Splinefunktionen oder Bernstein/Bezier-Polynome. Der Einsatz scannender Verfahren zur Qualitätssicherung dieser Freiformflächen bietet den Vorteil, dass im Gegensatz zu taktilen Messverfahren die gesamte Fläche erfasst und beurteilt werden kann. Für die Prüfung an durch Normen oder Spezifikationen fest definierten Punkten sind terrestrische Laserscanner hingegen aufgrund der rasterförmigen Abtastung nur bedingt geeignet. Hier stellt sich die Frage nach einer geeigneten Art und Weise, die Flächen zu interpolieren bzw. zu approximieren. Globale Approximationskonzepte modellieren dabei die gesamte Fläche, während lokale Modelle jeweils nur die benötigte Umgebung approximieren. Globale Modelle haben den Nachteil, dass sie nur schwer auf neue Stützpunkte angepasst werden können. Zudem weisen sie lokal oft höhere Abweichungen auf. Für die Erstellung lokaler Modelle haben sich zwei Verfahren durchgesetzt, die im Gegensatz zu Polynomen nicht zum Aufschwingen an den Rändern neigen: das Kriging und die radialen Basisfunktionen /Seiler 2012/.

In diesem Beitrag sollen die Untersuchungen zur Bestimmung der Formabweichungen großer industriell gefertigter Freiformflächen durch geeignete räumlich begrenzte Flächenmodellierung im lokalen Bereich definierter Prüfpunkte vorgestellt werden. Typische Anwendungen und Objektgrößen sind in *Abb. 1* dargestellt.

2 Stand der Technik

Für die Ermittlung von Flächenformabweichungen an Freiformflächen (Soll-Ist-Vergleich) mit überproportionalen Ausdehnungen,

wie sie z.B. im Schiffbau oder im Windkraftbereich vorkommen, eignen sich terrestrische Laserscanner zur effektiven Konturerfassung. Die Prüfbarkeit der Toleranzen ist dabei abhängig von der mit dem jeweiligen Instrument erzielbaren Genauigkeit. Da es sich um eine objektbezogene Auswertung handelt, ist neben der Formtreue der Objektbeschreibung (systematische Fehler) das Messrauschen von besonderer Bedeutung. Das Messrauschen ist eine variable Größe in Abhängigkeit von u. a. Entfernung, Auftreffwinkel, Reflexionseigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit. Deshalb lassen sich keine pauschalen Aussagen zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse treffen. Für eine prozesssichere Ableitung von Prüfgrößen oder Korrekturvorgaben ist die Einzelpunkt Betrachtung nicht ausreichend. Neben dem Messprinzip bedingten Nachteil scannender Systeme, definierte Prüfstellen nicht direkt zu erfassen, handelt es sich um nicht kontrollierte, nicht reproduzierbare Messungen mit unbekannter Messunsicherheit /Eling 2009/. Dies hat zur Entwicklung der Blockmittelwertbildung zur Steigerung der inneren Genauigkeit geführt. Die Güte der Ergebnisse ist dabei abhängig von der gewählten Blockbreite und der Punktzahl pro Block. Nichtlineare Kurvenverläufe lassen sich jedoch nur unzureichend modellieren /Garmann et al. 2014/. Für den Einsatz zur Deformationsanalyse von Bauwerken ist die lokale Approximation mittels Ebenen und die Rückführung auf einen reproduzierbaren Punkt umfangreich durch /Eling 2009/ beschrieben. Die zugrunde liegende Idee einer ausgleichenden Ebene erweist sich nur bei der Anwendung an schwach gekrümmten Flächen als praktikable Methode zur Ermittlung der Formabweichung. Die Residuenanalyse am Beispiel einer Megayacht (*Abb. 2*) zeigt den nicht ausreichenden Modellansatz für unbekannte lokale Konturverläufe.

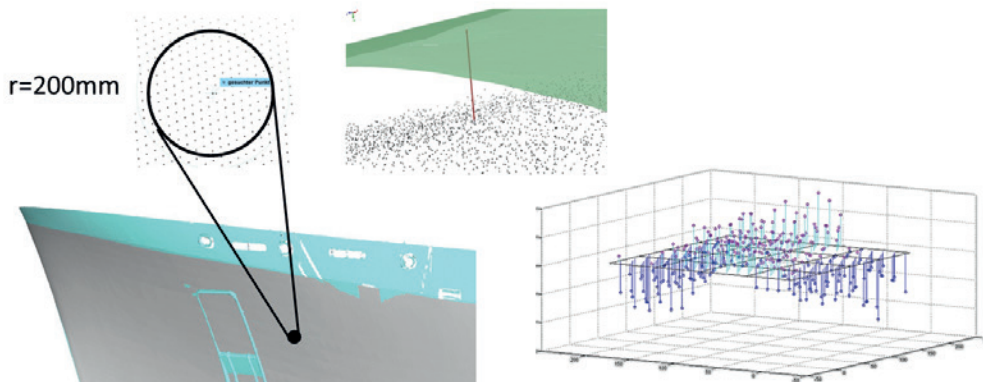


Abb. 2 | Residuenanalyse der lokalen Ebene an einer Schiffaußenhaut

Die Erweiterung des Modellansatzes mit mathematisch einfach zu beschreibenden Polynomen höherer Ordnung hat sich in vielen Bereichen als grundsätzlich nicht praktikabel erwiesen. Flächenpolynome neigen mit zunehmendem Polynomgrad zu einem unerwünschten Überschwingverhalten und liefern nur selten befriedigende Ergebnisse /Kern 2003/.

Ein möglicher Ansatz zur Approximation von beliebig gekrümmten Flächenverläufen ist das stückweise Aneinanderreihen von Polynomen. An den Übergangsstellen werden Glattheitsbedingungen gestellt und es entsteht eine zweimal stetig differenzierbare Funktion, die als Spline bezeichnet wird. Dieser Ansatz hat in der Automobilindustrie zur Entwicklung der heute bekanntesten und gebräuchlichsten Freiformflächenbeschreibungen durch B-Splines und deren Erweiterung zu Non-Uniform Rational B-Splines geführt. Die Übergangsstellen werden dabei zu einer Knotenfolge zusammengefasst, die den Konturverlauf bestimmt. Im Dreidimensionalen entsteht dabei ein Kontrollgitter (Abb. 3), das bei der Approximation von Messdaten in geeigneter Weise bereitgestellt werden muss.

Daraus leitet sich für die aus stückweise definierten Polynomen zusammengesetzten Funktionen die Bezeichnung gitterbasierte Verfahren ab. Voraussetzung für die Berechnung von B-Spline-Kurven bzw. -Flächen ist also eine geeignete Parametrisierung der Ausgangsdaten /Grimm-Pitzinger & Rudig 2005/. Die Autoren weisen u. a. nach, dass durch eine geeignete Modellierung das Messrauschen signifikant verringert werden kann. Die Flexibilität der

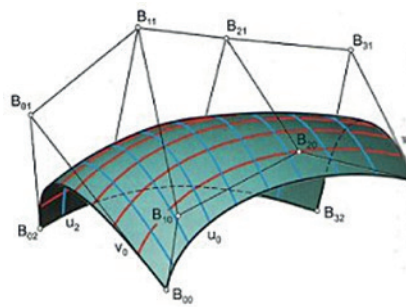


Abb. 3 | Kontrollgitter einer Freiformfläche /GRG21 OE 2006/

Splines wird dabei jedoch durch eine hohe Anzahl zu bestimmender Parameter „erkaufte“ /Holst 2015/. Bei Flächen mit polynomialen Basisfunktionen besteht die Gefahr einer „Überparametrierung“, wenn zu viele erklärende Variable in das Modell integriert werden. Dies widerspricht dem Konstruktionsziel von Modellen, einen Sachverhalt mit möglichst wenigen Einflussvariablen zu erklären /Cleff 2008/.

Wird eine Berechnung der Formabweichungen nur an wenigen diskreten Stellen benötigt, kann die Vorinformation, dass es sich bei der erfassten Oberfläche um harmonisch glatte Konturverläufe handelt, auch mit anderen Approximationsmethoden genutzt werden. Neben der aus der Geodäsie bekannten Kollokation können die für verstreute Datenpunkte entwickelten Scattered-Data-Verfahren auf Basis radialer Basisfunktionen genutzt werden. Diese Verfahren

HAMBURG 2016

INTERGEO®

11. – 13. OKTOBER

WISSEN UND HANDELN
FÜR DIE ERDE



SMARTER GEODATEN –

SMART CITIES

GEOSPATIAL 4.0 –

BIG DATA

GEOBIM –

DIGITALES BAUEN

**WERDEN SIE TEIL
DER INTERGEO 2016!
SCHON ZU 80 % AUSGEBUCHT**



DVW

Veranstalter: DVW e.V.
Ausrichter Kongress: DVW GmbH
Ausrichter Messe: HINTE GmbH

SPONSOREN:



werden als „Gitterfreie Methoden“ bezeichnet und bieten für die Anwendung zur lokalen Approximation folgende Vorteile gegenüber gitterbasierten Verfahren /Kaufmann 1982/, /Godzierz 2007/, /Pfeiffer 2011/, /Antoni 2012/, /Seiler 2012/:

- die Berechnung ist an frei wählbaren Stützstellen möglich und ist somit nicht an eine Gittertopologie gebunden;
- sehr hohe Rechengenauigkeit bei einem relativ kleinen Rechenaufwand;
- skalierungsinvariant;
- Approximationen weisen weniger bzw. schwächere ungewollte Schwingungen auf, d. h. dass die Modelle weniger unnötige Oszillationen aufweisen;
- hohe Zuverlässigkeit bei beliebigen Punktverteilungen, was insbesondere bei sich überlagernden Punktwolken vorteilhaft ist;
- es sind keine aufwendigen Rechnungen nötig, um die Basisfunktionen zu bestimmen, da radiale Basisfunktionen nur von der Entfernung abhängig sind.

3 GITTERFREIE METHODEN

Eine Alternative zur Integration von Modellwissen bei der Approximation stetiger Flächenverläufe stellen die gitterfreien Methoden dar. Ihr Vorteil ist, dass für die Approximation keine Gitterstruktur erzeugt werden muss, sondern direkt die Messpunkte genutzt werden können. Die gitterfreien Methoden werden im Allgemeinen angewendet, um die Approximation verstreuter Daten zu ermöglichen. Sie werden außerdem bei der Verarbeitung von Messdaten eingesetzt, um Löcher zu schließen und um Interpolationsaufgaben zu lösen. Dabei werden zwei unterschiedliche Verfahren – die Radiale-Basisfunktionen-Approximation und der Moving Least Square – unterschieden /Fasshauer 2007/. Beide Methoden verwenden radiale Basisfunktionen.

3.1 Radiale Basisfunktionen

Radiale Basisfunktionen (RBF) sind distanzgewichtete Funktionen, deren Funktionswert abhängig von der Entfernung zum Ursprung bzw. zu einem anderen Zentrumspunkt ist. Dabei wird der Punkt, in dem die radialsymmetrische Funktion gebildet wird, als Zentrum bezeichnet. Die Wahl der Zentrumspunkte (x_c) kann zufällig erfolgen oder sich auch direkt aus den Messpunkten ergeben. Um den Abstand zum Zentrum zu bestimmen, wird in der Regel die ℓ^2 -Norm (Euklidische Norm) verwendet, wobei andere Normen in speziellen Fällen Vorteile mit sich bringen können. Zur mathematischen Beschreibung einer analytischen Fläche wird die Linearkombination der Basisfunktionen mit den entsprechend zu bestimmenden Koeffizienten λ_i angewandt (1):

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi(\|x_c - x_i\|), \tag{1}$$

mit $x_i, x_c \in \mathbb{R}^n$.

Die Funktionen $\varphi(r)$ können dabei durch zusätzliche Parameter erweitert werden, sodass durch die Form $\varphi(r, \varepsilon)$ die Basisfunktion

geglättet bzw. die Gewichtung der umliegenden Punkte beeinflusst werden kann. In der Literatur gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher radialer Basisfunktionen. Einige Beispiele an RBF sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Name	RBF-Funktion
Linear	$\varphi(r, \varepsilon) = \varepsilon r$
Gauß	$\varphi(r, \varepsilon) = e^{(-\varepsilon r)^2}$
Wendland (C2-Stetigkeit)	$\varphi(r, \varepsilon) = (1 - \varepsilon r)^4 + (4\varepsilon r + 1)$
Thin Plate Splines	$\varphi(r, \varepsilon) = \varepsilon r^2 \log \varepsilon r$

Tab. 1 | Definition häufig verwendeter RBF

3.2 RBF-Approximation

Aufgrund des physikalischen Hintergrunds beziehen sich die folgenden Ausführungen zur RBF-Approximation exemplarisch auf Thin Plate Splines. Der Name bezieht sich dabei auf die von /Duchon 1976/ vorgestellte Lösung einer Fundamentalgleichung und repräsentiert den Zustand der minimalen Biegeenergie einer dünnen Metallplatte. Die Approximation von Messdaten wird durch das Hinzufügen eines polynominalen Terms $\rho(x)$ zu den Basisfunktionen, wie in (2), erreicht:

$$f(x) = \rho(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi(r_i), \tag{2}$$

mit $x \in \mathbb{R}^2$ und $r_i = \|x_c - x_i\|$.

Die Lösung der Gleichung lässt sich näherungsweise als die Form interpretieren, die eine Metallplatte einnimmt, wenn sie durch N Punkte aus der Ebene $\rho(x, y)$ gebogen wird. Die unbekanntenen Koeffizienten λ_i und die Parameter der Ebene werden durch die Minimierung der Fehlerquadrate und einen integralen Anteil zur Steuerung der Glättung berechnet:

$$\min \left\{ \sum (f_i - f(x))^2 + g \int_{\mathbb{R}^2} (\Delta f(x))^2 \right\} \tag{3}$$

mit $\Delta f = \text{div}(\text{grad } f) = \nabla(\nabla f)$.

Dabei bestimmt in (3) der Term für die Minimierung der Fehlerquadrate die Nähe der Funktion zu den Daten und der integrale Anteil steuert die Glattheit der Funktion. Das Verhältnis der beiden Terme zueinander wird durch den Glättungsfaktor g festgelegt.

3.3 Moving Least Square

Ein ebenfalls auf radialen Basisfunktionen basierendes Approximationsverfahren ist das Moving-Least-Square-(MLS-)Verfahren. Das Verfahren eignet sich sehr gut, um Problemstellungen zu behandeln, an denen das Verhalten globaler Modelle nicht ausreichend ist oder nur mit übermäßigem Aufwand an die Modellanpassung angewendet werden kann /Cleveland & Devlin 1988/.

Prinzipiell beruht das Verfahren auf der Methode der kleinsten Quadrate, bei der die gewichteten Fehlerquadrate für den jeweiligen Punkt $\bar{x} \in \mathbb{R}^n$ minimiert werden (4):

$$\left\{ \sum_{i=1}^N \phi(\|\bar{x} - x_i\|) \|f(x_i) - f_i\|^2 \right\} \tag{4}$$

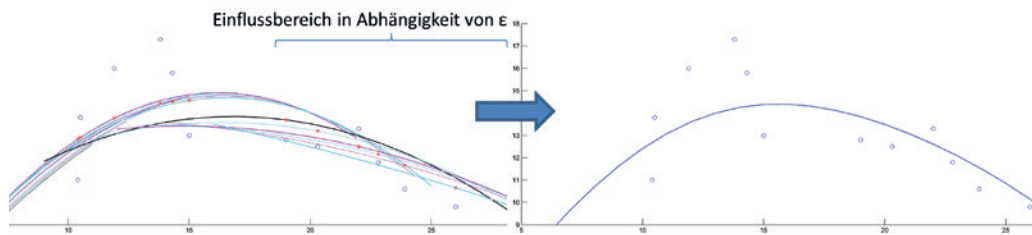


Abb. 4 | Prinzip der Approximation mittels MLS

Unter Nutzung der radialen Basisfunktionen als Gewichtsfunktion wird punktweise ein Teilbereich der Datenmenge approximiert (Abb. 4 links). Dadurch entsteht eine Menge an Polynomen, die jeweils nur für den Zentrumspunkt gültig sind. Diese werden anschließend zu einer Funktion zusammengefasst, welche eine Beschreibung der gesuchten Oberfläche ermöglicht.

Veranschaulicht bedeutet dies, dass ein Polynom niedrigen Grads gewählt und für einen beliebigen Punkt die lokal geltende Funktion entwickelt wird. Anschließend wird diese Funktion über das Parametergebiet verschoben und an den weiteren Punkten einzeln neu berechnet. Eine kontinuierliche Flächenbeschreibung erhält man durch das Zusammenfügen der Einzelfunktionen mittels der Technik der „Partition der Eins“. Nach /Shepard 1968/ gilt für jedes Gewicht:

$$\varphi_j(x) = \frac{\phi_j(x)}{\sum_{i=1}^N \phi_i(x)} \quad \text{mit} \quad \sum_j \varphi_j \equiv 1. \quad (5)$$

Die MLS-Methode generiert eine stetig differenzierbare Funktion genau dann, wenn die Gewichtsfunktion stetig differenzierbar ist /Wendland 2004/. Der Parameter ε der RBF kann direkt genutzt werden, um eine Glättung der Funktion zu erreichen und bei RBF mit kompaktem Träger (z. B. Wendland) den Einflussbereich der Abstände zu steuern. Das MLS-Verfahren eignet sich grundsätzlich, um glatte Funktionen auch in verrauschten Daten zu approximieren, ohne die gesamte Fläche entwickeln zu müssen /Fasshauer 2007/.

Für die Erläuterung und Herleitung der mathematischen Zusammenhänge für die Approximation mit radialen Basisfunktionen sei auf die einschlägige Fachliteratur, u. a. /Levin 1998/, /Wendland 2004/, /Fasshauer 2007/, hingewiesen.

4 ERGEBNISSE

4.1 Anwendungsbeispiel

Um die Approximationsfähigkeit und Verwendbarkeit radialer Basisfunktionen für die Bestimmung lokaler Formabweichungen zu untersuchen, wurde ein reales Beispiel aus der Praxis gewählt. Es handelt sich dabei um einen ca. 5 m großen Modellpropeller, der eine fast glatte Oberfläche aufweist. Die Aufgabenstellung besteht in der ISO-484 konformen Toleranzprüfung an ca. 800 Prüfpunkten für den gesamten Propeller. Für die Untersuchungen wird sich auf 60 Prüfpunkte auf einer Seite des Einzelflügels beschränkt (Abb. 5). Um die Leistungsfähigkeit der Approximationsmethoden bewerten zu können, sind Informationen zur wahren Gestalt des Objekts notwendig. Da eine Erfassung der Oberfläche dieser Objektgröße in zehnfach höherer Genauigkeit bei den neuesten Scannergenerationen kaum noch wirtschaftlich möglich ist, wird im ersten Schritt auf eine Evaluierung mittels Simulation zurückgegriffen. Der Vorteil solcher Datensimulationen besteht darin, dass die Unsicherheitsbeiträge nicht voneinander getrennt und den jeweiligen Quellen konkret zugeordnet werden müssen /Naab 2012/. Dies gilt bei Laserscannern insbesondere für die Trennung von systematischen und zufälligen Fehlern. Um die erreichbaren Ergebnisse auch am realen Objekt zu prüfen, wurde der Modellflügel mittels eines GOM-Streifenlichtprojektors in Verbindung mit einem Industriephotogrammetriesystem digitalisiert. Als Ergebnis liegt ein hochaufgelöstes trianguliertes Flächenmodell als Vergleichsobjekt vor.

Als Oberflächenformabweichung wird der orthogonale Abstand zwischen der theoretischen Sollfläche und der zu prüfenden Oberfläche definiert. Es wird der Abstand zur Sollfläche entlang des

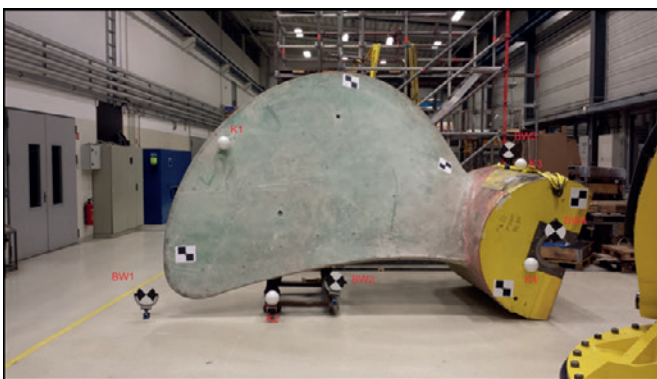
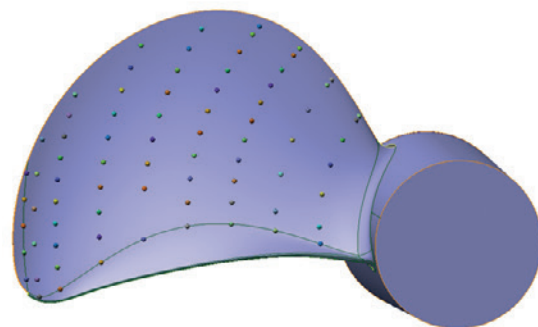


Abb. 5 | Modellflügel und Prüfpunkte nach ISO-Norm



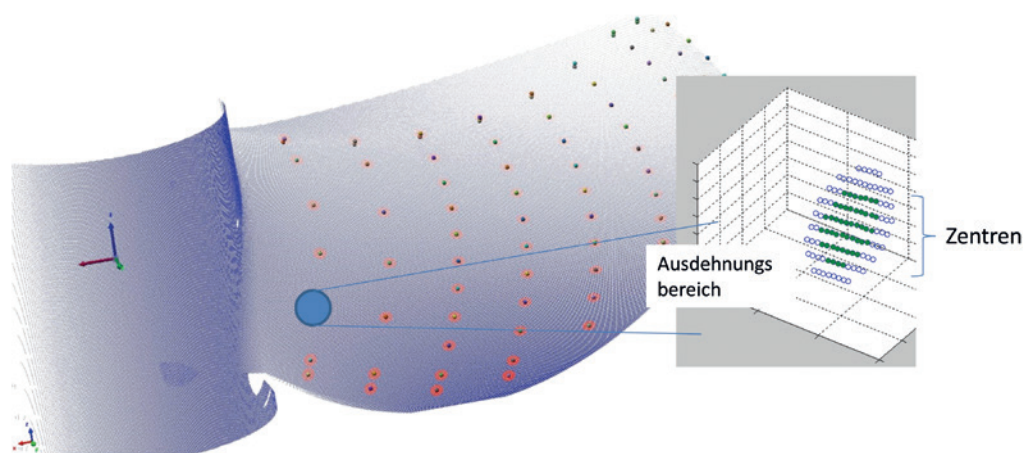


Abb. 6 | Prüfpunkte und Definition der zur lokalen Approximation genutzten Messpunkte

Normalenvektors des Prüfpunkts gesucht. Für die Anwendung an Schiffspropellern ergibt sich ein weiterer Vorteil der Bestimmung einer kontinuierlichen Flächenbeschreibung für den lokalen Bereich. Der Abstand entlang der Z-Achse des festgelegten Koordinatensystems (Bezug: Drehachse des Bauteils) entspricht der Steigungsdifferenz. Die Steigung ist ein Kennwert für die Leistungsfähigkeit des Propellers. Da es sich formal nur um die Festlegung der Vektorrichtung handelt, wird im Folgenden nur die Oberflächenformabweichung betrachtet. Anschließend erfolgt der Vergleich durch die Ermittlung des mittleren quadratischen Fehlers (RMS) über alle Oberflächenformabweichungen.

4.2 Simulation

Für die Simulation wurde die theoretische Sollfläche des Flügels genutzt. Mittels des umgesetzten Simulationstools können Messdaten sowohl von einem festgelegten Standpunkt simuliert als auch in ein regelmäßiges Raster virtuell erzeugt werden. Durch standpunkt-basierte Datenerzeugung können unterschiedliche Fehler-einflüsse (Winkelmessung, Entfernungsruschen) berücksichtigt werden. Ziel der Simulation ist es:

- Untersuchungen zur Verwendbarkeit der unterschiedlichen RBF durchzuführen;
- die grundsätzliche Approximationsfähigkeit der Methoden zu bewerten;
- den zu erwartenden Approximationsfehler zu bestimmen.

Da die Flügeloberfläche in den meisten Bereichen eine relativ schwache Krümmung aufweist, wird zum Vergleich der ebenenbasierte Ansatz ebenfalls umgesetzt. Die Simulation bewertet noch nicht den Einfluss lokaler Unebenheiten, die sich bei der Blockwertmittelbildung negativ auswirken können. Da mit jedem Punkt eine Funktion verbunden ist, wird im Umkreis des Prüfpunkts ein innerer und ein äußerer Bereich im Verhältnis „innerer + äußerer = gesamter Bereich“ definiert. Der innere Bereich beschreibt die Anzahl der genutzten Punkte (Abb. 6, grüne Punkte) und entspricht den Zentren, an denen jeweils eine radiale Basisfunktion entwickelt wird, der äußere Bereich (Abb. 6, blaue Punkte) die zusätzlich im Umkreis mitgenutzten Punkte. Der gesamte Bereich umfasst dem-

entsprechend alle Messpunkte, die für einen Prüfpunkt berücksichtigt werden. Die Punktzahl des inneren Bereichs entspricht der Anzahl der zu entwickelnden Funktionen.

4.2.1 Experimentelle Bestimmung der Ausdehnung

Im ersten Schritt der Simulation wurde für die Verfahren ein Ausdehnungsbereich der lokalen Approximation festgelegt. Dazu wurde der Ausdehnungsbereich um die zu bestimmenden Formabweichungen ohne Variation der Glättungsparameter erhöht. Es zeigt sich, dass bereits ohne Parameteranpassung mit beiden Verfahren ab ca. 30 Messpunkten eine Reduktion des Rauschens um den Faktor 5 erreicht werden kann (Abb. 7). Werden nur wenige Messpunkte im Bereich des Prüfpunkts verwendet, können bei geringen Krümmungen auf dem gewählten Objekt auch mit dem ebenenbasierten Ansatz gute Ergebnisse erzielt werden. Der Vorteil des gewählten Ansatzes besteht darin, dass wesentlich mehr Messpunkte zur Steigerung der Zuverlässigkeit der abgeleiteten Formabweichungen verwendet werden können. Mit einer geeigneten Parameteranpassung ist eine weitere Verbesserung der Ergebnisse der RBF-Approximation und des MLS-Verfahrens zu erwarten.

Abb. 8 zeigt exemplarisch die Untersuchung des Glättungsparameters der radialen Basisfunktion am Beispiel der Gauß-Funktion für das MLS-Verfahren mit lokalen Polynomen 2. Grades. Es ist zu erkennen, dass die Wahl des Parameters einen nichtlinearen Einfluss auf das Ergebnis hat. In der Literatur wird das Kreuzvalidierungsverfahren zur Parameteroptimierung beschrieben (siehe u.a. /Fasshauer 2007/). Da die Implementierung des Kreuzvalidierungsverfahrens für jeden Einzelbereich einen erheblichen Rechenaufwand verursachen würde, soll zukünftig aufgrund der Simulation eine vereinfachte Richtwertformel in Abhängigkeit vom zu erwartenden Messrauschen und dem Punktabstand abgeleitet werden. Entsprechende Beispiele finden sich u.a. in /Zhang 2004/. Deren Anwendung auf Laserscannerdaten konnte jedoch bis dato nicht die erwarteten Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse ohne Parameteranpassung dargestellt. Es wurde ein adaptiver Zentrumsbereich von 40 Punkten und eine Ausdehnung von 80 Punkten festgelegt. Die Anwendung des Ansatzes einer lokalen Ebene erfolgt nur für den inneren Bereich

von 40 Punkten, da mit steigender Messpunktzahl krümmungsabhängig eine wesentliche Verschlechterung der Ergebnisse zu erwarten ist (Abb. 7).

4.2.3 Vergleich der unterschiedlichen Verfahren

Zum Vergleich der inneren Genauigkeiten der verschiedenen Verfahren wurde die Flächenformabweichung an den durch die ISO 484 definierten Prüfpunkten (Abb. 5) aus den synthetischen Daten berechnet. Zur besseren Vergleichbarkeit mit dem ebenenbasierten Ansatz wurden für die Verfahren der radialen Basisfunktion jeweils Ansatzfunktionen mit Polynomen 1. Grades verwendet. Der Vergleich der Approximationsmethoden (Abb. 9) in Abhängigkeit vom Messrauschen zeigt eine deutliche Verbesserung der Zuverlässigkeit der bestimmten Formabweichungen. Mit allen drei Verfahren zur lokalen Approximation kann die innere Genauigkeit der Laserscannermessung deutlich gesteigert werden. Die RBF-Approximation ist dabei wesentlich empfindlicher gegen Messrauschen. Für das MLS-Verfahren ohne Optimierung der Parameter können bereits ohne Berücksichtigung lokaler Konturabweichungen die besten Schätzwerte der Formabweichungen erwartet werden. Zum Vergleich der Verfahren werden in Abb. 9 sowohl der RMS-Fehler aller Prüfabstände als auch der sich ergebende maximale Fehler dargestellt.

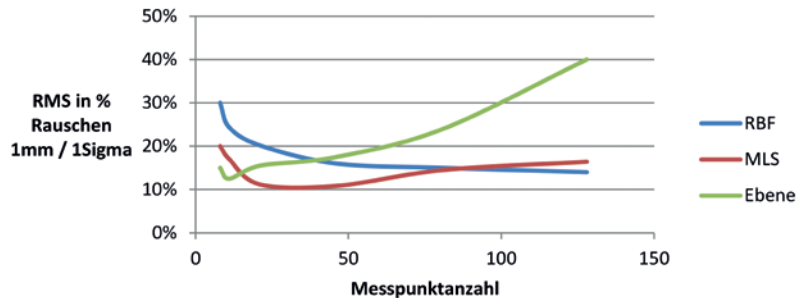


Abb. 7 | RMS bei 1 mm Rauschen und steigender Punktzahl

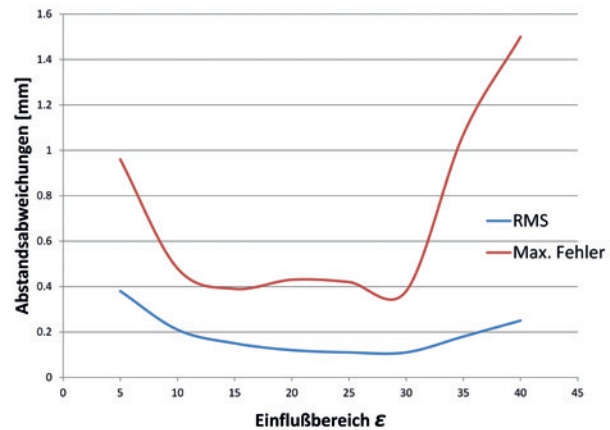


Abb. 8 | Variation des Glättungsparameters für die Gauß-Funktion

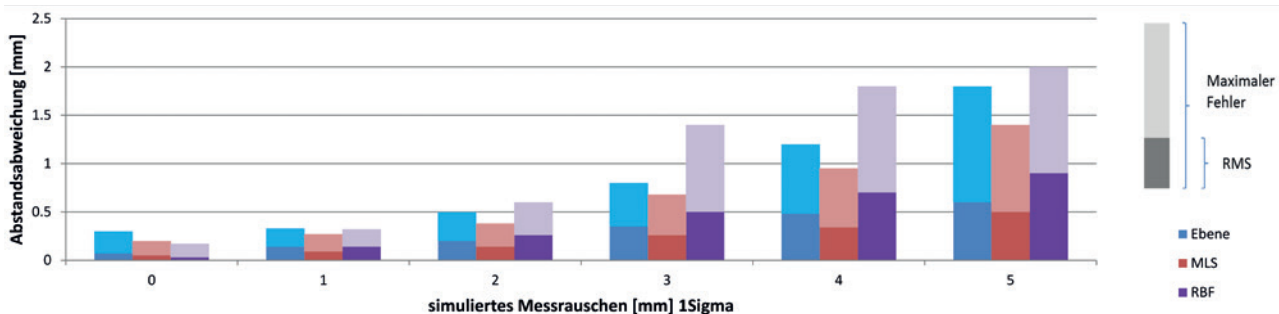


Abb. 9 | Vergleich der Verfahren in Abhängigkeit vom Messrauschen

4.3 Evaluierung am realen Objekt

Für das in Abb. 5 dargestellte Messobjekt wurden verschiedene Datensätze durch Variation der Entfernung, der Datenrate und des Auftreffwinkels erzeugt. Die unterschiedlichen Datensätze dienen der Übertragung und Evaluierung der Verfahren bei sich überlagernden Punktwolken. Die schematische Anordnung der Standpunkte ist in Abb. 10 dargestellt und ist durch die zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse begründet. Die Verknüpfung der Streifenlichtmessung, der unterschiedlichen Laserscannermessungen sowie die Referenzierung zueinander erfolgte in einem übergeordneten Bezugssystem mittels eines Industriephotogrammetriesystems sowie eines Lasertrackers. Zur Darstellung der Evaluierung wurden vier Standpunkte in unterschiedlichen Entfernungen ausgewählt, die alle ein etwa gleiches Raster von ca. 5 mm auf dem Objekt aufweisen. Zusätzlich zu den drei Verfahren wurde für jeden Prüfpunkt der

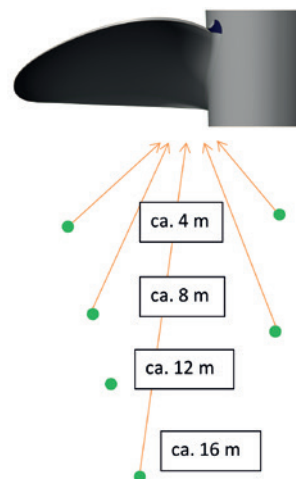


Abb. 10 | Schematische Anordnung der Standpunkte

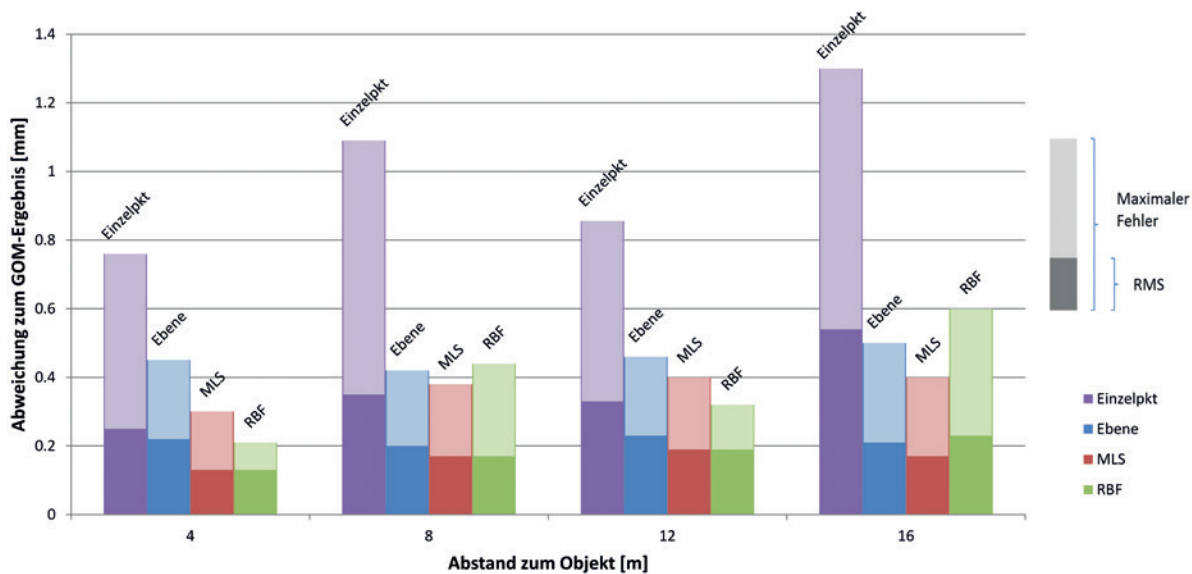


Abb. 11 | Vergleich der erzielbaren Genauigkeitssteigerung der Approximationsmethoden in Abhängigkeit unterschiedlicher Aufnahmesituationen

nächstliegende Einzelpunkt ausgewählt und die resultierende Formabweichung aus der Einzelpunktmessung ermittelt. Dabei bestätigen sich die Erkenntnisse der Simulation. *Abb. 11* zeigt, dass unter Einbeziehung der lokalen Konturverläufe bei geringem Rauschen mit der RBF-Approximation die besten Ergebnisse erzielt wurden.

Das MLS-Verfahren zeigt im Vergleich aller drei Verfahren, insbesondere bei erhöhten Rauschverhältnissen, die besten Ergebnisse. Die bei der MLS- bzw. RBF-Approximation in diesem Beispiel frei gewählten Parameter können durch Einbindung von Schätzverfahren auf Datenbasis weiter verbessert werden. Die bisherigen Versuche, die eine Einbindung von Parameterbestimmungen auf Basis der Kreuzvalidierung nutzen, zeigen bereits eine weitere signifikante Verbesserung der Approximation. Diese sind jedoch aufgrund des erhöhten Rechenaufwands nicht praktikabel für den Einsatz bei der Bestimmung einer erhöhten Anzahl von Prüfpunkten.

5 FAZIT

Bei der Ermittlung von Formabweichungen an Großstrukturen sind globale Modellansätze nicht ausreichend für die effektive und zuverlässige Prüfung von Toleranzen oder die Steuerung von Fertigungsprozessen geeignet. Durch eine lokale Approximation kann die hohe Redundanz beim Laserscanning genutzt werden, um Prüfmerkmale an Freiformflächen mit einer erhöhten Genauigkeit aus der Punktwolke zu extrahieren. Approximationsverfahren auf Basis radialer Basisfunktionen bieten dabei die Möglichkeit, durch die Einbringung entsprechenden Modellwissens (stetige Flächenverläufe) die Güte der Approximation und daraus abgeleiteter Merkmale zu erhöhen (*Abb. 12*). In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass eine Steigerung der inneren Genauigkeit der Scanmessung um mindestens den Faktor drei bereits mit grob abgeschätzten Glättungsparametern erreicht werden kann. Aufgrund der nicht benötigten äußeren Parametrisierung durch eine Gitterstruktur

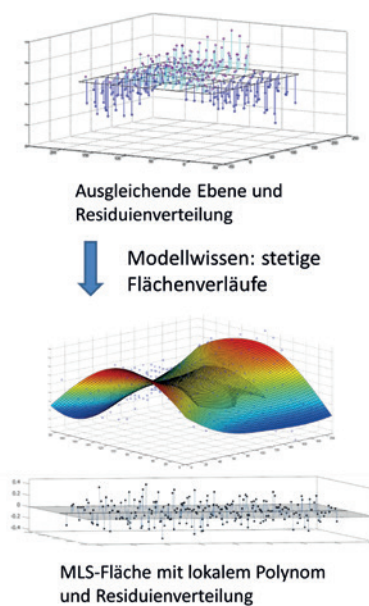


Abb. 12 | Verbesserung der Approximationsgüte durch die Berücksichtigung des Konturverlaufs

sind diese Verfahren besonders für automatisierte Mess- und Auswertprozesse geeignet. Anwendungsgebiete der beschriebenen Verfahren zur Formabweichungen mittels Laserscanner sind überdimensionale Freiformflächen, in denen eine exakte Modellierung der gesamten Fläche uneffektiv ist.

Beispiele für den Einsatz der räumlich begrenzten Approximation auf Basis von RBF sind:

- die Toleranzprüfung an durch Normen oder Spezifikationen definierten Positionen;
- automatisierte Auswertung an punktuellen Stellen zur Fertigungssteuerung (Vorgabe zum Materialauftrag oder -abtrag);
- Vorfertigung von Anbauteilen, die hohe Anforderung an die lokale Passgenauigkeit haben;

■ lokale Konturprüfung an flexiblen Bauteilen.

In den weiterführenden Forschungsarbeiten soll die Parameterfindung der RBF verbessert werden, um für die jeweilige Anwendung eine weitere Optimierung der Approximation zu erreichen. Außerdem werden Unsicherheitsbetrachtungen für die Abschätzung der Genauigkeit abgeleiteter geometrischer Größen erfolgen.

LITERATUR

Antoni, M. (2012): Nichtlineare Optimierung regionaler Gravitationsfeldmodelle aus SST-Daten. Dissertation, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Universität Stuttgart (2011).

Bonitz, P. (2009): Freiformflächen in der rechnerunterstützten Karosseriekonstruktion und im Industriedesign. Springer, Berlin/Heidelberg.

Duchon, J. (1976): Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. In: Revue française d'automatique, informatique recherche operationnelle Analyse numerique, 1976(10), 5–12.

Cleveland, W.; Devlin, S. (1988): Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. In: Journal of the American Statistical Association, 83(1988)403, 596–610.

Cleff, T. (2008): Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse. Gabler, Wiesbaden.

Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für Bauwerksüberwachung. DGK, Reihe C, 641. München. www.dgk.badw.de/fileadmin/docs/c-641.pdf (12.08.2014).

Fasshauer, G. E. (2007): Meshfree approximation methods with MATLAB. Interdisciplinary Mathematical Sciences, 6. World Scientific, Hackensack, NJ.

Garmann, M.; Alkhatib, H.; Schmitt, C.; Neumann, I. (2014): Monitoring von Brückentragwerken mittels Modellierung von Freiformkurven für Laserscanning-Profilen. In: Luhmann, Th.; Müller, Chr. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014. Wichmann, Berlin/Offenbach, 306–315.

Godzier, M. (2007): Globale Optimierung extrem aufwendiger Funktionen mit hochparallelen und sequentiellen Methoden. Dissertation, Fachbereich Mathematik, Technische Universität Darmstadt.

GRG21 OE (2006): Freiformflächen. http://www.grg21oe.at/mathe_geom/Kurs/freiformflaeche.htm (18.01.2016).

Grimm-Pitzinger, A.; Rudig, S. (2005): Laserscannerdaten für flächenhafte Deformationsanalysen 2005. In: Chesi, G.; Weinold, T. (Hrsg.): Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2005. Wichmann, Heidelberg, 115–124.

Holst, C. (2015): Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans. Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät, Universität Bonn.

International Organisation for Standardization (1981): International Standard ISO 484/1 – Shipbuilding – Ship screw propellers – Manufacturing tolerances. Part 1: Propellers of diameter greater than 2,50 m.

Kaufmann, T. (1982): The meshless radial point interpolation method for electromagnetics. Dissertation, Electrical Engineering and Information Technology, ETH Zürich.

Kern, F. (2003): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig.

Levin, D. (1998): The approximation power of moving least-squares. In: Mathematics of computation, 67(1998)224, 1517–1531.

Naab, C. (2012): Zur Parametrisierung bei der Modellierung von Objekten mit extremen Krümmungsänderungen. In: Luhmann, Th.; Müller, Chr. (Hrsg.):

Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, Berlin/Offenbach, 134–145.

Pfeiffer, T. G. (2011): Gitterfreie Methoden zur Berechnung harmonischer baryzentrischer Koordinaten für die Geometrieverarbeitung. Diplomarbeit, Fachbereich Mathematik und Informatik, Freie Universität Berlin.

Seiler, M. S. (2012): Geometrische Restriktionen bei der geometriebasierten Strukturoptimierung von Maschinenbauteilen mit Freiformgeometrien. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Shepard, D. (1968): A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In: Proc. 23rd National Conference ACM, 517–524.

Vajna, S.; Weber, C.; Schlingensiepen, J.; Schlottmann, D. (1994): CAD/CAM für Ingenieure: Hardware, Software, Strategien. Vieweg, Braunschweig.

Wendland, H. (2004): Scattered data approximation. Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics, 17. Cambridge University Press, Cambridge.

Zhang, X.; King, M.; Hyndman, R. (2004): Bandwidth Selection for Multivariate Kernel Density Estimation Using MCMC. In: Computational Statistics and Data Analysis, 50(2004), 3009–3031.

Dipl.-Ing. (FH) Michael Geist

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER
PRODUKTIONSTECHNIK

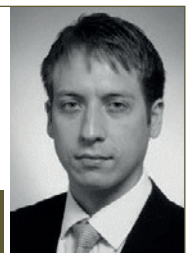
Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock
michael.geist@hro.ipa.fraunhofer.de



Dipl.-Math. Martin Meister

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER
PRODUKTIONSTECHNIK

Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock
martin.meister@hro.ipa.fraunhofer.de



M. Eng. Lisa Knaack

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER
PRODUKTIONSTECHNIK

Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock
lisa.knaack@hro.ipa.fraunhofer.de



Dipl.-Ing. Fabian Gierschner

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER
PRODUKTIONSTECHNIK

Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock
fabian.gierschner@hro.ipa.fraunhofer.de



Manuskript eingereicht: 10.08.2015 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet