

# Optimierung des Materialauftrags an Megayachten

Jens Hartmann, Robert Kenneweg, Fabian Gierschner, Christian Hesse,  
Michael Geist, Marc-André Dittrich, Volker Böß und Ingo Neumann

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird beschrieben, wie der Herstellungsprozess des Oberflächenfinishs von Luxusyachten optimiert und damit effizienter gestaltet werden kann. Um dies zu erreichen, erfolgt die 3D-Objektaufnahme durch kinematisches terrestrisches Laserscanning (k-TLS). Dazu wird ein im Profilmodus arbeitender Laserscanner auf einer bewegten Plattform am Objekt vorbeibewegt und durch einen Lasertracker hochgenau referenziert. Somit wird eine schnelle Aufnahme großer Oberflächen ermöglicht und die Aufnahmedauer deutlich verkürzt. Wesentliche Ziele der Datenauswertung sind die Entwicklung von Algorithmen zur Datenbereinigung und -aufbereitung sowie eine automatisierte Modellgenerierung unter Berücksichtigung von Sollkriterien und Randbedingungen. Dafür wird ein Designmodell verformt und der erfassten 3D-Punktwolke angenähert, während die zuvor definierten Randbedingungen eingehalten werden. Die Bewertung der generierten Flächen erfolgt hinsichtlich zu wählender Kriterien, welche sich aus mathematischen Analysen von Krümmungsverläufen, Stetigkeiten und konstruktiven Vorgaben, wie z.B. Parallelität oder konstante Krümmung ergeben. Die Erstellung dieser Kriterien erfolgt auf Basis von Bewertungen real gebauter Schiffe und der Analyse der zugehörigen Daten. Ziel ist es, sowohl die Effizienz und die Reproduzierbarkeit der Sollflächengenerierung als auch die Produktivität des Auftrags zu verbessern.

## Summary

*This article describes how the manufacturing process of the surface finish of luxury yachts can be optimized and thus made more efficient. To achieve this, the 3D object acquisition is carried out by kinematic terrestrial laser scanning. For this purpose, a laser scanner operating in profile mode is moved past the object on a mobile platform and referenced with high accuracy by a laser tracker. Thus, the required time for the acquisition of large surfaces is reduced significantly. The main goals of the data evaluation are the development of algorithms for data cleansing and processing as well as an automated model generation, with respect to desired criteria and the boundary conditions. For this, a design model is deformed and approximated to the captured 3D point cloud, while the previously defined boundary conditions are met. The evaluation of the generated surfaces is carried out with respect to criteria, which is derived from mathematical analyses of curvature sequences, consistency and constructive specifications, such as parallelism or constant curvature. These criteria are compiled based on evaluations of real ships and the analysis of the associated data. This is intended to increase the productivity of the desired area generation as well as the application of the filler.*

**Schlüsselwörter:** Schiffbau, Industrievermessung, kinematisches terrestrisches Laserscanning, Flächenmodellierung

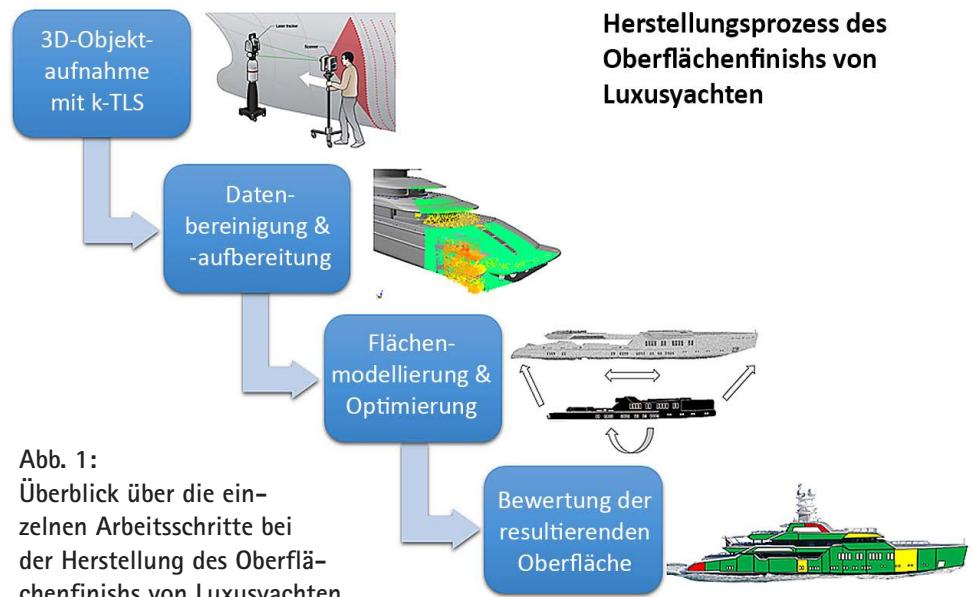
## 1 Einleitung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Entwicklungen und Methoden sind Inhalt des Verbundprojektes FINISH »Exakte und schnelle Geometrieerfassung sowie Datenauswertung von Schiffsoberflächen für effiziente Beschichtungsprozesse«, welches im Rahmen des Forschungsprogramms »Maritime Technologien der nächsten Generation« vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. Neben dem Gesamtkoordinator Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG (FLW) in Bremen, sind die folgenden Partner beteiligt: Vermessungsbüro Dr. Hesse und Partner Ingenieure Hamburg (dhp:i), Geodätisches Institut Hannover (GIH), Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) Rostock und das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover.

Hauptziel des Vorhabens ist die Optimierung des Materialauftrags bei der Herstellung von Megayachten. Die industrielle Produktion großer Objekte (> 100 m) ist ein sehr zeit- und kostenaufwändiger Prozess. Die Thematik, welche die Teilschritte 3D-Objektaufnahme, automatisierte Aufbereitung der 3D-Daten, Modellierung des optimierten Sollmodells sowie eine Bewertung der Flächenmodellierung umfasst, wurde beispielsweise in Wanner et al. (2010) und in Schäfer (2016) thematisiert.

In den vergangenen Jahren sind die Objekte im Spezialschiffbau stetig größer und komplexer geworden. Vor allem bei Luxusyachten spielt die Ästhetik der äußeren Oberflächen eine große Rolle. Zum Ausgleich von nicht vermeidbaren Fertigungsabweichungen werden die Außenbereiche mit Spachtelmasse geglättet und anschließend hochglänzend lackiert. Das ist ein sehr aufwendiger Arbeitsschritt, der durch eine 3D-Erfassung und Vorgabe der benötigten Spachteldicken beschleunigt werden kann. Die 3D-Objektaufnahme erfolgt aktuell durch statisches terrestrisches Laserscanning (s-TLS). Für die Aufnahme von Großstrukturen sind oft 50 und mehr Einzelmessungen nötig, welche im Nachgang referenziert und bereinigt werden müssen. Aufgrund der ständig steigenden Schiffsgrößen, ist die Datenerfassung und -auswertung sehr zeitintensiv. Für eine rechtzeitige Bereitstellung der Vorgaben an den Spachtelapplikateur ist es daher notwendig, sowohl Erfassung als auch Auswertung zu optimieren und zu beschleunigen.

In diesem Beitrag wird beschrieben, wie der Herstellungsprozess des Oberflächenfinishs von Luxusyachten optimiert und effizienter gestaltet werden kann. Die Abb. 1 gibt einen Überblick über den Gesamtlauf. Die einzelnen Arbeitsschritte – 3D-Objektaufnahme, Aufbereitung und Bereinigung der erfassten Punktwolken, die daraus erfolgende Flächenmodellierung und Optimierung sowie eine abschließende Bewertung der resultierenden Oberflächen – werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.



## 2 3D-Objektaufnahme durch kinematisches terrestrisches Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ermöglicht es, 3D-Objekte schnell und flächenhaft zu erfassen. Üblicherweise erfolgt dies durch s-TLS und es können Genauigkeiten von bis zu 1 bis 2 mm erreicht werden (Wanner et al. 2010). Die Objekterfassung in Form von 3D-Einzelpunktwolken erfolgt dabei von mehreren Standpunkten, welche anschließend zu einer 3D-Gesamtpunktwolke zusammengefasst (referenziert) werden. Für große und komplexe Objekte, wie z.B. Luxusyachten, kann dies zu einem sehr hohen Arbeitsaufwand führen. Darüber hinaus existieren in der industriellen Produktion hohe Genauigkeitsanforderungen ( $\pm 1$  mm) an die 3D-Objektaufnahme. Hinzu kommt, dass diese oft unter erschwerten Messbedingungen wie z.B. Staubentwicklung bzw. Erschütterungen, welche durch den Produktionsprozess hervorgerufen werden, erfolgt.

Alternativ zur 3D-Objektaufnahme mit s-TLS bietet sich aus Effizienzgründen eine Erfassung mit k-TLS an. Aktuelle Systementwicklungen im Indoor-Bereich verfügen jedoch nicht über die Spezifikationen, um alle genannten Anforderungen und Bedingungen zu erfüllen. Beispielhaft sind hier Leica Geosystems (2018), Applanix (2018), Viametris (2018) und Keller (2016) zu nennen. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit ab, ein geeignetes Multi-Sensor-System (MSS) mit entsprechenden Auswertealgorithmen zu entwickeln.

Das Prinzip der Objektaufnahme ist in der Abb. 2 dargestellt. Hierbei wird ein Laserscanner, welcher im Profilmodus (2D) rotiert, auf einer beweglichen Plattform am Objekt vorbeibewegt.

Als objektfassender Sensor wird ein terrestrischer Laserscanner mit einer hohen Genauigkeit verwendet. Hierfür ist bei einer Messentfernung von  $< 10$  m ein 3D-Gesamtfehler im Bereich von  $< 1$  mm zu erwarten.

Weitere genauigkeitsbeeinflussende Faktoren sind z.B. die Messentfernung, der Auftreffwinkel des Laserstrahls und die Materialeigenschaften des Objektes. Für eine hochgenaue direkte Referenzierung der bewegten Plattform wird ein Lasertracker in Verbindung mit einer am Laserscanner montierten T-Probe verwendet (siehe Abb. 3). Der Lasertracker ist mit einem Absolutinterferometer (AIFM) ausgestattet. Der Vorteil hierbei ist, dass die

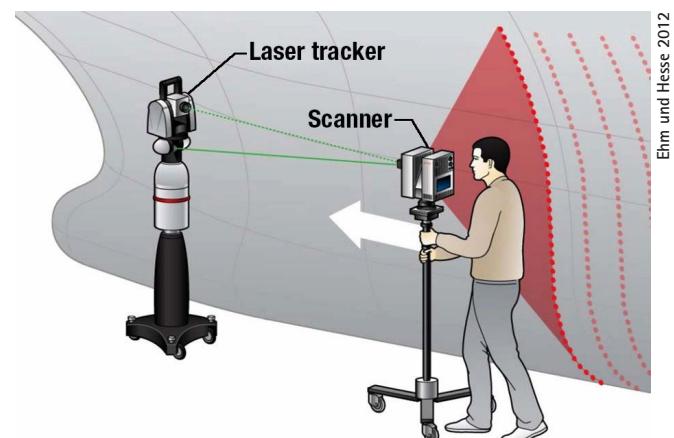


Abb. 2: Funktionsprinzip des k-TLS basierenden MSS zur Erfassung eines Objektes

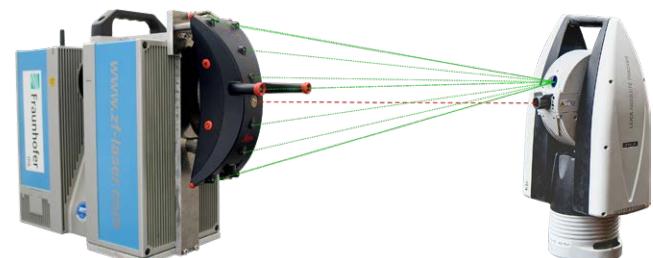
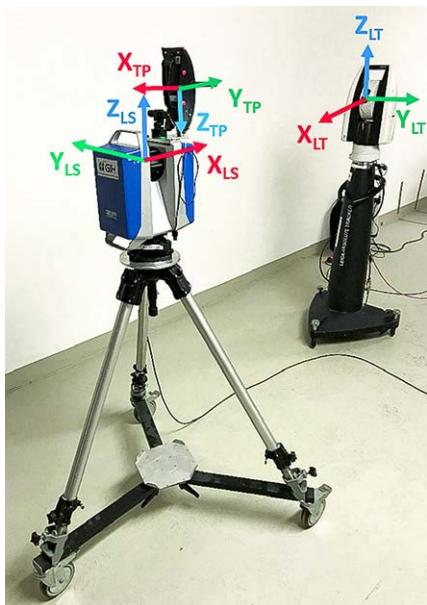


Abb. 3: Erfassung des Referenzpunktfeldes der am Laserscanner befestigten T-Probe durch den Leica AT960, in grün die von der Kamera erfassten zehn LEDs und in rot die Distanzmessung zum Reflektor

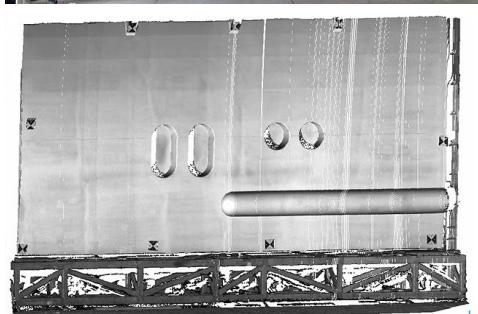


**Abb. 4:**  
Überblick über die verwendeten Sensoren Laserscanner mit montierter T-Probe (links) und Lasertracker (rechts) sowie die jeweiligen Koordinatensysteme Laserscanner (LS), T-Probe (TP) und Lasertracker (LT)

Distanzmessung mit der Genauigkeit eines Absolutdistanzmessers und mit der Geschwindigkeit eines Interferometers erfolgt. Schnelle und präzise Messungen sind auf diese Weise auch ohne einen Referenzpunkt möglich. Des Weiteren hat der Lasertracker eine Kamera, durch welche das Referenzpunktfeld der T-Probe, bestehend aus einem Reflektor und zehn LEDs angemessen wird (siehe Abb. 3).

Zusammenfassend ist es somit möglich, dass gleichzeitig je drei Translationen und Rotationen bestimmt werden (Abb. 4). Die erreichbaren Genauigkeiten (maximum permissible error) betragen  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$  für die Translationen und  $0,01^\circ = 18 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$  für die Rotationen (Hexagon Metrology 2018).

Durch Verwendung eines Triggersignals, welches der Laserscanner (pro Profil) an den Lasertracker sendet, erfolgt eine Synchronisierung von Objektaufnahme und Referenzierung. Da das Koordinatensystem der T-Probe (KTP) gegenüber dem des Laserscanners (KLS) drei-



**Abb. 5:**  
Oben: Aufbau eines Testpanels auf der Lürssen Werft.  
Unten: Erfasste 3D-Punktwolke mit k-TLS und Darstellung der Intensität in Grauwerten

dimensional verschoben und verdreht ist, muss die relative Orientierung (Pose) bestimmt werden. Dieser Prozess wird als 6 DoF (Degrees of Freedom) Kalibrierung bezeichnet. Die hochgenaue Bestimmung der 6 DoF (drei Translationen und drei Rotationen) erfolgt durch eine gemeinsame Erfassung von Referenzgeometrien durch Lasertracker und Laserscanner und wird grundlegend in Strübing und Neumann (2013) beschrieben. Die Bestimmung der Translationen erfolgt mit einer Standardabweichung von  $\leq 1 \text{ mm}$  und die Rotationen mit wenigen Milligrad, siehe Dorndorf et al. (2015), Heinz et al. (2017) und Hartmann et al. (2017).

Somit können alle gemessenen Punkte vom KLS in das KLT transformiert werden. Ein Überblick der verwendeten Sensoren und deren Koordinatensysteme zeigt Abb. 4. Die Transformation der Punkte in das KLT entspricht einer Ähnlichkeitstransformation mit sieben Parametern, wobei der Maßstab vernachlässigt wird. Der Übergang vom KLS in das KLT beinhaltet eine zweistufige Transformation:

1. vom KLS ins KTP mit den 6 DoF der vorab durchgeföhrten Kalibrierung und
2. vom KTP ins KLT mit den vom Lasertracker zur T-Probe direkt gemessenen Translationen und Rotationen.

Aufgrund der mechanisch starren Verbindung zwischen T-Probe und Laserscanner werden die 6 DoF als konstant für den Messzeitraum angenommen.

Erste Ergebnisse aus Testmessungen auf mit einem Leica T-Scan eingemessene Referenzgeometrien in Dorndorf et al. (2015) zeigen, dass eine 3D-Objektaufnahme durch k-TLS im Bereich von 1 bis 2 mm möglich ist. Ziel der aktuellen Forschungsarbeiten ist es, diese Entwicklungen weiterzuführen. Die Hauptaufgabe besteht darin, dass die komplexen Bedingungen (großflächige Aufnahme) und Vorgaben (Genauigkeitsanforderung  $\pm 1 \text{ mm}$ ) im industriellen Schiffbau eingehalten werden. Ein wesentlicher Vorteil einer 3D-Objektaufnahme mit k-TLS ist die Verkürzung der Aufnahmedauer um bis zu 60 %. Des Weiteren ergibt sich hierdurch die Möglichkeit, dass der Auftreffwinkel zwischen Laserstrahl und Objekt ständig kontrolliert und daher optimiert werden kann (Abb. 2).

### 3 Aufbereitung und Bereinigung der 3D-Punktwolken

Zur Vorgabe des Materialauftrages für das zu erreichen- de Oberflächenfinish wird ein neues Sollmodell erstellt (Wanner et al. 2010). Aufgrund der Randbedingungen in der Schiffsfertigung wird nie ein idealer Messzustand mit kompletter freier Zugänglichkeit des Objektes erreicht. Daher ist die Punktwolke nach der Erfassung auf relevante Teilbereiche zu reduzieren. Eine Grobbereinigung der Punktwolke kann durch Nutzung der Konstruktionsdaten erfolgen. Hierbei werden Einhausungen, Rüstungen und größere Störobjekte auf den Decks über eine

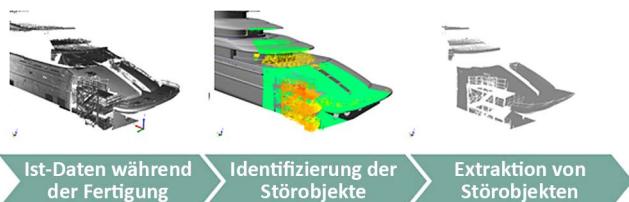


Abb. 6: Prozesskette für die Aufbereitung und Bereinigung der 3D-Punktwolken

Abstandsfunktion zum Soll-Modell segmentiert und entfernt (siehe Abb. 6). Nach dem ersten Bereinigungsschritt verbleiben weiterhin Störobjekte der Fertigung (z.B. Folien, Kabel, etc.) in den Daten, welche vor der Modellierung zu identifizieren und zu entfernen sind. Weiterführend ist eine Feinbereinigung der Messdaten durch Detektion und Extraktion von Störquellen auf dem Objekt zu entwickeln. Als Ergebnis soll der Flächenmodellierung nur die relevanten Messdaten zur Schiffsformbeschreibung zugeführt werden.

Bestandteil des Prozesses zur Herstellung des Oberflächenfinishs sind vorbereitende Arbeiten, die die Randbedingungen der zu modellierenden Fläche definieren. So werden aufwendig mit Schnüren die höchsten und tiefsten Punkte auf der Oberfläche gesucht und als Ausgangspunkte des Materialauftrages definiert. Designvorgaben wie z.B. feste Radien, Radienverhältnisse, Parallelitäten oder Ebenheiten im Bereich von Einbauelementen, werden mit Schablonen verkörpert, um sie bei der Herstellung der Fläche zu berücksichtigen. Es gilt, diese Randbedingungen für die Modellierung einer optimierten Fläche bereitzustellen. Hochpunkte definieren den Bereich des minimalen Materialauftrages, Radien die ein- und auslaufende Kontur, fertigungstechnische Randbedingungen wie die Materialstärke des Kaskos definieren die maximale zulässige Spachtelschicht. Die Prozesskette (siehe Abb. 6) muss so angepasst werden, dass die zu berücksichtigenden Randbedingungen in adäquater Form bereitgestellt oder automatisch aus der Punktfolge extrahiert werden. Dabei sind konstruktive, fertigungstechnische und optische Kriterien zu berücksichtigen.

#### 4 Flächenmodellierung und Optimierung

Die automatisierte Flächenmodellierung ist Inhalt vieler Veröffentlichungen. In den meisten Fällen stehen dabei jedoch andere Aspekte im Vordergrund. Van Ginneken et al. (2010) und Gorbunov et al. (2016) zeigen beispielsweise Methoden zur Erzeugung von aerodynamisch-optimierten Flächen.

Bei der derzeitigen Erstellung einer für die Spachtelvorhersage genutzten Fläche wird in einem manuellen Reverse Engineering Prozess der IST-Zustand der Stahloberflächen möglichst strakend modelliert. Anschließend erfolgt eine iterative Anpassung an die Messdaten, sodass die gesamte Schiffaußenhaut eingehüllt wird (Grewe und Geist 2014). Es wird eine manuelle bestmögliche Anpas-

sung des IST-Modells an die hervorstehenden Teilbereiche durchgeführt. Dieser Prozess ist subjektiv und nicht reproduzierbar, da es unter anderem keine objektiven Standards für optisch als glatt empfundene Flächen dieser Größenordnung gibt. Es wird zwar eine Reduzierung der Spachtelschicht erreicht, eine Optimierung im Sinne mathematischer Minimierungskriterien ist damit aber nicht gegeben. Eine einfache Möglichkeit ist die Nutzung einer trivialen Offsetfunktion bezüglich des ursprünglichen CAD-Modells, was zu unrealistischen Spachtelhöhen führen würde. Die resultierende Fläche ist mathematisch betrachtet sehr ästhetisch, für das menschliche Auge reichen aber auch abgeschwächte Kriterien für eine akzeptable Ästhetik. Für die Bewertungskriterien und Grenzen gilt es daher, einen optimalen Kompromiss zwischen den Zielkriterien minimaler Materialauftrag und Ähnlichkeit zum CAD-Modell zu beschreiben.

Diese Zielparameter bzw. die Minimierungsfunktion dienen als Grundlage für eine Anpassung der Designfläche an die Messdaten. Die geplante Fläche wird so verändert, dass sie eine zuverlässige und reproduzierbare Vorhersage der zu erwartenden Spachtelschicht ermöglicht. Die entwickelten Verfahren und Bewertungskriterien gilt es in Algorithmen zur automatischen Flächengenerierung unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu überführen, um eine zeitnahe Bereitstellung des Berechnungsergebnisses zu gewährleisten.

Durch Schaffung objektiver Vorhersagemodelle, die frühzeitig im Fertigungsprozess berücksichtigt werden können, wird eine Verkürzung der Durchlaufzeit beim Spachtelprozess angestrebt. Gelingt es, die Spachtelsimulation vollständig in die Prozesskette einzugliedern, kann die abgeleitete Spachtelhöhe als Grundlage für die Vorfertigung von Anbauteilen (Türen, Fenster) genutzt werden. Dadurch ergeben sich weitere signifikante Einsparpotenziale.

Die geplanten Teilespektre zur Sollmodellerzeugung lassen sich unter folgenden sequenziellen Arbeitsschritten zusammenfassen:

- Datenbereinigung der 3D-Punktwolke
  - Grobbereinigung
  - Feinbereinigung (Identifizierung von Störobjekten)
- Automatisierte und reproduzierbare Modellgenerierung
  - Einführung der Metainformationen aus der Konstruktion (z.B. Radienkatalog)
  - Extraktion der Randbedingungen aus der Punktfolge
  - Automatische Sollmodellgenerierung (mit Hilfe von Modellierungsparametern und Metainformationen)

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten soll ein Softwaretool entwickelt werden, mit dem sich aus den gemessenen Punktfolgen möglichst automatisiert und in kürzester Zeit ein optimiertes einhüllendes Sollmodell berechnen lässt. Dies soll die Planung des Spachtelprozesses reproduzierbar machen und gleichzeitig die Spachteldicke bei annehmbarer Ästhetik reduzieren.

## 5 Bewertung der resultierenden Oberfläche

Es gibt verschiedene Methoden zur automatisierten Flächenevaluation und -bewertung, die jedoch primär auf die Erkennung von Fertigungs- und Materialfehlern fokussiert sind (Ruoxu et al. 2018) und (Weimer et al. 2016). Ansätze zur ästhetischen Klassifizierung von Flächen finden sich fast ausschließlich im Automobilbau (Grabner und Nothhaft 2006). Im Yachtbau wird der Spachtelauftrag derzeit manuell sowohl unter strukturellen (Risse, Abplatzungen, etc.) als auch unter geometrischen Gesichtspunkten (z.B. Konturverläufe) untersucht. Die Betrachtung der Flächen erfolgt durch einen Operator in verschiedenen Winkeln und unter Zuhilfenahme von Werkzeugen wie z.B. Straklatten oder Radienlehren. Hauptaugenmerk ist dabei nicht die größtmögliche Ähnlichkeit zwischen der produzierten Fläche und dem geplanten CAD-Modell, sondern eine gute Ästhetik der Flächen. Diese beruht je nach Art der Fläche auf verschiedenen Faktoren, welche analysiert und mathematisch beschrieben werden müssen. Ein anschauliches Beispiel bildet der Einsatz von Radien zur Kantenverrundung. Ist eine Kante verrundet, so ist es beim Bau von Luxusyachten akzeptabel, wenn der Radius nicht genau der Angabe in der Zeichnung entspricht. Wichtiger ist, dass der Radius über die gesamte Kante gleich bleibt. Wird z.B. eine 3 m lange Kante laut Vorgabe mit 4 mm verrundet, aus der 3D-Objektaufnahme allerdings ein Radius von 3,75 mm bestimmt, wird dies akzeptiert, solange sich der Radius über die gesamten 3 m nicht wesentlich ändert.

Beispiele wie dieses zeigen, dass sich die Bewertung der Flächen deutlich von Qualitätskontrollen in anderen Produktionsbereichen, bei denen es auf extreme Maßgenauigkeit ankommt, unterscheidet. Während die meisten Fertigungstoleranzen klar mathematisch definiert sind, sind die Bewertungen der Oberflächen beim Bau von Megayachten eher subjektiv. Diese Subjektivität kann bei Kundenabnahme der Yacht zu teuren Nacharbeiten führen.

Ziel ist es daher, eine möglichst automatisierte Flächenbewertung, welche eine k-TLS-basierte 3D-Objektaufnahme nutzt, zu implementieren. Dafür müssen zunächst die Qualitätskriterien für verschiedene Flächentypen identifiziert und anschließend in mathematische Beschreibungen überführt werden. Als nächstes werden verschiedene sogenannte NURBS-Flächen nach Piegl und Tiller (1997) erzeugt, wobei einzelne Funktionsparameter so variiert werden, dass Grenzwerte für akzeptierte Flächen identifiziert werden.

Ein Beispiel für eine mathematische Betrachtung von Flächen im 2D-Raum ist in Abb. 7 dargestellt. Es wurden sechs Punkte ausgewählt und die Interpolation mit B-Splines unterschiedlicher Glattheit (»Stetigkeit«) durchgeführt. Im oberen Teil von Abb. 7 sind die entstehenden Kurven abgebildet. Im unteren Teil ist die entsprechende Krümmung an jedem Ort dargestellt. Die Krümmung der blauen C<sub>0</sub>-stetigen Kurve ist durchgehend null und an

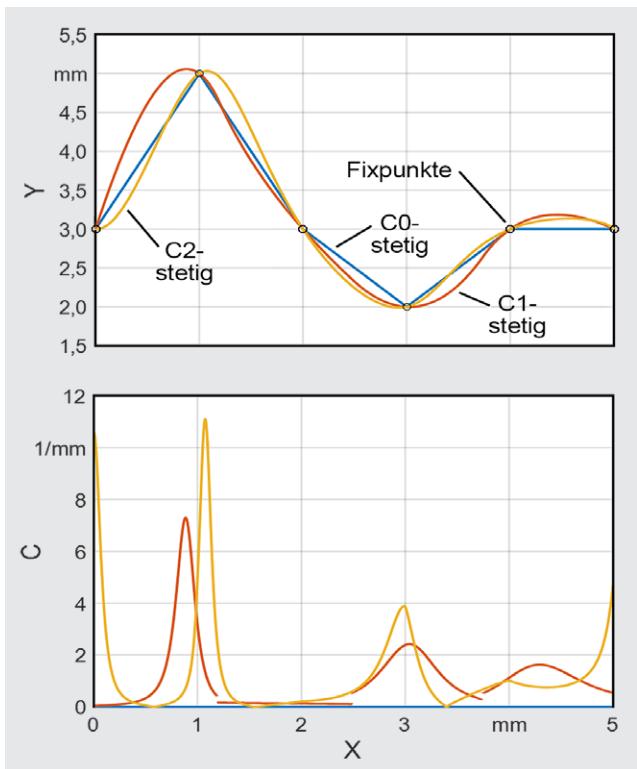


Abb. 7: Verschiedene Varianten der Interpolation von sechs Messpunkten (oben) und der zugehörigen Krümmungsverläufe (unten)

den Knickstellen nicht definiert. Die rote C<sub>1</sub>-stetige Kurve ist deutlich glatter, weiß jedoch Sprünge der Krümmung auf, was bei Flächen zu nicht gewünschten Verzerrungen von Spiegelungen führt. In dieser Hinsicht ist die gelbe C<sub>2</sub>-stetige Kurve die ästhetisch beste Kurve, da der Verlauf der Krümmung keine Sprünge aufweist. Ein ähnliches Vorgehen lässt sich auch bei Oberflächen anwenden und bildet ein Kernkriterium der Ästhetikbewertung. Bei der Betrachtung von dreidimensionalen Flächen müssen minimale und maximale Krümmung in Flächenpunkten beachtet werden. Daraus lassen sich weitere allgemeine (z.B. Gaußkrümmung) oder spezielle (Krümmung in definierter Richtung) Krümmungsbeschreibungen ableiten, wodurch eine erste automatisierte Bewertung von großen Flächen möglich wird.

Nach dem gleichen Schema können weitere mathematische Beschreibungen und Toleranzen ermittelt werden, die die Grundlage für die Entwicklung eines Software-Tools zur Flächenanalyse bilden sollen. Abschließend soll es möglich sein, bereinigte Flächendaten einzulesen und hinsichtlich der geometrischen Ästhetik zu bewerten. Die Grenzwerte können je nach Anforderungen in einem bestimmten Bereich variiert werden. Die Bewertung der Verspachtelung wird somit objektiviert, reproduzierbar und die Fehleranfälligkeit wird reduziert. Die Resultate der Analysen bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Optimierungsverfahrens zur direkten Erstellung eines einhüllenden Modells, aus dem anschließend punktuelle Vorgaben für den Applikateur abgeleitet und visuell aufbereitet werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird thematisiert, wie der Herstellungsprozess des Oberflächenfinishs von Luxusyachten optimiert und damit effizienter gestaltet werden kann. Zunächst wird beschrieben, wie eine schnelle und hochgenaue 3D-Objektaufnahme durch kinematisches Laser-scanning erfolgt. Weitere Schritte sind die Datenbereinigung und -aufbereitung sowie eine automatisierte Modellgenerierung unter Berücksichtigung von Sollkriterien und Randbedingungen. Dafür wird ein Designmodell verformt und der 3D-Punktwolke angenähert, während die zuvor definierten Randbedingungen eingehalten werden. Für die Bewertung der generierten Flächen sind Kriterien zu definieren, welche sich aus mathematischen Analysen von Krümmungsverläufen, Stetigkeiten und konstruktiven Vorgaben, wie z.B. Parallelität oder konstante Krümmung, ergeben. Die Erstellung dieser Kriterien erfolgt auf Basis von Bewertungen real gebauter Schiffe und der Analyse der zugehörigen Daten. Zielstellung dabei ist, dass sowohl die Produktivität bei der Sollflächengenerierung als auch beim Auftrag der Spachtelmasse erhöht werden.

### Dank

Alle Autoren bedanken sich beim gesamten Konsortium für die Unterstützung bei den vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Diese sind Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojektes »Exakte und schnelle Geometrieerfassung sowie Datenauswertung von Schiffsoberflächen für ef-fiziente Beschichtungsprozesse« (FINISH).



### Literatur

- Applanix (2018): TRIMBLE INDOOR MOBILE MAPPING SOLUTION (TIMMS). [www.applanix.com/products/timms-indoor-mapping.htm](http://www.applanix.com/products/timms-indoor-mapping.htm), letzter Zugriff 06.06.2018.
- Dorndorf, A., Hartmann, J., Paffenholz, J.-A., Neumann, I., Hesse, C. (2015): Validierung und Kalibrierung eines TLS-basierten Multi-Sensor-Systems. In: Luhmann T., Müller C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015. Wichmann, Berlin, S. 85–97.
- Ehm, M., Hesse, C. (2012): Entwicklung eines kinematischen Laserscan-systems für Anwendungen im Schiffbau. In: Fraunhofer IGD, Instituts-teil Rostock (Hrsg.): Go-3D 2012 Computergraphik für die Praxis 2012.
- Gorbunov, A. A., Pripadchev, A. D., Bykova, I. S. (2016): The Automation of the Design of the Additional Aerodynamic Surfaces of the Wing as a Component of the Configuration of a Commercial Airline. International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562, Vol. 11, Number 12 (2016), pp. 7868–7874.
- Grabner, J., Nothaft, R. (2006): Konstruieren von Pkw-Karosserien: Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5. 3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Gewe, O., Geist, M. (2014): Reverse Engineering von Schiffsstrukturen. In: HANSA International Maritime Journal (5), S. 30–34.

- Hartmann, J., Marschel, L., Dorndorf, A., Paffenholz, J.-A. (2017): Ein objektraumbasierter und durch Referenzmessungen gestützter Kalibrierprozess für ein k-TLS-basiertes Multi-Sensor-System. allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 124. Jg., Nr. 1-2, S. 3–10.
- Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., Kuhlmann, H. (2017): Analysis of Different Reference Plane Setups for the Calibration of a Mobile Laser Scanning System. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich. Wichmann, Berlin, Offenbach, S. 131–145.
- Hexagon Metrology (2018): LEICA ABSOLUTE TRACKER AT960 Produktbroschüre. [www.leica-geosystems.de/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20AT960%20brochure\\_de.pdf](http://www.leica-geosystems.de/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20AT960%20brochure_de.pdf), letzter Zugriff 06.06.2018.
- Keller, F. (2016): Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden. Dissertation, HafenCity Universität Hamburg (HCU), Arbeitsgebiet Ingenieurgeodäsie und geodätische Messtechnik, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 978-3-8440-4417-1.
- Leica Geosystems (2018): Leica ProScan Mobile Laserscanning-Plattform. [www.leica-geosystems.com/de-de/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-proscan](http://www.leica-geosystems.com/de-de/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-proscan), letzter Zugriff 06.06.2018.
- Piegls, L., Tiller, W. (1997): The nurbs book. 2. ed., Springer, Berlin.
- Ruoxu, R., Hung, T., Tan, K. C. (2018): A Generic Deep-Learning-Based Approach for Automated Surface Inspection. IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 48, Issue 3, March 2018, pp. 929–940.
- Schäfer, M. (2016): »3D marine surveying« – Laserscanning beim Bau und Refit von Superyachten. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laser-scanning 2016 (TLS 2016). DVW-Schriftenreihe, Band 85/2016, Wißner-Verlag, Augsburg, 2016, S. 165–172.
- Strübing, T., Neumann, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LiDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2013, 138. Jg., S. 210–221.
- Van Ginneken, D. A. J., Voskuyl, M., Van Tooren, M., Frediani, A. (2010): Automated Control Surface Design and Sizing for the Prandtl Plane. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences, Orlando, Florida.
- Viametris (2018): iMS 3D – BUILDING CONTINUOUS 3D SCANNER. [www.viametris.com/products/ims3d](http://www.viametris.com/products/ims3d), letzter Zugriff 31.07.2018.
- Wanner, M. C., Kuehl, H., Petkov V., Dryba S., Grewe O., Geist M. (2010): Verbundprojekt »Optimierung und Beurteilung des Oberflächenfinishs im Schiffbau (OFIN)«, Teilprojekt »Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der geometrischen Oberflächenqualität im Yachtbau«; Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2007–30.06.2010.
- Weimer, D., Scholz-Reiter, B., Shpitalni M. (2016): Design of deep convolutional neural network architectures for automated feature extraction in industrial inspection. CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 65, Issue 1, 2016, pp. 417–420.

### Kontakt

Dipl.-Ing. Jens Hartmann | Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann  
Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut  
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover  
hartmann@gih.uni-hannover.de | neumann@gih.uni-hannover.de  
www.gih.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Fabian Gierschner | Dr.-Ing. Michael Geist  
Fraunhofer-Einrichtung f. Großstrukturen i. d. Produktionstechnik IGP  
Albert-Einstein-Straße 30, 18059 Rostock  
fabian.gierschner@igp.fraunhofer.de | michael.geist@igp.fraunhofer.de  
www.hro.ipa.fraunhofer.de

Robert Kenneweg (M.Sc.) | Dr.-Ing. Marc-André Dittrich |  
Dr.-Ing. Volker Böß  
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), Produktionstechnisches Zentrum Hannover, Leibniz Universität Hannover  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
kenneweg@ifw.uni-hannover.de | dittrich@ifw.uni-hannover.de |  
boess@ifw.uni-hannover.de  
www.ifw.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Christian Hesse  
Dr. Hesse und Partner Ingenieure, Veritaskai 6, 21079 Hamburg  
ch@dphi.com  
www.dphi.com/de