

Modellbasierte Analyse von Stahlbau-Strukturen, am Beispiel Maßprüfung und Vollständigkeitsprüfung an Schienenfahrzeug-Wagenkästen mittels 3D-Scan und Software-Algorithmus

*Dr.-Ing. Uwe Jurdeczka,
ALSTOM Transport Deutschland GmbH,
Linke-Hofmann-Busch-Straße 1, 38239 Salzgitter
uwe.jurdeczka@alstomgroup.com*

Zusammenfassung

Die Analyse von Stahlbaustrukturen (wie zum Beispiel Wagenkästen für Schienenfahrzeuge) bezüglich

- Maßprüfung gemäß DIN 25043-2:2012, und
- Vollständigkeitsprüfung

ist eine Herausforderung wegen der Abmessungen des Prüfobjektes (ca. 20 x 3 x 3m) und wegen der Anzahl der Anbauteile (mehrere hundert).

Es gelingt, mit dem Einsatz von 3D Scannern ausreichend umfangreiche Information über die Ist-Konfiguration (Maße und Vollständigkeit) der zu prüfenden Stahlbaustruktur zu gewinnen.

Für die Maßprüfung ergeben sich Vorteile im Prüfablauf. Zusätzlich wird ein detailreiches Abbild gewonnen, welches für spätere Auswertungen genutzt werden kann.

Mittels eines angepassten Algorithmus wird auf das jeweilige 3D Modell als Soll Zustand mit Differenzbildern überlagert. Diese Differenzbilder zeigen eventuelle Maß-Abweichungen und auch eventuelle Fehlteile an, mindestens jedenfalls die suspekten Stellen. Damit lassen sich die Nachteile der bisher praktizierten ausschließlich manuellen Vollständigkeitsprüfung, nämlich Ermüdung und Geschwindigkeit der Prüfer, weitgehend umgehen.

Keywords: Stahlbaustrukturen, Maßprüfung, Vollständigkeitsprüfung, 3D Laserscanner, Auswertealgorithmus, Differenzbilder.

Motivation

Bisher werden pro Wagenkasten ca. einhundert diskrete Maße gewonnen durch Laser-Tracker oder Schnurgerüst, ergänzt um weitere Messungen mit Winkelmesser und Innenmeßschieber. Den formalen Anforderungen der DIN 25043-2:2012 wird damit sicher genügt. Die Analyse im Falle unerwarteter Montageprobleme wird so allerdings nicht unterstützt. Gerade diese Analyse von Merkmalen zu einem späteren Zeitpunkt bei fortgeschrittener Montage eröffnet Potential. Nebenher kann so auch die Statistische Prozeßregelung mit ausreichend Eingangsinformationen gespeist werden.

Die Taktzeit und die konstruktive Variantenvielfalt mit geringer Stückzahl völlig baugleicher Wagenkästen sind die motivierenden Randbedingungen für die Vollständigkeitsprüfung. Mittels MES – Manufacturing Execution System beherrscht man diese

Variantenvielfalt in der Fertigung. Die entsprechende fertigungsbegleitende Prüfung erfordert ebenso Aufmerksamkeit. Die Variantenvielfalt besteht in der Art der Anbauteile, ihrer Anzahl und in ihrer Positionierung. Circa dreihundert Anbauteile (Halter, Laschen, Erdungsanschlüsse u.ä.) sind innerhalb der Taktzeit von einer Schicht (ca. 8h) auf Vollständigkeit zu prüfen. Die Entwicklung von gerätegestützten Vollständigkeitsprüfungen schreitet entsprechend voran. Erfahrungsberichte für erste Entwicklungen hin zu einer gerätegestützten und modellbasierten Vollständigkeitsprüfung, für kleinere Prüfvolumen als die hier vorgestellten, liegen vor [1], [2], [3] und [4]. Diese Entwicklung wird ergänzt durch Handlungsanweisungen an Montage- und Prüfpersonal, indem Sollpositionen von Merkmalen per Laserlicht auf der Montageposition oder per Bildschirm im CAD-Datensatz angezeigt werden [5], [6]. Die

bekannten Ansätze für die Vermessung von Konstruktionen mit Hauptabmessungen größer 10m und für die Vollständigkeitsprüfungen sind also weiterzuführen. Modellbasierte Prüfungen versprechen nun die Möglichkeit, auf die Variantenvielfalt der Konstruktion und Fertigung mit einfach anzupassenden Prüfplänen und Merkmalslisten einzugehen.



Abb. 1: Ein Wagenkasten als Beispiel für Prüfobjekt im Prüfstand

Schmitt et.al. [7] geben den Überblick für die derzeit zur Verfügung stehenden Meßverfahren für große Prüfobjekte (Large-Scale). Kersten et.al. [8] sowie auch Lichtenberger und Wintjens [9] vertiefen dies für den Terrestrischen Laserscanner.

In [10] und [11] ist beschrieben das Generieren von Differenzbildern aus dem Vergleich 3D CAD Modell (Soll) zu 3D Daten (Ist). Hier geht man auch auf die der Fertigung zugestandenen Toleranzen und deren Ausnutzung ein. In [12] wird eine Lösung entwickelt, für das grundsätzliche Problem, dass die reale Länge des Wagenkastens mit dem Nennmaß aus dem CAD-Datensatz nur innerhalb der Toleranzen von mehreren Millimetern übereinstimmt. So führt beispielsweise eine Längenabweichung der realen Stahlbaukonstruktion versus Datensatz zu einer Anzeige im Differenzbild. Allerdings muss eine solche Abweichung nicht unbedingt ein Fehler sein, sondern kann eine als noch i.O. bewertete Fertigungsstreuung sein. So könnte eine ganze Seite einer kubischen Stahlbaukonstruktion (z.B. Seitenwand eines Schienenfahrzeuges) als fehlend/abweichend dargestellt werden. Dies, obwohl kein Fehler vorliegt, sondern die Toleranz auf das Nennmaß ausgenutzt wird.

Die vorhandenen Geräteklassen und Auswerteverfahren wurden also modifiziert bezüglich:

- der Erfassung des Ist-Zustandes des Prüfobjektes (Punktwolke, 3D Scan), und
- des Auswertealgorithmus.

Dies gelang durch die Verwendung des Terrestrischen Laser Scanners 100HSX-SR [13] und durch Implementierung eines Algorithmus in die Software PolyWorks Inspector Premium [14].

Bei der Anwendung des 3D Scannens für die Generierung von Maßaussagen bestehen gegenüber der Vollständigkeitsprüfung zusätzliche Schwierigkeiten. Diese sind am Ende des nächsten Kapitels aufgeführt.

Erfassung des Ist-Zustandes, Maße

Es wird also hier ein terrestrischer 3D Laser Scanner (TLS, auch HDS - High Definition Surveying genannt) zur Datenakquise (3D Scan, Punktwolke) genutzt. Schnelligkeit, vergleichsweise einfache Bedienung und handhabbare Punktwolken sind die Vorteile aus der Verwendung eines TLS/HDS zur Gewinnung des Abbildes des Prüfobjektes.

Ein typischer Wagenkasten eines Regionalzuges kann mit vier Sensorpositionen außen und weiteren fünf bis sechs Sensorpositionen im Innenraum soweit vollständig gescannt werden, um die Abschattungen durch Säulen im Inneren zu umgehen.



Abb. 2: Beispiel Punktwolke. Dargestellt ist die Intensität der Reflexion (Remission) als Grauwert. Dadurch eine fotorealistische Ansicht der Punktwolke.

Da aus verschiedenen Sensor-Positionen aufgenommen wird, sind zunächst die Einzelscans zu registrieren und zu einer gemeinsamen Punktwolke zusammen zu fassen. Durch Vernetzen können die Punkte sinnvoll ausgedünnt und einzelne Fehlabtastungen u.a. der Hallendecke eliminiert werden. Die Punktwolke aus den einzelnen 3D

Scans ist dazu aufzubereiten, nämlich durch Registrierung (Zusammenführen) der Einzelscans aus den verschiedenen Sensorpositionen und Vermaschung/Vernetzung. Beispielparameter für die Vermaschung: Netzgröße maximal 4mm und Abweichung Einzelpunkt 0,1mm. Optional kann auch eine Beurteilung der Punkte nach Scanner Abstand und besonders nach

Zielmarken (Zielmarken z.B. in Abb. 2) gibt die Software anschließend eine Statistik bzgl. der 3D-Genauigkeit aus. Die maximale Abweichung bei 20 Antastungen lag bei ca. 0,5mm, die Standardabweichung bei ca. 0,25mm.

Abbildung 3 zeigt die registrierte Gesamtpunktwolke eines Wagenkastens. In Abbildung 3 sind auch bereits Maße eingetragen, nämlich

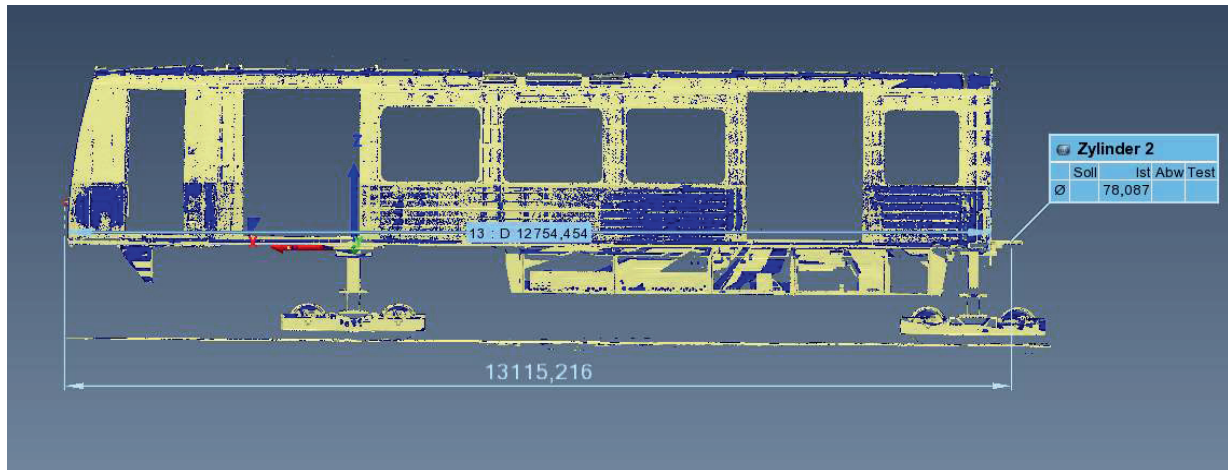


Abb. 3: Gesamtpunktwolke eines Wagenkastens. Abgeleitet zwei Längemaße und der Durchmesser einer Lagerbohrung.

Auftreffwinkel erfolgen. Die so mit den Scannern und der nachfolgenden Aufbereitung gewonnene Punktwolke ist eine detailreiche Abbildung des tatsächlich gebauten Zustandes (Ist-Zustand).

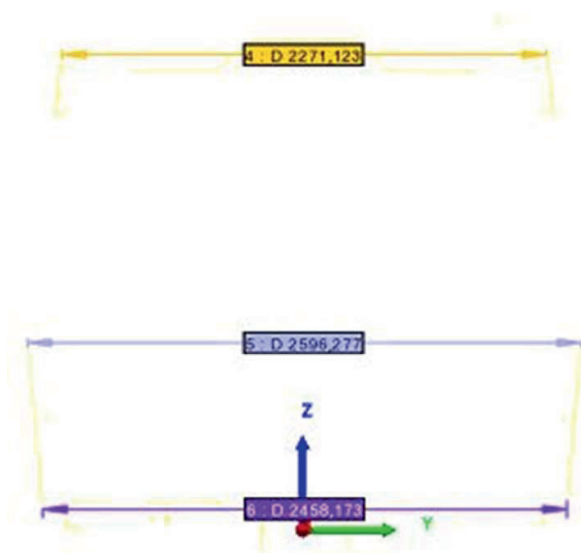


Abb. 4: Beispiel Referenzebenen im Wagenkasten.

Zur Reproduzierbarkeit der Messungen wurde eine Voruntersuchung durchgeführt. Bei der automatischen Registrierung der Scans mittels

Längemaße mit Bezugspunkt

- Rückwand und
- Mittelpunkt der Lagerbohrung.

Letztere ebenfalls aus der Punktwolke bestimmt. Die Auswertung erfolgt entsprechend der Messblätter nach DIN EN 25043-2. Zunächst war es notwendig, Ebenen als Referenzebenen in die registrierten Scandaten zu definieren. Ein Beispiel für Referenzebenen ist in Abbildung 4 zu sehen. Tabelle 1 führt die Beispiele für Maße in den drei Referenzebenen (Abb. 4) gemäß DIN 25043-2:2012 der Gesamtpunktwolke (Abb. 3) auf.

Tab. 1: Beispiel für Maße

Name	SOLL	IST	ABWEICHUNG
Y32L+R	2280,00	2271,12	-8,88
Y41L+R	2600,00	2596,28	-3,72
Y30L+R	2458,00	2458,17	0,17

Abbildung 5 zeigt eine zusätzlich eingezeichnete Fahrzeugmittenebene (Symmetrieebene) und die darauf bezogenen Breitenmaße, nämlich Y-Maße. Zum Vergleich können die Y 41L und 41R Maße aus Tabelle 1 und Abbildung 4 herangezogen werden.

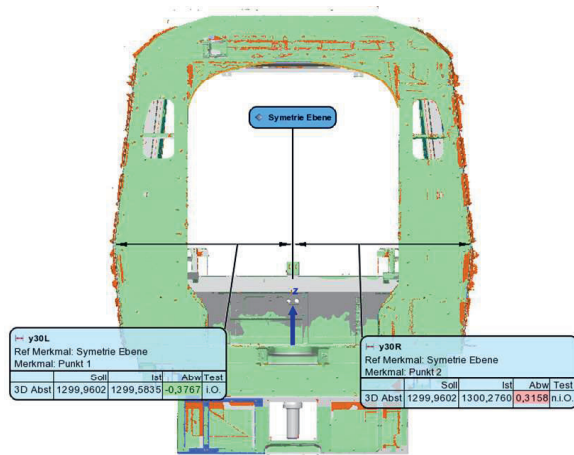


Abb. 5: Zusätzlich eingerechnete Fahrzeugmittenebene (Symmetrieebene) und die darauf bezogenen Breitenmaße, nämlich Y-Maße.

Durch Filtereinstellung am Scanner ist die Akquise der Punktwolken so zu beeinflussen, dass Pseudopoints (u.a. sogenannte Gardinen) weitgehend ausgeschlossen werden. Verbleibende Pseudopoints stören den Algorithmus für die Vollständigkeitsprüfung (beschrieben im folgenden Abschnitt) nicht wesentlich. Für die Maßprüfung sind sie allerdings sehr störend. Ihrer Unterdrückung ist also Aufmerksamkeit zu widmen. Beispiele für Pseudopoints in Abbildung 6 (unregelmäßiges Gebirge auf Rückwand, Gardinen in den Fensterausschnitten).

marken an den Stirnwänden ermittelt. Die Standpunkte wurden von jedem Scan zum Folgescan um ca. 1m verändert. Eine Registrierung ging hier also noch nicht ein.

Tab. 2: Vergleich zweier Messkampagnen

Kam-pagne 1	Länge in mm	Mittelwert in mm	Standard abweich.
Scan01	12100,78	12100,78	0,12
Scan02	12100,76		
Scan03	12100,61		
Scan04	12100,83		
Scan05	12100,99		
Kam-pagne 2	Länge in mm	Mittelwert in mm	Standard abweich.
Scan01	12100,76	12100,76	0,16
Scan02	12101,14		
Scan03	12100,66		
Scan04	12100,92		
Scan05	12100,92		

Zur Gewinnung der Gesamtpunktwolke aus den einzelnen Scans ist eine Registrierung nötig. Bei der Registrierung mittels automatisch erkannter Zielmarken werden angegeben 0,3mm Standardabweichung und 0,7mm maximale Abweichung eines Einzelpunktes. Dies stellt für die Vernetzung gute Daten bereit.

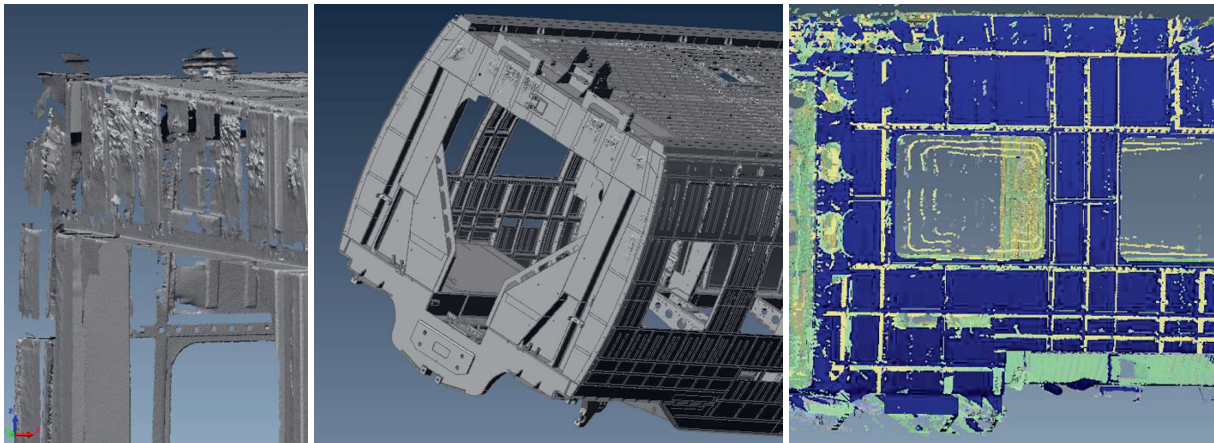


Abb. 6: Beispiel für Pseudopoints an der Rückwand und in den Fensterausschnitten eines Wagenkastens (Software ProcessC3DShell).

Erreichte Genauigkeit

Die Aufnahme der Punktwolke mit dem Phasenscanner erfolgt mit Genauigkeiten im Sub-Millimeter Bereich. Die Tabelle 2 gibt den Vergleich der Wagenkastenlänge in zwei Meßkampagnen in einem Wagenkasten wieder. Die Werte wurden durch Abtastung von Ziel-

Zum Algorithmus der Vollständigkeitsprüfung

Innerhalb des zu untersuchenden Bereichs wird die Punktwolke im Best Fit auf den Datensatz gelegt.

Eine zusätzliche Möglichkeit ist der RANSAC-Algorithmus, welcher oft verwendet wird, um

Best Fits robust gegen Ausreißer zu machen. Hierbei wird die Ausgleichung mit stark reduzierter Punktzahl durchgeführt und die erhaltenen Parameter werden auf die verbleibenden Punkte angewendet. Dies kann zum einen die benötigte Rechenzeit senken und zum anderen (und wichtiger) vermeiden, dass Ausreißer-Punkte den Best Fit stören und so das Auffinden der Ausreißer nach dem Restresiduum erschweren. Sehr umfangreich wurde der Algorithmus zur Vollständigkeitsprüfung bereits beschrieben in [10], aber auch in [12] und [18], weswegen an dieser Stelle dahin verwiesen wird. Bestandteil des Algorithmus ist die Definition eines Wertes für ϵ . Dies ist der Abstand zwischen CAD Modell und überlagerter Punktwolke, innerhalb dessen eine Relation zwischen CAD Element und Punktwolke angenommen wird.

In Abbildung 7 werden Elemente mit Punktabständen größer ϵ farbmarkiert. Die Betrachtung der Seitenwand Nähe Rückwand zeigt rote Punkte. Es sind dies Schutzstöpsel aus Plastik, die zum Zeitpunkt des Scannens bereits angebracht waren und natürlich nicht zum Konstruktionsdatensatz des Wagenkastens gehören. Das Auffinden dieser $\varnothing 8 \times 20$ mm bzw. $\varnothing 10 \times 20$ mm großen Merkmale zeigt die potentielle Sensibilität des Prüfsystems. Unterschiede zwischen 3D Modell und Punktwolke werden durch Anwendung des Algorithmus auffindbar sichtbar gemacht. Solch kleine Merkmale werden also erfaßt und ausgewertet.

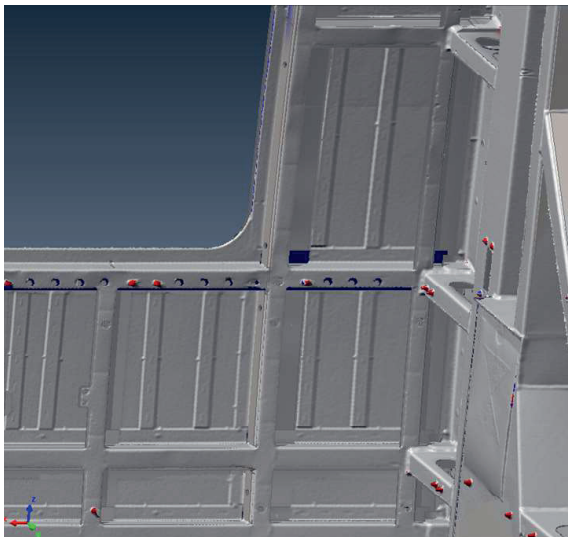


Abb. 7: Ausschnitt Seitenwand. Dargestellt ist der 3D Datensatz, die Farbmarkierung codiert den Abstand der korrespondierenden Punkte der Punktwolke (Software PolyWorks).

Erfahrungen und Ausblick

Mit der Verwendung eines TLS mit angepaßtem Fokusbereich zur Akquise von Punktwolken und der darauffolgendem Bearbeitung der Punktwolken mit einem angepaßten Algorithmus steht nun ein weiteres Meßverfahren für Stahlbaustrukturen bis 20m zur Verfügung. Ein Proof of Concept wurde positiv validiert (Alstom interner Bericht).

Mit der Ausgabe von Differenzbildern und den darin markierten Fehlteilen gelingt eine von Ermüdung und Erfahrung des Prüfers weitgehend unabhängige Vollständigkeitsprüfung [15], [16] und [18]. Von den ca. dreihundert Anbauteilen werden viele als richtig und vorhanden erkannt. Detektierte Fehler werden innerhalb des Modells nachvollziehbar und gut auffindbar dargestellt. Eine manuelle Nachkontrolle an diesen vergleichsweise wenigen Stellen separiert dann echte Fehleranzeigen von den gelegentlichen Fehlern höherer Ordnung.

Die modellbasierte Sollbeschreibung (mittels 3D CAD Daten Modell) führt zu hoher Flexibilität bei Änderung an den Prüfobjekten (Wagenkästen) und somit zu einer besonderen Eignung für variantenreiche Montageprozesse. Konstruktive Änderungen im CAD Modell können so auch kurzfristig in den Prüfplan (Liste der zu prüfenden Merkmale) einfließen. Besonders wichtig für den Umfang der Rechenoperationen ist die Struktur der 3D-Modell Daten. Soweit es gelingt, durch sinnvolle Strukturierung jeweils ein sogenanntes Light Model mit den Anbauteilen separat vom kompletten Konstruktionsdatensatz auszugeben, stehen geeignete Eingangsinformationen über den Soll Zustand zur Verfügung. Das Light Model lässt sich als Auszug aus der Stückliste verstehen, das also alle Anbauteile aufführt. Der Im- und Export von Prüfmerkmalsplänen aus dem Light Model kann dann gut unterstützt werden. So können also Prüfmerkmalspläne weitgehend automatisiert entstehen (Anbauteil-Name, Identnummer, weiteres).

Bestandteil des Prüfablaufes ist eine Einteilung des Prüfobjektes in Bereiche und zwar sowohl im Datensatz als auch in der Punktwolke. Für diese geometrischen Bereiche können für minimales Rauschen optimale geometrische Bereichsgrößen ermittelt werden. Hier sind weitere Untersuchungen nötig.

Die hier skizzierte Lösung der Einführung eines zweiten Koordinatensystems (lokal für den Bereich der betrachteten Anbauteile,

zusätzlich zum globalen Koordinatensystem für den gesamten Wagenkasten) stellt allgemein ausreichend Freiheitsgrade zur Ausrichtung bereit. Diese werden auch bei Ausrichtvorgängen zwischen den Arbeitsschritten, speziell hybriden Verfahren, der Additiven Fertigung benötigt [17].

Dieses Projekt erhielt Förderung durch das Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Gemeinschaft unter Fördernummer 723826.

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the grant agreement No. 723826.



Auch wenn die tatsächlichen Abmessungen in anderen Wertebereichen liegen, kann die Herangehensweise übertragen werden, um die Ungenauigkeit und die Streuung solcher Ausrichtvorgänge zu minimieren.

Literaturnachweis

- [1] Dirk Berndt, Ralf Warnemünde: Flexible modellbasierte Montageprüfung. <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereich/messtechnik-prueftechnik/montagepruefung-modellbasiert.html>; 2012.
- [2] Kelch, J.: Vollautomatisierte 100% Inspektion von Karosserieteilen-Aus allen Perspektiven. Carl-Hanser Verlag München, QZ Jahrgang 60 (2015) 05; Seite 62.
- [3] Bevor Fehler entstehen, 3D Bildverarbeitungssystem prüft Schaumstoffteile. Carl-Hanser Verlag München, QZ 60 (2015) 11; Seite 64.
- [4] Cem Tarih: Aktueller Stand der Automatisierung von Sichtprüfungen, speziell Vollständigkeitsprüfungen an großen Stahlbaustrukturen am Beispiel Schienenfahrzeugwagenkästen. Studienarbeit an der Ostfalia Braunschweig/Wolfenbüttel, 2016.
- [5] T. Drechsel: Laserprojektion im Lokomotivbau. Positionieren von Anbauteilen in der Produktion der Lokomotive Vectron. DVV Media Group / Eurailpress, EI-Eisenbahningenieur Jahrgang 67 (2016) 04, Seite 16.
- [6] Der "Schlaue Klaus" Anwendungen für intelligente Bilderkennung. Optimum GmbH, Karlsruhe, <https://www.optimum-gmbh.de/der-schlaue-klaus.html>, am 15.08.2016.
- [7] R. Schmitt, M. Peterek, E. Morse, W. Knapp, M. Galetto, F. Härtig, G. Goch, B. Hughes, W. Estler: Advances in large scale metrology - review and future trends. CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016), 643-665, doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002.
- [8] Th. Kersten, H.-J. Przybilla, R. Lichtenberger, P. Wintjens: Zum Genauigkeitspotential der terrestrischen 3D-Nahbereichsscanner Surphaser® 75USR und 100HSX-SR. in Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018, ISBN 978-3-87907-643-7.
- [9] Lichtenberger, R. und Wintjens, P.: Laser-scanner Surphaser – effiziente und präzise Digitalisierung für Qualitätskontrolle und Reverse Engineering. in Luhmann, T.; Schumacher, Ch.: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, ISBN 978-3-87907-625-3.
- [10] Jurdeczka, U.: Concept for completeness checking of joined structures exemplified on rail vehicle car body shells. J. Sens. Sens. Syst., 6, 53-63, 2017; auch unter <http://www.j-sens-sens-syst.net/6/53/2017/>, DOI 10.5194/jss-6-53-2017.
- [11] Jurdeczka, U.: Vollständigkeitsprüfung an Schienenfahrzeug-Wagenkästen. Tagungsband der 3D-Nordost 2016, Berlin Adlershof, ISBN 978-3-942709-16-3.
- [12] Jurdeczka, U.: Beitrag zur modellbasierten Vollständigkeitsprüfung von Anbauteilen an Stahlbau-Strukturen, vertieft an Schienenfahrzeug-Wagenkästen mit ca. 300 Haltern, Laschen und Erdungskontakten, Messvolumen 20m x 3m x 3m. Dissertation an der TU Braunschweig. Shaker Verlag 2018, ISBN 978-3-8440-5801-7.
- [13] [http://www.surphaser.com/pdf/Surphaser%20100 HSX.pdf](http://www.surphaser.com/pdf/Surphaser%20100%20HSX.pdf), am 30.10.2018.
- [14] <http://www.duwe-3d.de/de/products/polyworks-inspector>, am 30.10.2018.
- [15] Jurdeczka, U.: Optisches Prüfsystem für variantenreiche Montageprozesse. Carl-Hanser Verlag München, QZ Jahrgang 61 (2016) 07; Seite 46.
- [16] Jurdeczka, U.: Konzeption zur Vollständigkeitsprüfung von gefügten Strukturen am Beispiel Schienenfahrzeugwagenkästen. Postervortrag auf der 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016, Nürnberg, DOI 10.5162.
- [17] P. Penchev, K. Essa, U. Jurdeczka, A. Mehmeti, N. Adkins, L. Carter, S. Dimov, J. Maurath, N. Maillol, J. Bajolet, D. Bhaduri: System-level integration tools for hybrid laser-based powder bed fusion manufacturing platforms. 2018, Journal of Manufacturing Systems, Journal of Manufacturing Systems 50 (2019) 87–102, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.12.003>.
- [18] Jurdeczka, U.: Modellbasierte Analyse von Stahlbau-Strukturen, am Beispiel Maßprüfung und Vollständigkeitsprüfung an Schienenfahrzeug-Wagenkästen. Tagungsband der 3D-Nordost 2018, Berlin Adlershof, ISBN 978-3942709194.