

Kaskadierung stereometrischer Mess-Systeme für große Baugruppen und Rundum-Prüfung – Ergebnisse, Herausforderungen und Perspektive

L. Paul¹, A. Sobolev¹, M. Yildirim²:

¹ GFal e.V. , 12489 Berlin, Volmerstraße 3, eMail: paul@gfai.de, sobolev@gfai.de

² Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin, Sitz
Rudower Chaussee 25, 12489 Berlin, eMail: yildirim Mehmet82@gmail.com

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse und Perspektiven eines FuE-Vorhabens zur Schaffung kaskadierter stereometrischer Mess-Systeme für große Bauteile vorgestellt und diskutiert, das auch Entwicklung, Aufbau und Test eines Systemprototyps beinhaltet. Die Möglichkeiten einer Kaskadierung optischer Erfassungssysteme und der Parallelisierung entsprechender Messabläufe sind objektiv limitiert, jedoch in bestimmten Konfigurationen durchaus sinnvoll und zielführend. Die Realisierung solcher Systeme bringt besondere Herausforderungen technischer und algorithmischer Natur mit sich, die im Beitrag anhand der konkreten Lösung beschrieben werden. Die verfolgten Lösungsansätze und die damit erreichten Ergebnisse werden vorgestellt. Neben den speziellen messtechnischen Aspekten der Entwicklung werden Anwendungsperspektiven und Einsatzszenarien untersucht, wobei neben der Qualitätskontrolle insbesondere auf aktuelle und künftige Anforderungen an prozessintegrierte Lösungen eingegangen wird.

1. Einleitung / Motivation

Optische 3D-Mess- und Erfassungssysteme sind heute nicht nur für Design, Prototyping, in der Produktentwicklung, für Dokumentations- oder Präsentationsaufgaben im Einsatz, auch in der industriellen Qualitätsprüfung werden sie zu einem festen Bestandteil von Fertigungs-Prozessketten. Bei großformatigen Bauteilen und Baugruppen besteht dabei ein Dilemma bezüglich der Messraumgröße einerseits und Messgenauigkeit andererseits. Wenn es um große oder komplexe Messobjekte geht und gleichzeitig hohe Anforderungen an Auflösung und Messgenauigkeit bestehen, gibt es kaum eine Alternative zu Teilbereichs-Scans, die dann entweder sequentiell oder mit mehreren Scannern parallel erfasst und zusammengefügt werden müssen. Das gleiche Szenario ist typisch für Anwendungen, in denen die Notwendigkeit einer mehrseitigen bzw. –Rundumprüfung besteht.

In der gegenwärtigen Fertigungspraxis sind 100%-Prüfungen bei großen und komplexeren Baugruppen mittels 3D-Messtechnik kaum möglich. Bei Notwendigkeit wird in dieser Situation meist eine Einzelprüfung von Stichproben realisiert oder auf das Nachmessen bei Verdacht bzw. bei bereits auffällig gewordenen Defekten oder Toleranzüberschreitungen zurückgegriffen, die dann jeweils abseits vom Prozess mit vorhandenen Mess-Systemen und entsprechend hohem Zeit- und Personal-

aufwand realisiert werden. Im Kontext der aktuell anstehenden Forderungen nach einer „Informatisierung von Fertigungs- und Montagetechnik“ (Schlagwort Industrie 4.0) ist absehbar, dass für die Bereitstellung umfassender, werkstückbezogener digitaler Informationen im gesamten Fertigungsprozess auch Investitionen in die Ausstattung der Fertigungslinien mit neuer Mess- und Prüftechnik erforderlich werden. Dies wird voraussichtlich dort höchste Priorität haben, wo bisher noch „weiße Flecken“ bei der Gewinnung von Prozessinformation bestehen und zwar nicht mehr ausschließlich unter dem Gesichtspunkt des Qualitätsmanagements, sondern zunehmend der Prozesskontrolle und -dokumentation und mit dem Ziel der direkten Optimierung und der operativen Prozesssteuerung.

2. Parallelisierung von Messtechnik: Kosten versus Nutzen

Messaufösungen im Bereich eines Zehntel Millimeters und darunter lassen sich mit den meisten verfügbaren Sensoren nur für Messfelder im Dezimeterbereich realisieren, die nicht selten zusätzlich durch verdeckte Bereiche (Hinterschnitte) weiter eingeschränkt sind. Bei großen und / oder komplex geformten Baugruppen sowie bei Notwendigkeit einer Rundumerfassung ist der Parallelisierungsansatz demzufolge zunächst sinnfällig. Dagegen steht in der Regel vor allem die wirtschaftliche Betrachtung, mit der Anzahl der eingesetzten Sensorsysteme steigen die Investi-

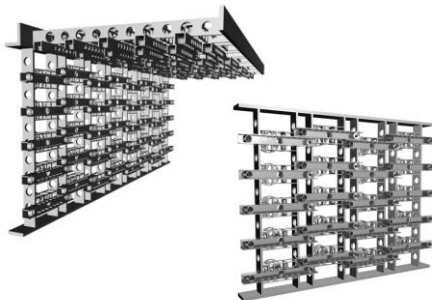
tionskosten erheblich. Um bei gleicher Messauflösung in den Quadratmeterbereich vorzustoßen, ist für die Sensorik ein entsprechend quadratisch wachsendes Investitionsvolumen zu erwarten. Als Alternative bietet sich das sequentielle Abscannen der einzelnen Patches an.

Dieser Ansatz ist jedoch seinerseits mit teilweise nicht akzeptablen Nachteilen verbunden, die sich in einem oder mehreren der folgenden Aspekte manifestieren:

Abb. 1: Vision: Hochparallele 3D-Messsysteme für die Integration in Fertigungslinien

- Erheblicher Personaleinsatz und – Aufwand bei manueller Realisierung des Abscan-Prozesses,
- Einschränkungen bei Zuverlässigkeit, Wiederholungssicherheit, Genauigkeit und Vollständigkeit bei manuellen Messungen aufgrund erforderlicher Umpositionierungen sowie subjektiver Faktoren
- Investitionen in mehrachsige Führungssysteme für die optische Sensorik bei automatisierten Lösungen einschließlich Programmier- und Einrichtungsaufwand
- Erheblich höherer Zeitaufwand für die Gesamtmessung
- Deutlich schlechtere Eignung für prozessintegrierte Messungen.

In der Gesamtbetrachtung kann eine hochgradige Sensor-Parallelisierung aus diesen Gründen in einigen Anwendungsfällen durchaus wirtschaftlich besser abschneiden. Für Idee und Konzept des hier dargestellten Projekts war zusätzlich entscheidend, dass der Kostenfaktor (Modulpreis) beim breiten Einsatz gleichartiger



vorgefertigter Module, die nach standardisierten Methoden eingesetzt, betrieben und ausgetauscht werden können, bekanntlich mit der Stückzahl erheblich sinkt und somit die Attraktivität hochparalleler Sensorlösungen wächst.

In der Vorbetrachtung waren dennoch zunächst potentielle Anwendungsfelder und –aufgaben zu identifizieren, für die der Einsatz hochparalleler 3D-Sensorsysteme wirtschaftlich interessant ist und gleichzeitig Anforderungen an solche Systeme zu untersuchen und ihre Auslegung entsprechend zu konzipieren.

3. Aussichtsreiche Anwendungsfelder und Messaufgaben

Ersichtlich wurde, dass für die Wirtschaftlichkeit hochparalleler 3D-Mess-Systeme (HP3DMS) im Wesentlichen folgende Voraussetzungen gegeben sein müssen:

- Messerfordernis für große Bauteile / Baugruppen (Meterbereich) mit hoher Auflösung / Genauigkeit bzw. geometrische Bauteilkomplexität oder notwendige Rundumerfassung.
- Notwendigkeit automatisierter und prozessintegrierter Messung / Prüfung bei fixer und begrenzter Taktzeit.
- Vertretbare Modulkosten, standardisierte Ein- und Umrichtung.
- Flexible Softwarekonfiguration für die Lösung verschiedenster Mess- und Prüfaufgaben.
- Da Installation und Kalibrierung von HP3DMS für eine definierte Messaufgabe dennoch relativ aufwendig sind, ist ihr Einsatz dort sinnvoll, wo über einen längeren Zeitraum gleichartige Baugruppen zu vermessen sind, also insbesondere an Fertigungslinien (Serienfertigung).

Basierend auf dieser Analyse ist sind die Bereiche Blechverformung / Karosserie und Montage, beispielsweise in der Fahrzeugfertigung oder Luftfahrtindustrie als primäres Anwendungsfeld von besonderem Interesse. Hier stehen durchaus unterschiedliche Messaufgaben auf der Tagesordnung, die nach Möglichkeit mit einem Zielsystem, wenn auch in unterschiedlicher Konfiguration, zu lösen wünschenswert sind. Dazu gehören

- Parameterbasierte Qualitätsprüfung (räumliche Absolut-Abstandsmessungen für vordefinierte Stützpunkte oder Konturen, Soll-Ist-Vergleich),
- Erkennung, Bewertung und Klassifizierung großflächiger Formabweichungen bzw. „langwelliger“ Deformationen, Vergleich mit CAD-Flächenmodellen, Maßhaltigkeit räumlich ausgedehnter Konturverläufe in Bezug zu vorgegebenen Fixpunkten (Absolut- und Relativmessungen),
- Lokale Messung von Radien, Verrundungen, Graten,
- Bewertung verschleißbedingter Abweichungen (Trends) innerhalb einer Werkzeug-Standperiode (Formen, Scheren, spanabhebende Bearbeitung),
- Detektion charakteristischer Tiefzieh-Fehler wie Oberflächenwelligkeit, Rissbildung, elastische Rückverformungen,
- Baugruppenprüfung und -Klassifizierung an Schnittstellen mit Zulieferern und Abnehmern (Wareneingang / Warenausgang).

Das ganze Spektrum der genannten möglichen Aufgaben kann, wo es sich lohnt, basierend auf einem „maximalistischen“ Ansatz realisiert werden: einem System zur weitestgehend lückenlosen Erfassung von Punktwolken in der nötigen Auflösung und Messgenauigkeit, nach dessen Installation die lokalen Scanprozesse und die

Datenauswertung entsprechend der gegebenen Aufgabenstellung selektiv parametrisiert und gesteuert werden können.

4. Realisierter Prototyp

4.1. HP3DMS Module, Sensor-Array

Dafür wurde der Einsatz standardisierter aktiv-stereometrischer Sensorbaugruppen vorgesehen, die jeweils mit zwei Kameras, einer Projektionseinheit, einer separaten Stromversorgung sowie einem eigenen Steuerrechner ausgestattet sind. Solche Module können beim heutigen Stand der Miniaturisierung problemlos konstruktiv, elektrisch und signaltechnisch kompakt integriert und bezüglich vieler Charakteristika im Einzelbetrieb vorkalibriert werden.

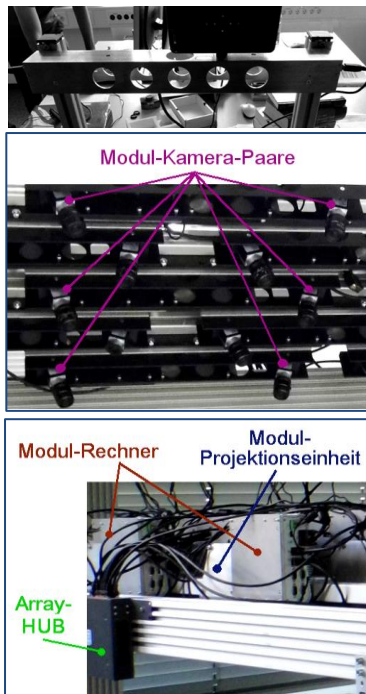


Abb. 2: Modul- und Array-Aufbau: Zwei Bildsensoren, eine Projektionseinheit und ein Rechner sind inkl. Stromversorgungen mechanisch und thermisch stabil zu integrieren (im Prototyp noch nicht 100%ig optimal realisiert).

In der prototypischen Realisierung wurde ein System aus zwölf identischen HP3DMS-Modulen aufgebaut, die versetzt in einer Ebene angeordnet sind und lateral einen Messbereich von 1-1,4 m² abdecken (Array aus Reihen von (2 x 3) + (3 x 2) Modulen). Bei einem Objekt-Sensor-Abstand 750 mm wird pro Sensor ein Patch von 320 x 260 mm bei einer Randüberlappung der Patches von ca. 80 mm erfasst. Mit der Vergrößerung des Abstandes können größere Überlappungsbereiche bei entsprechend verringerter lokaler Auflösung realisiert werden. Die Größe der Patchüberlappungen ist einerseits unter dem Gesichtspunkt einer lückenlosen Objektvermessung, jedoch auch hinsichtlich der Kosten und Zuverlässigkeit der Gesamt-Kalibrierung eines kaskadierten Systems von Bedeutung. Die Messauflösung in den Patches beträgt beim realisierten Prototyp 45 mm.

4.2. Scanverfahren

Der beschriebene Modulaufbau ermöglicht prinzipiell die Nutzung verschiedener Modifikationen von Scanverfahren mit strukturiertem Licht. Standardmäßig wird eine aktiv-stereometrische 3D-Messung mit dem Einsatz der Projektionseinheit als pixelgenauer „Referenzgenerator“ (Gray-code- / Phasenshift-Prinzip) genutzt. Argumente dafür sind die Unabhängigkeit von optischen Verzeichnungen in der Projektion

sowie eine bessere Stabilität der Messung bei geringfügiger Überschreitung des kalibrierten Messraums [3]. Da hierfür jeder messbare Oberflächenpunkt von beiden Kameras „gesehen“ und von der Projektion erreicht werden muss, ist die

Verdeckung bei ausgeprägten Objektkrümmungen so unter Umständen größer als bei Nutzung eines klassischen Graycode / Phasenshift-Ansatzes, bei dem pro Modul zwei Datensätze (jeweils basierend auf der Nutzung einer Kamera und der Projektionseinheit) generiert werden. Um auch diese Option nutzen zu können, ist das von einem Modul genutzte Verfahren entsprechend konfigurierbar.

Shutterzeiten der Kameras, Projektorhelligkeit (für Spezialfälle auch spektrale



Abb. 3: Ansichten des realisierten kaskadierten Mess-Systems mit 12 stereometrischen Sensoren

Charakteristika der Projektion), Filterparameter, Clipping-Bereich sind für jedes Modul entsprechend der Anforderungen konfigurierbar.

Als prinzipielle Verfahrensoption ist eine Erweiterung der Scanprozedur mit HDR (High Dynamic Range) - Bilderfassung (vgl. Abb. 7) verfügbar und wählbar, um auch bei hoher Dynamik der Reflexion bzw. lokalen Spiegeleffekten an metallischen oder lackierten Messobjekten eine möglichst 100%ige Erfassung (allerdings dann zu Lasten der Gesamtmesszeit) zu gewährleisten.

4.3. Vernetzung und Ansteuerung der HP3DMS-Module

Wie eingangs dargestellt, ist jedes einzelne Modul mit einem Rechner ausgestattet und kann die Patchvermessung somit autark bzw. auch parallel zu anderen Modulen ausführen. Alle HP3DMS-Module sind als LINUX-Server ausgelegt und über einen HUB mit einer zentralen Steuer- und Recheneinheit verbunden.

Dabei sind die für Scannen und Kalibrieren erforderlichen Funktionen auf jedem Modulrechner installiert und werden vom Zentralrechner lediglich in der gewünschten Kombination bzw. Reihenfolge angestoßen. Im Standardfall führen die HP3DMS-Module die optische Patchvermessung einschließlich der Punktwolkenberechnung und entsprechend der übergebenen Steuerparameter komplett aus und „liefern“ die resultierende Punktwolke (PW) danach ab. Alternativ können auch Rohdaten (Bildraten) oder Zwischenergebnisse an den Zentralrechner zur Auswertung übergeben werden. Die Client-Server-Architektur und die verteilte Rechnerleistung bieten darüber hinaus das Potential, auch komplexere Auswerteprozeduren über den zusammengefassten Patch-Scandaten wiederum – möglichst operativ und flexibel - auf die Modulrechner zu verteilen. Da in der Praxis

algorithmisch und rechentechnisch anspruchsvolle Aufgaben wie Parameter- und Kurvenableitung oder Krümmungs- und Distanzanalysen über den großen Datenmassiven bei gleichzeitig vorgegebenem Prozesstakt zu erwarten sind, muss dieses Potential in der weiteren Entwicklung und anhand konkreter Einsatzanforderungen und –erfahrungen unbedingt noch wesentlich besser erschlossen werden.

4.4. Sensorpositionierung und Kalibrierung

Die beim Prototypaufbau gewählte Anordnung der Module in einer Ebene und ein somit quaderförmiger Gesamtmessraum sind nicht zwingend. Die Sensormodule können ebenso in Reihen um das Messobjekt herum (zylindrischer Messraum) oder entsprechend der konkreten Objektform individuell ausgerichtet sein, solange eine Überlappung der Patches entsprechend der Messaufgabe gewährleistet ist.

Die „innere“ Kalibrierung jedes Bildsensors wird einschließlich der optischen Verzeichnungskorrektur bereits vor der Arraymontage durchgeführt. Für jedes 3D-Sensormodul separat ist dann eine „äußere“ Kalibrierung zu absolvieren, für die ein entsprechend der Messaufgabe und dem lokalen Messraum konfiguriertes physisches 3D-Kalibriernormal (Kalibrierkörper, KK) bereitgestellt werden muss. In der prototypischen Realisierung wurden KK unterschiedlicher Abmessungen und Fertigungsgenauigkeiten eingesetzt (vgl. Abb. 4), die jeweils mehrere mit optischen Marken versehene Kalibrierebenen repräsentieren.

Neben der möglichst hochgenauen Kalibrierung der Einzelsensoren stellt vor allen die Bestimmung der Transformationen zwischen den Einzeldatensätzen im Gesamtmessraum eine Herausforderung dar. Die Fertigung bzw. Bereitstellung hochgenauer Kalibriermittel wird mit zunehmender Objekt- und Messraumgröße technisch, aber auch bezüglich der Kosten deutlich problematischer. Für die Entwicklung wurde ein KK in der Größe eines Patches mit einer Genauigkeit von $40\mu\text{m}$ hergestellt und genutzt (Abb. 4a), der sich jedoch aus verfahrenstechnischen Gründen nur begrenzt für die Transformationsbestimmung zwischen verschiedenen Patches eignet. Bei den deutlich größeren KK, die in einer Position für die Kalibrierung von bis zu 5 Einzelmodulen geeignet sind, mussten die Genauigkeitsanforderungen aus Kostengründen auf ca. $100\mu\text{m}$ herabgesetzt werden. Anhand der auf Abbildung 4 (a,c) erkennbaren Identifikationsmarken, deren Relativpositionen bekannt und hinterlegt sind, ist die Kalibriersoftware in der Lage, die Ausrichtung des KK sowie den jeweils relevanten Bereich automatisch und sicher zu erkennen. Wenn der gesamte Messraum nicht mehr mit einem KK (in einer Position) kalibriert werden kann, muss die Systemkalibrierung durch mehrere Kalibrierläufe mit jeweils umpositionierten KK realisiert werden, wobei eine ausreichend große Redundanz der erfassten KK-Bereiche und Marken zu erreichen ist. Bei Vorliegen einer großen Anzahl von KK-Scans mit ausreichender Redundanz können die

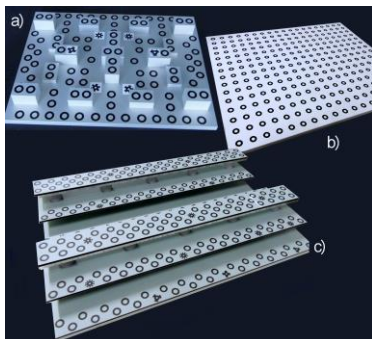


Abb. 4: Kalibriermittel:

- a) hochgenaues Patch-Normal $40\mu\text{m}$
- b) Distortion-Messplatte,
- c) Kalibriernormal für 5 Patches

von bis zu 5 Einzelmodulen geeignet sind, mussten die Genauigkeitsanforderungen aus Kostengründen auf ca. $100\mu\text{m}$ herabgesetzt werden. Anhand der auf Abbildung 4 (a,c) erkennbaren Identifikationsmarken, deren Relativpositionen bekannt und hinterlegt sind, ist die Kalibriersoftware in der Lage, die Ausrichtung des KK sowie den jeweils relevanten Bereich automatisch und sicher zu erkennen. Wenn der gesamte Messraum nicht mehr mit einem KK (in einer Position) kalibriert werden kann, muss die Systemkalibrierung durch mehrere Kalibrierläufe mit jeweils umpositionierten KK realisiert werden, wobei eine ausreichend große Redundanz der erfassten KK-Bereiche und Marken zu erreichen ist. Bei Vorliegen einer großen Anzahl von KK-Scans mit ausreichender Redundanz können die

Transformationen für die Einzelsensoren dann mittels gesamtfehlerminimierender Ausgleichsrechnungen ausreichend gut bestimmt werden.

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass das Optimum der konkrete Gestaltung der zu nutzenden Kalibrierkörper für die jeweilige Anwendung nach den Kriterien der geforderten lokalen und der globalen Genauigkeit (geforderte Präzision der Fertigung, Gesamtgröße, Größe der Überlappungsbereiche, Anzahl und Verteilung der Marken) auf der einen Seite gegen Fertigungskosten und zeitlicher Kalibriereraufwand abgewogen und bestimmt werden muss.

Eine Alternative zu speziell angefertigten KK wäre, Muster-Werkstücke des zu vermessenden bzw. zu prüfenden Typs zu nutzen, die zuvor einmalig hochgenau vermessen wurden. Im allgemeinen Fall sind dann allerdings dennoch optische Marken in größerer Zahl auf diesem Werkstück anzubringen, was mit anderen technischen Schwierigkeiten verbunden ist. Für spezielle Prüfaufgaben wie Relativmessungen oder Soll-Ist-Vergleich kann dieser Ansatz in entsprechender Modifikation jedoch kostensparend zur Anwendung kommen.

5. Ergebnisse von Messung und Auswertung



Abb. 5: Scanergebnis (63 Millionen Koordinaten), Patches

Für die Systemtests wurden von Partnern aus der Automotive Industrie verschiedene reale großformatige Karosserieteile sowie PKW-Türen gleicher und unterschiedlicher Bauart als Messobjekte bereitgestellt. Mit Hilfe des Prototyps konnten vor allem viele Untersuchungen und Teilentwicklungen zur Bewertung von Fremdlichteinflüssen, zur Scan-Parametrisierung und Anpassung der Projektionsvorlagen, zur Implementierung der verteilten Steuerung und des Client-Server-Systems, zur Teilparallelisierung von Patch-Scans und insbesondere zur Optimierung der Systemkalibrierungsfunktionen erfolgreich durchgeführt werden. Darüber hinaus wurden Funktionsmodule zur Messung und Ableitung von Abstands- oder Winkelwerten, Radien und Krümmungen als

Basis für die nutzerspezifische Datenauswertung geschaffen.

In Abbildung 5 ist das Ergebnis eines Matrix-Scans einer Tür (FORD) dargestellt. Die Punktwolke enthält über 63 Millionen Koordinaten sowie Texturwerte. Anhand der Grauwerttextur lässt sich hier die realisierte Überlappung der Patches erkennen. In Abbildung 6 sind einige weitere Scanergebnisse (Mesh-Repräsentationen) von Karosserieteilen bzw. PKW-Türen gezeigt.

Wie in Abschnitt 3 aufgezeigt, werden Zielanwendungen besonders in Bereichen gesehen, wo auch metallische oder bereits beschichtete (lackierte) Oberflächen zu erfassen und deshalb die bekannten, mit hoher Bilddynamik (lokale Spiegelreflektanz) verbundenen Probleme optischer Verfahren von Bedeutung sind.

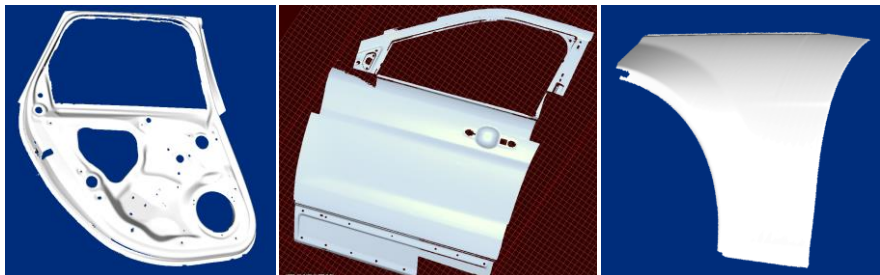


Abb. 6: Weitere Scanergebnisse von Originalobjekten aus dem Ziel-Anwendungssektor

Dazu erfolgten spezielle Untersuchungen und Entwicklungen, in deren Ergebnis konstatiert werden kann, dass mit dem Mess-Array eine praktisch 100%ige 3D-Erfassung für die untersuchten, aus realen Anwendungen stammenden Testobjekte dann realisiert werden konnte, wenn – unter Inkaufnahme verlängerter Messzeiten – mit HDR-Bildaufnahmen gearbeitet wurde.

In Abb. 7 sind Scanergebnisse von einer tiefgezogenen Aluminium- Motorhaube (AUDI, realisierter Messraum etwa 1600 x 1200 x 300 Millimeter) dargestellt, bei der lokale Reflektanzprobleme auftraten. Gegenübergestellt sind Punktwolken, die mit unterschiedlichen Belichtungszeiten gewonnen wurden sowie ein HDR-Scanergebnis. Die in den Einzelscans an unterschiedlichen Stellen auftretenden Ausfälle konnten mittels HDR praktisch vollständig kompensiert werden. In besonders schwierigen Fällen bietet sich bei Reflektanzproblemen darüber hinaus eine modifizierte und an das Objekt angepasste Positionierung einzelner HP3DMS-Module an.

Untersuchungen zur Modifikation des Spektrums der Projektionsbeleuchtung (weitgehend beschränkt auf den sichtbaren Spektralbereich) ergaben dagegen nur geringfügiges Potential für die Verringerung von allgemeinen Reflektanzproblemen, diese Option kann jedoch im Fall farbig lackierter Werkstücke / Messobjekte durch-

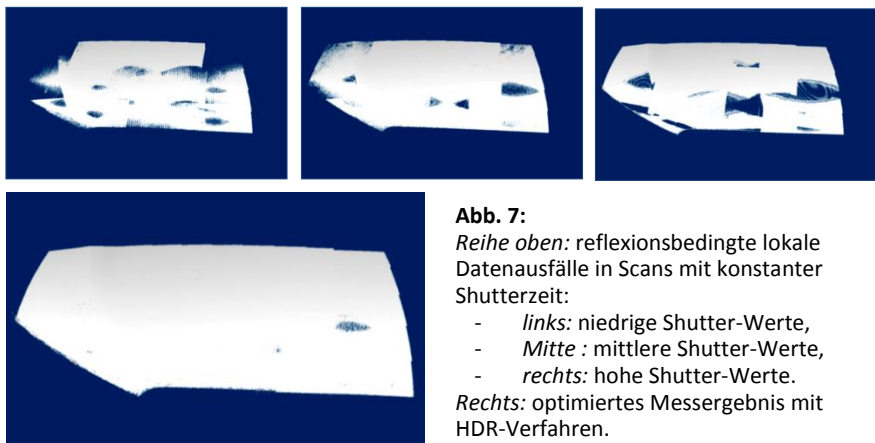


Abb. 7:

Reihe oben: reflexionsbedingte lokale Datenausfälle in Scans mit konstanter Shutterzeit:

- *links:* niedrige Shutter-Werte,
- *Mitte :* mittlere Shutter-Werte,
- *rechts:* hohe Shutter-Werte.

Rechts: optimiertes Messergebnis mit HDR-Verfahren.

aus für die Optimierung der Messungen eingesetzt werden. Weitere Untersuchungen dazu sind noch geplant.

Von einigen den Partnern wie AUDI AG und FORD AG wurden neben den Bauteilen auch einzelne CAD-Datensätze bereitgestellt. Mit dem aktuellen Stand der Auswertesoftware können für Soll-Ist-Vergleiche in der Form einer globalen oder lokalen Abstandsanalyse einschließlich einer statistischen Abweichungsanalyse, die eine globale Bauteilbewertung ermöglicht, durchgeführt werden. Abb. 8 zeigt graphische Darstellungen solchen Auswertungen für drei Türelemente (AUDI A6) aus einer Baureihe.

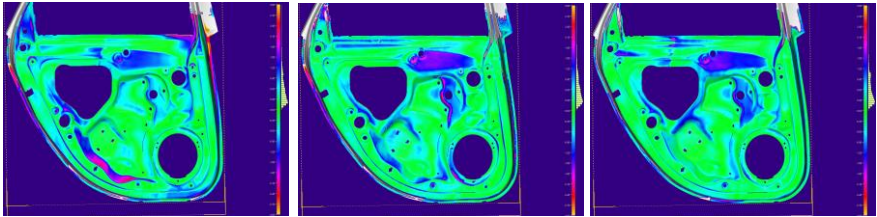


Abb. 8: Ergebnisse des Soll-Ist-Vergleichs (Distanzanalyse) für drei Türbaugruppen. Die lokale Differenz von Messung zu CAD wird mittels Farb-Skala angezeigt.

Für die Zielanwendung der Detektion und Bewertung charakteristischer Tiefzieh-Fehler, für die eine flächige Ausprägung bei nur sehr geringen Absolutabweichungen charakteristisch ist, erwies sich die Berechnung und Analyse der lokalen Oberflächenkrümmung als zielführend. Aufgrund der extremen Gesamtdatenmenge ist eine Krümmungsanalyse auf Punktwolkenbasis aus Performance-Gründen aktuell nur lokal realistisch, in den in der Praxis durchaus bekannten „Verdachtsbereichen“ der Kaltverformung können jedoch damit (und mit entsprechender Rechnerpower) automatische Werkstückprüfungen realisiert werden, um auch nur schwer global und absolut messbare Defekte zu erkennen und die Ausschleusung der betroffenen Bauteile aus dem Prozess zu organisieren. Abb. 9 zeigt Beispiele von mittels Krümmungsanalyse detektierbar gemachter Fehlerbilder dieser Klasse.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten Entwicklung sind wesentliche technische Voraussetzungen für den Einsatz hochparalleler 3D-Messsysteme in Fertigungslinien geschaffen, industrielle Einsatzmöglichkeiten und –Perspektiven verifizierbar gemacht worden. Gerade aufgrund der universellen Einsetzbarkeit der vorgestellten Systeme als Datenquelle für verschiedenste Mess- und Prüfaufgaben stellt die weitere Entwicklung effektiver und speziell auf Nutzeranforderungen ausgerichteter Auswertelgorithmen, von Tools zur flexiblen und einfachen Konfiguration der Mess- und Prüfaufgaben und besonders zur Taskverteilung und –Parallelisierung über die vorhandene, verteilte Rechenkapazität der Arrays im Netzwerk für künftige Entwicklungen noch einen enormen Aufgabenumfang dar, bis Messsysteme der vorgestellten Art vollintegriert in der Prozesssteuerung komplexer Fertigungslinien eingesetzt werden können. Auch die Autoren von [1] verweisen darauf, dass für die Nutzung von 3D Daten konkreter Prozesse in Unternehmen die üblichen bzw. verfügbaren Modelle nur selten ausreichend sind. Vielmehr müssen diese „nach Aufgabe und Zielplattform vereinfacht oder angereichert werden und oft mit weiteren Unternehmens oder

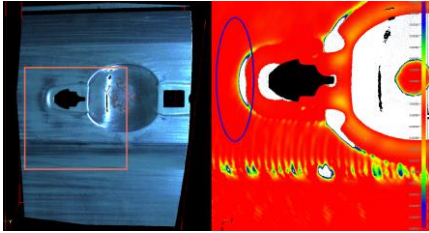
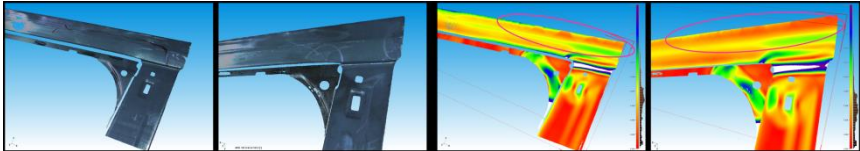


Abb. 9: Analyse lokaler Krümmungen als Methode zur Detektion und Bewertung unerwünschter Tiefzieh-Effekte.

links: Welligkeit im Bereich einer Türgriff-Mulde,

unten: Vergleich der Welligkeits-Effekte zweier Tür-Rahmen-Baugruppen.



Produktdaten verknüpft werden“. Weiterhin sind „einfach zu nutzende und zu kombinierende Dienste“ zu schaffen, die ohne spezifische 3D-Programmierkenntnisse genutzt werden können [1]. Für die Effektivität solcher Entwicklungsprozesse ist jedoch die direkte Zusammenarbeit mit Anwendern und die Integration erster Systeme in der realen Produktionsumgebung unabdingbar.

Ein System mit insgesamt neun kaskadierten stereometrischen Messmodulen zur Rundum-Deformationsmessung an Druckbehältern, das für die Messung einer Gesamtoberfläche von ca. 1,5 qm bei einer Messauflösung von ca. 0,1 mm ausgelegt ist konnte im Rahmen eines Auftrags konnte erarbeitet und 2015 bereits bei einem Kunden der gfai tech GmbH installiert werden.,

Auf der Grundlage der hier vorgestellten Ergebnisse wird von einem Partner aktuell eine Fallstudie für den Einsatz im QM-Bereich bei FORD Chicago erstellt. Weiterhin wird ein Symposium mit Vertretern der Automobil- und Zulieferindustrie vorbereitet, das zu einer Entscheidung über die gemeinsame Weiterentwicklung der Lösung anhand von Installationen und Tests unter Realbedingungen führen soll.

7. Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen MF 120027 gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Prognos AG, Fraunhofer IGD, MC Marketing Consulting: Marktperspektiven von 3D in industriellen Anwendungen. Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
- [2] Yildirim M., Heidenreich R., Paul L.: High Parallel Process Integrated Stereometric 3d Measurement Systems for Large Construction Parts. Posterausstellung 3D-NordOst 2014, GFal Berlin, Dezember 2014, ISBN: 978-3-942709-13-2
- [3] L. Paul, N. Heuwoold, W.-D. Prenzel: Ein kompakter optischer 3D-Flächenprüfsensor für die Inspektion, Vollständigkeitskontrolle und Evaluierung im Mikrometerbereich. Jahrbuch 2012 Optik und Feinmechanik, Hrsg. Dr. Ing. Prenzel, OPTIK-Verlag Görlitz 2012