

von der Windkanal-Messtechnik zur prozessintegrierten Qualitätskontrolle von Fertigungstechnologien – Ein Know-how-Transfer

F. Blumrich,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

Zusammenfassung

Ausgehend von dem in der Windkanal-Messtechnik seit mehr als 20 Jahren bekannten und erfolgreich eingesetzten Messverfahren Particle Image Velocimetry wird zunächst der allgemeine Ansatz der optischen korrelationsbasierten Messtechnik abgeleitet. Auf Basis zufälliger Punktemuster erfolgt dabei die Lösung des Korrespondenzproblems zwischen einem Bildpaar mit Hilfe von räumlichen Auswertefenstern. Dieser Ansatz ist schnell, eindeutig und robust. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein erfolgreicher Know-how-Transfer dieses Messprinzips von Windkanalanwendung hin zur prozessintegrierten Qualitätskontrolle sowie die dafür notwendigen Adaptionen dargestellt werden. Der hier vorgestellte Einsatz dieser 3D-Messtechnik in der Qualitätskontrolle basiert auf projizierten zufälligen Punktemustern. Er liefert als direktes Messergebnis die Abweichung zwischen einem Soll- und einem Ist-Bauteil und somit direkt die in der Qualitätskontrolle gesuchte Größe. Aufgrund der Ein-Bild-Charakteristik des Messprinzips lässt sich dieses Messverfahren direkt in den Produktionsprozess integrieren. Gegenüber herkömmlichen in der Qualitätskontrolle eingesetzten 3D-Messtechniken wie z.B. der Streifenprojektion entfällt die Notwendigkeit Bildsequenzen aufnehmen zu müssen. Damit wird erstmals auch die flächenhafte Messung von dynamischen Vorgängen, die bisher nur punktweise scannenden Verfahren vorbehalten war, möglich. Auch ein explizites Signalisieren von Punkten, wie dies in der klassischen Photogrammetrie der Fall ist, entfällt.

1. EINLEITUNG

In der Qualitätskontrolle von Bauteilen lautet die Messaufgabe oft, diese auf Beulen oder andere Defekte mit einer Ausdehnung im Millimeterbereich und einer Tiefe im Mikrometerbereich zu untersuchen. Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Göttingen wurde dafür ein optisches korrelationsbasiertes Messverfahren zur Form erfassung und Deformationsmessung entwickelt, das bis zu 50 mal schneller arbeitet als herkömmliche flächenhafte Verfahren wie z.B. Streifenprojektion. Die grundlegende Idee geht auf die Particle Image Velocimetry (PIV) Messtechnik zurück, ein seit mehr als 20 Jahren bekanntes und für verschiedenste Anwendungsbereich insbesondere in Windkanälen erfolgreich eingesetztes Messverfahren. Das aus dem Bereich der PIV-Messtechnik vorhandene Know-how sowie die Hard- und Software können dabei weitgehend weiterverwendet werden.

Für dieses Verfahren wird auf den Messbereich mittels eines Projektors ein feines zufälliges Punktemuster projiziert und unter einem Triangulationswinkel von einer digitalen Kamera aufgenommen. Durch Vergleich mit einem vorher aufgenommenen Referenzbild lässt sich eine Verschiebung berechnen, die bei bekannter Blickrichtung von Projektor und Kamera in die gewünschte 3D-Form bzw. Deformation umgerechnet werden kann. Der deutliche Geschwindigkeitsvorteil dieser Technik ergibt sich dadurch, dass zur Messung der Form nur ein

einzelnes Bild aufgenommen werden muss. Bei allen bisher verfügbaren Systemen wird für diese flächenhafte Formmessung eine Bildsequenz von teilweise bis zu 50 einzelnen Bildern projiziert und aufgenommen. Durch geeignete Kameras und starke Lichtquellen kann eine Belichtungszeit von deutlich unter einer Millisekunde realisiert werden, wodurch sich erstmals bewegende Objekte vollständig und flächenhaft erfassen lassen und somit eine Echtzeit-Qualitätskontrolle direkt im Fertigungsprozess möglich wird.

Das hier vorgestellte Messprinzip eignet sich insbesondere zum Einsatz in der Qualitätskontrolle, da es einen direkten Soll-Ist-Vergleich aus je einem aufgenommenen Bild durchführt. Es müssen nicht erst zwei 3D-Datensätze erzeugt und umständlich gegeneinander ausgerichtet werden, um den Soll-Ist-Vergleich durchführen zu können. Das Messverfahren liefert bereits direkt die Abweichungen des gemessenen Objektes gegenüber seinem Soll-Zustand, also genau die Größe, die es in der Qualitätskontrolle zu ermitteln gilt.

Dieses Messverfahren bescheinigt die Gewinnung eines 3D-Datensatzes im Vergleich zur Streifenprojektion um einen Faktor von ca. 50. Zusätzlich wirken Vibrationen, wie sie im Produktionsprozess ständig vorkommen, aufgrund des Ein-Bild-Charakters des Verfahrens und der damit verbundenen Echtzeitfähigkeit nicht störend auf die Messung der 3D-Daten.

2. DIE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY MESSTECHNIK

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist ein berührungsloses optisches Messverfahren, das es erlaubt, momentane zweidimensionale Geschwindigkeitsvektorfelder in einer Ebene der zu untersuchenden Strömung quantitativ zu bestimmen. Dazu wird die Strömung zunächst, falls nicht bereits auf natürlichem Wege vorhanden, mit kleinen Streupartikeln versehen. Nach [1] sollen diese Streupartikel idealerweise der Strömung exakt folgen, nicht selbst miteinander interagieren und die Strömung in keiner Weise beeinflussen. Mittels eines Pulslasers wird die zu untersuchende Ebene der Strömung zu zwei zeitlich genau bekannten Zeitpunkten beleuchtet. Typischerweise liegt der zeitliche Abstand der beiden Laserpulse im Bereich einiger Mikrosekunden und die Pulslänge jeweils zwischen 6 und 10 Nanosekunden (siehe [2]). Eine Kamera nimmt das an den Partikeln gestreute Laserlicht zu beiden Zeitpunkten der Beleuchtung auf. Mit Hilfe von Auswertealgorithmen auf Basis der lokalen Kreuzkorrelation (siehe dazu [3], [4]), lässt sich der Versatz der Partikelbilder zwischen beiden Zeitpunkten bestimmen. Ist zusätzlich der Abbildungsmaßstab zwischen der Bildebene der Kamera und der beleuchteten Messebene in der Strömung bekannt, lässt sich mit Hilfe der bekannten Zeitdifferenz der Aufnahme bzw. der Beleuchtungszeitpunkte ein momentanes zweidimensionales Geschwindigkeitsvektorfeld für die beleuchtete Strömungsebene berechnen. Aus dem Geschwindigkeitsvektorfeld lassen sich wiederum andere für die Strömungsmechanik relevante Größen wie z.B. die Wirbelstärke berechnen. Das Messprinzip der PIV-Messtechnik, das vorrangig in Windkanälen eingesetzt wird, ist in BILD 1 nochmals grafisch veranschaulicht.

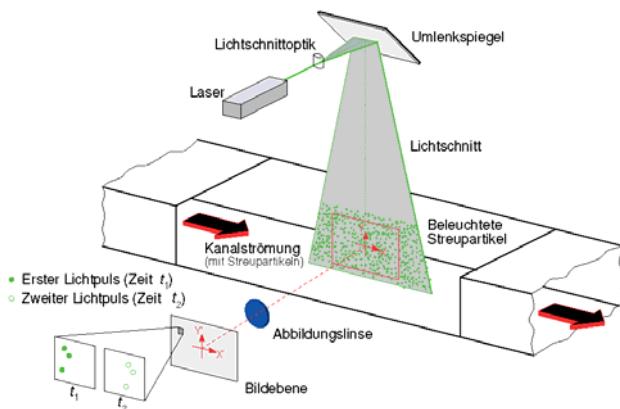


BILD 1. Prinzipielle Messanordnung für die PIV-Messtechnik in einem Windkanal nach [4].

Der Begriff *Particle Image Velocimetry* wurde im Jahr 1984 von R. J. Adrian vorgeschlagen. Erste PIV-Untersuchungen wurden stark von der Methode der Laser Speckle Messtechnik beeinflusst, die ursprünglich in der Festkörpermechanik zum Einsatz kommt. Seit mehr als zwei Jahrzehnten hat sich die PIV-Technik zu einer genauen und flächenhaft quantitativen Messtechnik in der Strömungsmechanik entwickelt. Der Übersichtsartikel *Twenty years of particle image velocimetry* [5] von R. J. Adrian fasst die wesentlichen Entwicklungen und den aktuellen Stand der PIV nach gut 20 Jahren zusammen. Das Buch *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide* [6] erschien erstmalig 1998 und geht neben sämtlichen Grundlagen auch detailliert auf verschiedene aktuelle

Anwendungen ein. Inzwischen ist mit [4] bereits die zweite überarbeitete Ausgabe erschienen. Die wesentlichen theoretischen Grundlagen der digitalen PIV-Auswertemethoden wurden von Westerweel im Rahmen seiner Dissertation mit dem Titel *Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application* [1] veröffentlicht. Eine Übersicht über aktuelle Entwicklungen und Anwendungen der PIV-Technik findet sich in [7].

Zum Verständnis eines gesamten PIV-Messsystems sollen hier zunächst die einzelnen Systemkomponenten kurz genauer betrachtet werden. Als Streupartikel kommen je nach Art des Fluids, dessen Strömung untersucht werden soll, mehrere Materialien in Frage. Wie bereits erwähnt sollten die Streupartikel der Strömung exakt folgen, nicht interagieren und die Strömung nicht selbst beeinflussen. Für Experimente in Wasser haben sich beschichtete hohle Glaskugeln mit einem ungefähren Durchmesser von 10 µm als geeignet erwiesen. Für Strömungen in Gasen (wie z.B. Luft) bieten sich Öl- oder Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat-Tropfen (DEHS) mit einem Durchmesser von ca. 1 µm an.

Zur Beleuchtung der Streupartikel in einer Ebene der Strömung wird, wie bereits erwähnt, ein Pulslaser verwendet. Um unverschmierte Abbildungen der sich mit der Strömung bewegenden Streupartikel zu erhalten, sind sehr kurze Belichtungszeiten der Kamera notwendig. Nur ein starker Pulslaser als Lichtquelle ermöglicht es, in dieser kurzen Zeit Bilder mit ausreichendem Kontrast zu erzeugen. Der Pulslaser übernimmt somit quasi die Aufgabe des Blitzlichtes bei der normalen Photographie. Zusätzlich lässt sich der Laserstrahl sehr einfach mit einer entsprechenden Optik in einer Richtung aufweiten, so dass, wie benötigt, eine Ebene der Strömung beleuchtet wird.

Für die Abbildung der beleuchteten Streupartikel in der Strömung müssen Beugungseffekte berücksichtigt werden. Ein entfernter Lichtpunkt, der von einer kreisförmigen Linse oder einer Öffnung (z.B. der Blende einer Kamera) endlicher Größe abgebildet wird, erscheint in der Bildebene aufgrund der Beugung als so genanntes Airy-Scheibchen, umgeben von konzentrischen Beugungsringen abnehmender Intensität. Dabei ist der Blendendurchmesser umgekehrt proportional zur Größe des Airy-Scheibchens. Die Airy-Funktion entspricht der Impulsantwort bzw. der *Point Spread Function* (PSF) einer idealen Linse. In der Praxis wird die Airy-Funktion aus Vereinfachungsgründen häufig durch eine geeignet skalierte Gauß-Funktion approximiert.

Die Aufnahme und Auswertung der Messbilder in der PIV-Technik erfolgt heutzutage vollständig digital. Der Schritt in das digitale Zeitalter stellt eine wesentliche Veränderung in der Entwicklung der PIV-Technik dar (siehe [5]). Aufgrund dessen, dass für eine Messung zwei Bilder der Strömung mit einer sehr kurzen Zeitdifferenz aufgenommen werden müssen, musste bei analoger Bilddaufnahme der Film zweimal hintereinander belichtet werden, da ein Filmtransport in der kurzen Zeit meist nicht möglich war. Das doppelt belichtete Bild wurde dann mittels Autokorrelation ausgewertet, wobei allerdings die Eindeutigkeit der Strömungsrichtung verloren ging. Dieser Nachteil entfiel, als CCD-Kameras (*Charge Coupled Device*) mit dem so genannten *interline transfer* auf den Markt kamen. Bei dieser Technologie steht jedem Pixel ein eigenes abgedunkeltes Transferregister zur Verfügung, in das die gesammelten

Ladungen direkt nach dem Ende der Belichtung verschoben werden können. Von dort erfolgt dann das Auslesen, während der lichtsensitive Bereich bereits wieder neue Ladungen registrieren kann. Somit ist es erstmals möglich, jede der beiden zeitlich sehr nah beieinander liegenden Belichtungen als eigenes Bild zu speichern und dadurch die Eindeutigkeit der Strömungsrichtung zu erhalten. Heutzutage werden in der PIV-Messtechnik CCD-Kameras mit bis zu 11 Megapixel eingesetzt, was im Prinzip einem Auflösungsvermögen von 100 Linien/mm bei 35 mm Film entspricht (siehe [5]).

Die Genauigkeit der Verschiebungsmessung mittels Kreuzkorrelation liegt im Sub-Pixel-Bereich und wird durch den Einsatz von speziellen Sub-Pixel-Detektoren zur Suche des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion erzielt [8]. Die Bilddaten selbst liegen heutzutage in diskretisierter Form vor und führen somit ebenfalls zu einer diskreten Kreuzkorrelationsfunktion. Die Position des maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten stellt dabei die gesuchte Verschiebung zunächst auf integer-Level der Bildausschnitte dar. Bei der Kreuzkorrelationsfunktion handelt es sich aber um ein statistisches Maß für eine bestmögliche Übereinstimmung und daher enthalten auch die anderen Werte der Kreuzkorrelationsfunktion auswertbare Informationen. Wie sich mittels zusätzlicher Berücksichtigung der lokalen Nachbarschaft in der Kreuzkorrelationsfunktion die Verschiebung mit Sub-Pixel-Genauigkeit bestimmen lässt, wird in der Standardliteratur genauer beschrieben (siehe z.B. [4]). Typischerweise kann mit einer Sub-Pixel-Messgenauigkeit in der Größenordnung von 0,1 bis 0,05 Pixel gerechnet werden.

Es ist wichtig zu verstehen, dass die Geschwindigkeitsmessung mittels PIV auf der einen Seite eine direkte Bestimmung der beiden fundamentalen Größen für die Geschwindigkeit, nämlich der Wegstrecke und der Zeit, beinhaltet. Auf der anderen Seite aber handelt es sich um eine indirekte Geschwindigkeitsmessung, da anstatt der eigentlich gesuchten Geschwindigkeit der Strömung die Geschwindigkeit der Streupartikel gemessen wird. Zusätzlich handelt es sich bei der so bestimmten Geschwindigkeit um eine zeitliche Mittelung über das Zeitintervall Δt oder anders formuliert um den Differenzenquotient

$$(1) \quad \mathbf{v}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{s}(\mathbf{x})}{M\Delta t}.$$

Dabei ist $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ das mittels Kreuzkorrelation aus den beiden Aufnahmen bestimmte Verschiebungsvektorfeld in Pixel, M der Abbildungsmaßstab und Δt das Zeitintervall zwischen den beiden Aufnahmen.

Aus den bisher entwickelten PIV-Varianten ergeben sich Anwendungen in den verschiedensten Gebieten von der Grundlagenforschung bis hin zu industrierelevanten Messungen. Der klassische Fall hierbei ist die Anwendung der PIV-Technik im Windkanal.

Eine wesentliche Eigenschaft der PIV ist es, dass die Dichte der abgebildeten Streupartikel so hoch ist, dass eine eindeutige Zuordnung einzelner Partikel in dem aufgenommenen Bildpaar nicht mehr möglich ist. Daher wird der Partikelversatz fensterweise mittels Kreuzkorrelation berechnet. Wählt man allerdings die Partikelkonzentration

so gering, dass einzelne Partikel identifiziert und in dem Bildpaar zugeordnet werden können, spricht man von *Particle Tracking Velocimetry*, kurz PTV. Das bedeutet, dass bei PTV die durchschnittliche Entfernung zwischen einzelnen Streupartikeln im Bild im Durchschnitt größer als deren Verschiebung ist (siehe [1]).

3. DIE PROJECTED PATTERN CORRELATION MESSTECHNIK

Die Projected Pattern Correlation (PROPAC) Technik ist eine optische flächenhafte Messtechnik zur Bestimmung von Deformationen auf diffus reflektierenden Oberflächen. Der grundlegende optische Aufbau besteht dabei, analog zur Streifenprojektion, aus einem Projektor und einer Kamera. Die Lösung des Korrespondenzproblems erfolgt mittels lokaler Kreuzkorrelation des feinen zufälligen Punktemusters, das der Projektor auf die Oberfläche aufbringt. Daher verringert sich gegenüber der Streifenprojektion zwar die räumliche Auflösung, aber es lässt sich mit dem PROPAC-Verfahren eine deutlich höhere zeitliche Auflösung erzielen, da pro Datensatz nur ein Kamerabild aufgenommen werden muss.

Die Technik der Projektion zufälliger Punktemuster wurde bereits in den 80er Jahren zur Vermessung von Karosserieteilen angewendet (siehe [9]). Das dafür angewandte System Zeiss Indusurf besteht aus einem Diaprojektor und zwei Kameras in Stereoanordnung. Allerdings dienen die zufälligen Punktemuster hier nur zur Texturierung der ansonsten homogenen Objektoberfläche. Der wesentliche Unterschied bei der Projektion der Muster ist aber, dass diese raumfest und nicht ortsfest mit der Oberfläche des Messobjektes verbunden sind. Auch die Richtung der Projektion findet im Zeiss Indusurf System keine Berücksichtigung, da der Projektor ja nur für die Texturierung verantwortlich ist.

Für die PROPAC-Technik zur Deformationsmessung wird das zufällige Punktemuster zunächst auf eine Referenz- oder Soll-Oberfläche projiziert und mit der Kamera unter einem Triangulationswinkel abgebildet. Durch eine weitere Aufnahme des identischen Punktemusters auf der deformierten Oberfläche bzw. der Ist-Oberfläche entsteht ein Bildpaar, das sich mittels lokaler Kreuzkorrelation zu einem Verschiebungsfeld berechnen lässt. Das Messprinzip ist also grundsätzlich eine Kombination aus Kreuzkorrelation zur Lösung des Korrespondenzproblems und Triangulation.

Analog zur Streifenprojektion wird der Projektor wie eine zweite Kamera behandelt, die überall eine konstante Nullverschiebung misst. Somit lassen sich aus der Photogrammetrie bekannte Stereoalgorithmen anwenden, um aus der Verschiebung des Punktemusters auf der Oberfläche die Verschiebung der Oberfläche in Normalenrichtung zu berechnen. Dazu müssen die innere und äußere Orientierung der Kamera, die Lage der Referenzoberfläche sowie das Projektionszentrum des Projektors bekannt sein. Weitere Parameter des Projektors, wie z.B. Linsenverzeichnungen, werden für diese Technik nicht benötigt.

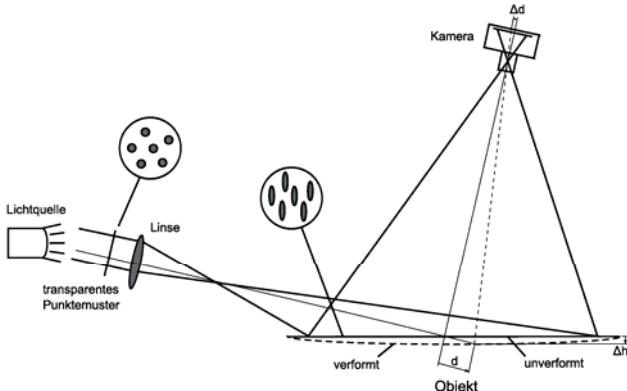


BILD 2. Messanordnung für die Projected Pattern Correlation (PROPAC) Technik.

Aus BILD 2 lässt sich erkennen, dass die Musterprojektion für die PROPAC-Technik, falls die Oberfläche dies zulässt, unter einem möglichst flachen Winkel erfolgen sollte, da dies bei gleichzeitig relativ kleiner Höhenänderung zu einer großen Musterverschiebung führt. Diese schräge Projektion der Punktemuster führt allerdings dazu, dass diese auf dem Objekt verzerrt dargestellt sind. Werden beispielsweise, wie in BILD 2 zu sehen, runde Punktemuster projiziert, so entstehen auf dem Objekt elliptische Punktemuster, deren Form und Lage vom jeweiligen Einfallswinkel der projizierten Lichtstrahlen abhängig ist.

Dr. Triangulationswinkel, also der Winkel zwischen den Projektionsstrahlen und der jeweils korrespondierenden Kamerablickrichtung, sollte idealerweise ca. 90° betragen. Dies führt zu einem unterschiedlichen Abbildungsmaßstab an verschiedenen Bildpositionen. Um die späteren Deformationsinformationen auf einem regelmäßigen Raster zu erhalten und eine leichte Umrechnung des Verschiebungsfeldes von Pixel in metrische Einheiten zu erlauben, werden die aufgenommenen Bilder entzerrt. Dazu kommt die projektive Transformation zum Einsatz.

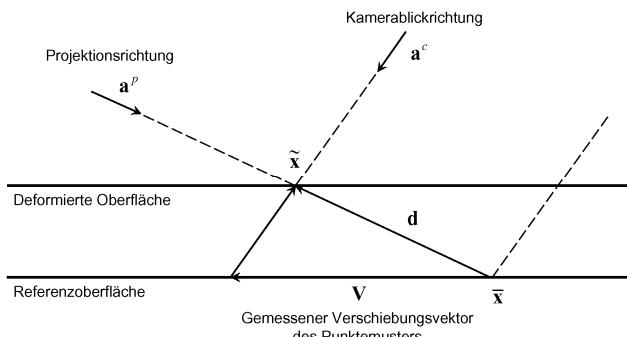


BILD 3. Deformationsmessung mittels der PROPAC-Technik im Detail.

Sowohl der Projektor als auch die Kamera können durch das Lochkameramodell beschrieben werden. Dieses Modell basiert auf der Annahme, dass alle Strahlen durch einen einzigen Punkt, das so genannte Projektionszentrum, laufen. Für die Durchführung der Kalibrierung kann auf herkömmliche Verfahren (siehe z.B. [10] oder [11]), wie sie für die Streifenprojektion oder die Stereophotogrammetrie eingesetzt werden, zurückgegriffen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass bei der PROPAC-Technik das zufällige Punktemuster raumfest ist, lassen sich mit

dieser Messmethode keine Verschiebungen von festen Objektpunkten entlang der Objektebene messen. Allerdings ist dieses Verfahren sehr sensibel gegenüber Verschiebungen in Richtung des Normalenvektors der Oberfläche. Betrachten wir dazu BILD 3. Der Verschiebungsvektor \mathbf{d} des Punktemusters im Raum ist definiert durch die beiden Schnittpunkte eines einzelnen Lichtstrahls des Projektors mit der Referenzoberfläche und der deformierten Oberfläche:

$$(2) \quad \mathbf{d} = \tilde{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}.$$

Von diesem dreidimensionalen Vektor \mathbf{d} wird aber nur eine zweidimensionale Projektion auf der Sensorebene der Kamera bzw. nach Entzerrung und Anbringen des Maßstabs auf der Referenzoberfläche gemessen. Für den Vektor \mathbf{d} und seine Projektion auf die Referenzoberfläche \mathbf{V} gilt folgende Beziehung:

$$(3) \quad p\mathbf{a}^p - q\mathbf{a}^c + \mathbf{V} = \mathbf{0},$$

Wobei \mathbf{a}^p und \mathbf{a}^c der normierte Richtungsvektor vom Projektionszentrum des Projektors bzw. der Kamera zum jeweiligen Punkt der Referenzoberfläche und p, q skalare Größen sind. Für jeden Punkt $\bar{\mathbf{x}}$ der Referenzoberfläche und dessen zugehöriger Verschiebung \mathbf{V} lassen sich bei bekannter geometrischer Anordnung von Kamera und Projektor die Richtungsvektoren \mathbf{a}^p und \mathbf{a}^c jeweils punktweise berechnen. Somit kann für jeden Oberflächenpunkt eine Lösung für die Skalare p und q aus Gleichung (3) nach der Methode der kleinsten Quadrate (MdQ) erzielt werden. Damit ergibt sich der räumliche Verschiebungsvektor

$$(4) \quad \mathbf{d} = -p\mathbf{a}^p,$$

in dem auch die gesuchte Verschiebung senkrecht zur Referenzoberfläche, also die Deformation der Oberfläche, enthalten ist.

Die erreichbare Genauigkeit der PROPAC-Messtechnik hängt nach [12] hauptsächlich von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Kamerapixel,
- Größe des Messbereichs,
- Sub-Pixel Messgenauigkeit der Auswertealgorithmen auf Basis der Kreuzkorrelation,
- geometrische Messanordnung, dabei insbesondere der Winkel zwischen der Referenzoberfläche und den Projektionsstrahlen.

Die Wahl eines möglichst flachen Projektionswinkel ermöglicht es, eine relative Höhenmessgenauigkeit von besser als 10^{-5} (entspricht z.B. 10 µm bei einem Messbereich von 1 m²) zu erreichen (siehe [13]).

Wie bereits erwähnt führt die Projektion runder Punktemuster bei diesem Messverfahren aufgrund der geometrischen Anordnung zu elliptischen Punktemustern auf dem Objekt, deren Form und Lage abhängig vom jeweiligen Einfallswinkel der projizierten Lichtstrahlen ist. Da bei der PIV-Messtechnik keine elliptischen Punktemuster auftreten, sind die herkömmlichen Algorithmen zur Sub-Pixel-Detektion nicht derart allgemein ausgelegt. Detaillierte Untersuchungen zu diesem Thema sowie eine geeignete

Erweiterung der Sub-Pixel-Detektoren finden sich in [14]. Dieser Schritt stellt die wesentliche Entwicklung dar, die den Know-how-Transfer aus dem Windkanal in die prozessintegrierte Qualitätskontrolle erlaubt.

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im Folgenden soll die Funktionalität dieses Verfahrens zur Qualitätskontrolle anhand von Messungen an realistischen Bauteilen verdeutlicht werden.

Die typischen Anforderungen der Industrie an ein System zur optischen flächenhaften Qualitätskontrolle von Bauteilen lauten meist, dass damit Fehler und Defekte mit einer Ausdehnung im Bereich einiger Millimeter und mit einer Tiefe von bis zu 10 µm sicher erkennbar sein müssen. Dies entspricht einer Höhenmessgenauigkeit, die um einen Faktor von ca. 100 höher sein soll als die räumliche Auflösung. Die PROPAC-Technik ermöglicht auf der einen Seite eine Sub-Pixel genaue Bestimmung der Verschiebung, die durch die schräge Projektion der Punktemuster nochmals erhöht wird. Auf der anderen Seite lässt sich aufgrund der Auswertung von lokalen Fenstern mittels der Kreuzkorrelation keine räumliche Auflösung von einem Pixel erreichen. Insgesamt werden die Anforderungen der Industrie durch die PROPAC-Technik erfüllt, hrend bisherige am Markt verfügbare Systeme die geforderte Höhenmessgenauigkeit nicht flächenhaft erreichen können.



BILD 4. Farblich markierter Messbereich an einer zu untersuchenden Außenspiegelhalterung.

Das erste praktische Beispiel ist die Untersuchung von Außenspiegelhalterungen im Auftrag eines Automobilzulieferers, der durch die Ergebnisse von der Funktionalität dieses Messverfahrens überzeugt werden konnte. In BILD 4 ist die komplette Außenspiegelhalterung zu sehen, während BILD 5 das von der Kamera erfasste Messbild inklusive der zufälligen projizierten Punktemuster zeigt, das somit auch den Messbereich festlegt.



BILD 5. Von der Kamera erfasstes Messbild der Außenspiegelhalterung inklusive der zufälligen projizierten Punktemuster.

Der in diesem Anwendungsfall gemessene Defekt ist in BILD 6 grafisch dargestellt. Die Höhe dieses Defekts betrug ca. 80 µm und liegt damit in der Größenordnung des Durchmessers eines menschlichen Haars. Dabei betrug die Wiederholgenauigkeit der Höhenmessung 0,69 µm. Da sich der Defekt räumlich über einige Millimeter ausdehnt, ist er mit bloßem Auge oder durch Abtasten mit den Fingern nicht feststellbar. Wenn das Bauteil aber schließlich mit einem hoch glänzenden Lack versehen ist, sind sogar so kleine Defekte im Gegenlicht zu erkennen. Allerdings ist dann ein Austausch oder eine manuelle Nachbearbeitung um einen Faktor von 10 bis 100 teurer. Daher ist es für die Industrie von sehr großem Interesse, diese Fehler möglichst früh im Produktionsprozess zu identifizieren.

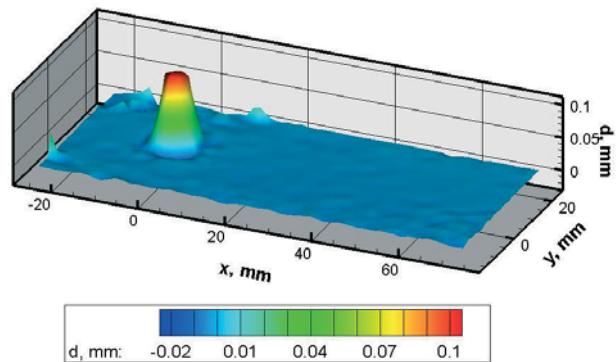


BILD 6. Gemessener Defekt an einer Außenspiegelhalterung (überhöhte Darstellung).

Ein anderes Anwendungsbeispiel dieser Messtechnik zur Qualitätskontrolle ist in BILD 7 zu sehen. Auf einem unlackierten Blech, das später zu einer Autotür werden soll, wurde nach Fehlern gegenüber einer Sollform gesucht. Dabei wurde die in BILD 7 vergrößerte und überhöht dargestellte Beule gefunden. Die räumliche Ausdehnung der Beule betrug ca. 2 x 2 cm, die Beulenheight ca. 140 µm. In diesem Fall konnte eine räumliche Auflösung der Messda-

ten von 0,94 mm und eine Wiederholgenauigkeit der Höhenmessung von 1,30 µm erreicht werden. Der dabei simultan erfasste Messbereich betrug jeweils ca. 30 x 20 cm.

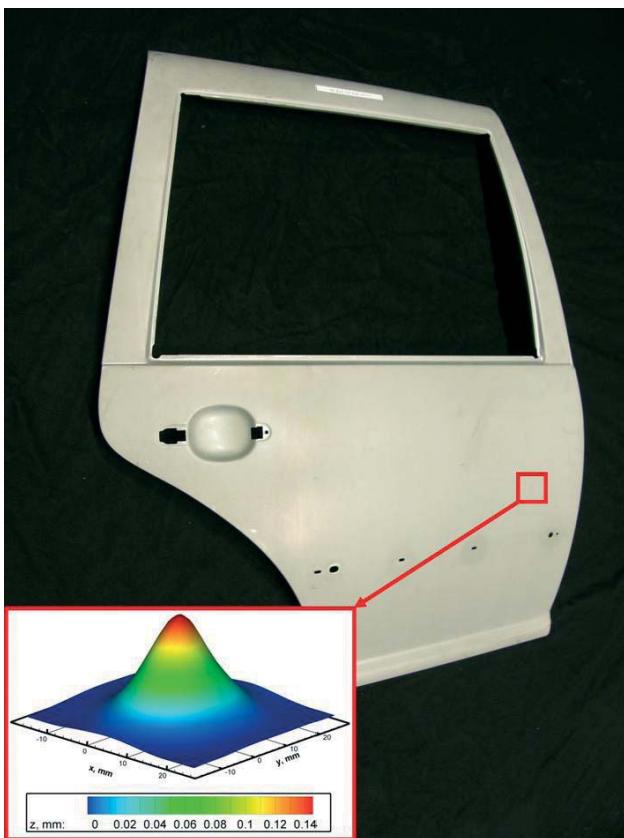


BILD 7. Messergebnis einer Beule an einer Autotür.

Anhand von verschiedenen Anwendungsbeispielen für Messungen zur Qualitätskontrolle an echten Bauteilen konnte die Funktionalität dieser Messtechnik gezeigt werden. Dabei wurde jeweils eine Höhenmessgenauigkeit von ca. 1 µm erreicht. Insbesondere für den relativ großen Messbereich des zweiten Beispiels entspricht dies einer mit bisherigen Verfahren unerreichten relativen Auflösung. Berücksichtigt man dabei noch die kurze Messdauer von nur einer Belichtungszeit der Kamera - für diese Messungen waren das jeweils wenige Millisekunden - so stellt das Verfahren nahezu in jeder Hinsicht einen deutlichen Fortschritt gegenüber bisherigen Methoden und Verfahren dar.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Auf Basis von Grundlagen der optischen Korrelationsbasierten Messtechnik wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Göttingen eine 3D-Messtechnik entwickelt, die einen direkten Soll-Ist-Vergleich und somit eine Qualitätskontrolle von beliebigen Bauteilen ermöglicht. Das vorgestellte Verfahren zur Form erfassung und Deformationsmessung arbeitet dabei bis zu 50 mal schneller als herkömmliche Verfahren wie z.B. Streifenprojektion und es lassen sich damit Höhenmessgenauigkeiten von ca. 10 µm bei einem Messbereich von 1 m² erreichen (dies entspricht einer relativen Messgenauigkeit von 10⁻⁵). Durch den Ein-Bild-Charakter des Verfahrens und der damit verbundenen Echtzeitfähigkeit wirken Vibrationen auf die Messung der 3D-Daten nicht störend. Diese Un-

empfindlichkeit gegenüber Vibrationen ermöglicht diesem Verfahren erstmals einen Einsatz direkt im Produktionsprozess und somit die von der Industrie gewünschte 100-Prozent-Kontrolle.

Die Funktionalität des Messverfahrens wurde in der Automobilindustrie und deren Zulieferern im Rahmen vieler Auftrags- und Testmessungen nachgewiesen. Aufgrund der Möglichkeit der direkten Integration in die Produktionskette ohne diese wie bisher unterbrechen zu müssen, besteht von Seiten der Industrie sehr hohes Interesse an einem Produkt mit den hier vorgestellten Eigenschaften und Kennzahlen. Eingesetzt werden können solche Systeme in sämtlichen Produktionslinien für Blech- und Plastikbauteile.

Zukünftige Untersuchungen könnten das Ziel haben, den Einsatz kleinerer Auswertefenster zu erlauben und damit die räumliche Auflösung des Messverfahrens weiter zu erhöhen.

6. LITERATUR

- [1] Westerweel, J.: Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application, Delft University of Technology, Dissertation, 1993
- [2] Schröder, A.: Untersuchung der Strukturen von künstlich angeregten transitionellen Plattengrenzschichtströmungen mit Hilfe der Stereo und Multiplane Particle Image Velocimetry, Georg-August Universität Göttingen, Dissertation, 2001
- [3] Willert, C.; Gharib, M.: Digital particle image velocimetry. In: Experiments in Fluids 10, 1991, S. 181–193
- [4] Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S. T.; Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Sec. Ed. Springer-Verlag, Berlin, 2007
- [5] Adrian, R. J.: Twenty years of particle image velocimetry. In: Experiments in Fluids 39, 2005, S. 159–169
- [6] Raffel, M.; Willert, C.; Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [7] Schröder, A. (Hrsg.); Willert, C. (Hrsg.): Particle Image Velocimetry - New Developments and Recent Applications. Bd. 112, Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [8] Bing, P.; Hui-min, X.; Bo-qin, X.; Fu-long, D.: Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. In: Measurement Science and Technology 17, 2006, S. 1615–1621
- [9] Schewe, H.: Automatische photogrammetrische Karosserievermessung. In: Bildmessung und Luftbildwesen 1/1988, 1988, S. 16–24
- [10] Zhang, Z.: Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: 7th International Conference on Computer Vision. Korfu, Greece, 1999, S. 666–673
- [11] Legarda-Sáenz, R.; Bothe, T.; Jüptner, W.: Accurate procedure for the calibration of a structured light sys-

tem. In: Optical Engineering 43, 2004, S. 464–471

[12] Blumrich, F.; Schröder, A.; Konrath, R.; Klinge, F.: Presentation of two optical correlation-based measurement techniques for surface deformation: PROPAC and REPAC. In: SENSOR Conference 2007, Proceedings Volume II. Nürnberg, Germany, 2007, S. 117–123

[13] Blumrich, F.: Korrelationsbasierte optische Messtechnik mittels zufälliger Punktemuster: PROPAC und REPAC. In: DGaO-Proceedings, 108, A29. Seebad Heringsdorf, Germany, 2007

[14] Blumrich, F.: Optische korrelationsbasierte Messtechnik mittels zufälliger Punktemuster, Dissertation an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart, 2009