

Entwicklung eines optischen Messsystems zur Online-Schichtdickenmessung thermisch gespritzter Schichten

Hans-Georg RADEMACHER *, Wolfgang TILLMANN **

* Institut für Forschung und Transfer RIF e.V., Dortmund

** TU Dortmund, Dortmund

Kurzfassung. Am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der TU Dortmund werden im Rahmen des SFB 708 Segmente von Tiefziehmatrizen mit einer Verschleißschutzschicht versehen, die mit Hilfe thermischer Spritzprozesse appliziert werden. Diese Schichten müssen einerseits eine Mindestdicke aufweisen, damit ihre Funktionalität gewährleistet werden kann. Andererseits soll aber auch möglichst endkonturnah beschichtet werden, da ansonsten das überschüssige Material wieder mit hohem Aufwand abgetragen werden muss. Die Kenntnis der Schichtdicke ist daher eine sehr wichtige Größe sowohl für den Beschichtungsprozess als auch für die nachfolgenden Bearbeitungsprozesse. Üblicherweise wird diese Größe an diskreten Stellen metallographisch ermittelt. Da dieser Vorgang zerstörend arbeitet, ist das Bauteil anschließend nicht mehr zu gebrauchen. Im Folgenden wird dann erwartet, dass der Prozess und die Rahmenbedingungen so stabil sind, dass die nächsten Bauteile in gleicher Weise beschichtet werden können. Im Beitrag soll daher die Entwicklung eines optischen Schichtdickenmesssystems vorgestellt werden, mit dem diese Information zerstörungsfrei ermittelt werden kann. Zum Einsatz kommt dabei die digitale Bildkorrelation, mit deren Hilfe vor und nach jedem Beschichtungsdurchlauf die 3D-Kontur der Bauteiloberfläche ermittelt wird. Aus der daraus gewonnenen Information kann anschließend auf die Schichtdicke geschlossen werden. Das Verfahren ist dabei so ausgelegt, dass Bewegungen der eingesetzten Kameras kompensiert werden können.

Einführung

Mit Hilfe thermischer Spritzprozesse wie dem Lichtbogen- oder dem Hochgeschwindigkeitsflammspritzen ist es möglich, Bauteile mit Verschleißschutzschichten zu versehen. Bei beiden Verfahren werden Partikel erhitzt und in Richtung der Bauteiloberfläche beschleunigt. Dort kühlen diese ab und haften an der Bauteiloberfläche, so dass eine Schicht durch eine vordefinierte Spritzpistolenbewegung ausgebildet wird. Im Rahmen der im Sonderforschungsbereich 708 „3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung“ beschichteten Umformwerkzeuge handelt es sich um eine Metallmatrix, in die Hartstoffe eingebettet sind. Um mit diesen Werkzeugen Bleche entsprechend maßhaltig umformen zu können, sind entsprechend enge Fertigungstoleranzen einzuhalten. Dies bedeutet für den thermischen Spritzprozess, dass die Beschichtung möglichst endkonturnah und gleichmäßig erfolgen



muss. Überschüssiges Material muss ansonsten im Anschluss aufwändig, z. B. durch Schleifen, abgetragen werden. Dazu muss das Bauteil allerdings zunächst vermessen werden. Dies kann beispielsweise mit einer Koordinatenmessmaschine erfolgen. In der Praxis wird zur genauen Bestimmung der applizierten Schichtdicken eine mikroskopische Untersuchung von Querschliffen durchgeführt. Dieses Vorgehen zerstört allerdings das Bauteil, so dass die Informationen auf Bauteile, die in Zukunft beschichten werden, nur unter der Voraussetzung übertragen werden können, dass der benutzte Spritzprozess eine gute Reproduzierbarkeit besitzt. Diese ist allerdings bei den meisten thermischen Spritzprozessen sehr begrenzt. Daher ist es wünschenswert, schon während des Beschichtungsprozesses Informationen über die Schichtdicke erhalten zu können. Im Folgenden wird daher die Entwicklung eines optischen Schichtdickenmesssystems vorgestellt, welches in der Lage sein soll, diese Information prozessbegleitend zu liefern. In Abb. 1 ist ein Segment zu sehen, das mit Hilfe des Hochgeschwindigkeitsflammspritzens beschichtet wird (links). In der rechten Bildhälfte ist ein Beschichtungsvorgang mit dem Lichtbogenspritzprozess zu sehen. Es wird deutlich, dass bei den Prozessen hohe Temperaturen, ein starker Funkenflug und damit einhergehend eine hohe Staubbelastung vorliegen. Im Hinblick auf einen optischen Messvorgang ist mit einem breitbandigen, sehr intensiven Störlichtanteil zu rechnen. Im Folgenden soll zunächst eine Übersicht über mögliche Verfahren der Schichtdickenmessung gegeben werden. Anschließend wird die Entwicklung des aufgebauten Messsystems erläutert und erste Messergebnisse präsentiert. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf weitere Arbeitspunkte gegeben.



Abb. 1. Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (links) und Lichtbogenspritzen (rechts).

1. Mögliche Verfahren zur Schichtdickenmessung

1.1 Zerstörende Verfahren zur Schichtdickenmessung

In Abb. 2. sind verschiedene Methoden zur Schichtdickenmessung aufgelistet. Diese lassen sich grundsätzlich in zum Teil genormte (DIN) zerstörende und nicht zerstörende Verfahren unterscheiden. Die Letzteren sind natürlich zu bevorzugen, da ansonsten das Bauteil nicht mehr zu verwenden ist. Die Beschichtung des nächsten Bauteils muss dann aber unter den exakt gleichen Rahmenbedingungen erfolgen, was in der Praxis nicht ganz einfach ist. Nichtsdestotrotz haben die zerstörenden Verfahren einen hohen Stellenwert, wenn es darum geht, beispielsweise Aussagen über die Porosität oder den Schichtdickenverlauf im Bereich von Kanten zu erhalten. Diese tragen dazu bei, Prozessparameter, aber auch die Bahnplanung des Beschichtungsroboters zu optimieren. Die Herstellung der dazu notwendigen Querschliffe, die mikroskopisch untersucht werden,

ist sehr aufwändig. Zur Beurteilung der Gesamtbeschichtung sind allerdings nicht alle zerstörungsfreien Schichtdickenmessverfahren gleich gut geeignet.

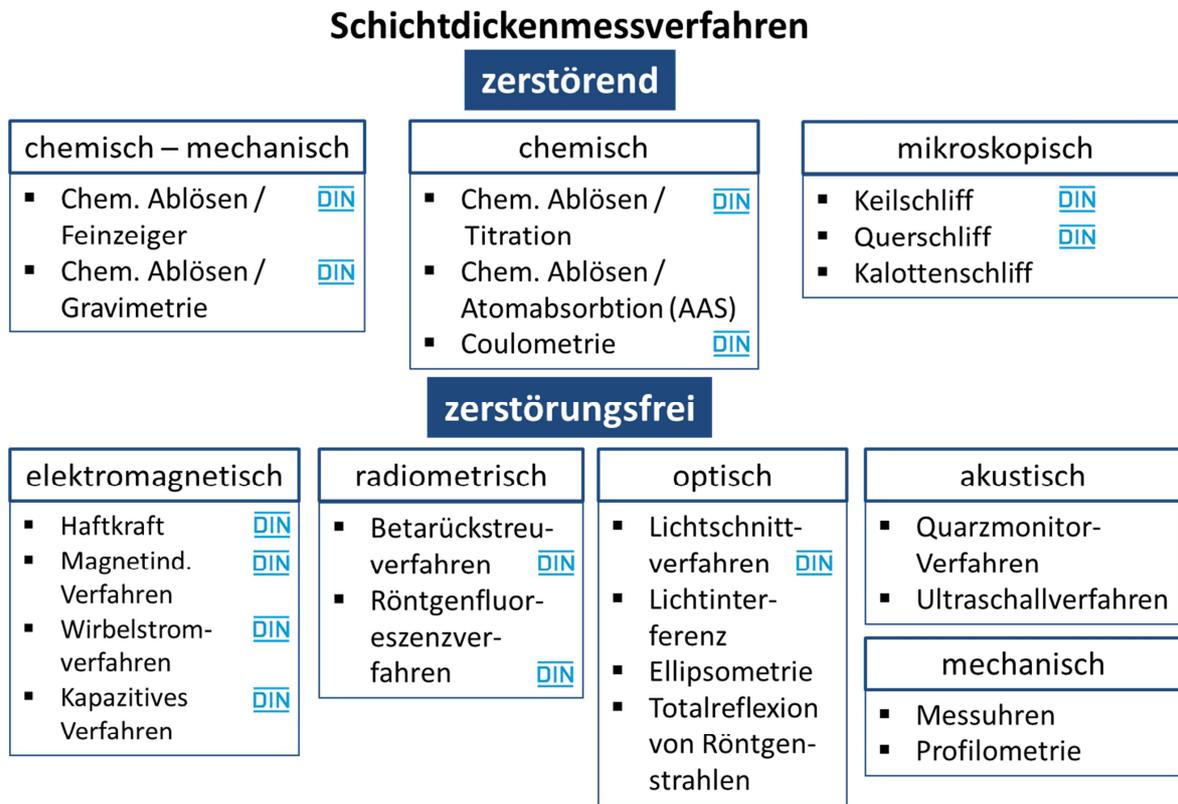


Abb. 2. Übersicht über verschiedene Methoden zur Schichtdickenmessung [1].

1.2 Zerstörungsfreie Verfahren zur Schichtdickenmessung

Die Übersicht der in Abb. 2. dargestellten zerstörungsfreien Schichtdickenmessverfahren suggeriert eine große Auswahl an verwendbaren Verfahren. Bei näherer Betrachtung wird allerdings klar, dass die Meisten nur bei bestimmten Werkstoffkombinationen oder Bauteilgeometrien angewendet werden können. Das Wirbelstromverfahren kann beispielsweise dann zum Einsatz kommen, wenn ein elektrisch leitfähiges, nicht ferromagnetisches Bauteil mit einem elektrisch schlecht leitfähigen Material beschichtet worden ist. Die Methode kann mit entsprechenden Kalibrierkörpern kalibriert werden und liefert punktuelle Messwerte. Bei kleinen Radien bzw. komplexen Bauteilgeometrien kann diese Methode allerdings nicht eingesetzt werden. Diese Einschränkung lässt sich durch den Einsatz einer Koordinatenmessmaschine überwinden, da die Topografie eines Bauteils mechanisch oder optisch erfasst werden kann. Wurde die Topografie auch vor der Beschichtung erfasst, so kann durch den Vergleich beider Informationen auf die Schichtdicke geschlossen werden. Auch dieses Messverfahren ist sehr zeitaufwändig und das Bauteil muss dem Prozess entnommen werden. Ein Verfahren, welches in der Lage ist, die Schichtdicke von Bauteilen mit komplexer Geometrie prozessbegleitend zu ermitteln, ohne das Bauteil ausbauen zu müssen, ist nicht etabliert. Einige Ansätze, die auf dem Lichtschnittverfahren beruhen, zeigen bei rotationssymmetrischen Bauteilen großes Potential [2]. Gleiches gilt für ein wirbelstrombasiertes Verfahren, bei dem der Sensor robotergestützt entsprechend der Beschichtungsbahn nachgeführt wird [3]. Alle Verfahren haben aber mehr oder weniger große Beschränkungen im Hinblick auf die Geometrie oder

den Werkstoff, die durch die Entwicklung eines neuen, optischen Messansatzes überwunden werden sollen.

1.3 Anforderungen an das optisches Messsystem zur online Schichtdickenmessung

Der neue Ansatz soll möglichst universell einsetzbar und nicht nur auf spezielle Werkstoffkombinationen oder auf einfache Flachproben beschränkt sein. Zudem soll die Messung prozessbegleitend erfolgen ohne das Bauteil ausbauen zu müssen. Die Messdaten sollen, ähnlich wie bei der taktil arbeitenden Koordinatenmessmaschine, möglichst über das gesamte Bauteil verteilt sein und nachfolgenden Bearbeitungsschritten Bereiche kennzeichnen können, an denen überschüssiges Material abgetragen werden muss. Darüber hinaus ist die Identifikation von Bereichen wünschenswert, an denen thermisch induzierte Eigenspannungen zu erwarten sind. Diese Information kann zur Optimierung der Prozessführung beitragen. Um den Arbeitsraum des Beschichtungsroboters nicht einzuschränken wird ein Arbeitsabstand von 2m angestrebt. Zudem sollen Einflüsse durch Vibrationen und Störlicht die Messung nicht negativ beeinflussen.

2. Entwicklung des optischen Schichtdickenmesssystems

Die Bestimmung der Schichtdicke erfolgt indirekt indem die Oberflächengeometrie vor und nach einem Beschichtungsvorgang dreidimensional im Raum bestimmt wird. Aus der Differenz dieser beiden Messungen kann auf die Schichtdicke geschlossen werden. Da die Gesamtbeschichtung aus mehreren separat aufgetragenen Einzelschichten aufgebaut wird, besteht die Möglichkeit, aus den Messdaten Informationen zur Prozesssteuerung abzuleiten. Zur Bestimmung der Oberflächengeometrie wird die Photogrammetrie genutzt. Anders als bei der Streifenprojektion werden mindestens zwei Kameras für eine stereoskope Aufnahme verwendet. Damit wird ein Nachteil der Streifenprojektion vermieden, der darin besteht, mehrere Aufnahmen unterschiedlich projizierter Streifenmuster durchführen zu müssen. Zwischen diesen einzelnen Aufnahmen kann sich das Bauteil bewegen und somit einen Messfehler verursachen. Bei der Photogrammetrie muss allerdings auch das Problem gelöst werden, in den aufgenommenen Bildern identische Bereiche auf der Bauteiloberfläche zu identifizieren, um dann über eine Triangulation die dreidimensionale Position dieses Bereiches bestimmen zu können. Zu diesem Zweck wird die digitale Bildkorrelation genutzt. Üblicherweise kommt diese bei der berührungslosen Vermessung von Dehnungsfeldern beispielsweise an Zugproben zum Einsatz. Die Proben werden oft mit einem Muster versehen, welches mit einem Farbspray aufgetragen werden kann. Aus der Verschiebung der Musterstrukturen zwischen zwei Aufnahmen kann dann die Dehnung berechnet werden. Dies ist prinzipiell auch beim thermischen Spritzen möglich, um damit den Abkühlvorgang zu untersuchen und einen Hinweis auf thermisch induzierte Spannungen zu erhalten. Allerdings ist es schwierig, ein Farbspray auf der heißen Bauteiloberfläche zu applizieren. Zwischen den einzelnen Beschichtungsvorgängen ist dieses sogar ausgeschlossen, da dadurch der Schichtaufbau ungünstig beeinflusst würde. Stattdessen wird die natürlich vorhandene Oberflächenrauheit als Merkmal genutzt. Um diese Merkmale nutzen zu können, werden allerdings hohe Anforderungen an das optische Abbildungssystem gestellt. Sollten die Merkmale nicht erkannt werden können, besteht immer die Möglichkeit, eine künstliche Strukturierung mit Hilfe eines Projektors zu erzeugen. Dadurch sind nach wie vor alle Anforderungen erfüllt, bis auf den Wunsch auch thermisch induzierte Dehnungen erfassen zu können. Ein entsprechender Versuchsaufbau ist in Abb. 3. zu sehen. Zwei Kameras nehmen ein Foto eines thermisch gespritzten Footprints auf. In der Mitte des Bildes ist Musterprojektor zu sehen. Um einen Footprint herzustellen wird die Spritzdüse senkrecht zu einer massiven, ebenen Platte ausgerichtet.

Anschließend wird der Beschichtungsvorgang für einige Sekunden durchgeführt. Die dabei aufgebaute Schicht ist charakteristisch für die eingesetzte Düse. Dieses Hilfsmittel dient zum einen für die Beurteilung von Düsenmodifikationen und zum anderen zur Unterstützung der Bahnplanung. Die Vermessung eines Footprints mit dem optischen Messsystem erfolgt in wenigen Minuten und ist damit eine wertvolle Ergänzung zu taktilen Messverfahren, die für die gleiche Aufgabe mehrere Stunden benötigen.

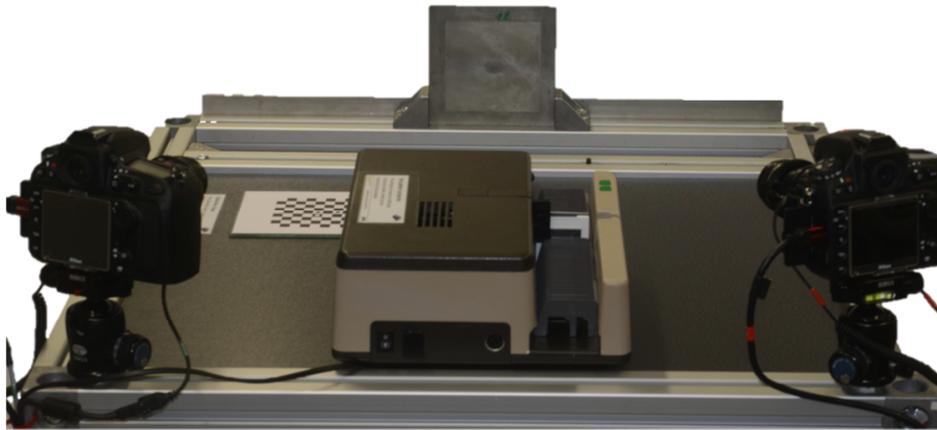


Abb. 3. Aufbau zur 3D-Vermessung von thermisch gespritzten Footprints.

Die Schichtdicke des erzeugten Footprints kann in diesem Fall mit der Software ISTR4D der Firma Dantec Dynamics bestimmt werden. Die Software ist in der Lage, eine 3D Kontur zu bestimmen, die in eine Ebene gefittet wird (Abb. 4.). Diese entspricht der beschichteten Platte, so dass die Höhe in diesem Fall gleichzeitig der Schichtdicke entspricht. Die berechneten Daten können dann exportiert und mit anderen Programmen weiterverarbeitet werden.

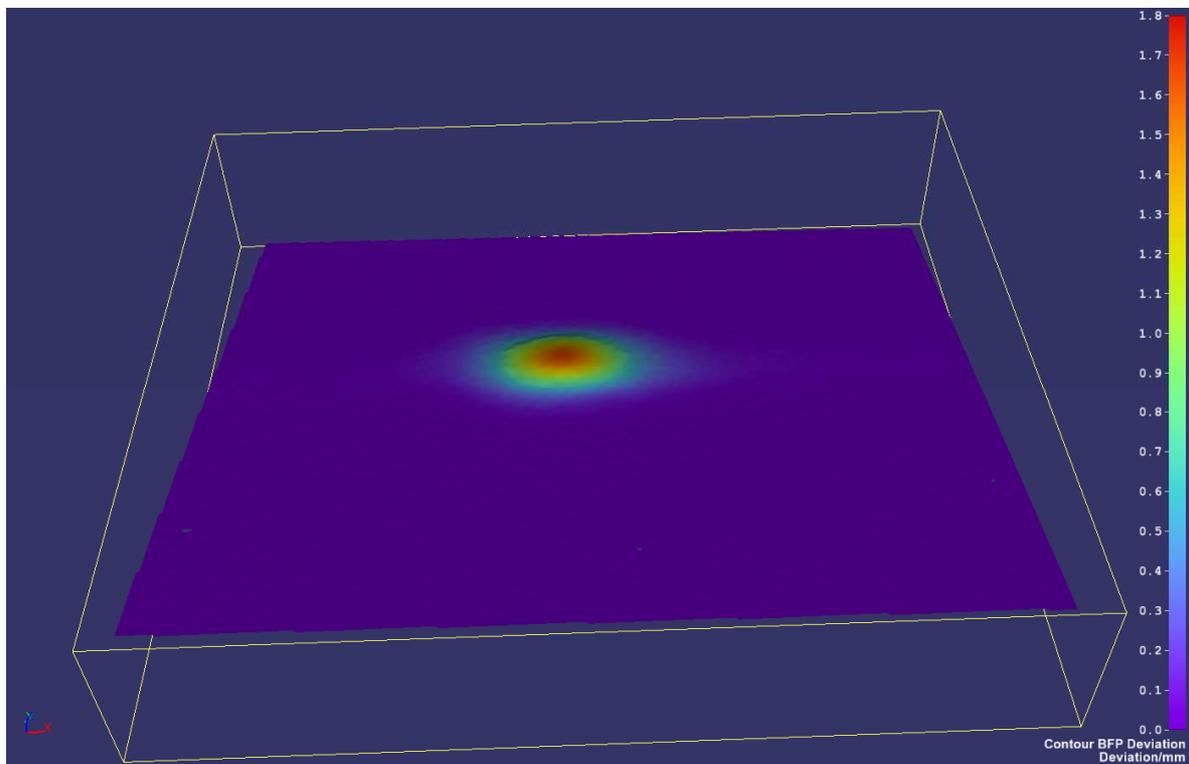


Abb. 4. Von ISTR4D berechnete Kontur eines thermisch gespritzten Footprints.

Um die anderen Anforderungen, die sich durch den prozessbegleitenden Einsatz des Messsystems ergeben, erfüllen zu können, muss das oben dargestellte Grundsystem erweitert werden. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Korrektur von Relativbewegungen zwischen den Kameras und dem beschichteten Bauteil. Diese Bewegung würde fälschlicherweise als Schichtdickenänderung interpretiert und muss daher erkannt und korrigiert werden können. Veranschaulicht wird dieser Zusammenhang in Abb. 5. In der linken Hälfte bewirkt eine Relativbewegung zwischen Kamera und Objekt eine vermeintliche Verschiebung des Objektes und damit wird fälschlicherweise ein Schichtauftrag erkannt. In der rechten Hälfte kann die Relativbewegung durch einen fixen Passpunkt erkannt und der daraus resultierende Fehler korrigiert werden.

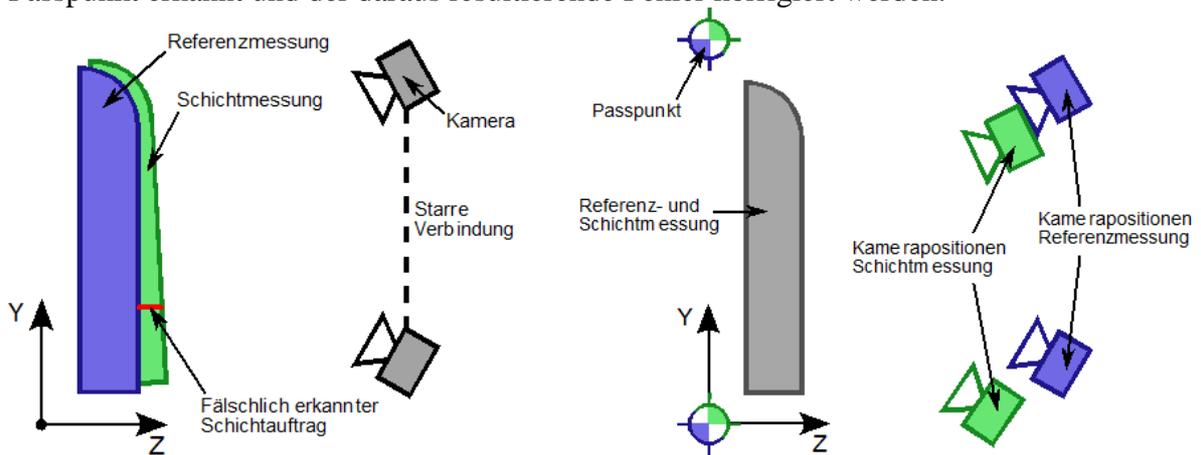


Abb. 5. Fehlereinfluss durch Relativbewegung und Korrektur über Passpunkte [5].

Um diese Korrektur durchführen zu können, muss der Passpunkt starr mit dem Bauteil verbunden sein. Dazu wurde eine Markerplatte konzipiert, die aus mehreren Passpunkten besteht. Auf dieser befindet sich ein Kühler, um die Wärme, die durch den thermischen Spritzprozess in das Bauteil eingebracht wird, abführen zu können, sowie ein Abstandshalter, damit die Beschichtungspistole nicht mit der Markerplatte kollidiert.

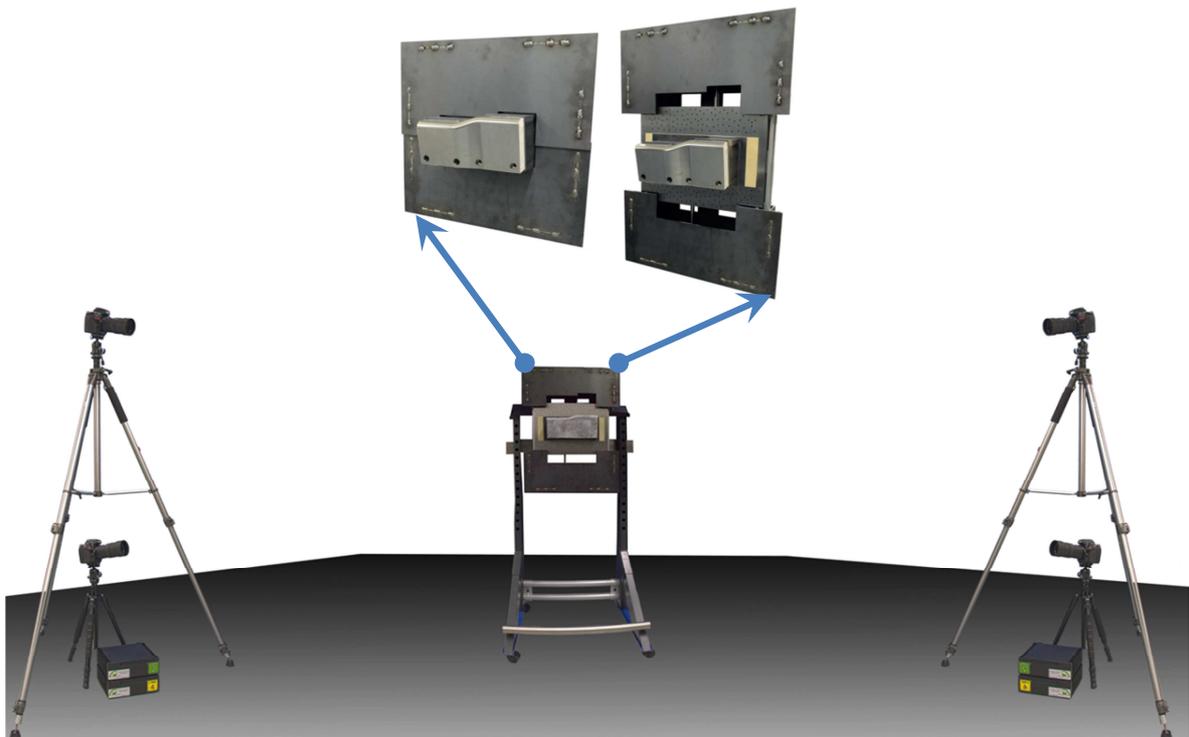


Abb. 6. Aufbau des optischen Schichtdickenmesssystems.

Damit die Markerplatte nicht mitbeschichtet wird, kann diese mit zwei beweglichen Schutzschilden verdeckt werden. Der komplette Aufbau des Messsystems ist in Abb. 6. zu sehen. Bauteil, Markerplatte und Schutzschilde sind auf einer fahrbaren Halterung montiert. In der Teilansicht sind einmal die geschlossenen und die geöffneten Schilde zu sehen. Links und rechts sind jeweils zwei Kameras, welche, bei geöffnetem Schild, die Probe und die Markerplatte fotografieren können [4]. Es kommen insgesamt vier Kameras zum Einsatz, um auch Rundungen erfassen zu können, die für zwei Kameras nicht zugänglich wären. Die Kameras können ferngesteuert eingestellt werden und synchron auslösen. Die Schilde werden ebenfalls ferngesteuert bedient. Die gesamte Ablaufsteuerung, die Korrektur mit Hilfe der Passmarken, sowie die eigentliche Schichtdickenbestimmung kann nicht von der Software ISTRA 4D durchgeführt werden. Für diese Aufgaben wurde eine eigene Software entwickelt [5]. Die Oberfläche dieser Software ist in Abb. 7. zu sehen. Die Software baut eine Verbindung zu den Kameras auf, um die aufgenommenen Bilder abzurufen und weiterverarbeiten zu können. Die synchrone Auslösung erfolgt mit Hilfe eines speziellen Mikrocontrollers. Um aus den Bildern eine 3D-Kontur bestimmen zu können, muss die Software mit ISTRA 4D kommunizieren. Da ISTRA 4D über keine Software Schnittstelle verfügt, gestaltet sich die Kommunikation sehr schwierig. Mit Hilfe der Software AutoItScript konnte zumindest ein halbautomatisierter Ablauf realisiert werden, der nur eine geringe Benutzerinteraktion benötigt. Wünschenswert wäre an dieser Stelle die Möglichkeit einer vollständigen Fernbedienbarkeit von ISTRA 4D. Eine weitere Schwierigkeit bei der Optimierung des Messverfahrens ist die Tatsache, dass die Software als Black Box anzusehen ist. Wie genau die Digitale Bildkorrelation und die nachfolgenden Optimierungsschritte durchgeführt werden ist nicht bekannt.

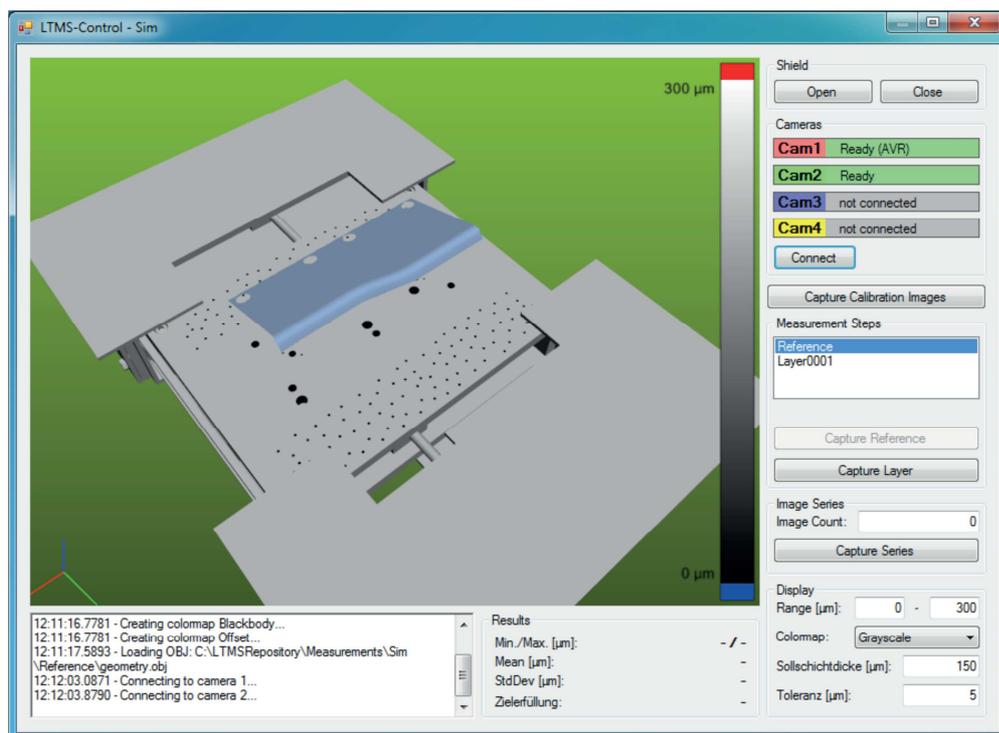


Abb. 7. Software LTMS-Control zur Steuerung und Bedienung des Messsystems [5].

In Abb. 8. Ist das Ergebnis einer Schichtdickenmessung zu sehen. Um das System zunächst im Labor testen zu können, wurde ein präparierter Teststreifen als Beschichtung genutzt. Neben der absoluten Anzeige der Schichtdicke besteht auch die Möglichkeit, eine Sollschichtdicke mit einer Toleranz vorzugeben. Die Abweichung wird dann entsprechend farblich visualisiert, so dass leichter entschieden werden kann, ob die bisher aufgebrauchte Schicht ausreichend dick ist.

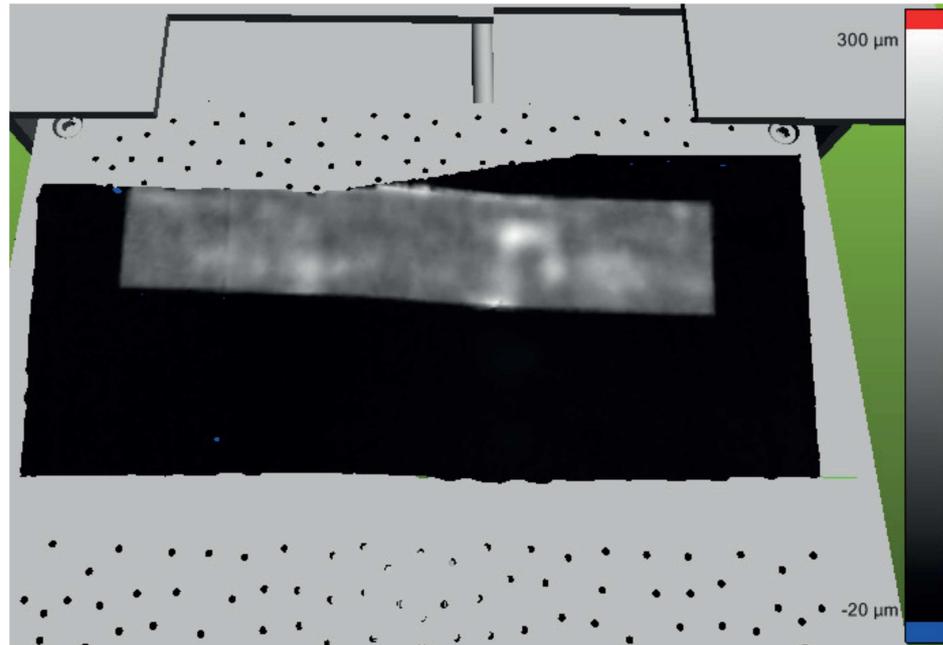


Abb. 8. Ergebnis einer Schichtdickenmessung mit einem Teststreifen [5].

Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte optische Messsystem zur Schichtdickenmessung erfüllt prinzipiell die Voraussetzung um die Schichtdicken thermisch beschichteter Bauteile bestimmen zu können. Dabei weist es gegenüber etablierten Verfahren Vorteile einer schnellen, flächigen und prozessbegleitenden Datenerfassung auf, sowie die Möglichkeit auch thermisch induzierte Dehnungen messen zu können. Für erste Tests bei realen Beschichtungsprozessen sind noch weitere konstruktive Maßnahmen zum Schutz der Kameras und der Optik durchzuführen. Diese sind zurzeit Gegenstand studentischer Arbeiten.

Danksagung

Die Autoren danken der DFG für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 708 „3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung-Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung“ Teilprojekt B3.

Referenzen

- [1] Dr. Tipp, Dr. Froh: „Schichtdickenmessung“, http://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt_wet/Praktika. Version: 2010, Abruf: 05-2014
- [2] R. Puschmann, C. C. Stahr, L.-M. Berger: „Möglichkeiten der Online-Schichtdickenmessung beim thermischen Spritzen“, Thermal Spray Bulletin 2/09, S. 111ff
- [3] C. Scheer, W. Reimche, K. Möhwald, F.-W. Bach: „Entwicklung einer Online-Schichtdickenmessung für das Plasmaspritzen von Keramik auf Basis einer Wirbelstromsensorik“, DACH-Jahrestagung 2008, St. Gallen
- [4] M. Prahl: „Konstruktion einer modularen Probenhalterung für thermisch gespritzte Bauteile im Rahmen einer prozessbegleitenden 3D-Vermessung“, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, 2013
- [5] T. Siebrecht: „Systementwicklung zur selbstkorrigierenden 3D Vermessung von beschichteten Bauteilen zur Bestimmung der Schichtdicke“, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, 2013