

Schallemissionsanalyse zur Prozessüberwachung beim thermischen Spritzen

Reiner ZIELKE, Wolfgang TILLMANN, Guang WANG, Mohamed ABDULGADER
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund
Leonhard-Euler-Str. 2, 44227 Dortmund
reiner.zielke@udo.edu

Kurzfassung. Mit Hilfe des thermischen Spritzens werden Bauteile mit Schichten versehen, welche z. B. den Verschleiß-, Korrosions- und Hochtemperaturschutz gewährleisten. Bei dem Beschichtungsprozess wird das Spritzmaterial an-, auf- oder abgeschmolzen. Danach werden die Partikel beschleunigt, prallen schließlich auf die vorbereitete Bauteiloberfläche auf und bilden somit die Schicht. Die sich dabei einstellende Schichtqualität wird primär von Partikelgeschwindigkeit und Temperatur beeinflusst, die wiederum von Geräteparametern wie Stromstärke oder Gasdruck abhängen. Weiterhin beeinflussen auch die Umgebungstemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit die Schichtqualität.

Eine Möglichkeit zur Prozessüberwachung stellt die Schallemissionsanalyse dar. Mit dieser können sowohl der Beschichtungsprozess selbst überwacht, als auch Abkühlrisse, die nach der Beschichtung entstehen, detektiert werden.

Im Beitrag wird das für die angestrebte Prozessüberwachung erstellte Schallemissionsanalysesystem vorgestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse zur Überwachung von Beschichtungsparametern (wie elektrische Spannung) sowie die zur Detektion von Abkühlrissen vorgestellt.

Einführung

Die Herstellung von Funktionsschichten erfolgt unter anderem mit Hilfe des thermischen Spritzens. Das Verfahren findet in der Industrie, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Biomedizin, der Druck- und Papierindustrie, Anwendung. Das thermische Spritzen unterteilt sich in Verfahren wie Plasma-, Hochgeschwindigkeits- und Lichtbogenspritzen. Bei allen Techniken wird zunächst das Spritzmaterial aufgeschmolzen, beschleunigt und trifft dann auf das zu beschichtende Bauteil. Die Systeme unterscheiden sich vorwiegend in Temperatur und Geschwindigkeit der erzeugten Partikel, die dann die Schicht aufbauen. Diese Partikeleigenschaften haben deshalb einen direkten Einfluss auf den Schichtaufbau und die Schichtqualität. Diese Eigenschaften werden jedoch nicht nur vom Spritzverfahren bestimmt, sondern auch durch Umgebungsparameter, wie Umgebungstemperatur oder Luftfeuchtigkeit, beeinflusst [1-3]. In der Abbildung 1 ist das Prinzip des thermischen Spritzens skizziert und die dabei vorliegenden Einflussgrößen aufgelistet.

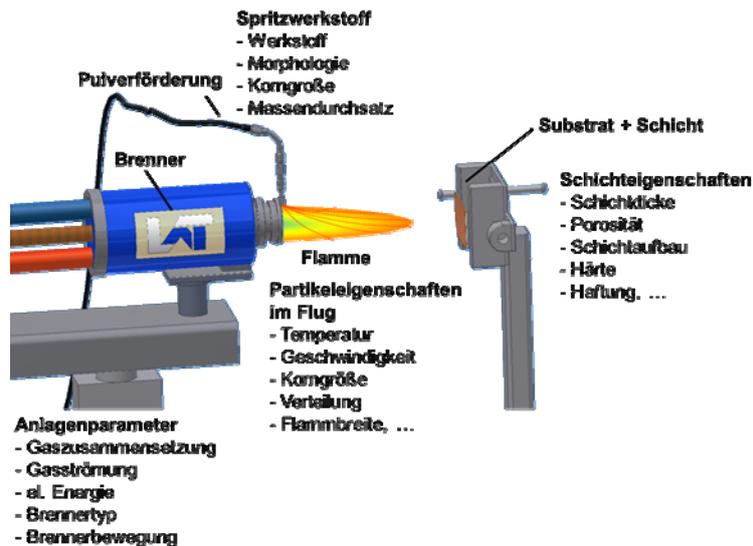


Abbildung 1: Prinzip des thermischen Spritzens und mögliche Einflussgrößen

Bei der Beschichtung komplexer Bauteile sind weitere Einflussgrößen, wie der Spritzwinkel und die Bahnstrategie, zu berücksichtigen. Diese Arbeiten sind Schwerpunkte des von der DFG geförderten SFBs 708 [4, 5]. Dabei werden mit unterschiedlichen Messsystemen, wie Schlieren-, Thermografie- und Hochgeschwindigkeitskameras, die Partikeleigenschaften analysiert, um deren Einfluss auf die Schichtqualität zu untersuchen. Für eine spätere Prozessüberwachung sind diese komplexen und auch kostenintensiven Systeme jedoch weniger geeignet. Aus diesem Grund wird, parallel zu den hochauflösenden Messungen, die Schallemissionsanalyse zur Prozessüberwachung erprobt [6, 7]. Dabei werden folgende Ziele verfolgt. Durch Schallemissionsanalyse während des Beschichtungsprozesses wird versucht auf sich ändernde Prozessparameter zu schließen. Eine Ortung der aufgenommenen Schallsignale ist vorgesehen, um somit mögliche Fehlstellen zu lokalisieren. Es wird untersucht, in wie weit die bereits aufgetragene Schichtdicke einen Einfluss hat und ob Rückschlüsse auf die Schichtdicke möglich sind. Unmittelbar nach der Beschichtung erfolgt dann eine Überwachung auf mögliche Rissentstehung und -wachstum als Folge des Abkühlverhaltens von Schicht und Substrat. Die hierzu gewählte Vorgehensweise sowie erste Ergebnisse werden nachfolgend näher erläutert.

Versuchsaufbau zur Prozessüberwachung

Bei der angestrebten Prozessüberwachung liegen kontinuierliche Signale vor. Als Schallquellen bieten sich neben dem zu beschichteten Bauteil auch die Spritzpistole selbst an. Daher werden Mikrofone sowohl an der Spritzpistole als auch an der Rückseite des Substrats installiert. In der Abbildung 2 sind die eingesetzte Spritzpistole sowie das zu beschichtende Bauteil abgebildet. Im Fall des Bauteils sind auch die rückseitig angebrachten Sensoren (Physical Acoustic WD) zu sehen, die mit Hilfe von Magnethaltern angebracht sind. Als Messsystem wird das PCI2 von Physical Acoustic eingesetzt.

Nach erfolgreicher Funktionsüberprüfung werden mit dem System Messungen mit unterschiedlichen Beschichtungsparametern durchgeführt. Es erfolgt eine Variation von Primär- und Sekundärgasdruck und auch von Spannung und Stromstärke des Lichtbogens. Durchgeführt werden die Untersuchungen sowohl für Massiv- als auch für Fülldrähte.

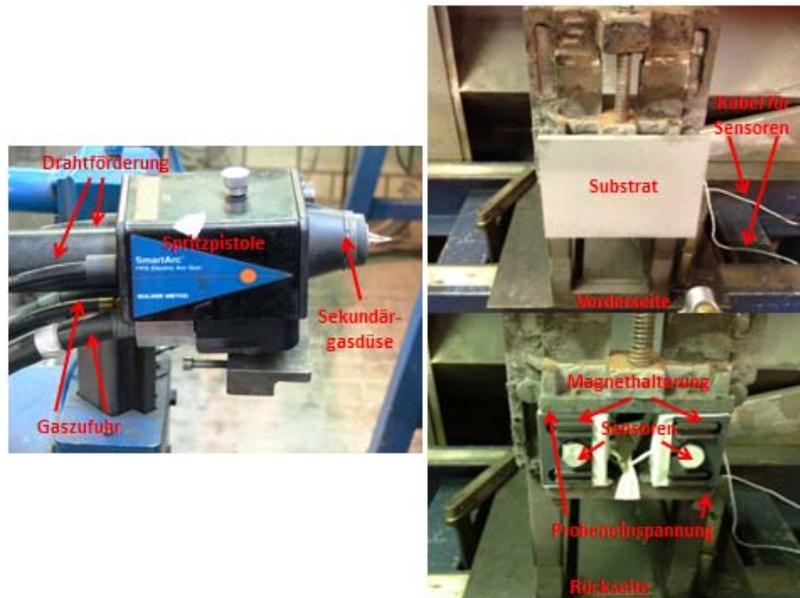


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Prozessüberwachung

Messergebnisse zur Prozessüberwachung

Die Auswertung der kontinuierlichen Signale erfolgt mit Hilfe einer Fouriertransformation, welche die Stärke der aufgenommenen Frequenzen darstellt.

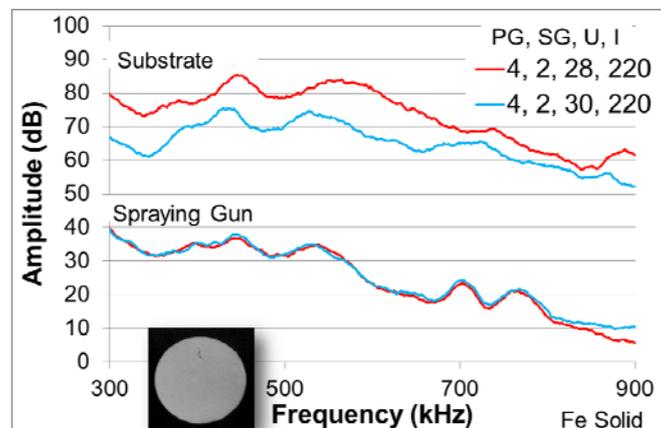


Abbildung 3: Messergebnis zur Variation der Spannung beim Lichtbogenspritzen im Fall von Massivdrähten

In der Abbildung 3 ist exemplarisch das Ergebnis für eine Beschichtung mit Fe-Massivdraht mit einem Primärgasdruck von 4 bar, einem Sekundärgasdruck von 2 bar und einer Stromstärke von 220 Ampere dargestellt. Variiert wurde die elektrische Spannung von 28 Volt (rote Linie) auf 30 Volt (blaue Linie). Aufgenommen wurden die Signale sowohl an der Spritzpistole als auch an der Rückseite des Substrats. Die Signale an der Spritzpistole sind bei beiden Spannungen sehr ähnlich. Bei den Signalen, die vom Substrat stammen, sind jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Hierbei bewirkt eine Zunahme der Spannung eine Abnahme der Signalamplituden.

Die Wärme für das Abschmelzen der Drähte wird durch den Lichtbogen erzeugt, der durch einen Kurzschluss zwischen den Massivdrähten entsteht. Die freigesetzte Wärmeenergie nimmt mit ansteigender Spannung zu. Dies führt zu einem schnelleren Abbrennen der Drähte, was zu einem größeren Massestrom führt. Somit liegen bei einer

Spannung von 30 Volt mehr Partikel vor als bei einer Spannung von 28 Volt. Die Partikel sind weiterhin wärmer und durch den energiereicheren Abbrennprozess auch kleiner. So gesehen prallen bei einer Spannung von 30 Volt zwar mehr Partikel auf das Substrat, die aber kleiner und wegen der höheren Temperatur auch fluider sind. Zusätzlich ergaben Messungen mit optischen Systemen, dass die Partikelgeschwindigkeit mit steigender elektrischer Spannung abfällt. Hierdurch sind die Schallsignale der einzelnen Partikel geringer als im Fall der 28 Volt-Anregung. Ein anderes Verhalten zeigte die gleiche Untersuchung mit Fülldrähten. In diesem Fall trifft das oben beschriebene Abbrennverhalten nur auf die elektrisch leitfähige Hülle des Fülldrahtes zu. Das elektrisch nicht leitende Beschichtungsmaterial im Inneren des Fülldrahtes wird nicht wesentlich beeinflusst. Daher sind hier die Unterschiede wesentlich geringer.

Die weiteren Untersuchungen zeigten, dass auch der Einfluss von variierender Stromstärke und Gasdrücken sowohl für Primär- als auch Sekundärgas nachgewiesen werden konnte [8].

Messergebnisse zur Schichtdickenbestimmung

Für die Herstellung dicker Schichten ist es prinzipiell möglich die Geschwindigkeit der Spritzpistole zu reduzieren oder diese gar anzuhalten. In dem Fall steigt jedoch die thermische Belastung des Bauteils an, was zu Schäden führt. Daher werden dickere Schichten durch mehrmaliges Überfahren des Substrats realisiert. Dabei wird die neue Schicht auf die zuvor aufgetragene und abgekühlte Schicht aufgebracht. Diese kann nun das Signal der auftreffenden Partikel dämpfen, so dass eine Korrelation zwischen Schallemissionssignal und Schichtdicke vorliegen könnte. Um diesen Sachverhalt zu überprüfen, wurden die Schallemissionssignale für die erste und zweite Überfahrt sowohl für Massiv- als auch Fülldraht aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

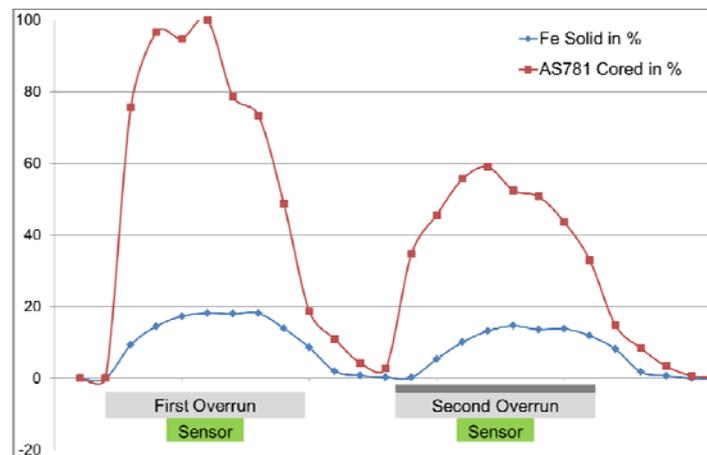


Abbildung 4: Untersuchungen zum Einfluss der Schichtdicke

Bei dieser Untersuchung wurde die Energie der Schallsignale ausgewertet. Die höchste Energie trat im Fall des Fülldrahtes (rote Linie) bei der ersten Überfahrt auf und wurde als 100 % gesetzt. Bei der zweiten Überfahrt fiel die Amplitude auf 60 % ab. Auch bei den Massivdrähten (blaue Linie) ist ein Abfall des Signals bei der zweiten Überfahrt zu erkennen. Somit kann auch mit Hilfe der Schallemissionsanalyse auf die Anzahl der Überfahrten und somit auf die ungefähre Schichtdicke geschlossen werden.

Versuchsaufbau zur Ortung des Partikelstrahls

Neben einer Detektion von Prozessabweichungen ist auch eine Ortung sinnvoll, da so der Schaden bewertet werden kann und gegebenenfalls Nachbesserungen oder Reparaturen während oder unmittelbar nach der Beschichtung möglich sind. Das bei den Untersuchungen eingesetzte Schallemissionsanalyse-System erlaubt die simultane Aufnahme von zwei Kanälen. Mit zwei Sensoren lässt sich somit nur eine lineare Ortung aufbauen, wie sie in der Abbildung 5 dargestellt ist.

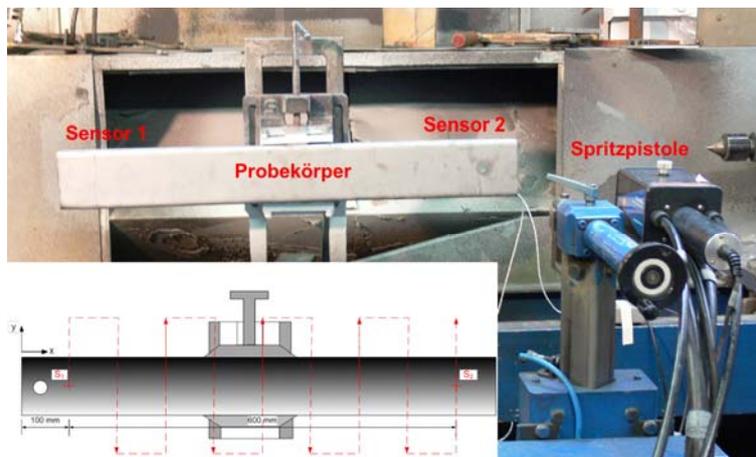


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Ortung des Partikelstrahls

Als Probekörper wurde ein 80 cm langes Stahlprofil gewählt, welches mäandrierend beschichtet wird. Die entsprechende Bahnkurve ist unten links in der Abbildung 5 skizziert. Die durch die Beschichtung emittierten Signale werden von beiden Sensoren aufgezeichnet. Bei der Ortung von Burstsignalen wird hierzu die Laufzeitdifferenz ausgewertet. In diesem Fall liegen jedoch kontinuierliche Signale vor, wodurch die Phasenverschiebung nur schwer zu bestimmen ist. Aus diesem Grund wurden zur Ortung die von den Sensoren aufgenommenen Amplituden herangezogen.

Messergebnisse zur Ortung des Partikelstrahls

Die Ergebnisse zur Ortung sind in der nachfolgenden Abbildung 6 graphisch dargestellt.

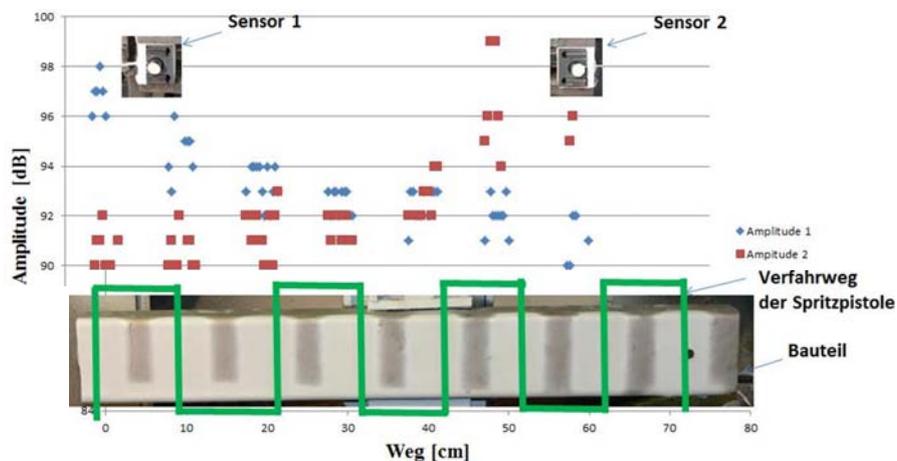


Abbildung 6: Messergebnis zur Ortung des Partikelstrahls

Aufgetragen sind jeweils die Amplituden der aufgenommenen Signale von Sensor 1 (blau) und von Sensor 2 (rot). Zusätzlich ist unten im Bild der Probekörper und der Verfahrensweg der Spritzpistole abgebildet. Am Anfang des Probekörpers (0 cm) verfährt die Spritzpistole senkrecht und beschichtet das Bauteil. Dabei registriert der Sensor 1 (blau) höhere Signale als Sensor 2 (rot), der ja auch weiter vom Auftreffen des Partikelstrahls entfernt ist. Beide Sensoren zeigen eine Streuung der Signale, die darauf beruht, dass der Partikelstrahl bei der Überfahrt das Bauteil nicht immer komplett trifft. In der Mitte des Bauteils (40 cm) sind die Signale von Sensor 1 und 2 vergleichbar und am rechten Ende des Bauteils (80 cm) liegen am Sensor 2 höhere Signale vor. Somit ist durch Auswertung der Amplituden eine Ortung des Partikelstrahls möglich.

Versuchsaufbau zur Detektion von Abkühlrissen

Um Abkühlrisse zu provozieren wurde die Spritzpistole angehalten und eine mehrere cm dicke Schicht aufgetragen. Den Versuchsablauf sowie die aufgetragene Schicht zeigt die Abbildung 7.

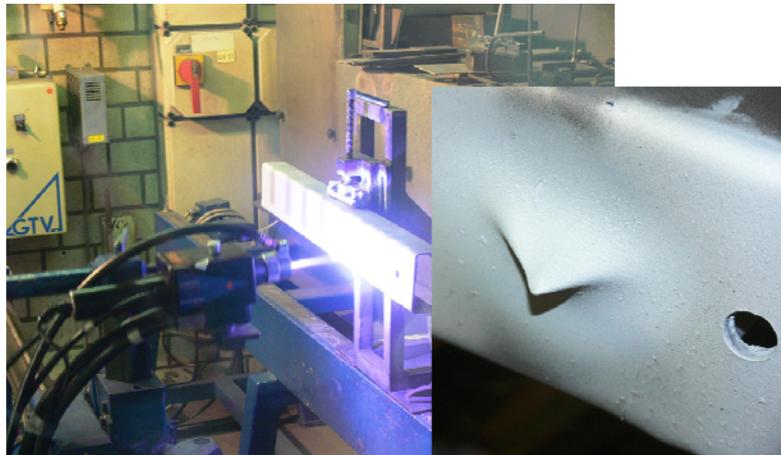


Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Detektion von Abkühlrissen

Während des Beschichtungsprozesses wurden die Signale der beiden Sensoren aufgezeichnet, wobei einer auf Höhe der Beschichtung und der andere am anderen Ende des Bauteils positioniert waren. Die Signalaufzeichnung wurde auch nach dem Ausschalten der Spritzpistole fortgesetzt, um mögliche Burstsignale aufzunehmen, die auf Abkühlrisse deuten.

Messergebnisse zur Detektion von Abkühlrissen

Während der Abkühlphase zeichnete der in der Nähe der Schicht befindliche Sensor deutliche Signale auf, welche der entfernt positionierte Sensor nicht oder nur schwach registrierte. Diese Signale stammen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Schicht. Burstsignale, die von beiden Sensoren gleich stark angezeigt wurden, wurden als Störsignale ausgefiltert. Die aufgenommenen Signale des an der Schicht befindlichen Sensors sind in der Abbildung 8 graphisch dargestellt.

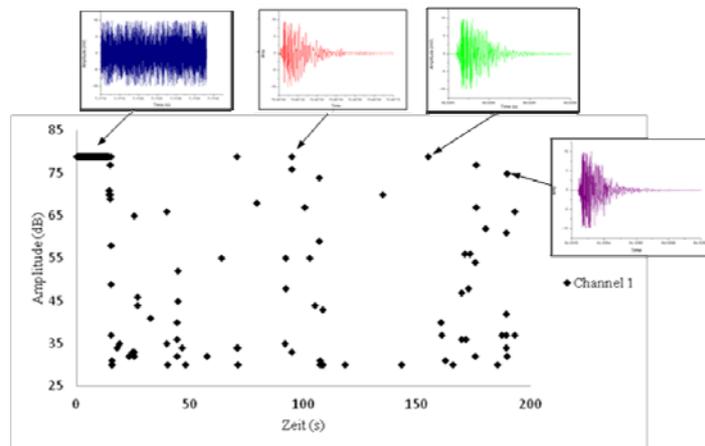


Abbildung 8: Messergebnisse zur Detektion von Abkühlrissen

Bis zu einem Zeitraum von ca. 10 Sekunden war die Spritzpistole aktiv und es wurde ein kontinuierliches Signal detektiert. Danach erfolgten Ereignisse mit unterschiedlichen Stärken. Dabei zeigten die Signale mit hoher Amplitude ein typisches Burstsinal. Diese zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Signale, die bei Zugversuchen an beschichteten Proben aufgenommen wurden und auf Risse hinweisen. Eine anschließende visuelle Untersuchung der Beschichtung zeigte eine hohe Anzahl an Materialinhomogenitäten. Somit können unmittelbar nach der Beschichtung, mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, Abkühlrisse detektiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass die Schallemissionsanalyse zur Qualitätsüberwachung des thermischen Beschichtungsprozesses geeignet ist. So konnte der Einfluss von Prozessparametern wie die Spannung des Lichtbogens der Spritzpistole, auf die Partikeleigenschaften nachgewiesen werden. Bei einer mehrmaligen Beschichtung des Bauteils ergab sich, dass die Schallemissionssignale durch die bereits vorhandene Schicht gedämpft wurden. Auf diese Weise kann die Schichtdicke mit Hilfe der Schallemissionsanalyse abgeschätzt werden. Weiterhin wurde gezeigt, dass eine Ortung des Partikelstrahls prinzipiell möglich ist. Die Ortung zusammen mit der Prozessüberwachung ermöglichen somit eine umfangreiche Dokumentation der Qualität des beschichteten Bauteils. Unmittelbar nach dem Beschichtungsprozess konnten einzelne Burstsinalde detektiert werden, die mit Abkühlrissen korrelierten. Somit besteht die Möglichkeit, mit dem System nicht nur den eigentlichen Beschichtungsprozess zu überwachen, sondern auch mögliche Schädigungen durch die thermische Belastung im Anschluss der Herstellung zu detektieren.

Für einen praxisnahen Einsatz sind jedoch noch weitere grundlegende Arbeiten notwendig. So ist vorgesehen, die kontinuierlichen Signale während der Beschichtung mit den Anlagenparametern und Partikeleigenschaften zu korrelieren. Insbesondere zur Bestimmung der Partikelparameter sind Messungen mit hochauflösenden thermografischen und optischen Systemen notwendig. Erst mit diesen Informationen kann eine optimale Auswertung der Schallemissionsanalyse erfolgen.

Danksagung

Die in diesem Beitrag durchgeführten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 708 TP B3 gefördert.

Referenzen

- [1] H.-D. Steffens: „Haftung und Schichtaufbau beim Lichtbogen- und Flammsspritzen“, Dissertation, Technische Hochschule Hannover, 1963
- [2] DIN EN 657: „Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung“; Deutsche Fassung EN 657:2005
- [3] G. Reuss: „Beitrag zur Überwachung des thermischen Spritzprozesses mittels Schallemissionsanalyse (SEA)“, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2001
- [4] W. Tillmann; J. Nebel: „Mit thermisch gespritzten Schichten auf dem Weg zu verschleißbeständigen Umformwerkzeugen“; Dialog - Materialwissenschaften und Werkstofftechnik; 1; 1; 2011; 44-48
- [5] <http://www.sfb708.tu-dortmund.de/>
- [6] R. Zielke, W. Tillmann, G. Wang, J. Sauer, J. Tenkamp, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund „Prozessüberwachung beim thermischen Spritzen“, 18. Kolloquium Schallemission 2011 in Wetzlar, DGZfP-Berichtsband BB – 131 CD, ISBN 978-3-940283-37-5
- [7] G. Wang, W. Tillmann, R. Zielke, TU Dortmund, Dortmund Lehrstuhl für Werkstofftechnologie: „Schallemissionsanalyse beim thermischen Spritzen“, DGZfP-Jahrestagung in Bremen 2011, Berichtsband – 127 CD, ISBN 978-3-940283-33-7
- [8] R. Zielke, W. Tillmann, G. Wang and M. Abdulgader „Acoustic Emission Analysis by Twin Wire Arc Spraying Using Cored Wired with Different Powder Size“. Conference Proceedings International Thermal Spray Conference 2012 (ITSC), 21.-24.05.2012 / Houston, Texas, USA, 2012, S. 409-415.