

Prozessüberwachung beim thermischen Spritzen

Reiner ZIELKE, Wolfgang TILLMANN, Guang WANG, Jan SAUER, Jochen TENKAMP

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund
Leonhard-Euler-Str. 2, 44227 Dortmund
Reiner.Zielke@udo.edu

Kurzfassung. Eine Möglichkeit zur Herstellung hochwertiger Bauteile ist der Einsatz von Schichtverbundwerkstoffen. Hierbei bestimmt die aufgetragene Schicht Eigenschaften wie Verschleiß, Korrosion, Reibwerte und Hochtemperaturschutz. Als Beschichtungsverfahren wird auch das thermische Spritzen eingesetzt, welches unter anderem in Plasma-, das Hochgeschwindigkeits- und das Lichtbogenspritzen unterteilt ist. Bei dem Verfahren wird das Spritzmaterial an-, auf- oder abgeschmolzen, dann beschleunigt und prallt schließlich auf die vorbereitete Bauteiloberfläche auf. Die aufgeprallten Partikel bilden dann die Schicht. Die sich dabei einstellende Schichtqualität ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. So sind die Parameter der Spritzpistole wie Stromstärke oder Gasdruck ebenso relevant wie das Spritzgut sowie die Bauteiloberfläche selbst. Weiterhin zeigte sich, dass auch die Umgebungstemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit die Qualität beeinflussen.

Eine Prozessüberwachung kann einerseits durch Überwachung von Maschinenparametern wie Strom, Gasdruck, usw. erfolgen. Diese berücksichtigen jedoch nicht die Umgebungstemperatur oder die Partikelgröße, -temperatur und -geschwindigkeit. Sie können aber mit Systemen wie thermischen und optischen Hochgeschwindigkeitskameras überwacht werden. Diese Systeme sind kostenintensiv und erfordern Fachpersonal und sind somit für eine praxisgerechte Prozessüberwachung nicht geeignet. Aus diesem Grund soll die Schallemissionsanalyse zur Überwachung des Spritzprozesses eingesetzt werden. Diese soll zwei Prüfaufgaben übernehmen. Während des Beschichtungsvorgangs soll eine Prozessüberwachung erfolgen, welche die Beschichtungsqualität sichert. Unmittelbar nach der Beschichtung erfolgt dann eine Überwachung auf mögliche Rissentstehung und -wachstum als Folge des Abkühlverhaltens von Schicht und Substrat. Im Beitrag werden die Vorgehensweise sowie die ersten Ergebnisse zum Einsatz der Schallemissionsanalyse vorgestellt.

1. Einleitung

Das thermische Spritzen wird zur Herstellung von Funktionsschichten eingesetzt. Abbildung 1 zeigt das System bei der Beschichtung einer Profilwalze. Diese Methode wird in vielen industriellen Bereichen, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Biomedizin, der Druck- und Papierindustrie, eingesetzt. Das Verfahren ist in weitere Untergruppen unterteilt. So wird z.B. zwischen Plasma-, Hochgeschwindigkeits- und Lichtbogenspritzen unterschieden. Bei allen Verfahren wird zunächst das Spritzmaterial aufgeschmolzen, beschleunigt und trifft dann auf das zu beschichtende Bauteil. Die Schicht wird durch die einzelnen Partikel aufgebaut. Die Masse der Partikel sowie deren Geschwindigkeit und Temperatur haben einen direkten Einfluss auf

den Schichtaufbau und somit auf die Schichtqualität. Diese wird auch von externen Größen wie der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit beeinflusst [1][2].



Abbildung 1: Beschichtung einer Profiwalze mit Hilfe des thermischen Spritzens

Die Optimierung des Spritzprozesses zur Beschichtung komplexer Bauteile ist ein Ziel des von der DFG geförderten SFB 708. Um den Einfluss der Beschichtungsparameter auf die Schichtqualität zu untersuchen, wird der Beschichtungsprozess mit unterschiedlichen Messsystemen wie Schlieren-, Thermografie- und Hochgeschwindigkeitskameras analysiert. Für eine spätere angedachte Prozessüberwachung sind diese hochtechnischen und kostenintensiven Systeme jedoch nicht geeignet. Aus diesem Grund wird parallel zu den hochauflösenden Messungen die Schallemissionsanalyse zur Prozessüberwachung ertüchtigt. Dabei werden zwei Ziele verfolgt. Während der Beschichtung erfolgt eine Prozessüberwachung, welche die Beschichtungsqualität sichern soll. 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.

2. Vorgehensweise

Die Schallemissionsanalyse [3] muss für die Prozessüberwachung, bei der transiente Signale vorliegen, und für die Rissdetektion in der Abkühlphase, bei der Burst-Signale auftreten, angepasst werden. Für die angestrebte Prozessüberwachung werden zwei Ansätze verfolgt. Zur Überwachung der Spritzparameter, wie Gasdruck oder Düsenverschleiß, erfolgt die Messung direkt an der Spritzpistole. Hierzu werden mit einer Halterung die Mikrofone an der Pistole fixiert. Für die Überwachung des Beschichtungsprozesses werden an der Rückseite des Substrats Mikrofone installiert, welche die Signale während der Beschichtung aufzeichnen, und die auch für die Rissdetektion während der Abkühlphase eingesetzt werden.

Für die Funktionsüberprüfung im Fall der Prozessüberwachung wurden zunächst Parameter der Spritzpistole, wie Stromstärke und Spannung, bewusst variiert und die Schallsignale, die an der Spritzpistole und am Substrat aufgenommen werden, mit den Spritzparameter korreliert. Die Funktionsüberprüfung zur Rissdetektion erfolgt mit Hilfe von Zugversuchen. Dadurch ist der experimentelle Aufwand geringer und es ist, da die Risse an der Oberfläche der Zugprobe entstehen und daher optisch leicht detektierbar sind, eine direkte Korrelation der Burstsignale zu den Rissen gewährleistet. Um eine Übertragbarkeit der bei den Zugversuchen ermittelten Erkenntnisse auf die zu detektierenden Abkühlrisse sicher zu stellen, wurden thermisch gespritzte Zugproben eingesetzt. Somit sollten die Risse, die in der Beschichtung der Zugprobe auftreten, vergleichbare Charakteristika haben wie die zu detektierenden Abkühlrisse. Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse zur Rissdetektion betrachtet.

3. Rissdetektion

Für die Untersuchungen wurden Zugproben aus C45 und Kupfer mit Hilfe des Lichtbogensspritzens beschichtet. Die Abmessung der Zugprobe sowie der Versuchsaufbau sind in der Abbildung 3 dargestellt.

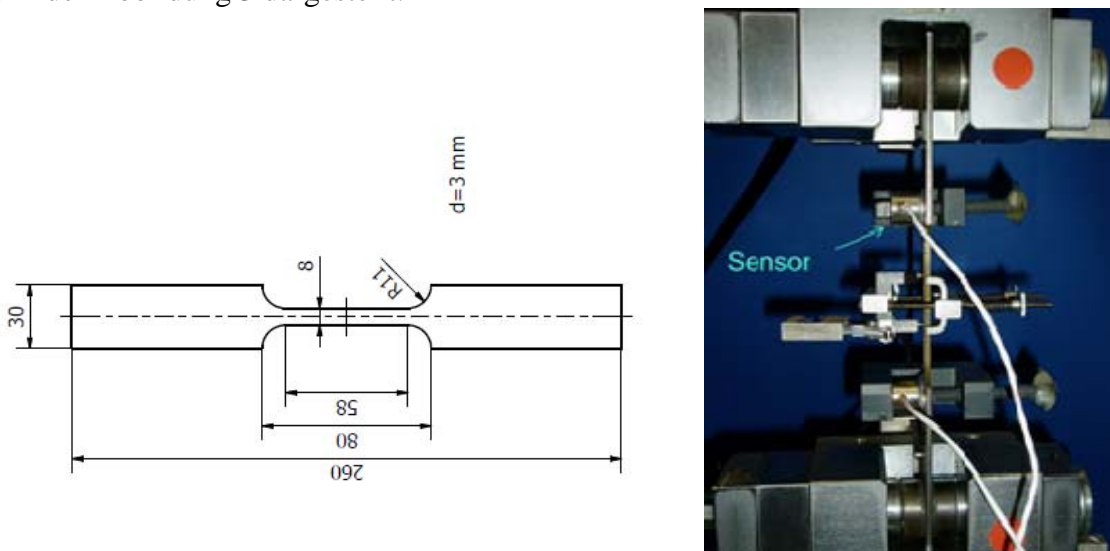


Abbildung 2: links: Abmessung der Zugproben, rechts: Versuchsaufbau

Die Proben wurden mit einer Zugmaschine quasistatisch bis zum Bruch belastet. Während des Versuchs wurde, mit zwei an den Enden der Zugproben befestigten Sensoren, der auftretende Schall aufgezeichnet. Für die Datenaufzeichnung wurde ein USB-Speicheroszilloskopes (PicoScope4224) eingesetzt. Neben der Schallemissionsaufzeichnung wurde auch die Spannungs-Dehnungskurve aufgenommen. In der Abbildung 3 ist die gemessene Spannungs-Dehnungskurve der C45- und Kupferprobe dargestellt. Die mit dem Schallemissionssystem aufgenommenen Burstsignale sind mit in der Spannungs-Dehnungskurve eingezeichnet. Das Burstsignal, welches den Bruch der Probe (Substrat) kennzeichnet, zeigt im Vergleich zum dem Burstsignal, das von der spröden Beschichtung ausgeht, eine höhere Amplitude.

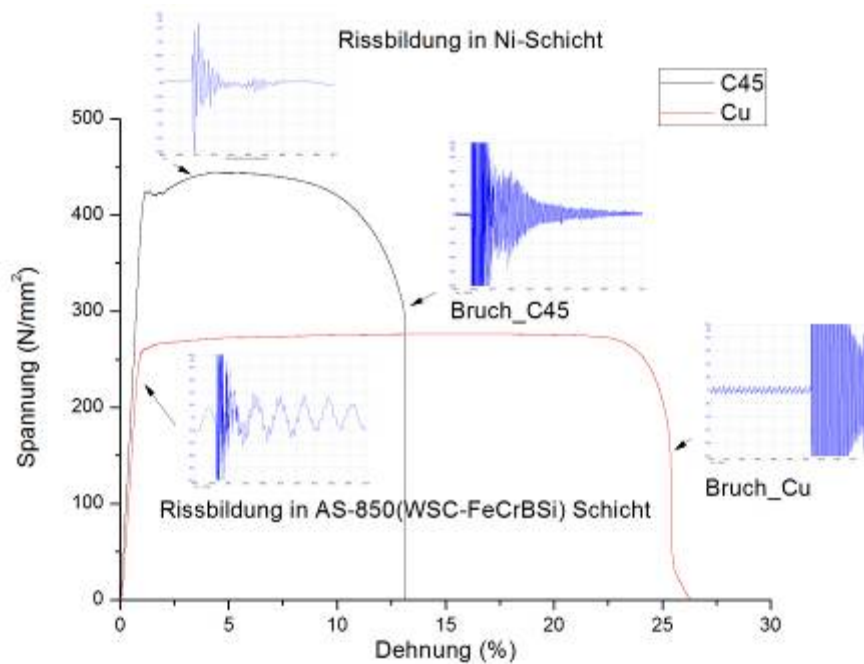


Abbildung 3: Spannungs-Dehngkurven und typische Burstsignale

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass sich Risse, welche durch mechanische Belastung in der Schicht entstanden sind, gut detektieren lassen. Unter der Voraussetzung, dass die Abkühlrisse ein ähnliches Verhalten zeigen, ist davon auszugehen, dass auch diese nachgewiesen werden können.

4. Prozessüberwachung durch Messungen am Substrat

Der für die Untersuchungen gewählte Messaufbau ist in der Abbildung 4 skizziert. Links im Bild ist der Aufbau der Lichtbogenspritzpistole skizziert, welche die Partikel auf das Substrat beschleunigt. Rechts ist das zu beschichtende Bauteil dargestellt, das auf der Rückseite mit Schallemissionssensoren versehen ist. Für die Messungen wurde das gleiche Messsystem eingesetzt wie im Fall der Rissdetektion. Bei den Untersuchungen wurde ein C45 Stahlkörper mit Eisen beschichtet.

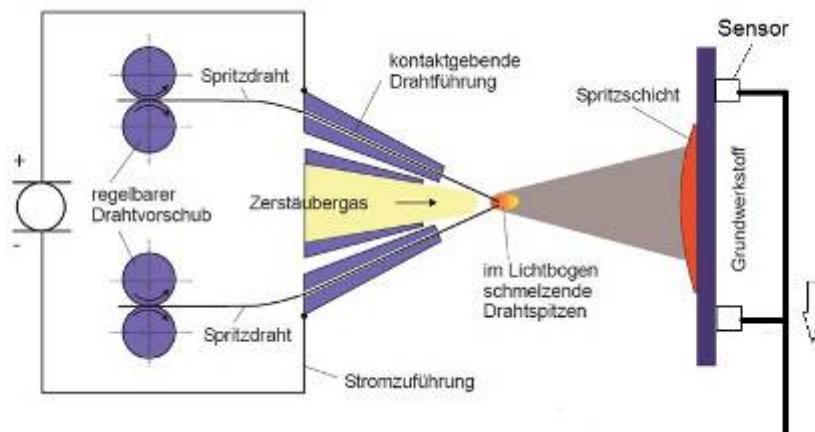


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Prozessüberwachung beim Lichtbogenspritzen

Während der Beschichtung wurden nur die Parameter der Spritzpistole variiert. Hier haben, neben der Spannung und Stromstärke, auch die Gasdrücke von Primär- und Sekundärdruck einen hohen Einfluss. [4][5] Die für die Untersuchungen gewählten Parameter der Spritzpistole sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Prozessparameter

Nr.	Spannung (V)	Strom (A)	Primärgas (Bar)	Sekundärgas (Bar)
1	28	220	4	2
2	34	220	4	2
3	28	320	4	2

Für die Auswertung der transienten Signale wurde das Frequenzspektrum berechnet. Die zugehörigen Ergebnisse zeigt die Abbildung 5.

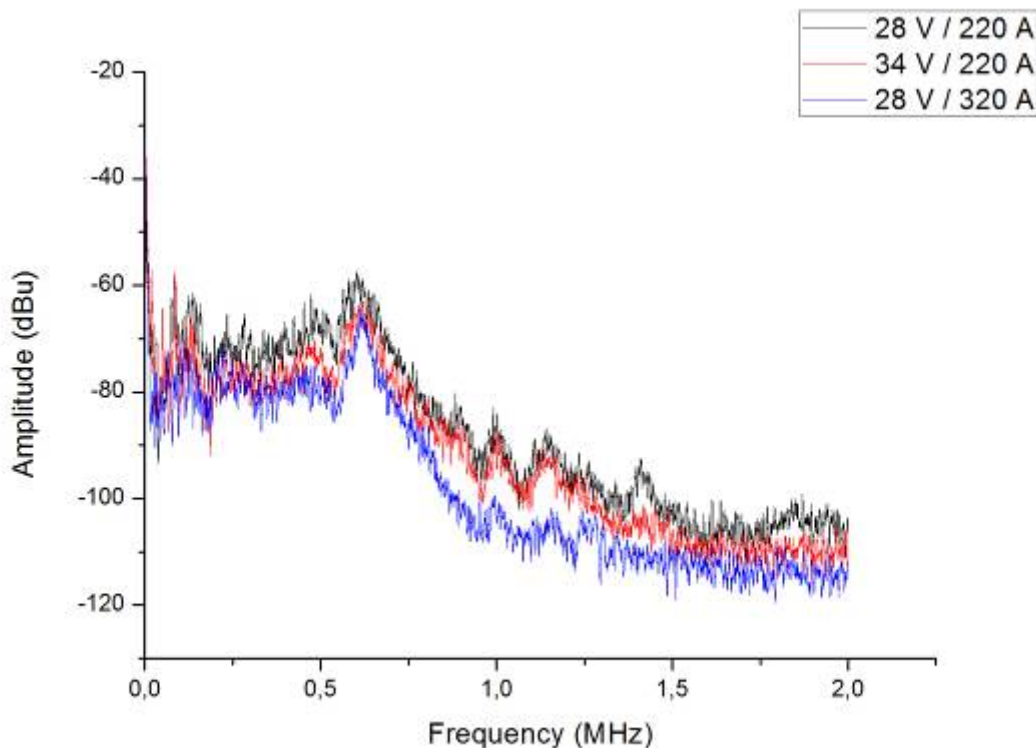


Abbildung 5: Frequenzanalyse der Schallemissionssignale

Im Diagramm ist die Amplitude für die gemessenen Frequenzen für die drei Betriebsarten der Spritzpistole aufgetragen. Die höchsten Amplituden zeigten sich bei einer Betriebsspannung von 28 V und einer Stromstärke von 220 A. Eine Erhöhung der Spannung auf 34 V bewirkt nur eine geringe Abnahme der Amplitude. Die Erhöhung der Stromstärke auf 320 A hingegen äußert sich in einer deutliche Abnahme der Amplitude insbesondere im Frequenzbereich um 1 MHz.

Beim Lichtbogenspritzen werden die Drähte durch einen Kurzschluss und der dadurch entstehenden Wärme aufgeschmolzen. Diese Wärme ist primär von der Stromstärke anhängig. Weiterhin bewirkt der höhere Wärmeeintrag ein schnelleres Abschmelzen der Drähte, was zu einem größeren Massestrom führt. Aus diesen Gründen liegen bei der Stromstärke von 320 A mehr Partikel vor als bei einer Stromstärke von 220 A, die außerdem wärmer und durch den energiereicheren Abbrennprozess kleiner sind. Daher treffen im Fall der 320 A Einstellung zwar mehr Partikel auf das Substrat, die jedoch geringere Massen und auf Grund der höheren Temperatur gegebenenfalls eine höhere Viskosität besitzen. Hierdurch sind die Schallsignale der einzelnen Partikel geringer als im Fall der 220 A Anregung. Somit ist mit Hilfe dieser Messanordnung eine Überwachung des Spritzprozesses

prinzipiell möglich. Im Folgenden wird untersucht, ob eine Prozessüberwachung auch durch Messungen an der Spritzpistole selbst erfolgen kann.

5. Prozessüberwachung durch Messungen an der Spritzpistole

In diesem Fall wird die Schallemission der Spritzpistole aufgenommen. Hierzu ist eine Halterung notwendig, welche das Mikrophon an der Pistole im Bereich der Düse positioniert. Abbildung 6 zeigt die eingesetzte Spritzpistole und die hierzu konstruierte Halterung für die Mikrofone.

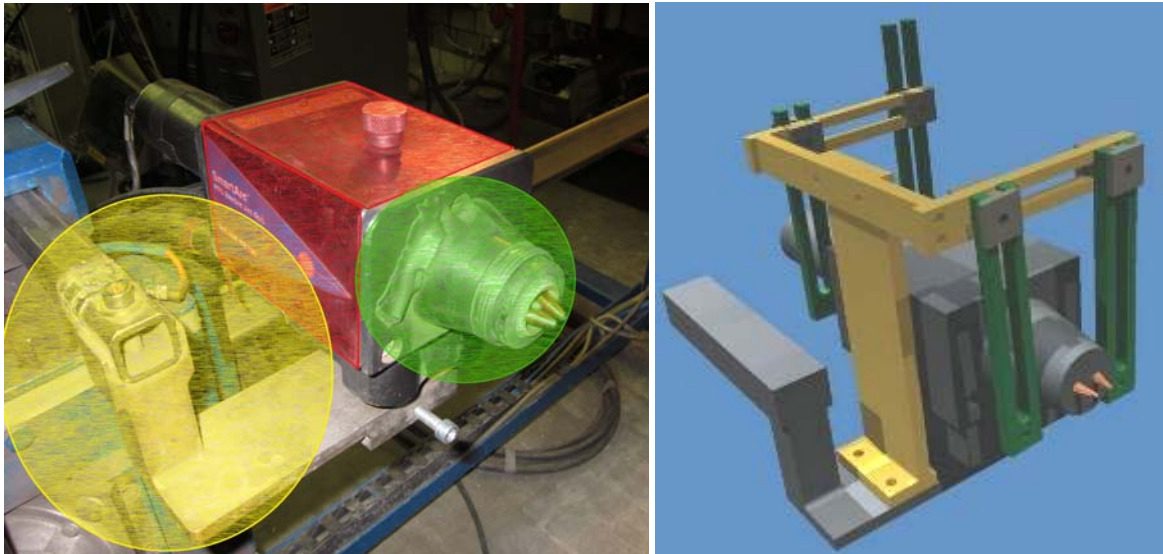


Abbildung 6: links: Lichtbogenspritzanlage mit Plastikabdeckung(rot), Halterung(gelb) und Vorderseite mit Düse (grün), rechts: Halterung für die Mikrofone

Wie im Fall der Untersuchungen zur Schallmessung am Substrat wurden die Spritzparameter gemäß der Tabelle 2 variiert.

Tabelle 2: Prozessparameter

Nr.	Spannung (V)	Strom (A)	Primärgas (Bar)	Sekundärgas (Bar)
1	30	220	4	2
2	30	220	4	4
3	30	220	4	6

Im Folgenden wird der Einfluss des Sekundärgasdruckes untersucht. Hierzu wurde anhand der transienten Signale wiederum das Frequenzspektrum berechnet, welches in der Abbildung 7 dargestellt ist. Während bei einem Sekundärgasdruck von 4 und 6 bar ein nahezu gleiches Verhalten zeigt, liegt im Fall von 2 bar Sekundärgasdruck im Frequenzbereich größer 700 kHz eine höhere Schallintensität vor. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass eine weitere Erhöhung des Sekundärdrucks über 4 bar keinen wesentlichen Einfluss hat. Um jedoch eine abschließende Aussage machen zu können, müssen weitere Untersuchungen folgen.

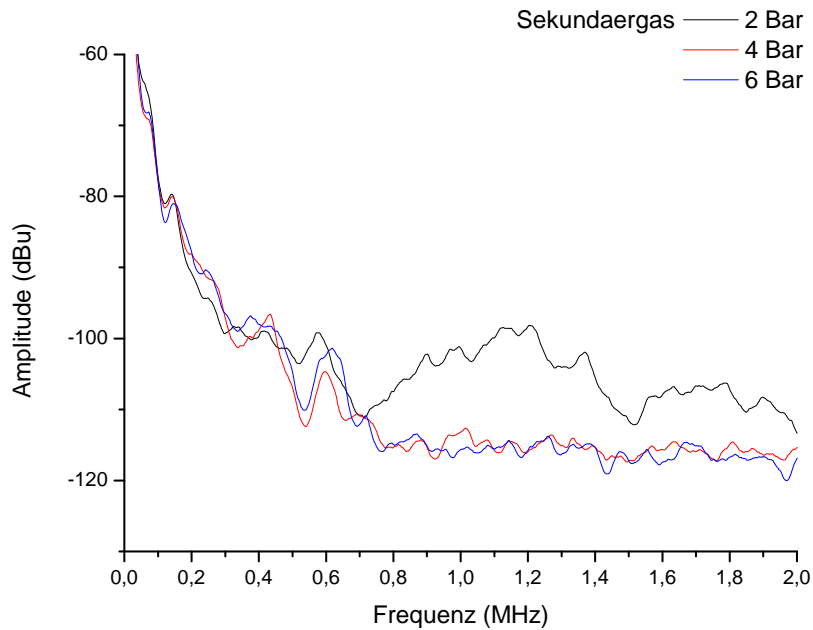


Abbildung 7: Frequenzanalyse der Schallemissionssignale

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen die prinzipielle Eignung der Schallemission zur Qualitätsüberwachung des thermischen Beschichtungsprozesses. Dabei wurde gezeigt, dass durch Auswertung des Frequenzspektrums der kontinuierlichen Signale im Fall des Beschichtungsprozesses eine Aussage über die Spritzparameter möglich ist sowohl für die Messung der Schallemission am Substrat, als auch an der Spritzpistole. Ebenso können einzelne Risse, die in der Schicht nach dem Herstellungsprozess entstehen, anhand von Burstsignalen detektiert werden, wie die Untersuchungen an den Zugproben zeigten.

Für einen praxisnahen Einsatz sind jedoch noch weitere umfangreiche 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. Dies erfordert auch eine mehrkanalige, schnelle und hochwertige Aufnahmeeinheit für die Schallemissionssignale. Für die Störsignalunterdrückung ist der Einsatz mehrerer Mikrofone vorgesehen, die eine Ortung der Schallquelle ermöglichen und somit mögliche Störsignale identifizieren.

7. Danksagung

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

8. 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] A. Sharma, M.I. Junaidh, K.K. Purushothaman, C.P. Kotwal, J. Paul, Shalini Tripathi, B. Pant and A.S. Sankaranarayanan: “Acoustic Emission Response of Ti6Al4v Alloy in Different Heat Treatment Conditions During Tensile Testing”, Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, 2006, Hyderabad
- [4] W. Tillmann, E. Vogli, M. Abdulgader: „Partikelinteraktion (Cross Over) in der Flugphase beim Lichtbogenspritzen von Fülldrähten“, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund, 2. öffentliches Kolloquium, SFB 708, 21. November, 2008, Dortmund
- [5] W. Tillmann, E. Vogli, B. Krebs: „Optimierung von thermisch gespritzten und verdichteten Verschleißschutzschichten mittels statistischer Versuchsplanung“, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund, 2. öffentliches Kolloquium, SFB 708, 21. November, 2008, Dortmund