

# Schallemissionsanalyse beim thermischen Spritzen

Guang WANG, Wolfgang TILLMANN, Reiner ZIELKE

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

**Kurzfassung.** Die integrierte Diagnostik von thermischen Spritzprozessen, insbesondere bei der Beschichtung komplexer Geometrie oder freigeformter Oberflächen, stellt aufgrund der hohen Komplexität der Oberflächen sowie auch der beteiligten Teilprozesse eine große Herausforderung dar. Für eine exakte und umfangreiche Analyse werden Messsysteme wie Hochgeschwindigkeits- und Thermografiekameras eingesetzt. Somit lassen sich die Einflüsse wie Partikelgröße, -geschwindigkeit und -Temperatur auf die Schichtqualität genau untersuchen. Diese Systeme sind jedoch auf Grund ihrer Komplexität nicht für eine Prozessüberwachung geeignet. Für eine einfache Überwachung des Spritzprozesses wird daher untersucht, inwieweit sich die Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Prozessparameter einsetzen lässt. Im Beitrag werden die Vorgehensweise zur Prozessüberwachung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse sowie erste Ergebnisse präsentiert.

## 1. Einleitung

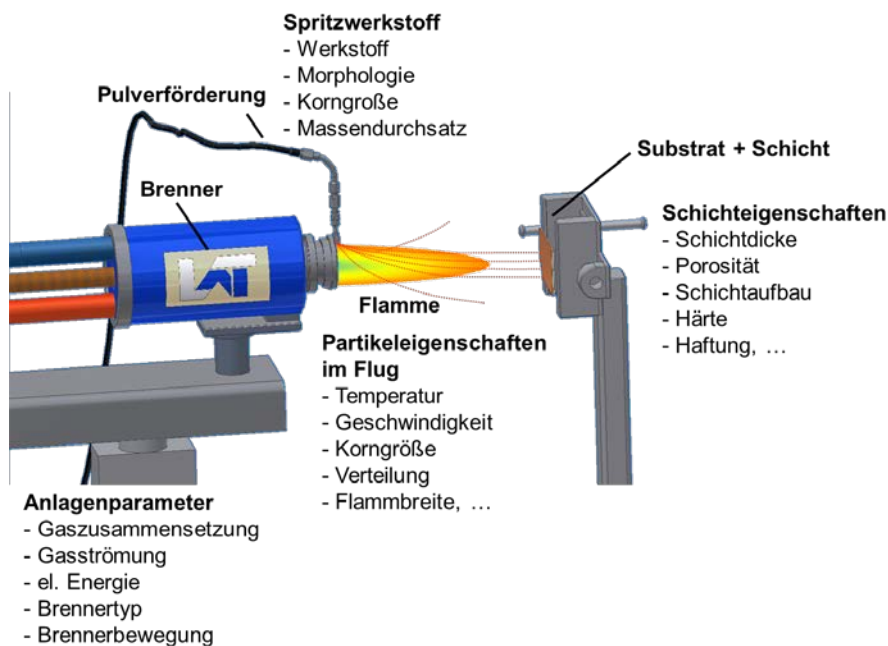
Auf Grund der steigenden Anforderungen an Bauteile ist es notwendig immer höherwertige Materialien einzusetzen. Eine Möglichkeit stellt hierbei die Beschichtung eines Basiswerkstoffes dar. So können durch Einsatz dieses Verbundwerkstoffes die Eigenschaften wie Verschleiß, Korrosion, Reibwerte und Hochtemperaturschutz gezielt eingestellt werden. Ein Beschichtungsverfahren stellt das thermische Spritzen dar, welches eine weite Verbreitung gefunden hat.



Abbildung 1: Einsatz von thermisch gespritzten Schichten

So wird das Verfahren in vielen industriellen Bereichen, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Biomedizin, der Druck- und Papierindustrie eingesetzt. Abbildung 1 zeigt hierzu beispielsweise eine mit einer Wärmedämmschicht versehene Turbinengasschaufel aus dem Bereich der Luftfahrt und ein beschichtetes künstliches Hüftgelenk.

Das thermische Spritzen ist in unterschiedlichen Verfahren unterteilt, wobei das Plasma-, das Hochgeschwindigkeits- und das Lichtbogenspritzen die zu Zeit relevanten sind. Alle Verfahren zeigen folgenden Ablauf, der in der Abbildung 2 skizziert ist. Das Spritzmaterial, welches die Schicht erstellt, wird an-, auf- oder abgeschmolzen, dann beschleunigt und prallt schließlich auf die vorbereitete Bauteiloberfläche auf. Hier bilden die einzelnen Partikel die Schicht. Die Qualität der Schicht hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. So haben die Temperatur, die Masse und die Geschwindigkeit der Partikel einen relevanten Einfluss. Ebenso beeinflussen die Luftfeuchtigkeit, die Umgebungstemperatur und die Bauteiloberfläche die Schichtqualität. [1][2]



**Abbildung 2:** Prinzip des thermischen Spritzens

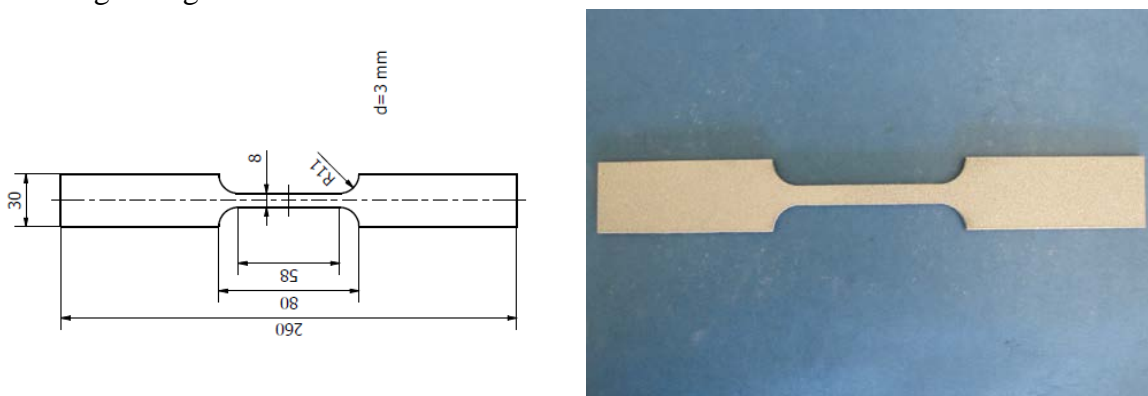
Die Optimierung des Spritzprozesses zur Beschichtung komplexer Bauteile ist ein Ziel des von der DFG geförderten SFB 708. Hier wird die Beschichtung mit unterschiedlichen Messsystemen wie Schlieren-, Thermografie- und Hochgeschwindigkeitskameras untersucht und mit der Schichtqualität korreliert. Für eine spätere Prozessüberwachung sind diese hohtechnischen und kostenintensiven Systeme nicht geeignet. Aus diesem Grund wird parallel zu den erwähnten Messungen im Teilprojekt B3 des SFBs die Schallemissionsanalyse zur Prozessüberwachung ertüchtigt. Hierbei sollen zwei Aufgaben erfüllt werden. 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. Nachfolgend werden die Vorgehensweise sowie die ersten Ergebnisse zur Ertüchtigung der Schallemissionsanalyse vorgestellt.

## 2. Vorgehensweise

Die Schallemissionsanalyse [3] muss für die Prozessüberwachung, bei der transiente Signale vorliegen, und für die Rissdetektion in der Abkühlphase, wo Burst-Signale auftreten werden, angepasst werden. Für die angestrebte Prozessüberwachung werden an der Rückseite des Substrats Mikrofone installiert, welche die Signale während der Beschichtung aufzeichnen. Zur Funktionsüberprüfung wurden zunächst Parameter der Spritzpistole, wie Stromstärke und Spannung, bewusst variiert. Die Rissdetektion wurde an beschichteten Zugproben durchgeführt. Beim Zugversuch entstehen die Risse zunächst in der spröden Beschichtung. Die dabei auftretenden Signale sind mit denen von Abkühlrissen vergleichbar. Auf diese Art kann die Schallemissionsanalyse gut angepasst werden, da die entstehenden Risse direkt sichtbar sind. Des Weiteren ist der zeitliche und finanzielle Aufwand bei den Zugversuchen wesentlich geringer als bei der Messung unmittelbar nach dem Beschichtungsprozess. Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse zur Rissdetektion betrachtet.

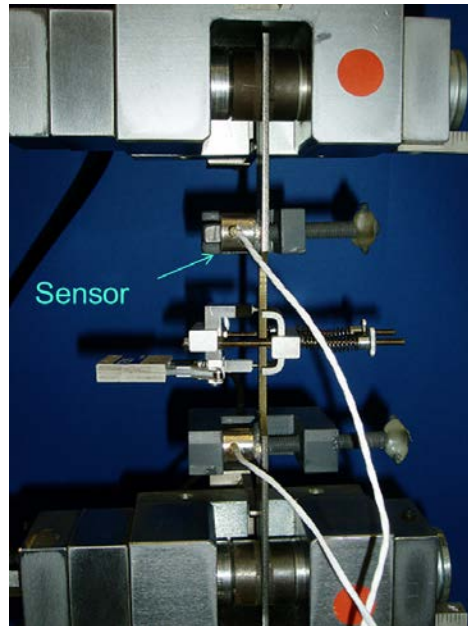
## 3. Rissdetektion

Für die Untersuchungen wurden Zugproben aus C45 mit Hilfe des Lichtbogenspritzens mit Nickel beschichtet. Die Abmessung der Zugprobe sowie die untersuchte Probe sind in der Abbildung 3 dargestellt.



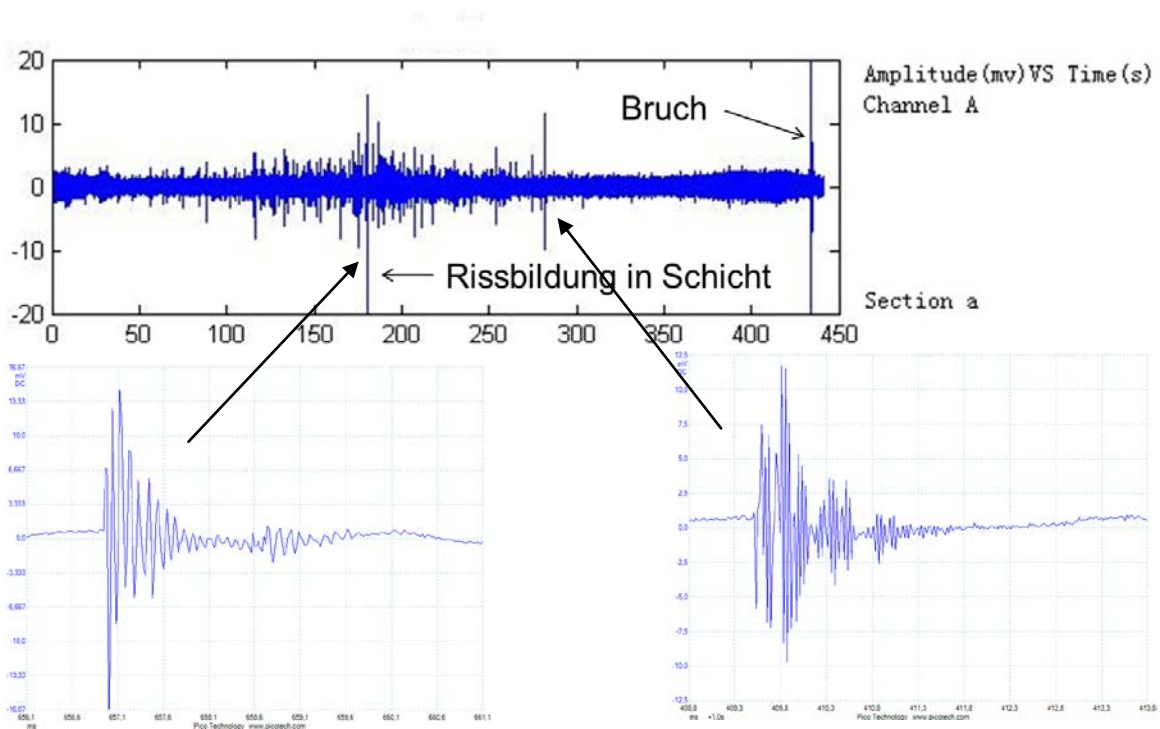
**Abbildung 3:** Abmessung der Zugproben, beschichtete Zugprobe

Eingespannt wurde die Probe in der in der Abbildung 4 dargestellten Zugmaschine. An den beiden Enden der Zugprobe wurden die Mikrofone befestigt. Die Signale wurden mit Hilfe eines USB-Speicheroszilloskopes (PicoScope4224) aufgenommen. Während der Belastung der Probe wurden die Schallsignale aufgenommen, abgespeichert und anschließend ausgewertet.



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau für die Rissdetektion beim Zugversuch

Ein typisches Schallemissionssignal während des Zugversuchs ist in der Abbildung 5 dargestellt. Neben dem Grundrauschen sind einzelne hohe Impulse zu erkennen. Diese zeigen die für Rissentstehung typischen Burstsignale (siehe Abbildung 5). So zeigt die Messung nach einer Messdauer von 100 Sekunden erste typische Burstsignale und kennzeichnet somit den Bereich der ersten Rissentstehung. Dann nimmt die Intensität der Burstsignale zu bis zu einer Messzeit von knapp 300 Sekunden. Danach treten keine Burstsignale mehr auf, da die Schicht sich vom Substrat gelöst hat und somit keiner Belastung mehr unterliegt. Das große Burstsignal bei 440 Sekunden kennzeichnet dann den Bruch der C45-Zugprobe.



**Abbildung 5:** Schallemissionssignal während des Zugversuches und typische Burstsignale

Abbildung 6 zeigt die auf diese Art belastete Zugprobe. Die Risse in der Beschichtung sind deutlich zu erkennen.

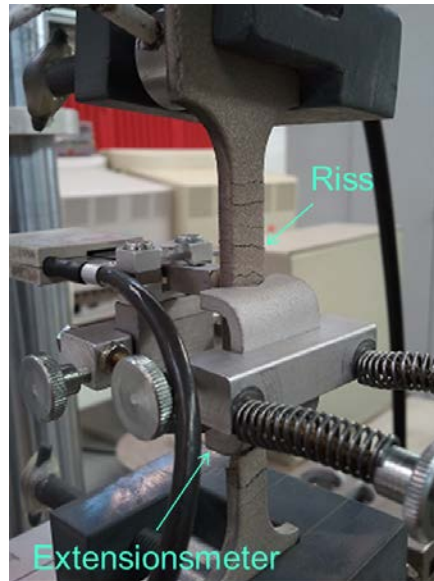


Abbildung 6: Zugprobe nach Belastung

Die Untersuchungen an den beschichteten Zugproben zeigen, dass sich Rissentstehungen in der Beschichtung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse gut detektieren lassen.

#### 4. Prozessüberwachung

Der Messaufbau zur Prozessüberwachung ist in der Abbildung 7 skizziert. An der Rückseite des zu beschichtenden Bauteils wurden die gleichen Sensoren wie im Fall der Rissdetektion angebracht. Ebenso wurde für die Signalaufzeichnung ein USB-Speicheroszilloskop eingesetzt. Beschichtet wurde ein Stahlblock (C45) mit den Abmessungen 10x50x70 mm<sup>3</sup>. Als Beschichtungsmaterial wurde Eisen eingesetzt.

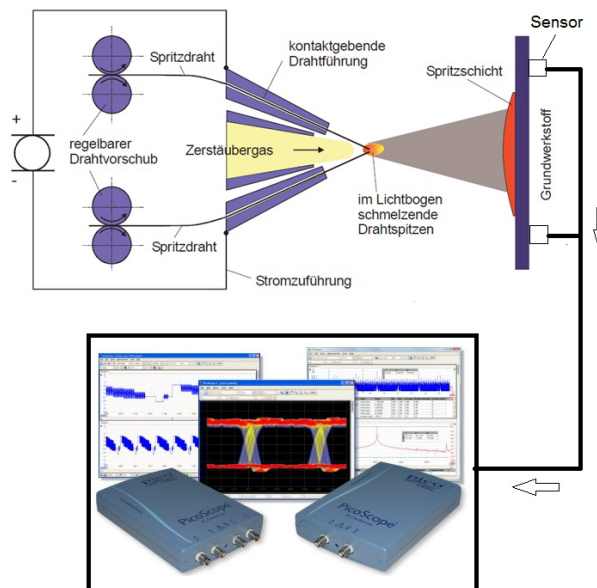


Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Prozessüberwachung beim Lichtbogenspritzen

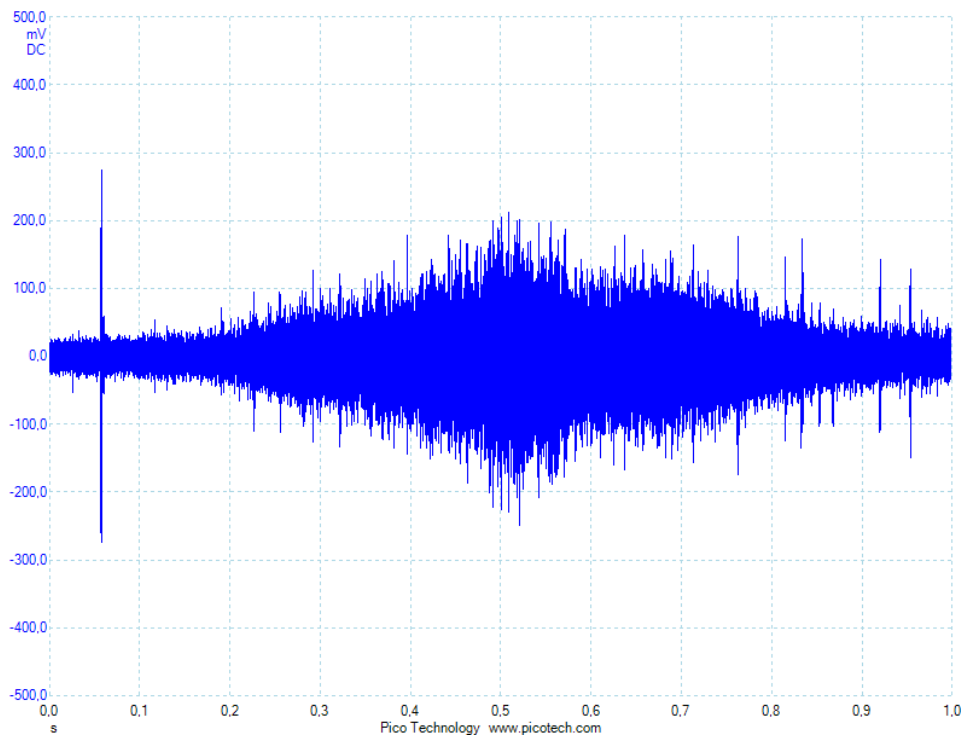
Für die ersten Untersuchungen wurden nur die Parameter der Spritzpistole variiert. Hier haben neben der Spannung und Stromstärke auch die Gasdrücke von Primär- und Sekundärdruck einen hohen Einfluss. [4][5] Die für die Untersuchungen gewählten Parameter der Spritzpistole sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

**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

Bei den nachfolgenden Untersuchungen wurden Spannung und Stromstärke variiert, wobei die Gasdrücke konstant gehalten wurden.

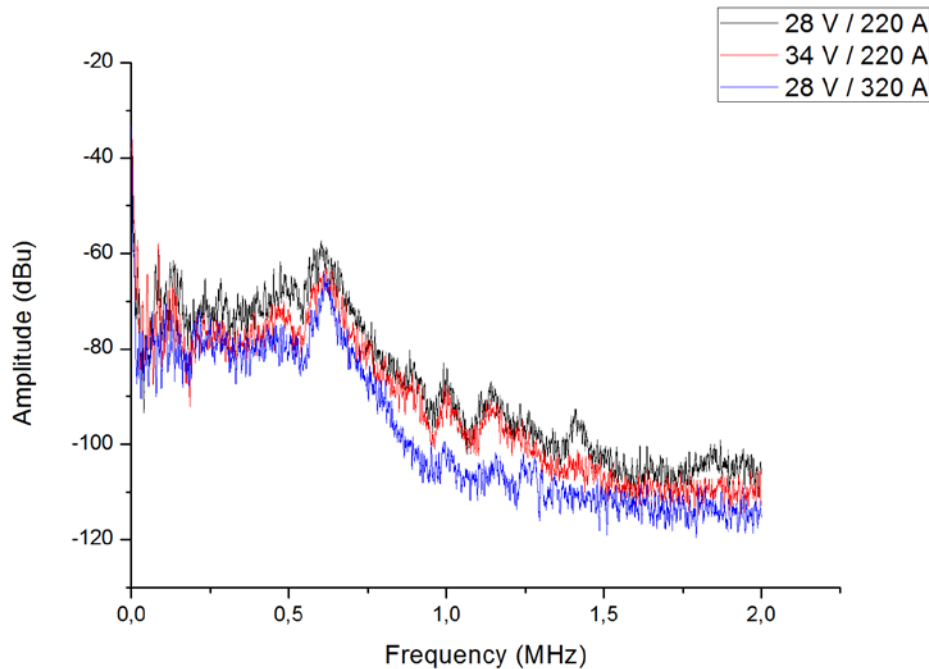
Die bei der Beschichtung auftretenden Partikel erzeugen ein kontinuierliches Zeitsignal, welches exemplarisch in der Abbildung 8 dargestellt ist. Hier ist das Schallemissionssignal für eine Überfahrt der Spritzpistole abgebildet.



**Abbildung 8:** Schallemissionssignal während des Beschichtungsprozesses

Die Schallintensität nimmt mit geringerem Abstand zum Mikrofon zu. So befand sich bei einem Zeitpunkt von 0,5 Sekunden die Spritzpistole auf gleicher Höhe wie das Mikrofon. Somit ist prinzipiell eine Ortung der Spritzpistole mit Hilfe der Mikrofone möglich. Für eine weitere Auswertung wurde das Frequenzspektrum berechnet. Diese Auswertung wurde für die drei Parametereinstellungen der Spritzpistole durchgeführt. Die zugehörigen Ergebnisse zeigt die Abbildung 9.





**Abbildung 9:** 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 Volt und einer Stromstärke von 220 A. Eine Erhöhung der Spannung auf 34 Volt bewirkt nur eine geringe Abnahme der Amplitude. Die Erhöhung der Stromstärke auf 320A 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 damit 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 geringen 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 der Schallemissionsanalyse eine Überwachung des Spritzprozesses prinzipiell möglich.

## 5. 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. 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. Hierzu ist auch eine Aufnahme der an der Spritzpistole entstehenden Signale vorgesehen, die dann zusammen mit den Signalen, welche vom Bauteil stammen, ausgewertet werden. 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.

## 6. Danksagung

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

## 7. 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