

Schichtdickenmessung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse

Guang WANG, Wolfgang TILLMANN, Mohamed ABDULGADER, Reiner ZIELKE
TU Dortmund Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

Kurzfassung. Thermisch gespritzte Schichten finden eine breite Anwendung im Bereich des Verschleiß- und Korrosionsschutzes. Die Qualität der Schichten wird von ihrer Zusammensetzung, der Schichtdicke und der Anbindung zum Substrat bestimmt, welche von den Beschichtungsparametern beeinflusst werden. Eine Überwachung relevanter Parameter kann unter anderem mit der Schallemissionsanalyse erfolgen, mit der auch eventuell auftretende Abkühlrisse zuverlässig detektiert werden. Neben dieser Prozessüberwachung kann jedoch auch eine Überprüfung der Schichtdicke erfolgen. Die Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Schichtprüfung während der Beschichtung als auch nach dem Beschichtungsprozess sind Schwerpunkte des Beitrages. Um eine vorgegebene Schichtdicke zu realisieren, wird das Bauteil mehrmals beschichtet. Dabei dämpft die schon vorhandene Schicht das Signal der neu auftreffenden Partikel. Durch Auswertung des Dämpfungsverhaltens kann so auf die Schichtdicke geschlossen werden. Nach dem Beschichtungsprozess kann durch eine akustische Anregung ebenfalls durch Auswertung des Dämpfungsverhaltens die Schichtdickenbestimmung erfolgen. Die entsprechenden Versuchsaufbauten sowie die an unterschiedlichen Schichtsystemen erhaltenen Ergebnisse stehen im Mittelpunkt des Beitrages.

Einführung

Das thermische Spritzen [1] wird standardmäßig zur Herstellung von Funktionsschichten eingesetzt und 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. In der Abbildung 1 sind das Prinzip des thermischen Spritzens skizziert und mögliche Einflussgrößen angegeben. Das Verfahren findet in der Industrie, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Biomedizin, der Druck- und Papierindustrie, Anwendung.

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 [2]. Dabei werden mit unterschiedlichen Messsystemen, wie Schlieren-, Thermografie- und Hochgeschwindigkeitskameras, die Partikeleigenschaften analysiert, um deren Einfluss auf die Schichtqualität zu untersuchen [3]. 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



[4-6]. So wurde mit der Schallemissionsanalyse bereits der Einfluss von Gasdruck, Spannungs- und Stromänderungen auf die Schallentstehung an der Spritzpistole und am Substrat erfolgreich nachgewiesen.

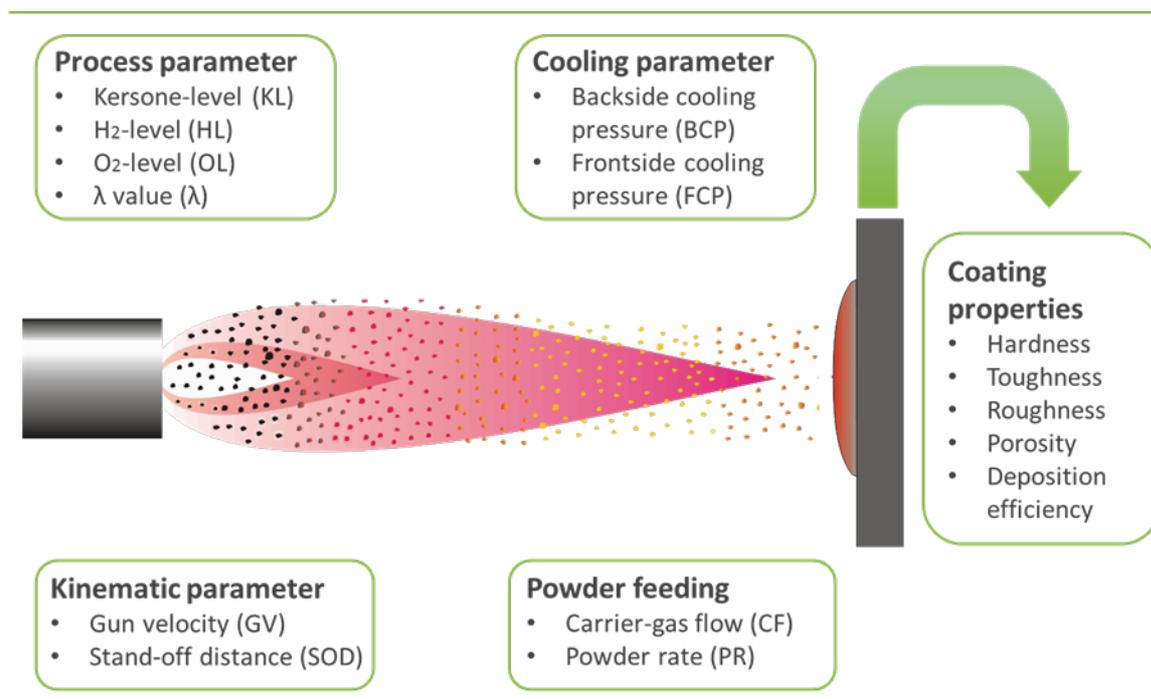


Abbildung 1. Prinzip des thermischen Spritzens und mögliche Einflussgrößen

Weiterhin wurden nach dem Beschichtungsprozess auftretende Abkühlrisse detektiert und geortet. Bei der Herstellung von dicken Funktionsschichten sind mehrere Beschichtungsüberfahrten notwendig. Dabei ergab die Schallemissionsanalyse, dass der während der Beschichtung erzeugte Schall durch die bereits vorhandene Schicht gedämpft wird. Somit liegt ein Zusammenhang zwischen der Schallintensität und der aufgetragenen Schichtdicke vor. Die Analyse dieses Zusammenhangs ist das Thema der folgenden Arbeiten. Dabei wird der oben erwähnte Ansatz zur Online-Messung verfolgt, aber auch eine Möglichkeit zur Offline-Messung, bei der mit Hilfe des Bleistiftminentests eine Schallquelle erzeugt wird.

Messungen zur Online-Überwachung

Die für die Online-Messungen eingesetzte Messanordnung ist in der Abbildung 2 dargestellt. Oben im Bild ist der Messaufbau skizziert. Mit dem Lichtbogenspritzverfahren wird das Bauteil beschichtet. Der während der Beschichtung auftretende Schall wird mit einem Schwingungsaufnehmer, der sich an der Bauteilrückseite befindet, aufgenommen. Unten links im Bild ist die eingesetzte Beschichtungsanlage und rechts das Messsystem der Firma Physical Acoustic abgebildet. Ein Schallemissionssensor WD der Firma Physical Acoustic wurde mit Hilfe eines Magnethalters an der Bauteilrückseite angebracht und war über einen Vorverstärker mit dem Messsystem verbunden. Das Bauteil wurde nun mehrmals von der Spritzpistole überfahren, um die geforderte Schichtdicke zu realisieren. Dieses mehrmalige Überfahren der Probe war notwendig, um die thermische Belastung des Bauteils zu reduzieren. Die in den Untersuchungen verwendeten Beschichtungsparameter sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

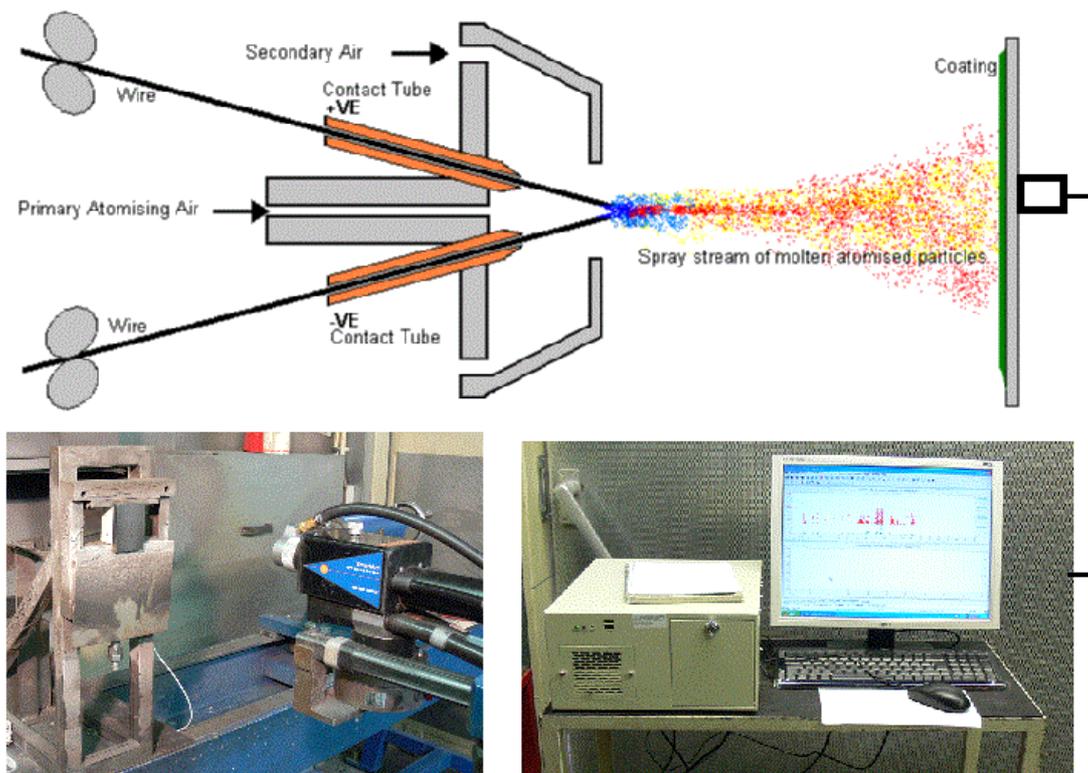


Abbildung 2. Messaufbau für die Online-Messungen

Tabelle 1. Spritzparameter

Parameter	Wert
Spannung (V)	30
Strom (A)	220
Primär Gas Druck (Bar)	6
Sekundär Gas Druck (Bar)	4
Spritzabstand (mm)	130
Schicht Material	Massiv Eisen
Substrat Material	Stahl C45
Substrat Geometrie (mm)	70x50x10

Während des Beschichtungsprozess wurden mit dem Messsystem PCI2 von Physical Acoustic die auftretenden Signale aufgezeichnet. Wie Voruntersuchungen zeigten, nehmen die aufgenommen Schallemissionssignale mit steigender Schichtdicke ab. Zur exakten Untersuchung dieses Zusammenhangs wurden Messungen durchgeführt, bei denen vier Proben auf folgende Art hergestellt wurden. Die erste Probe wurde mit nur einer Beschichtungsüberfahrt hergestellt, die Probe zwei mit zwei Überfahrten bis hin zur Probe vier mit vier Überfahrten. Somit lag ein Probensatz mit steigender Schichtdicke vor. Die bei der Beschichtung auftretenden Schallemissionssignale wurden für alle Proben aufgezeichnet und ausgewertet. Im Anschluss wurde dieser Probensatz auch mit dem im folgenden Kapitel beschriebenen Offline-System vermessen. Abschließend wurde der Probensatz metallografisch untersucht und so die vorliegenden Schichtdicken bestimmt, welche dann zur Kalibrierung des Schallemissionssystems dienten. Die auf diese Art erhaltenen Messdaten sind im nachfolgenden Diagramm für den Fall von vier

Beschichtungsüberfahrten graphisch dargestellt. Die Abbildung 3 zeigt deutlich, dass die Amplitude des Schallsignals mit zunehmender Schichtdicke (Anzahl der Beschichtungsüberfahrten) abnimmt. Die Korrelation zwischen der Amplitudenabnahme und der metallographisch ermittelten Schichtdicke zeigt die Abbildung 4.

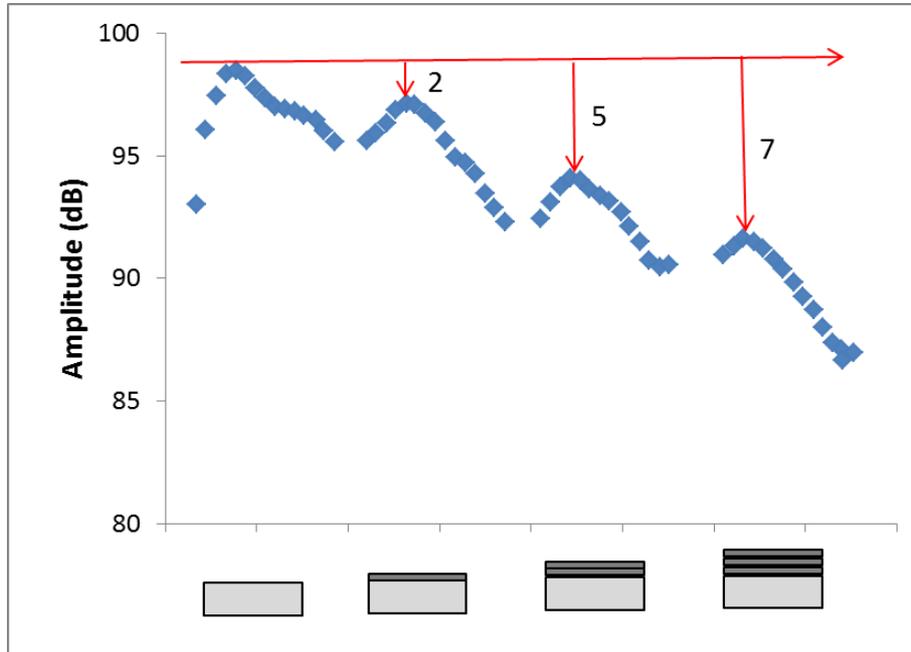


Abbildung 3. Amplitudenabnahme mit zunehmenden Schichtdicke

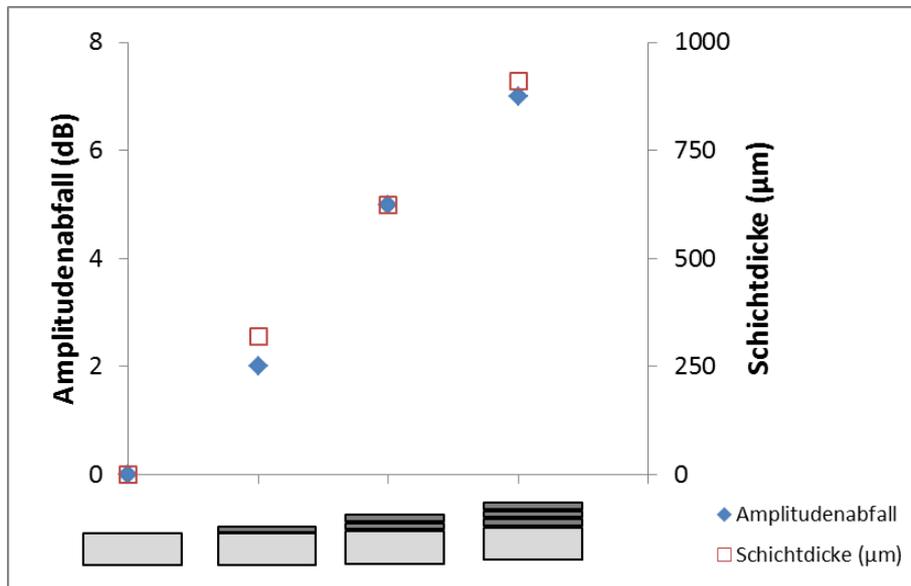


Abbildung 4. Korrelation zwischen Amplitudenabnahme und Schichtdicke

Die Messungen während des Beschichtungsprozesses ergaben, dass die Schichtdicke durch Auswertung der Schallamplitude schon während der Beschichtung abgeschätzt werden kann.

Messungen zur Offline-Überwachung

Ähnlich wie bei der Online-Messung wird hier auch das Dämpfungsverhalten durch die aufgebraute Schicht ausgewertet. Für die Untersuchungen wurden Flachproben betrachtet, die einseitig mit unterschiedlichen Schichtdicken versehen wurden. Für die Bestimmung des Dämpfungsverhaltens wurde ein Bleistiftminenbruchttest nach Hsu-Nielsen als Schallquelle eingesetzt und das Signal sowohl an der unbeschichteten Seite als auch an der beschichteten Seite aufgenommen. Den eingesetzten Aufbau, mit dem der Probensatz untersucht wurde, zeigt die Abbildung 5.

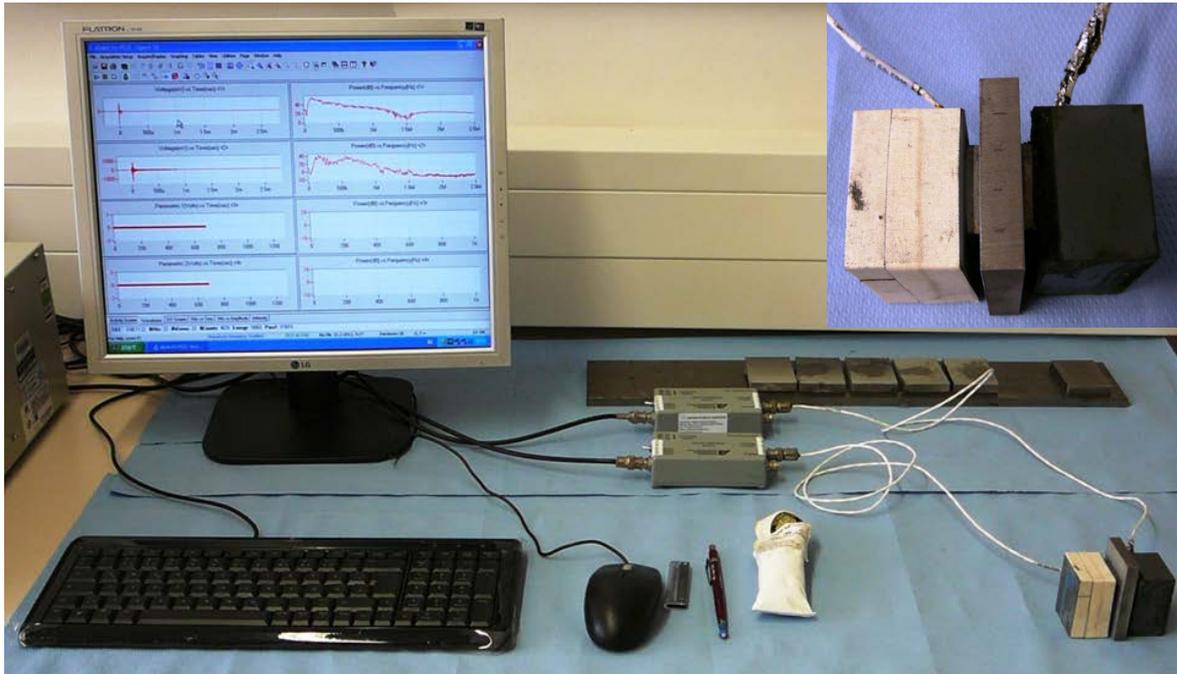


Abbildung 5. Messaufbau für die Offline-Messungen

Der Monitor zeigt das Messprogramm von Physical Acoustic, das die Signale von zwei Sensoren aufzeichnet und abspeichert. Angeschlossen an das Messsystem sind zwei Vorverstärker, welche die von den Sensoren aufgenommenen Signale aufbereiten. Die Sensoren sind, wie im Bildausschnitt oben rechts zu sehen, an der beschichteten und an der unbeschichteten Probe jeweils mit einem Magnethalter angebracht. Auf der oberliegenden freien Probenseite wurde mit Hilfe des Bleistiftminentests ein Schallsignal eingebracht, welches dann von beiden Sensoren aufgezeichnet wurde. In der Abbildung 6 sind exemplarisch die beiden Signale dargestellt. Der Vergleich der Signale zeigt deutlich, dass das Signal durch die aufgebraute Schicht gedämpft wurde. Oben ist die Wellenform der unbeschichteten Seite und unten ist die Wellenform der beschichteten Seite dargestellt. Die Signaldauer der einzelnen Impulse ist im Fall der unbeschichteten Seite größer als bei der beschichteten Seite.

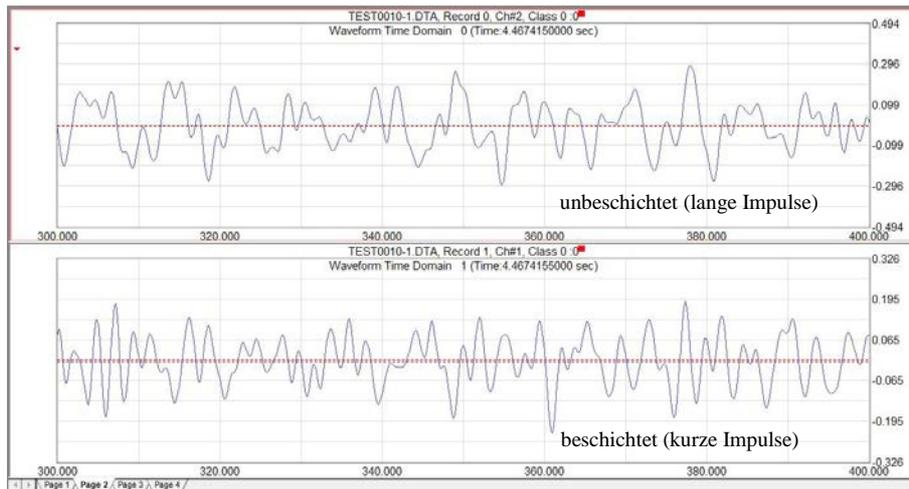


Abbildung 6. Vergleich der Wellenform von beschichtet und unbeschichtete Probeseite

Diese Signaldauer wurde zur Schichtdickenmessung herangezogen. Dabei gibt der Koeffizient K die durchschnittliche Dauer dieser Überschwingungen an. Mit Hilfe dieses Koeffizienten K kann auch die Signalenergie E in folgender Art abgeschätzt werden: $E=A*K*C$ mit A=maximale Amplitude und C=Anzahl der Überschwingungen.

Für die Auswertung wurde die durchschnittliche Dauer der Überschwingungen (K) an der unbeschichteten Seite zur Normierung des Signals von der beschichteten Seite eingesetzt. Auf diese Art können Schwankungen auf Grund der Anregung (Bleistiftminentest) eliminiert werden. Die so erhaltenen Messergebnisse zeigt die Abbildung 7. Die K-Werte fallen für die Messungen an der beschichteten Probenseite mit steigender Schichtdicke ab. Diese Änderung ist in der Abbildung 8 gegenüber der metallographisch bestimmten Schichtdicke aufgetragen.

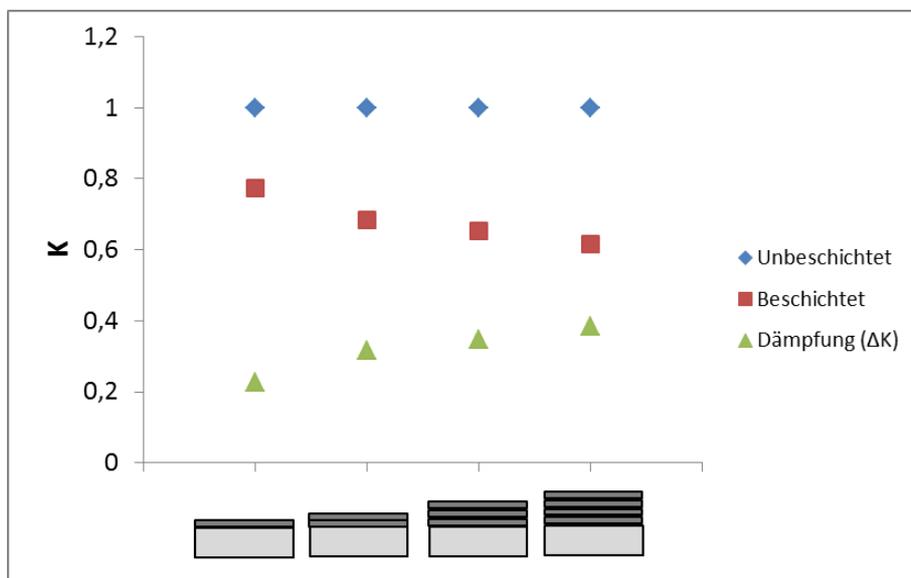


Abbildung 7. Vergleich der Koeffizient K von der beschichteten und unbeschichteten Probeseite

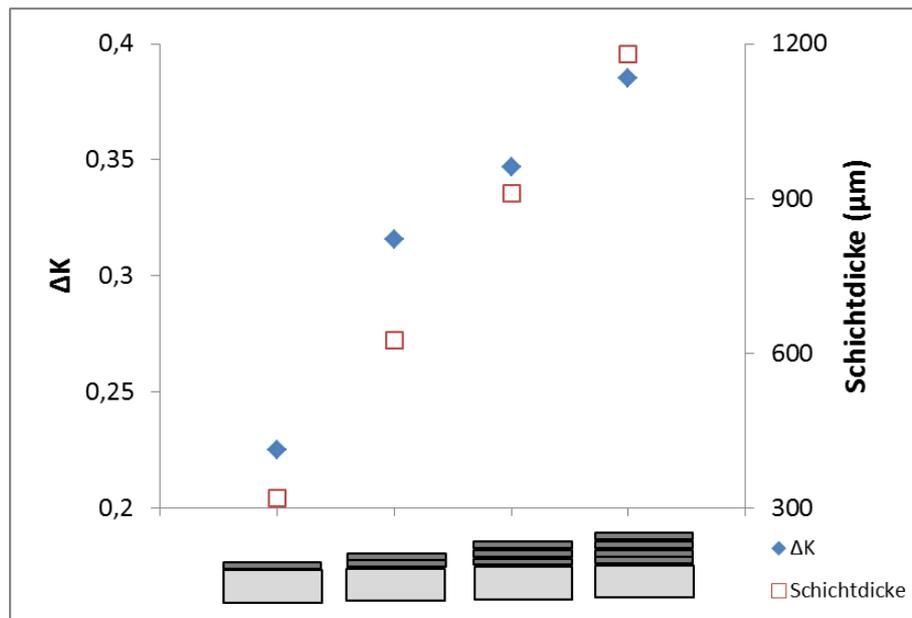


Abbildung 8. Korrelation zwischen Dämpfungskoeffizient (ΔK) und Schichtdicke

Die Ergebnisse der Offline-Messungen zeigen, wie die zuvor dargestellten Ergebnisse der Online-Messungen, wieder einen klaren Zusammenhang zwischen der Schallamplitude und der Schichtdicke. Auf diese Art können die Proben auch nach der Beschichtung auf ihre Schichtdicke geprüft werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Fall der Online-Messung, welche am Lichtbogenspritzverfahren mit Massivdrähten durchgeführt wurden, ließ sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Schallintensität und der Schichtdicke ermitteln. Auf diese Art ist prinzipiell eine Schichtdickenbestimmung schon während des Beschichtungsprozesses möglich. Bei der Offline-Messung mit Hilfe des Bleistiftminenbruchtests konnten die unterschiedlichen Schichtdicken ebenfalls bestimmt werden. Somit stellt das hier vorgestellte System eine Methode dar, die Schichtdicken umfangreich zu charakterisieren.

Neben den Online-Messungen an Beschichtungen mit Hilfe von Massivdrähten, wurden auch Messungen durchgeführt, bei denen Fülldrähte AS 850 der Firma DURMAT eingesetzt wurden, die für die Herstellung von Verschleißschutzschichten eingesetzt werden. Die Fülldrähte bestehen aus einem dünnen Stahlmantel, der mit nicht elektrisch leitfähigem Pulvermaterial gefüllt ist. Bei diesen Messungen ergab sich der in der Abbildung 9 graphisch dargestellte Zusammenhang zwischen Amplitude und Schichtdicke.

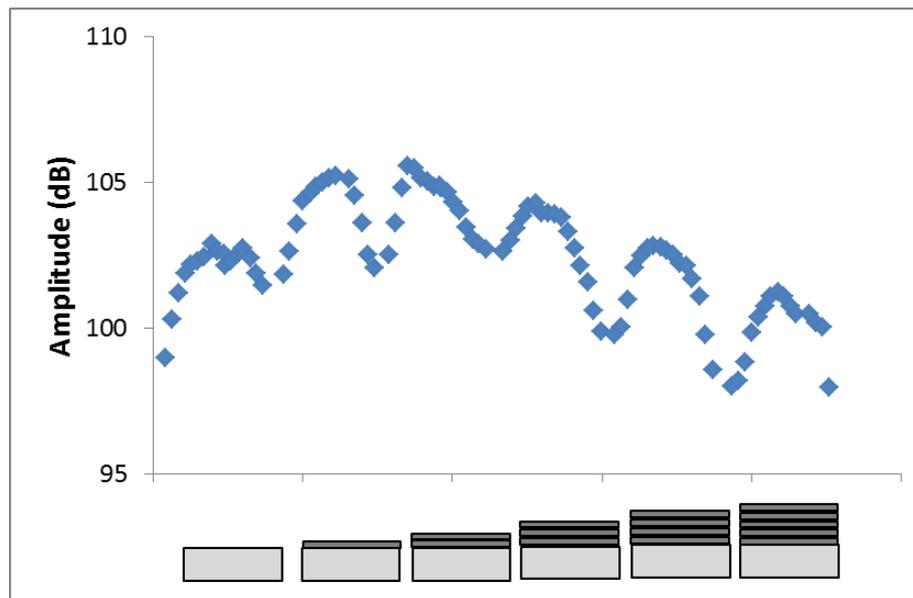


Abbildung 9. Amplitudenabfall mit zunehmenden Schichtdicke bei Online-Messung (Fülldrähte)

In diesem Fall steigt, im Gegensatz zu den zuvor eingesetzten Massivdrähten, die Amplitude bis zur dritten Beschichtungsüberfahrt an und fällt erst dann wieder ab. Dabei zeigt die sechste Überfahrt eine deutlich geringere Amplitude als die erste Überfahrt. Auch Wiederholungsmessungen zeigten dieses Verhalten. Eine mögliche Ursache hierfür können die höheren Temperaturen bei der Verwendung von Fülldrähten sein. Eine Klärung dieses Verhaltens ist ein Schwerpunkt der kommenden Arbeiten.

Danksagung

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

Referenzen

- [1] DIN EN 657: „Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung“; Deutsche Fassung EN 657:2005
- [2] <http://www.sfb708.tu-dortmund.de/>
- [3] W. Tillmann, M. Abdulgader, H.-G. Rademacher, G. Wang, R. Zielke: „Prozess- und Schichtcharakterisierung mit Schallemissionsanalyse und digitaler Bildkorrelation“, Sonderforschungsbereich 708, 3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung - Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung - 5. öffentliches Kolloquium, 20. November 2012, Dortmund, ISBN 978-3-86975-071-2
- [4] G. Reuss: „Beitrag zur Überwachung des thermischen Spritzprozesses mittels Schallemissionsanalyse (SEA)“, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2001
- [5] W. Tillmann, M. Abdulgader, G. Wang, R. Zielke: „Quality Prediction of Twin Wire Arc Sprayed Coatings Using Acoustic Emission Analysis“, JTTEE5 DOI: 10.1007/s11666-012-9861-z 1059-9630/\$19.00 ASM International
- [6] R. Zielke, W. Tillmann, G. Wang, M. Abdulgader, TU Dortmund, Dortmund Lehrstuhl für Werkstofftechnologie: „Schallemissionsanalyse zur Prozessüberwachung beim thermischen Spritzen“, DACH-Jahrestagung in Graz 2012