Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik
Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz

Sachstandsbericht

Projekt:

„Einsatz von Fülldrähten mit großem Durchmesser für das thermische Spritzen“

Laufzeit:

01.08.2011 bis 31.10.2012

Vorhaben – Nr.:

17.049 B

Projektleiter (LVW, TU Chemnitz):

Dr.-Ing. habil. Hanna Pokhmurska
hanna.pokhmurska@mb.tu-chemnitz.de

Institutsleiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Wielage
bernhard.wielage@mb.tu-chemnitz.de

---

1 Ziel des Vorhabens

Das Projekt verfolgt das Ziel, die Werkstoffkonzepte, den Herstellungsprozess, die Verarbeitung mittels Lichtbogendraht- und Drahtflammspritzen sowie die erreichbaren Schichtqualitäten für dicke Drähte zu optimieren. Für Standardanwendungen (für die Vielzahl der kmUs relevant) sollen Drähte mit einem Durchmesser von 1,6 bis 3,2 mm systematisch untersucht werden, um die auftretenden Skalierungseffekte zu charakterisieren. Diese Festlegung des zu untersuchenden Durchmesserbereichs orientiert sich an den mit marktüblichen Spritzsystemen verarbeitbaren Drahtstärken. Exemplarisch werden auch dickere Drahtvarianten in die Betrachtungen einbezogen, wobei diese jedoch nur mit modifizierter Brennertechnik verarbeitet werden können. Entsprechende Modifikationen werden so ausgeführt, dass sie problemlos durch kmU an verschiedenen Brennertypen durchführbar sind. Da die Prozessbedingungen und damit die Schichtmikrostruktur entsprechend den Ergebnissen der Voruntersuchungen von Drahtdurchmesser und -zusammensetzung abhängig sind, sollen systematische Grundlagen für das Drahtdesign erarbeitet werden. Berücksichtigt werden dabei neben dem Durchmesser, der Dicke und der Form des Drahtmantels auch Füllungszusätze mit desoxierender Wirkung, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Legierungsbildung und die Tropfenablösung an den Drahtspitzen haben. Das Projekt soll im Ergebnis Industrieunternehmen eine Hilfestellung bieten, wenn neben den Qualitätsanforderungen auch die Auftragsleistung und der prozentuale Anteil von Verstärkungspartikeln bzw. Legierungselementen Zielgrößen der Parameteroptimierung sind.

2 Stand der Technik

Besonders zur Herstellung großflächiger Beschichtungen und bei Baustellenanwendungen werden Spritzverfahren, die einen drahtförmigen Zusatzwerkstoff verwenden, pulvergestützten Verfahren vorgezogen, da sie hinsichtlich Anlagenhandling und Kosten vorteilhaft sind. Zur Herstellung hochlegierter Beschichtungen, beispielsweise für den Oxidationsschutz von Kraftwerkskomponenten (Wärmetauscher) ist der Einsatz von Fülldrähten notwendig, da sich Massivdrähte mit der benötigten Legierungszusammensetzung aufgrund mangelnder Duktilität nicht herstellen und verarbeiten lassen. Die Legierungsgehalte sind dabei durch den maximalen Füllgrad begrenzt. Bei Fülldrähten mit 1,6 mm Durchmesser, wie sie für zahlreiche Anwendungen standardmäßig verwendet werden, kann ein maximaler Füllgrad von ca. 20-25 % erreicht werden. Darüber hinaus wäre das Mantelmaterial nicht mehr ausreichend mechanisch stabil. Durch die Verwendung größerer Drahtdurchmesser sind problemlos höhere Gehalte möglich, was einerseits die Erschließung neuer Legierungsbereiche ermöglicht und andererseits zur Kostensenkung bei der Drahtherstellung beiträgt, da weniger Ziehvorgänge zur Einstellung des Enddurchmessers erforderlich sind. Dem Einsatz dicker Drähte stehen jedoch neben möglichen Vorteilen auch eine Reihe von Fragestellungen und Problemen entgegen, die untersucht werden sollen. Bislang ist nicht systematisch geklärt, welche Fülldrahtdurchmesser und Füllgrade unter der Maßgabe erzeugt werden können, dass die Füllung fest eingebunden ist und im Prozess nicht vorzeitig herausgelöst wird. Des Weiteren ist zu untersuchen, welche anlagentechnischen Grenzen bei der Verarbeitung hinsichtlich Drahtförderbarkeit, -konstanz und maximalem Fördervolumen bestehen. Unterschiede, die sich in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser hinsichtlich Drahtabschmelzverhalten und Schichtqualität bei verschiedenen Spritzverfahren und Werkstoffen ergeben, sollten ebenfalls untersucht werden. Betrachtungen zu den zu erwartenden ökonomischen Vorteilen werden den Unternehmen helfen, ihre Konkurrenzfähigkeit zu verbessern und teure Verfahren zu substituieren.

In der Fachliteratur existieren einige Berichte zu den Einflussfaktoren des Drahtabschmelzverhaltens in Abhängigkeit von Drahttyp, Spritzverfahren oder Prozessparametern. So werden beim Hochgeschwindigkeitsdrahtflammspritzen von AISI 316L (1.4404) deutliche Unterschiede bezüglich der Homogenität der Schichten in Abhängigkeit vom Drahttyp (Massivdraht, Falzdraht, Röhrchenfülldraht) beobachtet. Auch der Einfluss der Brennerführung auf den Prozess wurde für verschiedene Drahttypen untersucht. Aufgrund seiner ökonomischen Attraktivität existieren im Bereich des Lichtbogenspritzens zahlreiche Grundlagenuntersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen Brennergeometrie, Gasflüssen, Gasarten, der Prozessstabilität, Partikelparametern und den resultierenden Schichteigenschaften. Der Einfluss des Gasdrucks und der Drahtvorschubgeschwindigkeit, die sich weitgehend proportional zur Stromstärke verhält, auf Partikelgeschwindigkeit und Temperatur wurde ebenfalls untersucht. Viele Arbeiten beschäftigen sich mit dem Einfluss der Düsengeometrien auf den Lichtbogenspritzprozess. Auch Verfahrensmodifikationen des Lichtbogenspritzens unter Verwendung von Brenngasen wurden phänomenologisch detailliert untersucht. Für die Diagnostik des Spritzprozesses steht eine Reihe von Messverfahren und Methoden zur Verfügung. So ist für die Untersuchung des Abschmelzverhaltens die Hochgeschwindigkeitskameraanalytik unverzichtbar. Für die Messung der Partikeleigenschaften stehen optische, lasergestützte und pyrometrische Verfahren zur Verfügung, welche häufig in Partikeldiagnostiksystemen kombiniert werden. Für die Herstellung großflächiger verschleißbeständiger Schichten ist das Lichtbogenspritzen von Fülldrähten besonders

vorteilhaft. So beschäftigen sich viele Veröffentlichungen mit Schichten für den kombinierten Hochtemperatur-Verschleiß- und Korrosionsschutz. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist der Verschleißschutz bei niedrigen Temperaturen. Zur Verwendung von Fülldrähten beim Schutzgasschweißen (Auftragschweißen) existieren deutlich mehr Veröffentlichungen als für den Bereich Thermisches Spritzen, wobei die hier untersuchten Drahtdurchmesser meistens 1,2 oder 1,6 mm betragen. Nur bei sehr hoch legierten Drähten für den Verschleißschutz werden größere Durchmesser von bis zu 4,8 mm verwendet. In einigen Veröffentlichungen werden 2,0 mm Drähte berücksichtigt. Lediglich beim Auftragschweißen sind größere Durchmesser gebräuchlich. Systematische Untersuchungen zum Einfluss des Drahtdurchmessers auf das Beschichtungsergebnis beim Lichtbogenspritzen insbesondere von Fülldrähten, unter Beachtung ihres spezifischen Abschmelzverhaltens, fehlen gänzlich. Damit leitet sich ein dringender Forschungsbedarf ab, der durch die perspektivischen Vorteile dickerer Fülldrähte motiviert ist. Zudem suchen zahlreiche Industriebetriebe händeringend nach preiswerten Lösungen, um höhere Abschmelzleistungen zu realisieren und richten sich mit konkreten Fragestellungen zum Thema „Dicke Drähte“ an die Forschungsinstitute.

3 Erste Ergebnisse

Der Einfluss des Drahtdurchmessers und der Spritzparameter Abstand und Stromstärke auf den Sauerstoffgehalt der lichtbogengespritzten Spritzschichten wurde in Vorversuchen anhand zweier Spritzdrähte mit nahezu identischer chemischer Zusammensetzung (Tabelle 1) untersucht. Ein Unterschied zwischen den verwendeten Drähten besteht hinsichtlich der Zugabe von fluoridischem Flussmittel in der Füllung des Drahtes mit 2,8 mm Durchmesser.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Spritzdrähte in At.-% (Rest: Fe)

Drahtdurchmesser [mm]	Cr	Al	Si	Mn	Mo	V
2,0	6 – 7	1	< 1	1	< 1	< 1
2,8	6 – 7	1 – 2	1 – 2	1 – 2	< 1	< 1

Mit beiden Spritzdrähten wurden Spritzschichten mittels Lichtbogenspritzens unter Variation von Strom und Spritzabstand hergestellt. Hierzu wurde eine OSU-Lichtbogenspritzanlage mit dem Brennertyp LD/U2 eingesetzt. Die verwendeten Spritzparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Spritzdrähte in At.-% (Rest: Fe)

Parameter	**Wert**
Stromstärke	100 A / 150 A
Spannung	25 V
Zerstäubergasdruck	3,5 bar
Spritzabstand	80 mm / 100 mm / 120 mm

Mit beiden Drahtvarianten können dichte und gut haftende Schichten hergestellt werden. Mittels Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen wurde das Abschmelzverhalten der Drähte im Lichtbogen genauer analysiert. Dabei konnte bei dicken Drähten ein relativ stabiler Prozess nachgewiesen werden, d.h. eine sehr gleichmäßige Schmelzekonvektion an den Drahtspitzen und nur geringe Fluktuationen im Sinne von komplettem Erlöschen bzw. erneutem Zünden des Lichtbogens. Anhand der Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen (Bildrate 10.000 Bilder pro Sekunde) lässt sich sehr gut erkennen, dass bei der Verarbeitung von dicken Drähten vorrangig ein starkes Wandern der Lichtbogenfußpunkte auftritt, was dazu führt, dass der Lichtbogen das Drahtmaterial relativ homogen erwärmt (Abbildung 1). Im Gegensatz dazu zeigt sich bei dünneren Drähten, die mit identischen Spritzparametern (ausgenommen der Drahtvorschubgeschwindigkeit) verarbeitet werden, die Tendenz einer starken Veränderung der Lichtbogenlänge insbesondere nach Ablösung großer Partikel bzw. Schmelztropfen von den Drahtenden. Bei der gleichen Menge abgelösten, schmelzflüssigen Materials variiert der Abstand der Drahtenden deutlich stärker als bei dickem Draht. Ein Vorteil dünner Drähte besteht wiederum darin, dass diese eine weniger starke Störstelle im Strömungsfeld des Brenners bilden, was sich positiv auf die Freistrahldivergenz auswirkt.

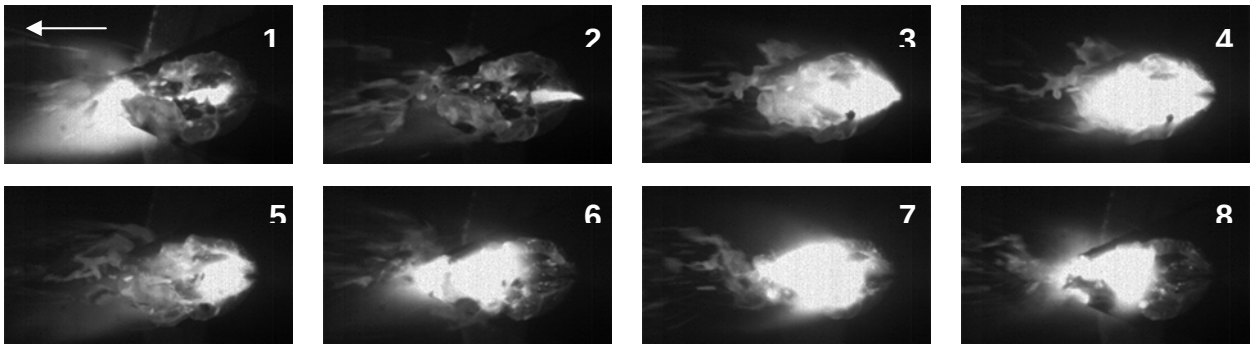


Abbildung 1: Bildfolge einer Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme des 2,8 mm dicken Drahtes, die deutlich das Wandern der Lichtbogenfußpunkte zeigt (Pfeil in Bild 1 zeigt die Spritzrichtung)

Im Ergebnis zeigt sich, dass in Bezug auf die Schichtqualität der Einsatz dicker Drähte nicht zwangsläufig zu einer verminderten Qualität führen muss. Es ist sogar davon auszugehen, dass dabei eine homogenere Legierungsbildung erreicht werden kann. In der mikrostrukturellen Ausbildung der Spritzschichten zeigen sich charakteristische Unterschiede zwischen den Drähten (Abbildung 2).

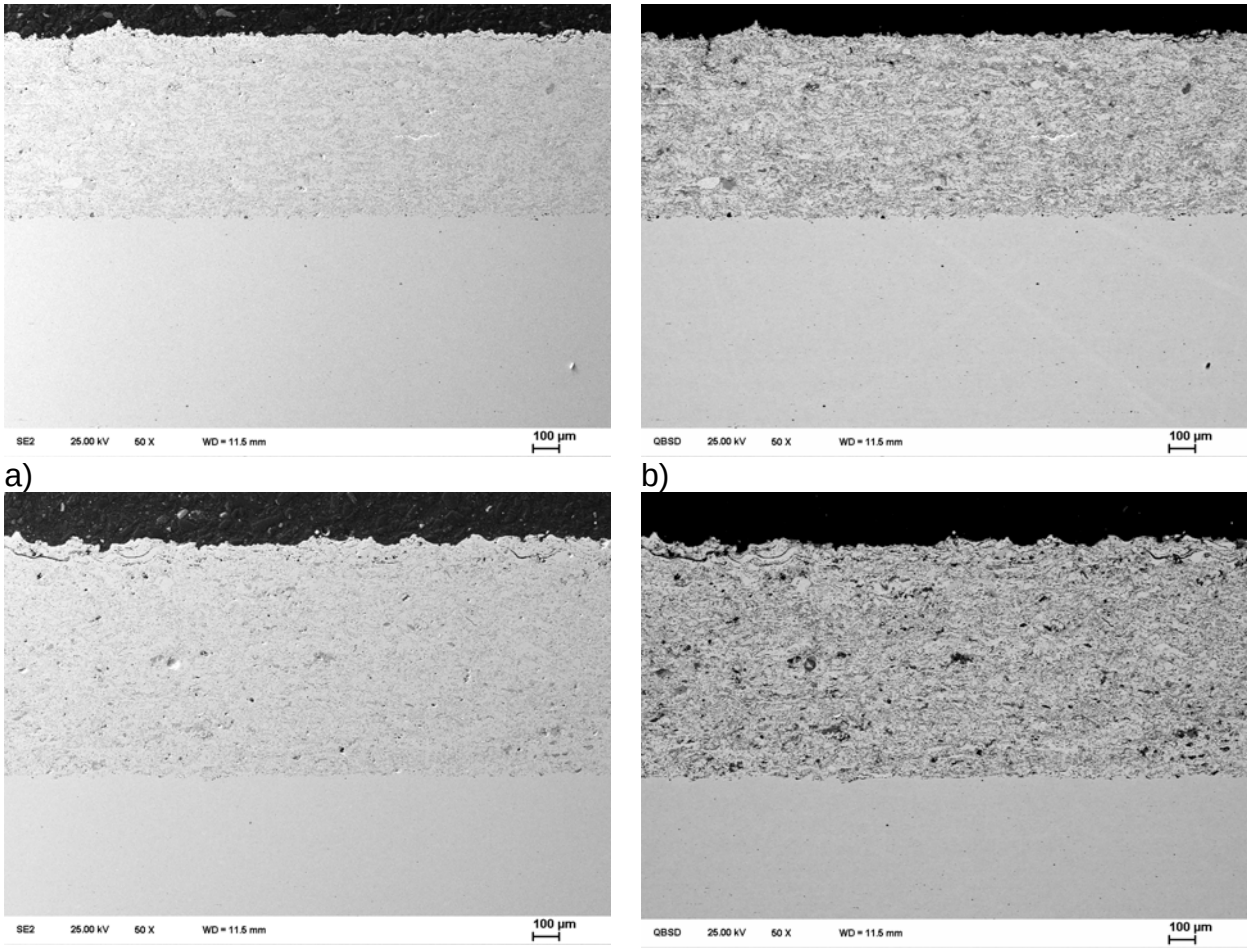
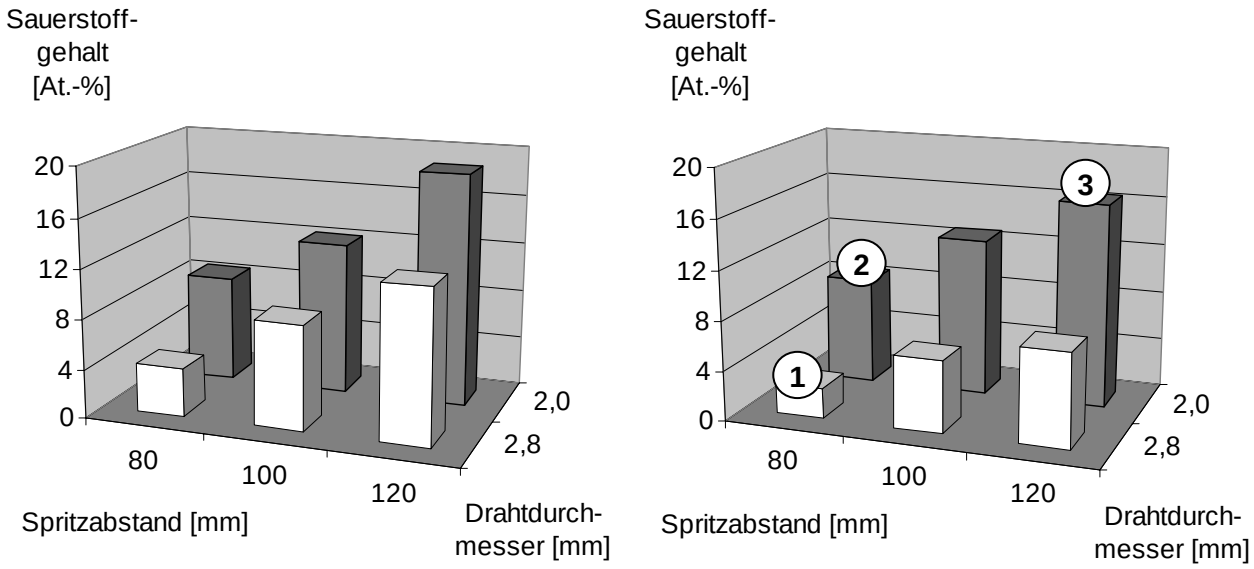


Abbildung 2: Einfluss des Drahtes (a und b: 2,0 mm; c und d: 2,8 mm) auf die Mikrostruktur (REM-Aufnahmen) der Lichtbogenspritzschicht (Spritzabstand: 120 mm; Stromstärke: 150 A; 50-fache Vergrößerung; a und c: SE-Kontrast, b und d: RE-Kontrast)

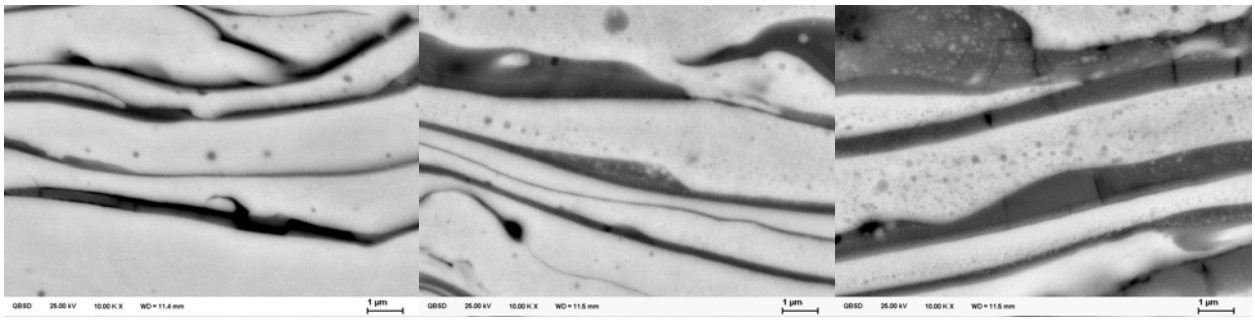
Beide Schichten weisen eine sehr geringe und geschlossene Porosität auf, wie die REM-Aufnahmen im SE-Kontrast belegen (Abbildung 1, a und c). Aus dem Vergleich der im SE- und RE-Kontrast aufgenommenen Gefüge geht hervor, dass die unter Verwendung des dünneren Drahtes hergestellte Schicht einen geringeren Anteil grober Oxidpartikel besitzt, beide Schichten jedoch eine vergleichbare Lamellengröße aufweisen. Dies deutet auf eine ähnliche Größenverteilung der Spritzpartikel bei beiden Drähten hin. Die vermehrten oxidischen Einschlüsse bei Verwendung des dickeren Drahtes weisen erhöhte Gehalte von Calcium und Natrium auf und können somit auf Flussmittelrückstände zurückgeführt werden. Die Flächenanalyse der chemischen Zusammensetzung der Spritzschichten mittels EDX ergab eine klare Abhängigkeit des Sauerstoffgehalts von den variierten Spritzparametern und der Drahtstärke (Abbildung 3). So führt die Erhöhung des Spritzabstandes generell aufgrund der längeren Exposition der schmelzflüssigen Partikel im Zerstäuberluftstrom zu höheren Sauerstoffgehalten in der

Schicht. Die Erhöhung der Stromstärke hat hingegen nur für den flussmittelhaltigen dickeren Draht eine deutliche Absenkung des Sauerstoffgehaltes zur Folge.



a) b)

Abbildung 3: Einfluss von Stromstärke (a: 100 A; b: 150 A), Spritzabstand und Drahtdurchmesser auf den Sauerstoffgehalt der Lichtbogenspritzschicht



a) b) c)

Abbildung 4: Einfluss des Drahtes und der Spritzparameter auf die Oxidation der Schicht (REM-Aufnahmen, RE-Kontrast; vgl. Abbildung 2-b: a) Schicht 1; b) Schicht 2; c) Schicht 3)

Deutlich wird der Zusammenhang zwischen Draht, Spritzparameter und Oxidation bei Betrachtung der Schichtmikrostruktur mit hoher Vergrößerung (Abbildung 4). Mit steigendem Sauerstoffgehalt der Schicht nimmt sowohl der Grad der inneren Oxidation der Spritzlamellen als auch die Dicke der interlamellaren Oxidschicht zu.

Im Berichtzeitraum wurden weitere eisenbasierte Fülldrähte von verschiedenen Durchmessern mittels Lichtbogenspritzen verarbeitet. Die chemische Zusammensetzung der Drähte ist in der Tab. 1 dargestellt. Es handelt sich um vergleichbare Zusammensetzung bei unterschiedlicher Drahtgeometrie.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Fülldrähte im Fe-Mantel

Fülldraht	**∅, [mm]**	**Fe**	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**
A864 M*	1,6	90,589	0,554	0,19	1,09	0,018	0,025	0,204
A864 M*	3,2	91,068	0,452	0,3	1,2	0,025	0,025	0,22
A862 M**	1,6	74,368	2,8	0,3	0,39	0,02	0,025	21,1
A862 M**	2,4	74,002	2,51	0,62	0,38	0,01	0,008	21,4
A760 M***	1,6	91,654	0,41	0,4	1,56	0,02	0,016	5,44
A760 M***	2,4	90,566	0,469	0,402	1,404	0,013	0,02	6,617

* Ni: 1,3-1,8; B: 5,0-6,0
** V: 0,5-0,6; W: 0,4-0,6
*** Mo: 0,5

Zur Verarbeitung wurde das Lichtbogenspritzsystem OSU L DU-2 verwendet. Alle Fülldrähte (1,6, 2,4 und 3,2 mm) waren gut handhab- und förderbar. Im Detail wurde der Einfluss der Spritzparameter Stromstärke und Spritzabstand auf die Schichteigenschaften untersucht. In Bezug auf die Porosität zeigt sich, dass erhöhte Abschmelzleistungen (hohe Ströme und damit hohe Drahtvorschubgeschwindigkeiten) zu einer Verschlechterung der Schichtporosität führen (Abbildung 5). Für die industrielle Anwendung kann geschlussfolgert werden, dass erhöhte Abschmelzleistungen und damit verbunden ökonomische Vorteile möglich sind. Inwieweit diese nutzbar sind, wird durch die Anforderungen (Lastenheft) an das Schichtsystem definiert.

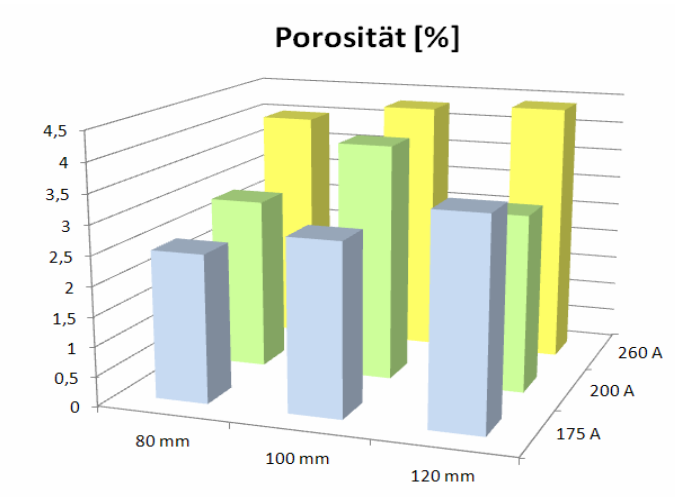


Abbildung 5:
Einfluss der Spritzparameter (Abschmelzleistung und Spritzabstand) auf die Schichtporosität bei Verarbeitung von A862 M mit 3,2 mm Drahtdurchmesser

5 Arbeitsplan

Arbeitsschritte		Quartal									
		1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	9	10
Drahtauswahl und -herstellung											
1	Auswahl und Herstellung der Versuchsdrähte										
Untersuchung des Drahthandlings											
2	Biegetest (Bestimmung des kritischen Knickradius)										
3	Drahtförderversuche										
Prozesscharakterisierung											
4	Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen (LiBo)										
5	PIV und Analyse der Spritzstrahldivergenz (LiBo)										
6	Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen (FS)										
7	PIV und Analyse der Spritzstrahldivergenz (FS)										
8	Partikelanalyse an aufgefangenen Spritzpartikeln										
Schichtcharakterisierung											
9	Herstellung von LiBo-Schichten										
10	Metallografische Analyse der LiBo-Schichten										
11	Herstellung von FS-Schichten										
12	Metallografische Analyse der FS-Schichten										
13	Verschleißuntersuchungen										
Fertigung von Musterbeschichtungen											
14	Musterbeschichtungen in Absprache mit pbA										
Dokumentation und Aufbereitung der Ergebnisse											
15	Berichterstellung										

6 PbA

Dem PbA danken wir herzlich für die hilfreiche Unterstützung.

Anwender

- GB PowerTech e.V. - Hr. Dr. Schirmer
- Fremat GmbH & Co KG - Dr. Marx / Hr. Köhler
- Procon GmbH - Hr. Richter
- Ingenieurbüro Weich - Hr. Weich
- Ermafa GmbH - Dr. Hartmann
- Kelterborn & Kelterborn GbR - Hr. Pfeifer

Anlagenhersteller:

- GTV GmbH - Hr. Dr. Schwenk
- IBEDA GmbH & Co. KG - Hr. Weissenfels
- Sulzer Metco Europe GmbH, Fred van Rodijnen

Zusatzwerkstoffhersteller:

- Drahtzug Stein GmbH & Co. KG - Hr. Dr. Rosert
- Corodur Verschleißschutz GmbH - Hr. Pelz
- Castolin GmbH - Hr. Satke

7 Nächste PbA-Sitzung

- 15. Dezember 2011, Chemnitz von 10.00 Uhr bis 15.00 Uhr
- Gemeinsame PbA-Sitzung mit den Projekten 17.099 B „Oberflächenfunktionalisierung von Hochleistungspolymeren“ und 16.412 B „Hochgeschwindigkeitslichtbogenspritzen“
- Anmeldung bitte unter Tel. 0371-531 3 6595 oder per Email an hanna.pokhmurska@mb.tu-chemnitz.de