Statusbericht zum IGF-Vorhaben „Feinstrukturierte Werkstoffe auf Fe-Basis und korrespondierende Verarbeitungsverfahren für den Verschleiß- und Korrosionsschutz“

IGF-Vorhaben-Nr.: 15.505 N / DVS-Nr.: 02.005
Laufzeit: 01.02.2008 bis 31.01.2011
Berichtsdatum: 31.03.2010
Forschungsstelle: **LWT, TU Dortmund**
Leiter der Forschungsstelle: **Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. W. Tillmann**
Projektleiter: **Dipl.-Ing. B. Rüther**

1 Forschungsthema

Feinstrukturierte Werkstoffe auf Fe-Basis und korrespondierende Verarbeitungsverfahren für den Verschleiß- und Korrosionsschutz

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Anlass für den Forschungsantrag

Thermisch gespritzte Schichten bestehend aus Fe-Basislegierungen werden derzeit von klein- und mittelständige Unternehmen als Schichten zum Verschleiß- und Korrosionsschutz für eine Vielzahl von Grundwerkstoffen eingesetzt. Ein Hauptvorteil von Fe-Basislegierungen gegenüber anderen Schichtsystemen auf Ni- oder Co-Basis ist ein deutlich geringerer Werkstoffpreis bei guter Verschleiß-Schutzfunktion. Die bedienten Industriezweige sind im Wesentlichen in der allgemeinen Maschinenbauindustrie, der Druck- und Papierindustrie, der Kraftwerkstechnik, der Luftfahrtindustrie sowie in dem Automobilbau zu finden.

Auf Basis einer Umfrage, die im Jahr 2008 vom DVS zusammen mit der Gesellschaft Thermisches Spritzen e.V. (GTS) durchgeführt wurde, ergab sich, dass Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten noch keine zufrieden stellende Ergebnisse erzielen, da kommerziell verfügbare Spritzwerkstoffe teuer sind und Schichteigenschaften wie Struktur, Porosität, Oberflächenrauhigkeit und damit Verschleiß- und Korrosionseigenschaften nicht dem geforderten Leistungsniveau entsprechen. Zur Verbesserung dieser Eigenschaften konnte in vergangenen Forschungsprojekten gezeigt werden, dass Fe-basierte Schichtsysteme eine Möglichkeit zur Kostenreduktion bieten und, dass die oben genannten Werkstoffeigenschaften durch nanostrukturierte Schichten wesentlich verbessert werden können.

Zur Herstellung von konturgenauen Schichten mit sehr guter Oberflächenbeschaffenheit reichen die Korngrößen kommerziell verfügbarer Pulver für die thermische Spritztechnik nicht aus, da die Oberflächenbeschaffenheit direkt mit der Partikelgröße des verspritzten Pulvers korreliert. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist hier das thermische Spritzen von Feinstpulvern mit Korngrößen im Bereich von wenigen Mikrometern. Dadurch wird erwartet, Schichten mit hoher Dichte, geringer Porosität, geringer Oberflächenrauigkeit und Feinststruktur zu erzeugen.

2.2 Ausgangssituation

Die kommerziell verfügbaren Methoden in der thermischen Spritztechnik weisen Unterschiede in den Verfahrensbedingungen wie Temperatur bei der Verbrennung und Teilchengeschwindigkeit des verdüsten Werkstoffes auf. Thermisch gespritzte Korrosions- und Verschleißschutzschichten zeichnen sich durch charakteristische, oft unerwünschte Eigenschaften, wie Porosität und raue Oberflächen, aus. Diese Mängel sind größtenteils in einer groben Körnung (ca. 40-100µm) kommerziell verfügbarer Pulver zur Schichtherstellung begründet. Um die für die betrachteten Anwendungen entsprechende Oberflächenbeschaffenheit zu erzielen, ist somit eine Nachbehandlung der Oberfläche notwendig. Ein interessanter Ansatz zur Verringerung des Nachbearbeitungsaufwandes ist das thermische Spritzen feinkörniger Pulver mit Partikelgrößen im Bereich von 5-15µm.

2.3 Stand der Technik/Forschung

Die thermische Spritztechnik hat sich in vielen Industriezweigen, aufgrund Ihrer vielfältigen Potentiale im Bereich der wirtschaftlichen, dicken und großflächigen Beschichtungen, durchgesetzt. Ein Hauptanwendungsgebiet der thermischen Spritztechnik ist der Verschleiß- und Korrosionsschutz verschiedenster Bauteil unter anderem aus der Papier- und Druckindustrie, der Luft- und Raumfahrttechnik oder aber auch in Turbinenanwendungen im stationären und mobilen Bereich. Vor diesem Hintergrund kommt der funktionellen Oberflächenbeschichtung durch thermische Spritzverfahren eine herausragende Bedeutung zu. In der Industrie liegt eine wesentliche Aufgabe thermisch gespritzter Schichten im Verschleißschutz. Etablierte Verschleißschutzschichten und -schichtsysteme sind keramische Schichten (Al_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, Y_2O_3), karbidhaltige Verbundschichten wie Cermets (WC/Co, Cr_3C_2/NiCr, ZrO_2/NiAl) und metallische Schichten (NiCrBSi, NiCr).

Die konventionellen Schichtsysteme weisen allerdings Mängel auf, die durch den Einsatz von Fe-Basis-Schichten kompensiert werden können. Fe-Basis-Schichten sind kostengünstiger als Ni- bzw. Co-Basis-Schichten bei einer höheren Spritzrate und Beschichtungseffizienz als bei keramischen Werkstoffen. Durch spezielles Legieren der Ausgangswerkstoffe können die Eigenschaften der Fe-Basis-Schichten gezielt verbessert werden. Eine erhöhte Kohlenstoffzugabe kann beispielsweise dazu führen, dass eine Karbidbildung in der Schicht begünstigt wird und dadurch die Verschleißfestigkeit gesteigert werden kann. Zusätzlich können Charakteristiken wie Härte, Korrosions- und Verschleißwiderstand, etc. durch Legierungselemente wie Chrom, Molybdän, Stickstoff und Vanadium verbessert werden.

Allerdings reichen die Korngrößen kommerziell verfügbarer Pulver zur Herstellung von konturgenauen Schichten nicht aus, da die Oberflächenbeschaffenheit direkt mit der Partikelgröße des verspritzten Pulvers korreliert ist. Derzeit werden im Bereich der thermischen Spritztechnik neuartige ultrafeine bzw. nanoagglomerierte Pulver entwickelt und erprobt. Diese weisen außergewöhnliche Eigenschaften auf.

Zur Herstellung von Spritzschichten mit ultrafeinen Pulvern eignet sich hervorragend das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying). Dieses zeichnet sich gegenüber anderen Spritzverfahren durch eine geringe Erwärmung des Beschichtungsmaterials, gekoppelt mit einer hohen Auftreffgeschwindigkeit der Spritzpartikel, aus. Bei diesem Verfahren wird in der Brennkammer ein Brenngas (meistens Propan, Propylen, Kerosin oder Wasserstoff) mit Sauerstoff unter hohem Druck kontinuierlich verbrannt. Die Prozessgasströmungen erreichen dabei Temperaturen bis ca. 3200°C und Geschwindigkeiten bis zu 650m/s.

Die Herstellung von Feinstpulvern kann mit verschiedenen Verfahren erfolgen, wie dem Hochenergiemahlen, der Sol-Gel-Technik und verschiedene Verdüsungsprozesse. Zur Herstellung von metallischen Pulvern aus Eisen, Aluminium, niedriglegierten Stählen, Edelstählen, Werkzeugstählen, Super- und Titanlegierungen sowie vielen anderen Legierungen ist die Verdüsung der dominierende Prozess. Bei der Verdüsung wird eine Flüssigkeit in feine Tröpfchen aufgespalten. Bei hochschmelzenden Materialien erstarrt sie beim Abkühlen zu feinen Tröpfchen, die in der Gesamtheit ein Pulver ergeben. Die Qualität und Eigenschaft von verdüsten Pulvern wird von einer Reihe von Verdüsungsparametern beeinflusst, die im Wesentlichen auf drei relevante Einflussgrößen reduziert werden: die Schmelzatmosphäre, das Verdüsungsmedium und das Abkühlmedium. Je nach Anforderungen an die Pulverqualität müssen sie angepasst werden.

Einen großen Einfluss auf die Weiterverarbeitbarkeit eines verdüsten Pulvers hat dessen Sauerstoffgehalt. Mit stark oxidierten Pulvern lassen sich für die meisten Anwendungen nur unzureichende Schichteigenschaften mittels thermischen Spritzens erreichen. Es ist daher wichtig, den Oxidgehalt des Pulvers durch geeignete Maßnahmen zu kontrollieren.

3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Ziel des Clusterprojekts ist die Entwicklung von Fe-Basis-Feinstpulvern. Hierzu werden zwei unterschiedliche werkstofftechnologische Routen verfolgt. Zum einen werden Fe-Basis-Legierungen eingesetzt, die karbidische oder silizidische Hartstoffe ausscheiden, über die die angestrebten tribologischen Eigenschaften eingestellt werden können. Zum anderen werden konventionelle Kalt- und Warmarbeitsstähle zu entsprechenden Pulvern verarbeitet. Die Pulververarbeitung erfolgt über eine gezielte Verdüsung von Drähten oder Pulvern im Lichtbogen bzw. in der Plasmaflamme mit dem Ziel, eine feinkörnige Pulverfaktion zu erzeugen (5-15µm). Die schnelle Abkühlung ermöglicht darüber hinaus auch die Einstellung eines gezielten Gefügezustands im einzelnen Pulverkorn. Hierzu wird eine entsprechende Verfahrenstechnik konzipiert und aufgebaut.

3.2 Bisher erzielte Ergebnisse

Das IGF-Vorhaben beschäftigt sich mit der Herstellung von Eisen-Basis-Feinstpulvern mittels Lichtbogenspritzen. Hierzu wird mit einer standardmäßigen Lichtbogenspritzanlage durch Applizieren von Fülldrähten in Wasser gespritzt. Durch die Variation der Spritzparameter Druck, Strom, Spannung und Abstand Lichtbogenspritzdüse-Wasseroberfläche kann die Partikelgröße eingestellt werden.

In der ersten Phase des Projektes wurde ein Ablaufschema zur Feinstpulverherstellung entwickelt und die hierfür notwendigen Baugruppen wurden erzeugt (Partikelgröße <15µm) (siehe Abb. 1). Die Baugruppen sind so ausgelegt, dass nahezu 100% der Spritzpartikel aufgefangen werden und durch das im Prozess befindliche Wasser schlagartig abgekühlt werden. Die Sedimentationsröhre und der Trockenschrank ermöglichen eine kostengünstige und effiziente Möglichkeit das erzeugte Pulver zu trocknen.

Der Aufbau der Pulvererzeugung mittels Lichtbogenprozess wurde im Verlauf des Projektes zu Gunsten höherer Effizienz und zur Erzeugung unterschiedlicher Partikelgrößenverteilungen verändert (siehe Abb. 2a & b, Tab. 1). Es werden daher parallel Versuche vertikaler und horizontaler Art durchgeführt. Durch das senkrechte Spritzen, bei dem Anstelle einer permanenten Wasserzufuhr stehendes Wasser zur Abkühlung der Partikel genutzt wird, konnte die Menge des im Prozess benötigten Wassers um 65% reduziert werden. Hier können auch orbikulare Teilchenformen erzeugt werden (siehe Abb. 3a). Spratzige Teilchen können mittels horizontalen Spritzen in Wasser mit permanenter Wasserzufuhr hergestellt werden (siehe Abb. 3b). Eine weitere Möglichkeit die Partikelgrößen zu variieren, ist die Änderung des Abstandes zwischen Lichtbogen-Kanone und Auftreffpunkt der Partikel auf das Wasser. Hierdurch ist es möglich Feinstpulver mit einer Partikelgröße von unter 1µm zu erzeugen (siehe Abb. 4).

Durch die stetige Reduktion des im Prozess benötigten Wassers und durch den Einsatz neuartiger Legierungsbestandteile in den Fülldrähten ist es gelungen den Oxidgehalt auf 3,5% weiter zu senken. Leider hat der Einsatz von Titan, bekannt als Antioxidationsmittel im Unterwasserschweißen, nicht den gewünschten Erfolg zur weiteren Reduktion des Sauerstoffanteils im Pulver gehabt (siehe Abb. 5). Daher werden derzeit alternative Fülldrahtmischungen und Konzepte erforscht um den angestrebten Sauerstoffschwellwert von unter 1% zu erreichen.

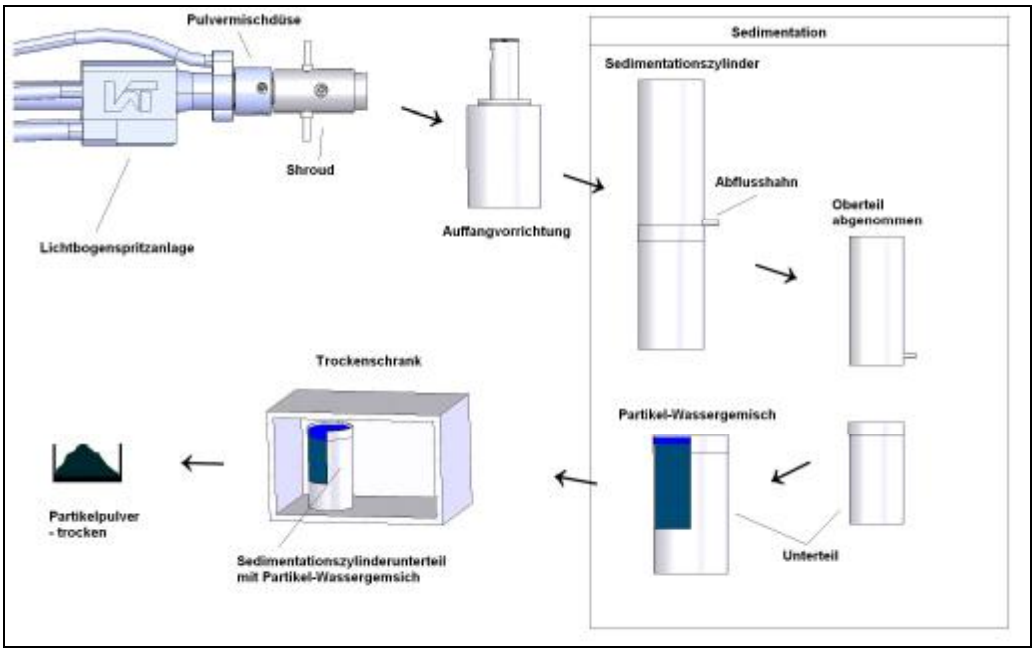


Abbildung 1: Ablauf der Pulvererzeugung

Abbildung 2a): Vertikale Pulvererzeugung

b): Horizontale Pulvererzeugung

Tabelle 1: Effizienzübersicht der erzeugten Pulvermengen

Versuchsreihe	Verfahren	Drahtmenge	Spritzdauer	Erzeugte Pulvermenge	Effizienz
03	Prototyp	218g	60s	125g	57%
01	1. Optimierung	218g	60s	205g	94%
01 - 2010	2. Optimierung	260g	60 s	246,7g	94,9 %

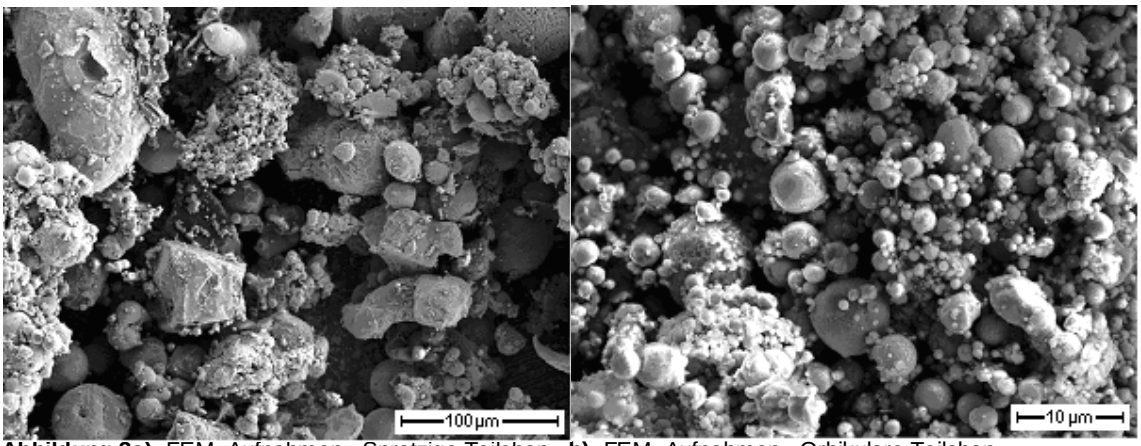
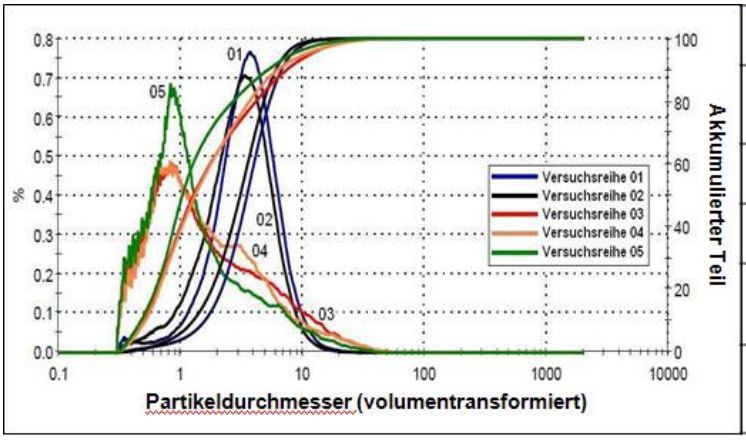


Abbildung 3a): FEM- Aufnahmen **-** Spratzige Teilchen **b):** FEM- Aufnahmen - Orbikulare Teilchen



Versuchs -Reihe	Verfahren
01	Aktuelles Verfahren mit senkrechtem Einspritzen in Wasser mit Folienschutz (Abstand: 100mm)
02	Aktuelles Verfahren mit senkrechtem Einspritzen in Wasser ohne Folienschutz (Abstand: 100mm)
03	Aktuelles Verfahren mit waagerechtem Einspritzen in Wasser (Abstand: 100mm)
04	Aktuelles Verfahren mit anschließender Wärmebehandlung zur Oxidationsreduktion des Pulvers (Abstand: 100mm)
05	Aktuelles Verfahren wie unter 01 mit max. Feinstpulveranteil (Partikelgröße < 1µm) (Abstand: 80mm)

Abbildung 4: Partikelverteilung der erzeugten Feinstpulver

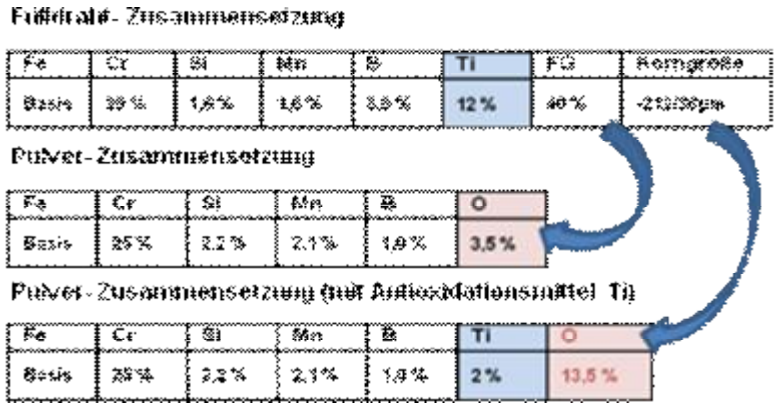


Abbildung 5: Zusammensetzung der verwendeten Fülldrähte und erzeugten Pulver

3.3 Gegenüberstellung der bisher erzielten Ergebnisse mit den geplanten Zielen

Das Ziel der ersten beiden Jahre dieses Projekts war die Konzipierung eines Verdüsungssystems auf Basis einer standardmäßigen Lichtbogenspritzanlage, eine Optimierung der Prozessparameter sowie die Erzeugung von Eisen-Basis-Feinstpulvern im Partikelgrößenbereich 5-15µm. Weiterhin waren Messkampagnen mit dem Projekt „Prozessdiagnostik“ (15.502 N) und die Versorgung des Projektes „Feinstpulverschicht“ (15.501 N) mit Eisenba-

sis-Feinstpulver geplant. In den Jahren 2008 und 2009 wurden bereits die Projektziele Konzipierung des Verdüsungssystems inklusive der benötigten Baugruppen zur Pulverherstellung erreicht. Weiterhin wurden erste Spritzversuche zur Parameteroptimierung erfolgreich abgeschlossen. Dies war notwendig, um eine hohe Reproduzierbarkeit der Feinstpulverpartikel im Bereich 5-15µm dauerhaft gewährleisten zu können. Weiterhin wurden die Herstellungsschritte Pulvertrocknung und Nachbehandlung der Pulver dezidiert analysiert und verbessert. Um eine kosteneffiziente und kurzfristige Pulvererzeugung mit den gewünschten Pulverqualitäten zu realisieren, wurden die Wasseranteile und somit die Oxidgehalte der Partikel stark reduziert. Dies ermöglichte eine Produktionsmenge von > 1kg Pulver ohne Mehrkostenaufwand. Zudem wurde durch die Reduktion des Oxidgehaltes, eine Vakuumofen-Glühbehandlung nicht mehr notwendig. Durch die Verwendung von 2 unterschiedlichen Systemen, dem horizontalen und vertikalen Lichtbogenspritzen in Wasser, ist es sogar möglich die Pulverteilchenform und die Partikelgrößenverteilung gezielt einzustellen. Durch Verwendung individuell auf den Einsatzfall abgestimmter Fülldrähte ist es auch möglich neue Pulvermischungen mit noch geringeren Oxidgehalten (< 3,5 %) zu generieren. Die ersten größeren Mengen des Feinstpulvers wurden wie vorgesehen im HVOF-Prozeß auf Verarbeitbarkeit überprüft und an das Forschungsclusterprojekt IGF-Nr. 15.501 zur Weiterverarbeitung geliefert. Des Weiteren sind in diesem 2. Abschnitt die metallografischen Schichtuntersuchungen sowie die chemischen Schichtanalysen (durch das wissenschaftliche Fachpersonal) planmäßig durchgeführt worden. Während der gesamten Zeit oblag die Planung, Koordination, Auswertung sowie Außendarstellung auf Sitzungen/Tagungen dem wissenschaftlichen Personal. In Zusammenarbeit mit den Forschungsclusterprojekten IGF-Nr. 15.502 ist im Rahmen des 2. Projektabschnitts die erste Messkampagne am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT) erfolgreich realisiert worden, die dazu diente Daten für die Prozessdiagnostik zu ermitteln. In dieser Messkampagne sind Geschwindigkeiten sowie Verteilungen der Eisenbasisfeinstpulverpartikel im Lichtbogen-Spritzstrahl gemessen worden. Die hier erarbeiteten Daten wurden in der Wissensrückkopplung zur weiteren Optimierung des Pulvererzeugungsprozesses genutzt. Eine weitere Messkampagne ist für 2010 geplant.

4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

4.1 Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
-Projektbegleitender Ausschuss (PbA)	-Ausführliche Diskussion & Präsentation der Forschungsergebnisse im PbA	-Vorstellung und Diskussion der geplanten Arbeiten -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse	-Feb. 2008 -Okt. 2008 -März 2009 -Juli 2009 -März 2010 -Okt. 2010
-Berichterstattung bei den Fachausschuss sitzungen des DVS (FA2)	-Kurze Präsentation und Diskussion der aktuellen Forschungsergebnisse auf den Sitzungen des FA2	-Vorstellung und Diskussion der geplanten Arbeiten -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse -Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse	-März 2008 -Okt. 2008 -März 2009 -Nov. 2009 -Apr. 2010 -Herbst 2010
-Veröffentlichungen & Vorträge auf nationa len und internationa len Konferenzen	-Großflächige und schnelle Verbreitung der Forschungsergebnisse	-GTS (Gemeinschaft thermisches Spritzen) -Kongress in Rostock -GTS- Kongress Herzogenaurach - WTK (Werkstofftechnisches Kolloquium in Chemnitz) - WTK (Werkstofftechnisches Kolloquium in Chemnitz) -GTS- Kongress -ITSC (International Thermal Spray Conference) in Hamburg	-Okt. 2008 -Juli 2009 -Okt. 2009 -Okt. 2010 -Okt. 2010 -2011
-Internetplattform	-Informationsmöglichkeiten, die jederzeit vom PbA des Forschungsclusters eingesehen werden können; Ergebnisstransfer	-Internetseite des DVS, der GTS, Verlinkungen von den Institutsseiten und des IOT zum Forschungscluster „Thermisches Spritzen“(gesicherter Bereich)	-ab März 2008
-Enger Kontakt mit den PbA- Mitglieder	-Enger & direkter Informationsaustausch mit PbA-Mitgliedern über die Ausschüsse hinaus	-Besuch der Institute durch PbA-Mitglieder, Besuch der PbA-Mitglieder, direkter Austausch von Informationen über Probleme, etc.	fortlaufend

4.2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
-Berichterstattung bei den Fachausschuss sitzungen des DVS (FA2)	-Abschließende Vorstellung der Forschungsergebnisse auf der Sitzung des FA2	-Vorstellung und abschließende Diskussion der Ergebnisse	-2011, richtet sich nach dem Termin der FA2-Sitzung
-Abschlussveröffent-lichung im Thermal Spray Bulletin des DVS-Verlag	-Großflächige und schnelle Verbreitung der For schungsergebnisse	-Fachveröffentlichung im Ther-mal Spray Bulletin	- Sommer 2011
-Transfer in d. Industrie	-Ausführliche Vorstellung der Forschungsergebnisse des Projektes und des gesam ten Forschungsclusters im PbA mit Diskussionsmög-lichkeit, Ergebnistransfer in die Wirtschaft	-Abschlusskolloquium zum gesamten Forschungsclusters (alle Projekte) mit Vorstellung und Diskussion der For-schungsergebnisse	- 1. Hälfte 2011

5 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse in KMU

Mit den Forschungsergebnissen können neuartige Pulver für klein- und mittelständige Unternehmen verschiedenster Industriezweige wie der allgemeinen Maschinenbauindustrie, der Druck- und Papierindustrie, der Kraftwerkstechnik, der Luftfahrtindustrie und der Automobilindustrie geliefert werden. Denkbar ist der Einsatz der Fe-Basis Schichten in allen Bereichen, in denen Bauteile durch thermisch gespritzte Schichten vor Verschleiß und Korrosion geschützt werden. Dabei bieten Fe-Basis-Schichten die Möglichkeit, Kosten für Beschichtungen signifikant zu verringern. Zusätzlich wird ein Schritt in Richtung umweltfreundlicher Werkstoffe getätigt, da diese Schichtsysteme eine mögliche Alternative zu Systemen auf Chrom- oder Nickel-Basis darstellen.

5.2 Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Die Fe-Basis-Feinstpulver werden die Eigenschaften konventioneller Schichtsysteme auf Basis grober Spritzpulver signifikant verbessern. Durch den Einsatz kostengünstiger Fe-Basis-Werkstoffe kann so die technologische Innovativität der klein- und mittelständigen Unternehmen gesteigert werden. Durch die Minimierung des Einsatzes von umweltschädlichen Substanzen wird ein Beitrag zu umweltfreundlichen Produkten geliefert. Dadurch wird die Vorreiterrolle Deutschlands und speziell der klein- und mittelständigen Unternehmen ausgebaut.

5.3 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der F&E-Ergebnisse nach Projektende

Wirtschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die kmU`s, die sich für die Mitarbeit im Projekt begleitenden Ausschuss bereiterklärt haben, sind aktiv an der Entwicklung des Vorhabens und der Diskussion der Ergebnisse beteiligt.

Sie signalisieren durch ihre Mitarbeit ein großes Interesse an den zu erwartenden Ergebnissen und am Transfer der Ergebnisse in die industrielle Praxis. Ein großer Nutzen gerade für kleinere Unternehmen ist die Entwicklung eines kostengünstigen Verdüsungssystems, dass auf vorhandener Spritztechnik aufbaut. Es ist so möglich Feinstpulver auch ohne große finanzielle Aufwendungen, und damit konkurrenzfähig zu finanzstärkeren Unternehmungen, herzustellen.

Einschätzung der Finanzierbarkeit einer anschließenden industriellen Umsetzung

Die Finanzierbarkeit einer industriellen Umsetzung, der in diesem Projekt entwickelten Forschungsergebnisse stellt keinerlei Problem da. Grundgedanke dieses Vorhabens war und ist die Verwendung von, in der Industrie weitverbreiteten und eingesetzten, Anlagentypen um für den Industrienutzer etwaige Anlagenanschaffungskosten ausschließen zu können. Somit sind neben einer standardmäßigen Lichtbogenspritzanlage nur noch Materialien und Eigenbauten im mittleren vierstelligen Gesamtinvestitionsbereich von Nöten. Ein weiterer Vorteil bezüglich der Finanzierbarkeit ist die Verwendung von Eisenbasislegierungen. Aufgrund der geringeren Kosten der Eisenbasislegierungen im Vergleich zu Nickelbasislegierungen, in der heutigen Zeit wird Nickel oft als spekulatives Gut an den Rohstoffbörsen gehandelt, gewinnt der Anwender aufgrund der Kostenreduktion im Materialeinsatz einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Mitbewerbern, die auf Ni-Basis-Legierungen setzen.