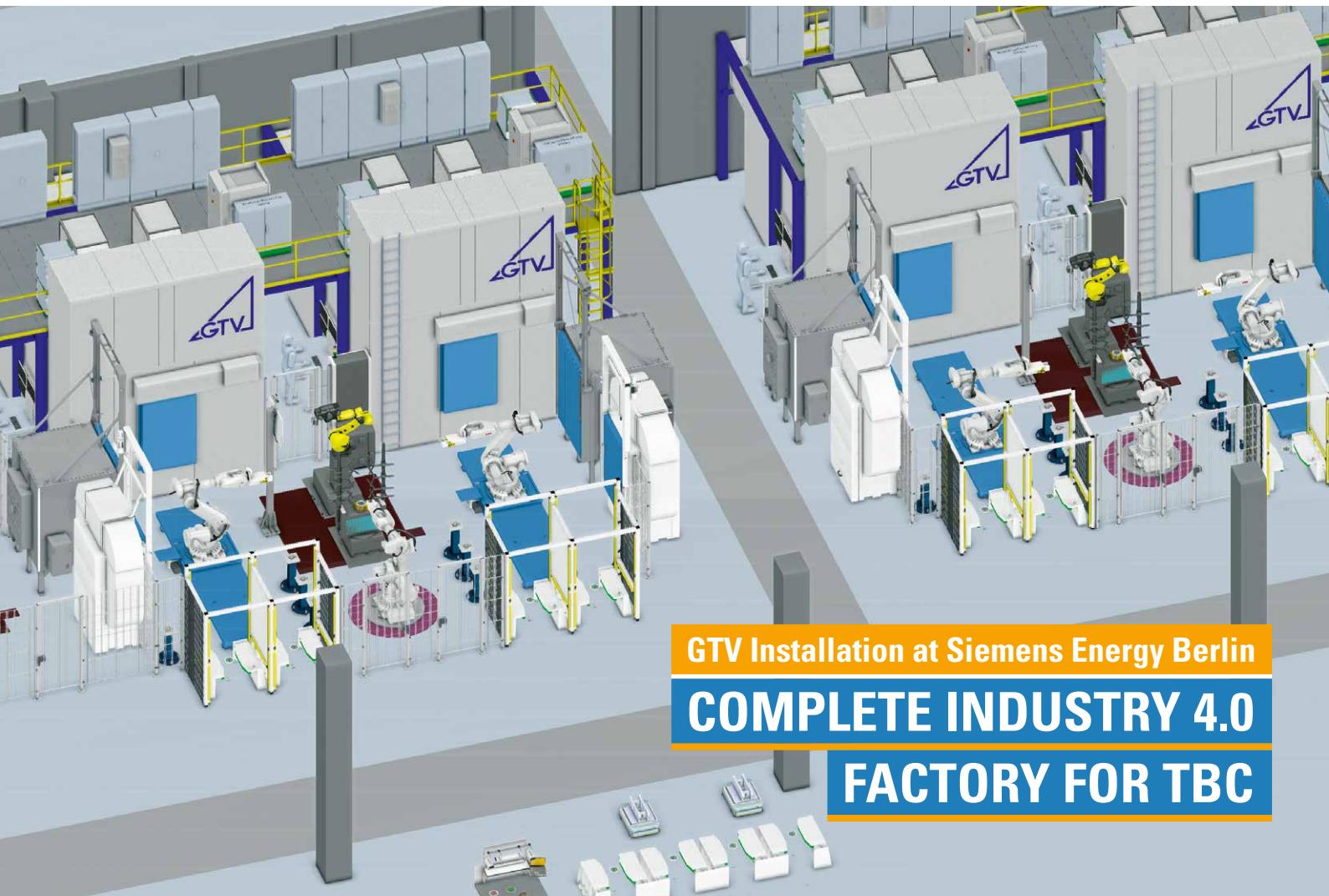


THERMAL SPRAY BULLETIN

www.thermal-spray-bulletin.info

+ **GTS**
Europe *STRahl*

- Simulation der Gas- und Partikelströmung in der Brennkammer und Austrittsdüse des HVOF-ID-Prozesses • Simulation of the Gas and Particle Flow in the Combustion Chamber and the Exit Nozzle of the HVOF ID Process • Kontrolle von Pulverströmen • Control of Powder Streams • Adaptive Bahnplanung für die additive Fertigung von Freiformgeometrien mittels Kaltgasspritzens • Adaptive Path Planning for Additive Manufacturing of Freeform Geometries Using Cold Spraying



GTV Verschleißschutz GmbH

Vor der Neuwiese 7
57629 Luckenbach | Germany
Phone: +49 (0) 2662 9576-0
Web: www.gtv-mbh.de | E-mail: office@gtv-mbh.de



Seit / Since 1983



Full Metal Anti-Aging with long-term effects.

Welding Materials with **built-in** wear protection

Approximately **66%** of this ad describes how Deloro Materials contribute to wear protection, corrosion resistance, or performance under high temperatures.

But that's not the point. What truly matters is that **100%** of all Deloro Materials used make components more efficient, longer-lasting, or support a more rugged maintenance strategy.

There's a small chance—around **5%**—that Deloro may not have a perfect off-the-shelf match from its portfolio of over 500 materials.

And guess what? **In that case, we'll simply develop it.**

Deloro's 500+ materials are available for four major application forms, tailored to key welding and coating processes: Weld deposition, Thermal spray application, Hot Isostatic Pressing (HIP), Additive manufacturing (e.g., 3D printing).

Visit Deloro at SCHWEISSEN & SCHNEIDEN in Essen for a free consultation and a **fortune cookie**. Or connect with us anytime via our brand-new website.

Discover our new **product finder** online. Materials for optimal results in synergy with Deloro's Welding Systems.



Get your
fortune cookie
at Hall 2 - A44
15. - 19.9.25



www.deloro.com

Persönlicher Austausch und Innovationen stehen im Mittelpunkt

Focus on personal interaction and innovations



Am 15. September öffnet die 21. Ausgabe der Weltleitmesse SCHWEISSEN & SCHNEIDEN ihre Tore. Sie steht in diesem Jahr unter dem Motto „Join the Future“ – und für dieses Motto steht auch der DVS, der die technologische Weiterentwicklung der rund 250 verschiedenen Verfahren des Fügens, Trennens und Beschichtens kontinuierlich vorantreibt.

Neben der Füge- und Trenntechnik ist die Beschichtungstechnik ein bedeutender Bestandteil der SCHWEISSEN & SCHNEIDEN 2025. Unser Partner, die Gemeinschaft Thermisches Spritzen e. V. (GTS), und einige Unternehmen aus der Beschichtungsbranche werden auf der Weltleitmesse vertreten sein. Die Beschichtungstrends sind vielfältig: In der Energie- und Automobilindustrie wächst der Bedarf an elektrischen Isolationsschutzschichten, die Schichtqualität wird durch Online-Überwachung kontinuierlich verbessert und Nanomaterialien kommen in Schichtsystemen zunehmend zum Einsatz. Der Einsatz von Robotern und automatisierten Systemen macht den Spritzprozess präziser, effizienter und wiederholbarer, was die Qualität der Beschichtungen erhöht. Weiterhin gibt es einen Trend hin zu umweltfreundlicheren Spritztechniken und Schichtsystemen, die weniger Emissionen und Abfall produzieren. Darüber hinaus bieten die Beschichtungstechnologien eine Basis für neue Anwendungen der additiven Fertigung.

Gemeinsam mit der GTS setzt sich der DVS aktiv dafür ein, auch andere Branchen für die faszinierenden Oberflächentechniken zu begeistern. Wir freuen uns auf ein Wiedersehen mit der Branche und auf den persönlichen Austausch. In einer Zeit, in der digitale Formate längst zum Alltag gehören, zeigt sich besonders bei Veranstaltungen wie der SCHWEISSEN & SCHNEIDEN, wie wertvoll der direkte Kontakt vor Ort ist. Das persönliche Wiedersehen weltweit agierender Innovatoren und die Möglichkeit, spontan ins Gespräch zu kommen, schaffen eine einzigartige Atmosphäre. Genau diese Kraft macht unsere Messe zu einem unverzichtbaren Ereignis. Die 21. Ausgabe der Fachmesse stellt für Aussteller und Besucher eine bedeutende Plattform dar, um in den namensgebenden Technologiefeldern der Branche Neugkeiten zu entdecken. Der DVS-Gemeinschaftsstand 3A23 in Halle 3 auf der SCHWEISSEN & SCHNEIDEN ist traditionell ein zentraler Anlaufpunkt für alle Besucher der Messe. Fünf Tage lang steht der Austausch mit Fachleuten im Mittelpunkt.

Wir sind stolz, dieses Großereignis als Kooperationspartner seit über 50 Jahren kontinuierlich zu begleiten und laden Sie herzlich ein, unseren Stand zu besuchen!

The 21st edition of the world's premier fair, SCHWEISSEN & SCHNEIDEN, is opening its doors on September 15. This year, it is bearing the motto: "Join the Future" - and this motto is also being supported by DVS which is continuously pushing ahead with the technological advancement of the around 250 different processes for joining, cutting and surfacing.

In addition to joining and cutting technologies, surfacing technology is a significant constituent of SCHWEISSEN & SCHNEIDEN 2025. Our partner, the Association of Thermal Sprayers (GTS), and a few companies from the surfacing sector are represented at the world's premier fair. The surfacing trends are diverse: The energy and automobile industries are exhibiting a growing need for electrical insulation protection coatings, the coating quality is being improved continuously as a result of online monitoring and nanomaterials are being utilised in coating systems to an increasing extent. The utilisation of robots and automated systems is making the spraying process more precise, more efficient and more repeatable and is thus enhancing the quality of the coatings. Furthermore, there is a trend towards more environmentally friendly spraying technologies and coating systems which produce fewer emissions and less waste. Moreover, the surfacing technologies are offering a basis for new applications of additive manufacturing.

Together with GTS, DVS is actively committed to also making other sectors enthusiastic about the fascinating surface technologies. We are looking forward to seeing the sector again and to interacting in person.

In times when digital formats have long since become part of everyday life, it is particularly events such as SCHWEISSEN & SCHNEIDEN which are showing how valuable the direct contact in situ is. A unique atmosphere is being created by the fact that globally active innovators are seeing each other in person and can spontaneously enter into discussions. Precisely this force is making our fair an indispensable event. The 21st edition of the trade fair constitutes a significant platform for exhibitors and visitors in order to discover innovations in those technological fields of the sector which give the fair its name. DVS's cooperative booth 3A23 in Hall 3 at SCHWEISSEN & SCHNEIDEN is traditionally a central contact point for all the visitors to the fair. Five days' long, attention is focusing on the interaction with specialists.

We are proud to have continuously accompanied this large-scale event as a cooperation partner for over 50 years and are cordially inviting you to visit our booth!

Susanne Szczesny-Oßing
DVS-Präsidentin President of DVS

Dr.-Ing. Roland Boecking
DVS-Hauptgeschäftsführer Managing Director of DVS

Autor Author	Seite Page
Baumann, Ingó	88, 104
Ferreira, Manuel	88
Hauser, Enrico	96
Königstein, Tim	96
Kuhlenkötter, Bernd	104
Möllensiep, Dennis	104
Mülln, Melissa	96
Said, Ahmad	88
Schein, Jochen	88
Schmengler, Christian	96
Tillmann, Wolfgang	88, 104
Wank, Andreas	96
Wietheger, Wolfgang	84
Zajaczkowski, Jonas	104
Stephan Zimmermann	88

Aktuelles

- 74** Potenziale, Grenzen und Perspektiven des handgeführten Laserstrahl-schweißen in Füge- und Beschichtungsanwendungen – ein Interview

Aus Unternehmen

- 76** Oerlikon Metco: Modulare Plattformen für skalierbare Anwendungen im Thermischen Spritzen
- 78** Metco Joining und Cladding: Werkstoffinnovationen für extreme Einsatzbedingungen
- 80** T-Spray: Zweimotoriger Maschinenbrenner für optimiertes Lichtbogendrahtspritzen

Veranstaltungen

- 83** Rückblick auf die ITSC 2025 und Ausblick auf 2026

Fachbeiträge

- 84** Maßgeschneiderte Armaturenbeschichtungen für den Einsatz in Wasserstoffanwendungen
KVT Kurlbaum GmbH, Osterholz-Scharmbeck

Wissenschaftliche Fachbeiträge

- 88** Numerische Simulation der Gas- und Partikelströmung in der Brennkammer und Austrittsdüse des HVOF-Internal-Diameter-Prozesses
*Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT), Technische Universität Dortmund
Institut für Plasmatechnik und Mathematik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg*
- 96** Kontrolle von Pulverströmen in der Beschichtungstechnik
GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach
- 104** Adaptive Bahnplanung für die additive Fertigung von Freiformgeometrien mittels Kaltgasspritzens
*Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT), Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum*

Weitere Rubriken

- 112** Impressum
- 113** Bezugsquellenverzeichnis
- 126** Inserentenverzeichnis

GTS-Strahl

- III** Vorwort
- IV** Das Schwarze Brett
- VI** Bericht der GTS-Geschäftsstelle
- VII** Zahlen und Fakten aus der GTS-Geschäftsstelle
- VII** Mitglieder mit GTS-Zertifikat
- VIII** GTS-Beiträge
- XIII** Aus unseren Mitgliedsbetrieben
- XXIV** GTS-Services: GTS-Rundschreiben 2025
- XXIV** GTS-Services: Termine und Veranstaltungen

News

- 74** Potentials, Limitations, and Perspectives of Handheld Laser Beam Welding in Joining and Coating Applications – An Interview

from Companies

- 76** Oerlikon Metco: Modular Surface Platforms for Scalable Thermal Spray Operations
- 78** Metco Joining and Cladding: Advancing Materials Innovation for Harsh Environments
- 80** T-Spray: Twin-Motor Machine Torch for Optimized Wire Arc Spraying

Events

- 83** Review of ITSC 2025 and Outlook for 2026

Specialist Articles

- 84** Tailored Valve Coatings for Use in Hydrogen Applications
KVT Kuribaum GmbH, Osterholz-Scharmbeck

Peer-reviewed Papers

- 88** Numerical Simulation of the Gas and Particle Flow in the Combustion Chamber and the Exit Nozzle of the HVOF Internal Diameter Process
Chair of Materials Technology, Technische Universität Dortmund
Institute for Plasma Technology and Mathematics, Universität der Bundeswehr München
- 96** Control of Powder Streams in Coating Technologies
GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach
- 104** Adaptive Path Planning for Additive Manufacturing of Freeform Geometries Using Cold Spraying
Chair of Materials Technology, Technische Universität Dortmund and Chair of Production Systems, Ruhr-Universität Bochum

Regular Features

- 112** Imprint
- 113** Buyers guide
- 126** Advertiser listing

Publish your scientific specialist article as a „peer-reviewed paper“ in THERMAL SPRAY BULLETIN.

Send your manuscript offer to nicole.stramka@dvs-media.info. You can find information about the scope, the structure, the external form etc. at <https://t1p.de/vkxfx>

Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH

Qualität aus Deutschland seit 1948



www.metallspritztechnik.de

+49(0)33434 1550-00

info@metallspritztechnik.de

Metall-, Carbid- und Keramikbeschichtungen
HVOF-, Plasma-, Kaltgas-, Flamm- und Lichtbogenspritzen



Potenziale, Grenzen und Perspektiven des handgeführten Laserstrahlschweißens in Füge- und Beschichtungsanwendungen – ein Interview

Potentials, Limitations, and Perspectives of Handheld Laser Beam Welding in Joining and Coating Applications – An Interview

Das handgeführte Laserstrahlschweißen hat sich in den vergangenen Jahren von einer Nischentechnologie zu einer Option im Bereich des Verbindungsschweißens entwickelt. Sinkende Systemkosten, kompaktere Bauformen und der Bedarf an flexiblen, mobil einsetzbaren Lösungen fördern den industriellen Einsatz. Aufgrund der Vorteile, beispielsweise höhere Schweißgeschwindigkeit und geringere Energieeinbringung, kommen aktuell Ansätze auf, das Verfahren auch für Reparatur- und Beschichtungszwecke einzusetzen.

Im folgenden Interview erläutert Dr.-Ing. Simon Jahn – einer der Autoren des Beitrags „Handgeführtes Laserstrahlschweißen: Neue Wege für die Konstruktion und Instandhaltung“ (im GTS-Strahl, S. XVIII) – seine Einschätzungen zu den Potenzialen und Grenzen des Verfahrens im Vergleich zu anderen Beschichtungsmethoden. Er gibt Einblicke in technische Unterschiede, mögliche Synergien und Perspektiven – und zeigt auf, in welchen Fällen sich das handgeführte Laserstrahlschweißen als Ergänzung, Alternative oder sogar als Ersatz etablieren könnte.

Herr Dr. Jahn, wie ordnen Sie den Einsatz des handgeführten Laserstrahlschweißens bei der Instandsetzung verschleißbeanspruchter Funktionsflächen ein?

Im Vergleich zum Verbindungsschweißen, wo das Verfahren sich

immer mehr etabliert, befindet sich das handgeführte Verfahren im Bereich des Beschichtens noch in den Kinderschuhen. Beim Fügen von Bau- teilen führen die hohen Schweißgeschwindigkeiten sowie die geringe Energieeinbringung zu signifikant reduzierten Streckenenergien und somit zu deutlich minimierten Verzügen. Daraus resultiert auch ein geringerer Nachbearbeitungsaufwand, beispielsweise Richtarbeiten. Firmen berichten beim Verbindungsschweißen von einem 30 % höheren Durchsatz in der Schweißerei, allein basierend auf dem Austausch des Schweißverfahrens. Um beim Verbindungsschweißen von Kehlnähten das geforderte A-Maß zu erzielen, zählen Mehrdrahtzufuhrreinheiten zum Standard, je nach Hersteller mit bis zu drei Drähten.

Welche Unterschiede in Haftung, Aufmischung und Schichtdicke ergeben sich im Vergleich zu typischen anderen metallischen Beschichtungsverfahren?

Die ersten Ergebnisse aus Beschichtungsexperimenten bestätigen, dass die Eigenschaften des automatisierten Laserauftragschweißen auch für die handgeführte Variante vorliegen. Dort wurden bisher jedoch vor allem Pulver als Zusatzwerkstoff eingesetzt. Mit dem handgeführten Ansatz steigt für uns wahrnehmbar auch das Interesse an drahtförmigen Zusatzwerkstoffen, auch für das au-

In recent years, handheld laser beam welding has evolved from a niche technology into an option in the field of joining. Declining system costs, more compact system designs, and the demand for flexible, mobile solutions foster industrial adoption. Due to its advantages, such as higher welding speeds and lower heat input, current approaches are emerging to also apply the process for repair and coating purposes.

In the following interview, Dr. Simon Jahn – one of the authors of the article "Handheld Laser Beam Welding: New Approaches for Design and Maintenance" (in GTS-Strahl, pp. XVIII) – shares his assessment of the potentials and limitations of the process in comparison to other coating methods. He provides insights into technical differences, possible synergies, and perspectives – and points out in which cases handheld laser beam welding could establish itself as a complement, an alternative, or even a substitute.

Dr. Jahn, how do you assess the use of handheld laser beam welding in the repair of wear-exposed functional surfaces?

Compared to welding, where the process is becoming increasingly established, the handheld variant in the field of coating is still at an early stage of development. In component joining, the high welding speeds as well as the lower heat input lead to significantly reduced heat input per unit length, and thus to markedly minimized distortion. As a result, the amount of post-weld rework, such as straightening operations, is also reduced. Companies report up to 30 % higher throughput in welding operations solely based on changing the welding process. To achieve the required throat thickness when welding fillet welds, multi-wire feeding units have become standard in joining, with up to three wires depending on the manufacturer.

Dr.-Ing. Simon Jahn, Geschäftsführer der Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH (ifw Jena), ist Experte für das handgeführte Laserstrahlschweißen. (© ifw Jena)

Dr.-Ing. Simon Jahn, Managing Director of the Institute for Joining Technology and Materials Testing (ifw Jena), is an expert in hand-held laser beam welding. (© ifw Jena)

tomatisierte Laserauftragschweißen. Aufgrund der stoffschlüssigen Verbindung beim Schweißen liegen hohe Festigkeiten in der Fügezone vor. Über Laserleistung und Vorschub können die Aufmischung und die sich ergebende Schichtdicke kontrolliert werden.

Für welche Anwendungen, die heute thermisch beschichtet werden, könnte das handgeführte Laserstrahlschweißen aus Ihrer Sicht in Zukunft zum Einsatz kommen?

Zum einen bei kleinen bzw. filigranen Bauteilen und zum anderen bei Anwendungen, bei denen eine Schweißverbindung vorliegen muss, die Aufmischung aber geringer ausfallen soll. Im Vergleich zu anderen „Energieeinbringern“ kann der Laserstrahl sehr präzise eingestellt werden. Neben der Leistung sind Fokusdurchmesser und Strahlpendeln weitere Variablen, um die Energieeinbringung zu kontrollieren.

Sie betonen die Möglichkeit, schwer zugängliche Geometrien präzise zu beschichten. Könnte dies eine Lücke schließen, in der andere Verfahren an ihre Grenzen stoßen?

Im Vergleich zu anderen Prozessen können handgeführte Laserköpfe klein ausfallen und damit Vorteile hinsichtlich Zugänglichkeit besitzen. Auch bietet die drahtförmige Drahtzufuhr Vorteile bei bestimmten Geometrien, beispielsweise beim Einsatz über Kopf. Aufgrund des kleinen Schmelzbades können Überkopfschweißun-

gen einfacher im Vergleich zu Lichtbogenprozessen ausgeführt werden.

Sie erwarten, dass das handgeführte Laserstrahlschweißen künftig auch mit dem konventionellen Lichtbogenschweißen konkurrieren wird. Sehen Sie eine ähnliche Entwicklung in Bezug auf das thermische Beschichten?

Im Fall des konventionellen Lichtbogenschweißens zum Fügen existiert die Konkurrenzsituation bereits. Für den Einsatz zum Beschichten liegen jedoch aktuell zu wenig Erfahrungen vor, um dies zu beurteilen. Das Potenzial liegt aus meiner Sicht jedoch vor.

Gibt es sicherheitstechnische oder normative Hürden, die derzeit den breiteren Einsatz laserbasierter Beschichtungen im Umfeld des thermischen Beschichtens bremsen?

Ja, insbesondere für Einsteiger in die Lasermaterialbearbeitung. Ist bereits ein Laser dafür im Unternehmen vorhanden, beispielsweise zum Schneiden oder Schweißen, so muss ein Laserschutzbeauftragter (LSB) benannt sein. Wenn nicht, sind häufig auch die Anforderungen der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) unbekannt. Neben dem LSB bestehen auch Forderungen hinsichtlich der Ein- bzw. Umhausung des Arbeitsplatzes, um die Laserstrahlung abzuschirmen.

Vielen Dank für das Gespräch.

What differences in adhesion, dilution, and coating thickness arise compared to typical metallic coating processes?

The first results from coating experiments confirm that the properties of automated laser cladding are also present in the handheld variant. However, powders have so far been predominantly used as filler materials. With the handheld approach, we also perceive a noticeable increase in interest in wire-shaped filler materials, including for automated laser cladding. Due to the metallurgical bond created in welding, high strengths are achieved in the fusion zone. Laser power and travel speed allow both dilution and the resulting coating thickness to be controlled.

For which applications that are thermally coated today could handheld laser beam welding, in your view, be applied in the future?

On the one hand, for small or filigree components, and on the other hand for applications where a welded joint must be present, but dilution should remain low. Compared to other “energy sources,” the laser beam can be adjusted very precisely. In addition to power, focus diameter and beam oscillation are further variables to control energy input.

You emphasize the possibility of precisely coating hard-to-access geometries. Could this close a gap where other processes reach their limits?

Compared to other processes, handheld laser heads can be built very

compact, thus offering advantages in terms of accessibility. Wire feeding also provides benefits in certain geometries, for example in overhead applications. Due to the small weld pool, overhead welding can be performed more easily compared to arc processes.

You expect handheld laser beam welding to compete with conventional arc welding in the future. Do you foresee a similar development with regard to thermal coating?

In the case of conventional arc welding for joining, the competitive situation already exists. For coating applications, however, there is currently too little experience to make a reliable assessment. In my view, though, the potential is present.

Are there safety-related or regulatory hurdles that currently slow the broader adoption of laser-based coatings in the environment of thermal coating?

Yes, particularly for newcomers to laser material processing. If a laser is already available in the company, for example for cutting or welding, a laser safety officer (LSO) must be appointed. If not, companies are often unfamiliar with the requirements of the German Ordinance on Occupational Safety regarding Artificial Optical Radiation (OStrV). In addition to the LSO, there are also requirements concerning the enclosure of the workplace in order to shield the laser radiation.

Thank you for the interview.



Bedrijvenweg 10 5386KA Geffen
www.bekkersmetaalspuitwerken.nl

Reparatur, Überholung und Nachhaltigkeit von mechanischen Komponenten

Oerlikon Metco: Modulare Plattformen für skalierbare Anwendungen im Thermischen Spritzen

Oerlikon Metco: Modular Surface Platforms for Scalable Thermal Spray Operations

Die Technologie des Thermischen Spritzens wurde seit ihren Anfängen kontinuierlich weiterentwickelt, um steigende Anforderungen an Präzision, Wiederholbarkeit und Effizienz zu erfüllen. Oerlikon Metco begegnet diesen Anforderungen mit der *Surface Plattform* – einer modularen Systemlösung für skalierbare, automatisierbare und prozessstabile Anlagen für Thermisches Spritzen.

Die 2018 eingeführte *Surface One-Plattform* markiert einen klaren technologischen Schritt weg von konventionellen Anlagen für thermisches Spritzen. Ihr modulares Design ermöglicht eine verkürzte Installationszeit, einfache Standortwechsel sowie einen standardisierten Betrieb über verschiedene Produktionsumgebungen hinweg. Diese Architektur bildet die Grundlage für *Surface Two*, die 2025 vorgestellt wurde und auf größere Bauteildimensionen sowie höhere Produktionsvolumen ausgelegt ist.

Technische Merkmale

Beide Plattformen bestehen aus zwei Modulen: dem Beschichtungsmodul mit automatisierter Roboterführung, bis zu vier Pulverzuführungen und flexibel konfigurierbarer Teilehandhabung sowie dem Prozessmodul mit *MultiCoat 5-Steuerung*, Energieversorgung, Gasmanagement und Kühlinfrastruktur. Die standardisierte Architektur sorgt für hohe Betriebssicherheit und reduziert anlagenbedingte Unterschiede auf ein Minimum. Die Plattformen unterstützen thermische Spritzverfahren wie atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), HVOF (Gas- und Flüssigbrennstoff) sowie Pulverflammspritzen und ermöglichen eine anwendungsspezifische Anpassung der Systemkonfiguration. Anlagen, die initial mit reduzierter Prozessausstattung bestellt werden, können nachträglich aufgerüstet



Surface One und Surface Two: Die Plattformen unterstützen thermische Spritzverfahren wie atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), HVOF (Gas- und Flüssigbrennstoff) sowie Pulverflammspritzen. (© Oerlikon Metco)

Surface One and Surface Two: The platforms support thermal spray processes atmospheric plasma spray (APS), HVOF (gas- and liquid-fueled), and combustion powder spray. (© Oerlikon Metco)

werden, wodurch eine flexible Reaktion auf veränderte Produktionsanforderungen möglich ist. Die automatisierten Varianten *Surface One K2* und *Surface Two K2* sind für die kontinuierliche karussellbasierte Produktion kleinerer bzw. größerer Bauteile ausgelegt. Sie entlasten den Bediener und verbessern Wiederholbarkeit sowie Prozesskontrolle, insbesondere in Luftfahrt, Energie und Medizintechnik. Ein zentrales Merkmal der Oberflächenplattformen ist das mittels CFD optimierte Luftstromdesign, das Overspray-Erfassung und Partikelbelastung reduziert und so eine sauberere Arbeitsumgebung schafft. Durch die vollständige Integration technischer Komponenten wie Kabelkanälen wird die Wartung vereinfacht, die Reinigung beschleunigt und die Arbeitssicherheit erhöht.

Mit IIoT-Schnittstellen und Ferndiagnose unterstützen die Plattformen digitale Fertigungskonzepte und Industrie 4.0. Robuste Bauweise, einheitliche Systemarchitektur und modulare Erweiterbarkeit machen sie ideal für die Modernisierung oder den Ausbau thermischer Spritzanlagen bei hohen Sicherheits- und Qualitätsanforderungen.

Quelle: Oerlikon Metco

power supply, gas management and cooling infrastructure. This standardized architecture promotes operational stability and minimizes variation between installations.

The platforms support thermal spray processes atmospheric plasma spray (APS), HVOF (gas- and liquid-fueled) and combustion powder spray and allowing users to tailor configurations to specific application needs. Systems ordered with fewer processes can be upgraded post-installation, providing flexibility as production requirements evolve.

Automation-oriented variants, *Surface One K2* and *Surface Two K2*, are engineered for continuous, carousel-based production of smaller and larger parts, respectively. These configurations help reduce operator exposure while improving repeatability and process control, particularly in aerospace, energy and medical applications.

A distinguishing aspect of the Surface Platforms is their computational fluid dynamics (CFD)-optimized airflow design. This approach improves overspray capture, reduces airborne particulates and contributes to cleaner operating environments. The absence of internal cable trays and obstructions also simplifies maintenance and accelerates cleaning cycles.

Equipped with IIoT interfaces and remote diagnostics capabilities, the platforms align with digital manufacturing strategies and Industry 4.0 objectives. Their robust construction, consistent system architecture and modular expandability make them well-suited for facilities aiming to modernize or scale up thermal spray operations while maintaining high standards of safety and coating quality.

Source: Oerlikon Metco

*Advanced materials and
services for extreme
wear and impact*

We're not reinventing the process - We're innovating higher performance.

As a global materials powerhouse, we don't just supply materials—we engineer breakthroughs.

From powders to wires, rods to electrodes, our solutions innovate processes like laser cladding, PTA, MIG, and TIG. But it's our big data-driven development that truly sets us apart.

Here's what we deliver:

- Longer-lasting components under extreme abrasion and impact
- High-performance single-layer solutions for maximum efficiency
- Crack-free multi-layer welding with >55 HRC hardness

Let's find the material solution that meets your toughest challenges.

You know the process, we make it perform



Visit us at Schweissen & Schneiden
September 15th - 19th
Hall 2, Booth 2D39
www.metcojoiningcladding.com

metco
joining & cladding

Metco Joining und Cladding: Werkstoffinnovationen für extreme Einsatzbedingungen

Metco Joining and Cladding: Advancing Materials Innovation for Harsh Environments

Metco Joining & Cladding (MJC) ist ein weltweit führender Anbieter fortgeschrittlicher Materialinnovationen zur Steigerung von Effizienz und Zuverlässigkeit in Industriebranchen wie Energie, Bergbau, Öl & Gas, Luft- und Raumfahrt sowie Automobilbau.

Werkstofflösungen gegen Verschleiß und Korrosion

MJC bietet ein umfassendes Portfolio an Werkstoffen, die speziell für extreme Verschleiß- und Korrosionsbedingungen entwickelt wurden:

- Schweißdrähte und -stäbe
- Selbstfließende Legierungen
- Hartlötpulver, -pasten und -bänder
- Pulver für Laserstrahlauflagerschweißen und PTA-Verfahren
- Eisen-, Nickel- und Kobaltbasislegierungen
- Karbide und Karbidmischungen
- *Scoperta*: eine Software zur schnellen Entwicklung von Werkstoffen und Legierungen

Eine Neuheit ist *Metco 8226* – ein Eisenbasiertes Schweißdraht, der während des Schweißprozesses harte Molybdänborid-Ausscheidungen bildet. Das Ergebnis ist eine feinkörnige, homogene Gefügestruktur mit einer Beständigkeit gegen Abrieb und Erosion durch Schlamm, die mit Wolframkarbid-Auftragschweißungen vergleichbar ist – jedoch ohne die damit verbundenen Kosten. *Metco 8226* verhindert das Herausbrechen von Karbiden, eine häufige Schadensursache, die den Matrixverschleiß deutlich beschleunigt.

Für eine verlängerte Standzeit kann *Metco 8226-SLW* als zweite Schicht aufgetragen werden. Dabei bleibt die Leistung des ursprünglichen Auftrags erhalten, während gleichzeitig dicke und langlebige Beschichtungen möglich sind. Diese Werkstoffe sind mit gängigen Schweißverfahren wie Metallschutzgasschweißen (GMAW), Unterpulverschweißen (UP) und Autogen-schweißen (OA) kompatibel und lassen sich vor Ort problemlos einsetzen.



Auftragschweißen für Bodenbearbeitungswerkzeuge (GETs) (© Oerlikon Metco)

Hardfacing for Ground Engaging Tools (GETs) (© Oerlikon Metco)

Leistungsmerkmale

- Abriebwiderstand: entspricht dem von Wolframkarbid-Auftragschweißungen und übertrifft deutlich den von Chromkarbid-Auftragschweißungen.
- Schlagzähigkeit: Überlegen gegenüber Wolframkarbid- und Chromkarbid-Auftragschweißungen mit hoher Beständigkeit gegen zyklische Belastungen.
- Beständig gegen Schlammabrasion: Hervorragende Leistung in Hochgeschwindigkeits-Schlammströmungen, validiert durch ASTM G65 und Schlammstrahlprüfungen.

Anwendungsbereiche

MJC-Lösungen sind in kritischen Anwendungen bewährt, wie zum Beispiel:

- Bremsenbeläge und Kolbenring-nuten (Automobilindustrie)
- Wabendichtungen und Diffusions-hartlöten (Luft- und Raumfahrt)
- Bohrköpfe, Stabilisatoren und Saug-stangenkupplungen (Öl- und Gasindustrie)
- Verschleißplatten, Brecherkom-ponenten und Hydraulikzylinder (Bergbau und Schwerindustrie)

MJC intensiviert kontinuierlich seine Marktpräsenz im Bereich der Plat-tier- und Auftragschweißtechnologien. Quelle: Oerlikon Metco

eliminates carbide pull-out, a common failure mode that accelerates matrix wear.

For extended service life, *Metco 8226-SLW* can be applied as a second layer, maintaining the performance of the original deposit while enabling thicker, more durable coatings. These materials are compatible with conventional welding processes such as GMAW, SAW and OA and can be easily repaired in the field.

Performance Highlights

- Abrasion Resistance: Comparable to tungsten carbide overlays and significantly better than chromium carbide overlays.
- Impact Resistance: Superior to both tungsten carbide and CCO, with high durability under repeated stress.
- Slurry Erosion Resistance: Excellent performance in high-velocity slurry environments, validated through ASTM G65 and slurry jet testing.

Application areas

MJC solutions are trusted in critical applications such as:

- Brake disc coatings and piston ring groovers (automotive)
- Honeycomb seals and diffusion brazing (aerospace)
- Drill bits, stabilizers and sucker rod couplings (oil and gas)
- Wear plates, crushing components and hydraulic cylinders (mining and heavy industry)

MJC continues to expand its footprint in the welding and cladding market. The brand's focus on innovation, customer-centric development and operational excellence positions it as a trusted partner for industries seeking to extend equipment life, reduce downtime and improve performance.

Source: Oerlikon Metco



Thermal Spray Advanced Powders

Exploring the boundaries of what's possible with every surface we encounter.

Linde Advanced Material Technologies
(Formerly known as Praxair Surface Technologies)

Are you ready to elevate your business operations? Linde Advanced Material Technologies can help optimize your processes with advanced materials and innovative technologies, boosting your productivity and profitability.

We offer a comprehensive range of thermal spray powders, including carbide, ceramic, MCrAlY, and metal alloys, as well as thermal spray wires and coating systems like Arc Spray, HVOF, and Plasma Spray.

Our goal is to enhance your equipment's durability, increase efficiency, and reduce downtime. Contact us today to discover how we can support your success.

FABTECH
September 8-11, 2025 | Chicago, IL, US

Come visit us in
Booth #B16100

Linde Advanced Material Technologies
Linde AMT GmbH, Am Mühlbach 13, 87487 Wiggensbach, Germany
Phone +49 (0) 8370 92070 | AME.Europe@linde.com | www.linde-amt.com

Making our world more productive

T-Spray: Zweimotoriger Maschinenbrenner für optimiertes Lichtbogendrahtspritzen

T-Spray: Twin-Motor Machine Torch for Optimized Wire Arc Spraying

Die T-Spray GmbH, ein Spezialist im Bereich thermische Spritzverfahren und Automatisierung, bietet individuelle Kundenlösungen von der Idee über die 3D-Konstruktion, Fertigung und Montage bis zur Inbetriebnahme der Anlage. Der Fokus des Unternehmens liegt auf dem Lichtbogendrahtspritzen, das unter den thermischen Beschichtungsverfahren als besonders wirtschaftlich gilt und mit dem immer bessere Schichtqualitäten hergestellt werden können. Ein zentrales Element für die Qualität und Effizienz beim Lichtbogendrahtspritzen ist der Drahtvorschub. Eine an den Spritzwerkstoff angepasste Drahtvorschubgeschwindigkeit, ist einer der wichtigsten Parameter für den Prozess. In Gesprächen mit Kunden erfuhr Geschäftsführer Jürgen Bosler, dass es am Markt einen Bedarf für einen Lichtbogenbrenner gibt, der in der Lage ist, die Vorschubparameter auf beide Drähte individuell einzustellen. Ein Prototyp entstand. In Zusammenarbeit mit der Hochschule Zwickau wurden Hochgeschwindigkeitsuntersuchungen durchgeführt, um den Beschichtungsprozess zu analysieren. Anhand dieser Ergebnisse wurden entsprechende Optimierungen durchgeführt. Inzwischen ist der zweimotorige Maschinenbrenner bei den ersten Kunden im Einsatz und hat diese überzeugt.

Erweitertes Anwendungsspektrum

Mit der Entwicklung des zweimotorigen Maschinenbrenners wurde das Anwendungsspektrum des Lichtbogendrahtspritzens erheblich erweitert. Bei diesem Brenner kann die Drahtvorschubgeschwindigkeit der beiden Drähte einzeln eingestellt werden. Dadurch lässt sich beim Einsatz von zwei gleichen Drähten das asymmetrische Abschmelzverhalten an Anode und Kathode gezielt ausgleichen. Ein weiterer Vorteil des zweimotori-



Bild 1: Bei dem zweimotorigen Maschinenbrenner kann die Drahtvorschubgeschwindigkeit der beiden Drähte einzeln eingestellt werden. (© T-Spray)

Fig. 1: The wire feed speed of the two wires can be set individually on the twin-motor machine torch. (© T-Spray)

gen Maschinenbrenners besteht in der Möglichkeit, zwei Drähte mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften zu verarbeiten. So lassen sich beispielsweise hoch- und niedrigschmelzende Drähte oder auch Kombinationen aus Massiv- und Fülldrähten besser aufeinander abstimmen. Durch die getrennte Steuerung der Drahtvorschubgeschwindigkeit kann das Abschmelzverhalten jedes Drahts individuell an seine physikalischen Eigenschaften angepasst werden. Mit dieser Flexi-

T-Spray GmbH, a specialist in thermal spray processes and automation, offers tailored customer solutions ranging from concept development and 3D design to manufacturing, assembly and system commissioning. The company's primary focus is on wire arc spraying, a thermal spray process regarded as particularly cost-effective and increasingly capable of delivering high coating quality. A key factor in coating quality and process efficiency in wire arc spraying is the wire feed sys-

tem. Wire feed speed, when precisely adapted to the spray material, is among the most critical process parameters.

In discussions with customers, Managing Director Jürgen Bosler identified a need in the market for an arc spray torch that allows for independent adjustment of feed parameters for each wire. A prototype was subsequently developed. In cooperation with the University of Applied Sciences Zwickau, high-speed imaging and process diagnostics were used to analyze the coating process. Based on these investigations, targeted optimizations were implemented. The resulting twin-motor machine torch is now in operation with several customers and has proven effective.

Expanded Application Potential

The development of the twin-motor machine torch has significantly expanded the application range of wire arc spraying. The torch enables independent control of the wire feed speed for both wires. This makes it possible to actively compensate for the asymmetric melting behavior at the anode and cathode when using identical wires.



Bild 2: Der Brenner kann optional mit einem sekundären Zerstäubergas betrieben werden. Diese zusätzliche Zerstäubung beeinflusst die Spritzpartikel und den Spritzstrahl. (© T-Spray)

Fig. 2: The torch can optionally be operated with a secondary atomizing gas. This additional atomization influences both the particle stream and the spraying jet. (© T-Spray)

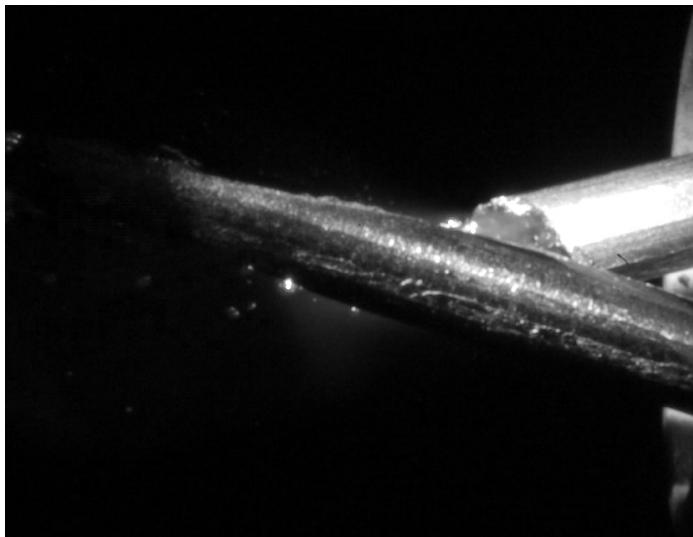


Bild 3: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Prozesses mit nur einem Antrieb; Ergebnis: ein unterschiedliches Abschmelzverhalten der Drähte (© T-Spray)



Fig. 3: A High-speed imaging of a process with a single drive; result: a uneven melting behavior of the wires (© T-Spray)

Fig. 4: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Prozesses mit zwei Antrieben und einem auf die unterschiedlichen Drähte angepassten Drahtvorschub; Ergebnis: ein gleichmäßiges Abschmelzverhalten der Drähte (© T-Spray)

bilität lassen sich maßgeschneidernte Schichtsysteme mit kombinierten Eigenschaften erzeugen – etwa durch die gleichzeitige Erhöhung von Härte, Verschleiß- und Korrosionsschutz oder die gezielte Reduktion der Porosität. Auf diese Weise lassen sich anwendungsspezifische Schichteigenschaften realisieren, die mit herkömmlichen Ein-Draht-Systemen nicht oder nur eingeschränkt erreichbar sind.

Technische Details

Beim Lichtbogendrahtspritzen ist ein gleichmäßiger Drahtvorschub von entscheidender Bedeutung. Daher wurden alle Brennervarianten mit einem Vier-Rollen-Antriebssystem ausgestattet, bei dem sowohl An-

triebs- als auch Klemmrollen aktiv angetrieben werden. Dies sorgt für einen gleichmäßigen Kraftschluss, verhindert Drahtverformungen und gewährleistet einen schlupffreien Vorschub. Je nach Drahtmaterial stehen profilierte Antriebsrollen zur Verfügung, die auf unterschiedliche Drahtquerschnitte und -oberflächen abgestimmt sind.

Diese Eigenschaften sorgen für einen optimalen Drahtvorschub. In der neuen Brenngeneration ermöglicht eine doppelte Motorseinheit die separate Ansteuerung beider Drahtvorschubssysteme. Dadurch kann die Vorschubgeschwindigkeit für jeden Draht individuell und materialabhängig eingestellt werden, was insbesondere beim

An additional advantage of the twin-motor design lies in the capability to process dissimilar wires. This includes combinations of high- and low-melting-point wires, as well as solid and cored wires. With separate feed control, the melting behavior of each wire can be individually adapted to its specific physical properties. This flexibility allows for the creation of customized coating systems with tailored properties such as simultaneous improvements in hardness, wear resistance and corrosion protection, or targeted reduction of porosity. As a result, application-specific coating characteristics can be achieved that are not feasible or only partially attainable with conventional single-wire systems.

Technical Features

In wire arc spraying, consistent wire feeding is essential. For this reason, all torch variants are equipped with a four-roll drive system in which both the drive and pressure rolls are actively powered. This configuration ensures uniform torque transmission, reduces wire deformation and enables slip-free wire feed. Depending on the wire material, profiled drive rolls are available that are optimized for different wire cross-sections and surface characteristics.

The latest torch generation employs a dual-motor drive that permits independent control of each wire feed system. This allows feed rates to be set individually for each

BodyClad® Surface Brazing Solutions

Coatings - Wear Parts - Maintenance - Materials

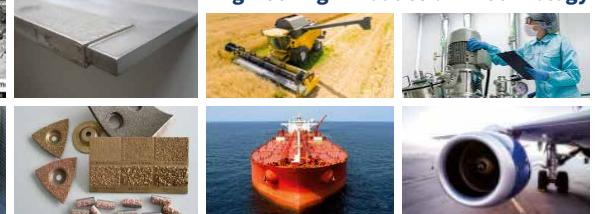


EUROMAT GmbH
Industrial Surface Solutions

Hermann-Hollerith-Straße 6
52499 Baesweiler

euromat
INDUSTRIAL SURFACE SOLUTIONS

Engineering • Production • Technology



t +49 2401 607 2866
f +49 2401 607 2855

e input@euromat.de
w www.euromat.de

Einsatz unterschiedlicher Drahttypen oder zur Kompensation asymmetrischer Abschmelzraten von Vorteil ist.

Ein weiteres wichtiges Konstruktionsmerkmal ist die präzise Ausrichtung der Kontaktspitzen. Die freiliegende Drahtlänge (stick out) ist auf ein Minimum reduziert worden. Die präzise Positionierung erfolgt allein durch die Geometrie im Spritzkopf. Ein anschließendes manuelles Ausrichten entfällt.

Die interne Gasführung ist so ausgelegt, dass das Zerstäubergas möglichst geradlinig und in gleichmäßigem Querschnitt vom Brennereingang bis zur Düsenscheibe geführt wird. Dies reduziert Turbulenzen und Druckverluste.

Für automatisierte Serienanwendungen wurde ein Wechselsystem entwickelt, das den Spritzkopf mit wenigen Handgriffen vom Antriebsgehäuse trennt. Ein instandgesetzter Spritzkopf kann eingesetzt und der Fertigungsprozess weitergeführt werden. Die Wartung des demontierten Spritzkopfs kann in der Nebenzeitz erfolgen.

Die neue Brennergeneration kann optional mit einem sekundären Zerstäubergas betrieben werden. Diese zusätzliche Zerstäubung beeinflusst die Spritzpartikel und den Spritzstrahl. Abhängig von der gewählten Düsengeometrie lässt sich so ein fokussierter, ggf. an eine Kontur angepasster Partikelstrahl realisieren.

Quelle: T-Spray GmbH

wire, based on material-specific requirements. This is especially beneficial when using wires with differing melting behaviors or when compensating for asymmetrical melting rates.

A further key design feature is the precise alignment of the contact tips. The free wire length (stick-out) has been minimized, with positioning ensured solely by the geometry of the spray head eliminating the need for manual adjustment.

The internal gas flow path is designed to deliver the atomizing gas in a straight line and with a uniform cross-section from the torch inlet to the nozzle plate. This reduces turbulence and pressure loss.

For automated high-volume production, a modular torch head replacement system has been developed. This allows the spray head to be detached from the drive housing with minimal effort. A refurbished spray head can be installed, enabling continued operation, while maintenance on the removed spray head can be performed in parallel.

The new torches can optionally be operated with a secondary atomizing gas. This additional atomization influences both the particle stream and the spraying jet. Depending on the selected nozzle geometry, a focused and potentially contour-adapted particle stream can be achieved.

Source: T-Spray GmbH



ITSC2026

INTERNATIONAL THERMAL SPRAY
CONFERENCE AND EXPOSITION



SAVE
THE
DATE!

MARCH 18 – 20, 2026, QSNCC, BANGKOK (THAILAND)

www.dvs-events.com



Rückblick auf die ITSC 2025 und Ausblick auf 2026

Review of ITSC 2025 and Outlook for 2026

Die Veranstalter der International Thermal Spray Conference (ITSC), die ASM Thermal Spray Society und der DVS, blicken zurück auf eine sehr erfolgreiche Veranstaltung in Vancouver. Mit über 460 Präsentationen, darunter über 280 Fachvorträgen, 7 Keynotes, 2 Podiumsdiskussionen und mehr als 900 Teilnehmern aus 28 Ländern hat die Konferenz ihr Ziel als führende Plattform für den Wissensaustausch und die Zukunft der Oberflächentechnik in diesem Jahr wieder erfolgreich erfüllt. Die begleitende Ausstellung zeigte Produkte und Dienstleistungen von über 100 Unternehmen und Organisationen, die moderne Produkte und Dienstleistungen im Bereich des thermischen Spritzens vorstellten und bot die Gelegenheit zum Networking. Besonders hervorzuheben ist die Podiumsdiskussion „WiTS: Women in Thermal Spray“, eine neue Initiative der ASM Thermal Spray Society (TSS), die bedeutende Beiträge von Frauen in der Thermal-Spray-Community würdigt und unterstützt. Die Diskussion wurde moderiert von Dr. Laura Toma und Dr. Andrew Ang.

Ein sehr wichtiger Bestandteil der Veranstaltung bleibt das Engagement für die Förderung der nächsten Generation von Experten im Thermischen Spritzen. Der Wettbewerb, der Spitzenforschung von aufstrebenden Fachleuten präsentiert, gesponsort vom langjährigen Partner Oerlikon Metco, ermöglicht es talentierten Nachwuchswissenschaftlern, ihre Forschungsthemen der globalen Gemeinschaft des Thermischen Spritzens vorzustellen. In diesem Jahr gewonnen haben folgende Wissenschaftler:

- 1. Platz: Influence of Secondary Parameters in Cold Gas Spraying of Al6061; Luca Klingler, Helmut Schmidt University, Deutschland
- 2. Platz: Process Parameters Impact on Deposition Quality and Heat Conduction through Novel Cold-Sprayed GrCop42 on Inco-



Dr. Andrew Ang, Präsident der ASM Thermal Spray Society, begrüßte die Teilnehmer zur Veranstaltung. (© DVS Media)

Dr. Andrew Ang, President of the ASM Thermal Spray Society, welcomed the attendees. (© DVS Media)



Dr. Filofteia-Laura Toma, Senior Research Scientist am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden, wurde mit dem TSS President's Award for Meritorious Service ausgezeichnet. (© DVS Media)

Dr. Filofteia-Laura Toma, Senior Research Scientist at the Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS in Dresden, was honored with the TSS President's Award for Meritorious Service. (© DVS Media)

nel 718; Caleb Griffin, University of Strathclyde, Schottland und ■ (ein zweiter) 2. Platz: Luminous Discharge Analysis on Ceramic Coating Process by "Aerosol Deposition Method": Influence of Particle Rate and Size; Ximena Ospina Arrubla, University of Limoges, France.

Die Veranstalter freuen sich nun auf die kommende ITSC, die vom 18. bis 20. März 2026 in Bangkok, Thailand, stattfinden wird. Das Leitthema wird "Engineered for Excellence – Smart Coatings for a Smart World" sein. Quelle: DVS Media GmbH

The organizers of the International Thermal Spray Conference (ITSC), the ASM Thermal Spray Society and DVS, look back on a highly successful event in Vancouver. With over 460 presentations – including more than 280 technical talks, 7 keynotes, 2 panel discussions – and more than 900 participants from 28 countries, the conference once again fulfilled its mission as a leading platform for knowledge exchange and the future of surface technology. The accompanying exhibition featured products

and services from more than 100 companies and organizations, showcasing the latest solutions in the field of thermal spray and offering excellent networking opportunities.

A particular highlight was the panel discussion "WiTS: Women in Thermal Spray", a new initiative of the ASM Thermal Spray Society (TSS) that recognizes and supports the impactful contributions of women in the thermal spray community. The discussion was moderated by Dr. Laura Toma and Dr. Andrew Ang.

A very important part of the conference remains the commitment to fostering the next generation of thermal spray professionals. The competition, sponsored by long-standing partner Oerlikon Metco, highlights cutting-edge research by emerging experts and gives talented young scientists the opportunity to present their work to the global thermal spray community. This year's winners were:

- 1st Place: Influence of Secondary Parameters in Cold Gas Spraying of Al6061, Luca Klingler, Helmut Schmidt University, Germany
- 2nd Place: Process Parameters Impact on Deposition Quality and Heat Conduction through Novel Cold-Sprayed GrCop42 on Inconel 718, Caleb Griffin, University of Strathclyde, Scotland and
- (a second) 2nd Place Winner: Luminous Discharge Analysis on Ceramic Coating Process by "Aerosol Deposition Method": Influence of Particle Rate and Size, Ximena Ospina Arrubla, University of Limoges, France

Looking ahead, the organizers are pleased to announce that the next ITSC will take place from March 18–20, 2026, in Bangkok, Thailand, under the guiding theme: "Engineered for Excellence – Smart Coatings for a Smart World."

Source: DVS Media GmbH

Maßgeschneiderte Armaturenbeschichtungen für den Einsatz in Wasserstoffanwendungen

Tailored Valve Coatings for Use in Hydrogen Applications

Kurzfassung

Die großflächige Anwendung von Wasserstoff gehört zu den zentralen Bausteinen einer globalen und klimaneutralen Energieversorgung. Für die effiziente Herstellung, Verteilung sowie Verwendung werden spezielle Anforderungen an die wasserstoffführenden Armaturen gestellt. Insbesondere die Effizienz und Lebensdauer der hochbeanspruchten metallischen Dichtsysteme werden maßgeblich durch die verwendeten Werkstoffkombinationen beeinflusst. In dieser Studie wurden verschiedene Werkstoffkombinationen ausgewählt, mit Festschmierstoffen modifiziert und durch das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen sowie das Flammspritzen mit nachgelagertem Einschmelzen appliziert. Im Anschluss erfolgte eine tribologische Untersuchung sowie eine Wasserstoffbeaufschlagung. Hierbei konnten verschiedene Beschichtungen für den Wasserstoffeinsatz qualifiziert werden.



Dr.-Ing. Wolfgang Wietheger

Reintegration

KVT Kurlbaum GmbH, Osterholz-Scharmbeck

Wolfgang.Wietheger@kvt-group.de

Mehr Informationen zu den Autoren auf www.thermal-spray-bulletin.info/de/autoren
More information on the authors at www.thermal-spray-bulletin.info/en/authors

Abstract

The large-scale use of hydrogen is one of the key pillars of a global and climate-neutral energy supply. Special requirements are placed on hydrogen-carrying valves to ensure efficient production, distribution, and utilization. In particular, the efficiency and service life of the highly stressed metallic sealing systems are significantly influenced by the mate-

rial combinations used. In this study, various material combinations were selected, modified with solid lubricants, and applied using high-velocity oxy-fuel spraying (HVOF) and flame spraying followed by fusing. This was followed by tribological testing and hydrogen exposure. Several coatings were qualified for use in hydrogen service.

1. Einleitung

Die Anwendung von Wasserstoff im großen Maßstab gilt als erste Wahl für die Dekarbonisierung ausgewählter Segmente im Verkehr, in der Industrie und in Gebäuden, da hierdurch eine flexible Energieübertragung über Sektoren, Zeit und Orte hinweg ermöglicht wird [1]. Der großflächige Einsatz von Wasserstoff erfordert Neugestaltungen sowie Anpassungen von wasserstoffführenden Komponenten. Dafür sind in vielen Systemen Armaturen notwendig, die eine sichere Medienführung gewährleisten.

Die sehr unterschiedlichen Beanspruchungen, angefangen vom flüssigen Wasserstoff bei $T = -253^{\circ}\text{C}$ über gasförmige Transportlösungen bei $p = 30$ bis 700 bar bis hin zu Hochtemperaturanwendungen, führen zu außergewöhnlichen Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffsysteme [2]. Für tribologisch hochbelastete Armaturenanwendungen werden metallische Dichtsysteme eingesetzt,

die sowohl hohe Betriebsdrücke und extreme Temperaturen als auch häufige Schaltwechsel bewältigen. Um den steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz gerecht zu werden, wird eine Weiterentwicklung der etablierten Schichtsysteme hinsichtlich Reibungsreduzierung angestrebt. Im Bereich der Armaturentechnik ist dabei die Reibung zwischen Dichtring und Kugeloberfläche entscheidend für die Dimensionierung des Antriebs sowie die Energieeffizienz des Gesamtsystems (Bild 1). Eine etablierte Möglichkeit zur Reibungsreduzierung im Armaturenbereich stellen diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC) als Deckenschichten auf thermisch gespritzten Beschichtungen dar. Hierdurch können die für das Schalten einer Armatur notwendigen Drehmomente in eigenen Tests um über 50 % gegenüber konventionellen Beschichtungen reduziert werden. Die DLC-Beschichtungen besitzen jedoch eine starke Anfälligkeit gegenüber Stoßbelastung,

1. Introduction

The large-scale application of hydrogen is considered the top choice for decarbonizing selected segments of transportation, industry, and buildings, as it enables flexible energy transfer across sectors, time, and locations [1]. Widespread use of hydrogen requires new designs and adaptations of hydrogen-carrying components. In many systems, valves are necessary to ensure safe media handling. The very diverse loads, from liquid hydrogen at $T = -253^{\circ}\text{C}$, to gaseous transport solutions at $p = 30$ to 700 bar, to high-temperature applications result in extraordinary demands on the material systems used [2]. Metallic sealing systems are employed for tribologically high-load valve applications that must withstand high operating pressures, extreme temperatures, and frequent switching cycles. To meet growing demands for energy efficiency, established coating systems are being further developed to reduce friction. In valve en-

gineering, the friction between the sealing ring and ball surface is decisive for actuator sizing and the energy efficiency of the overall system (Fig. 1).

An established approach to reducing friction in valve applications is the use of diamond-like carbon (DLC) coatings as top layers on thermally sprayed coatings. These can reduce the torque required to operate a valve by more than 50 % compared to conventional coatings, according to internal testing. However, DLC coatings are highly susceptible to impact stress, which can lead to delamination during assembly, for example (Fig. 2). Given the expected rapid expansion of hydrogen networks, a significant number of highly stressed and frequently switching valves is anticipated, yet no broadly available friction reduction solution currently exists for these.

In most hydrogen applications, separate lubrication is not feasible due to the gas's reactivity. Therefore, a materials-based solution is

wodurch es beispielsweise während der Montage zu Schichtablösungen kommen kann (Bild 2). Insbesondere für den zukünftig rasant steigenden Netzausbau für Wasserstoff ist von einer erhöhten Anzahl hochbelasteter und häufig schaltender Armaturen auszugehen, für die jedoch aktuell keine in großem Maßstab verfügbare Reibungsreduzierung existiert. In den meisten Wasserstoffanwendungen ist eine separate Schmierung bedingt durch die Reaktivität nicht möglich, daher wird eine werkstofftechnische Lösung im Armaturenbereich benötigt. Erste Studien zum Einsatz von Festschmierstoffen bei thermisch gespritzten Hartmetallbeschichtungen zeigen eine tendenzielle Eignung [3, 4]. Im Rahmen dieser Studie werden dazu etablierte Armaturenbeschichtungen ausgewählt und mit Festschmierstoffzugaben modifiziert. Zur Bewertung erfolgen tribologische Untersuchungen, um Systeme mit möglichst geringer Reibung zu identifizieren. Im Anschluss wird die Verwendbarkeit der Schichtsysteme mittels Wasserstoffbeaufschlagung untersucht.

2. Schichtherstellung

Die Applikation ausgewählter Armaturenbeschichtungen erfolgt zum einen mit Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) und zum anderen mit Flammspritzen inklusive anschließendem Einschmelzprozess, exemplarisch dargestellt in Bild 3. Für die HVOF-Systeme werden zwei Hartmetallsysteme und für die eingeschmolzene Beschichtung eine Nickelbasislegierung mit Hartmetallzugebetrachtet.

Die chemische Zusammensetzung der ausgewählten Schichtwerkstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt. Als Festschmierstoff wurde agglomeriertes Pulver aus hexagonalem Bornitrid (hBN) mit einer mittleren Teilchengröße mit einem Durchmesser unter 30 µm und einer hohen Schüttdichte ausgewählt, um eine gute Integration während des Beschichtungsprozesses zu erzielen. Die Integration von hBN mittels des HVOF-Prozesses konnte für die Systeme A und B erfolgreich realisiert werden, für das eingeschmolzene System C stehen zukünftige Prozessanpassungen aus.

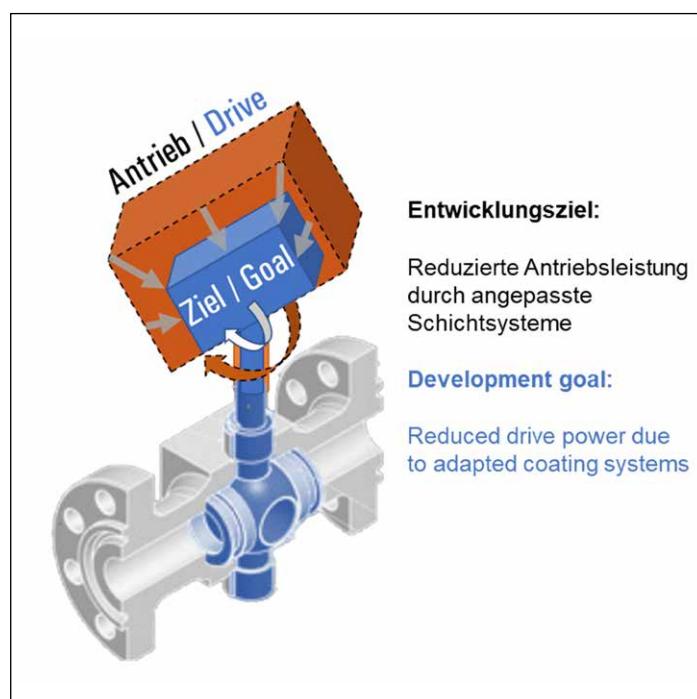


Bild 1: Reibungsreduzierung von metallischen Dichtsystemen zur Energie- und Kosteneinsparung in wasserstoffführenden Armaturen

Fig. 1: Friction reduction of metallic sealing systems for energy and cost savings in hydrogen-carrying fittings

3. Tribologische Untersuchung

Zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten und des Materialabtrags wurden tribologische Untersuchungen am Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie (fem) durchgeführt. Dazu wurden Beschichtungsproben hergestellt und mittels Schleifen auf eine einheitliche Oberflächenrauheit von $Ra = 0,2 \mu\text{m}$ konditioniert. Als Gegenkörper wurde eine Kugel aus WC-Co (94/6) mit einem Durchmesser von $\varnothing = 6 \text{ mm}$ verwendet, die mit einer Last von $F = 5 \text{ N}$ bei einer Geschwindigkeit von $v = 52,4 \text{ mm/s}$ gegen die Beschichtung gedrückt wurde. Nach einer Teststrecke von $s = 62,83 \text{ m}$ wurde der Materialabtrag an der Beschichtung profilometrisch vermessen und der Mittelwert des Reibungskoeffizienten bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt. Die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen zeigen, dass eine signifikante Reduzierung der Reibungskoeffizienten durch die hBN-Integration im Fall von Schichtsystem A aus WC-CoCr realisierbar ist. Im direkten Vergleich zwischen A0 und A2.5 führt die Integration von hBN mit einem Massenanteil von $w_{\text{hBN}} = 2,5 \%$ zu einer Reibungsreduktion von ca. $\Delta\mu \approx 25 \%$. Zusätzlich ist der Materialabtrag bei

needed in valve technology. Initial studies on using solid lubricants in thermally sprayed hardmetal coatings show promising potential [3, 4]. This study selected established valve coatings and modified them with solid lubricant additives. Tribological tests were conducted to identify systems with minimal friction. The usability of these coating systems was then evaluated under hydrogen exposure.

2. Coating Application

Selected valve coatings were applied using high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying and flame spraying with subsequent fusing, as illustrated in Fig. 3. Two hardmetal systems were used for the HVOF process, and a nickel-based alloy with hardmetal additions was used for the fused coating.

The chemical composition of the selected coating materials is shown in Table 1. The solid lubricant selected was agglomerated powder of hexagonal boron nitride (hBN) with an average particle size of less than 30 µm in diameter and a high bulk density, to ensure good integration during the coating process. The integration of hBN via the HVOF process was successfully realized for systems A and B; for the fused system C, further process adjustments are still required.

3. Tribological Testing

Tribological tests were carried out at the Research Institute for Precious Metals and Metal Chemistry (fem) to determine the coefficient of friction and material loss. Coating samples were prepared and ground to a uniform surface roughness of $Ra = 0,2 \mu\text{m}$. A WC-Co (94/6) ball with a diameter of $\varnothing = 6 \text{ mm}$ was used as the counterbody, pressed against the coating at a load of $F = 5 \text{ N}$ and a speed of $v = 52,4 \text{ mm/s}$. After a test track of $s = 62,83 \text{ m}$, material wear was measured profilometrically.

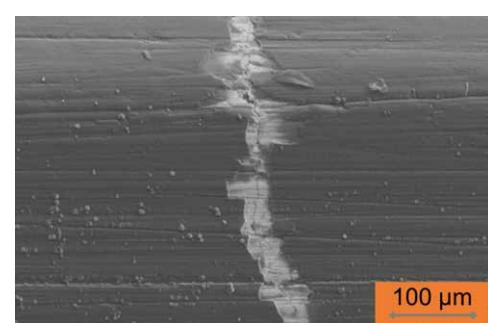


Bild 2: REM-Oberflächenaufnahme einer rissförmigen Schichtablösung entlang einer DLC-Deckschicht

Fig. 2: SEM surface image of a crack-like layer detachment along a DLC surface layer

Tabelle 1: Ausgewählte Schichtwerkstoffe
Table 1: Selected coating systems

Schichtsystem / Coating system	Zusammensetzung / Composition
Ax	WC-CoCr 86/10/4
Bx	Cr ₃ C ₂ -NiCr 75/25
Cx	Ni17CrBSi + 50(WC-Co 88/12)
x: Festschmierstoffzugabe	hBN mit den Massenanteilen 0; 2,5; 5 und 7,5 %
x: Solid lubricant addition	hBN with mass fractions 0; 2.5; 5 and 7.5 %

dem System A allgemein so gering, dass eine quantitative Auswertung unabhängig der hBN-Zugabe nicht möglich ist. Beim Schichtsystem B ist eine geringe Reibungsreduzierung durch die hBN-Zugabe detektierbar, jedoch steigt dabei der Materialabtrag. Das eingeschmolzene System C liefert in der Untersuchung einen geringfügig höheren Reibwert und einen moderaten Materialabtrag.

4. Wasserstoffbeaufschlagung

Zur Überprüfung der Schichtsysteme für den Einsatz in wasserstoffführenden Armaturen erfolgte eine Wasserstoffbeaufschlagung. Das Langzeitverhalten der Beschichtungen wurde dabei im Rahmen des Forschungsprojekts „H₂ und Absperrarmaturen – Ke-FeH₂“ an der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH an Kugelsegmenten im Betrieb mit Wasserstoff unter Drucklastwechsel untersucht. In Anlehnung an das Forschungsprojekt wurden unter anderem die drei eingangs betrachteten Grundbeschichtungstypen A0, B0, und C0 an der DBI ausgelagert und anschließend an der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart nach Testende charakterisiert.

Bild 5 zeigt eine exemplarische REM-Aufnahme des eingeschmolzenen Nickelbasisbeschichtungssystems C0. Nach Testende sind auch im Bereich kleinerer Schichtartefakte innerhalb der Beschichtung sowie am Interface zum Substrat keine Anzeichen für Beschädigungen detektierbar. Die Wasserstofftauglichkeit der Systeme kann daher bestätigt werden. Die gewonnenen Ergebnisse fließen als Grundlage in das technische Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) im Bereich wasserstoffführender Absperrarmaturen mit ein.

5. Fazit und Ausblick

Für hochbelastete Armaturen werden metallische Dichtsysteme mit thermisch gespritzten Beschichtungen verwendet. Diese Schichtsysteme sind maßgeblich für die Funktionsfähigkeit sowie Effizienz der Gesamtarmatur verantwortlich. Aus dem Einsatz für Wasserstoffanwendungen können spezielle Belastungsgrößen abgeleitet werden, die angepasste Schichtsysteme erfordern.



Bild 3: Prozessaufnahme des Einschmelzens einer thermisch gespritzten Kugelhahnbeschichtung mittels Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Fig. 3: Process image of the melting of a thermally sprayed ball valve coating using an acetylene-oxygen flame

In dieser Studie wurden verschiedene Werkstoffsysteme ausgewählt, mit Festschmierstoffen modifiziert und durch Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen sowie Flammenspritzen mit

ly, and the average coefficient of friction was determined. The results are shown in Fig. 4.

The tribological results show that a significant reduction in the coeffi-

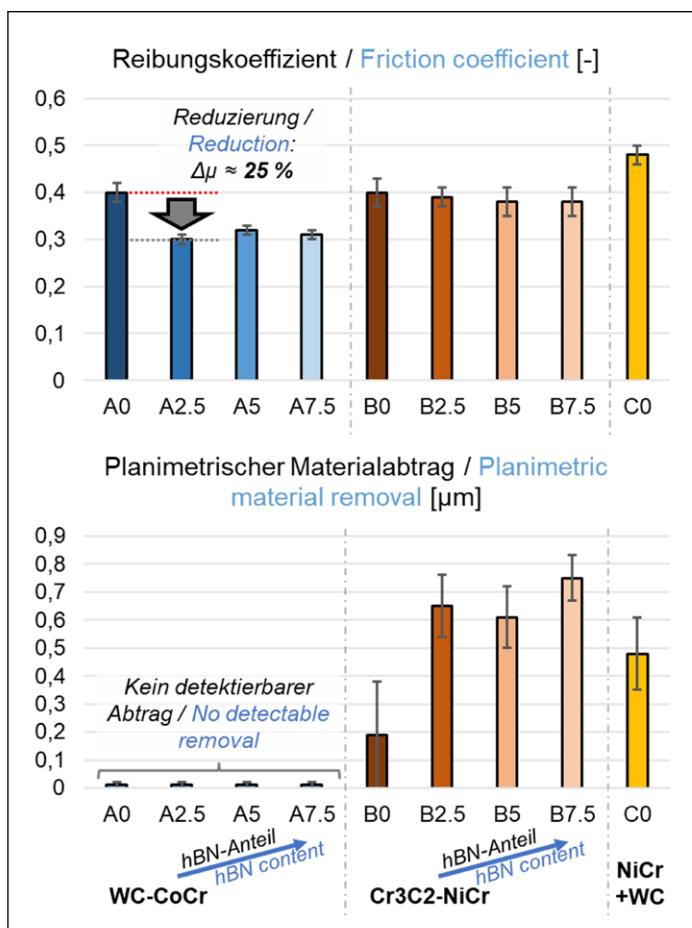


Bild 4: Ergebnisse der tribologischen Stift-Scheibe-Untersuchungen an den ausgewählten Armaturenbeschichtungen bei F = 5 N gegen eine Kugel aus WC-Co

Fig. 4: Results of the tribological pin-disc tests on the selected valve coatings at F = 5 N against a ball made of WC-Co

cient of friction can be achieved by integrating hBN in coating system A (WC-CoCr). A direct comparison between A0 and A2.5 shows that the integration of hBN at a mass fraction of $w_{hBN} = 2,5 \%$ results in a friction reduction of approximately $\Delta\mu \approx 25\%$. Additionally, the material wear in system A is generally so low that quantitative evaluation is not feasible, regardless of the hBN addition. For system B, a slight friction reduction is detectable with hBN addition, but wear increases. The fused system C showed a slightly higher friction coefficient and moderate wear.

4. Hydrogen Exposure

To evaluate the suitability of the coating systems for use in hydrogen-carrying valves, hydrogen exposure tests were conducted. The long-term performance of the coatings was investigated in the research project "H₂ and Shut-off Valves – KeFeH₂" at DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH using ball segments under hydrogen service with alternating pressure loads. As part of the project, the three base coatings A0, B0, and C0 were tested and later characterized at the Materials Testing Institute of the University of Stuttgart.

Fig. 5 shows an SEM image of the fused nickel-based coating system C0. After testing, no signs of damage were detected in areas with minor coating artifacts or at the interface to the substrate. Thus, the hydrogen compatibility of these systems is confirmed. The results serve as a basis for the technical code of practice developed by the German Technical and Scientific Association for Gas and Water (DVGW) for hydrogen-carrying shut-off valves.

5. Conclusion and Outlook

Metallic sealing systems with thermally sprayed coatings are used for highly stressed valves. These coating systems are crucial for the performance and efficiency of the entire valve. Hydrogen applications impose special mechanical demands, requiring adapted coating solutions.

In this study, various material systems were selected, modified with

nachgelagertem Einschmelzen als Armaturenbeschichtungen appliziert. In tribologischen Untersuchungen konnte eine Reibungsreduzierung von etwa $\Delta\mu \approx 25\%$ durch die hBN-Integration mit einem Massenanteil von $w_{hBN} = 2,5\%$ im Vergleich zu einer festschmierstofffreien Basisbeschichtung aus WC-CoCr realisiert werden. Zusätzlich konnte die Einsatzfähigkeit der Basisbeschichtungen mittels Wasserstoffbeaufschlagung unter Drucklastwechsel erfolgreich validiert werden.

Für Hochdruckanwendungen ab etwa $p \geq 300$ bar, bei häufigen Temperaturwechseln sowie für kryogene Anwendungen sind meist eingeschmolzene Beschichtungen vorteilhaft, um beispielsweise ausdehnungsbedingte Risse zu vermeiden. Hierzu wird das geförderte Kooperationsprojekt „SolidFlux“ mit dem Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik (IWW) der TU Chemnitz durchgeführt, um auch selbstfließende Legierungen mittels Festschmierstoffen zu modifizieren. Die praktische Eignung der werkstoff- und prozesstechnischen Entwicklungsaspekte wird an industriell verfügbaren Armaturen umgesetzt, um das thermische, tribologische sowie chemische Lastkollektiv umfassend abzubilden. Hieraus sollen weitere thermisch gespritzte Schichtsysteme hervorgehen, die einen Mehrwert hinsichtlich Lebensdauer und Effizienz im Armaturenbereich liefern.

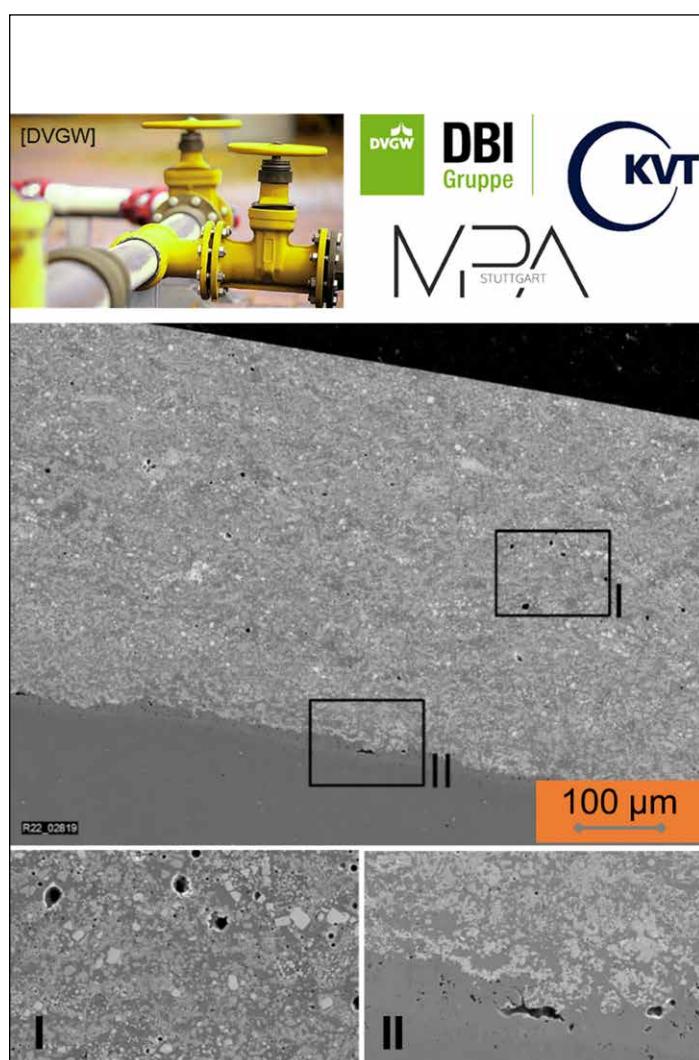


Bild 5: REM-Querschliffsaufnahmen an Schichtsystem C0 nach erfolgter Wasserstoffbeaufschlagung im DVGW-Forschungsprojekt „KuFeH2“

Fig. 5: SEM cross-sectional images of layer system C0 after hydrogen exposure in the DVGW research project „KuFeH2“

solid lubricants, and applied as valve coatings via HVOF spraying and flame spraying with fusing.

Tribological investigations demonstrated a friction reduction of approximately $\Delta\mu \approx 25\%$ through the integration of hBN at a mass fraction of $w_{hBN} = 2,5\%$, compared to a solid-lubricant-free base coating of WC-CoCr.

Furthermore, the usability of these base coatings was successfully validated through hydrogen exposure under alternating pressure loads.

For high-pressure applications starting at $p \geq 300$ bar, frequent temperature changes, and cryogenic conditions, fused coatings are generally more advantageous, e.g., to avoid thermally induced cracking. To this end, the funded cooperative project "SolidFlux" with the Institute of Materials Science and Engineering (IWW) at Chemnitz University of Technology is being conducted to modify self-fluxing alloys with solid lubricants. The practical suitability of the developed materials and processes is being implemented in commercially available valves to fully represent the thermal, tribological, and chemical load profiles. The goal is to derive additional thermally sprayed coating systems that offer improved service life and efficiency for valve applications.

Literatur References

- [1] EU Report: Hydrogen Roadmap Europe, A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Luxembourg 2019, ISBN: 978-92-9246-332-8.
- [2] T. Kannengießer, M. Rhode: DVS Studie Fügetechnik für die neue Wasserstoffökonomie – Werkstoffe, Schweißtechnologien, Perspektiven – DVS-Berichte Band 373, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2021, ISBN: 978-3-96144-157-0.
- [3] K. Bobzin, W. Wietheger, H. Heinemann, M. Schulz, M. Oechsner, T. Engler, H. Scheerer, Y. Joung: Thermally sprayed coatings for the valve industry. Materials Science & Engineering Technology, Volume 52, Issue 9, 2021, Issue 1. <https://doi.org/10.1002/mawe.202100032>.
- [4] Du, L.; Huang, C.; Zhang, W.; Li, T.; Liu, W.: Preparation and wear performance of NiCr/Cr₃C₂–NiCr/hBN plasma sprayed composite coating. Surface and Coatings Technology 205(12), 2011, 3722–3728, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.031>.

Numerische Simulation der Gas- und Partikelströmung in der Brennkammer und Austrittsdüse des HVOF-Internal-Diameter-Prozesses

Numerical Simulation of the Gas and Particle Flow in the Combustion Chamber and the Exit Nozzle of the HVOF Internal Diameter Process

Kurzfassung

Die vorliegende Studie widmet sich der numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics – CFD) des HVOF-ID-Prozesses (ID – Internal Diameter) mit zusätzlicher Stickstoffeindüse in die Brennkammer (Warmspray Verfahren) zur Innenbeschichtung von Bauteilen. Dabei wird ein Innenbeschichtungsbrenner vom Typ ID-RED betrachtet. Der Fokus der durchgeföhrten CFD-Simulationen liegt dabei auf der Brennkammer, dem L-förmigen Lauf und dem Bereich der Expansionsdüse. Durch die Verwendung eines detaillierten, experimentell validierten Simulationsmodells auf Basis von *Ansys Fluent* wurden Gas- und Partikelströmung, Wärmetransport sowie Verbrennungsprozesse in einem ID-HVOF-Brenner untersucht. Die Geometrie wurde mittels Röntgentomografie digitalisiert und zu einem achsensymmetrischen Modell aufbereitet. Die Simulationen zeigen den Einfluss variabler Parameter wie Stickstoffdurchsatz, Partikelgröße, Spritzabstand und Injektionsgeschwindigkeit auf Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen sowie auf das Flugverhalten von WC-12Co-Partikeln. Die Ergebnisse dieser Studie belegen, dass feine Partikel bei kurzen Spritzabständen sowie angepasster Injektionsgeschwindigkeit besonders vorteilhafte thermisch-kinetische Eigenschaften aufweisen. Auf diese Weise kann auch bei kurzen Spritzabständen ein ausreichender Wärme- und Impulstransfer der Flamme auf die Partikel stattfinden und die Beschichtung ermöglicht werden. Die Stickstoffzufuhr beeinflusst maßgeblich



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann

Inhaber des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie
Holder of the Chair of Materials Technology

Technische Universität Dortmund
wolfgang.tillmann@tu-dortmund.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein

Professor am Institut für Plasmatechnik und Mathematik
Professor at the Institute for Plasma Technology and Mathematics

Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
jochen.schein@unibw.de



Dr.-Ing. Stephan Zimmermann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Plasmatechnik und Mathematik
Research associate at the Institute for Plasma Technology and Mathematics

Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
Stephan.Zimmermann@UniBw.de



Dipl.-Ing. Manuel Ferreira

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Research assistant the Chair of Materials Technology

Technische Universität Dortmund
manuel.ferreira@tu-dortmund.de



Ahmad Said

Maschinenbau-Student, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT), Bereich thermischen Spritzens
Mechanical engineering student, Chair of Materials Technology, Thermal spraying area

Technische Universität Dortmund
ahmad.said@tu-dortmund.de



Dr.-Ing. Ingo Baumann

Oberingenieur am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Chief engineer at Chair of Materials Technology

Technische Universität Dortmund
ingo.baumann@tu-dortmund.de

Mehr Informationen zu den Autoren auf www.thermal-spray-bulletin.info/de/autoren
More information on the authors at [https://www.thermal-spray-bulletin.info/en/authors](http://www.thermal-spray-bulletin.info/en/authors)

Abstract

This study focuses on computational fluid dynamics (CFD) simulations of the HVOF-ID (High Velocity Oxy-Fuel – Internal Diameter) process with additional nitrogen injection into the combustion chamber (Warm Spray Process) for the internal coating of components. The simulations are carried out using an ID-RED type internal coating torch, with particular emphasis on the combustion chamber, the L-shaped barrel, and the expansion nozzle region. A detailed, experimentally validated simulation model based on *Ansys Fluent* was employed to investigate gas and particle flow, heat transfer, and combustion processes in an ID-HVOF torch. The geometry was digitized by means of X-ray computed tomography and processed into an axisymmetric model. The computational domain was discretized with refined mesh sizes in the nozzle and combustion chamber regions. The simulations reveal the influence of variable parameters such as nitrogen flow rate, particle size, spray distance, and injection velocity on the temperature and velocity distributions as well as on the flight behavior of WC-12Co particles. The results of this study demonstrate that fine particles exhibit particularly favorable thermo-kinetic properties at short spray distances and with adjusted injection velocity. In this way, sufficient heat and momentum trans-

fer from the flame to the particles can be achieved even at short spray distances, enabling effective coating. Nitrogen injection strongly affects flame temper-

die Flammentemperatur, den Brennkammerdruck sowie die Form des Freistrahls im Prozess. Insgesamt bietet die Studie eine fundierte Grundlage zur Prozessoptimierung des HVOF-ID-Verfahrens, insbesondere hinsichtlich Effizienz, Reproduzierbarkeit und Beschichtungsqualität.

1. Einleitung

Die kontinuierliche Weiterentwicklung thermischer Beschichtungsverfahren hat zur Erschließung neuer Applikationsfelder geführt, insbesondere im Bereich der Innenbeschichtung. Das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel) hat sich dabei als Schlüsseltechnologie etabliert, um hochdichte, verschleißfeste Cermet-Schichten in komplexen Innengeometrien zu erzeugen [1–3]. Die zunehmende Miniaturisierung von Bauteilen sowie der Bedarf an prozesssicheren Beschichtungen bei geringen Spritzabständen erfordern ein vertieftes Verständnis der zugrunde liegenden Strömungs- und Partikelprozesse im Inneren der Bauteile [2, 6].

Ein zentrales Werkzeug zur Analyse dieser komplexen Prozesse stellt die numerische Strömungssimulation (CFD – Computational Fluid Dynamics) dar. Durch sie lassen sich Brennerströmungen, Verbrennungsprozesse sowie Partikelverhalten detailliert untersuchen und gezielt optimieren. Gerade im HVOF-ID-Bereich, in dem eine direkte optische Diagnostik kaum möglich ist, gewinnen simulationsgestützte Verfahren zunehmend an Bedeutung [3, 6].

In den letzten Jahren wurden CFD-Modelle vor allem für den Bereich der thermischen Spritztechnik weiterentwickelt, um den physikochemischen Bedingungen im Brennraum und Strahlbereich möglichst realitätsnah gerecht zu werden. So wurde von Ren et al. (2021) ein feature-basiertes Multi-View-Modell vorgestellt, das CAD/CFD-Integration, physikalische Simulation und Optimierungslogik zu einem geschlossenen Konzept vereint. Dieses erlaubt eine systematische Ableitung optimaler Prozessparameter für verschiedene Geometrien und Materialien unter Einbeziehung experimenteller Validierung [7].

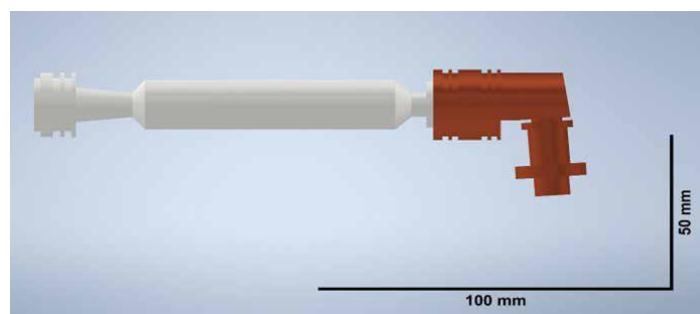


Bild 1: 3D-Model des ID-HVOF-Brenners

Fig. 1: 3D model of the ID-HVOF torch

Bartuli et al. (2003) simulierten erstmals detailliert den thermochemischen Zustand von WC-Co-Pulvern im Gasstrom einer JP-5000-HVOF-Brennerkonfiguration. Mit Hilfe der Eddy-Dissipation-Concept-Methode (EDC) konnten kritische Parameter wie Flammentemperatur und Partikelverlauf modelliert und deren Einfluss auf die Karbidentkohlung analysiert werden [4]. Kamnis et al. (2008) entwickelten ein gekoppeltes Euler-Lagrange-Modell, das Partikeltrajektorien und -schmelzverhalten in einem dreidimensionalen HVOF-System abbildet. Dabei wurde die Wirkung unterschiedlicher Trägergasströmungen und Partikelgrößen auf die Heiz- und Ablagerungscharakteristik untersucht [5].

Tabbara und Gu (2009) führten eine umfassende CFD-Studie des liquid-fueled JP-5000-HVOF-Systems durch, wobei insbesondere die Auswirkungen der Düsengestalt, Brennkammerauslegung und Kraftstofftröpfchengröße auf die Ausbildung der Überschallflamme analysiert wurden. Ihre Ergebnisse zeigen, dass selbst kleine geometrische Änderungen signifikante Auswirkungen auf Flammenform, Partikelverlauf und letztlich auf die Beschichtungseigenschaften haben können [8]. Diese Entwicklungen verdeutlichen den Trend hin zu integrierten und parametrisierten Simulationsumgebungen, die nicht nur das Verhalten einzelner Partikel, sondern das Zusammenspiel von Brennerdesign, Prozessparametern und Zielbeschichtung quantitativ erfassen. Insbesondere für den ID-Bereich eröffnen solche Modelle neue Möglichkeiten zur Prozessauslegung, zur Skalierung auf verschiedene Bauteilgeometrien sowie zur Verringerung des experimentellen Aufwands.

ature, combustion chamber pressure as well as the shape of the free jet. Overall, this study provides a solid foundation for process optimization of the HVOF-ID technique, particularly with regard to efficiency, reproducibility, and coating quality.

1. Introduction

Continuous development of thermal spray processes has led to new application fields, especially in internal coating. High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) spraying has become a key technology for producing dense, wear-resistant cermet coatings in complex internal geometries [1–3]. The increasing miniaturization of components and the need to achieve reliable coatings at short spray distances require a deeper understanding of the underlying flow and particle processes inside the components [2, 6].

CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations represent a central tool for analyzing these complex processes. They enable detailed in-

vestigation and targeted optimization of torch flows, combustion processes, and particle behavior. In the HVOF-ID domain, where a direct optical diagnostics are barely possible, simulation-based methods have been gaining in importance [3, 6].

In recent years, CFD models have been especially for the field of thermal spraying technology advanced to better reflect the physicochemical conditions in the combustion chamber and the jet region. Ren et al. (2021) introduced a feature-based multi-view model integrating CAD/CFD tools, physical simulation, and optimization logic. This framework enables systematic derivation of optimal process parameters for various geometries and materials, incorporating experimental validation. [7]

Bartuli et al. (2003) were the first to simulate the thermochemical state of WC-Co powders in the gas stream of a JP-5000 HVOF torch. Using the EDC (Eddy Dissipation Concept) method, critical parameters such as the flame temperature and particle behavior were modeled, and their effect on carbide decarburization analyzed [4]. Kamnis et al. (2008) developed a coupled Euler-Lagrange model representing particle trajectories and melting behavior in a three-dimensional HVOF system. As part of this, the influence of different carrier gas flows and particle sizes on the heating and deposition behavior was investigated [5].

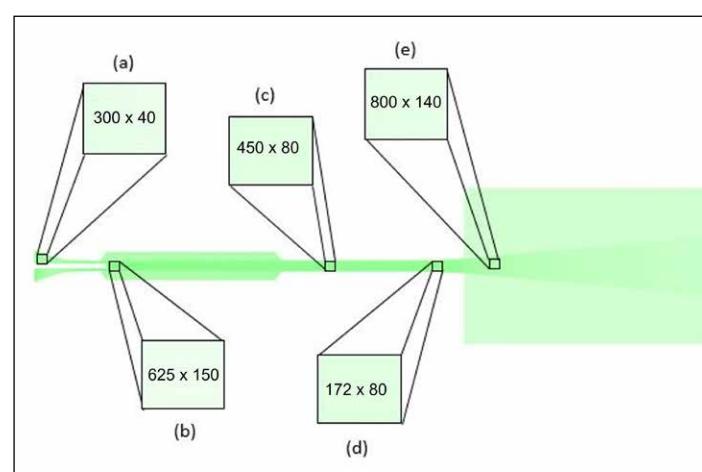


Bild 2: Netzgrößen des Simulationsbereichs: (a) erste CD-Düse, (b) Verbrennungskammer, (c) Lauf, (d) divergente Düse, (e) Freistahlbereich

Fig. 2: Mesh of the simulation area: (a) first CD nozzle, (b) combustion chamber, (c) flow path, (d) divergent nozzle, (e) free jet area

Die vorliegende Arbeit greift diese Entwicklungen auf und fokussiert sich auf die CFD-gestützte Untersuchung des HVOF-ID-Prozesses vom Bereich der Brennkammer bis zum Gas- und Partikelaustritt an der Austrittsdüse. Durch numerische Simulationen sollen Gasdynamik, Partikeltrajektorien und Wärmetransportvorgänge analysiert werden. Ziel ist es, eine fundierte Grundlage für die gezielte Prozessoptimierung von Innenbeschichtungsprozessen zu schaffen, indem auf die Zusammenhänge von Partikeleindüsinggeschwindigkeit, Partikelgröße, Eindüsungswinkel und Gasdurchfluss auf Druck, Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur und Partikelgeschwindigkeit eingegangen wird.

2. Experimentelle Methoden und Simulationsansatz

2.1. Geometrieerfassung und Modellaufbau

Zur numerischen Analyse des ID-RED-HVOF-Brenners wurde zunächst die Geometrie des Brennersystems vollständig erfasst. Mittels Röntgentomografie (Phoenix V|tome|x L 300 Scanner, Waygate Technologies – Baker Hughes Digital Solutions GmbH, Hürth) wurden die wesentlichen Bauteile – Verbrennungskammer, konvergente-divergente (CD) Düsen und der L-förmige Lauf – hochauflösend getragen und daraus 3D-Modelle generiert. Bild 1 zeigt die Außenansicht der Teile. Anschließend erfolgten die Vereinfachung und Aufbereitung der Geometrie zu einem zweidimensionalen achsensymmetrischen Modell, welches die strömungsrelevanten

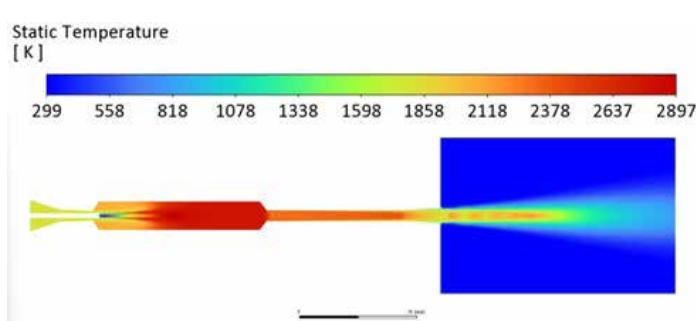


Bild 3: Simulierte Gasttemperatur [9]

Fig. 3: Simulated gas temperature [9]

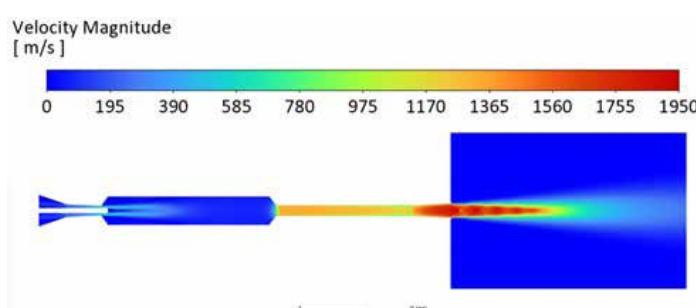


Bild 4: Simulierte Gasströmungsgeschwindigkeit [9]

Fig. 4: Simulated gas flow velocity [9]

Strukturen abbildet. Die Vernetzung des Modells wurde mit unstrukturierter, größtenteils hexaedrischen Zellen umgesetzt, wobei lokale Verfeinerungen im Bereich der Injektionszone und der Düsenbereiche realisiert wurden, um eine höhere Auflösung der Gasströmung und Partikeldynamik zu ermöglichen (Bild 2).

2.2. Simulationsmethodik

Die numerische Simulation des Innenbeschichtungsprozesses mittels ID-HVOF-Brenners erfolgte unter

Tabbara and Gu (2009) conducted a comprehensive CFD study of the liquid-fueled JP-5000 HVOF system, focusing on the effects of the nozzle geometry, combustion chamber design, and fuel droplet size on the formation of the supersonic flame. Their findings show that even small geometric modifications can significantly affect the flame shape, particle behavior, and ultimately the coating properties [8].

These developments underline the trend toward integrated and param-

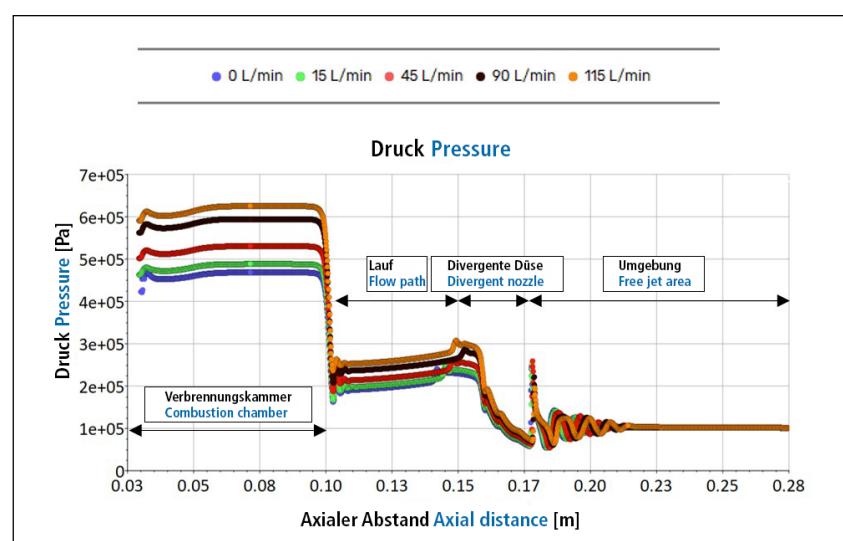
eterized simulation environments that not only capture individual particle behavior but also quantitatively represent the interaction of the torch design, the process parameters, and the target coating. Such models, particularly in internal diameter (ID) applications, offer new opportunities for process design, scaling to various component geometries, and reducing the experimental effort.

This study builds on these developments and focuses on the CFD-based investigation of the HVOF-ID process from the combustion chamber to the gas and particle expansion at the nozzle. Numerical simulations are used to analyze gas dynamics, particle trajectories, and heat transfer. The aim is to establish a sound basis for targeted process optimization of internal coatings by examining how the particle injection velocity, particle size, injection angle, and gas flow influence the pressure, flow velocity, temperature, and particle velocity.

2. Experimental Methods and Simulation Approach

2.1. Geometry Acquisition and Model Setup

First, the full geometry of the torch system was first captured for the numerical analysis of the ID-RED-HVOF torch. Using X-ray computed tomography (Phoenix V|tome|x L 300 scanner, Waygate Technologies – Baker Hughes Digital Solutions GmbH, Hürth), the main components – the combustion chamber, the convergent-divergent (CD) nozzle, and the L-shaped flow path – were scanned in high resolution, and 3D models were generated. Fig. 1 shows the external view of the components. The geometry was then simplified and processed into a two-dimensional axisymmetric model that represents the flow-relevant structures. Meshing of the model was carried out with unstructured, predominantly hexahedral cells, with local refinements implemented in the injection zone and the nozzle regions to enable higher resolution of the gas flow and particle dynamics (Fig. 2).

Bild 5: Einfluss des N₂-Volumenstroms auf den Druck [9]Fig. 5: Influence of the N₂ volume flow rate on the pressure [9]

Verwendung der Software *Ansys Fluent* 24.1. Die Berechnungen basierten auf der Lösung der stationären, kompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen unter Berücksichtigung von Turbulenz, chemischer Reaktion und Mehrphasenströmung.

2.2.1 Gasphasendynamik

Zur Beschreibung der turbulenten Gasströmung wurde das Realizable- k - ε -Modell eingesetzt. Dieses Modell bietet verbesserte Vorhersagen für starke Umlenkungen der Strömung und hohe Schergradienten, wie sie in der Konvergent-Divergent-Düse und dem Freistrahlbereich des HVOF-ID-Brenners auftreten. Die Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie κ und die Dissipationsrate ε wurden gelöst. Für die Energiebilanz wurde die Energiegleichung aktiviert, um die Temperaturfelder innerhalb der Verbrennungskammer und der Düse zu berechnen.

2.2.2 Verbrennungsmodell

Die chemische Reaktion zwischen Kerosin, Wasserstoff und Sauerstoff wurde mit dem Spezies-Transportmodell unter Einbeziehung des Eddy-Dissipation Models (EDM) beschrieben. Dabei wird die Reaktionsrate durch die lokale Turbulenz bestimmt, wodurch die dominierende Rolle der turbulenten Vermischung im Flammenbereich abgebildet wird. Das Modell berücksichtigt die Bildung der Hauptprodukte Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) sowie Nebenprodukte wie Kohlenstoffmonoxid (CO). Die Brennstoffzufuhr erfolgte modellhaft als Mischung aus Kerosintröpfchen und gasförmigem Wasserstoff.

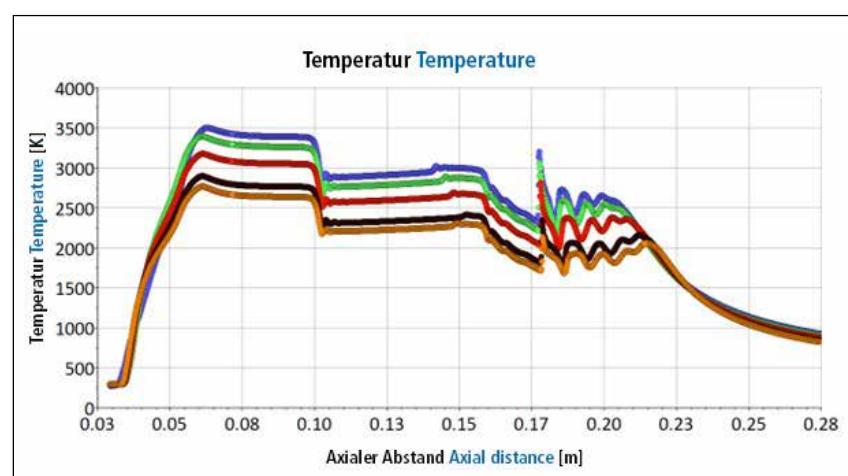


Bild 6: Einfluss des N_2 -Volumenstroms auf die Temperatur [9]

Fig. 6: Influence of the N_2 volume flow rate on the temperature [9]

Die Stickstoffinjektion wurde separat berücksichtigt und beeinflusste den Brennkammerdruck und die Flammtemperatur durch seine Kühlwirkung aufgrund seiner spezifischen Wärmekapazität.

2.2.3 Partikelmodellierung

Zur Modellierung der Partikelbewegung und - erwärmung wurde das Diskrete-Phasen-Modell (DPM) verwendet. Die Spritzpartikel (ein agglomeriert-gesintertes WC-12Co Pulver in der Fraktionierung $-10 +2 \mu\text{m}$ und individuellen WC und Co Partikeln von 400 nm) wurden als diskrete, träge Phasenteilchen simuliert, die durch die Gasströmung beschleunigt und gleichzeitig durch Konvektion erhitzt wurden. Für die Partikel wurden folgende Gleichungen gelöst:

- Bewegungsgleichung (Newton-sche Kräftebilanz) unter Berücksichtigung von Strömungswiderstand.
- Energiebilanz zur Ermittlung der Partikeltemperatur durch Konvektion.

2.2. Simulation Methodology

The numerical simulation of the internal coating process using the ID-HVOF torch was conducted with *Ansys Fluent* 24.1. The calculations were based on the steady-state, compressible Navier-Stokes equations, taking into account the turbulence, chemical reaction, and multiphase flow.

2.2.1. Gas Phase Dynamics

The Realizable k - ε turbulence model was used to describe the turbulent gas flow. This model provides improved predictions for strong flow deflections and high shear gradients, such as those occurring in the convergent-divergent nozzle and the free jet region of the HVOF-ID torch. Transport equations for the turbulent kinetic energy κ and the dissipation rate ε were solved. The energy equation was activated to calculate the temperature fields inside the combustion chamber and nozzle.

2.2.2. Combustion Model

The chemical reaction between kerosene, hydrogen, and oxygen was modeled using the Species Transport

model in combination with the Eddy Dissipation Model (EDM). The reaction rate is determined by the local turbulence, which captures the dominant role of turbulent mixing in the flame region. The model takes into account the formation of the main products carbon dioxide (CO_2) and water vapor (H_2O), as well as byproducts such as carbon monoxide (CO). In the model a mixture of kerosene droplets and gaseous hydrogen was used. Nitrogen injection was modeled separately. It influenced the flame temperature due to its cooling effect due to its specific heat capacity.

2.2.3. Particle Modeling

The Discrete Phase Model (DPM) was used to simulate particle motion and heating. The spray particles (WC-12Co, $-10 +2 \mu\text{m}$) were modeled as discrete, inertial phase particles accelerated by the gas flow and heated by convection. The following equations were solved for the particles:

- Equation of motion (Newton's second law), taking into account the drag force.
 - Energy balance to determine the particle temperature as a result of convective heating.
 - For the gas and particle phases, a "one-way coupling" approach was adopted, meaning the particles do not have a reverse effect on the gas flow.
- Key assumptions included:
- The particles are spherical and non-deformable.
 - No phase change of the particles (no evaporation or melting).
 - Constant thermophysical properties of the particles.

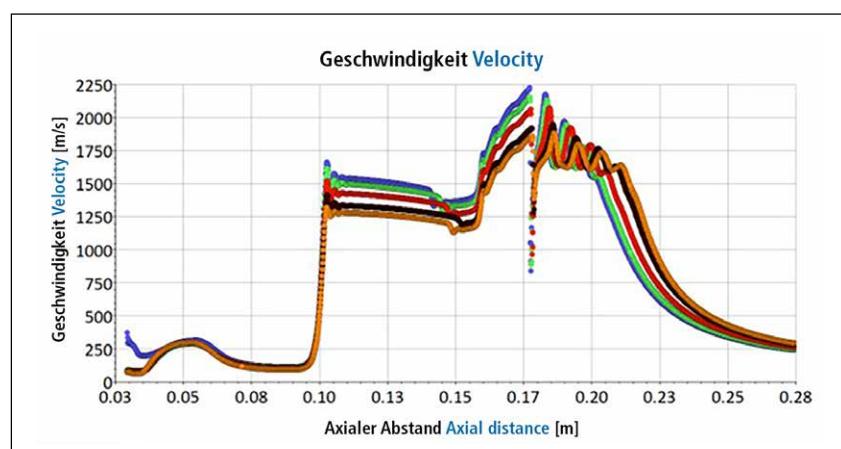


Bild 7: Einfluss des N_2 -Volumenstroms auf die Geschwindigkeit [9]

Fig. 7: Influence of the N_2 volume flow rate on the velocity [9]

- Eine Kopplung zwischen Gasphase und Partikelphase wurde im Modus der „one-way coupling“ angenommen, das heißt, die Partikel beeinflussen die Gasströmung nicht rückwirkend.

Wichtige Annahmen:

- Partikel sind kugelförmig und nicht deformierbar.
- Kein Phasenwechsel der Partikel (keine Verdampfung oder Schmelze).
- Konstante thermophysikalische Eigenschaften der Partikel.

2.2.4 Diskretisierung und numerische Lösung

Für die Lösung der Erhaltungsgleichungen kamen folgende numerische Verfahren zum Einsatz:

- Diskretisierung der Konvektionsglieder: Second-Order Upwind.
- Druck-Geschwindigkeit-Kopplung: Simple-Algorithmus.
- Zeitschritt: Stationäre Berechnung mit Konvergenzkriterium von 10^{-5} für Residuen.

Die Netzunabhängigkeit wurde durch systematische Verfeinerung der Gitterstruktur geprüft, wobei der Fokus auf einer korrekten Auflösung der Schergradienten und Stoßstrukturen in der Düse lag.

2.3. Randbedingungen

Die Randbedingungen für die Simulation wurden basierend auf realen Prozessparametern gewählt.

Die Wände wurden adiabatisch gesetzt. Am Düsenausgang wurden Auslassrandbedingungen mit Umgebungsdruck definiert. Die Injektionsposition des Pulvers lag im konvergenten Teil der Düse unmittelbar nach der L-förmigen Umlenkung.

3. Ergebnisse & Diskussion

3.1. Verbrennungsmechanismen und Gasströmungseigenschaften

Im Rahmen der numerischen Untersuchung des HVOF-ID-Brenners mittels *Ansys Fluent* wurde die zweistufige Verbrennung von Wasserstoff und Kerosin analysiert. Die Simulationen zeigen, dass die Wasserstoffverbrennung bereits in der ersten CD-Düse eine heiße Gasströmung mit etwa 1800 K erzeugt, welche in der Verbrennungskammer zur Verdampfung und Zündung des Kerosins führt. Daraus resultiert eine maximale Gas-

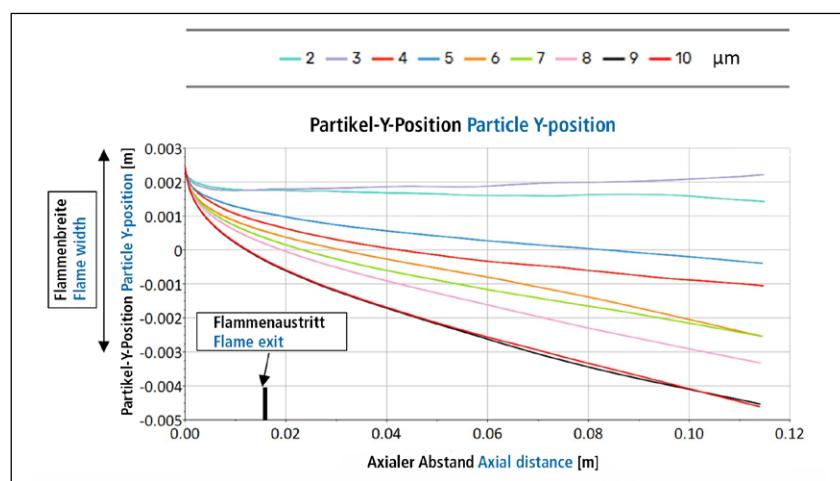


Bild 8: Einfluss des Partikeldurchmessers auf die Partikelflugbahn

Fig. 8: Influence of the particle diameter on the particle trajectory

temperatur von etwa 2900 K im Zentrum der Brennkammer (Bild 3). Die anschließende Expansion in der divergenten Düse transformiert thermische in kinetische Energie, wodurch Überschallgeschwindigkeiten bis 1950 m/s (Mach 2,1) erreicht werden. Im Verlauf der partikelfreien Strömung sind deutliche Überschallknoten erkennbar, die auf eine gut ausgeprägte Strahlstruktur hinweisen (Bild 4).

3.2. Einfluss des Stickstoffdurchsatzes auf die Gasströmung

Die Variation des Stickstoffvolumenstroms zeigt signifikante Auswirkungen auf die thermodynamischen Eigenschaften der Gasströmung im HVOF-ID-Brenner. Mit zunehmendem Stickstoffdurchsatz von 0 auf 115 L/min wurde ein nahezu linearer Anstieg des Brennkammerdrucks von $4,8 \times 10^5$ bis $6,4 \times 10^5$ Pa beobachtet. Dieser Druckanstieg resultiert primär aus dem zusätzlichen Massenstrom, der durch die Stickstoffzufuhr in das System eingebracht wird (Bild

2.2.4. Discretization and Numerical Solution

The following numerical methods were applied to solve the conservation equations:

- Discretization of convection terms: Second-order upwind scheme.
- Pressure-velocity coupling: Simple algorithm.
- Time step: Steady-state calculation with a convergence criterion of 10^{-5} for residuals.

The mesh independence was verified by systematically refining the mesh structure, with a focus on correctly resolving the shear gradients and shock structures in the nozzle.

2.3. Boundary Conditions

Boundary conditions for the simulation were defined based on actual process parameters.

The walls were set as adiabatic. The outlet boundary conditions at the nozzle exit were defined with ambient pressure. The powder injection point was located in the convergent section of the nozzle, directly after the L-shaped deflection.

3. Results & Discussion

3.1. Combustion Mechanisms and Gas Flow Characteristics

As part of the numerical investigation of the HVOF-ID torch using *Ansys Fluent*, the two-stage combustion of hydrogen and kerosene was analyzed. The simulations show that hydrogen combustion already produces a hot gas flow of approximately 1800 K in the first CD nozzle, leading to the evaporation and ignition of the kerosene in the combustion chamber. This results in a maximum gas temperature of approximately 2900 K in the center of the combustion chamber (Fig. 3). Subsequent expansion in the divergent section of the nozzle transforms thermal energy into kinetic energy, reaching supersonic velocities of up to 1950 m/s (Mach 2.1). Along the flow path, distinct shock diamonds are visible, indicating a well-defined jet structure (Fig. 4).

3.2. Influence of the Nitrogen Flow Rate on Gas Dynamics

Variation of the nitrogen volumetric flow rate shows significant effects on the thermodynamic properties of the

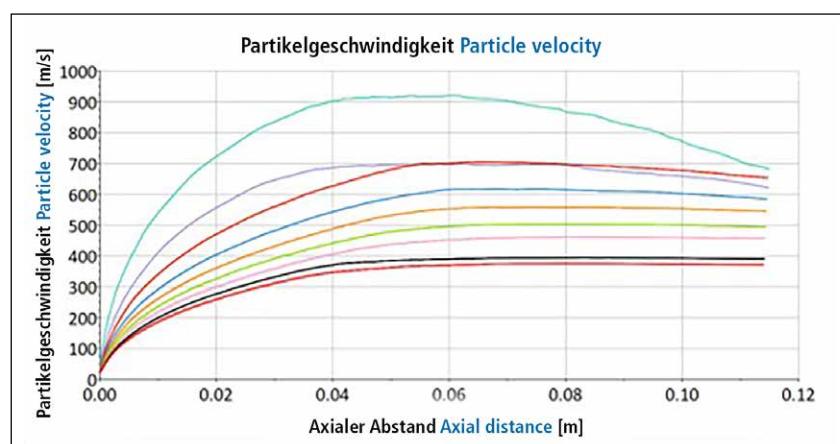


Bild 9: Einfluss des Partikeldurchmessers auf die Partikelgeschwindigkeit

Fig. 9: Influence of the particle diameter on the particle velocity

5). Gleichzeitig wirkt Stickstoff als inertes Kühlgas, was aufgrund der spezifischen Wärmekapazität zu einer deutlichen Reduktion der Flammen-temperatur führt. So sinkt die maximale Gastemperatur im Brennerinnen- ren mit steigender Stickstoffzufuhr um bis zu 200 K im Vergleich zum Referenzfall ohne Stickstoffzugabe (Bild 6). In Bezug auf die Strömungsgeschwindigkeit wurde ein komplexer Zusammenhang festgestellt. Während die Maximalgeschwindigkeit im Düsenbereich bei hohem Stickstoffvolumenstrom leicht von 2200 m/s auf 1900 m/s abnimmt, zeigt sich im nachgelagerten Freistrahlbereich eine Strahlstruktur mit verlangsamtem Geschwindigkeitsverlust. Dies deutet darauf hin, dass Stickstoff die Gastemperatur in der Brennkammer reduziert, jedoch die Kohärenz und Richtung der Gasströmung nach der Austrittsdüse stabilisiert. Die Mach-Zahl-Analysen bestätigen diese Beobachtungen: Zwar sinkt der lokale Maximalwert leicht, jedoch bleibt der Bereich mit Überschallverhältnissen bei erhöhtem Stickstoff länger erhalten, was für eine verbesserte Expansionseffizienz spricht (Bild 7).

3.3. Einfluss der Partikelgröße und des Spritzabstands auf das Partikelverhalten

In den folgenden Diagrammen ist anzumerken, dass nur der Bereich nach der Partikeleindüsing in die divergente Düse simuliert wird. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen verdeutlichen, dass sowohl die Partikelgröße als auch der Spritzabstand einen wesentlichen Einfluss auf das thermische und kinetische Verhalten der WC-12Co-Partikel im HVOF-ID-Beschichtungsprozess haben. Kleinere Partikel (2 µm) folgen aufgrund ihres geringeren Trägheitsmoments deutlich besser dem Gasströmungsverlauf (Bild 8) und erreichen schneller die durch die Gasströmung vorgegebene maximale Partikelgeschwindigkeit (Bild 9 und 10). Sie weisen höhere Endgeschwindigkeiten (bis 700 m/s) und maximale Temperaturen von knapp unter 2000 K auf, verglichen mit größeren Partikeln (10 µm), deren Geschwindigkeit und Temperatur aufgrund der erhö-

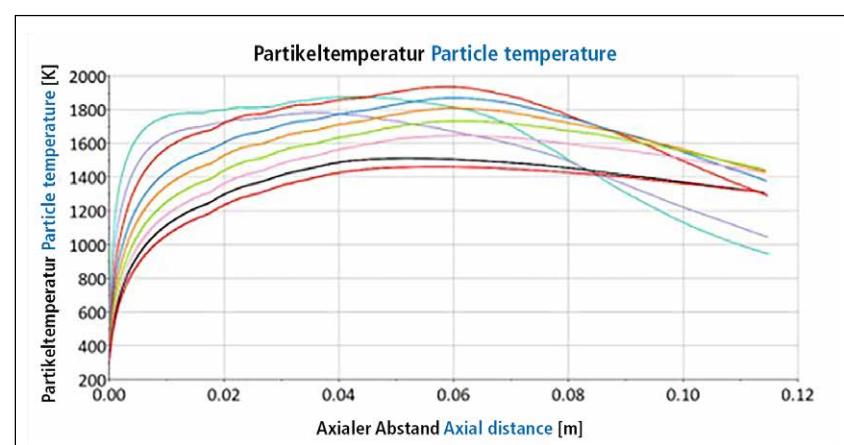


Bild 10: Einfluss des Partikeldurchmessers auf die Partikeltemperatur

Fig. 10: Influence of the particle diameter on the particle temperature

ten Masse und des geringeren Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses mit 400 m/s und 1500 K deutlich niedriger ausfallen.

Mit zunehmendem Spritzabstand wurde für alle Partikelgrößen eine Abnahme sowohl der Partikelgeschwindigkeit als auch der -temperatur festgestellt. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei kleinen Partikeln, die aufgrund ihrer geringen thermischen Trägheit rasch mit der abkühlenden Gasströmung interagieren und dadurch schneller an Energie verlieren. Die Simulation bestätigt, dass eine gezielte Auswahl der Partikelgröße in Kombination mit einem optimierten Spritzabstand entscheidend für die Erreichung idealer Partikelströmungseigenschaften ist. Insbesondere für feine Pulver erweist sich ein angepasster Spritzabstand als vorteilhaft, um sowohl nicht zu hohe Geschwindigkeiten als auch ausreichend hohe Temperaturen zur Sicherstellung einer effektiven Substrathaf- tung zu gewährleisten.

gas flow in the HVOF-ID torch. With increasing nitrogen flow rate from 0 to 115 L/min, an almost linear increase in torch chamber pressure of 4.8×10^5 bis 6.4×10^5 Pa was observed. This pressure increase is primarily caused by the additional mass flow introduced into the system through nitrogen injection (Fig. 5). At the same time, nitrogen acts as an inert cooling gas, leading to a noticeable reduction in flame temperature. The maximum gas temperature inside the torch decreases by up to 200 K compared to the reference case without nitrogen (Fig. 6). Regarding flow velocity, a complex relationship was found. While the maximum velocity in the nozzle region slightly decreases at high nitrogen flow rates, a more jet structure with reduced velocity decay was observed in the downstream free jet region. This indicates that nitrogen reduces the gas temperature in the combustion chamber but stabilizes the coherence and direction of the gas jet after the nozzle exit. Mach number

analyses confirm these observations: although the local maximum Mach number slightly decreases, the supersonic region persists longer at higher nitrogen levels, indicating improved expansion efficiency (Fig. 7).

3.3. Influence of the Particle Size and Spray Distance on Particle Behavior

It is important to note that only the region after the particle injection into the divergent section of the nozzle was simulated in the following diagrams. The numerical simulation results show that both particle size and spray distance significantly influence the thermal and kinetic behavior of WC-12Co particles in the HVOF-ID coating process. Smaller particles (2 µm) follow the gas flow more closely due to their lower inertia (Fig. 8) and reach thermal and dynamic equilibrium with the gas flow more quickly (Figs. 9 and 10). They attain higher final velocities (up to 700 m/s) and maximum temperatures just below 2000 K, compared to

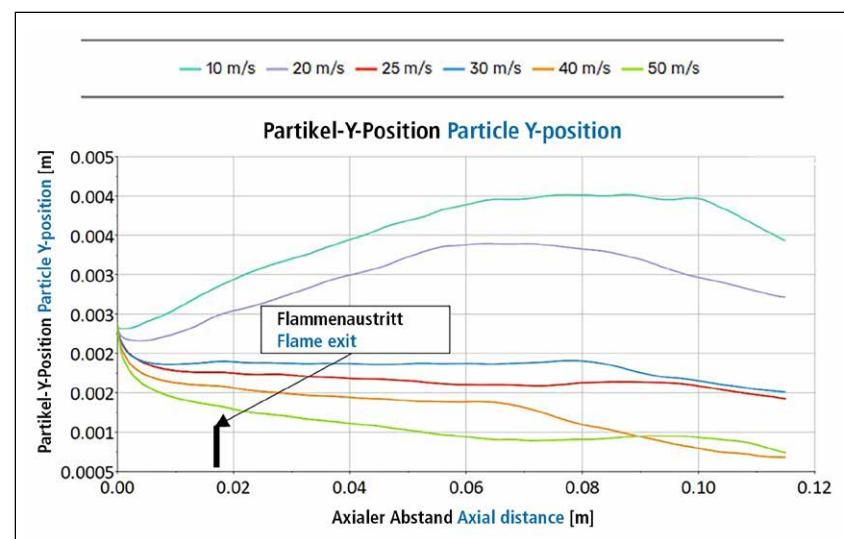


Bild 11: Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Partikelflugbahn bei 2 µm Partikelgröße

Fig 11: Influence of the injection speed on the particle trajectory at 2 µm particle size

3.4. Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf das Partikelverhalten

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Injektionsgeschwindigkeit der Partikel einen signifikanten Einfluss auf deren Flugverhalten, Temperaturaufnahme und Beschleunigung im Gasstrahl hat. Im untersuchten Bereich von 10 bis 50 m/s lässt sich eine komplexe Abhängigkeit erkennen, die von einer Wechselwirkung mit der turbulenten Strömung geprägt ist. Das ist vor allem bei kleineren Partikeln von 2 µm sichtbar, wo ein deutlich unregelmäßiges Flugverhalten bei nahezu allen Injektionsgeschwindigkeiten zu erkennen ist. Größere Partikel (5 µm) zeigen demgegenüber ein deutlich stabileres Flugverhalten und profitieren tendenziell von niedrigeren Injektionsgeschwindigkeiten, da sie hier die zentrale Strömungslinie besser durchqueren und weniger stark von Strömungsschwankungen beeinflusst werden. Hier führt eine moderate Steigerung der Injektionsgeschwindigkeit zu einer gleichmäßigeren Erwärmung und höheren Endgeschwindigkeiten. Bei einer sehr hohen Injektionsgeschwindigkeit (50 m/s) wurde jedoch unabhängig von der Partikelgröße beobachtet, dass Partikel in peripheren Zonen des Gasstrahls ausweichen und somit nicht optimal beschleunigt und erwärmt werden. Das kann dadurch erklärt werden, dass bei zu hohen Injektionsgeschwindigkeiten die Partikel eher an den Rand der Gasströmung mitgerissen werden und somit schon beim Austreten aus der Düse keine optimale Position vorliegt.

Tabelle 1: Randbedingungen und variable Parameter
Table 1: Boundary conditions and variable parameters

Name Item	Randbedingung Boundary condition	Wert Value
Gaseinlass Gas inlet	Volumenstrom Volume flow (O_2)	130 L/min
	Volumenstrom Volume flowrate (H_2)	0-110 L/min
	Volumenstrom Volume flow rate (N_2)	0, 15, 45, 90, 115 L/min
	Temperatur Temperature	300 K
Kerosineinlass Kerosene inlet	Volumenstrom Volume flow rate	2,5 L/h
	Temperatur Temperature	300 K
Pulverinjektion Powder injection	Massenstrom Mass flow rate	0,00033 kg/s
	Temperatur Temperature	325 K
	Injektionsgeschwindigkeit Injection velocity	10, 20, 25, 30, 40, 50 m/s
	Injektionswinkel Injection angle	45°, 90°, 135°
	Partikeldurchmesser Particle diameter	2-10 µm
	Pulverdichte Powder density (WC-12Co)	14320 kg/m³
Auslass-Düse (Umgebungsbedingungen) Outlet nozzle (ambient conditions)	Spezifische Wärmekapazität Specific heat capacity	295 J/(kg K)
	Druck Pressure	1 atm
	Temperatur Temperature	300 K
Gekühlte Wand Cooled wall	Luft-Massenverteilung Air mass distribution	21 % (O_2), 79 % (N_2)
	Temperatur Temperature	300 K

Insgesamt zeigt sich, dass eine an die Partikelgröße angepasste Injektionsgeschwindigkeit entscheidend für eine effektive thermische und kinetische Konditionierung der Partikel ist. Besonders für feine Pulver ist eine geringere Injektionsgeschwindigkeit (< 25 m/s) empfehlenswert, um eine zentrale Flugbahn mit maximalem Energieeintrag zu gewährleisten.

4. Zusammenfassung

Die numerische Untersuchung des HVOF-ID-Prozesses zeigt, dass die gezielte Variation von Prozessparametern einen erheblichen Einfluss auf die Strömungs- und Partikeleigenschaften hat. Durch Stickstoffzugabe lässt sich die Flammentemperatur regulieren, was vor allem bei thermisch sensiblen Feinstpulvern vorteilhaft ist

larger particles (10 µm), whose velocity and temperature are significantly lower due to their increased mass and lower surface-to-volume ratio. As spray distance increases, both particle velocity and temperature decrease for all particle sizes. This effect is particularly pronounced for smaller particles, which interact more rapidly with the cooling gas stream due to their low thermal inertia and thus lose energy more quickly. The simulation confirms that optimal particle size selection in combination with a suitable spray distance is crucial for achieving ideal particle flow properties. Especially for fine powders, an adjusted spray distance is beneficial to ensure both sufficiently high temperatures and moderate velocities for effective substrate adhesion.

3.4. Influence of the Injection Velocity on Particle Behavior

Simulation results show that the particle injection velocity has a significant effect on their flight behavior, temperature uptake, and acceleration in the gas jet. In the range of 10 to 50 m/s examined, a complex relationship was found, which is strongly influenced by interaction with the turbulent flow. This is particularly evident for smaller particles of 2 µm, which show highly irregular flight behavior at almost all injection velocities. In contrast, larger particles (5 µm) exhibit much more stable trajectories and generally benefit from lower injection velocities, as they pass through the central flow axis more effectively and are less influenced by flow fluctuations. In this case, a moderate increase in injection velocity leads to more uniform heating and higher final velocities. However, at very high injection velocities (50 m/s), regardless of the particle size, it was observed that particles in peripheral zones of the gas jet evade and are therefore not optimally accelerated and heated. This can be explained by the fact that at excessively high injection velocities, particles are more likely to be carried toward the edge of the gas stream and are therefore not ideally positioned when exiting the nozzle.

Overall, the results show that an injection velocity adjusted to the parti-

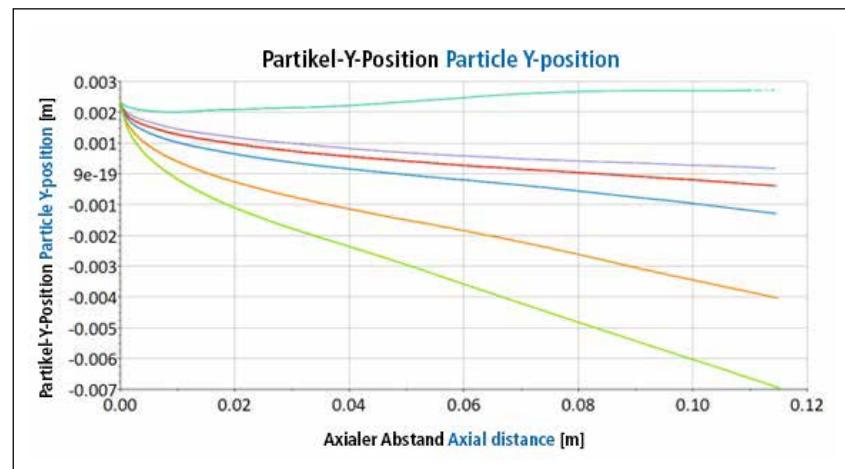


Bild 12: Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Partikelflugbahn bei 5 µm Partikelgröße

Fig. 12: Influence of the injection speed on the particle trajectory at 5 µm particle size

und Überhitzungen vermeiden kann und die Strahlstruktur stabilisieren, was eine verbesserte Kontrolle des Beschichtungsprozesses ermöglicht. Kleine Partikel weisen eine höhere thermische und kinetische Reaktionsfähigkeit auf, reagieren jedoch empfindlicher auf Spritzabstand und Injektionsbedingungen. Eine angepasste Injektionsgeschwindigkeit, insbesondere im unteren Bereich, verbessert die Energieaufnahme und Flugstabilität feiner Pulver. Insgesamt liefert die Simulation eine fundierte Grundlage für die Optimierung des HVOF-ID-Prozesses hinsichtlich der Gaseigenschaften im HVOF-ID-Brenner und der Partikeleigenschaften und der Flugbahn nach dem Düsenaustritt.

Zusammenfassend belegen die Simulationsergebnisse:

- Die Verbrennung von Wasserstoff und Kerosin erzeugt Temperaturen bis 2900 K und Überschallgeschwindigkeiten im Bereich von Mach 2.
- Eine Erhöhung des Stickstoffdurchsatzes führt zu niedrigeren Flammentemperaturen, höherem Kammerdruck und stabileren Strahlstrukturen.
- Kleine Partikel (2 µm) erreichen höhere Geschwindigkeiten.
- Ein optimaler Spritzabstand ist entscheidend für effektive Parti-

kelflugeigenschaften, insbesondere bei feinen Pulvern.

Danksagung

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Projekt wird durchgeführt durch die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



INFO

Der Fachbeitrag basiert auf dem IGF-Forschungsvorhaben 01IF22.830N / DVS-Nr. 02.3604.

cle size is crucial to achieving effective thermal and kinetic conditioning of the particles. Especially for fine powders, lower injection velocities (<25 m/s) are recommended to ensure a central trajectory with maximum energy input.

4. Summary

The numerical investigation of the HVOF-ID process shows that targeted variation of the process parameters has a significant effect on the gas flow and particle characteristics. The addition of nitrogen enables regulation of the flame temperature and stabilization of the jet structure, allowing for improved control of the coating process. Small particles exhibit higher thermal and kinetic responsiveness but are more sensitive to spray distance and injection conditions. An adjusted injection velocity, particularly in the lower range, improves energy uptake and flight stability of fine powders. Overall, the simulation provides a solid foundation for optimizing the HVOF-ID process in terms of gas dynamics inside the HVOF-ID torch and of the particle behavior and the trajectory after the nozzle exit.

In summary, the simulation results demonstrate the following:

- Combustion of hydrogen and kerosene generates temperatures up to

2900 K and supersonic velocities in the range of Mach 2.

- Increasing the nitrogen flow rate leads to lower flame temperatures, higher chamber pressure, and more stable jet structures.
- Small particles (2 µm) achieve higher velocities.
- An optimal spray distance is crucial to effective particle flight properties, especially for fine powders.

Acknowledgement

The project is promoted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWE) on the basis of a resolution of the German Bundestag. The project is carried out by the research association "Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf."



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

INFO

This peer-reviewed paper is based on the IGF research project No. 01IF22.830N / DVS No. 02.3604.

Literatur References

- [1] Bach, F.-W., Henne, R., Landes, K., Lugscheider, E., Prehm, J., Hartz, K., Ernst, F., Zimmermann, S., Arnold, J., Müller, M., Schiller, G., Kavka, T.: Diagnostics for Thermal Coating Processes - Research Results of the DFG-Founded Project Group. In Thermal Spray 2004: Proceedings from the International Thermal Spray Conference. International Thermal Spray Conference, pp. 980/7. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2004p0980>
- [2] Baumann, I., Hagen, L., Tillmann, W., Hollingsworth, P., Stangier, D., Schmidtmann, G., Tolan, M., Paulus, M., Sternemann, C.: Process characteristics, particle behavior and coating properties during HVOF spraying of conventional, fine and nanostructured WC-12Co powders. Surface and Coatings Technology Vol. 405, 2021, 126716. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126716>
- [3] Baumann, I., Tillmann, W., Schaak, C., Schmidt, K., Hagen, L., Zajaczkowski, J., Schmidtmann, G., Matthäus, G., Luo, W.: Internal Diameter Coating by Warm Spraying of Fine WC-12Co Powders (- 10 + 2 µm) with Very Short Spray Distances up to 10 mm. J Therm Spray Tech Vol. 30, 2021, pp. 1344/64. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01195-x>
- [4] Bartuli, C., Cipri, F., Valente, T., Verdone, N.: CFD Simulation Of An HVOF Process For The Optimization Of WC-Co Protective Coatings. Wit Press Transactions on Engineering Sciences 39, 2003, WIT Press, Electronic ISSN 1743-3533.
- [5] Kamnis, S., Gu, S., Lu, T. J., Chen, C. 2008. Computational simulation of thermally sprayed WC-Co powder. Computational Materials Science Vol. 43, Issue 4, 2008, pp. 1172/82. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.015>
- [6] Pulsford, J., Venturi, F., Pala, Z., Kamnis, S., Hussain, T.: Application of HVOF WC-Co-Cr coatings on the internal surface of small cylinders: Effect of internal diameter on the wear resistance. Wear, Vol. 432-433, 2019, 202965. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202965>
- [7] Ren, J., Zhang, G., Rong, Y., and Ma, Y.: A feature-based model for optimizing HVOF process by combining numerical simulation with experimental verification. Journal of Manufacturing Processes Vol. 64, 2021, pp. 224/38. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.017>
- [8] Tabbara, H. and Gu, S.: Computational simulation of liquid-fuelled HVOF thermal spraying. Surface and Coatings Technology, Vol. 204, Issue 5, 2009, pp. 676/84. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.005>
- [9] Tillmann, W., Schein, J. et. al. (2.-3. April 2025). Online process diagnostics for internal diameter (ID) HVOF spray processes (Poster). 24. Werkstofftechnisches Kolloquium. Chemnitz, Germany.

Kontrolle von Pulverströmen in der Beschichtungstechnik

Control of Powder Streams in Coating Technologies

Kurzfassung

Der Füllgrad von Tellernuten in Scheibenförderern wird mittels Lasertriangulation ermittelt. Eine Korrelation des Nutfüllungsgrads mit der Pulverförderrate wird nachgewiesen. Anwendungsmöglichkeiten für das Aufbauen besonders effektiver Regelkreise zum Erzielen konstanter Pulverförderraten und für das Ermitteln optimaler Parameter und Hardware-Setups zum Betreiben von Scheibenförderern werden diskutiert. Das Stabilisierungsverhalten von Pulverströmen nach Umschaltvorgängen wird am Beispiel einer auf Quetschventilen basierenden Umschalteinheit mittels digitaler Bildanalyse beleuchteter Pulverstrahlen, die aus Düsen austreten, untersucht. Die Zeiten zum Erreichen eines stabilisierten Pulverstroms hängen von der Schüttdichte und Förderrate des Pulvers ab.

1. Einleitung

In Thermischen Beschichtungsprozessen mit pulverförmigem Zusatzwerkstoff hängt die erzielbare Schichtqualität maßgeblich von abzustimmenden Charakteristika des Energieträgers und der zugeführten Pulverströme ab. Während das Optimieren der Eigenschaften und Stabilität von Flammen, thermischen Plasmastrahlen oder Laserstrahlen Gegenstand zahlreicher Entwicklungsprojekte ist und kontinuierlich verbesserte Brennertechnologien hervorbringt, wird der Kontrolle der zugeführten Pulverströme eine vergleichsweise geringe Beachtung geschenkt. Dabei lassen sich Ansätze zum Herstellen von Near-net-shape-Beschichtungen nur realisieren, wenn die Pulverförderrate präzise eingestellt und stabil gehalten wird [1]. Insbesondere im Fall ra-



Dr.-Ing. Andreas Wank

Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung
Head of the Research and Development Department

GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach
a.wank@gtv-mbh.de



Enrico Hauser

BMSR-Techniker
BMSR technician

GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach



Christian Schmengler, M. Eng.

Prozessingenieur in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung
Process engineer in the research and development department

GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach
c.schmengler@gtv-mbh.de



Melissa Mülln, B. Eng.

Entwicklungsingenieurin in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung
Development engineer in the research and development department

GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach
m.muelln@gtv-mbh.de



Dr.-Ing. Tim Königstein

Prozessexperte für das Thermische Spritzen
Process expert for thermal spraying

GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach
t.koenigstein@gtv-mbh.de

Mehr Informationen zu den Autoren auf www.thermal-spray-bulletin.info/de/autoren
More information on the authors at [https://www.thermal-spray-bulletin.info/en/authors](http://www.thermal-spray-bulletin.info/en/authors)

dialer Injektion von Pulverströmen in APS-Prozessen hängt der Übertrag von Wärme und kinetischer Energie auf die Partikel nicht nur von den Eigenschaften des Pulverwerkstoffes ab, sondern auch vom Injektionsort und -winkel sowie der Divergenz der aus den Pulverinjektoren austretenden Pulverströme und der Geschwindigkeit der Partikel. Auch beim Laser-Pulver-Auftragschweißen beeinflusst die lokale Verteilung der Pulverpartikel die Qualität von Schichten maßgeblich [2]. Zudem kann bereits kurzzeitiges Pulsen der Pulverströme zu Ausschuss führen. Daher wurden Monitoringwerkzeuge, die offline die

1. Introduction

The achievable quality of thermal spray coatings produced with powder feedstock strongly depends on the tuning of characteristics of the applied energy carrier and the fed powder streams. There are numerous development projects on the optimization of properties and stability of flames, thermal plasma jets or laser beams yielding continuously improved torch technologies. Contrary, only little attention is paid to control of fed powder streams, although near net shape approaches can only be realized, if powder feed rates are set precisely and kept con-

Abstract

The filling grade of feeder disk grooves is monitored by a laser triangulation sensor. A correlation between groove filling grade and powder feed rate is proven. Applicability of groove filling grade data for realization of effective control loops to secure constant powder feed rates and for determination of optimal hardware setups and parameter settings of disk type feeders are discussed. Stabilizing behavior of powder streams after switching between different powder feed lines using a compact squeeze valve based powder quick switch unit is studied by digital analyses of images taken from illuminated powder streams that exit injectors. The time to re-establish stable powder streams depends on apparent density and feed rates of powders.

stant throughout the coating process [1]. There is particularly strong dependency of heat and momentum transfer to spray particles not only on powder properties but also on injection location and angle as well as divergence of powder streams and speed of particles exiting powder injectors in APS processes with radial injection of powder feedstock. Also, the local particle density distribution of powder streams interacting with the laser beam must be adjusted to ascertain high quality of laser claddings [2] and even short-term pulsing of powder streams can result in faults. Therefore, monitoring tools for offline characterization of the contours of powder streams exiting powder nozzles as well as online characterization of their dimensions and intensity have been developed to series production readiness [3].

Kontur von aus Düsen austretenden Pulverströmen und online deren Dimensionen und Intensität charakterisieren, zur Serienreife entwickelt [3]. Sowohl für die Beschichtungsverfahren des Thermischen Spritzens als auch für das Laser-Pulver-Auftragschweißen (Laser Cladding) kommen zumeist Scheibenförderer zum Einsatz. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sich eine große Bandbreite von Pulvern aus Metallen, Keramiken, Polymeren und Verbundwerkstoffen mit diversen Partikelgrößenverteilungen und -formen fördern lassen. Dabei lässt sich die Pulverförderrate in weiten Grenzen, d. h. von etwa 0,1 bis 100 g/min, definiert einstellen und über lange Zeiträume konstant halten. Das generelle Förderprinzip ist in [4] detailliert beschrieben. Zu unterscheiden sind die volumetrische und gravimetrische Regelung.

Bei der volumetrischen Regelung wird die Drehzahl der Förderscheibe vorgegeben und die Pulverförderrate muss durch sogenanntes Ausltern, das im DVS-Merkblatt 2322 [5] beschrieben ist, ermittelt werden. Um eine gewünschte Pulverförderrate einzustellen, muss zunächst die korrespondierende Tellerdrehzahl ermittelt werden. Dieser Aufwand entfällt bei der gravimetrischen Regelung, bei der sogenannte Waage-Pulverförderer basierend auf kontinuierlichem Monitoring der Gewichtsabnahme des Pulvorratsbehälters während des Förderns automatisch die Tellerdrehzahl zum Erreichen einer vorgegebenen Pulverförderrate anpassen. Die gravimetrische Regelung bietet neben dem Vorteil des reduzierten Vorbereitungsaufwands auch die Vorteile der kontinuierlichen Überwachung des Pulverförderprozesses mit Meldung des Verletzens von Grenzwerten an den Anlagenbediener und der automatischen Kompensation bspw. von füllstandsbedingten Drifts oder von durch Verschleiß an Förderkomponenten abrupt auftretenden Änderungen. Somit stellt die gravimetrische Regelung eine Grundlage für eine reproduzierbare Massenfertigung bei minimaler Ausschussrate und für die Fertigung sicherheitsrelevanter Bauteile dar. Im Vergleich zur volumetrischen Regelung wird über längere Messzeiträume eine überle-

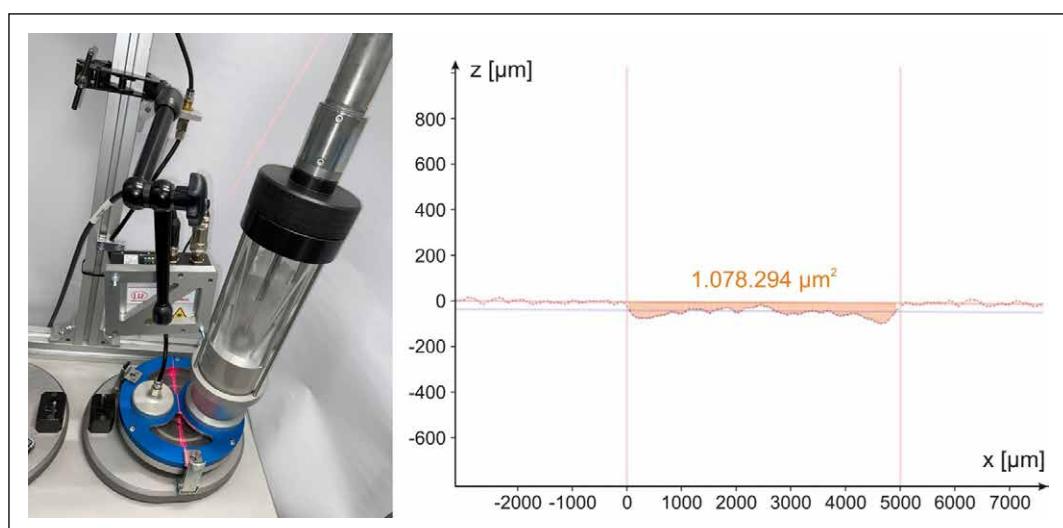


Bild 1: Versuchsaufbau für Analysen der Nutfüllung von Fördertellern durch gefördertes Pulver mit Hilfe eines Laser-triangulationssensors (links, Messbereich rot beleuchtet) und Auswertung bezüglich des nicht gefüllten Querschnitts anhand von Messdaten (rechts, nicht gefüllter Nutquerschnitt orange hinterlegt)

Fig. 1: Experimental setup for laser triangulation sensor based analyses concerning powder filling grade of feeder disk grooves (left, red illumination of analyzed line) and evaluation of unfilled groove cross section based on measured data (right, unfilled groove cross section shown in orange)

gene Präzision der gemittelten Pulverförderrate abgesichert. Insbesondere für das Anwenden sehr geringer Pulverförderraten können die auf den Regelzyklen basierenden Schwankungen aber höher ausfallen als bei Anwendung des volumetrischen Regelprinzips [6]. Für diese Betriebsbedingung bietet sich daher das über die Wägezellen überwachte Fördern bei Anwendung der volumetrischen Regelung an, bis ein definierter Grenzwert der Abweichung von der vorgegebenen Pulverförderrate überschritten wird und ein automatisches Kompensieren durch Anpassen der Tellerdrehzahl in einem Schritt erfolgt.

Aufgrund der Annahme, dass Veränderungen der Pulverförderrate bei konstanter Tellerdrehzahl mit der Nutfüllung von Fördertellern korrelieren könnten, erfolgen weiterführende Arbeiten zur Charakterisierung des Förderverhaltens mit begleitender Erfassung der Nutfüllung mittels Lasertriangulation. Zur Bewertung der zeitlich hochauflösten Stabi-

In thermal spraying and laser cladding mostly disk type powder feeders are applied. They feature an excellent capability to feed a wide spectrum of metal, ceramic, polymer, and composite material powders showing different shape and size fractions with well-defined powder feed rates ranging from roughly 0.1 to 100 g/min at high stability over long time periods. The general principle is described in detail in [4]. The feeders can be operated either in volumetric or gravimetric control mode. In the volumetric control mode, a feeder disk rotation speed is set and resulting powder feed rates need to be measured by a procedure described in DVS code of practice number 2322 [5]. To permit feeding of powder with a desired feed rate first the corresponding feeder disk rotation speed must be determined. Such effort is not needed when operating so-called scale powder feeders in gravimetric control mode that is based on continuous monitoring of the weight of powder feeder hoppers during feed-

ing processes and automatic adjustment of feeder disk rotation speeds to secure a set powder feed rate.

The gravimetric control mode does not only offer the advantage of reduced preparation efforts. It also permits continuous monitoring of the feeding process including notification of operators in case of limit value violations and automatically compensates e.g., effects of wear of feeder components or drifts due to changing hopper filling levels. thereby gravimetric control represents a base for reproducible mass production with minimal scrap rate and for production of safety relevant workpieces. For extended measurement periods also improved accuracy of average powder feed rate compared to feeding in volumetric control mode is ascertained. If very low powder feed rates are applied, feed rate fluctuations can be higher due to control cycles of the closed-loop gravimetric control mode compared to feeding in volumetric mode [6]. Application of the volumetric control mode with

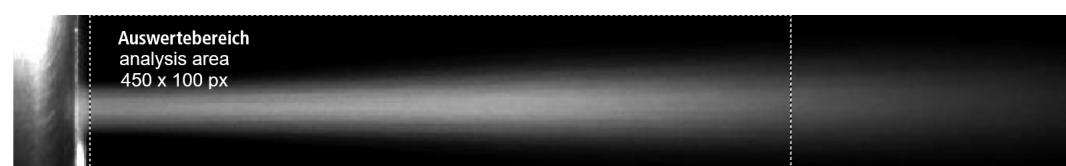


Bild 2: Schematische Darstellung der Pulverstrahlanalysen mittels digitaler Bildauswertung

Fig. 2: Schematic of powder stream analyses for determination of dead time during switching of powder

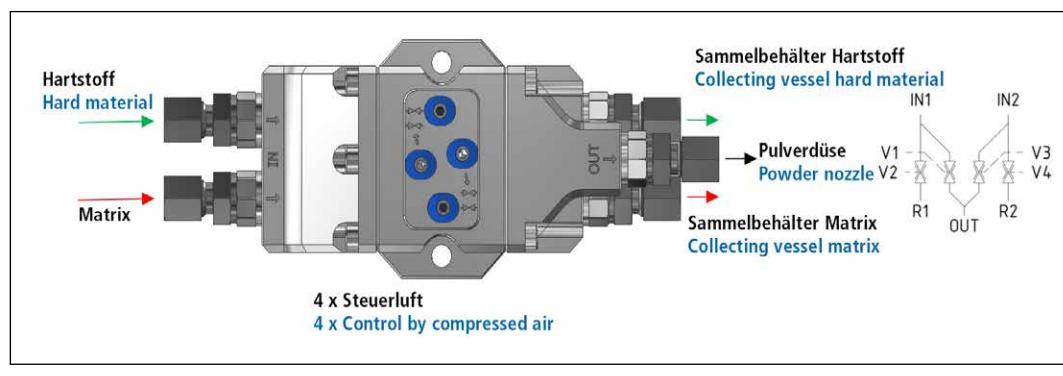


Bild 3: Schematischer Aufbau der Umschalteinheit GTV Powder Quick Switch

Fig. 3: Schematic of GTV powder quick switch unit

lität von aus Pulverinjektoren austretenden Pulverströmen erfolgen Analysen mittels digitaler Bildauswertung. Die gleiche Methodik wird auch angewendet, um zu ermitteln, welche Stabilisierungszeiten für das Absichern eines stabilen, definierten Pulverstroms nach dem Umschalten zwischen verschiedenen Pulvern, die beispielsweise für das zweilagige Beschichten von Bremsscheiben konsekutiv der Laser-Pulverdüse zugeführt werden [7], erforderlich sind.

2. Versuchsdurchführung

In einem ersten Schritt erfolgen grundlegende Analysen der Nutfüllung von Fördertellern in Abhängigkeit von dem geförderten Pulver und der eingestellten Tellerdrehzahl unter Verwendung eines Lasertriangulationsensors *scanControl 3010-200* (Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Ortenburg, Deutschland), dessen Messbereich den Förderteller mittig schneidet und den gesamten Durchmesser des Fördertellers abdeckt (Bild 1, links). Die Schultern der Tellernut spannen eine Ebene auf, die als Referenz eine vollständig gefüllte Nut repräsentiert. Deren Abstand zu der gemessenen Oberfläche der mit Pulver gefüllten Nut ergibt eine Fläche, die dem nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitt entspricht und kontinuierlich erfasst wird (Bild 1, rechts). Für die Untersuchungen werden Förderteller mit einer 5,0 mm breiten und 0,6 mm tiefen Nut verwendet. Inertgasverdüstete AISI316L-Pulver in den nominellen Körnungen +20 – 53 µm und +53 – 150 µm werden bei Anwendung von Tellerdrehzahlen zwischen 1 und 10 U/min gefördert. Die Analysen der feineren

Pulverfraktion erfolgen mit aktiviertem und deaktiviertem Rührer, um zu prüfen, ob dieser Betriebsparameter die Nutfüllung signifikant beeinflusst. Weiterführende Untersuchungen werden durchgeführt, während gleichzeitig der nicht gefüllte Nutquerschnitt, die Tellerdrehzahl und die Pulverförderrate erfasst werden. Die Pulverförderrate wird dabei bestimmt, indem das Pulver für eine Stunde in einen auf einer Wägeeinheit montierten Auffangbehälter gefördert wird. Für diese Untersuchungen kommen Fördersteller mit einer 3,5 mm breiten und 0,3 mm tiefen Nut sowie inertgasverdüstetes AISI316L-Pulver in der nominellen Körnung +20 – 53 µm zum Einsatz. Die Untersuchungen dienen zur Prüfung, ob Veränderungen des nicht gefüllten Nutquerschnitts mit Veränderungen der Pulverförderrate einhergehen.

Für Analysen zur Stabilität von aus Pulverinjektoren austretenden Pulverströmen werden diese mittels einer LED-Lampe beleuchtet und mit einer Bildrate von 409 fps aufgezeichnete CCD-Kamerabilder einer digitalen Bildauswertung in Bezug auf die Helligkeit im Auswertebereich (Region of Interest) unterzogen (Bild 2). Das Umschalten zwischen unterschiedlichen Pulvertypen erfolgt unter Einsatz einer Umschalteinheit *GTV PQS* (Powder Quick Switch, GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, D), deren Funktionsprinzip in Bild 3 dargestellt ist. Die Quetschventile werden simultan derart geschaltet, dass der Pulverstrom einer Linie zur Pulverdüse gefördert wird, während der Pulverstrom der anderen Linie in einen zugeordneten Auf-

continuous monitoring of the hopper weight and stepwise adjustment of feeder disk rotation speed for violation of defined powder feed rate limit values provides the best possible feed rate stability then.

Assuming that changes of powder feed rate at constant feeder disk rotation speed correlate with feeder disk groove filling grade continuous research on the characterization of feeding characteristics including monitoring of disk groove filling grade based on laser triangulation measurements is conducted. High time resolution investigations on the stability of powder streams exiting powder injectors are carried out by digital image analyses. The same method is applied to determine how long it takes for powder streams to stabilize after switching between lines feeding metal and carbide / cermet powders for example during production of double layer protective laser claddings on brake disks [7].

2. Experimental

First basic analyses of the feeder disk groove filling grade depending on the type of powder material and the set disk rotation speed are conducted using a laser triangulation sensor type *scanControl 3010-200* (Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Ortenburg, Germany). Measurements are taken from a line through the center of the feeder disk covering the diameter of the disk completely (Fig. 1, left). The shoulders of the feeder disk groove define a reference plane that represents a completely filled disk groove. The integral of local distances between the reference plane and the surface of

the powder filling the groove represents the cross section of the feeder disk groove that is not filled with powder particles. This area is measured and recorded continuously (Fig. 1, right). Feeder disks with groove width of 5.0 mm and groove depth of 0.6 mm are used for these analyses. Inert gas atomized AISI316L steel powder showing nominal size fractions +20 – 53 µm and +53 – 150 µm and feeder disk rotation speeds between 1 and 10 rpm are applied. For the finer powder fraction analyses are conducted with activated and deactivated mixer to check if mixing takes significant influence on the groove filling grade.

Continuative investigations are conducted by recording powder feed rate and feeder disk groove filling grade simultaneously for a duration of one hour to check if changes of the disk groove filling grade correlate with changes of the powder feed rate. The powder feed rate is determined by feeding powder into a collecting vessel fixed on a scale unit. For these test series feeder disks with groove width of 3.5 mm and groove depth of 0.3 mm as well as inert gas atomized AISI316L steel powder showing a nominal size of +20 – 53 µm are applied.

Powder streams exiting powder injectors are illuminated by a LED light and CCD camera images taken at a frame rate of 409 fps are evaluated concerning the brightness in a region of interest starting at the powder injector exit plane (Fig. 2). Switching between streams of different powder materials is conducted using a powder quick switch unit type *PQS* (GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, Germany). The functional principle is shown in Fig. 3. Pneumatic squeeze valves are activated in a manner to guide the powder of one feed line to the powder nozzle, while the powder of the other line is fed into a dedicated collecting vessel. Besides inert gas atomized AISI430L steel powder agglomerated and sintered TiC/FeCr 70/30 and spherical fused tungsten carbide (W₂C/WC) is applied. These powder materials cover a wide range of apparent densities. Particle size distribution data, apparent densities and the applied feed

Tabelle 1: Eigenschaften und angewendete Pulverförderratenbereiche der in Umschaltzeitanalysen verwendeten Pulver
Table 1: Properties and feed rate ranges of applied powders in powder switch analyses

Pulvertyp Powder type	AISI430L	TiC/FeCr 70/30	W ₂ C/WC
d10 [μm]*	20,0 20.0	21,8 21.8	30,2 30.2
d50 [μm]*	31,4 31.4	34,1 34.1	39,9 39.9
d90 [μm]*	44,4 44.4	48,1 48.1	52,0 52.0
Schüttdichte apparent density [g/cm ³]	4,2 4.2	1,7 1.7	9,3 9.3
Pulverförderrate powder feed rate [g/min]	20–60	10–30	20–60

* ermittelt mittels dynamischer Bildanalyse (ISO 13322-2) mit Retsch Camsizer X2

* determined by digital image analyses (ISO 13322-2) based on Retsch Camsizer X2

fangbehälter geleitet wird. Neben inertgasverdünsterem AISI430L-Pulver werden agglomeriertes und gesintertes TiC/FeCr 70/30-Pulver und sphärisches Wolframschmelzcarbid-Pulver (W₂C/WC) untersucht, die ein breites Band von Schüttdichten abdecken. Die Schüttdichten und die angewendeten Pulverförderraten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Das Ermitteln erforderlicher Stabilisierungszeiten erfolgt auf der Basis von Helligkeitsverläufen der zuvor beschriebenen digitalen Bildauswertung 30 s über den Umschaltzeitpunkt hinaus. Ausgehend vom Ende der Aufzeichnungen wird ermittelt, zu welchem Zeitpunkt die Helligkeitskurve erstmals aus einem Band mit einer maximalen Abweichung von 2,5 %, 5 % und 10 % fällt, um den Zeitraum ab der Aktivierung der Umschaltung zu definieren, nach dem eine entsprechende Annäherung an den stabilisierten Zustand der Pulverförderung für den neu zugeführten Zusatzwerkstoff erreicht wird.

3. Ergebnisse

3.1 Analysen zum Füllgrad von Fördertellernuten

Für das Fördern von inertgasverdünsterem AISI316L-Pulver in der Körnung +53–150 μm ist der zeitliche Verlauf des nicht gefüllten Nutquerschnitts in Abhängigkeit von der Tellerdrehzahl in Bild 4 dargestellt. Mit zunehmender Tellerdrehzahl steigt der nicht mit Pulver gefüllte Nutquerschnitt im Mittel kontinuierlich an. Für eine Tellerdrehzahl von 10 U/min wird mit etwa 1,5 mm² im Vergleich zu einer Tellerdrehzahl von 1 U/min (etwa 0,8 mm²) ein nahezu doppelt so hoher Wert gemessen.

Während die Schwankungsbreite der Messwerte für geringe Tellerdrehzahlen von 1 bis 3 U/min vergleichsweise

gering ausfällt, fluktuiert der nicht gefüllte Nutquerschnitt bei 7 U/min zwischen 1,0 und 1,4 mm². Bei nochmals höherer Tellerdrehzahl von 10 U/min nehmen die Fluktuationen wieder ab. Auch beim Fördern von Pulver in der feineren Fraktion +20–53 μm wird mit steigender Tellerdrehzahl eine Zunahme des nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitts beobachtet (Bild 5). Allerdings ist der Effekt weniger stark ausgeprägt als beim Fördern der gröberen Pulverfraktion. Auch die Schwankungsbreiten der Messwerte fallen geringer als beim Fördern der gröberen Fraktion aus. Das Deaktivieren eines im Pulvertopf installierten Rührers nimmt zumindest für das Pulver in der Körnung +20–53 μm keinen erkennbaren Einfluss auf die mittlere Nutfüllung oder die Schwankungsbreite der Messwerte.

In Fördertests mit einer konstanten Tellerdrehzahl von 10 U/min über einen Zeitraum von einer Stunde werden für das Anwenden einer Rotationsgeschwindigkeit von 82,5 U/min (75 % des Maximalwerts) des Rührers Schwankungen der Pulverförderrate von 13,8 bis 15,4 g/min aufgezeichnet. Ohne Einsatz des Rührers beträgt die Schwankungsbreite 11,3 bis 15,7 g/min. In diesem Regelungsmodus wird eine klare Korrelation zwischen Nutfüllungsgrad und Pulverförderrate beobachtet (Bild 6). Sowohl kontinuierliche Drifts in den ersten 00:28 h und direkt anschließend bis zum Zeitpunkt 00:48 h als auch sprunghafte Veränderungen bei 00:28 h und 00:48 h fallen zeitlich zusammen. Dabei liegt zwischen den erfassten Ereignissen im Verlauf des Nutfüllungsgrads und der durch das Fördern auf eine Wägeeinheit ermittelten Pulverförderrate ein zeitlicher Versatz. Dieser setzt sich zusammen aus den Zeiten, die das Pulver

rate ranges of the tested powder are listed in Table 1.

Inevitable stabilizing time after switching between powder feed lines is analyzed based on brightness data of the above described digital image analyses of powder streams. The brightness is recorded for a duration of 30 s beyond the time of switching between feed lines. The data is then analyzed starting from the end representing the fully stabilized state. Points of time for emission data to exceed accumulated averages by more than 2.5 %, 5 % and 10 % for the first time are determined. Intervals between those points of time and the times of switching (t_{stop}) represent the duration that is needed to achieve stabilized powder streams.

3. Results

3.1 Feeder Disk Groove Filling Grade Analyses

Graphs of disk groove cross section areas that are not filled by powder during feeding tests using AISI316L

steel powder with nominal size fraction +53–150 μm are shown in Fig. 4 for different feeder disk rotation speeds. The average unfilled groove cross section area increases continuously with increasing feeder disk rotation speed. For 10 rpm rotation speed the value is almost twice as big as for 1 rpm rotation speed (1.5 mm² and 0.8 mm² respectively).

The scattering of unfilled groove cross section areas is small for rotation speeds of 1 to 3 rpm. At 7 rpm rotation speed, however, values range from 1.0 to 1.4 mm². At even higher rotation speed of 10 rpm scattering becomes smaller again.

For feeding of AISI316L steel powder with nominal size fraction +20–53 μm the unfilled groove cross section area also increases with disk rotation speed (Fig. 5). However, the effect is much smaller compared to feeding of the coarser powder. At the same time reduced scattering of values is observed. At least for feeding of the fine powder size fraction +20–53 μm there is no major influence of activating a mixer installed inside the powder feeder hopper on both average disk groove filling grade and its scattering with time.

In 1 hour feeding tests applying a constant feeder disk rotation speed of 10 rpm the powder feed rate shows deviations between 13.8 and 15.4 g/min if the mixer rotates at a speed of 82.5 rpm (75 % of the maximum value). If the mixer is deactivated devi-

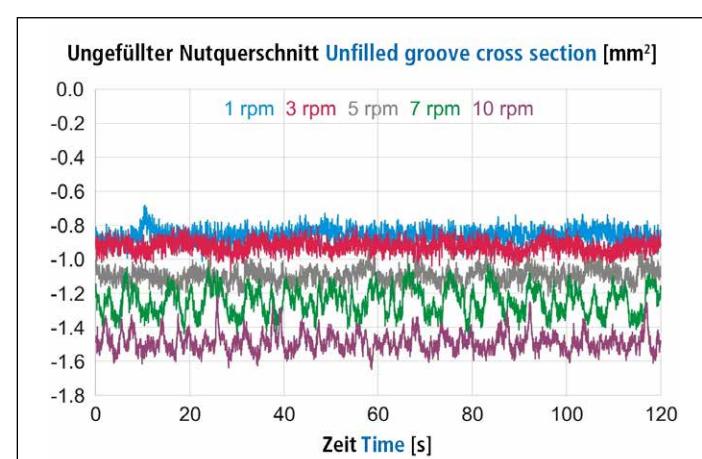


Bild 4: Zeitlicher Verlauf des nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitts beim Fördern von AISI316L-Pulver in der nominellen Körnung +53–150 μm für Tellerdrehzahlen zwischen 1 und 10 U/min.

Fig. 4: Development of unfilled groove cross section of feeder disks with time for feeding of AISI316L steel powder with nominal size fraction +53–150 μm for feeder disk rotation speeds between 1 and 10 rpm

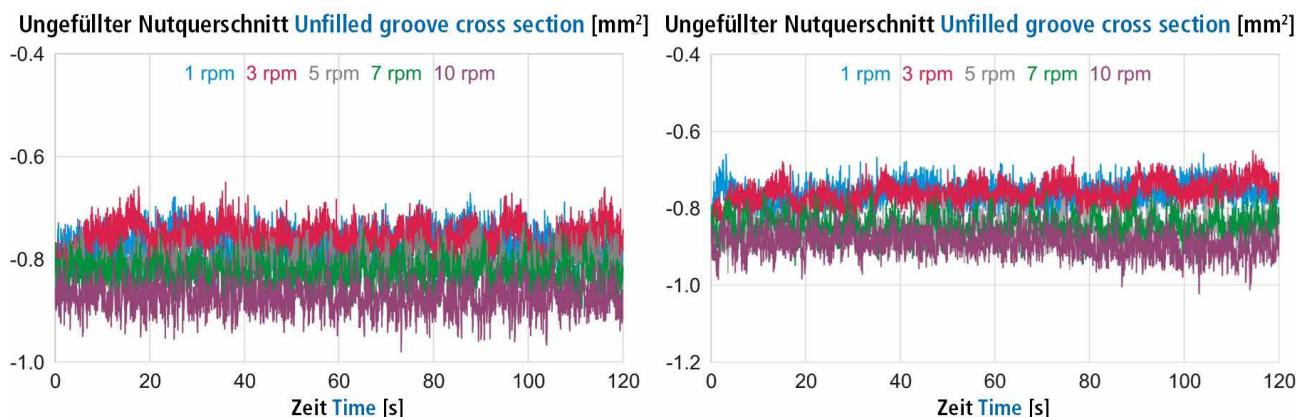


Bild 5: Zeitlicher Verlauf des nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitts beim Fördern von AISI316L-Pulver in der nominellen Körnung +20 –53 µm mit Tellerdrehzahlen zwischen 1 und 10 U/min mit (links) und ohne (rechts) Aktivierung des im Pulvertopf installierten Rührers

Fig. 5: Development of unfilled groove cross section areas of feeder disks with time for feeding of AISI316L steel powder with nominal size fraction +20 –53 µm for feeder disk rotation speeds between 1 and 10 rpm with activated (left) and deactivated (right) mixer.

in der Tellernut von der Messebene des Lasertriangulationssensors zum Absauger transportiert wird, und der Zeit, die das Pulver im Förderschlauch auf dem Weg in den Behälter auf der Wägeeinheit verbringt.

Auch im Regelungsmodus einer closed-loop geregelten Pulverförderrate lässt sich eine Korrelation von Nutfüllungsgrad und Pulverförderrate erkennen (Bild 6). Aufgrund der automatischen Anpassung der Tellerdrehzahl wird zunächst im Zeitraum von 00:50 h bis 00:54 h eine Reaktion im Kurvenverlauf der Tellerdrehzahl zur Kompensation von Veränderungen des Nutfüllungsgrads beobachtet. Sind die Kompensationsmöglichkeiten aufgrund des Erreichens der maximalen Tellerdrehzahl (10 U/min) zum Zeitpunkt 00:54 h erschöpft, bilden sich weitere Veränderungen des Füllgrads der Nut im Verlauf der Pulverförderrate ab.

3.2 Analysen zur Pulverstromstabilität, auch bei Umschaltvorgängen

Die Rohdaten der Helligkeit beleuchteter Pulverströme, die mit einer Bildrate von 409 fps analysiert werden, weisen auch für Zustände, die beim Laser-Pulver-Auftragschweißen mit nichtrostenden Stählen bei Schweißgeschwindigkeiten von 3 m/s nur Standardabweichungen der lokalen Schichtdicke von 6 % hervorrufen, starke Schwankungen auf. So werden beispielsweise für das Fördern von AISI430L-Pulver mit einer

Pulverförderrate von 60 g/min über einen Zeitraum von 10 s Einzelwerte zwischen 36,0 und 63,2 Einheiten bei einem Mittelwert von 47,0 Einheiten ermittelt. Durch gleitende Mittelwertbildung über 100 Messwerte werden Daten erhalten, die eine Überwachung der Pulverstromstabilität für die Anwendung eines Toleranzfelds von $\pm 5\%$ erlaubt. Bei Aktivierung eines Umschaltprozesses zwischen zwei Pulverlinien sinkt der Graph der Helligkeit zum be treffenden Zeitpunkt t_{stop} umgehend stark ab (Bild 7), weil im Förderstrang hinter der Pulverumschalteinheit zu nächst das verbliebene Pulver der ab geschalteten Linie keine Beschleunigung durch Trägergas mehr erfährt. Danach bewirkt der Trägergasstrom aus der zugeschalteten Pulverlinie ein rasches Austreiben der Pulverreste beider Linien, was stark erhöhte Helligkeitswerte bewirkt, bevor eine Phase sehr geringer Helligkeitswerte einsetzt. In dieser Phase werden nur sehr wenige Partikel der zugeschalteten Pulverlinie im Trägergasstrom aus der Pulverdüse ausgetragen. Vielmehr füllt der größte Teil der Pulverpartikel zunächst den Totraum im geschlossenen Strang zum Sammelbehälter auf. Nach dem Auffüllen des Totraums strömen die folgenden Pulverpartikel in den Strang zur Pulverdüse. Dabei kann zunächst ein Überschwingen erfolgen (Bild 7, links), so dass kurzzeitig höhere Pulverförder raten als im stabilisierten Zustand realisiert werden, oder die Pulverför

derate zwischen 11,3 und 15,7 g/min are recorded. In this volumetric control mode, a clear correlation between groove filling grade and powder feed rate is observed (Fig. 6). Continuous drifts in the first 00:28 h and in the following period until 00:48 h as well as abrupt changes at 00:28 h and 00:48 h coincide. Thereby the groove filling level and the powder feed rate data determined by feeding into a vessel installed on a scale show a time offset that is made up of the time for transporting powder from the plane analyzed by the laser triangulation sensor to the plane, where the powder exits the feeder disk through the exhaust into the powder hose, and the time that the powder spends on its way through the hose to the collecting vessel. Correlation between groove filling grade and powder feed rate can also be observed for powder feeding in gravimetric control mode (Fig. 6). Due to the closed-loop control reduced disk groove filling grades are compensated by increased feeder disk rotation speed between 00:50 h and 00:54 h. After leaving the control range of disk rotation speed that is limited to 10 rpm further decline of the groove filling grade results in respective changes of powder feed rate.

3.2 Analyses Concerning Stabilizing of Powder Streams After Switching Events

Brightness raw data of illuminated powder streams analyzed at a frame rate of 409 fps shows strong fluctu

ations even for conditions that produce stainless steel coatings with only 6 % standard deviation of local thickness at a welding speed of 3 m/s. For example, individual brightness values range from 36,0 to 63,2 units with an average of 47,0 units for feeding AISI430L steel powder at 60 g/min for a duration of 10 s. Moving averages of 100 values are suitable to establish monitoring of powder stream stability applying tolerance zones of $\pm 5\%$.

Switching between two powder lines results in abrupt decrease of the recorded brightness graph at the point of time t_{stop} (Fig. 7), because powder residues from the deactivated feed line inside the hose between powder quick switch and nozzle are no longer accelerated by carrier gas. Then the carrier gas stream from the activated powder feed line causes extraction of powder residues from both feed lines through the injector indicated by strongly increased brightness values followed by a period with low brightness values. In that period only few particles exit the powder injector along with the carrier gas flow from the activated feed line. Most powder particles fill up the dead volume in the blocked branch that is connected to the dedicated collecting vessel. After filling of the dead volume powder particles flow through the branch connected to the powder injector. Thereby either a transient overshoot (Fig. 7, left) indicating higher powder feed rates compared to the fully stabi

derrate steigt kontinuierlich auf den Wert des stabilisierten Zustands an (Bild 7, rechts).

Das Stabilisierungsverhalten nach Umschaltvorgängen charakterisiert durch die Zeiten, nach denen keine Abweichungen von mehr als 2,5 %, 5 % bzw. 10 % vom vollstabilisierten Zustand mehr auftreten, stellt sich für die verschiedenen Zusatzwerkstoffe und Pulverförderraten uneinheitlich dar, wobei grundsätzlich ein klarer Trend zu mit steigender Pulverförderrate sinkenden Umschaltzeiten vorliegt (Bild 8).

Die $t_{10\%}$ -Zeiten weisen für einen Zusatzwerkstoff und eine Pulverförderrate nur relativ geringe Unterschiede auf. Während für das Fördern von AISI430L mit einer Förderrate von 20 g/min $t_{10\%}$ von etwa 8 s ermittelt werden, beträgt $t_{10\%}$ für Förderraten von 40 g/min knapp unter 5 s und für 60 g/min knapp über 4 s. Insbesondere für 60 g/min Förderrate streuen die ermittelten $t_{2,5\%}$ -Zeiten dagegen zwischen 5 und 10 s. Auch für das Fördern von TiC/FeCr 70/30 werden für eine Förderrate von 10 g/min mit etwa 6,5 s längere $t_{10\%}$ -Zeiten als für 20 g/min mit knapp über 4 s und für 30 g/min mit knapp unter 4 s ermittelt. Die $t_{2,5\%}$ -Zeiten weisen für eine Förderrate von 10 bis 20 g/min jeweils nur geringe Abweichungen auf, während für eine Förderrate von 30 g/min Werte zwischen 3,7 s und 8,9 s ermittelt werden. Für das Fördern von W₂C/WC-Pulver werden insbesondere für die geringsten angewendeten Förderraten von 20 g/min die längsten Umschaltzeiten mit

$t_{10\%}$ von knapp 15 s ermittelt. Bei 60 g/min Förderrate sinkt $t_{10\%}$ auf etwa 6 s und die Schwankungsbreite der $t_{25\%}$ -Zeiten liegt bei 8,4 bis 9,4 s.

4. Diskussion

Lasertriangulationssensoren ermöglichen das Erfassen des Füllgrads der Fördertellernuten von Scheibenförderern mit hoher zeitlicher Auflösung. Der Nutfüllungsgrad korreliert eindeutig mit der Pulverförderrate. Da er mit einem zeitlichen Vorlauf bezogen auf das Austreten des Pulverstrahls aus der Pulverdüse ermittelt wird, ergeben sich Möglichkeiten, die Daten für eine besonders effektive Regelung der in Beschichtungsprozesse eingehenden Pulverförderrate zu nutzen.

Analysen der Schwankungsbreiten des Nutfüllungsgrads in Abhängigkeit vom verwendeten Hardware-Setup des Scheibenförderers (Tellerotyp, Typen von Abstreifern und Absaugern, Rührertyp und -positionierung) und den Betriebsparametern (Art und Massenflussrate des Trägergases, Tellerdrehzahl und Rotationsgeschwindigkeit des Rührers) ermöglichen die Identifikation geeigneter Parameter für das robuste Fördern eines bestimmten Pulvertyps mit einer gewünschten Pulverförderrate. In den durchgeführten Untersuchungen wird für AISI316L-Pulver in der Körnung $+53 - 150 \mu\text{m}$ eine ausgeprägte Abhängigkeit des Nutfüllungsgrads von der Rotationsgeschwindigkeit des Fördertellers festgestellt, was darauf hinweist, dass kein streng proportionaler Zusam-

lized feed conditions or a continuous increase of powder feed rate (Fig. 7 right) towards the fully stabilized feed conditions can be observed.

Stabilizing time characterized as the duration to reach maximum deviations of 2.5 %, 5 % or 10 % from the fully stabilized condition differs depending on the type of fed powder and the applied powder feed

rate. However, there is a clear trend towards reduced stabilizing time with increasing powder feed rate (Fig. 8). There are only minor differences of $t_{10\%}$ durations for a specific type of fed powder at a fixed powder feed rate. For feeding AISI430L steel powder $t_{10\%}$ amounts to roughly 8 s, 5 s and 4 s applying powder feed rates of 20 g/min, 40 g/min and 60 g/min, respectively. In contrast $t_{2.5\%}$ durations can differ between 5 and 10 s applying a powder feed rate of 60 g/min. In case of feeding TiC/FeCr 70/30 powder at feed rates of 10, 20 and 30 g/min $t_{10\%}$ amounts to roughly 6.5 s, 4 s and 4 s, respectively. While scattering of $t_{2.5\%}$ is small for 10 and 20 g/min powder feed rate, values ranging from 3.7 s to 8.9 s are determined for 30 g/min powder feed rate. The highest $t_{10\%}$ values of almost 15 s are measured for feeding of W₂C/WC powder at the lowest applied feed rate of 20 g/min. For feed rates of 60 g/min $t_{10\%}$ is roughly 6 s and $t_{2.5\%}$ ranges from 8.4 s to 9.4 s.

4. Discussion

Laser triangulation sensors permit high time resolution characterization of the filling grade of feeder disk

grooves in disk type powder feeders. The groove filling grade clearly correlates with powder feed rate. As the groove filling grade can be determined with some lag before the powder exits the powder injector, the data can be used to establish powder feed rate control loops yielding unsurpassed stability in coating processes.

Analyses of groove filling grade fluctuations depending on the applied specific hardware setup (disk type, type of spreaders and exhausters, type and positioning of mixers) and feeding parameters (type and flow rate of carrier gas, disk and mixer rotation speed) permit identification of best suited boundary conditions for robust feeding of specific powders at a desired powder feed rate. The performed analyses show a strong dependence of feeder disk rotation speed on the groove filling grade for feeding of AISI316L steel powder with nominal size fraction $+53 - 150 \mu\text{m}$ indicating that powder feed rate is not strictly proportional to feeder disk rotation speed. Additionally, the applied hardware set-up turns out to be particularly disadvantageous for a disk rotation speed of roughly 7 rpm provoking scattering of unfilled groove cross section areas between 1.0 and 1.4 mm^2 . That equals scattering of the groove filling grade between 53 % and 67 % in relation to the nominal groove cross section area of 3.0 mm^2 . Such large scattering is not observed for feeding of the finer nominal size fraction $+20 - 53 \mu\text{m}$.

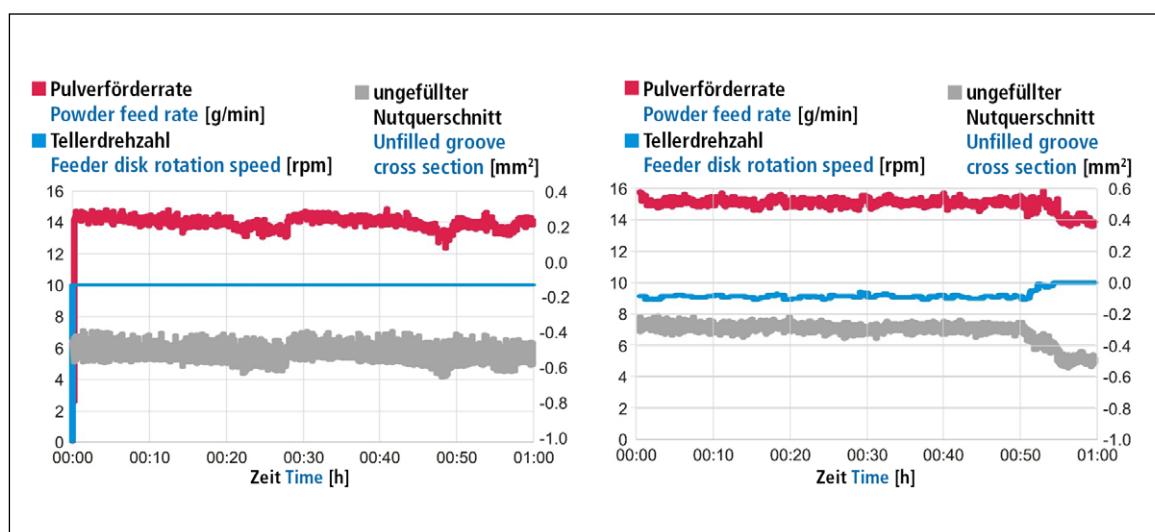


Bild 6: Gegenüberstellung von Nutfüllungsgrad und Pulverförderrate beim Fördern von Pulver im Regelmodus einer konstanten Tellerdrehzahl von 10 U/min (links) sowie bei closed-loop Regelung der Pulverförderrate auf einem Sollwert von 15 g/min (rechts)

Fig. 6: Comparison of unfilled groove cross section area and powder feed rate for application of constant feeder disk rotation speed 10 rpm (left) and closed-loop controlled powder feed rate of 15 g/min (right)

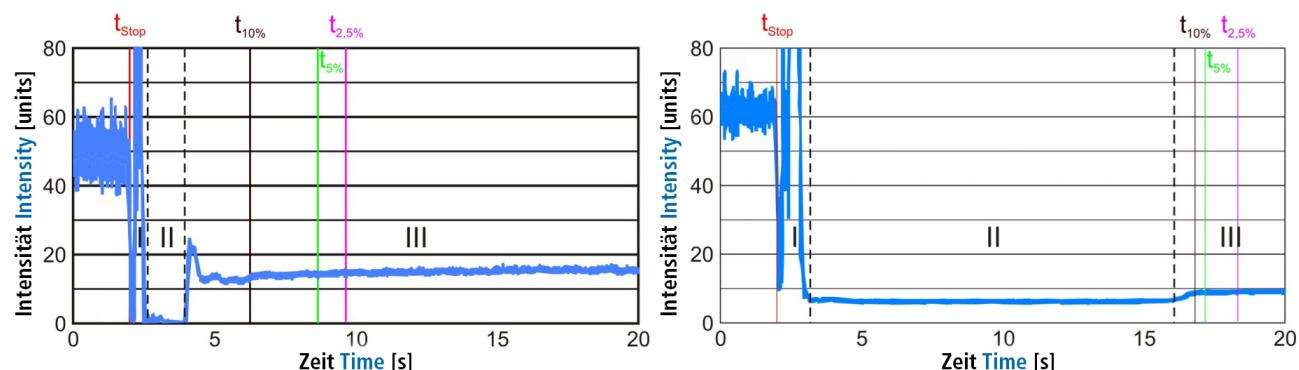


Bild 7: Helligkeitsverlauf beleuchteter Pulverstrahlen für das Umschalten von 60 g/min AISI430L auf 20 g/min TiC/FeCr 70/30 (links; $t_{10\%}$ 4,3 s, $t_{5\%}$ 6,7 s, $t_{2,5\%}$ 7,7 s) und für das Umschalten von 60 g/min AISI430L auf 20 g/min W₂C/WC (rechts; $t_{10\%}$ 14,8 s, $t_{5\%}$ 15,2 s, $t_{2,5\%}$ 16,3 s); I: Austreiben von Pulverresten beider Pulverlinien, II: Auffüllen von Toträumen vor dem Quetschventil im Strang zum Auffangbehälter der zugeschalteten Linie, III: Stabilisierung des Pulverstroms aus der Pulverdüse

Fig. 7: Development of brightness value of illuminated powder streams during switching from 60 g/min AISI 430L steel to 20 g/min TiC/FeCr 70/30 (left; $t_{10\%}$ 4.3 s, $t_{5\%}$ 6.7 s, $t_{2,5\%}$ 7.7 s) and from 60 g/min AISI 430L steel to 20 g/min W₂C/WC (right; $t_{10\%}$ 14.8 s, $t_{5\%}$ 15.2 s, $t_{2,5\%}$ 16.3 s); I: extraction of powder residues from both feed lines, II: filling up of dead volume in front of the squeeze valve blocking the path towards the dedicated collecting vessel of the activated line, III: stabilizing of powder stream exiting the nozzle

menhang zwischen Tellerdrehzahl und Pulverförderrate vorliegt. Zudem erweist sich eine Tellerdrehzahl von 7 U/min für den verwendeten Hardware-Setup als besonders ungünstig. Fluktuationen des nicht gefüllten Nutquerschnitts zwischen 1,0 und 1,4 mm² bedeuten bezogen auf den nominellen Nutquerschnitt von 3,0 mm² Schwankungen des Füllgrads zwischen 53 % und 67 %. Derartig große Schwankungsbreiten werden für das Fördern der Körnung +20 – 53 µm nicht beobachtet.

Die Stabilisierung von aus Düsen austretenden Pulverstrahlen nach dem Umschalten zwischen zwei Förderlinien unter Einsatz der Umschaltseinheit GTV PQS hängt sowohl vom Typ des geförderten Pulvers als auch

von der gewählten Pulverförderrate ab. Grundsätzlich sinken die Stabilisierungszeiten mit zunehmender Pulverförderrate, weil das Füllen von Toträumen rascher erfolgt. Für gleiche Pulverförderraten in g/min sinken die Stabilisierungszeiten mit der Schütttdichte des geförderten Pulvers, weil ein definiertes Volumen als Totraum zu füllen ist. Im gesamten untersuchten Förderatenbereich von bis zu 60 g/min weisen die Helligkeitskurven beleuchteter W₂C/WC-Pulverstrahlen einheitlich einen kontinuierlichen Anstieg ohne Überschwingen nach Umschaltvorgängen auf. Diese Charakteristik wird beim Fördern von AISI430L- und TiC/FeCr 70/30-Pulvern nur für die jeweils niedrigsten untersuchten Pulverförderraten von 20 g/min bzw. 10 g/min beobachtet.

Stabilizing behavior of powder streams exiting powder injectors after switching from one powder feed line to another using the compact switch unit GTV PQS depends on the type and feed rate of the fed powder. Stabilizing time drops with increasing powder feed rate due to faster filling of dead volumes. For the same reason stabilizing time also drops with decreasing apparent density of fed powders, when applying constant powder feed rates.

In the complete range of tested powder feed rates, i.e., up to 60 g/min, intensity curves of illuminated W₂C/WC powder streams point at continuously increasing powder feed rates after powder switching events without overshoots. Contrary such behavior is only observed

for feeding of AISI430L steel and TiC/FeCr 70/30 powders at powder feed rates of 20 g/min and 10 g/min, respectively. For higher powder feed rates (sometimes even double) overshooting is observed before the feed process approaches its fully stabilized state. This indicates that sensitivity for establishing constant pressure conditions in feed lines after switching events increases along with increasing volumetric powder feed rate. While dead time after switching powder feed lines can be limited to maximum 5 s for switching to AISI430L steel and TiC/FeCr 70/30 powder streams, switching to W₂C/WC might result in more than 15 s dead time depending on the desired hard phase content of the coating.

Literatur References

- [1] Tillmann, W., Vogli, E., Baumann, I., Krebs, B.: Near-Net-Shape and Dense Wear Resistant Thermally Sprayed Coatings, Key Engineering Materials, Vol. 384 (June 2008), pp. 117/23. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.384.117>.
- [2] Wank, A., Schmengler, C., Pehl, D., Krause, A., Barteck, S.: Influence of carbide feedstock on properties of protective laser claddings for grey cast iron brake rotors, Eurobrake 2023, September 12th - 14th, 2023, Barcelona, ES, EB2023-CMT-001.
- [3] Wank, A., Königstein, T., Schmengler, C., Pehl, D., Krause, A., Barteck, S., Mülln, M., Müller-Roden, K., Wessler, T.: Beschichtungsstrategien und Prozesssicherung beim Beschichten von Bremscheiben, Tagungsband 8. GTV Kolloquium Thermisches Spritzen & Laser Cladding, 2. September 2022, Luckenbach, Deutschland, S. 99/111.
- [4] Königstein, T., Schmengler, C., Wank, A., Mülln, M.: Influencing and disturbing variables in relation to the feed stabilities of powder feed systems with different control concepts, Thermal Spray Bulletin, Vol. 14 (2021) No. 2, pp. 82/6.
- [5] N.N.: Code of practice DVS 2322: Determination of powder feed rate, 09/2017, pp. 1/11.
- [6] Wank, A., Schmengler, C., Hitzek, A., Krause, A., Mülln, M.: Progress in Laser Additive Manufacturing Equipment and Applications, Journal of Japan Laser Processing Society, Vol. 29 (2022) No. 1, pp. 1/6.
- [7] Wank, A., Schmengler, C., Krause, A., Müller-Roden, K., Wessler, T.: Environmentally friendly protective coatings for brake disks, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 32 (2023) No. 2-3, pp. 443-455. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01459-0>

Für höhere Pulverförderraten erfolgt zunächst ein (teilweise doppeltes) Überschwingen, bevor eine kontinuierliche Annäherung an den vollstabilisierten Zustand eintritt. Dies deutet darauf hin, dass mit zunehmender volumetrischer Pulverförderrate eine zunehmende Sensitivität in Bezug auf den Aufbau konstanter Druckverhältnisse in der Pulverförderlinie entsteht. Während für das Umschalten zwischen AISI430L- und TiC/FeCr 70/30-Pulverströmen Totzeiten von maximal 5 s erreichbar sind, kann das Umschalten auf W₂C/WC je nach angestrebtem Hartstoffgehalt auch Totzeiten von mehr als 15 s erfordern.

5. Zusammenfassung

Der Füllungsgrad von Tellernuten in Scheibenförderern, der mit der Pulverförderrate korreliert, kann mittels Lasertriangulation verlässlich erfasst werden. Aufgrund des zeitlichen Vorlaufs der Messungen vor dem Austragen des Pulverstroms aus einer Düse ergibt sich die Möglichkeit einer proaktiven Regelung der Pulverförderrate durch Anpassen der Tellerdrehzahl. Zudem erlauben Analysen der Schwankungsbreite des Nutfüllungsgrads das Ermitteln

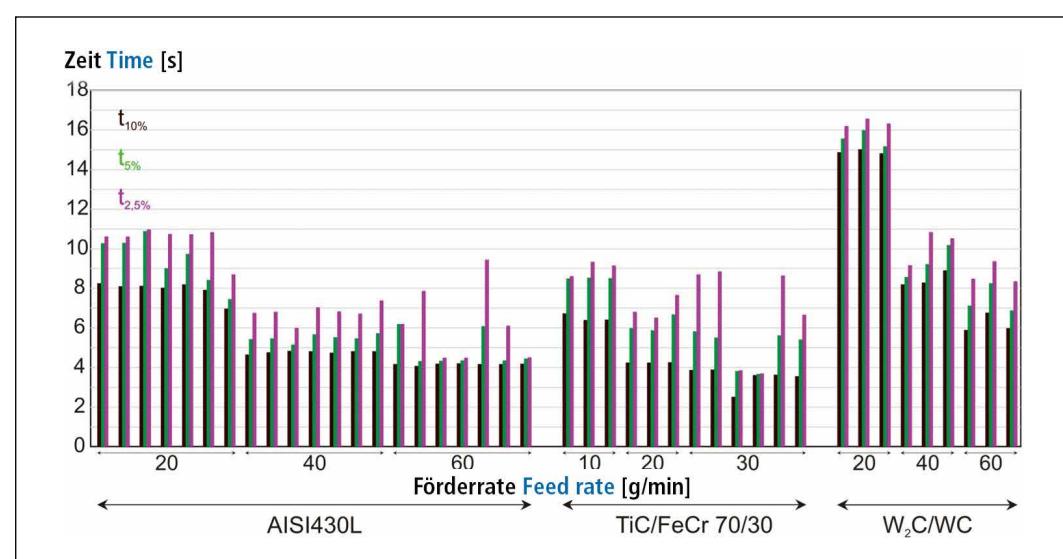


Bild 8: Ermittelte Umschaltzeiten in Abhängigkeit von Typ und Förderrate des zugeschalteten Pulvers

Fig 8: Dead time for switching of powder streams depending on powder type and feed rate

optimaler Setups für das robuste Fördern spezifischer Pulver mit einer gewünschten Förderrate. Pulverumschalteinheiten erlauben den Wechsel zwischen geförderten Beschichtungswerkstoffen mit definierten Förderraten. Die erforderlichen Totzeiten zum Absichern eines stabilen, definierten Pulverstroms hängen von der Schüttdichte und der Förderrate des Pulvers, auf das umgeschaltet wird, ab.

5. Summary
The filling grade of disk grooves in disk type powder feeders correlates with powder feed rate and can be monitored reliably by laser triangulation measurements. As the groove filling grade is determined with some lag before the powder exits the feeder hopper, control of powder feed rate based on proactive adjustment of feeder disk rotation speed can permit improved feed rate stability. Also, analyses of scatter-

ing of disk groove filling grade open up the chance to determine optimal hardware setups for robust feeding of specific powders at a desired powder feed rate. Powder switch units offer the possibility to apply different coating materials consecutively at controlled powder feed rates. Inevitable dead time to establish a stable powder stream with defined feed rate after switching events depends on feed rate and apparent density of the newly fed powder.

Berichtigung Correction

In der letzten Ausgabe 1/2025 wurde am Ende des Fachbeitrags „Einfluss der ID-HVOF-Prozessparameter auf die Schichteigenschaften von Cr₃C₂-NiCr-75/25-Innenbeschichtungen“ eine falsche Danksagung veröffentlicht. Nachfolgend drucken wir den richtigen Förderhinweis ab und bitten um Entschuldigung. Die Reaktion



In the last issue 1/2025, an incorrect acknowledgement was published at the end of the peer-reviewed paper "Influences of the ID-HVOF Process Parameters on the Properties of Cr₃C₂-NiCr-75/25 Linings". We are printing the correct funding notice below and apologise. The Editorial Department



Federal Ministry for Economic Affairs and Energy

INFO This peer-reviewed paper is based on the IGF research project No. 01IF22829 N / DVS No. 02.3643.

Danksagung

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Projekt wird durchgeführt durch die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf.



Der Fachbeitrag basiert auf dem IGF-Forschungsvorhaben 01IF22829 N / DVS-Nr. 02.3643.

Acknowledgement

The project is being promoted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWE) on the basis of a resolution of the German Bundestag. The project was carried out by the research association "Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf."

Adaptive Bahnplanung für die additive Fertigung von Freiformgeometrien mittels Kaltgasspritzens

Adaptive Path Planning for Additive Manufacturing of Freeform Geometries Using Cold Spraying

Kurzfassung

Die additive Fertigung mittels Kaltgasspritzens (Cold Spray Additive Manufacturing, CSAM) bietet ein vielversprechendes Verfahren zur Herstellung und Reparatur metallischer Bauteile, insbesondere solcher aus temperaturkritischen Werkstoffen wie Kupfer oder Aluminium. Im Gegensatz zu thermischen Verfahren basiert CSAM auf der plastischen Verfestigung von Partikeln durch hochkinetische Aufprallprozesse, wodurch thermische Einflüsse auf das Spritzmaterial und das Substrat vermieden werden. Diese Charakteristik eröffnet neue Anwendungsfelder, stellt jedoch auch besondere Anforderungen an die Prozessplanung und Systemintegration.

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wurde ein adaptives Bahnplanungssystem entwickelt, das die Besonderheiten des kontinuierlichen Materialauftrags und die begrenzte Bewegungsfreiheit robotergeführter Kaltgasspritzsysteme berücksichtigt. Zentrale Bestandteile des Systems sind ein modifizierter Slicer zur Generierung nicht-planarer Schichten, eine automatisierte Bahnorientierung unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrie sowie eine datenbasierte Integration empirisch ermittelter Footprint-Geometrien. Letztere ermöglichen eine realitätsnahe Vorhersage der Schichtbildung und wurden für verschiedene Werkstoffe durch experimentelle Untersuchungen validiert. Das System wurde erfolgreich in eine Roboterzelle implementiert und anhand dreidimensionaler Demonstratorbauteile getestet. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Maßhaltigkeit, Homogenität und Kohäsion der erzeugten Schichten.

1. Einleitung

Die additive Fertigung hat sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten von einem Prototyping-Werkzeug zu einer industriell etablierten Produktionstechnologie entwickelt [1, 3]. Ihr zentrales Merkmal ist der schichtwei-



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann

Inhaber des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie
Holder of the Chair of Materials Technology

Technische Universität Dortmund

wolfgang.tillmann@tu-dortmund.de



Jonas Frederik Zajaczkowski, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Research associate at Chair of Materials Technology

Technische Universität Dortmund

jonas.zajaczkowski@tu-dortmund.de



Dr.-Ing. Ingor Baumann

Oberingenieur am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Chief engineer at Chair of Materials Technology

Technische Universität Dortmund

igor.baumann@tu-dortmund.de



Dennis Möllensiep

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme
Research associate at Chair of Chair of Production Systems

Ruhr-Universität Bochum

moellensiep@ips.rub.de



Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssysteme
Holder of the Chair of Production Systems

Ruhr-Universität Bochum

kuhlenkoetter@ips.rub.de

Mehr Informationen zu den Autoren auf www.thermal-spray-bulletin.info/de/autoren
More information on the authors at <https://www.thermal-spray-bulletin.info/en/authors>

Abstract

Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM) offers a promising process for the production and repair of metallic components, particularly those made of temperature-sensitive materials such as copper or aluminum. Unlike thermal processes, CSAM relies on the plastic deformation of particles through high-velocity impact, thereby avoiding thermal effects on the spray material and the substrate. This characteristic opens new application fields but also presents specific requirements on process planning and system integration

To address these challenges, an adaptive path planning system was developed that considers the characteristics of continuous material deposition and the limited degrees of freedom of robot-guided cold spraying systems. Key components of the system include a modified slicer for generating non-planar coatings, automated toolpath orientation based on part geometry and data-driven integration of empirically determined footprint geometries. The latter enables realistic predictions of coating formation and was validated for different

materials through experimental investigations. The system was successfully implemented in a robotic cell and tested using three-dimensional demonstrator parts. The results show high dimensional accuracy, homogeneity and cohesion of the deposited coatings.

1. Introduction

Over the past two decades, additive manufacturing has evolved from a prototyping tool into an industrially established production technology [1, 3]. Its core characteristic is the coating-by-coating construction of a component directly from digital 3D CAD data, which provides high geometric

flexibility while eliminating tool-specific limitations. This feature enables not only the realization of functionally optimized, load-path-compatible, or customized geometries but also significant savings in material and energy consumption compared to conventional subtractive manufacturing processes. Processes

tional optimierter, lastpfadgerechter oder individualisierter Geometrien, sondern auch signifikante Einsparungen bei Material- und Energieeinsatz im Vergleich zu konventionellen subtraktiven Fertigungsverfahren. Verfahren wie das selektive Laserschmelzen (PBF-LB/M), das Elektronenstrahlschmelzen (PBF-EB/M) oder der Draht-Lichtbogen-Auftragschweißprozess (WAAM) gelten mittlerweile als industriell qualifiziert und werden in der Luftfahrttechnik, im Werkzeugbau sowie in der Medizintechnik zunehmend eingesetzt [2].

Dennoch existieren weiterhin technologische Hürden bei der Umsetzung bestimmter Werkstoffgruppen in der additiven Fertigung, insbesondere bei hochleitfähigen oder oxidationsanfälligen Metallen wie Kupfer und seinen Legierungen. Die Verarbeitung reiner Kupferwerkstoffe stellt in schmelzbasierten Verfahren eine besondere Herausforderung dar, da Kupfer eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit (bis zu 400 W/mK) und eine starke Reflektivität gegenüber üblicher roter Laserstrahlung besitzt [3]. Dadurch wird ein erheblicher Teil der eingestrahlten Energie reflektiert oder direkt in das Volumen abgeführt, was zu instabilen Schmelzbädern, schlechter Anbindung und hoher Porosität führen kann. Hinzu kommt die starke Neigung zur Oxidation bei hohen Temperaturen, die insbesondere bei unzureichender Prozessatmosphäre zur Bildung nichtmetallischer Einschlüsse und damit zu einer Beeinträchtigung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften führt [3]. Bei Messinglegierungen tritt zusätzlich ein Zinkverdampfungs effekt auf, der zur chemischen Entmischung führen kann und die Homogenität der Gefügestruktur reduziert [4]. Eine technologische Alternative zu diesen schmelzbasierten Verfahren stellt die additive Fertigung mittels Kaltgasspritzens (Cold Spray Additive Manufacturing, CSAM) dar. Dabei werden metallische Partikel durch ein komprimiertes Trägergas auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt und treffen mit hoher kinetischer Energie auf das Substrat. Die Haftung erfolgt durch plastische Verformung, ohne dass eine thermische Aufschmelzung notwendig ist. Die Prozessführung bleibt dabei deut-

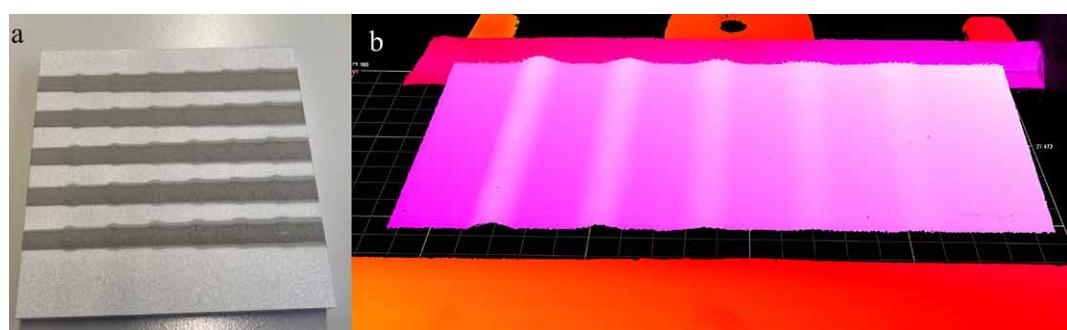


Bild 1: Generierte Footprint-Bahnen (a); Digitalisierung der Footprint-Bahn mittels Streifenlichtprojektion (b)

Fig. 1: Generated footprint tracks (a); digitization of the footprint track using structured light projection (b)

lich unterhalb der Schmelztemperatur des Werkstoffs, was eine Verarbeitung empfindlicher Werkstoffe wie Kupfer, Messing oder Aluminium ohne nennenswerte Gefügeveränderungen, Oxidation oder Entmischung ermöglicht. Durch den Wegfall der Schmelzphase werden auch Eigenspannungen und Verzüge signifikant reduziert, was CSAM besonders attraktiv für Hybridbauweisen, Reparaturaufgaben oder funktionalisierte Strukturen macht. Während einfache rotationssymmetrische Geometrien mittels Kaltgasspritztechnik bereits hergestellt werden können, stellt die Erzeugung freigeformter, komplexer Bauteile eine Herausforderung dar. Grund hierfür ist das Fehlen geeigneter Bahnplanungsstrategien, die die Prozess- und Kinematikrestriktionen berücksichtigen. Ziel dieses Projekts ist daher die Entwicklung eines adaptiven, simulationsgestützten Systems zur Bahnplanung für CSAM unter Berücksichtigung realer Prozesscharakteristika und der Roboterkinematik.

2. Technologische und wirtschaftliche Herausforderungen

Für die Bahnplanung in der additiven Fertigung wird in der Regel eine sogenannte Slicing-Software eingesetzt. Diese schneidet die CAD-Bauteilgeometrie mit Schnittebenen. Die dabei entstehenden Flächen werden anschließend mit Werkzeugbahnen aufgefüllt. Aufgrund der Verfahrensunterschiede können die für etablierte Verfahren wie Fused Deposition Modeling genutzten Slicing-Programme nicht ohne Anpassung für die additive Fertigung mittels Kaltgasspritzens genutzt werden. So sehen diese häufig Ab- und Wiederaufsetzbewegungen innerhalb der einzelnen Schich-

such as selective laser melting (PBF-LB/M), electron beam melting (PBF-EB/M) and wire arc additive manufacturing (WAAM) are now considered industrially qualified and are increasingly used in aerospace, toolmaking and medical technology [2]. Nevertheless, technological challenges persist in processing certain material groups in additive manufacturing, particularly highly conductive or oxidation-prone metals such as copper and its alloys. Processing pure copper materials poses a specific challenge in melt-based processes, as copper exhibits extremely high thermal conductivity (up to 400 W/mK) and strong reflectivity to typical red laser radiation [3]. As a result, a significant portion of the input energy is either reflected or dissipated into the volume, which can lead to unstable melt pools, poor bonding and high porosity. In addition, the strong tendency to oxidize at high temperatures can result in the formation of non-metallic inclusions, which especially in suboptimal process atmospheres may impair the mechanical and electrical properties [3]. In brass alloys, zinc evaporation can also occur, leading to chemical segregation and reduced structural homogeneity [4].

An alternative to these melt-based processes is Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM). In CSAM, metallic particles are accelerated to very high velocities by a compressed carrier gas and impact the substrate with high kinetic energy. Bonding occurs through plastic deformation without the need for thermal melting. The process temperature remains well below the melting point of the material, enabling the deposition of sensitive materials such as copper, brass, or aluminum without significant microstructural changes,

oxidation, or segregation. The absence of a melt phase also significantly reduces residual stresses and distortion, making CSAM particularly attractive for hybrid structures, repair applications, or functionalized components. While simple rotationally symmetric geometries can already be produced using the cold spray technology, the fabrication of freeform, complex parts remains a challenge. The main reason for this is the lack of suitable path planning strategies that account for process and kinematic constraints. The goal of this project is therefore to develop an adaptive, simulation-based path planning system for CSAM that considers real process characteristics and robot kinematics.

2. Technological and Economic Challenges

In additive manufacturing, path planning is typically performed using so-called slicing software. This software intersects the CAD part geometry with section planes. The resulting surfaces are then filled with toolpaths. Due to process differences, slicing programs developed for established methods such as Fused Deposition Modeling cannot be used directly for Cold Spray Additive Manufacturing without modifications. These programs often include tool lift-off and repositioning movements within each coating, during which material feed is interrupted. In cold spraying, however, the material feed cannot be started and stopped abruptly during the spraying process, which would result in unintended material deposition and deviations in the fabricated geometry. Additionally, material deposition is not constant, but depends on the spraying angle, stand-off distance and trav-

ten vor, bei denen die Materialzufuhr unterbrochen wird. Beim Kaltgasspritzen kann die Materialzufuhr im Spritzprozess jedoch nicht abrupt gestartet und gestoppt werden, sodass ungewollter Materialauftrag erfolgen würde, der zu Abweichungen bei der gefertigten Geometrie führen würde. Darüber hinaus ist der Materialauftrag nicht konstant, sondern hängt vom Auftragswinkel, dem Spritzabstand und der Fahrgeschwindigkeit ab. Da der Spritzbrenner von einem Industrieroboter geführt wird, muss während der Bahnplanung zusätzlich das dynamische Verhalten des Roboters berücksichtigt werden. Insbesondere beim Auffüllen der Schichten werden enge Radien gefahren, was zu einem Abbremsen und Beschleunigen führt, wodurch sich die Fahrgeschwindigkeit und somit auch der Schichtauftrag ändern. Zusätzlich darf der Spritzbrenner nicht zu lange über Kopf geführt werden, da ansonsten ein Wärmestau auftreten kann. Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren unterscheidet sich die additive Fertigung durch Kaltgasspritzen bei der Herstellung von Überhängen. Diese werden typischerweise durch Stützstrukturen oder Pulverbette realisiert, die beim Kaltgasspritzen nicht verwendet werden können. Aufgrund der hervorragenden Schichthaftung besteht jedoch auch keine Notwendigkeit für abstützende Strukturen. Stattdessen können Überhänge direkt von der Seite aufgetragen werden. Dies muss jedoch von der Slicing-Software berücksichtigt werden, wodurch aufgefüllte Schnittebenen entlang der Bauteilhöhe nicht ausreichen, um für das Kaltgasspritzen verwendet zu werden. Eine Alternative stellen Slicer dar, die mit gekrümmten Schnitten arbeiten, um auch beim Fused Deposition Modeling die Fertigung von Überhängen ohne Stützstrukturen zu ermöglichen. Dies bedingt auch zwangsläufig die Unterstützung von mehr als drei Werkzeugachsen, was für die Verwendung eines Industrieroboters von Vorteil ist.

Vor dem Hintergrund dieser zahlreichen Anforderungen wurde entschieden, eine bestehende Slicing-Software zu erweitern, anstatt diese von Grund auf neu zu programmieren. Dies setzt

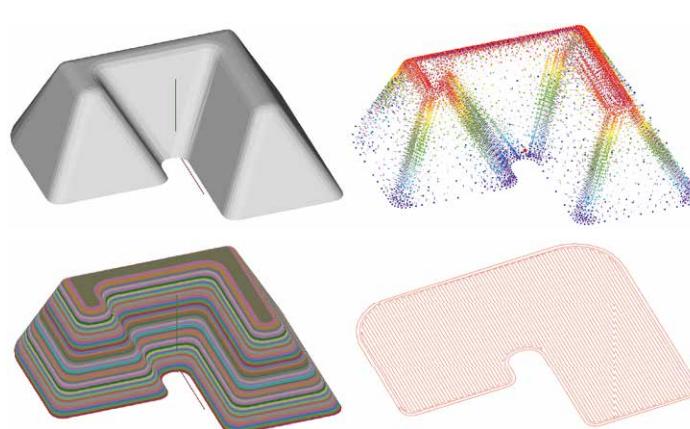


Bild 2: (a) CAD-Modell des additiv gefertigten Bauteils, (b) Darstellung der Netzknöten mit den Normalenvektoren der Oberfläche, (c) berechnete Schnittebenen, (d) mit Werkzeugbahnen aufgefüllte Schnittebene

Fig. 2: (a) CAD model of the additively manufactured part, (b) representation of mesh nodes with surface normal vectors, (c) computed slicing planes, (d) sliced plane filled with toolpaths

voraus, dass diese quelloffen ist und kommerziell genutzt werden darf. Darüber hinaus soll diese idealerweise gekrümmte Schnitte durchführen können und mehr als drei Werkzeugachsen unterstützen. Eine mögliche Lösung ist die Verwendung von *RotBot* [5] mit der Erweiterung *Slicer4RTN* [6], womit sich Überhänge mit konischen Bahnen eines vierachsenigen Werkzeugs herstellen lassen. Die Slicing-Software ist jedoch nur unter Linux-Distributionen lauffähig. Da innerhalb des Forschungsprojekts auch Versuche auf den Beschichtungsanlagen der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt werden sollen und bei diesen Windows-Distributionen verbreitet sind, ist eine darauf lauffähige Lösung zu bevorzugen. Hierfür wurde der *S³-Slicer* als bestmögliche Lösung identifiziert, der alle vormalig genannten Anforderungen abdeckt bzw. um diese Funktionalitäten erweitert werden kann [7].

3. Footprintgenerierung

Zur quantitativen Erfassung des Materialauftragsverhaltens beim Kaltgasspritzen wurde für den Werkstoff CuZn30 eine systematische Footprintstudie durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung des Einflusses zentraler Prozessparameter auf die Schichtdicke, die laterale Ausdehnung der Spritzspur sowie deren Morphologie. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die Modellierung des schichtweisen Aufbaus innerhalb des Bahnplanungssystems.

axes. One possible solution is to use *RotBot* [5] with the *Slicer4RTN* extension [6], which enables overhangs to be produced using conical paths of a four-axis tool. However, this slicing software only runs on Linux distributions. Since experiments within the research project are also to be conducted on the coating systems of the project advisory board members – many of whom use Windows systems – a compatible solution was preferred. The *S³-Slicer* was identified as the best solution, as it either meets or can be extended to meet all of the aforementioned requirements [7].

3. Footprint Generation

To quantitatively analyze the material deposition behavior during cold spray application, a systematic footprint study was conducted using the material CuZn30. The objective was to determine the influence of key process parameters on the coating thickness, the lateral spread of the spray track and its morphology. The collected data serve as the foundation for modeling the coating-by-coating buildup within the path planning system.

The tests were performed using a high-pressure cold spray system (Impact 5/11) with nitrogen as the process gas. The spray gun was manipulated by an industrial robot (ABB IRB 4400) following linear paths over flat aluminum substrates (EN AW-7075). This substrate material was also used as the baseplate in the additive manufacturing process as it can be fairly easily separated by a chemical agent from the final component. The parameters varied included the spray distance (15–75 mm in 10 mm increments), the spray angle (60°–90° in 10° increments), gas temperature (250–750 °C in 100 °C increments) and the gas pressure (25–45 bar in 5 bar increments). The robot speed was set at three levels (200, 300 and 400 mm/s). Each plate received five paths with seven different spray distances, with the remaining parameters varied according to the fractional factorial design shown in Table 1. In total, 210 parameter variations were applied across six substrate plates. After deposition of the footprint tracks (Fig. 1a), the samples were

Die Versuche wurden unter Verwendung eines Hochdruck-Kaltgasspritzsystems Impact 5/11 mit Stickstoff als Prozessgas durchgeführt. Die Bewegung des Spritzbrenners erfolgte mittels eines Industrieroboters (*ABB IRB 4400*) bei linearer Bahnausführung über ebenen Aluminiumsubstraten (EN AW-7075). Das Substratmaterial soll auch später als Grundplatte im additiven Fertigungsprozess dienen und wurde gewählt, weil es vergleichsweise leicht chemisch vom gefertigten Bauteil getrennt werden kann. Variiert wurden der Spritzabstand (15–75 mm in 10-mm-Schritten), der Anstellwinkel (60°–90° in 10°-Schritten), die Gastemperatur (250–750 °C in 100-°C-Schritten) sowie der Gasdruck (25–45 bar in 5-bar-Schritten). Die Robotergeschwindigkeit wurde in drei Stufen (200, 300 und 400 mm/s) eingestellt. Pro Platte wurden fünf Bahnen mit den sieben unterschiedlichen Spritzabständen gefahren, wobei pro Bahn die restlichen Parameter gemäß des teilfaktoriellen Versuchsplans in Tabelle 1 variiert wurden, sodass insgesamt 210 Parametervariationen auf sechs Substratplatten erzeugt wurden. Nach dem Aufbringen der Footprintbahnen (Bild 1a) wurden die Proben vor einem Streifenlichtprojektionssensor (LMI Gocator 3210) aufgespannt vermessen. Das System erzeugt eine codierte Lichtstruktur auf der Oberfläche, die über ein triangulierendes Kamerasystem ausgewertet wird. Die Auflösung lag bei 60 µm in lateraler und 35 µm in vertikaler Richtung. Die resultierenden Daten wurden in digitale Höhenkarten überführt (Bild 1b). Aus den Höhenkarten wurde mit der Software *Mountainsmap* für jede Parametervariation ein durchschnittlicher Footprintquerschnitt erzeugt, welcher anschließend in die Bahnplanung eingebunden werden kann. Die Integration dieser Daten in das Bahnplanungssystem erlaubt eine präzise Prognose des Schichtwachstums in Abhängigkeit von den lokalen Prozessparametern und der Substratgeometrie. Zur Validierung wurden zusätzlich ausgewählte Probenquerschnitte hergestellt und metallographisch untersucht.

Die Analyse der Streifenlichtdaten sowie der Querschliffe zeigte eine deutliche Abhängigkeit der Schicht-

Tabelle 1: Parametervariation zur Erzeugung der Footprints
Table 1: Parameter variation for footprint generation

Gasdruck [bar] Gas pressure [bar]	Gastemperatur [°C] Gas temperature [°C]	Verfahrgeschwindigkeit [mm/min] Robot travel speed [mm/min]	Spritzwinkel [°] Spray angle [°]
25	250	2000	70
25	250	4000	70
25	350	2000	60
25	350	4000	80
25	650	2000	90
25	650	3000	60
25	750	3000	90
25	750	4000	80
30	250	3000	60
30	250	4000	90
30	350	3000	90
30	450	2000	70
30	650	4000	60
30	750	2000	70
30	750	2000	80
40	250	2000	90
40	250	4000	60
40	350	2000	60
40	550	400	80
40	650	3000	80
40	750	3000	70
40	750	4000	90
45	250	2000	80
45	250	3000	80
45	350	3000	70
45	350	4000	90
45	650	2000	90
45	650	4000	70
45	750	2000	60
45	750	4000	60

geometrie von den Parametern Spritzabstand und Winkel. Mit zunehmendem Abstand nahm die maximale Schichtdicke deutlich ab, während sich die Breite der Auftragszone erweiterte. Ein optimaler Bereich in Bezug auf eine minimale Porosität, welche mittels Lichtmikroskopie an den Querschliffen ermittelt wurde, und gleichmäßige Spurform wurde bei 30 mm Abstand und einem Winkel von 90° identifiziert. Die Gastemperatur wirkte sich primär auf die Porosität der Schicht aus; höhere Temperaturen führten zu einer verringerten Porosität und verbesserten Anbindung. Druckerhöhungen zeigten eine

mounted in front of a structured light projection sensor (LMI Gocator 3210) and scanned. The system projects a coded light pattern onto the surface, which is evaluated using a triangulating camera system. The resolution was 60 µm laterally and 35 µm vertically. The resulting data were converted into digital height maps (Fig. 1b). From these height maps, an average footprint cross-section was generated for each parameter set using the software *MountainsMap*. The cross-section can subsequently be integrated into the path planning system. The integration of this data allows for precise prediction of the coating growth

based on local process parameters and substrate geometry. Additionally, selected sample cross-sections were produced and metallographically examined for validation.

Analysis of the structured light data and cross-sections revealed a significant dependence of coating geometry on spray distance and angle. As the distance increased, the maximum coating thickness decreased, while the width of the deposited area expanded. An optimal combination in terms of minimum porosity – determined on the cross-section by means of light microscopy – and uniform track shape was identified at a distance of 30 mm and a 90° spray angle. The gas temperature primarily influenced porosity; higher temperatures resulted in reduced porosity and improved bonding. Increased pressure showed diminishing returns beyond about 40 bar, where no significant further reduction in porosity was observed. Porosity values for all examined samples were < 0.5%.

4. Slicing Software

The *S^3* slicer used in this study employs a mesh representation of the component as the basis for calculating the toolpath. For each mesh node, an optimization function is formulated that considers the overhang angle, collision risk, coating thickness and – when using Fused Deposition Modeling – coating adhesion and surface quality [8] (Fig. 2b). The result is a displacement of the mesh node, represented by a quaternion. In this way, the entire component is mapped through a field of quaternions that is iteratively optimized. Ultimately, the displacements are mapped as a scalar field, from which the curved slicing planes are extracted (Fig. 2c). Within these, the actual toolpath is planned.

First, the outer contour is traced twice to ensure high surface quality, then the inner area is filled using a zigzag pattern (Fig. 2d).

Compared to the original version of the *S^3* slicer, several modifications were made to adapt the slicer to cold spraying. Originally, the starting point for filling each sliced section was fixed in the same corner. If the endpoint was on the opposite side, the tool had to travel across the entire part to begin the next slice, resulting in unintended material

Sättigung ab etwa 40 bar, jenseits dessen keine signifikanten Verringerungen der Porosität mehr festgestellt wurden, die Porositäten lagen hier für alle untersuchten Proben in einem Bereich von < 0,5 %.

4. Slicing-Software

Der verwendete S^3 -Slicer nutzt eine Netzdarstellung des Bauteils als Ausgangslage für die Berechnung der Werkzeugbahn. Für jeden Netzknoten wird eine Optimierungsfunktion aufgestellt, die den Überhangwinkel, die Kollisionsgefahr, die Schichtdicke und im Falle der Nutzung von Fused Deposition Modeling die Schichthaftung und die Oberflächenqualität berücksichtigt [8] (Bild 2b). Deren Ergebnis ist eine Verschiebung des Netzknotens, repräsentiert durch ein Quaternion. Auf diesem Wege wird das gesamte Bauteil durch ein Quaternionenfeld abgebildet, welches iterativ optimiert wird. Schlussendlich werden die Verschiebungen als ein Skalarfeld abgebildet und aus diesem die gekrümmten Schnittflächen extrahiert (Bild 2c). In diesen wird wiederum die eigentliche Werkzeugbahn geplant. Hierbei wird zunächst die Außenkontur zwei Mal abgefahren, um eine hohe Oberflächenqualität zu gewährleisten und anschließend die Innenkontur mit einem Zickzack-Muster aufgefüllt (Bild 2d). Im Vergleich zur ursprünglichen Version des S^3 -Slicers wurden bislang folgende Änderungen umgesetzt, um den Slicer an das Kaltgasspritzen anzupassen. Ursprünglich lag der Startpunkt zum Auffüllen der einzelnen Schnittflächen in der gleichen Ecke. Sofern der Endpunkt auf der gegenüberliegenden Seite gelegen hat, musste das Werkzeug auf dem Weg zur nächsten Schnittebene somit einmal über das gesamte Bauteil fahren, was zu ungewolltem Materialauftrag geführt hat. Die Slicing-Software wurde derart erweitert, dass der Startpunkt einer Schnittebene über dem Endpunkt der vorherigen liegt. Darauf hinaus wurde in der Ursprungsversion der Slicing-Software das Auffüllen der Innenkontur durch Zickzack-Bahnen in eine vordefinierte Richtung durchgeführt. Als Folge dessen konnte es passieren, dass einzelne Bauteilbereiche nicht ohne

ein unzulässiges Ab- und Wiederansetzen des Werkzeugs erreichbar waren. Bei einem U-förmigen Bauteil, welches von unten aufgefüllt wird, wird somit zunächst eine Seite bearbeitet und anschließend durch die Lücke zur gegenüberliegenden gefahren. Sofern man das gleiche Bauteil jedoch von links oder rechts auffüllen würde, könnte dies ohne Absetzbewegungen geschehen. Dies wurde realisiert, indem die Software automatisch iterativ einen Vektor ermittelt, in dem keine Absetzbewegungen von Nötigen sind. Die Integration der zuvor ermittelten Footprints erfolgt über die Wahl der Zustellung und Lagenanzahl, die bei der Berechnung Schnittflächen im Skalarfeld genutzt werden. Schlussendlich wird anhand des berechneten Werkzeugpfads ein entsprechendes Roboterprogramm generiert.

5. Robotersimulation

Aufgrund der hohen Anzahl an Werkzeugbahnpunkten (mehrere 10.000) ist eine vollständige Simulation des Roboterprogramms in der Praxis nicht praktikabel, da die Simulationsumgebung *RobotStudio* des Roboterherstellers ABB dies nicht unterstützt. Die Fahrbewegungen ähneln sich jedoch innerhalb der einzelnen Schnittebenen und bestehen aufgrund des Zickzack-Musters aus Geraden, die mit Radien verbunden sind. Um einen gleichmäßigen Schichtauftrag zu gewährleisten, wurde in Versuchen ermittelt, bei welchen Geschwindigkeiten welche Radien ohne Bremsungen und Beschleunigungen gefahren werden können. Diese wurden dann in der Bahnplanung berücksichtigt. Darauf hinaus wurde simulativ die kinematische Erreichbarkeit des gesamten Arbeitsraums überprüft, sodass jeder Werkzeugbahnpunkt erreicht werden kann (Bild 3).

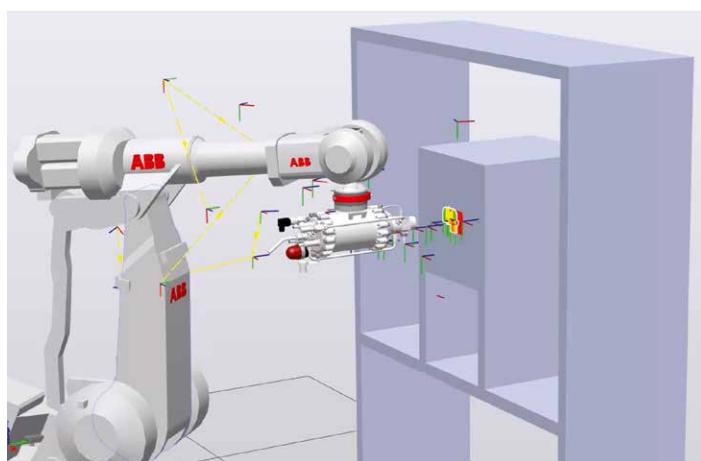


Bild 3: Kinematische Erreichbarkeits-simulation in RobotStudio

Fig. 3: Kinematic reachability simulation in RobotStudio

deposition. The slicer was modified so that the starting point of a slice is placed above the endpoint of the previous one. Additionally, in the original version, the interior fill was generated using zigzag paths in a predefined direction. This occasionally made it impossible to reach certain areas of a part without impermissible tool interruptions. For example, when filling a U-shaped component from below, one side is processed first, then the tool passes through the gap to reach the opposite side. However, filling from the left or right could be accomplished without any stops. This was implemented software was adapted to automatically determine a direction that avoids unnecessary tool interruptions. The integration of previously determined footprints is implemented by setting the coating height and number of coatings, which are applied to the scalar field for slicing. Finally, the toolpath is used to generate a corresponding robot program.

5. Robot Simulation

Due to the large number of toolpath points (several tens of thousands), a full simulation of the robot program is

not feasible in practice, as the simulation environment *RobotStudio* by ABB does not support it. However, the travel motions are similar within each coating and consist of straight lines connected by arcs due to the zigzag pattern. To ensure uniform coating deposition, tests were conducted to determine which speeds allow arcs to be traversed without acceleration or deceleration and this data was incorporated into path planning. In addition, a simulation was conducted to verify the kinematic reachability of the entire work area, ensuring that every toolpath point could be reached (Fig. 3).

6. Experimental Validation

To validate the simulation-based toolpaths, real parts made of CuZn30 were produced using the high-pressure cold spray system at the Chair of Materials Technology. The components were deposited onto the same aluminum substrates (EN AW-7075) that were used to generate the footprint tracks required for the simulation. To reduce the testing effort, a new component with 20 coatings and a total height of 15 mm was pro-

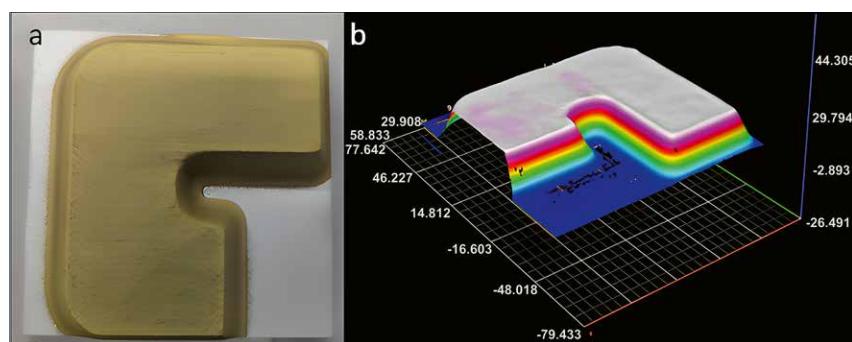


Bild 4: Kaltgasspritztes Bauteil nach 10 Lagen (a); Vermessenes 3D-Modell (b)

Fig. 4: Cold-sprayed part after 10 layers (a); measured 3D model (b)

6. Experimentelle Validierung

Zur Validierung der simulativ erstellten Bahnen wurden mit der am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie vorhandenen Hochdruck-Kaltgasspritzanlage reale Bauteile aus CuZn30 auf den gleichen Aluminiumsubstraten (EN AW-7075) gefertigt, auf denen bereits die zur Simulation benötigten Footprint-Bahnen erzeugt wurden. Zur Reduktion des Versuchsaufwands wurde ein neues Bauteil mit 20 Lagen und einer Gesamthöhe von 15 mm erzeugt. Zur Bewertung der Reproduzierbarkeit wurden drei Bauteile mit identischen Parametern gefertigt. Die für die Simulation sowie den Aufbauprozess genutzten Parameter sind in Tabelle 1 aufgeführt. Nach der Fertigung wurden die Bauteile mit dem Streifenlichtprojektionssensor *Gocator 3210* vermessen. Die Streifenlichtvermessung der resultierenden Strukturen zeigte eine gute Übereinstimmung mit der geplanten CAD-Geometrie sowie den Simulationsergebnissen (Bild 4). Die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Geometrie bezogen auf die Gesamthöhe betrug im Mittel weniger als 300 µm. Diese hohe Reproduzierbarkeit unterstreicht die Robustheit des entwickelten Bahnplanungsverfahrens und die Verlässlichkeit der experimentell gewonnenen Prozessmodelle. Über die erweiterte Bahnplanung konnten übermäßige Schichterhöhungen durch die Richtungswechsel weitgehend vermieden werden. Der kontinuierliche Materialauftrag konnte durch die gezielte Startpunktverlagerung und Bahnorientierung aufrechterhalten werden.

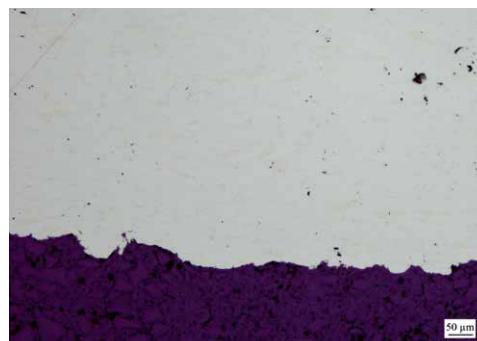


Bild 5: Querschliff am Interface zwischen Substrat und Bauteil

Fig. 5: Cross-section at the interface between substrate and part

oped path planning method and the reliability of the experimentally derived process models. The enhanced path planning approach effectively minimized excessive coating buildup at turning points. Continuous material deposition could be maintained by specifically setting the starting points and the path orientation. The previously derived coating profiles from the footprints could thus be success-

Die zuvor aus Footprints abgeleiteten Schichtprofile konnten damit erfolgreich zur prädiktiven Steuerung des Materialauftrags verwendet werden. Die analysierten Querschliffe zeigten eine hohe Homogenität sowie eine gleichmäßige Anbindung an das Substrat (Bild 5). Die Grenzfläche zwischen Schicht/Bauteil und Substrat zeigt keine Anbindungsfehler. Die messbare Porosität lag bei allen Bauteilen bei $0,35 \pm 0,07\%$.

Die eingesetzte Streifenlichtprojektion erwies sich sowohl für die Footprint erfassung als auch für die geometrische Verifikation als zuverlässiges Instrument. Durch die hohe laterale Auflösung konnten selbst feine Unebenheiten und Verzüge nachgewiesen werden, die im metallografischen Schliffbild nicht vollständig erkennbar waren. Die Kombination beider Methoden ermöglicht eine umfassende Bewertung der geometrischen und strukturellen Qualität der erzeugten Strukturen.

7. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse belegen, dass durch adaptive, simulationsgestützte Bahnplanung komplexe Geometrien mit

Tabelle 2: Parameter für die Validierungsversuche
Table 2: Parameters for validation experiments

Parameter	Wert Value
Prozessgasdruck Process gas pressure	4,5 MPa
Prozessgastemperatur Process gas temperature	550 °C
Fördergasfluss Carrier gas flow rate	4 m ³ /h
Förderscheibendrehzahl Powder disk rotation speed	6 1/min
Spritzabstand Spray distance	30 mm
Spritzwinkel Spray angle	90°
Bahnabstand Track spacing	2 mm
Robotergeschwindigkeit Robot travel speed	4.000 mm/min

duced. Three parts with identical parameters were manufactured to assess reproducibility. The parameters used in both the simulation and the buildup process are listed in Table 1. After fabrication, the parts were measured using the *Gocator 3210* structured light projection sensor. The structured light measurements of the resulting structures showed good agreement with the planned CAD geometry and the simulation results (Fig. 4). The deviation between the target and actual geometry relative to the total height was less than 300 µm on average. This high reproducibility underpins the robustness of the devel-

fully used for predictive control of the material deposition.

Analysis of the cross-sections showed high homogeneity and consistent bonding to the substrate (Fig. 5). The interface between the deposited coating/component and the substrate showed no bonding defects. Measured porosity across all parts was $0.35 \pm 0.07\%$.

The structured light projection system proved to be a reliable tool for both the footprint acquisition and the geometric verification. Its high lateral resolution allowed even small irregularities and distortions to be detected, some of which were not entirely discernible

Literatur References

- [1] Frazier, W. E.: Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23 (2014) 6, pp. 1917/28. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [2] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer-Verlag, New York, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [3] Jiang, Q.; Zhang, P.; Yu, Z. et al.: A Review on Additive Manufacturing of Pure Copper. *Coatings* Volume 11 (2021) Issue 6, 740. <https://doi.org/10.3390/coatings11060740>
- [4] Yin, J.; Zhang, W.; Ke, L. et al.: Vaporization of alloying elements and explosion behavior during laser powder bed fusion of Cu–10Zn alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 161 (2021), 103686. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103686>
- [5] Maissen, S.; Zürcher, S.; Wütherich, M.: Nonplanar Gcode Transformation. Internet: https://github.com/RotBotSlicer/Nonplanar_Slicing/. Zugriff am 21.05.2025
- [6] Müller, R. K.: Slicer4RTN. Internet: <https://github.com/Spiritdude/Slicer4RTN>. Zugriff am 21.05.2025
- [7] Zhang, T.; Liu, T.; Wang, C.C.L.: S³-Slicer: A General Slicing Framework for Multi-Axis 3D Printing. Internet: https://github.com/zhangty019/S3_DeformFDM. Zugriff am 21.05.2025
- [8] Zhang, T.; Fang, G.; Huang, Y. et al.: S3-Slicer: A General Slicing Framework for Multi-Axis 3D Printing. *ACM Transactions on Graphics* Vol. 41 (2022) Issue 6, Article No. 277, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1145/3550454.3555516>

tels Kaltgasspritzens additiv gefertigt werden können. Die entwickelte Lösung kombiniert Slicer-Technologie, Roboterkinetik sowie experimentelle Prozessdaten in einem ganzheitlichen System. Die Robustheit und Übertragbarkeit der Methoden wurden durch eine erfolgreiche Fertigung dreidimensionaler Bauteile nachgewiesen. Das System stellt eine praxistaugliche Lösung dar, insbesondere für KMU, die auf vorhandener Technik aufbauen möchten. Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die Echtzeitsteuerung von Bahnkorrekturen über externe Algorithmen sowie die Erweiterung des Systems auf weitere Werkstoffe und Geometrien. Auch die Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche für industrielle Endanwender steht im Fokus, um den Einstieg in die additive Fertigung mit Kaltgasspritzens weiter zu erleichtern.

Danksagung

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Projekt wird durchgeführt durch die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



INFO

Der Fachbeitrag basiert auf dem IGF-Forschungsvorhaben 01IF22584N / DVS-Nr. 2.3525.

in the metallographic cross-sections. The combination of both methods enables a comprehensive assessment of the geometric and structural quality of the fabricated components.

industrial end users is also a priority to further facilitate entry into additive manufacturing using cold spraying.

Acknowledgement

The project is promoted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWE) on the basis of a resolution of the German Bundestag. The project is carried out by the research association "Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf."



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

INFO

This peer-reviewed paper is based on the IGF research project No. 01IF22584N / DVS No. 2.3525.



UNSER AUS- & WEITERBILDUNGSANGEBOT IM THERMISCHEN SPRITZEN



Materialographie und werkstofftechnisches Prüfen von thermisch gespritzten Schichten

SLV München: auf Anfrage

Spritzfachmann I European Thermal Spraying Specialist (ETSS) nach DVS-EWF-Richtlinie 1188

SLV München: 06.10. - 24.10.2025 (ausgebucht!)

09.11. - 27.11.2026 (rechtzeitig Plätze sichern)

Erfahrungsaustausch für den Thermischen Spritzer

SLV Duisburg: 16.09. - 17.09.2025

Veranstaltungsort: wird noch bekannt gegeben

Thermischer Spritzer I European Thermal Sprayer (ETS) nach DVS-EWF-Richtlinie 1197 inkl. Prüfung von Thermischen Spritzern nach DIN EN ISO 14918

SLV Duisburg: 27.10. - 31.10.2025 18.05. - 22.05.2026

08.12. - 12.12.2025 14.09. - 18.09.2026

02.03. - 06.03.2026 23.11. - 27.11.2026

Alle Informationen sowie Preise und Anmeldung unter:
www.slv-muenchen.de | www.slv-duisburg.de

COURSES IN ENGLISH

European Thermal Sprayer (ETS)
according to guideline EWF 507 incl. Qualification Testing of Thermal Sprayers according to ISO 14918

SLV Duisburg: 15.06. - 19.06.2026

European Thermal Spraying Specialist (ETSS)
according to guideline EWF 459

SLV München: 08.06. - 26.06.2026



New: 2 weeks webinar
+ 1 practical week in Munich.

Außerdem:
Unternehmens-
zertifizierung
nach GTS-
Richtlinie und
ISO 9001



AB 2026: 3 STATT 2!

Mehr Inhalt. Mehr Fachwissen. Mehr für Sie.

STARTING 2026: 3, NOT 2!

More content. More expertise. More for you.



**Herausgeber:**

DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
GTS – Gemeinschaft Thermisches Spritzen e. V.

Verlag:

DVS Media GmbH, Postfach 101965, 40010 Düsseldorf; Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, Telefon (0211)1591-0, Telefax: -150, E-Mail: media@dvsmedia.info, Internet: www.dvs-media.eu, Geschäftsführung: Dirk Sieben

Redaktion:

Sarah Gottschalk (Leitung),
Nicole Stramka M. A. (V.i.S.d.P.),
Telefon: +49 211 1591-289, nicole.stramka@dvs-media.info,
Sylvia Hanagan (Redaktionsassistenz)

Ständiger Gutachterkreis:

Dr.-Ing. Gerd Bloschies, Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Prof. Vittorio Colombo, Dr.-Ing. Sven Hartmann, M.A. MBA (SFI), Werner Krömer, Prof. Dr.-Ing. Thomas Klassen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lampke, Prof. Dr.-Ing. Kai Möhwald, Prof. Lech Pawłowski, Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein, Dr.-Ing. Thomas Schläfer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Wolfgang Tillmann, Prof. Dr. Robert Vaßen

Redaktionsbeirat:

Dr. Alexander Barth, Dr.-Ing. Gerhard Bloschies, Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Dr.-Ing. Roland Boecking, Radek Enzl, Dr.-Ing. Sven Hartmann, MBA (SFI), Werner Krömer, Dr.-Ing. Konstantin von Niessen, Prof. Dr.-Ing. Christian Rupprecht, Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Wolfgang Tillmann

Anzeigen:

Markus Winterhalter (verantwortlich), Telefon: +49 211 1591-142, markus.winterhalter@dvs-media.info
Alexandra Seewald-Sander, Telefon: +49 211 1591-225, alexandra.seewald-sander@dvs-media.info
Gültig ist zurzeit die Preisleiste Nr. 17 vom 1. Januar 2025.

Vertrieb:

DVS Media GmbH, Leser-Service, Telefon: +49 (0) 6123 9238-145, E-Mail: dvsmedia@vuservice.de

Bezugsbedingungen:

„THERMAL SPRAY BULLETIN“ erscheint zweimal im Jahr. Sie erhalten „THERMAL SPRAY BULLETIN“ im Rahmen der Mitgliedschaft im DVS zu ermäßigten Bezugsbedingungen. Im Abonnement können Sie „THERMAL SPRAY BULLETIN“ seit 2009 durch den Buchhandel oder direkt beim Verlag beziehen. Einzelheft 31,00 € (zuzüglich Versandkosten), jährliche Bezugskosten Online 51,00 €, Print und Online 64,00 €, zuzüglich Versandkosten.

Druck:

D+L Printpartner, Bocholt

Urheber- und Verlagsrecht:

„THERMAL SPRAY BULLETIN“ sowie alle in dieser Zeitschrift enthaltenen Beiträge, Bilder und Tabellen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der DVS Media GmbH strafbar. Mit Annahme des Manuskripts gehen das Recht zur Veröffentlichung sowie die Rechte zur Übersetzung, zur Vergabe von Nachdruckrechten, zur elektronischen Speicherung in Datenbanken, zur Herstellung von Sonderdrucken und Fotokopien an den Verlag über.

Hinweis:

In dieser Fachzeitschrift wird aus Gründen der Lesbarkeit auf eine durchgängige geschlechtsneutrale Formulierung verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter. Die gewählte Sprachform dient allein der sprachlichen Vereinfachung und beinhaltet keine Wertung.

ISSN 1866-6248

Publisher:

DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
GTS – Gemeinschaft Thermisches Spritzen e. V.

Publishing house:

DVS Media GmbH, P.O. Box 101965, 40010 Düsseldorf; Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, Germany; telephone +49 (0)211 1591-0, fax: -150, e-mail: media@dvs-media.info, Internet: www.dvs-media.eu, Management: Dirk Sieben

Editorial department:

Sarah Gottschalk (Managing Editor),
Nicole Stramka M. A. (Responsible),
phone: +49 211 1591-289, nicole.stramka@dvs-media.info,
Sylvia Hanagan (Editorial assistance)

Permanent expert board:

Dr.-Ing. Gerd Bloschies, Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Prof. Vittorio Colombo, Dr.-Ing. Sven Hartmann, M.A. MBA (SFI), Werner Krömer, Prof. Dr.-Ing. Thomas Klassen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lampke, Prof. Dr.-Ing. Kai Möhwald, Prof. Lech Pawłowski, Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein, Dr.-Ing. Thomas Schläfer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Wolfgang Tillmann, Prof. Dr. Robert Vaßen

Editorial advisory board:

Dr. Alexander Barth, Dr.-Ing. Gerhard Bloschies, Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Dr.-Ing. Roland Boecking, Radek Enzl, Dr.-Ing. Sven Hartmann, MBA (SFI), Werner Krömer, Dr.-Ing. Konstantin von Niessen, Prof. Dr.-Ing. Christian Rupprecht, Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Wolfgang Tillmann

Advertising:

Markus Winterhalter (responsible),
phone: +49 (0)211 1591-142, markus.winterhalter@dvs-media.info
Alexandra Seewald-Sander,
phone: +49 211 1591-225, alexandra.seewald-sander@dvs-media.info
Price list no. 17 dated January 1, 2025 is valid at present.

Customer Service:

DVS Media GmbH, Leser-Service, telephone: +49 (0) 6123 9238-145, E-Mail: dvsmedia@vuservice.de

Purchase conditions:

“THERMAL SPRAY BULLETIN” will be published every six months. As a member of DVS, you will receive “THERMAL SPRAY BULLETIN” with discounted purchase conditions. Since 2009, you as a subscriber will be able to purchase “THERMAL SPRAY BULLETIN” via the book trade or directly from the publishing house. Single issue € 31.00 (plus shipping costs), annual purchase costs online € 51.00, print and online € 64.00 plus shipping costs).

Printing:

D+L Printpartner, Bocholt, Germany

Copyright and publishing law:

“THERMAL SPRAY BULLETIN” as well as all the articles, figures and tables included in this journal are protected by copyright. With the exception of the cases authorised by law, any utilisation without the consent of DVS Media GmbH will be liable to prosecution. When the manuscript is accepted, the right of publication and the rights to the translation, to the granting of reprinting rights, to the electronic storage in databases and to the manufacture of offprints and photocopies are transferred to the publishing house.

Note:

For the sake of readability, this technical scientific journal does not use gender-neutral language throughout. All gender-specific terms apply equally to all genders. The chosen form is intended solely for linguistic simplicity and does not imply any judgement.

ISSN 1866-6248

Veröffentlichung in / Publication in:

THERMAL SPRAY BULLETIN

A	Anlagen und Komponenten zum Thermischen Spritzen <i>Plants and components for thermal spraying processes</i>
B	Jobshop mit Spritzverfahren in der Anwendung <i>Jobshop with thermal spraying processes</i>
C	Thermische Spritzanwendungen <i>Thermal spray applications</i>
D	Ausrüstung zur Vorbereitung & Hilfsstoffe <i>Preparation equipment & supplies</i>
E	Ausrüstung zur Endbearbeitung <i>Finishing equipment</i>
F	Weitere Ausrüstung <i>Other equipment</i>
G	Zusatzwerkstoffe zum Thermischen Spritzen <i>Filler materials for thermal spraying</i>
H	Oberflächenbearbeitung <i>Finishing services</i>
I	Prüfen, Forschung & Entwicklung, Aus- und Weiterbildung <i>Testing, research & development, education</i>

© DVS Media GmbH

Ansprechpartner / **Contact person:** Britta Wingartz
 Aachener Straße 172 Tel.: +49 211 1591-155
 40223 Düsseldorf Fax: +49 211 1591-150
 E-Mail: britta.wingartz@dvs-media.info



▼ Detonationsspritzen
Detonation spraying 9010



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Flammenspritzen mit Draht, Schnur oder Stab
Flame spraying with wire, cord or rod 9020



Bekkers Metaalspuitwerken B.V.
Bedrijvenweg 10, NL-5386 KA Geffen
+31 73 532 29 81
E-Mail: info@bekkersmetaal.nl
Internet: www.bekkersmetaal.nl



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



Metallizing Equipment Co. Pvt. Ltd.
E-101, M.I.A., Basni 2 phase, IND - Jodhpur-342005
+91 291 274 7601-02
Internet: www.mecpl.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourelet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Flammenspritzen mit Pulver
Flame spraying with powder 9030



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



METALLIZING EQUIPMENT CO. PVT. LTD.
E-101, M.I.A., Basni 2 phase, IND - Jodhpur-342005
+91 291 274 7601-02
Internet: www.mecpl.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Hochgeschwindigkeits-Flammenspritzen
High-velocity oxy-fuel spraying 9040



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
+49 (0)8370/92070 +49 (0)8370/920720



METALLIZING EQUIPMENT CO. PVT. LTD.
E-101, M.I.A., Basni 2 phase, IND - Jodhpur-342005
+91 291 274 7601-02
Internet: www.mecpl.com



OERLIKON METCO EUROPE GMBH
Am Prime Parc 2a, 65470 Rauhneim
+49 6142 6033 0 +49 6142 6033 426
E-Mail: sales.oss.metco.germany@oerlikon.com
Internet: www.oerlikon.com/metco



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Kaltgassspritzen
Cold gas spraying 9050



IMPACT INNOVATIONS GMBH
Bürgermeister-Steinberger-Ring 1, D-84431 Rattenkirchen
+49 8636 695 190-0 +49 8636 695 190-10
E-Mail: info@impact-innovations.com
Internet: www.impact-innovations.com

▼ Lichtbogenspritzen
Arc spraying 9080



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
+49 (0)8370/92070 +49 (0)8370/920720



METALLIZING EQUIPMENT CO. PVT. LTD.
E-101, M.I.A., Basni 2 phase, IND - Jodhpur-342005
+91 291 274 7601-02
Internet: www.mecpl.com



OERLIKON METCO EUROPE GMBH
Am Prime Parc 2a, 65470 Rauhneim
+49 6142 6033 0 +49 6142 6033 426
E-Mail: sales.oss.metco.germany@oerlikon.com
Internet: www.oerlikon.com/metco



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



T-Spray GmbH
Hoher Stich 4, D-73252 Lenningen
☎ +49 (0)7026/71135 ☎ +49 (0)7026/5421
E-Mail: info@t-spray.de
Internet: www.t-spray.de



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
☎ +39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
☎ +49 (0)8370/92070 ☎ +49 (0)8370/920720



Metallizing Equipment Co. Pvt. Ltd.
E-101, M.I.A., Basni 2 phase, IND - Jodhpur-342005
☎ +91 291 274 7601-02
Internet: www.mecpl.com



Oerlikon Metco Europe GmbH
Am Prime Parc 2a, 65470 Raunheim
☎ +49 6142 6033 0 ☎ +49 6142 6033 426
E-Mail: sales.oss.metco.germany@oerlikon.com
Internet: www.oerlikon.com/metco



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
☎ +39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourelet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
☎ +33 490 858 500 ☎ +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Plasma-Pulver-Auftragschweißen
Plasma transfer arc welding



DURUM VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Wüllich
☎ +49 (0)2154/4837-0 ☎ +49 (0)2154/4837-79
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durmat.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
☎ +39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourelet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
☎ +33 490 858 500 ☎ +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

B Jobshop mit folgenden Spritzverfahren in der Anwendung
Jobshop with following thermal spraying processes

▼ Flammspritzen mit Draht, Schnur oder Stab
Flame spraying with wire, cord or rod



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
☎ +49 (0)831/540288-0 ☎ +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de



Baumann Plasma Flame Technic AG
Hofstrasse 1, CH-8181 Höri
☎ +41 44 8644490 ☎ +41 44 8644491
E-Mail: walker@baumann-plasma.ch
Internet: www.baumann-plasma.ch



Berolina Metallspritztechnik
Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
☎ +49 (0)33434/1550-0 ☎ +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de

9100



RYBAK + HOFMANN rvv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
☎ +49 (0)7151/95998-0 ☎ +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvv-technik.de
Internet: www.rvv-technik.de

▼ Flammspritzen mit Pulver
Flame spraying with powder



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
☎ +49 (0)831/540288-0 ☎ +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de



Baumann Plasma Flame Technic AG
Hofstrasse 1, CH-8181 Höri
☎ +41 44 8644490 ☎ +41 44 8644491
E-Mail: walker@baumann-plasma.ch
Internet: www.baumann-plasma.ch



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
☎ +49 (0)33434/1550-0 ☎ +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



Cremer Beschichtungstechnologie GmbH
Bauklot 16, 58515 Lüdenscheid
☎ +49 (0)2351 / 94 22 - 48 ☎ +49 (0)2351 / 94 22 - 49
E-Mail: info@cremer-beschichtungstechnologie.de
Internet: www.cremer-beschichtungstechnologie.de/flammspritzen.html



RYBAK + HOFMANN rvv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
☎ +49 (0)7151/95998-0 ☎ +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvv-technik.de
Internet: www.rvv-technik.de

▼ Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen
High-velocity oxy-fuel spraying



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
☎ +49 (0)831/540288-0 ☎ +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de



Baumann Plasma Flame Technic AG
Hofstrasse 1, CH-8181 Höri
+41 44 8644490 +41 44 8644491
E-Mail: walker@baumann-plasma.ch
Internet: www.bbaumann-plasma.ch



Bekkers Metaalspuitwerken B.V.
Bekrijvenweg 10, NL-5386 KA Geffen
+31 73 532 29 81
E-Mail: info@bekkersmetaal.nl
Internet: www.bekkersmetaal.nl



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



Oerlikon Metco Europe GmbH
Am Prime Parc 2a, 65470 Raunheim
+49 6142 6033 0 +49 6142 6033 426
E-Mail: sales.oss.metco.germany@oerlikon.com
Internet: www.oerlikon.com/metco



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de

▼ Kaltgasspritzan
Cold gas spraying

9670
▼ Lichtbogenspritzan
Arc spraying



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
+49 (0)831/540288-0 +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de



Baumann Plasma Flame Technic AG
Hofstrasse 1, CH-8181 Höri
+41 44 8644490 +41 44 8644491
E-Mail: walker@baumann-plasma.ch
Internet: www.bbaumann-plasma.ch



Bekkers Metaalspuitwerken B.V.
Bekrijvenweg 10, NL-5386 KA Geffen
+31 73 532 29 81
E-Mail: info@bekkersmetaal.nl
Internet: www.bekkersmetaal.nl



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de

9640

9680
▼ Plasmaspritzan
Plasma spraying



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
+49 (0)831/540288-0 +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de

9660



Baumann Plasma Flame Technic AG
Hofstrasse 1, CH-8181 Höri
+41 44 8644490 +41 44 8644491
E-Mail: walker@baumann-plasma.ch
Internet: www.bbaumann-plasma.ch

RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de



Bekkers Metaalspuitwerken B.V.
Bekrijvenweg 10, NL-5386 KA Geffen
+31 73 532 29 81
E-Mail: info@bekkersmetaal.nl
Internet: www.bekkersmetaal.nl



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



Oerlikon Metco Europe GmbH
Am Prime Parc 2a, 65470 Raunheim
+49 6142 6033 0 +49 6142 6033 426
E-Mail: sales.oss.metco.germany@oerlikon.com
Internet: www.oerlikon.com/metco



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de

9690
▼ Plasma-Pulver-Auftragschweißen
Plasma transfer arc welding



DURUM VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Willich
+49 (0)2154/4837-0 +49 (0)2154/4837-78
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durmat.com

C Thermische Spritzanwendungen
Thermal spray applications



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de

▼ Korrosionsschutz
Corrosion protection

9232



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rvh-technik.de

▼ Elektronik
Electrical

9140



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de

▼ Hochtemperaturkorrosion
High temperature corrosion

9160



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de

▼ Sanierung
Repair

9170



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rvh-technik.de



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourellet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Vakuumplasma
Vacuum plasma

9180



Oerlikon Metco Europe GmbH
Am Prima Parc 2a, 65470 Rauhheim
+49 6142 6033 0 +49 6142 6033 426
E-Mail: sales.oss.metco.germany@oerlikon.com
Internet: www.oerlikon.com/metco

▼ Verschleißschutz
Wear resistance

9190



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
+49 (0)831/540288-0 +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



CORODUR Fülldraht GmbH - Das Original
Gießerallee 37, 47877 Willich
+49 2154 8879-0 +49 2154 8879-9
E-Mail: stenzel@corodur.de
Internet: www.corodur.de



DURUM VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Willich
+49 (0)2154/4837-0 +49 (0)2154/4837-78
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durumat.com



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rvh-technik.de
Internet: www.rvh-technik.de



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourellet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Wärmeschutz
Thermal barrier

9200



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourellet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

D Ausrüstung zur Vorbereitung und Hilfsstoffe
Preparation equipment and supplies

▼ Druckluft- & Vakuumstrahlen
Pressure & vacuum blasting



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com

▼ Strahlmittel
Blasting media



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourellet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

E Ausrüstung zur Endbearbeitung
Finishing equipment

▼ Ausrüstung zum Sandstrahlen
Sand-blasting equipment



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Drähte
Wires



CORODUR
DAS ORIGINAL
FÜLLDRAHT GMBH

CORODUR Fülldraht GmbH - Das Original
Gießerallee 37, 47877 Willich
+49 2154 8879-0 +49 2154 8879-79
E-Mail: stenzel@corodur.de
Internet: www.corodur.de



DURUM
VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH

DURUM VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Willich
+49 (0)2154/4837-0 +49 (0)2154/4837-78
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durmat.com



Lincotek
Equipment

LINCOTEK EQUIPMENT SPA

Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy

+39 0525 53659

E-Mail: equipment@lincotek.com

Internet: www.lincotekequipment.com



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
+49 (0)8370/92070 +49 (0)8370/920720



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourlet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Intermetallische Pulver
Intermetallic powders



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com

9400



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Keramische Pulver (Metalloxide/Metallnitride)
Ceramic powders (metal oxides/nitrides)



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com

9420



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
+49 (0)8370/92070 +49 (0)8370/920720



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourlet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Keramikstäbe
Ceramic rods



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

9430



SAINT-GOBAIN
SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourellet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ MCrAlYs
MCrAlYs

▼ Oxide
Oxides

9445

▼ Spritzpulver
Spray Powders

9459



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com

▼ Metallische Pulver
Metal powders

9439



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



CORODUR
DAS ORIGINAL FÜLDRAHT GMBH
CORODUR Fülldraht GmbH - Das Original
Gießerallee 37, 47877 Willich
+49 2154 8879-0 +49 2154 8879-79
E-Mail: stenzel@corodur.de
Internet: www.corodur.de



DURUM
VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Willich
+49 (0)2154/4837-0 +49 (0)2154/4837-78
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durum.com



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
+49 (0)8370/92070 +49 (0)8370/920720



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN
SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourellet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Selbstfließende Pulver
Self Fluxing powders

9450



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Spritzpulver-Gemische
Powder mixtures

9460



CORODUR
DAS ORIGINAL FÜLDRAHT GMBH
CORODUR Fülldraht GmbH - Das Original
Gießerallee 37, 47877 Willich
+49 2154 8879-0 +49 2154 8879-79
E-Mail: stenzel@corodur.de
Internet: www.corodur.de



DURUM
VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Willich
+49 (0)2154/4837-0 +49 (0)2154/4837-78
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durum.com



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



Linde AMT GmbH
Am Mühlbach 13, D-87487 Wiggensbach
+49 (0)8370/92070 +49 (0)8370/920720



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it

▼ Spritzschnüre
Flexible cords 9461



DURUM VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 7, D-47877 Wüllich
+49 (0)2154/4837-0 | +49 (0)2154/4837-78
E-Mail: knauf@durum.de
Internet: www.durmat.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS
50, Rue du Mourelet, F-84093 AVIGNON Cedex 9
+33 490 858 500 | +33 490 829 452
E-Mail: coatingsolutions@saint-gobain.com
Internet: www.coatingsolutions.saint-gobain.com

▼ Verdüste Legierungen
Atomized alloys 9475



LINCOTEK EQUIPMENT SPA
Via Talignano 5, 43044, Collecchio PR, Italy
+39 0525 53659
E-Mail: equipment@lincotek.com
Internet: www.lincotekequipment.com



S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL
VIA CARMELITANI SCALZI 20, 37122 Verona, Italy
+39 045 8348452 | Mobile: +39 348 5486143
E-Mail: info@scs.vr.it
Internet: www.scs.vr.it



▼ Schleifen
Grinding 9490



ABLER GmbH & Co. KG
Georg-Haindl-Straße 44, D-87448 Waltenhofen-Hegge
+49 (0)831/540288-0 | +49 (0)831/540288-9
E-Mail: info@abler.de
Internet: www.abler.de



Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 | +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 | +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rhv-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de

▼ Spanende Bearbeitung
Machining 9500

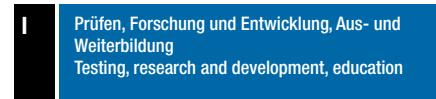


Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH
Pappelhain 30-31, D-15378 Hennickendorf
+49 (0)33434/1550-00 | +49 (0)33434/1550-01
E-Mail: info@metallspritztechnik.de
Internet: www.metallspritztechnik.de



RYBAK + HOFMANN rhv-Technik GmbH + Co. KG
Eisentalstraße 27, D-71332 Waiblingen
+49 (0)7151/95998-0 | +49 (0)7151/95998-95
E-Mail: claudia.hofmann@rhv-technik.de
Internet: www.rhv-technik.de

▼ Beratung
Consultancy 9560



▼ Aus- und Weiterbildung
Education 9520



GSI - Gesellschaft für
Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV Duisburg
Bismarckstraße 85, 47167 Duisburg
+49 203 3781-0 | +49 203 3781-228
E-Mail: info@slv-duisburg.de
Internet: www.slv-duisburg.de



GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV München
Schachenmeierstraße 37, 80636 München
+49 89 126 802 - 0 | +49 89 123 939 - 11
E-Mail: info@slv-muenchen.de
Internet: www.slv-muenchen.de

▼ Forschung und Entwicklung
Research and Development 9530



Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS)
Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden
+49 (0)351/83391-3330 | +49 (0)351/83391-3478
E-Mail: filofteia-laura.toma@iws.fraunhofer.de
Internet: www.iws.fraunhofer.de

▼ Prüfdienstleistung, Ausrüstung, Betriebsstoffe
Testing services, equipment, supplies 9550



GSI - Gesellschaft für
Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV Duisburg
Bismarckstraße 85, 47167 Duisburg
+49 203 3781-0 | +49 203 3781-228
E-Mail: info@slv-duisburg.de
Internet: www.slv-duisburg.de

▼ Beratung
Consultancy 9560



CORODUR Fülldraht GmbH - Das Original
Gießerallee 37, 47877 Wüllich
+49 2154 8879-0 | +49 2154 8879-79
E-Mail: stenzel@corodur.de
Internet: www.corodur.de



GSI - Gesellschaft für
Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV Duisburg
Bismarckstraße 85, 47167 Duisburg
+49 203 3781-0 | +49 203 3781-228
E-Mail: info@slv-duisburg.de
Internet: www.slv-duisburg.de

Firmenindex / Index to Companies

Firma / Company	Produkt / Product	Firma / Company	Produkt / Product
ABLER GmbH & Co. KG	9190, 9490, 9610, 9620, 9630, 9670, 9680	LINCOTEK EQUIPMENT SPA	9020, 9030, 9040, 9080, 9090, 9210, 9250, 9270, 9280, 9310, 9340, 9350, 9360, 9380, 9390, 9400, 9410, 9420, 9439, 9440, 9445, 9459, 9460, 9475
Baumann Plasma Flame Technic AG	9610, 9620, 9630, 9670, 9680	Linde AMT GmbH	9040, 9080, 9090, 9340, 9380, 9390, 9410, 9420, 9440, 9460
Bekkers Metaalspuitenwerken B.V.	9020, 9630, 9670, 9680	Metallizing Equipment Co. Pvt. Ltd.	9020, 9030, 9040, 9080, 9090, 9360
Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH	9140, 9160, 9170, 9190, 9210, 9490, 9500, 9610, 9620, 9630, 9640, 9670, 9680	Oerlikon Metco AG, Wohlen	9040, 9080, 9090, 9180, 9630, 9680
C&M Technologies GmbH	9410, 9459	Rybak + Hofmann rhv-Technik GmbH + Co. KG	9120, 9170, 9190, 9232, 9490, 9500, 9610, 9620, 9630, 9660, 9670, 9680
CORODUR Fülldraht GmbH	9190, 9380, 9390, 9410, 9440, 9450, 9460, 9560	S.C.S. SURFACE COATING SOLUTIONS SRL	9010, 9020, 9030, 9040, 9080, 9090, 9100, 9250, 9262, 9340, 9350, 9380, 9390, 9400, 9410, 9420, 9430, 9440, 9445, 9450, 9459, 9460, 9461, 9475
Cremer Beschichtungstechnologie GmbH	9620	SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS	9020, 9090, 9100, 9170, 9190, 9200, 9230, 9390, 9420, 9430, 9445, 9461
DIAMANT Polymer GmbH	9262	T-Spray GmbH	9080, 9280
DURUM VERSCHLEISS-SCHUTZ GMBH	9100, 9190, 9340, 9380, 9390, 9410, 9440, 9450, 9460, 9461, 9690		
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahletechnik IWS Dresden	9530		
GSI - Gesellschaft f. Schweiß-technik International mbH Niederlassung SLV Duisburg	9520, 9550, 9560		
GSI mbH Niederlassung SLV München	9520		
Impact Innovations GmbH	9050		

Preisliste / Pricelist

Die Vorteile auf einen Blick / The advantages at a glance:

- Für jeden etwas dabei / Something for everyone:**
Der Branchenführer ist nach 9 thematisch unterteilten Hauptgruppen mit zahlreichen relevanten Stichwörtern sortiert / *Organised topically into 9 main groups with numerous relevant keywords*
- Zielsicher / Directed:** Die klare Gliederung führt den Benutzer schnell und treffsicher ans Ziel / *the precise classification leads the user to a result accurately*
- Alles auf einen Blick / At a glance:** Jeder Eintrag umfasst die vollständige Firmenanschrift inklusive E-Mail- und Internet-Adresse / *Complete listing of your entries including email and Internet address*
- Länderübergreifende Kontakte / Cross-national contacts:** Die Veröffentlichung in unserer zweisprachigen Zeitschrift ermöglicht Ihnen eine Kontaktaufnahme auch über Deutschlands Grenzen hinaus / *The bilingual magazine offers the opportunity to develop new international contacts*
- Kosten sparen / Save costs:** Wir bieten Ihnen attraktive Staffelpreise nach Anzahl der Stichwörter / *Attractive scale prices on basis of number of keywords*

Preise / Prices:

Anzahl der Stichwörter Number of keywords	Kosten pro Jahr/pro Stichwort in EUR* Costs per annum/per keyword in EUR*
1	75,00
2 – 5	70,00
6 – 10	65,00
ab/from 11	60,00

* Auf alle Preise wird die derzeitige MwSt. erhoben.

* The prices are subject to VAT.

Jetzt mit verbesserter Internetpräsenz!
Ihr kompletter Firmeneintrag inklusive Logo und Verlinkung zu Ihrer Homepage erscheint auf www.tsb-bezugsquellen.de und das komplett **ohne zusätzliche Kosten**.
Die neue Online-Präsenz verdoppelt die Reichweite Ihrer Werbemaßnahmen.

Now with improved internet presence!
Your complete company entry including logo and linking to your homepage appears at www.tsb-bezugsquellen.de/en and that **without any additional costs** whatever.
The new online presence doubles the range of your advertising measures.

The screenshot shows the website's header with 'Bezugssquellenverzeichnis' and 'THERMAL SPRAY BULLETIN'. Below the header, there's a search bar and a navigation menu with links to 'Home', 'Bezugssquellenverzeichnis', 'Mediendaten', 'Preise', and 'Kontakt'. The main content area displays the company entry for 'THERMAL SPRAY BULLETIN', including its logo, name, and a brief description of its focus on thermal spraying technology. At the bottom of the page, there's a footer with links to 'Eintrag erstellen', 'Presse', and 'Kontakt'.

Ihre Ansprechpartnerin:
Your contact person:
Britta Wingartz



DVS Media GmbH
Postfach 10 19 65, 40010 Düsseldorf
P: +49 211 1591-155
F: +49 211 1591-150
E-Mail: britta.wingartz@dvs-media.info
Internet: www.dvs-media.eu

Bestellformular / Order

Ja, bitte veröffentlichen Sie den folgenden Eintrag im Bezugsquellenverzeichnis:

Yes, please publish the following entry in the buyers guide:

Firma/Company

Straße, Hausnummer bzw. Postfach/Street Address - P.O. Box

PLZ, Wohnort/Postal Code, City

Telefon/Phone

Fax

E-Mail/email

Internet

Hauptgruppe bitte ankreuzen:/Please mark the main group:

- A Anlagen und Komponenten zum thermische Spritzverfahren/Plants and components for thermal spraying processes
- B Jobshop mit Spritzverfahren in der Anwendung/Jobshop with thermal spraying processes
- C Thermische Spritzanwendungen/Thermal spray applications
- D Ausrüstung zur Vorbereitung & Hilfsstoffe/Preparation equipment & supplies
- E Ausrüstung zur Endbearbeitung/Finishing equipment
- F Weitere Ausrüstung/Other equipment
- G Zusatzwerkstoffe zum Thermischen Spritzen/Filler materials for thermal spraying
- H Oberflächenbearbeitung/Finishing services
- I Prüfen, Forschung & Entwicklung, Aus- und Weiterbildung/Testing, research & development, education

Stichwörter/Keywords:

- | | |
|----------|----------|
| 1. _____ | 4. _____ |
| 2. _____ | 5. _____ |
| 3. _____ | 6. _____ |

Für weitere Stichwörter bitte separates Blatt verwenden/For further keywords please use a separate sheet

Die bereits bestehende Stichwörterliste kann mit neuen - zur Hauptgruppe passenden - Stichwörtern ergänzt werden.

It's possible to add new keywords to the existing list of keywords (appropriate to the main group).

Die Einträge im Branchenführer erfolgen jeweils mit einer Laufzeit von 12 Monaten bis auf Widerruf.

Abbestellungen werden zum Ende des jeweiligen Bezugsjahres unter Einhaltung einer Frist von 6 Wochen angenommen. Stichtag ist jeweils der 15. des Monats.

The entries in the Industry Guide take place in each case with a term of 12 month until they are canceled.

Discontinuation will be accepted at the end of a subscription year considering 6 weeks notice. Deadline is the 15th of each month.

Zusätzlich und kostenfrei: Der Eintrag im Internet unter www.tsb-bezugsquellen.de, mit einer Verlinkung zu Ihrer Homepage sowie die Veröffentlichung Ihres Firmenlogos. Bitte senden Sie das Bestellformular mit Ihrem Logo (jpg-Datei) an folgende E-Mail Adresse: britta.wingartz@dvs-media.info.

In addition and at no charge: Your entry on the internet on www.tsb-bezugsquellen.de/en/ with a link to your homepage and also the Publication of your company logo. Please send the order formular with your logo (jpg-file) to: britta.wingartz@dvs-media.info.

Ansprechpartner/Contact person

Bestellzeichen/Sign

Datum/Date

Unterschrift/Signature

Produktliste / List of Products

A Anlagen und Komponenten zum Thermischen Spritzen / Plants and components for thermal spraying processes

9010	Detonationsspritzen / Detonation spraying
9020	Flammspritzen mit Draht, Schnur oder Stab / Flame spraying with wire, cord or rod
9030	Flammspritzen mit Pulver / Flame spraying with powder
9040	Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen / High-velocity oxy-fuel spraying
9050	Kaltgasspritzen / Cold gas spraying
9060	Kunststoff-Flammspritzen / Plastic flame spraying
9070	Laserspritzen / Laser spraying
9080	Lichtbogenspritzen / Arc spraying
9090	Plasmaspritzen / Plasma spraying
9100	Plasma-Pulver-Auftragschweißen / Plasma transfer arc welding

B Jobshop mit folgenden Spritzverfahren in der Anwendung / Jobshop with following thermal spraying processes

9600	Detonationsspritzen / Detonation spraying
9610	Flammspritzen mit Draht, Schnur oder Stab / Flame spraying with wire, cord or rod
9620	Flammspritzen mit Pulver / Flame spraying with powder
9630	Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen / High-velocity oxy-fuel spraying
9640	Kaltgasspritzen / Cold gas spraying
9650	Kunststoff-Flammspritzen / Plastic flame spraying
9660	Laserspritzen / Laser spraying
9670	Lichtbogenspritzen / Arc spraying
9680	Plasmaspritzen / Plasma spraying
9690	Plasma-Pulver-Auftragschweißen / Plasma transfer arc welding

C Thermische Spritzanwendungen / Thermal spray applications

9120	Atmosphärische Korrosion / Atmospheric corrosion
9232	Korrosionsschutz / Corrosion protection
9130	Einlaufschichten / Abradable applications
9140	Elektronik / Electrical
9150	Maßhaltigkeit / Clearance control
9160	Hochtemperaturkorrosion / High temperature corrosion
9170	Sanierung / Repair
9180	Vakuumplasma / Vacuum plasma
9190	Verschleißschutz / Wear resistance
9200	Wärmeschutz / Thermal barrier

D Ausrüstung zur Vorbereitung & Hilfsstoffe / Preparation equipment & supplies

9198	Flammspritzen mit Draht oder Stab / Flame spraying with wire or rod
9199	Flammspritzen mit Pulver / Flame spraying with powder
9201	Kunststoff-Flammspritzen / Plastic Flame spraying
9202	Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) / High-velocity oxy-fuel spraying (HVOF)
9203	Detonationsspritzen / Detonation spraying
9204	Plasmaspritzen / Plasma spraying
9205	Suspensionsspritzen / Suspension spraying
9206	Laserspritzen / Laser spraying
9207	Lichtbogenspritzen / Arc spraying
9208	Kaltgasspritzen / Cold gas spraying
9209	Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA) / Plasma transfer arc welding (PTA)
9210	Druckluft- & Vakuumstrahlen / Pressure & vacuum blasting
9220	Maskierungen & Klebebänder / Masking compounds & tapes
9230	Strahlmittel / Blasting media
9231	Sandstrahlen / Sandblasting

E Ausrüstung zur Endbearbeitung / Finishing equipment

9239	Einschmelzbrenner / Fusing torch
9240	Werkzeuge und Schleifmittel / Finishing tools and grinding wheels
9250	Ausrüstung zum Sandstrahlen / Sand-blasting equipment
9260	Dichtmittel / Sealants
9261	Spiegelhochglanz / Mirror polish
9262	Versiegeln / Sealing

F Weitere Ausrüstung / Other equipment

9270	Abluft/Filtersysteme/Filter / Exhaust systems/bag houses
9280	Automatisierte Spritzsysteme / Automated spraying systems
9290	Durchflussmesser/Durchflussregler / Flow meter/Flow controller
9300	Luftkompressoren / Air compressors
9310	Manipulatoren / Manipulators
9330	Prüfausrüstung / Testing equipment
9340	Pulverförderer / Powder feeder
9350	Roboter / Robotics
9360	Schallschutzkabinen/Spritzkabinen / Soundproof rooms/Spray booths

G Zusatzwerkstoffe zum Thermischen Spritzen / Filler materials for thermal spraying

9380	Andere Pulver / Other powders
9390	Drähte / Wires
9400	Intermetallische Pulver / Intermetallic powders
9410	Karbidische Pulver / Carbide powders
9420	Keramische Pulver (Metallocide/Metallnitride) / Ceramic powders (metal oxides/nitrides)
9430	Keramikstäbe / Ceramic rods
9439	MCrAlYs / MCrAlYs
9440	Metallische Pulver / Metal powders
9445	Oxide / Oxides
9450	Selbstfließende Pulver / Self Fluxing powders
9459	Spritzpulver / Spray Powders
9460	Spritzpulver-Gemische / Powder mixtures
9461	Spritzschnüre / Flexible cords
9470	Thermoplaste / Thermoplastics
9475	Verdüste Legierungen / Atomized alloys

H Oberflächenbearbeitung / Finishing services

9480	Feinschleifen / Superfinishing
9490	Schleifen / Grinding
9500	Spanende Bearbeitung / Machining
9510	Weiteres / Other

I Prüfen, Forschung & Entwicklung, Aus- und Weiterbildung / Testing, research & development, education

9520	Aus- und Weiterbildung / Education
9530	Forschung und Entwicklung / Research and Development
9540	Prüfabschnitte / Test coupons
9550	Prüfdienstleistung, Ausrüstung, Betriebsstoffe / Testing services, equipment, supplies
9560	Beratung / Consultancy

Inserentenverzeichnis Thermal Spray Bulletin

Advertiser listing Thermal Spray Bulletin

Bekkers Metaalspuitenwerken B.V.	KA Geffen/The Netherlands	75
Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH	Hennickendorf/Germany	73
Deloro Wear Solutions GmbH	Koblenz/Germany	U2/IFC
Durum Verschleißschutz GmbH	Willich/Germany	XV
DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.	Dusseldorf/Germany	82
DVS Media GmbH	Dusseldorf/Germany	111, 126
EUROMAT GmbH	Baesweiler/Germany	81
GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH Niederlassung SLV München	Munich/Germany	110
GTV Verschleißschutz GmbH	Luckenbach/Germany	Title
Linde AMT GmbH	Wiggensbach/Germany	79
Lufthansa Technik AG	Hamburg/Germany	U3/IBC
Metco Joining & Cladding	Wohlen/Switzerland	77
obz innovation gmbh	Bad Krozingen/Germany	U4/BC



Der Stellenmarkt für die Branche.
www.home-of-welding.com/jobportal

Wir beraten Sie gerne!

Britta Wingartz · T +49 211 15 91-155 · anzeigen@dvs-media.info

In Kooperation mit



Fast schöner als Fliegen: Es möglich machen.

Facharbeiter:in für **Thermisches Spritzen** und **Oberflächenbeschichtung** gesucht.

Das erwartet dich:

- › Maskieren und Abdecken von Triebwerksbauteilen z.B. durch Einsatz von hitzebeständigem Klebeband bzw. Vorrichtungen/Abdeckungen aus Blech- oder Silikonformen
- › Bedienen und Programmieren verschiedener robotergesteuerter (ABB) Strahl- und Beschichtungsanlagen
- › Aluminiumoxidstrahlen von Triebwerksteilen und Flugzeugteilen als Vorbereitung zum Plasmaspritzen
- › Anwenden von verschiedenen thermischen Spritzverfahren

Das bringst du mit:

- › (zeitnah) abgeschlossene Berufsausbildung in einem metallverarbeitenden Beruf
- › Kenntnisse und Erfahrungen im Thermischen Spritzen und Robotersteuerung wünschenswert

Deine Benefits

 Flugvergünstigungen

 Betriebliche Altersvorsorge

 Urlaubs- und Weihnachtsgeld



Jetzt bewerben: [lufthansa-technik/karriere](#)



TAKING OFF **TOGETHER**



Lufthansa Technik

Lufthansa Technik



COLD SPRAYING

THERMAL SPRAYING

SUSPENSION SPRAYING

obz innovation gmbh, the most selected development partner for coating solutions in thermal spraying, cold spraying and suspension spraying.

obz innovation gmbh | phone: +49 7633 90 899 0 | info@obz-innovation.com
www.obz-innovation.com | www.coldgascoating.com | www.suspensionspraying.com