

Technologievergleich beim Thermischen Spritzen

Hochschule Furtwangen, Fakultät Mechanical and Medical Engineering
Jan Schuster

Abstract – Thermal spraying is one of the most important and most efficient methods for coating surfaces. The company "Hugo Kern und Liebers" uses atmospheric plasma spraying for various coating processes such as the metallic coating of functional surfaces to optimize electrical conductivity. In order to gain further experience in the field of thermal spraying and to get a better overview, the processes of thermal spraying were compared in this project. Therefore, in addition to the information on atmospheric plasma spraying, the properties of other processes were collected through research. An Excel table of the process properties provides a good overview and helps with comparisons. The aim of this research work was the differentiation of the processes from each other, to identify advantages and disadvantages and to define areas of application. [1, 2]

I. EINLEITUNG

Thermische Beschichtungen verändern und optimieren Oberflächen hinsichtlich deren Schutz vor mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen. Über die wirtschaftliche Verlagerung diverser Oberflächeneigenschaften auf beliebige Grundwerkstoffe bieten die thermischen Beschichtungstechnologien innovative und kostengünstige Produktideen und Möglichkeiten. Die große Bandbreite der bekannten Verfahren des thermischen Spritzens ermöglicht die Erzeugung von Schichten aus Metallen, Keramiken, Verbundwerkstoffen und Kunststoffen. Wobei Kunststoffe eher bei Verfahren mit geringer thermisch Bauteilbelastung zum Einsatz kommen. Als Grundmaterialien sind artgleiche und artfremde Werkstoffe einsetzbar. Auch Naturstoffe wie beispielsweise Papier oder Holz können thermisch beschichtet werden. Die Vorzüge des thermischen Spritzens sind die hohe Flexibilität, der lokale Partikelauflauf und eine hohe Depositionsrate. Die Gliederung der Verfahren resultiert oft auf Basis der Energiequelle. Unterschieden werden hierbei Flammen, Hochgeschwindigkeitsgasströmungen, Lichtbögen und Plasmen.

Das thermische Spritzen umfasst gemäß DIN EN 657 Beschichtungsverfahren, bei denen Spritzzusätze inner- oder außerhalb von Spritzgeräten an-, auf- oder abgeschmolzen und auf vorbereitete, vorwiegend gestrahlte Substrate geschleudert werden. Hierbei werden die Oberflächen nicht aufgeschmolzen. Das Beschichten durch thermisches Spritzen ist laut DIN 8580 eine Untergruppe der Hauptgruppe 5 *Beschichten*. Für die Erzeugung einer Spritzschicht wird zusätzlich zur thermischen auch kinetische Energie benötigt, die in der Regel über Gasströmungen bereitgestellt werden. Die Partikel treffen auf das Substrat und haften zunächst vorrangig mechanisch auf der Oberfläche. Sie verzahnen, verhaken und verklammern mechanisch, sowie durch Adhäsionskräfte miteinander und haften teilweise durch metallurgische Wechselwirkungen wie Diffusion. Je höher die kinetische Energie der Partikel, desto dichter ist die Schicht. Außerdem resultiert daraus eine höhere Haftzugfestigkeit. [1, 3–5]

II. VERFAHRENSÜBERSICHT

Folgend sind die bedeutsamsten Verfahren des thermischen Spritzens für industrielle Anwendungen grob beschrieben. Das dient dazu, einen Überblick über die technischen Gegebenheiten und die Verfahrensabläufe zu bekommen. Alle weiteren Verfah-

rensbeschreibungen können in den Normen DIN EN 657 und DIN EN ISO 14917 nachgeschlagen werden. [2]

A. Drahtflammspritzen (WFS)

Beim Drahtflammspritzen wird der Ausgangswerkstoff in Form eines Massiv- oder Fülldrahts (4) mit Hilfe einer Drahtvorschubeinrichtung (5) konstant der Pistole zugeführt. Mit einer Brenngas-Sauerstoffflamme (2,3) wird die Drahtspitze (8) zum Schmelzen gebracht. Diese Schmelze wird zusätzlich mit einem Zerstäubungsgas (1) über einen Spritzstrahl (9) auf die vorbereitete Werkstoffoberfläche (7) geschleudert und erzeugt somit eine Spritzschicht (6). Varianten des Drahtflammspritzens sind das Stabflammspritzen (RFS), mit Fixlängen des Werkstoffstabs, und das Schnurflammspritzen (CFS), bei dem Schnüre der Pistole zugeführt werden.

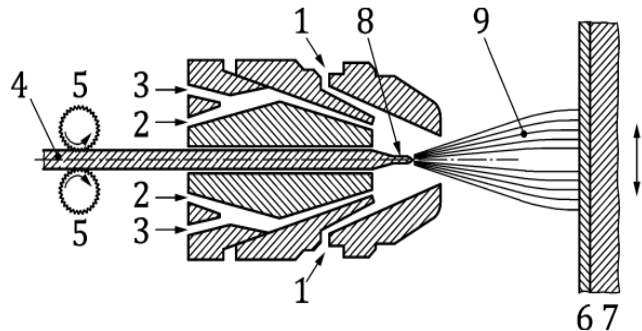


Abbildung 1: Prozess des Drahtflammspritzens [6]

Weitere spezielle Verfahren des Flammspritzens sind das Hochgeschwindigkeits-Drahtflammspritzen (HVWFS) und das Pulverflammspritzen (PFS). Außerdem das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas (HVOF oder HVAF) oder mit flüssigem Brennstoff und das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen (HVFSS), sowie das Detonations-spritzens (DGS). [6, 7]

B. Kaltgasspritzen (CGS)

Das Kaltgasspritzen ist ein Verfahren, bei dem das Prozessgas (1) mit Hilfe der De-Laval-Düse (2) auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt. Zur Beschleunigung werden Gasdrücke von bis zu 50 bar benötigt. Das Pulver (3) wird vor der Düse in den Gasstrahl (4) injiziert. Zum Schleudern des Pulvers auf die Substratoberfläche (6) wird hohe kinetische und niedrige thermische Energie genutzt. Beim Aufprall auf die Oberfläche breiten sich die Pulverpartikel aus und bilden eine dichte Schicht (5). Durch das Erhitzen des Gasstrahls wird die Strömungsgeschwindigkeit des Gases und die Partikelgeschwindigkeit erhöht. Das Erhitzen optimiert das Verformen der Partikel beim Aufprall. Diese Temperatur liegt allerdings weit unter der Schmelztemperatur des Pulvers. Bei diesem Verfahren können Nachteile wie Oxidation und andere Phasenumwandlungen vermieden werden. [6, 7]

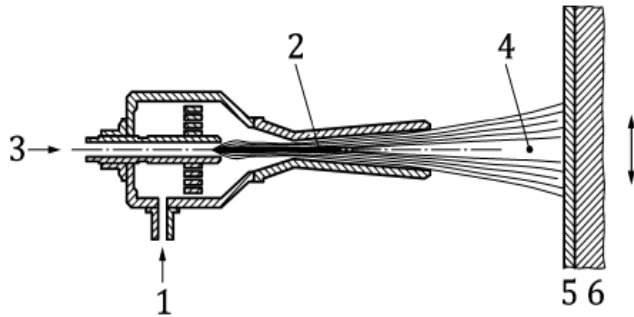


Abbildung 2: Prozess des Kaltgasspritzens [6]

C. Lichtbogenspritzen (AS)

Beim Lichtbogenspritzen brennt ein Lichtbogen, zwischen zwei drahtförmigen Spritzzusätzen, die Drahtspitze (8). Der Lichtbogen wird mit Hilfe von Spannung (2) über eine Kontaktrohre (3) erzeugt. Die Drähte (4) bestehen hierbei aus artgleicher oder -ungleicher Zusammensetzung oder geformt als Fülldraht und werden mit einer Drahtvorschubeinrichtung (5) zugeführt. Über einen oder mehrere Gasstrahlen (1), wird der geschmolzene Draht zerstäubt und durch einem Spritzstrahl (9) auf die vorbereitete Substratoberfläche (7) geschleudert. Der Prozess findet mit Stickstoff oder Stickstoffgemischen als Zerstäubungsgas in atmosphärischer Umgebung statt. Somit kann die Oxidation der Spritzschicht (6) verringert werden und ein bestimmter Sauerstoffgehalt des Beschichtungstoffes wird festgelegt. Bei dem Sonderverfahren Schutzgaslichtbogenspritzen (SAS) muss das Zerstäubungsgas komplett frei von Sauerstoff sein, um die zuvor genannten Effekte zu verstärken. Das kann erreicht werden, indem ein Inertgas als Umhüllung für den Lichtbogen und den Spritzstrahl verwendet wird. [6]

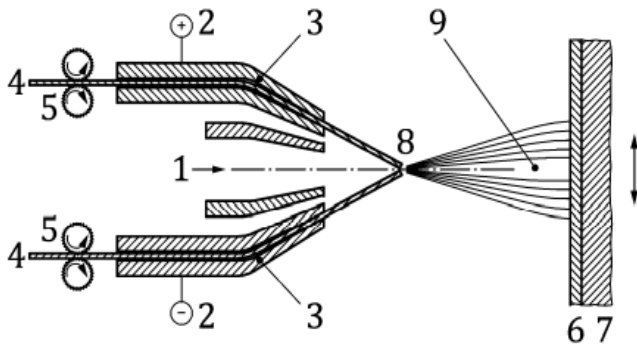


Abbildung 3: Prozess des Lichtbogenspritzens [6]

D. Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)

Das atmosphärische Plasmaspritzen funktioniert über das plastische Verformen oder das teilweise Aufschmelzen von Pulver (4) mit Hilfe eines Plasmastrahls (9). Das Pulver wird dem Plasmastrahl intern oder extern über ein Trägergas zugeführt und mit einem Spritzstrahl (10) auf das Substrat (8) geschleudert. Das Plasma wird mit einem isolierten (6) brennenden Lichtbogen mit Hilfe von Spannung (1) zwischen zwei Elektroden (3) und der Düse (5) erzeugt. Das Plasmagas (2) wird dabei teilweise oder vollständig ionisiert. Die hohe Geschwindigkeit des Plasmastrahls resultiert aus der thermischen Gasexpansion. Über einen Kühlwasserzugang (11) wird ein Überhitzen der Anlage verhindert. Als Gase werden Wasserstoff, Argon, Stickstoff oder Helium verwendet. Oft kommen auch Gemische dieser Gase zum Einsatz. In Sonderfällen des Verfahrens kann eine Gasumhüllung

des Plasmastrahls genutzt werden, um die Oxidierung und die Porosität der Spritzschicht (7) zu reduzieren.

Spezielle Verfahren des Plasmaspritzens sind das Plasmasuspensionsspritzen (APSS), das Schutzgas-Plasmaspritzen (SPS) und das Plasmaspritzen in Kammern (VPS oder HPPS). [6, 7]

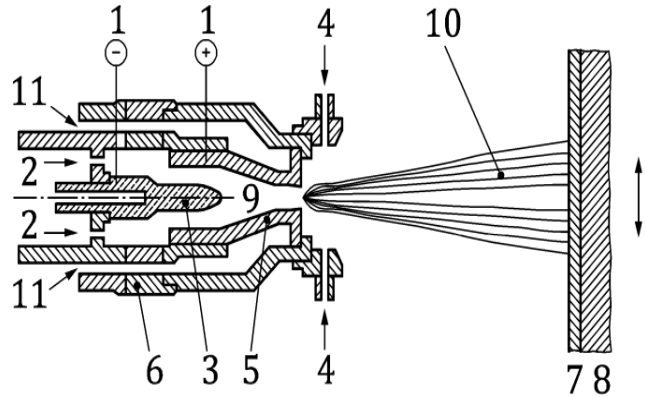


Abbildung 4: Prozess des Plasmaspritzens [6]

Verfahren wie das Schmelzbadspritzen (MBS), das wasserstabilisierte Plasmaspritzen (LSPS), das Induktionsplasmaspritzen (ICPS) und das Plasmadrahtspritzen mit übertragendem Lichtbogen (PTWA) sind in der Industrie nicht gebräuchlich und werden nur für Sonderanwendungen eingesetzt. Daher werden diese Verfahren in dieser Ausarbeitung nicht weiter berücksichtigt.

III. VERFAHRENSANALYSE

Die Verfahren des thermischen Spritzens werden folgend klassifiziert und miteinander verglichen. Hierfür wurden über eine Tabelle Eigenschaften und Kriterien der Verfahren gesammelt und in Bezug aufeinander bewertet. [2]

A. Klassifizierung

Um die Verfahren vergleichen und bewerten zu können, wurden alle Verfahren über eine Tabelle in deren verschiedenen Eigenschaftskriterien klassifiziert. Mit dieser Klassifizierung wird ein guter Überblick über die Verfahren gegeben. [2]

Zum einen sind die Verfahren selbst in die Hauptgruppen der Norm DIN EN ISO 14917 gegliedert. Diese Unterteilung umfasst das thermische Spritzen mit gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen, mittels Ausdehnung von Hochdruckgasen ohne Verbrennung, über Lichtbogen oder Gasentladung, sowie die Oberflächenbehandlung mit gebündeltem Lichtstrahl und elektrischem Lichtbogen oder Gasentladung. [7]

Zum anderen werden die Verfahren über eigens gewählte Kategorien differenziert. Neben den Eigenschaften der Verfahrensbeschreibung, der Peripherie und dem Einsatzgebiet, werden diverse Schichteigenschaften und Verfahrensparameter zur Klassifizierung herangezogen.

Die Kategorie der Schichteigenschaften beinhaltet den Ausgangsstoff der Schicht und die Schichtdicke bei verschiedenen Metallen, sowie Nicht-Metallen als Beschichtung. Des Weiteren werden die Porosität, die Haftzugfestigkeit und der Oxidgehalt der Schicht betrachtet.

Die Klasse der Verfahrensparameter enthält die Prozess- und Elektronentemperatur, die Spritzleistung und die Partikelgeschwindigkeit. Außerdem werden der Prozessaufwand, die Ver-

fahrenskosten und die Wichtigkeit des Prozesses für die Industrie relativ bewertet.

B. Verfahrensvergleich

Im folgenden Verfahrensvergleich werden die Verfahren auf Basis der zuvor beschriebenen Klassifizierung miteinander verglichen. Auf Grund der Breite des Themas, der vorherigen Identifizierung von ungeeigneten Verfahren und der Vorgabe in der Aufgabenbeschreibung der Firma „Hugo Kern und Liebers“ berücksichtigt der folgende Vergleich nur gewisse pulverbasierte thermische Fertigungsverfahren. Diese sind das Pulverflammspritzen, das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff und Brenngas-Luft, sowie mit flüssigen Brennstoffen. Außerdem das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen, das Detonationsspritzen, das Kaltgasspritzen und das atmosphärische, sowie das Schutzgas-Plasmaspritzen. Weiterhin das Plasmaspritzen in einer Kammer, und das atmosphärische Plasmasuspensionsspritzen. Zusätzlich wird auch die Oberflächenbehandlung mit einem Lichtstrahl und einem Lichtbogen oder Gasentladung berücksichtigt.

In der Kategorie der **Schichtdicke** ist das Pulverflammspritzen am geeignetsten für dünne Schichtdicken mit einer großen Materialvielfalt. Mit diesem Verfahren können Metalle auf Fe-Basis, NE-Metalle, selbstfließende Legierungen, Keramiken und Karbide gespritzt werden. Die Schichtdicken liegen dabei beispielsweise im Bereich von 0,05 mm bis 2 mm bei Metallen auf Fe-Basis und NE-Metalle oder 0,15 mm bis 0,8 mm bei Karbiden. Alle anderen Flammspritzverfahren der Klasse Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen erreichen ebenfalls diese Werte, jedoch können mit diesen Verfahren keine Keramiken verarbeitet werden. Die Schichtdicke des Kaltgasspritzens kennzeichnet den dicksten Schichtdickenbereich, welcher bei 0,05 mm beginnt, aber erst bei 100 mm endet. Diese Angabe ist beim Kaltgasspritzen materialunabhängig. Alle Plasmaspritzprozesse hingegen erreichen beispielsweise eine Schichtdicke von 0,4 mm bis 2,5 mm bei Metallen auf Fe-Basis und 0,15 mm bis 0,8 mm bei Karbiden. Allerdings können selbstfließende Legierungen mit Plasma ebenfalls nicht zur Beschichtung genutzt werden. Weiterhin können über das Laserspritzen nur relativ dicke Spritzschichten von 0,5 mm bis 4 mm für alle Materialien erreicht werden. [3, 8, 9]

Es werden hier, wie auch folgend oft Bereiche für die Angabe von Schichtdicken genutzt, da diese Werte von vielen Prozessparametern abhängen und ein spezifischer Wert nicht aussagekräftig wäre.

Die **Porosität** ist beim Kaltgasspritzen und dem Plasmaspritzen in einer Kammer mit unter 0,5 % am geringsten. Im Gegensatz hierzu kennzeichnen das atmosphärische Plasmasuspensionsspritzen und das Schutzgas-Plasmaspritzen mit einer Porosität von 1 % bis 20 % und das Pulverflammspritzen mit 5 % bis 15 % die höchsten Porositäten. Zwischen diesen Ober- und Untergrenzen liegen beispielsweise das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff oder Brenngas-Luft und das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen mit 0,5 % bis 2 %, oder auch das atmosphärische Plasmaspritzen mit einer Porosität von 2 % bis 5 %, sowie das Laserspritzen mit 1 %. [3, 10, 11]

Bei der **Haftzugfestigkeit** überzeugen alle Verfahren des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens mit einem Wert von bis zu 100 MPa. Kurz gefolgt hiervon sind die Plasmaspritzverfahren,

welche je nach Verfahren eine Haftzugfestigkeit von 20 MPa bis 70 MPa erreichen. Die Plasmaspritzen in einer Kammer und das atmosphärische Plasmaspritzen kommen hierbei am deutlichsten an den maximalen Wert von 70 MPa heran. Das Verfahren mit der geringsten Haftzugfestigkeit ist das herkömmliche Pulverflammspritzen mit 30 MPa. Dazwischen findet sich beispielsweise noch das Kaltgasspritzen, welches mit einer Haftzugfestigkeit von 20 MPa bis 60 MPa angeben ist und sich somit im ähnlichen Bereich wie die Plasmaspritzverfahren befindet. [3, 10]

Der **Oxidgehalt** der Schicht ist gerade bei kammergebundenen Verfahren mit dem Ausschluss von Sauerstoff äußerst gering. Dieser Vorteil ist vor allem beim Kaltgasspritzen und dem Plasmaspritzen in einer Kammer mit einem Oxidgehalt im ppm-Bereich (0,0001 %) zu sehen. Auch bei den restlichen Plasmaspritzprozessen ist der Oxidgehalt mit 2 % bis 3 % sehr gering. Der höchste Oxidgehalt und damit den größten Nachteil verzeichnet, wie auch schon bei der Haftzugfestigkeit, das Pulverflammspritzen mit einem Oxidgehalt von 10 % bis 15 %. Weitere relativ geringe Oxidgehalte von 1 % bis 5 % können mit dem Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff und Brenngas-Luft, sowie dem Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen erreicht werden. [3]

Die Klasse der **thermischen Bauteilbelastung** kennzeichnet die Prozesstemperatur und bei plasmabasierten Verfahren zusätzlich die Elektronentemperatur. Die Prozesstemperatur ist beim Pulverflammspritzen und den Verfahren des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens mit 3.000 °C am höchsten. Die niedrigste Temperatur hingegen besitzt der Prozess des Kaltgasspritzens mit 20 °C, was auch den Einsatz von temperaturempfindlichen Werkstoffen erlaubt. Alle plasmabasierten Verfahren haben je nach erzeugtem Plasma eine relativ geringe Prozesstemperatur zwischen 100 °C und 350 °C. [3, 10]

Die **Spritzleistung** ist beim Pulverflammspritzen mit 2 kg/h bis 30 kg/h relativ hoch, wobei auch das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff, Brenngas-Luft oder flüssigen Brennstoffen, sowie das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen mit 1 kg/h bis 20 kg/h in einem ähnlichen Bereich liegt. Verfahren wie das Kaltgasspritzen und das Plasmaspritzen in einer Kammer besitzen nur eine Spritzleistung von 3 kg/h bis 15 kg/h. Die niedrigste Spritzleistung von 3 kg/h bis 6 kg/h resultiert aus dem Flammshockspritzen (Detonationsspritzen). Dazwischen finden sich noch Prozesse wie das atmosphärische Plasmaspritzen mit 2 kg/h bis 20 kg/h und das Laserspritzen mit 8 kg/h. [1, 3, 9, 12]

Die Eigenschaft der **Partikelgeschwindigkeit** kennzeichnet das Verhalten des Pulvers während dem Prozess und ist beim Kaltgasspritzen, dem Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff, Brenngas-Luft oder flüssigen Brennstoffen und dem Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen mit über 1.000 m/s am höchsten. Hierdurch können besonders glatte, dichte und wenig poröse Schichten erstellt werden. Im Vergleich hierzu erreicht das Pulver beim Pulverflammspritzen lediglich eine Geschwindigkeit von 40 m/s. Zwischen diesen Extremwerten liegen jedoch noch Verfahren wie das Detonationsspritzen mit 800 m/s oder das das Plasmaspritzen in einer Kammer mit 300 m/s bis 600 m/s. Außerdem werden mit dem atmosphärischen Plasmaspritzen Partikelgeschwindigkeiten von 150 m/s bis 400 m/s erreicht, und beim atmosphärischen Plasmasuspensionsspritzen und dem Schutzgas-Plasmaspritzen werden die Partikel auf bis zu 450 m/s beschleunigt. [3, 10]

Die folgenden drei Kategorien der Verfahrenskosten, dem Prozessaufwand und der Bedeutsamkeit für die Industrie sind zum großen Teil nicht auf Basis von festen Werten wie beispielsweise Preisen bewertet. Die Kategorien wurden anhand der Prozesse bewertet, wie sie in der Literatur über die Verfahrensbeschreibungen und die Peripherie beschrieben wurden. Das folgende Ranking ist daher eine relative Beurteilung mit fünf Bewertungsstufen.

Die **Verfahrenskosten** sind beim Schutzgas-Plasmaspritzen und dem Plasmaspritzen in einer Kammer am höchsten bewertet. Das atmosphärische Plasmaspritzen, das atmosphärische Plasmasuspensionsspritzen, das Laserspritzen und die Plasma-Oberflächenbehandlung folgen als zweitbeste Verfahren. Darauf folgt das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff, Brenngas-Luft oder flüssigen Brennstoffen und das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen, sowie das Detonationsspritzen. Als relativ günstig hingegen ist das Kalgasspritzen bewertet. Das günstigste Verfahren ist in diesem Vergleich das Pulverflammspritzen. [3]

In der Klasse des **Prozessaufwands** ist das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit flüssigen Brennstoffen, das Detonationsspritzen und das Plasmaspritzen in einer Kammer am aufwändigsten bewertet. Darauf folgt das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff oder Brenngas-Luft, das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen, das Schutzgasplasmaspritzen und die Plasma-Oberflächenbehandlung. Weiter bilden das Kalgasspritzen, das atmosphärische Plasmaspritzen, das atmosphärische Plasmasuspensionsspritzen, sowie das Laserspritzen die Mitte der Beurteilung. Weniger aufwändig ist das Pulverflammspritzen.

Da die **Bedeutsamkeit für die Industrie** stark von Faktoren wie dem aktuellen Trend, dem Stand der Technik oder den Interessen des Kunden abhängt, ist es schwer hierzu eine allgemeingültige Aussage zu treffen. Folgend wurden die Verfahren dennoch anhand der Verfahrenseigenschaften, sowie den Vor- und Nachteilen in Bezug auf die Wichtigkeit bewertet.

Das aktuell wichtigste Verfahren für die Industrie ist das atmosphärische Plasmaspritzen. Weitere äußerst bedeutsame Verfahren sind das Pulverflammspritzen, das Kalgasspritzen, das Schutzgas-Plasmaspritzen, das Plasmaspritzen in einer Kammer, sowie das Laserspritzen und die Plasma-Oberflächenbehandlung. Hiervon gefolgt ist das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit Brenngas-Sauerstoff oder Brenngas-Luft, das Detonationsspritzen und das atmosphärische Plasmasuspensionsspritzen. Weniger bedeutsame Verfahren für die Industrie sind das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen mit flüssigen Brennstoffen und das Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen. Absolut ungebrauchliche und unbedeutsame Verfahren für die Industrie wurden zuvor im Abschnitt auf Seite 2 identifiziert und genannt.

Auf Basis der genannten Prozesseigenschaften können folgend die **Einsatzgebiete** für spezifische Verfahren abgeleitet werden.

Das **Pulverflammspritzen** ist auf Grund der einfachen Handhabung und den relativ schlechten Schichtresultaten eher für einfache Anwendungen wie Gartenmöbel, Rohrdurchführungen durch Mauern, Markierungen in Schwimmbecken und Trinkwassersertanks geeignet. Außerdem wird dieses Verfahren für das Beschichten von Buchsen, Rollen und Lagern, das Beschichten von

Recycling-Kunststoff-Bauteilen und für Ventilatoren und Rotoren von Extruderschnecken genutzt. [3]

Im Gegensatz hierzu wird das **Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen** mit Brenngas-Sauerstoff oder Brenngas-Luft und mit flüssigen Brennstoffen für hoch beanspruchte Bauteile mit korrosionsbeständigen und verschleißfesten Beschichtungen eingesetzt. Hierzu gehören Bauteile wie Hochdruckpumpen-Plunger, Walzen für Papiermaschinen oder Bügeleisengleitflächen. Die Verwendung dieser Verfahren für die genannten Anwendungen resultiert aus der geringen Porosität und der hohen Haftzugfestigkeit. [3]

Das Verfahren des **Flammschockspritzen** (Detonationsspritzen) wird ähnlich wie die Verfahren des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens eher für verschleiß- und korrosionsbelastete Bauteile wie Expansionsturbinen oder Pumpenplunger in Gasverdichtern eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete sind Nutzwalzen im Nassbereich von Papiermaschinen oder Turbinenläufer in Dampfturbinen. [3]

Außerdem ist der Korrosionsschutz der Elektronik im Automobilbau das Haupteinsatzgebiet des **Kalgasspritzens**. Das liegt vor allem an der guten Handhabbarkeit und dem geringen Oxidgehalt der Beschichtung. [3]

Die **Plasmaspritzprozesse** werden in der Industrie auf Grund ihres aufwändigen Prozesses und den guten Werten der Porosität, der Schichtdicke und der Haftzugfestigkeit hauptsächlich für hochwertige Beschichtungen verwendet. Beispiele hierfür sind Schichtsysteme im Pumpenbau oder dem Flugtriebwerksbau und Maschinenbauteile im Textilbereich. [3]

Um partiell lokale Stellen eines Bauteils zu beschichten wird oft das **Laserspritzen** verwendet. Das liegt an der guten Fokussierbarkeit des Lasers. Hierdurch wird das Verfahren oft für Biege-, Stanz-, oder Schneidwerkzeuge mit engen Toleranzen genutzt. [3]

IV. DISKUSION

Die Vorgehensweise der Datensammlung mit Hilfe einer Excel-Tabelle vereinfacht das Vorgehen in diesem Projekt und hat gute Ergebnisse geliefert. Da die Daten auf Basis einer Literaturrecherche gesammelt wurden, würden die Ergebnisse dieses Projekts keine Veränderung aufzeigen. Somit kann festgestellt werden, dass dieses Vorgehen ein gutes repräsentierbares Ergebnis liefert. Lediglich die Daten, welche nicht über die Literaturrecherche gefunden werden konnten, waren schwer in Bezug mit vorhandenen Daten zu bringen. Das könnte jedoch über eine Ausweitung des Projekts, mit beispielsweise einer Versuchsreihe, optimiert werden. [2]

V. FAZIT UND AUSBLICK

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Verfahren des thermischen Spritzens jeweils andere Vor- und Nachteile, sowie unterschiedliche Einsatzgebiete haben. Ebenso zeigt sich die differenzierende Funktionsweise der Verfahren. Somit ist festzuhalten, dass die Wahl des Verfahrens von vielen Faktoren abhängt, welche bei jedem Neueinsatz genau angeschaut werden sollten. Diese Verfahrensentscheidung wird durch die vorliegende Ausarbeitung erleichtert.

Es ist außerdem zu sehen, dass alle plasmabasierten Verfahren relativ gute Ergebnisse liefern und für die Industrie aktuell

sehr bedeutsam sind. Diese Verfahren sind im Vergleich zu anderen Verfahren allerdings etwas teurer und aufwändiger.

Da die Verfahren immer weiterentwickelt werden und auch immer wieder neue Verfahren des thermischen Spritzen auf den Markt kommen, ist eine regelmäßige Überprüfung des vorliegenden Vergleichs unerlässlich. Hierdurch ist gewährleistet, dass die Informationen dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Zusätzlich zur Datensammlung über Literaturrecherchen könnte man zukünftig auch Versuche anstellen, um fehlende Daten zu sammeln oder um bestehende Daten zu bestätigen oder zu korrigieren.

VI. DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während dieser Projekt- und Forschungsarbeit unterstützen und motiviert haben. Besonderer Dank gebührt Herr Stefan Gerbes, der diese Arbeit firmenseitig betreut und begutachtet hat. Ich bedanke mich außerdem bei Herr Prof. Dr. Volker Bucher, der diese Arbeit hochschulseitig betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Durchführung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bei Ihnen beiden bedanken.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

[1] H.-W. Zoch und G. Spur, Hg., *Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten*, 2. Aufl. München: Hanser, 2015. S.144-165

[2] Jan Schuster, „Verfahrensvergleich beim Thermischen Spritzen: Projekt- und Forschungsarbeit - Advanced Precision Engineering (APE) - MME“, Nov. 2022. Zugriff am: 28. Februar 2023.

[3] V. Schuler und J. Twrdek, *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*, 6. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>. S.272-290

[4] B. Awiszus, Hg., *Grundlagen der Fertigungstechnik: Mit 55 Tabellen*, 5. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2012. S.287-294

[5] *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren_- Begriffe, Einteilung*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Sep. 2003. S.12

[6] *DIN EN 657:2005-06; Thermisches Spritzen – Begriffe, Einteilung; Deutsche Fassung*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Jun. 2005. S.1-21

[7] *DIN EN ISO 14917:2017-08, Thermisches Spritzen_- Begriffe, Einteilung (ISO_14917:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_14917:2017*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Aug. 2017. S.1-32

[8] Praxair, *LOXPLATE® (Kaltgasspritzen)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.praxair-gmbh.de/kaltgasspritzen/> (Zugriff am: 12. Januar 2023).

[9] Höganäs, *Consistent results with laser cladding*. [Online]. Verfügbar unter:

https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/surface-coating/laser-cladding/?gclid=Cj0KCQiA4uCcBhDdARIsAH5jyUnNSfb5OW9uMwKaAVA88QsIYWPYDwWKPmS0TB-Td5Y3CgGkIyt9DpEaAIFiEALw_wcB (Zugriff am: 22. Februar 2023).

[10] T. Grünendick, „Thermisches Spritzen in der Luftfahrtindustrie“ (ger), *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal*, 1998. [Online]. Verfügbar unter: http://www.gbv.de/dms/clausthal/H_BIB/IMW/mitteilungen/23-1998/imw-23-08.pdf. S.39-46

[11] Chao Zeng, Wei Tian, Wen He Liao und Liang Hua, „Microstructure and porosity evaluation in laser-cladding deposited Ni-based coatings“, *Surface and Coatings Technology*, 2016, doi:10.1016/j.surfcoat.2016.03.083. S. 122–130

[12] Baumann Plasma Flame Technic AG, *Detonationsspritzen: Konzentriert Pulverpartikel erhitzen und beschleunigen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baumann-plasma.ch/spritzverfahren/detonationsspritzen/> (Zugriff am: 12. Januar 2023).