

9 Plasmaspritzen

E. LUGSCHEIDER, M. KNEPPER

9.1 Vorbemerkungen

Seitdem es im Jahre 1939 zum ersten Male gelang, mit einem Lichtbogenplasma als Wärmequelle Beschichtungen zu erzeugen [9–1], hat sich die Plasmaspritztechnik ein enormes Anwendungspotential erschlossen [9–45]. Einer der Hauptgründe hierfür liegt in der universellen Einsetzbarkeit dieses Verfahrens, das hinsichtlich der verwendeten Grundwerkstoffe und Beschichtungsmaterialien fast beliebige Kombinationsmöglichkeiten erlaubt.

Alle zur Zeit eingesetzten Verfahrensvarianten des Plasmaspritzens (Kap. 9–3) bieten die Möglichkeit, die prozeßrelevanten Parameter mit Rechnern zu steuern und zu regeln und so einen hohen Automatisierungsgrad bei der Fertigung beschichteter Bauteile zu erreichen.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Plasmatechnologie und -technik zu einem universellen Beschichtungsverfahren, das in nahezu allen Industriebereichen eingesetzt wird (Bild 9–1), erlaubt es heute, die unterschiedlichsten Werkstoffe zu verarbeiten, deren Bandbreite von den niedrigschmelzenden Kunststoffen bis hin zu höchstschmelzenden Keramiken reicht, [9–46].

Plasmaspritztechnisch gefertigte Oberflächenschichten dieser Werkstoffe findet man heute in den Bereichen Oxidations-, Verschleiß- und Heißgaskorrosionsschutz und thermische und elektrische Isolation, aber auch bei verschiedenen Sonderanwendungen.

Mit dem Plasmaspritzen werden dünne bis mitteldicke Schichten mit Stärken ab etwa 50 µm realisiert. Die obere Grenze für die Schichtdicke ist stark werkstoff- und verfahrensabhängig, Schichten bis zu 2 mm Stärke z. B. für thermische Isolationsanwendungen sind möglich, stellen aber eine Ausnahme dar.

Das Plasmaspritzen gehört zur Familie der Thermischen Spritzverfahren, zu der auch die artverwandten Verfahren Flamm- und Lichtbogenspritzen gehören, wie Bild 9–2 zeigt.

Allen diesen Verfahren ist gemein, daß der Schichtwerkstoff entweder in Draht- oder meist in Pulverform durch die Wärmeenergie und Temperatur der Energiequelle des entsprechenden Verfahrens in den flüssigen Zustand überführt wird und dann auf das zu beschichtende Bauteil aufgebracht wird.

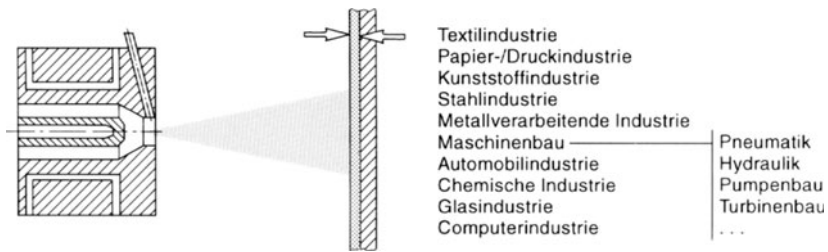


Bild 9–1. Die universellen Anwendungsmöglichkeiten der Plasmaspritztechnologie finden Anwendung in verschiedenen Industrien.

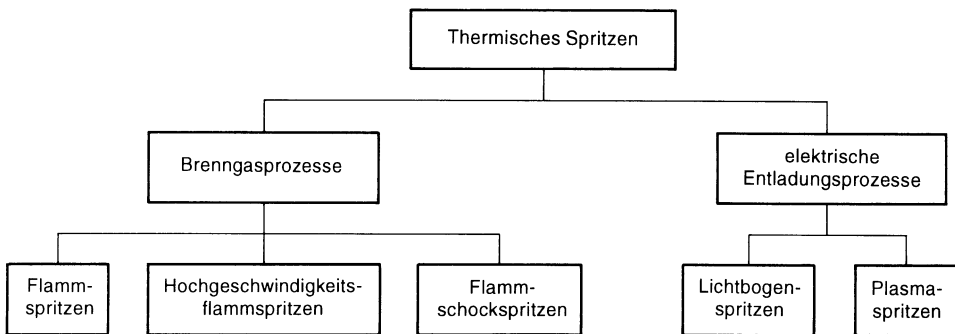


Bild 9–2. Prozessvarianten des Thermischen Spritzens.

9.2 Funktionsprinzip des Plasmaspritzens

Beim Plasmaspritzen wird ein pulverförmiger Schichtwerkstoff mit Hilfe einer Plasmaflamme vom festen in den flüssigen Zustand überführt und anschließend auf die im allgemeinen nicht erwärmte Substratoberfläche aufgetragen. Das Prinzip des Plasmaspritzens ist in Bild 9–3 dargestellt.

Als Energiequelle dient ein Lichtbogen, der mit Hilfe eines Hochspannungs- bzw. Hochfrequenzfunken gezündet wird. Der Lichtbogen brennt zwischen den intensiv wassergekühlten Elektroden, einer fingerförmigen Wolframkatode und einer zu einer Düse ausgebildeten Kupferanode. In diese Düse wird das Plasmagas eingeleitet, das aus Argon oder aus Gemischen von Argon, Helium, Stickstoff und Wasserstoff besteht. Durch den Zusammenstoß der von der Katode emittierten und durch ein Potential beschleunigten Elektronen mit den Gasatomen bzw. -molekülen dissoziiert und ionisiert das Gas, während es den elektrischen Lichtbogen durchströmt; es wird elektrisch leitend und damit in den Plasmazustand überführt.

Bei der Einströmung der Plasmagase koaxial zur Katode wird die Gasströmung über eine entsprechende Gasdüsenform verdrallt, so daß zusammen mit dem durch elektromagnetische Effekte umlaufenden Lichtbogenfußpunkt eine zu hohe lokale thermische Belastung von Katode und Anode vermieden wird. Der elektrische Lichtbogen ist durch thermische Effekte (thermal pinch) und durch sein eigenes Magnetfeld (magnetic pinch) im Querschnitt eingeschnürt.

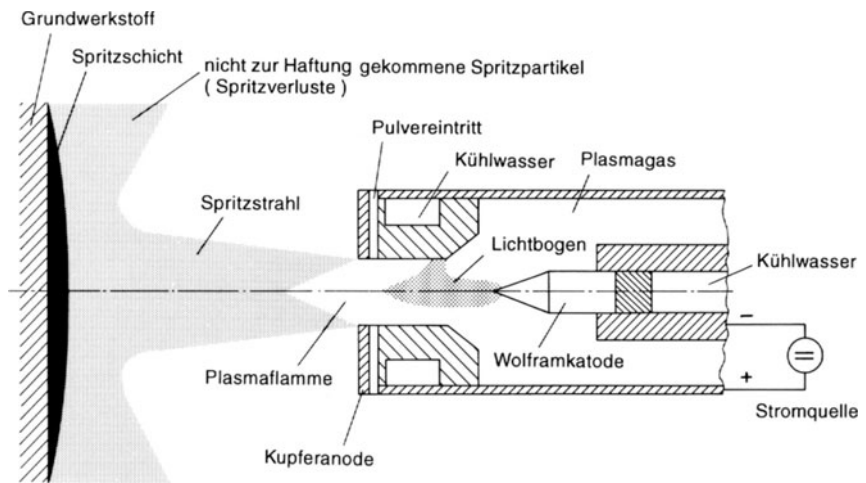


Bild 9–3. Prinzip des Plasmaspritzens.

An der Düsenmündung, nach Verlassen des Lichtbogens, erfolgt die Rekombination der Atome und Moleküle des Plasmagases, durch die freiwerdende Rekombinationswärme werden im Kern des Plasmas Temperaturen bis zu 20000 K erreicht. Der Energieinhalt und die Temperatur des Plasmas hängen von dem verwendeten Plasmagas oder Gasgemisch ab. Die Enthalpie der einatomigen Gase Argon und Helium ist dabei wesentlich niedriger als diejenige der zweiatomigen Gase Wasserstoff und Stickstoff. Andererseits ist die Temperatur im Plasma wesentlich höher als bei Wasserstoff und Stickstoff [9–2].

Mit Hilfe des Trägergasstromes wird der pulverförmige Schichtwerkstoff in den energie-reichen Plasmastrahl eingeblasen. Nach erfolgter Injektion werden die Pulverpartikel in den flüssigen Zustand überführt und beschleunigt. Die axiale Geschwindigkeitskomponente der Pulverpartikel wird dabei durch die Durchflußmenge des Plasmagases und durch die enorme Volumenausdehnung bei der Überführung des Gases in den Plasma-zustand realisiert, so daß die Partikelgeschwindigkeit nach der Beschleunigungsphase je nach Gaszusammensetzung und Verfahrensvariante in einem Bereich zwischen 300 und 700 m/s liegt. Die hohe Partikelgeschwindigkeit hat zur Folge, daß die Flugphase der Pulverpartikel bis zum Aufprall auf die Substratoberfläche nur wenige ms dauert.

Der Plasmastrahl mit dem transportierten Spritzpulverzusatz wird nun über die Oberfläche des zu beschichtenden Bauteils geführt, wobei die Schichtdicke durch die zugeführte Menge Pulver pro Zeiteinheit, die Verfahrensgeschwindigkeit des Brenners sowie durch die Zahl der Übergänge über die zu beschichtende Fläche bestimmt wird.

Aufgrund des Bauraumes, den ein Plasmabrenner beansprucht, sind Beschichtungen nur auf frei zugänglichen Flächen sowie auf rotationssymmetrischen Bauteilen möglich. Eine Innenbeschichtung von Rohren beim atmosphärischen Plasmaspritzen ist ab einem Innendurchmesser von 30 mm möglich, wobei jedoch die Beschichtungstiefe aufgrund der Brennerkonstruktion beschränkt ist. Eine Beschichtung von Hinterschnidungen ist prinzipiell nicht möglich.

Ein weiterer Vorteil des Plasmaspritzverfahrens ist durch die zeitgleiche Verarbeitung von mehr als nur einem pulverförmigen Werkstoff zu einer Schicht gegeben. Dies wird reali-

Haftungsmechanismus:
mechanische
Verklammerung

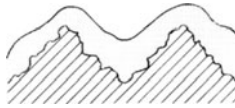


Bild 9–4. Mechanische Verklammerung.

siert, indem die verschiedenen Werkstoffe über getrennte Injektionsorte dem Plasma zugeführt werden. Dabei ist es auch möglich, durch die geeignete Wahl der einzelnen Injektionsorte die verschiedenen physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe zu berücksichtigen und so einer möglichen Entmischung durch unterschiedliche Flugbahnen der verschiedenen Pulverpartikel entgegenzuwirken [9–3]. Somit ist ein örtlich und zeitlich gleiches Auftreffen der Pulverpartikel gewährleistet. Mit Hilfe einer geeigneten Prozesssteuerung lassen sich durch sich ändernde Anteile der einzelnen Werkstoffkomponenten auch gradierte Schichtstrukturen herstellen, wodurch kritische Eigenschaftsänderungen, wie zum Beispiel unterschiedliche Härtewerte oder Ausdehnungskoeffizienten von Grund- und Schichtwerkstoff, nicht sprunghaft, sondern gleichmäßig erfolgen.

Eine wichtige Voraussetzung zur Erzielung einer ausreichenden Haftung der Plasmaspritzschichten auf dem Grundwerkstoff ist eine Oberflächenvorbereitung z. B. durch Strahlen mit Korund. Die so aktivierte Oberfläche ist gekennzeichnet durch eine hohe Oberflächenenergie und eine große Anzahl von Gitterfehlstellen wie Versetzungen, Mikrohohlräumen, Grenzflächen oder Gitterdeformationen. Auf diese Oberfläche treffen die aufgeschmolzenen Pulverpartikel auf, die aufgrund ihrer hohen kinetischen Energie und der Kapillarwirkung in Unebenheiten und Hinterschneidungen eindringen. Dort erstarren sie sehr schnell, was zu einer mechanischen Verklammerung als wesentlichen Haftungsmechanismus führt, die noch durch Schrumpfspannungen an vom Spritzgut umschlossenen Rauheitsspitzen verstärkt wird (Bild 9–4) [9–4, 9–5].

Das Verhalten der Pulverpartikel beim Aufprall auf das Substrat ist abhängig von der Geschwindigkeit und der Viskosität der aufgeschmolzenen Pulverteilchen. Nur ein vollständig aufgeschmolzenes Partikel kann sich flach ausdehnen und an die Oberflächenstrukturen anpassen. Durch Überlagerung der Teilchen bildet sich eine dichte Schicht aus, Bild 9–5. Durch nicht völlig aufgeschmolzene Partikel kann es zu einer Aufbauporosität kommen, wenn diese Partikel in die Schicht eingelagert werden. Daneben bleibt ein Teil der unaufgeschmolzenen Partikel nicht auf der Substratoberfläche haften, sondern prallt

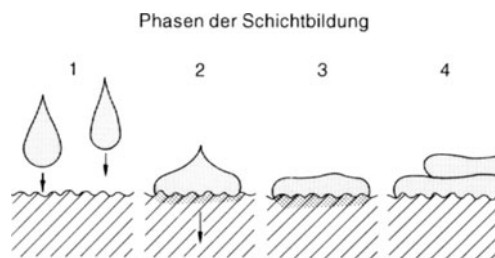


Bild 9–5. Entstehung der Plasmaspritzschicht.

1 Flug der flüssigen Pulverpartikel, 2 Aufprall auf der Substratoberfläche, 3 Wärmetransfer auf das Substratmaterial, 4 Erstarrung und Schrumpfung des Schichtwerkstoffes.

wieder ab, wodurch sich die Pulverausbeute, bzw. der Auftragwirkungsgrad verschlechtert [9–6].

Bei der Beschichtung metallischer Grundwerkstoffe mit metallischen Schichtwerkstoffen kommt es auch zu metallurgischen Wechselwirkungen zwischen Spritzpartikeln und Grundwerkstoff.

Dabei sind vor allem Diffusionsvorgänge zu nennen, die an die Zufuhr thermischer Energie sowie eine große Fehlstellendichte der aktivierten Substratoberfläche gebunden sind. Diffusionsvorgänge treten sowohl beim Spritzprozeß selber als auch bei auf den Spritzprozeß ggf. folgenden Einschmelzprozessen auf. Nach Überschreiten der Aktivierungsenergie der Atome ist es möglich, daß diese ihre Gitterplätze verlassen und Wege zurücklegen, die größer als ihr Atomabstand im Gitter sind. Dabei können Atome, ohne sich im schmelzflüssigen Zustand zu befinden, vom Schicht- in den Grundwerkstoff eindringen oder umgekehrt. Die Diffusion ist aufgrund des Materialtransportes, der damit verbundenen Stoffvermischung und der Erhöhung der Bindungsenergien ein wichtiger Haftungsmechanismus thermischer Spritzschichten.

Bei sehr hohen Pulverpartikelgeschwindigkeiten kommt es innerhalb einer Spritzschicht auch zu partiellen Verschweißungen der Spritzpartikel untereinander, aber auch im Übergangsbereich zwischen Schicht- und Grundwerkstoff kann es zu Mikroverschweißungen kommen.

Generell von untergeordneter Bedeutung für die Haftung der Spritzschichten sind die Mechanismen Adhäsion, Epitaxie und Reaktion. Diese Mechanismen spielen nur in Sonderfällen eine Rolle.

Das Plasmaspritzen zeichnet sich durch eine große Anzahl von Einflußgrößen aus, deren Wechselwirkungen untereinander in Bild 9–6 dargestellt sind. Bei einer Optimierung der Plasmaspritzparameter zum Erzielen einer funktionellen Schicht sind alle diese Größen zu berücksichtigen und aufeinander abzustimmen.

Eine erfolgreiche Optimierung der zahlreichen Parameter kann mit Hilfe der Faktorenanalyse der mathematischen Statistik durchgeführt werden [9–8 bis 9–10]. Die Vorteile dieser Methode bestehen nicht nur in der Feststellung des Einflusses von Versuchsparametern auf die Änderungstendenz der Zielgröße, sondern sie beschreiben auch die Wechselwirkungen verschiedener Parameter untereinander und minimierten somit die Anzahl der notwendigen Optimierungsversuche. Ein anderer Weg zur Optimierung der Beschichtungsparameter hinsichtlich des Aufschmelzverhaltens der Pulverpartikel ist der Wipe-Test. Mit Hilfe dieses Tests, bei dem der Plasmastrahl mit dem transportierten Spritzpulverpartikel das Substrat wie ein Scheibenwischer nur einmal kurz streift, wird die Verteilung der Pulverpartikel im Plasmastrahl bildlich festgehalten und so ihr Aufschmelzgrad im Rasterelektronenmikroskop ermittelt. Dabei zeigt sich, wie stark die Qualität einer Spritzschicht vom Aufschmelzgrad des Spritzpulvers beeinflusst wird [9–11].

Entscheidenden Einfluß auf die Wechselwirkung zwischen Plasma und Pulverpartikel und damit auf die Qualität der Spritzschicht haben neben anlagenbedingten Parametern Partikelgröße, Korngrößenverteilung und Morphologie des Spritzpulvers [9–12]. Um eine homogene Aufschmelzung der Pulverpartikel im Plasmastrahl zu realisieren, werden Plasmaspritzpulver werkstoff- und verfahrensbedingt in Korngrößenklassen unterteilt. Übliche Einteilungen sind dabei die Klassen $-90 + 45 \mu\text{m}$, $-45 + 22,5 \mu\text{m}$, $-45 + 5,6 \mu\text{m}$

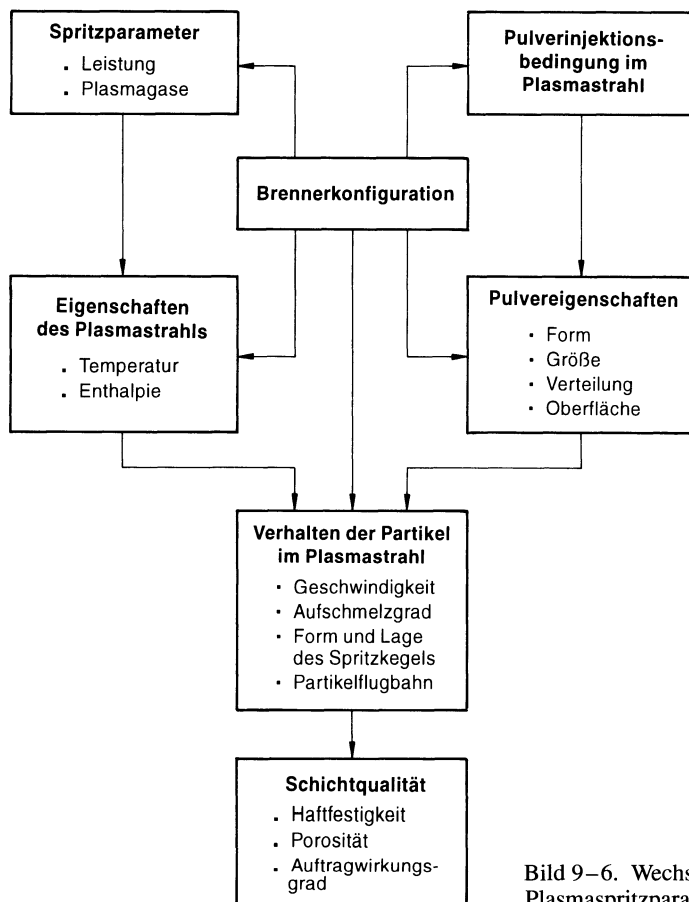


Bild 9–6. Wechselwirkungen der wichtigsten Plasmaspritzparameter.

oder $-22,5 + 5,6 \mu\text{m}$. Die Klassifizierung von Pulvern, die sich im Bereich unterhalb $45 \mu\text{m}$ bewegen, gestaltet sich aufwendig, denn für eine sichere Analyse mit Hilfe von Röntgen- und Lasermethoden spielt auch die Kornform eine wichtige Rolle [9–7]. Die weitentwickelte Pulvertechnologie mit ihren verschiedenen Pulverherstellungsmethoden bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Herstellung von Pulvern zum Plasmaspritzen. Abhängig von dem angewandten Verfahren ist dabei die Charakteristik der Pulver stark unterschiedlich. Auch ist die Kombination von stark unterschiedlichen Werkstoffen zu Verbundpulvern möglich. Neben Korngröße, Korngrößenspektrum und Kornform charakterisieren auch chemische Zusammensetzung, Gasgehalt sowie Verunreinigungen ein Pulver [9–12]. Die verschiedenen Herstellungsmethoden zur Gewinnung der Ausgangspulver werden ergänzt durch zahlreiche Methoden zur Pulvermodifikation und -veredelung. Zu diesen neuen Verfahren zur Pulvermodifikation gehören das Mikropellitisieren, das Umhüllen sowie die Plasmaveredelung.

Beim Mikropellitisieren können Metalle, Keramiken, Kunststoffe, metallische und nicht-metallische Hartstoffe mit sich selbst oder untereinander bei relativ geringen Temperaturen in beliebiger Verteilung kombiniert werden. Neben der Einstellung einer definierten

chemischen Zusammensetzung kann das Pulver auch hinsichtlich seiner mechanischen Förderfähigkeit, der Fließfähigkeit beeinflusst werden. In Abhängigkeit von der Dichte der Werkstoffe werden dabei Korngrößen von ca. 5 µm bis 200 µm erreicht.

Ein weiteres Verfahren zur Verbundpulverherstellung ist das Sherit-Gordon-Verfahren, mit dessen Hilfe sich umhüllte Pulver erzielen lassen. Das Verfahren beruht auf der Reduktion von Metallsalzlösungen unter Druck und Temperatur. Das reduzierte Metall bildet im Verlauf der Reduktion entweder selber Pulverpartikel oder es umhüllt Partikel, die der Lösung zuvor zugegeben worden sind, mit einer dichten, gleichmäßigen und fest anhaftenden Schicht. Dabei können als Ausgangswerkstoffe Metalle, Legierungen, Keramiken, Hartstoffe oder Kunststoffe umhüllt werden. Umhüllungswerkstoffe können z. B. Ni, Co, Cu oder Edelmetalle sein.

Das Plasmaveredeln eines Werkstoffes wird realisiert, indem ein bereits mikropelletisierter Werkstoff in Pulverform der thermischen Energie des Plasmas ausgesetzt wird. Dabei kann die Plasmanachbehandlung unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (Atmosphäre, Inertgas, Vakuum, Unterwasser) durchgeführt werden.

Durch gezielte Parametervariation läßt sich die Energieübertragung von Plasma auf die Mikropellets, die Verweilzeit im Plasma sowie die Abkühlgeschwindigkeit steuern. So können auch Werkstoffe mit hohen Schmelztemperaturen kombiniert werden. Für Plasmaspritzpulver, die auf diese Weise hergestellt werden, ergibt sich somit unter Einbeziehung des Herstellverfahrens und dem Beschichtungsprozeß eine Verdoppelung der Verweilzeit im Plasma gegenüber konventionell hergestellten Pulvern. Dadurch lassen sich in der Spritzschicht stabilere Gefüge realisieren und ebenso können unerwünschte Fremdphasen, die sich bei schmelzmetallurgischer Herstellung einstellen würden, durch die hohen Abkühlgeschwindigkeiten unterdrücken. Bei der Plasmaveredelung kommt es neben der Verdichtung der Mikropellets zu einer Sphärodisierung der Pulver, was eine hervorragende Förder- und Fließfähigkeit der Pulver zur Folge hat [9–13].

Aufgrund der bereits beschriebenen Wechselwirkungen der Plasmaspritzparameter, aber auch aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der Spritzwerkstoffe müssen die Beschichtungsparameter für jeden Werkstoff und jedes Pulver angepaßt werden. Auch die Funktion der herzustellenden Schicht ist schon in die Parameterauswahl mit einzubeziehen. So ist bei einer Wärmedämm- oder einer Einlaufschicht eine gewisse Porosität erwünscht, während eine heißgaskorrosionsbeständige oder elektrisch isolierende Schicht nahezu porenfrei sein muß.

Plasmaspritzschichten zeichnen sich prozeßbedingt durch eine charakteristische lagenförmige Struktur aus. Nachdem die einzelnen Pulverpartikel im aufgeschmolzenen Zustand während des Fluges eine kugelige Form annehmen, entsteht durch den hochenergetischen Aufprall der Teilchen auf dem Bauteil ein lamellarer, feinkristalliner Schichtaufbau. Dieser ist in erster Linie beeinflusst durch die Energie der Spritzteilchen und die Viskosität der aufgeschmolzenen Partikel. Mit abnehmender Viskosität gestaltet sich der lamellare Aufbau der Schichten günstiger, wobei sich die Lamellen senkrecht zum Temperaturgradienten der Oberfläche aufbauen. Dieser lamellare Aufbau ist für Plasmaspritzschichten charakteristisch und kann nur durch besondere thermische Nachbehandlungsverfahren in eine kompakte kristalline Struktur überführt werden [9–14]. Plasmaspritzschichten weisen aber auch fast immer eine gewisse Restporosität auf, die abhängig von der jeweiligen Verfahrensvariante und der Bauteilgeometrie ist. Beim atmosphärischen Plasmaspritzen liegt die Porosität im allgemeinen zwischen einem und fünf

Prozent, beim Vakuumplasmaspritzen unter einem Prozent. Bei den Poren handelt es sich um geschlossene Poren, weshalb ab einer bestimmten Schichtdicke sichergestellt ist, daß die Schichten dicht sind. Die Porositätsmessung erfolgt heute computergestützt [9–15 bis 9–17].

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Qualität einer Plasmaspritzschicht ist mechanische Schichtstabilität oder Schichthaftung. Neben den Beschichtungsparametern ist dabei vor allem die Schichtdicke von Bedeutung. In der Regel nimmt die Kohäsion und Adhäsion einer Spritzschicht mit zunehmender Schichtdicke ab, da die Eigenspannungen zunehmen. Die Schichtdicke plasmagespritzter Schichten liegt im allgemeinen zwischen 50 µm und 500 µm [9–7], in Sonderfällen können diese auch geringer sein, bei einigen Werkstoffen können aber auch Schichtdicken im Millimeterbereich realisiert werden.

Im plasmagespritzten („as sprayed“) Zustand ist die Oberfläche rau und direkt abhängig von der Oberflächengüte des Grundwerkstoffes und der Pulverkorngröße. Die Rauheit R_z liegt im nicht nachbehandelten Zustand zwischen 5 µm und 30 µm. Daher ist für viele Anwendungsfälle, um spritzbedingte Oberflächenrauheiten zu beseitigen, eine mechanische Nachbearbeitung der Schichten durch Schleifen und Polieren notwendig. Bei einer entsprechend geringen Porosität einer Spritzschicht sind dabei Oberflächengüten erzielbar, deren Qualität mit derjenigen von geschliffenen und polierten Vollmaterialien vergleichbar ist, es lassen sich R_z -Werte von bis zu 0,1 µm realisieren. Die Nachbehandlungsmethoden Schleifen und Polieren werden somit als Endfertigungsverfahren für Plasmaspritzschichten eingesetzt.

Thermische Nachbehandlungen werden sowohl im Bereich oberhalb als auch unterhalb der Schmelztemperatur des entsprechenden Schichtwerkstoffes durchgeführt. Abhängig von dem Werkstoff und der Temperatur wird dabei die lamellare Struktur der Spritzschicht in eine feinkörnige umgewandelt. Der Nachbehandlungsprozeß kann dabei auch in einer inerten Atmosphäre oder im Vakuum stattfinden.

Für niedrigschmelzende selbstfließende Legierungen wird im allgemeinen das Einschmelzen als thermisches Nachbehandlungsverfahren eingesetzt. Voraussetzung für dieses Verfahren ist allerdings, daß der Schmelzpunkt der Schicht niedriger ist als der des Grundwerkstoffes.

Das heißisostatische Pressen (HIP) wird ebenfalls für die Nachbehandlung von Plasmaspritzschichten eingesetzt. Dadurch lassen sich dichtere Schichten mit einer höheren Haftfestigkeit zwischen Substrat und Schichtwerkstoff erzeugen. Bei metallischen Werkstoffen kann es dabei zur Ausbildung einer Diffusionszone zwischen Schicht und Substrat kommen. Das Verfahren wird auch bei der Reparatur beschädigter Turbinenschaufeln verwendet. Zunächst wird das Material auf die beschädigten Flächen aufgebracht, und anschließend werden diese Bauteile heißisostatisch gepreßt, um den Werkstoffverbund zu festigen und die gleiche Struktur in dem Reparaturbereich und dem übrigen Werkstück zu erzielen [9–18].

Eine weitere Methode der Nachbehandlung thermischer Spritzschichten ist das Lasereinschmelzen, das sich zu einer eigenständigen Technologie entwickelt hat [9–19]. Abhängig von der Leistung des Lasers können unterschiedliche Eindringtiefen, Abkühlraten und verschiedene Gefügestrukturen erreicht werden. Bei dem Einsatz des Verfahrens unterhalb der Schmelztemperatur kann eine Umwandlung der Korngrößen sowie eine Neuorientierung der Körner erfolgen. Bei einer Nachbehandlung oberhalb der Schmelz-

temperatur kann neben der Verglasung, also Amorphisierung der Schicht auch, je nach Prozeßführung, eine kristalline Umwandlung mit oder ohne Aufschmelzen des Grundwerkstoffs erfolgen [9–20, 9–21].

Als Substratwerkstoffe werden metallische und nichtmetallische Werkstoffe eingesetzt. Außer der großen Anzahl von Stählen und Legierungen sind natürlich auch keramische Werkstoffe beschichtbar. So sind z. B. Borcarbidspritzschicht auf Aluminiumoxidsubstraten herstellbar [9–22]. Ebenso sind Beschichtungen auf CFK-Bauteilen möglich. Ein erfolgreicher Einsatz von CFK-Bauteilen ist oft nur in Verbindung mit einer funktionellen Oberfläche möglich, die auch mit Hilfe des Plasmaspritzverfahrens realisiert werden kann [9–23].

Das Schichtwerkstoffspektrum, das in der Plasmaspritztechnologie Anwendung findet, ist fast unbegrenzt. Einschränkungen hinsichtlich des Einsatzes bestehen nur bei solchen Werkstoffen, die nicht kongruent schmelzen. In beschränktem Umfang können solche Werkstoffe aber trotzdem verarbeitet werden, indem man sie entweder umhüllt oder aber durch Beschichtungsparameteranpassung nur thermisch duktilisiert und durch die hohe kinetische Energie der Teilchen beim Aufprall eine Anformung an die Oberflächenstrukturen erreicht.

Einen Überblick über die in der Thermischen Spritztechnologie eingesetzten Schichtwerkstoffgruppen gibt Bild 9–7.

Hartlegierungen auf Eisen-, Cobalt- oder Nickelbasis werden zum Verschleiß- und Korrosionsschutz auch durch Plasmaspritzen verarbeitet. Durch Zusatz von artfremden Hartphasen, meist Wolframcarbid und Chromcarbid, entstehen sogenannte Pseudolegierungen mit verbesserten Verschleißigenschaften [9–25]. Durch Kombination metallischer Hartstoffe mit einem metallischen Binder entstehen sogenannte Hartmetalle. Das bekannteste Hartmetallsystem ist das System Wolframcarbid-Cobalt (WC-Co), das hauptsächlich zum Verschleißschutz eingesetzt wird [9–7]. Ein weiteres Hartmetallsystem, auch für tribologische Beanspruchung bei höheren Temperaturen, ist das System Chromcarbid (Cr_3C_2)-Nickel/Chrom. Hochschmelzende und sauerstoffempfindliche Refraktärmetalle wie z. B. Tantal, Niob und Titan können durch Nutzung der Verfahrensvorteile des Vakuumplasmaspritzens zu sehr dichten, oxidarmen und damit phasenreinen Schichten verspritzt werden. Mit dem atmosphärischen Plasmaspritzverfahren werden insbesondere große Mengen an hochlegierten Stählen zum Verschleiß- und Korrosionsschutz spritztechnisch verarbeitet. Zum Schutz gegen Heißgaskorrosion, der z. B. in Gasturbinen erforderlich ist, werden sogenannte MCrAlY-Legierungen (M = Ni, Co, oder Fe) plasmagespritzt. Die Schutzwirkung solcher Schichten beruht auf der Bildung von dünnen Oxidschichten während des Betriebes. Durch diese hauptsächlich aus Chrom- und Aluminiumoxid bestehenden sehr dichten Oberflächenschichten wird der darunterliegende Schichtwerkstoff sowie der Grundwerkstoff gegen weitere Korrosion geschützt [9–18].

Die Verfahrensvorteile des hochenergetischen Plasmaspritzens kommen natürlich besonders bei den hochschmelzenden Keramiken zum Tragen. Eine Vielzahl von Oxidkeramiken wie z. B. Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, Cr_2O_3 oder stabilisierte ZrO_2 -Qualitäten werden zur Realisierung vielfältiger Schichtfunktionen im Verschleiß- und Korrosionsschutz, der Wärmedämmung sowie der elektrischen Isolation durch Plasmaspritzen an der Atmosphäre verarbeitet. Ebenfalls zu den keramischen Werkstoffen gehören die neuen Hochtemperatursupraleiter. Als Ergebnis umfangreicher Untersuchungen hinsichtlich der

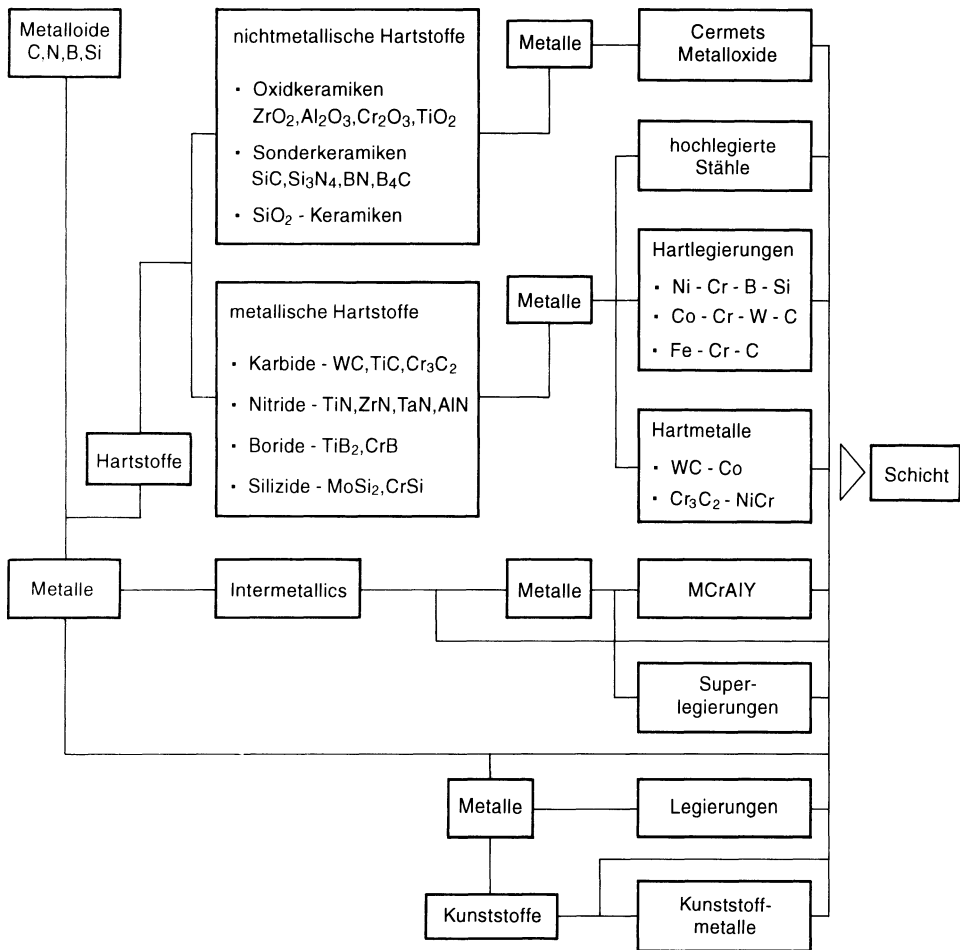


Bild 9-7. Übersicht über die Schichtwerkstoffe, die beim Plasmaspritzen eingesetzt werden können [9-24].

Werkstoff- und Prozeßoptimierung konnten supraleitende Schichten der Systeme Y-Ba-Cu-O und Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O mit Sprungtemperaturen oberhalb der Temperatur des flüssigen Stickstoffs realisiert werden [9-26]. Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich mit der plasmaspritztechnischen Verarbeitung von Sonderkeramiken, wie AlN, B₄C, BN, SiC und Si₃N₄ mit interessanten Anwendungsperspektiven. Ähnliches gilt für metallische Hartstoffe auf Carbid und Nitridbasis, wie TiC, WC, NbC, TaC, VC, MoC und Komplexcarbiden sowie TiN und ZrN. Zersetzungs- bzw. Entkohlungsprobleme werden durch Spritzen im Vakuum oder im Inertgas gelöst. Neuesten Untersuchungen zufolge zeigen Plasmaspritzschichten aus TiN und ZrN ausgezeichnete hochtemperatur-tribologische Eigenschaften. Intermetallische Phasen zeichnen sich durch besondere physikalische und mechanische Eigenschaften aus und eröffnen spezielle Anwendungen dieser Werkstoffgruppe, zu der u. a. Verbindungen aus den Systemen Nickel-Aluminium, Titan-Aluminium sowie Silizide gehören [9-27]. Hohe mechanische Festigkeit und Oxidations-

beständigkeit auch bei höchsten Temperaturen eröffnen ein Anwendungspotential bei Temperaturen, die höher liegen als die Einsatztemperaturen der Superlegierungen. Die Eigenschaften der Intermetallics lassen sich zwischen denjenigen von Metallen und Keramiken einordnen.

Die modernen Methoden der Verbundpulverherstellung, wie Agglomeration und Mikro-pelletisierung oder Umhüllung, erlauben vielfältige Kombinationsmöglichkeiten auch von metallischen Komponenten mit Keramiken unter Bildung sogenannter Cermets. Bewegungs- und prozeßgesteuerte Plasmaspritzanlagen erlauben auch für Cermets neue Herstell- und Anwendungsmöglichkeiten [9–12]. Durch eine kontrollierte Mehrfachförderung verschiedener Pulver in die Plasmaflamme lassen sich auch gradierte Schichtsysteme realisieren, d.h. Beschichtungen, bei denen von einer Schichtkomponente ausgehend kontinuierlich in eine andere übergegangen wird.

Die Entwicklung maßgeschneiderter Werkstoffe wird ständig verbessert und geprüft und betrifft sowohl konventionelle als auch spezielle Anwendungen wie z.B. die Beschichtung von Implantaten mit Hydroxylapatit [9–28 bis 9–30].

9.3 Verfahrensvarianten

Alle Varianten der Plasmaspritztechnologie lassen sich in zwei Hauptgruppen unterscheiden:

Zunächst gibt es diejenigen Prozesse, bei denen der Prozeßraum mit Luft bei einem Umgebungsdruck von 1 bar umgeben ist, das Atmosphärische Plasmaspritzen (APS) und das Hochleistungsplasmaspritzen (HPPS). Im Gegensatz dazu gibt es die Gruppe der Prozesse, die in einer kontrollierten Atmosphäre stattfinden. Die Umgebungsluft wird hier vorgegeben und kann von einem Inertgas, einem Reaktivgas oder auch von Wasser gebildet werden, der Druck ist dabei variabel und kann sowohl größer als auch kleiner 1 bar sein. Zu dieser Verfahrensgruppe zählen das Inertgasplasmaspritzen (IPS), das Vakuumplasmaspritzen (VPS), das Reaktivplasmaspritzen (RPS) und das Unterwasserplasmaspritzen (UPS). Bild 9–8 gibt einen Überblick über die heute gebräuchlichen oder in der Entwicklung befindlichen Verfahrensvarianten der Plasmaspritztechnologie.

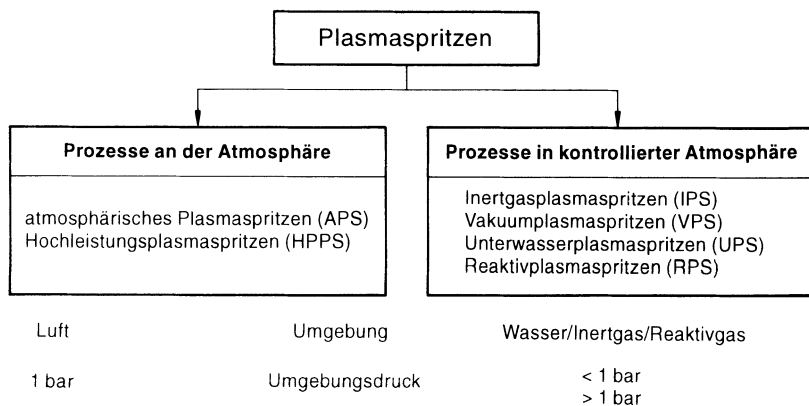


Bild 9–8. Plasmaspritzverfahren.

9.3.1 Prozesse an der Atmosphäre

Man unterscheidet an der Atmosphäre die beiden Verfahren Atmosphärisches Plasmaspritzen und Hochleistungsplasmaspritzen.

9.3.1.1 Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)

Die wirtschaftlich bedeutendste Variante des Plasmaspritzens ist das atmosphärische Plasmaspritzen. Die Spritzpartikel können dabei mit der umgebenden Atmosphäre reagieren, was die verarbeitbaren Werkstoffe auf solche beschränkt, die keine oder nur eine geringe Neigung zum Oxidieren haben, Bild 9–9. Der während des Beschichtungsprozesses entstehende Oxidanteil wird mit in die erzeugte Spritzschicht eingebaut.

Der Spritzabstand vom Brenner zum Bauteil beträgt in Abhängigkeit vom Werkstoff und den Beschichtungsparametern zwischen 100 und 150 mm. Typische Werkstoffe für das APS-Verfahren sind Keramiken, Metalle und auch Legierungen. Die Schichtporositäten liegen im allgemeinen zwischen einem und fünf Prozent.

Moderne atmosphärische Plasmaspritzenanlagen arbeiten in Kammern, um so die Umgebung vor Lärm und Strahlung zu schützen und verfügen über leistungsfähige Absaug- und Filteranlagen zur Beseitigung der Spritzstäube. Häufig übernimmt ein Roboter die Brennerführung, um so auch komplexe Geometrien beschichten zu können.

9.3.1.2 Hochleistungsplasmaspritzen (HPPS)

Das Hochleistungsplasmaspritzen (HPPS) ist eine Erweiterung des bisherigen konventionellen atmosphärischen Plasmaspritzens. Insbesondere bei der Verarbeitung hochschmelzender keramischer Werkstoffe stellt die kinetische Energie der Teilchen beim Aufprall auf das Substrat eine entscheidende Einflußgröße auf die Schichtqualität hinsichtlich Haftung und Porosität dar [9–31].

Zu diesem Zweck wurde ein Brenner mit einer speziellen Düsengeometrie konstruiert, der es erlaubt, Leistungen bis zu 200 kW umzusetzen, Bild 9–9. Neben einer höheren Dichte und Härte gerade in hochschmelzenden Keramiksichten, beispielsweise Chromoxid-schichten, ist aber auch eine größere Pulverförderrate möglich, da der Pulverdurchfluß deutlich erhöht werden kann.

9.3.2 Prozesse in kontrollierter Atmosphäre

9.3.2.1 Inertgasplasmaspritzen (IPS)

Auch beim Inertgasplasmaspritzen lassen sich ebenfalls zwei Varianten unterscheiden. Zunächst läßt sich der Prozeß in geschlossenen Kammern durchführen, das eigentliche Inertgasplasmaspritzen (IPS), aber eine zweite Variante erlaubt es, die Plasmaflamme und den Pulverstrahl durch einen umgebenden Schutzgasmantel vor der Atmosphäre zu schützen, das Shrouded- oder Schutzgasplasmaspritzen (SPS). Bei beiden Varianten besteht die Umgebungsatmosphäre aus einem inerten Gas, und der Arbeitsdruck liegt bei 1 bar, Bild 9–9.

Beim Inertgasplasmaspritzen in geschlossenen Kammern muß die Prozeßkammer zunächst auf einen Restgasdruck von $< 10^{-2}$ mbar evakuiert werden, um anschließend für

| | atmosphärisches Plasmaspritzen | Hochleistungsplasmaspritzen | Inertgasplasmaspritzen | Vakuumplasmaspritzen | Unterwasserplasmaspritzen | Reaktivplasmaspritzen |
|--------------------------|--|---|--|--|----------------------------|---|
| Atmosphäre | Luft | Luft | Ar, N ₂ | Ar, N ₂ | Wasser | Ar - H ₂ - C ₂ H ₂ Ar - N ₂ Ar - H ₂ - C ₂ H ₄ |
| Druckbereich | p = 1000 hPa | p = 1000 hPa | p < 4000 hPa | p < 1000 hPa | p < 1000 hPa | 40 hPa < p < 4000 hPa |
| Abstand Brenner-Substrat | 100 ... 200 mm (Innenbrenner bis 30 mm) | 150 ... 250 mm | 100 ... 200 mm | 250 ... 350 mm | 18 ... 30 mm | 30 ... 250 mm |
| Leistungsbereich | 15 ... 80 kW | bis 200 kW | 15 ... 80 kW | 15 ... 60 kW | 15 ... 60 kW | 15 ... 60 kW |
| Werkstoffe | nicht bzw. gering oxidationsempfindliche Werkstoffe | auch oxidationsempfindliche Werkstoffe | auch oxidationsempfindliche Werkstoffe | keine Einschränkungen | reaktionstähige Werkstoffe | |
| Beispiele | Metalle: Al, Cu, Mo, ... Legierungen: NiCr, NiCoCrAlY, CuAl, ... Keramiken: Al ₂ O ₃ , Zr ₂ O, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ - TiO ₂ , ... Hartstoffe: WC / Co, ... | dichte Schichten für höchstschmelzende Werkstoffe | Ti, Ta, V, ... MCrAlY, Ti - Al, ... Al ₂ O ₃ , Zr ₂ O, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ - TiO ₂ , ... | übertragender Lichtbogen zur Substratreinigung möglich | gefährliche Werkstoffe | |
| Bemerkungen | wirtschaftlich bedeutendste Variante | | | | | |

Bild 9-9. Die Prozeßvarianten des Plasmaspritzens im Vergleich.

den Spritzprozeß mit einem Inertgas (Argon) auf Atmosphärendruck geflutet zu werden. Entstehende Stäube und einströmige Plasmagase werden über Absaugvorrichtungen abgesaugt. Durch den geringen Sauerstoffpartialdruck, der durch die Qualität der Gase und den Evakuierungsprozeß bestimmt wird, wird eine Oxidation von leicht reaktiven Werkstoffen unterdrückt.

Während des Spritzens kann auch mit hohen Kühlgasmengen, bestehend aus Inertgas, gearbeitet werden, so daß die Substrattemperatur ähnlich niedrig wie beim APS-Verfahren gehalten werden kann. Dies ist besonders bei der Verarbeitung von harten und spröden Werkstoffen mit geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Bedeutung. Bei der Verwendung von konventionellen Substratmaterialien (ferritischer und austenitischer Stahl) kann eine zu hohe Werkstücktemperatur zum Abplatzen der Plasmaspritzschicht aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten führen.

Beim Schutzgasmantelplasmaspritzen oder Shrouded-Plasmaspritzen (SPS) findet der Prozeß nicht in einem geschlossenen Kammersystem statt. Es handelt sich prinzipiell um einen APS-Prozeß, bei dem der Plasmastrahl durch einen inerten Gasstrom geschützt wird, der das Plasma koaxial umhüllt und so eine Wechselwirkung der Spritzpartikel und des Plasmas mit der umgebenden Atmosphäre weitgehend verhindert. Der zusätzliche Gasstrom wird nicht ionisiert und erfüllt zugleich die Kühlfunktion des Substrates.

Ein Vorteil dieses Verfahrens gegenüber dem Inertplasmaspritzen in geschlossenen Kammern ist vor allem durch den erheblich geringeren maschinellen Aufwand gegeben. Den dadurch deutlich geringeren Investitionskosten können aber höhere Kosten für das Schutzgas gegenüberstehen.

9.3.2.2 Vakuumplasmaspritzen (VPS)

Beim Vakuumplasmaspritzen (VPS), Bild 9–9, findet der Beschichtungsprozeß in einem geschlossenen Kammersystem statt. Nach dem Evakuieren der Kammer auf $< 10^{-2}$ mbar findet der Plasmaspritzprozeß in einer Inertgasatmosphäre bei Drücken zwischen 50 und 400 mbar statt. Da der Druck während des Beschichtens konstant gehalten werden muß, werden die einströmende Plasmagase mit leistungsfähigen Pumpsystemen abgepumpt. In der inerten Atmosphäre sind sowohl die flüssigen Spritzpartikel, die zu beschichtenden Bauteile als auch die noch reaktionsfähigen Spritzschichten vor Oxidation geschützt.

Ein weiterer Vorteil gegenüber dem APS-Verfahren ist die Möglichkeit, einen übertragenden Lichtbogen zur Reinigung der Substratoberfläche, z. B. zum Entfernen von Oxidresten, sowie zum Vorwärmen des Substrates einzusetzen [9–32, 9–44].

Bedingt durch den niedrigen Druck kommt es beim VPS-Verfahren zu günstigeren aerodynamischen Verhältnissen gegenüber dem APS-Verfahren. Wegen einer größeren Gasexpansion im Vakuum kann der Plasmastrahl schneller ausströmen und sich wegen der abgeschwächten Wechselwirkung mit der umgebenden Atmosphäre ungestört ausbilden. Ein Lavaldüsenvorsatz verstärkt diesen Effekt [9–33].

Durch die geringere Anzahl von umgebenden Gasmolekülen in der Niederdruckatmosphäre wird der Plasmastrahl länger und die Gasgeschwindigkeit höher als unter Atmosphärendruck.

Eine Verwirbelung des Plasmastrahls tritt erst in größerer Entfernung von der Düse auf.

Dadurch verlängert sich die heiße Zone des Plasmastrahls [9–34]. Die größere Ausdehnung des Plasmastrahls ist aber mit einer Verringerung der Energiedichte verbunden. Bei hochschmelzenden Metallen wirkt sich ein erhöhter Druck über 200 mbar positiv auf den Aufschmelzgrad aus, wobei die Partikelgeschwindigkeit gleichzeitig abnimmt und so die Verweilzeit erhöht wird [9–33].

Beim Vakuumplasmaspritzen wird auch der Grundwerkstoff auf höhere Temperaturen erhitzt, da durch fehlende Kühlung und die geringere Anzahl umgebender Moleküle nur wenig Wärme abgeführt werden kann. Dies hat aber auch den Vorteil, daß durch die niedrigere Abkühlgeschwindigkeit Wärmespannungen zwischen Schicht- und Substratwerkstoff gering bleiben. Die höheren Temperaturen fördern auch die Diffusion zwischen Schicht- und Grundwerkstoff, mit dem Ergebnis einer verbesserten Schichthaftung.

Der Spritzabstand beim VPS-Verfahren liegt zwischen 250 und 350 mm. Typisch sind Schichten mit Porositäten im Bereich von weniger als einem Prozent.

Eine aus dem Vakuumplasmaspritzen in Verbindung mit dem Inertgasplasmaspritzen und dem Atmosphärischen Plasmaspritzen entstandene Entwicklung ist ein System, das mehrere Plasmaspritzverfahren in einer Anlage integriert. Das als CAPS (Controlled Atmosphere Plasma Spraying) bezeichnete Verfahren zeichnet sich dadurch aus, daß in einem geschlossenen Kammersystem der Prozeß unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden kann. Dabei kann in einem Druckbereich zwischen 50 und 400 mbar das Vakuumplasmaspritzen, im Normaldruckbereich das Inertgas-Plasmaspritzen und im Druckbereich zwischen 1 und 4 bar das Druckplasmaspritzen angewendet werden.

Von besonderem Vorteil ist dabei, daß in einem solchen System Bauteile mit einer APS- und VPS-Schichtkombination in einem Arbeitsgang beschichtet werden können. Durch die Möglichkeit des Arbeitens im Überdruckbereich ergeben sich Vorteile bei der Innenbeschichtung [9–35] und bei der Verarbeitung von Werkstoffen, die zur Sublimation oder zur druckabhängigen Zersetzung neigen.

9.3.2.3 Unterwasser-Plasmaspritzen (UPS)

Eine neuere Entwicklung innerhalb der Plasmaspritztechnologie ist das Unterwasser-Plasmaspritzen (UPS), Bild 9–9. Bei dieser Prozeßvariante ist der Plasmastrahl völlig von Wasser umschlossen.

Durch die ausströmenden heißen Plasmagase entsteht ein Gaskanal, der sich zwischen dem Brenner und dem Substrat schlauchförmig ausbildet. Hierdurch wird die zu beschichtende Oberfläche getrocknet, so daß ein Verbund zwischen Substrat und Spritzschicht möglich wird [9–36]. Die Partikel werden dann innerhalb dieses Gaskanals aufgeschmolzen und dann auf das Substrat aufgebracht, Bild 9–10.

Unabhängig von den Plasmaspritzparametern erfolgt das UPS bei stark verkürztem Spritzabstand zwischen 15–30 mm. Auch die makroskopische Geometrie der Plasmaspritzschicht verändert sich im Vergleich mit dem atmosphärischen Verfahren und ähnelt dem Aussehen von Schweißraupen [9–36].

Das Unterwasser-Plasmaspritzen bietet aber auch Vorteile hinsichtlich der Arbeitsplatzbedingungen, denn Geräuschpegel und Strahlenbelastung werden auf ein Minimum reduziert. Beim Unterwasser-Plasmaspritzen entstehende Spritzverluste fallen als Schlamm an und können dann auf einfache Weise entfernt werden [9–37]. Perspektiven der Anwen-

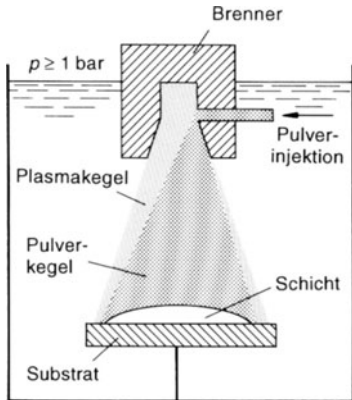


Bild 9–10. Schema des Unterwasserplasmaspritzens.

dungen der UPS-Technologie liegen u. a. in der Off-Shore-Industrie und bei der Verarbeitung gefährlicher Stoffe.

9.3.2.4 Reaktivplasmaspritzen (RPS)

Plasmaprozesse im Reaktivgasbetrieb sind aus der Plasmasynthese von Werkstoffen seit längerem bekannt und finden in jüngster Zeit auch Eingang in die Beschichtungstechnik. Durch kontrollierte Reaktion des im Plasmastrahl aufgeschmolzenen pulverförmigen Schichtwerkstoffes mit dem Plasma zugeführten reaktiven Gasen gelingt eine den Beschichtungsprozeß überlagerte ergänzende Werkstoffsynthese, Bild 9–9. Das Ergebnis sind Verbundwerkstoffschichten mit eingelagerten Hartphasen wie Carbiden, Nitriden, Oxiden oder Siliciden.

Reaktivgase wie Methan, Propan, Stickstoff, Sauerstoff, Silane, werden möglichst außerhalb der Plasmadüse zugeführt. So wird ein verstärkter Elektrodenverschleiß verhindert. Das Reaktivgas kann als Pulverträgergas bei externer Pulverinjektion zugeführt werden, aber auch in einem der Düse nachgeschalteten Reaktorraum.

Verbundwerkstoffe, wie z. B. TiC verstärkte NiCr-Werkstoffe, MoSi₂ verstärktes Molybdän, oder ODS-Legierungen werden heute versuchsweise auch durch reaktives Formspritzen zu Bauteilen verarbeitet. Unter Nutzung einer reaktiven Vakuumplasmaspritzvariante gelingt es heute bereits, diamantähnliche Beschichtungen mit sehr hohen Auftragsleistungen zu realisieren [9–37, 9–38].

9.4 Anlagentechnik

Eine moderne Plasmaspritzanlage ist aus mehreren Elementen aufgebaut. Diese Einzelteile sind im folgenden aufgelistet:

- Plasmabrenner
- Pulverfördereinrichtung
- Plasma-Hochfrequenzstarter

- Plasma-Stromquelle
- Steuereinheiten
- Brennermanipulationssystem
- Substratmanipulationssystem
- Periphere Einrichtungen.

Bei Verfahren, die in kontrollierten Atmosphären arbeiten, ist diese Liste noch zu ergänzen um:

- Prozeßraum
- Steuer- und Kontrolleinheiten für die Atmosphäre.

Bild 9–11 zeigt schematisch den Aufbau einer Plasmaspritze am Beispiel einer Vakuumplasmaspritze.

9.4.1 Plasmabrenner

Hauptfunktionselement einer Plasmaspritze ist der Brenner. Dieser setzt die eingebrachte elektrische Energie in Wärme um, wobei jedoch die elektrische Leistung nicht nur für die Dissoziation, Ionisation und Temperaturerhöhung des Plasmagases benötigt, sondern auch über die Wasserkühlung des Brenners sowie durch Gehäusekonvektion und Strahlung abgeführt wird. In Bild 9–12 wird die Energiebilanz des Brenners gezeigt.

Zur Zündung des eigentlichen Lichtbogens wird zunächst durch einen Hochspannungs-/Hochfrequenzzündimpuls ein ionisierter Entladungskanal in der Argonstromung zwischen den Elektroden erzeugt. Durch eine Gleichspannung, die zwischen der Katode und der Anode anliegt, kann nun ein Gleichstromlichtbogen erzeugt werden, der den ursprünglichen dünnen Entladungskanal stark aufweitet. Der Fußpunkt des Lichtbogens wird durch die Gasströmung des nachfolgenden Plasmagases zur Düsenmündung hin getrieben, wodurch ein stabiler Zustand erzeugt wird. Nach der Zündung des Plasmabrenners kann die Gasdurchflußmenge erhöht werden, ebenfalls die Stromstärke. Ebenso kann ein zweites Gas beigemischt werden (Helium, Stickstoff oder Wasserstoff), um so die für den Beschichtungsprozeß erforderliche Temperatur, Enthalpie und Geschwindigkeit des Plasmastrahls zu erreichen.

Die Plasmacharakteristik hinsichtlich Temperatur, Geschwindigkeit und Wärmehalt der Gasströmung beeinflusst das Aufschmelzverhalten der Pulverpartikel und bestimmt somit die Schichteigenschaften.

Die Leistung eines Plasmabrenners wird entscheidend von mehreren Einflüssen bestimmt:

- Art des Plasmagases, Gasmischungen
- Stromstärke zwischen den Elektroden
- Brennergeometrie
- Wärmeabfuhr durch Brennerkühlung.

Im folgenden wird der prinzipielle Aufbau des Plasmabrenners dargestellt, Bild 9–13.

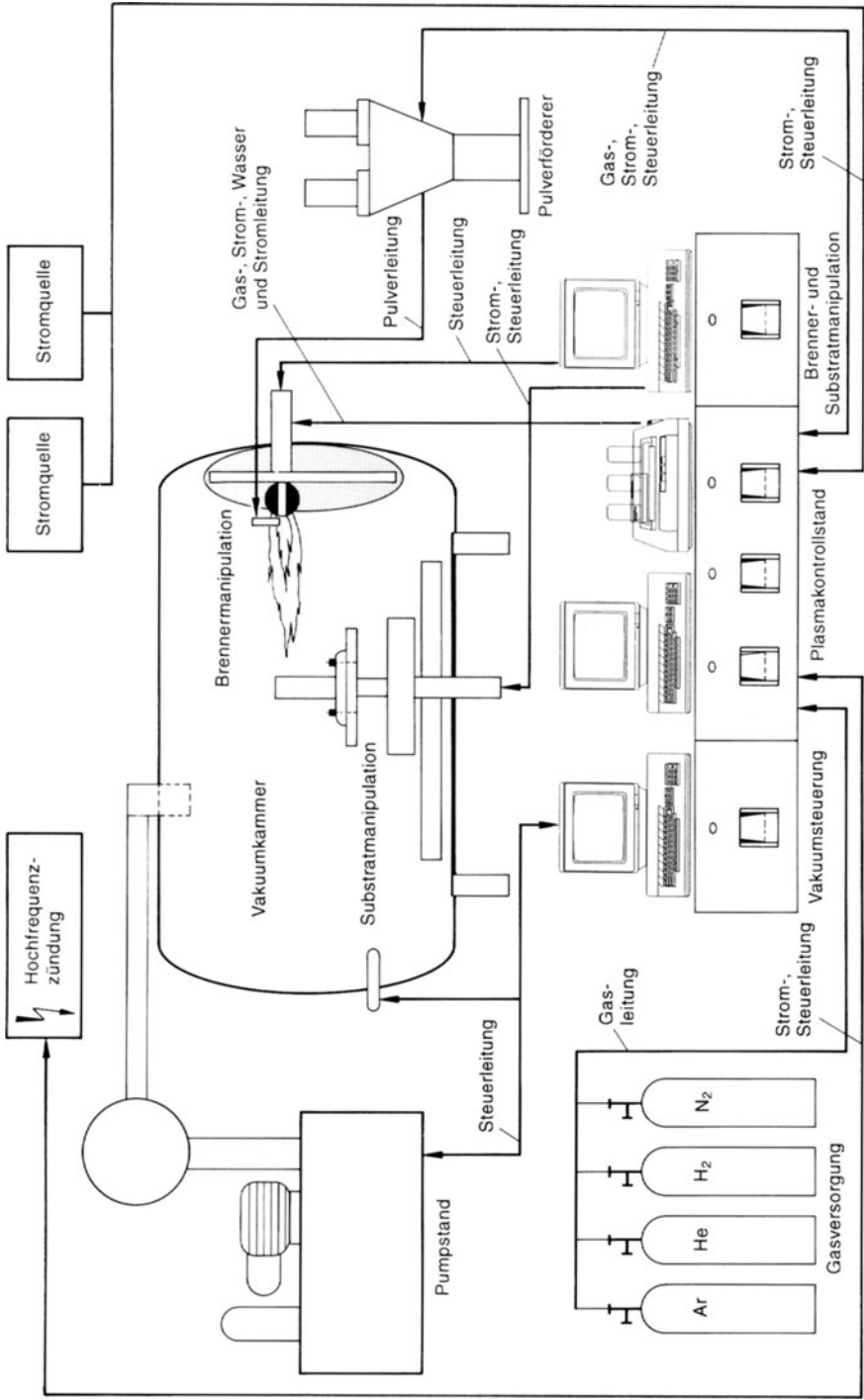
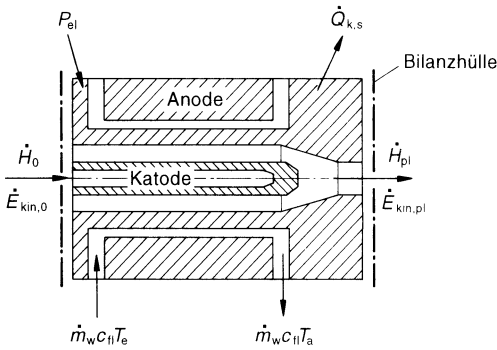


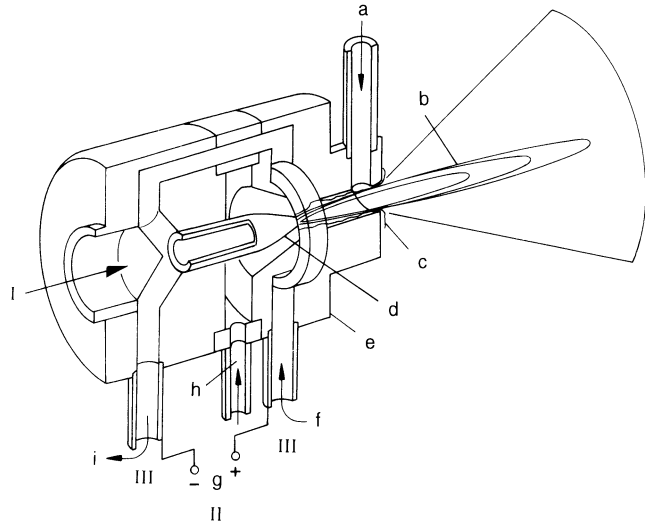
Bild 9-11. Anlagenschema einer Plasmaspritzeanlage.



P_{el} eingebrachte elektrische Leistung
 $\dot{Q}_{k,s}$ abgeführte Wärme durch Konvektion, Strahlung
 $(\dot{H}_0 - \dot{H}_{pl})$ Plasmaenthalpiedifferenz
 $(\dot{E}_{kin,0} - \dot{E}_{kin,pl})$ Differenz der kinetischen Energie
 $(\dot{m}_w c_{11} T_e - \dot{m}_w c_{11} T_a)$ durch Wasser abgeführte Wärme

Bild 9–12. Energiebilanz des Plasmabrenners.

Bild 9–13. Aufbau eines Plasmabrenners nach [9–40].
 a pulverisiertes Spritzmaterial in Trägergas
 b Plasmaflamme
 c Lichtbogen
 d Katode
 e Anode
 f Kühlwassereintritt
 g Gleichspannungsquelle
 h Plasmagas
 i Kühlwasseraustritt.



Erkennbar sind drei Versorgungsanschlüsse innerhalb des Systems. Die Gasversorgung (I) sorgt für die Zufuhr mit Plasmagas. Dieses strömt durch einen perforierten Isolierring, der zur Trennung der Kupferanode und der Wolframkatode notwendig ist. Bei Durchströmen des Lichtbogens zwischen den Elektroden wird das Gas unter Volumenausdehnung stark erhitzt, was zur Folge hat, daß das Gas die Düse mit hoher Geschwindigkeit verläßt. Hier wird nun das aufzuschmelzende Pulver mit Hilfe eines Trägergasstromes injiziert, von der schnellen Plasmaströmung beschleunigt und aufgeschmolzen. Der Stromfluß (II) führt vom Pluspol der Quelle über die Anode zur Gasentladungsstrecke, dem Lichtbogen, in die fingerförmige Katode und zum Minuspol zurück. Der Kühlwasserkreislauf (III) durchfließt vom positiven Anschluß her die Kanäle innerhalb der Düse. Daran anschließend wird das Wasser bis zur Elektrodenspitze geführt, bevor es wieder zum Austritt des negativen Anschlusses geführt wird.

Brennertypen gibt es für die verschiedenen Anwendungsgebiete der Plasmaspritztechnologie: Man unterscheidet Brenner für den Einsatz an der Atmosphäre (Hand- und Maschinenbrenner), für den Einsatz im Vakuum, als Schutzgas- oder als Unterwasserbrenner.

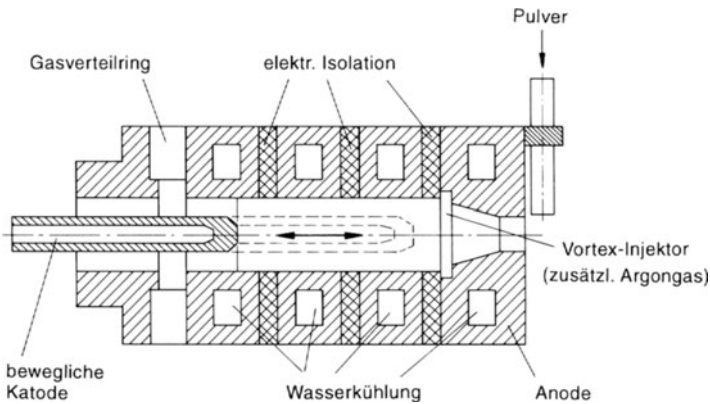


Bild 9–14. Plasmabrenner mit variabler Katode (Perkin-Elmer-Metco GmbH).

Üblicherweise ist der Abstand zwischen Anode und Katode durch Brennerkonfiguration festgelegt, jedoch gibt es auch Entwicklungen zur Gestaltung von Brennern mit axial verschiebbarer Elektrode, Bild 9–14, was zur Erzeugung eines längeren Lichtbogens sowie zur Kompensierung von Verschleiß an Katode und Anode führt [9–41].

Einen bedeutenden Einfluß auf das Aufschmelzverhalten der Pulverteilchen hat die Art der Pulverinjektion. Die Pulverinjektion soll so ausgelegt sein, daß das Pulver in das Zentrum des Plasmastrahls gelangt. Während des Beschichtungsvorganges kommt es zu einer Überlagerung der radialen Injektionsgeschwindigkeit mit der axialen Plasmagasgeschwindigkeit. Dies führt in Verbindung mit unterschiedlichen Eigenschaften der Spritzpulver, wie Korngrößenverteilung und Dichte, zu verschiedenen Flugbahnen durch das Plasma. Da das Temperaturfeld (Bild 9–15) des Plasmastrahls durch extreme Temperaturgradienten gekennzeichnet ist, kommt es auch zu verschiedenen Aufschmelzgraden der Pulverpartikel. Die Überlagerung der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten führt dazu, daß es zu einer Abweichung der Symmetrieachsen von Plasma- und Pulverkegel um den Winkel β kommt, Bild 9–15. Der Winkel β ist dabei eine Funktion der Pulvereigenschaften und der Injektionsgeschwindigkeit.

Bei der radialen Pulverinjektion unterscheidet man verschiedene Varianten. Bei einer Injektion innerhalb der Düse (Anode) spricht man von einer internen Pulverinjektion, bei einer Injektion außerhalb von einer externen, Bild 9–16. Desweiteren unterscheidet man zwischen positiven, negativen oder neutralen Pulverinjektionswinkeln. Abhängig vom Schmelzpunkt bzw. -bereich des Pulvers kann der Injektionswinkel in die Plasmaflamme Θ von 0° variiert werden, Bild 9–17. Bei der Verarbeitung einer hochschmelzenden Keramik wird $\Theta > 0^\circ$, um so den Aufenthalt der Partikel im Bereich höherer Plasmatemperaturen und für längere Verweilzeiten zu realisieren, während bei niedrighschmelzenden Metallen oder Kunststoffen $\Theta < 0^\circ$ ist, um den Werkstoff in den Bereich niedriger Temperaturen zu injektieren.

Bei der parallelen Verarbeitung mehrerer Werkstoffe ist es möglich, die Lage der Injektionsorte in die Plasmaströmung so anzupassen [9–3, 9–42], daß den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffe Rechnung getragen wird und diese während des Beschichtungsvorganges nicht entmischt werden, sondern ort- und zeitgleich auf einem Punkt auf dem Substrat auftreffen.

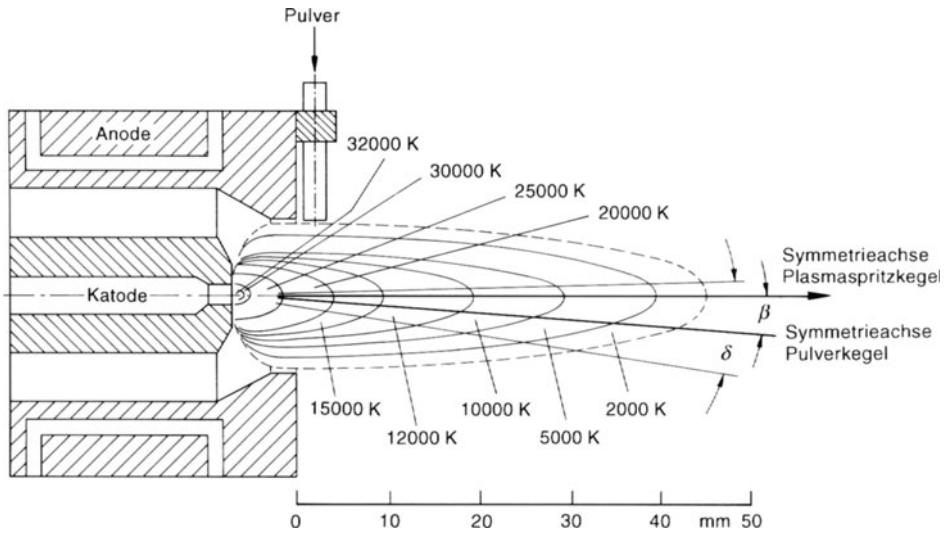


Bild 9–15. Temperaturverteilung in dem Plasma nach [9–14] und geometrische Verhältnisse nach [9–33] während des Spritzprozesses.

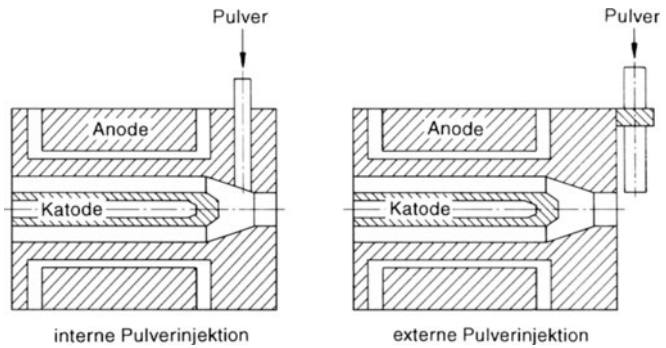


Bild 9–16. Injektionsorte des Pulvers in das Plasma.

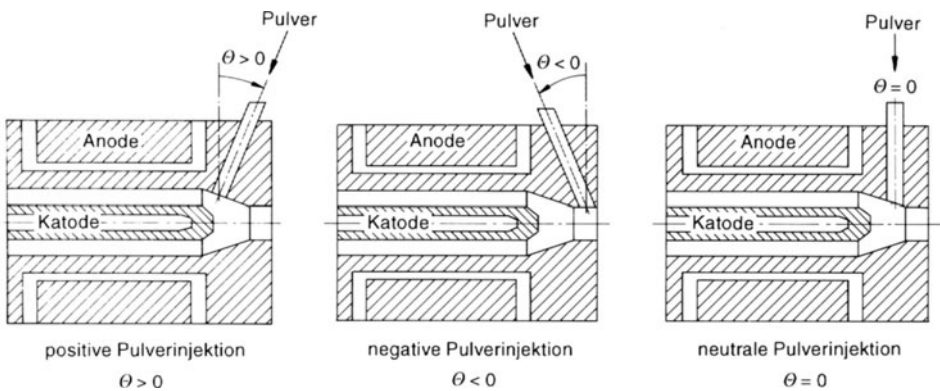


Bild 9–17. Injektionswinkel des Pulvers in das Plasma.

9.4.2 Plasmakontrolleinheit

Der Plasmaspritzprozeß wird von einer Plasmakontrolleinheit gesteuert. Diese hat folgende Aufgaben zu erfüllen (Toleranzen nach DIN 32521):

- Regelung des Plasmastromes (Sollwert $\pm 1,5\%$)
- Regelung der Plasmagase und der Trägergase (Durchfluß) (Sollwert $\pm 1,5\%$)
- Regelung der Pulverförderrate (Sollwert $\pm 5\%$).

Bei einer im Vakuumbereich arbeitenden Plasmaspritzanlage kommen noch die Aufgaben der Arbeitsdruckregelung (± 1 mbar) sowie der Regelung des übertragenden Lichtbogens zur Substratreinigung und -vorwärmung hinzu [9–43].

9.4.3 Pulverfördereinrichtungen

Pulverfördersysteme, Bild 9–18, die in der Plasmaspritztechnik eingesetzt werden, müssen eine gleichmäßige Förderung der Werkstoffpulver sicherstellen, um reproduzierbare Schichteigenschaften und gleichbleibende Schichtqualität sicherzustellen.

Die technischen Anforderungen sind:

- Möglichst exakte Pulverdosierung
- Förderung einer großen Bandbreite von Pulvern für die thermische Spritztechnik (Korngrößen zwischen 5 und 200 μm , verschiedene Fließverhalten)
- Reproduzierbarkeit des Pulverflusses.

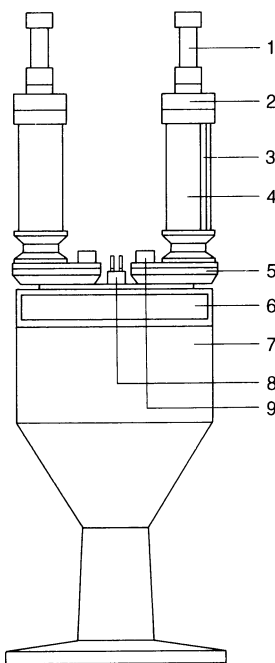


Bild 9–18. Pulvergeber (Plasmatechnik AG).

- 1 Rührermotor
- 2 Deckel für Pulvereinfüllung
- 3 Druckausgleichsrohr
- 4 Pulverbehälter
- 5 Dosiereinheit, austauschbar
- 6 Frontplatte
- 7 Stahlblechgehäuse
- 8 Arretiervorrichtung der Dosiereinheit
- 9 Pulverschlauchanschluß, schraubbar.

Die beim Plasmaspritzen eingesetzten Pulvergeber fördern die pulverförmigen Werkstoffe mit Hilfe eines Trägergases über die Injektionsdüse in die Plasmaflamme. Dabei wird die Menge des zugeführten Pulverwerkstoffes bei den heute eingesetzten Anlagen meist über das geförderte Volumen kontrolliert. Variationen des Trägergasstromes beeinflussen die Injektionsverhältnisse, nicht aber die Pulvermengenströme.

Zur simultanen Verarbeitung mehrerer Pulver werden auch Mehrfachpulvergeber verwendet. Mit numerischen Steuerungen können so nicht nur Kompositwerkstoffe erzeugt werden, es können auch die schon unter 9.2 genannten gradierten Strukturen mit variablen Anteilen der Einzelpulverkomponenten hergestellt werden.

9.4.4 Prozeßräume

Während bei den atmosphärischen Plasmaspritzverfahren (APS, HPPS) und dem Schutzgasplasmaspritzverfahren (SPS) lediglich Arbeitskammern benötigt werden, die die Umgebung vor Lärm und Strahlung schützen, benötigen Verfahren wie das Vakuum-, das Inertgas-, das Reaktivplasmaspritzverfahren Prozeßräume, die nach außen komplett abgeschlossen sind. Es sind Pumpensysteme erforderlich, um vor dem eigentlichen Spritzprozeß die Kammer auf bis zu $2 \cdot 10^{-2}$ mbar evakuieren zu können, um sicherzustellen, daß kaum Restsauerstoff während des Beschichtungsprozesses vorhanden ist. Die Pumpensteuerung muß so ausgelegt sein, daß sie in der Lage ist, den erforderlichen Betriebsdruck während des Beschichtens konstant zu halten.

9.4.5 Sonstige Elemente

Sonstige Elemente sind der Hochfrequenzstarter sowie die Stromquelle, deren Aufgaben bereits unter 9.4.1 aufgeführt worden sind.

Eine entscheidende Produktionsanforderung ist eine reproduzierbare Oberflächenbeschichtung konstanter Qualität. Deshalb ist der Einsatz numerisch gesteuerter Manipulationseinrichtungen für Brenner und Werkstück heutzutage unerlässlich und der Automatisierungsgrad industriell eingesetzter Plasmaanlagen zur Fertigung beschichteter Bauteile entsprechend hoch.

9.4.6 Periphere Einrichtungen

Für das Plasmaspritzen erforderliche periphere Systeme sind Gasversorgung, Wasserkühler, Abluftsysteme oder Frischluftanlagen. Die Steuerung dieser Komponenten kann ebenfalls von der Plasmakontrolleinheit aus erfolgen.