

Einführung Thermisches Spritzen

May 2022



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
1.1 Eigenschaften von Oberflächen	4
1.2 Beschichtungsverfahren	5
2 Thermisch gespritzte Schichten	6
2.1 Definition	6
2.2 Grundwerkstoffe.....	6
2.3 Zusatzwerkstoffe	7
2.4 Beschichtungsverfahren	8
2.5 Schichtaufbau	13
2.6 Schichteigenschaften	14
2.7 Nachbehandlung.....	14
2.8 Charakterisierung der Schichten.....	15
3 Anwendungen	16
3.1 Neuteilbeschichtung.....	17
3.2 Reparatur	20
4 Zusammenfassung	21
5 Anhang	22
5.1 Tabellen.....	22
5.2 Literaturhinweise	23

1 Einleitung

Nach dem heute in allen Industriebereichen gültigen Motto «höher, schneller, leichter, billiger» werden an alle Bauteile immer höhere Anforderungen gestellt. Der Einsatz unter solch aggressiven Bedingungen führt oftmals zu vorzeitigem Ausfall der Aggregate durch zu hohe Beanspruchung. Bild 1a zeigt z.B. eine Düsennadel, die bei Pelton-turbinen eingesetzt wird und nach einer Betriebsdauer von einigen tausend Stunden völlig verschlissen ist. Wenn man nun diese Standzeit nicht hinnehmen will, so muss man entweder das komplette Bauteil aus einem höherwertigen Grundmaterial herstellen oder aber die Partie, die dem starken Angriff ausgesetzt ist, veredeln. Aus Kostengründen wird man sich meist für die «lokale» Methode entscheiden. Dies führt zum Einsatz von Oberflächenbeschichtungsverfahren. Hier wird entweder das gesamte Bauteil oder nur die lokal beanspruchten Stellen mit Werkstoffen belegt, die die jeweiligen Ansprüche besser erfüllen.

1.1 Eigenschaften von Oberflächen

Die Anforderungen, die an die Werkstückoberflächen gestellt werden, sind von dem jeweiligen Einsatz abhängig und können sehr vielfältig sein.

Sie reichen von massivem Schutz gegen Verschleiß, über Korrosionsbeständigkeit, Wärmeisolation, elektrischer Isolierung, bis hin zu verbessertem ästhetischem Aussehen.

In der Praxis wird man jedoch selten den Zustand finden, dass die Bauteile nur einer Beanspruchungsart ausgesetzt sind. Meist liegt eine Kombination vor, wie z.B. Abrasion bei gleichzeitiger hoher thermischer Belastung, oder ähnliches. Die häufigsten Anforderungen sind Verschleiß und Korrosionsbeständigkeit, denen dann die jeweiligen Beschichtungen standhalten müssen.

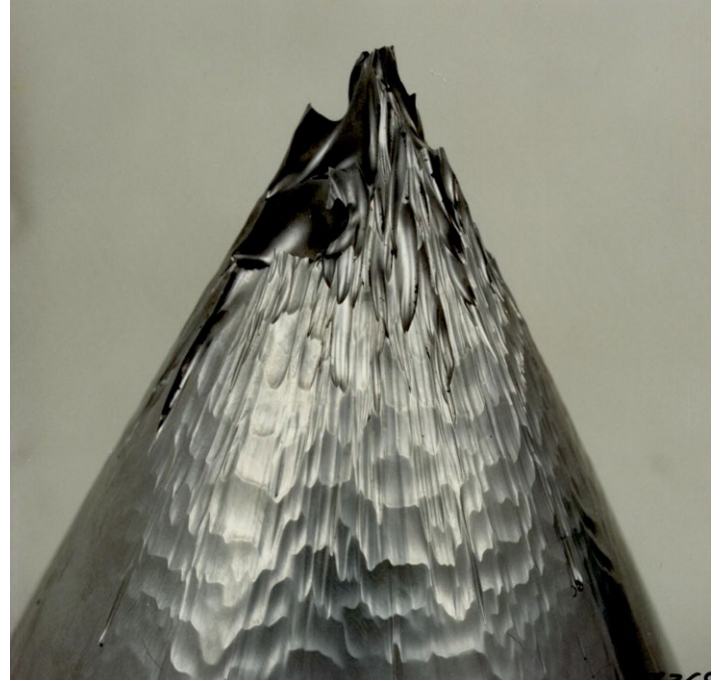


Bild 1a – Verchromte Düsennadel aus Stahl 13/4 nach Einsatz bei Pelton-turbine

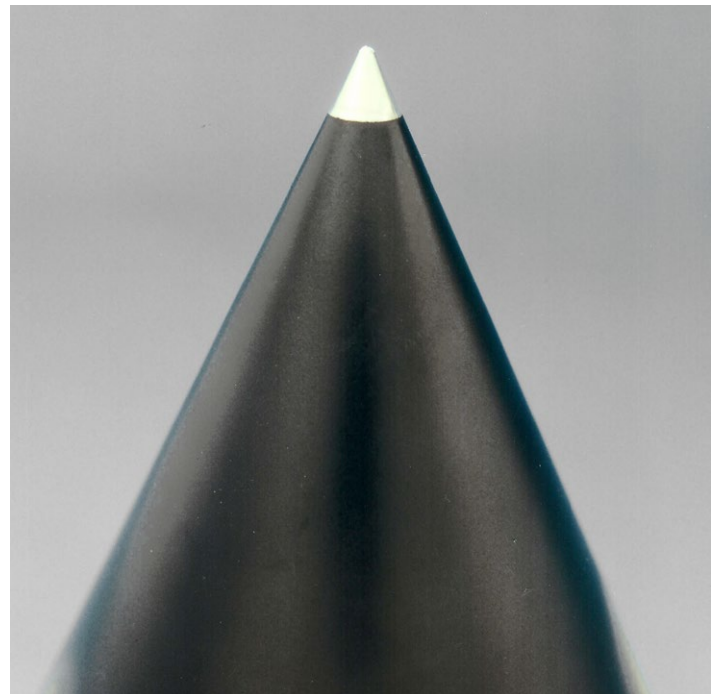


Bild 1b – Mit Chromoxid beschichtete Düsennadel

1.2 Beschichtungsverfahren

Es gibt eine Vielzahl von Beschichtungsverfahren, sowie eine nicht überblickbare Anzahl von Beschichtungswerkstoffen. Die für den jeweiligen Anwendungsfall richtige Kombination auszuwählen, bedarf in der Regel das Wissen von Spezialisten.

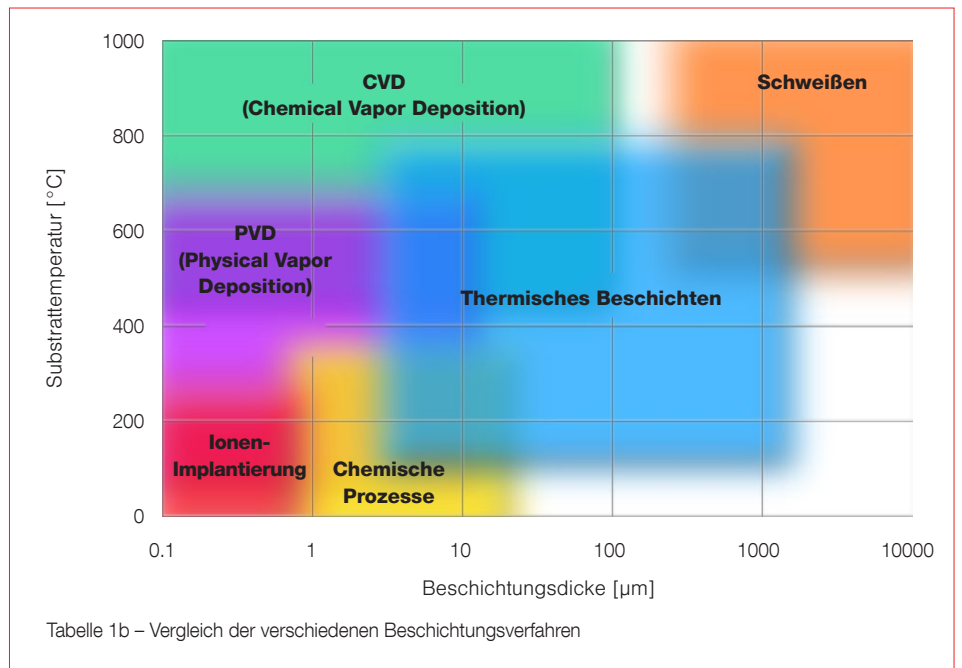
In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die wichtigsten Verfahren, die damit erreichbaren typischen Schichtdicken, die üblichen Beschichtungswerkstoffe, sowie Anwendungsbeispiele aufgelistet. Je nach aufzutragendem Werkstoff sind einige

Verfahren nicht geeignet, auch die erforderlichen Schichtdicken sind nicht mit allen Methoden erreichbar. Darüber hinaus sind einige Verfahren apparativ recht aufwändig und daher kostenintensiv. Eine Kosten/Nutzen-Analyse kann hier Aufschluss geben, ob eine Beschichtung sinnvoll ist. In der heutigen Zeit müssen auch die ökologischen Gesichtspunkte der jeweiligen Beschichtungsverfahren geprüft werden. Nicht alle Methoden sind im gleichen Maß umweltverträglich.

Verfahren	Typische Schichtdicken	Beschichtungswerkstoffe	Eigenschaften	Beispiele
PVD	1 – 5 µm	Ti(C,N)	Verschleißbeständig	Werkzeuge
CVD	1 – 50 µm	SiC	Verschleißbeständig	Faserbeschichtung
Lackieren	1 – 10 µm	Polymere	Korrosionsbeständig, ästhetisch	Automobile
Thermisches Spritzen	40 – 3000 µm	Keramische und metallische Legierungen	Verschleißbeständig, korrosionsbeständig	Lager
Hartverchromen	10 – 100 µm	Chrom	Verschleißbeständig	Walzen
Auftrags-schweißen	0.5 – 5 mm	Stähle, Stellite	Verschleißbeständig	Ventile
Verzinken	1 – 5 µm	Zink	Korrosionsbeständig	Stahlbleche
Auftragslöten	10 – 100 µm	Ni-Cr-B-Si-Legierung	Sehr hart, dicht	Wellen

Tabelle 1a – Wichtigste Beschichtungsverfahren und ihre typischen Merkmale

Das Verfahren, welches die größte Variationsbreite bezüglich der Beschichtungswerkstoffe, der Schichtdicken und der Schichteigenschaften aufweist, ist das thermische Spritzen, welches im Folgenden näher beschrieben werden soll.



2 Thermisch gespritzte Schichten

2.1 Definition

Definition nach DIN 657^[1]: «Das Aufbringen dieser Schichten erfolgt mittels besonderer Geräte/Anlagen durch Aufschmelzen oder Anschmelzen, Zerstäuben und Aufspritzen des Spritzwerkstoffes mit hoher Geschwindigkeit auf die gereinigte und vorbehandelte Bauteiloberfläche. Diese Definition reicht nicht aus, um das thermische Spritzen ausreichend zu beschreiben.

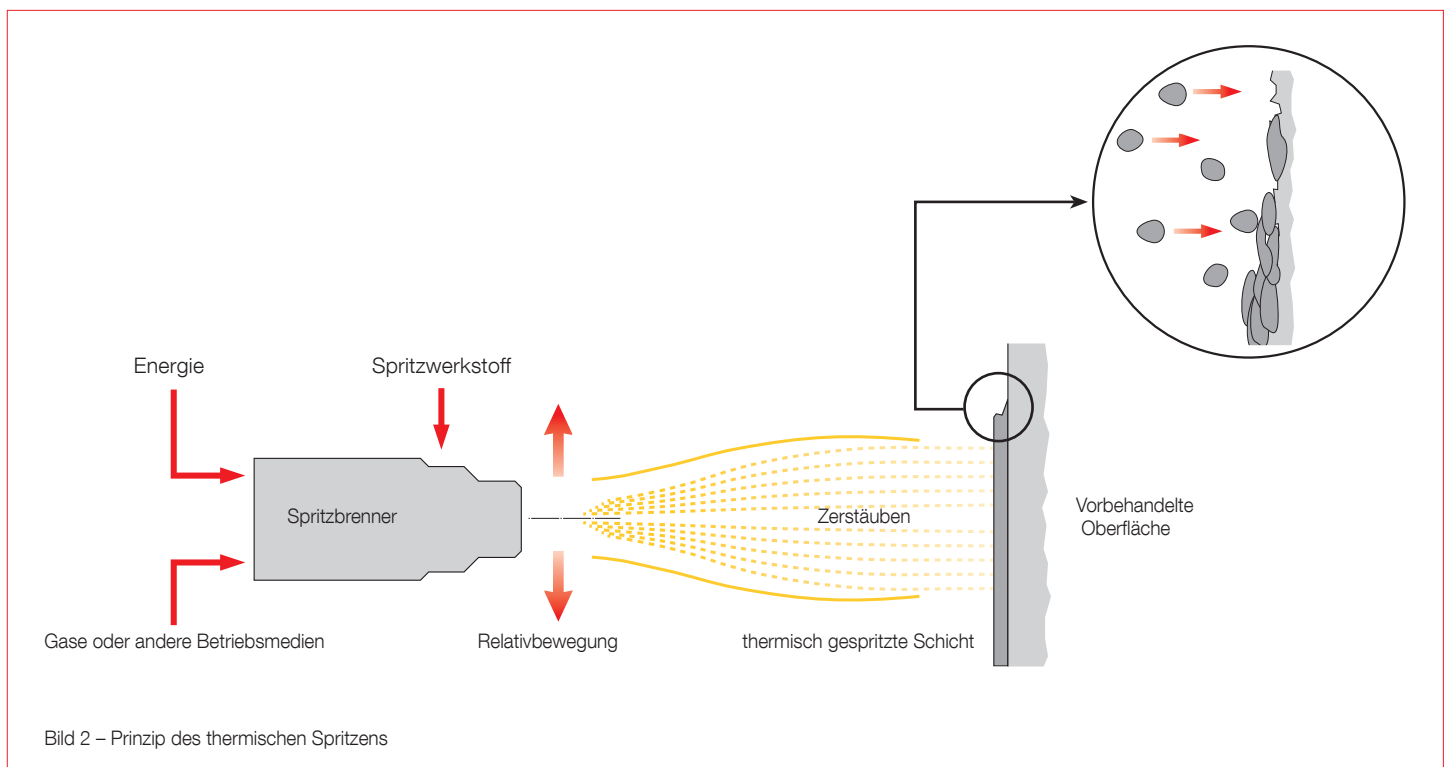
Bild 2 zeigt eine Prinzip-Skizze des thermischen Spritzens. In einem Brenner wird mit Hilfe von Energie Beschichtungsmaterial aufgeschmolzen. Dieser flüssige oder teigige Werkstoff wird dann mit Hilfe von Prozessgasen zerstäubt und so auf das Grundmaterial gespritzt, wo er erstarrt und eine geschlossene Schicht bildet. Auf die einzelnen Aspekte dieser Vorgänge wird im folgenden genauer eingegangen.

2.2 Grundwerkstoffe

Als Substrate eignen sich alle Werkstoffe, die sich durch Strahlverfahren aufrauen lassen, d.h. Werkstoffe, deren Härten kleiner als etwa 55 HRC sind. Grundwerkstoffe mit höheren Härten sind nur mit besonderem Aufwand beschichtbar. Da die Haftung vorwiegend aus mechanischer Verklammerung besteht, ist eine sorgfältige Reinigung und Vorbehandlung der zu beschichtenden Oberfläche äußerst wichtig.

Nach der Entfernung von Oberflächenverunreinigungen durch chemische oder mechanische Methoden wird die Oberfläche in der Regel anschließend mit einem Strahlverfahren aufgeraut. Dies hat einerseits die Aufgabe, die Oberfläche durch Erhöhung der freien Oberflächenenergie zu aktivieren und andererseits den auftreffenden Spritzteilchen durch die erhöhte Fläche bessere Möglichkeiten zur Verklammerung zu bieten.

Die flüssigen oder teigigen Beschichtungspartikel treffen nun mit einer hohen Geschwindigkeit auf der aufgerauten Oberfläche auf. Durch den Aufprall werden die Teilchen verformt und breiten sich wie «Pfannkuchen» auf dem Substrat aus.



Die heißen Teilchen geben ihre Wärme an das kältere Grundmaterial ab. Dabei schrumpfen sie und können sich so mit künstlichen Oberflächenunebenheiten des Grundmaterials verklammern. Die Haftung beruht also auf mechanischer Verhakung. Dieser Vorgang ist schematisch im Bild 2 und Bild 3 dargestellt. Der Anteil an metallurgischer Bindung durch Diffusion zwischen Partikel und Grundmaterial ist gering und kann für die Betrachtung der Haftmechanismen vernachlässigt werden (Ausnahme: Molybdän).

Das Aufrauen erfolgt in der Regel durch Sandstrahlen mit trockenem Korund. Aber auch andere Mittel, wie Hartgusskies, Stahlkugeln oder SiC kommen gelegentlich zum Einsatz. Neben dem Strahlmittel sind Faktoren wie Korngröße, Kornform, Strahlwinkel, Druck und Reinheit des verwendeten Mittels von Bedeutung.

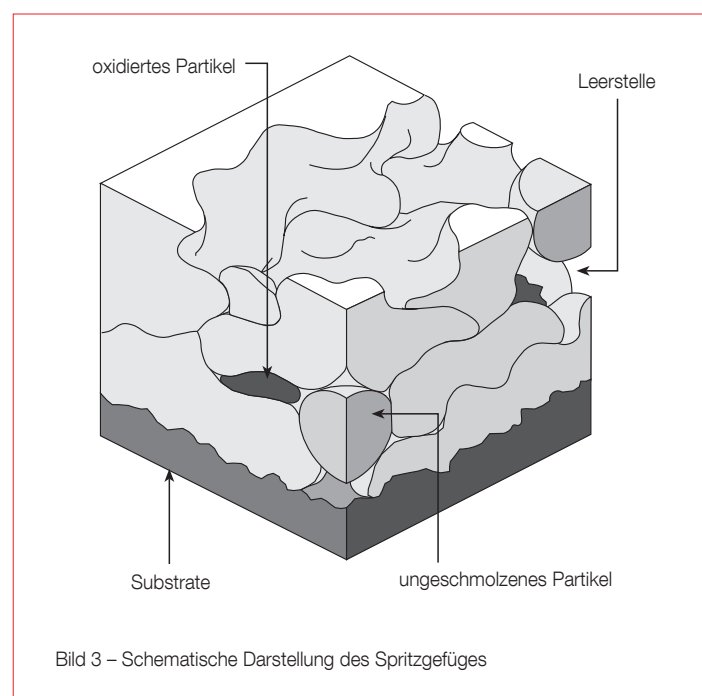
2.3 Zusatzwerkstoffe

Als Zusatzwerkstoffe, d.h. die Materialien, die auf die Bauteiloberfläche gespritzt werden sollen, können grundsätzlich alle Werkstoffe verwendet werden, die sich ohne Zersetzung aufschmelzen lassen. Die Auftragswerkstoffe werden, in Abhängigkeit des später verwendeten Verfahrens, in Form von Draht oder Pulver eingebracht.

In Tabelle 2 sind die am häufigsten eingesetzten Materialien aufgelistet. Die kurze Übersicht enthält neben der Werkstoffgruppe typische Vertreter dieser Gruppe, Eigenschaften und Anwendungsbeispiele.

Die Wahl des richtigen Zusatzwerkstoffes für den Anwendungszweck bedarf einerseits eines recht genauen Wissens über die auftretende Art der Beanspruchung sowie der Kenntnis über die verschiedenen Werkstoffe. Neben den physikalischen Eigenschaften, wie Ausdehnungskoeffizient,

Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Schmelzpunkt, haben weitere Faktoren, wie Kornform, Korngrößenverteilung oder Herstellungsverfahren der Pulver (agglomeriert, gesintert, umhüllt) Einfluss auf die späteren Gebrauchseigenschaften. Da die meisten Spritzwerkstoffe als Legierungen oder Gemische vorliegen, führt dies zu einer fast unbegrenzten Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten, die nur durch langjährige Erfahrung und ein breites Knowhow eingegrenzt werden kann.



Werkstoffgruppe	Typische Legierung	Eigenschaft	Anwendungsbeispiel
Reine Metalle	Zn	Korrosionsschutz	Brückenbau
Selbstfließende Legierungen	FeNiBSi	Hohe Härte, schmelzverbunden, geringe Porosität	Wellen, Lager
Stähle	Fe Cr13	Kostengünstig, verschleißbeständig	Reparatur
MCrAlY	NiCrAlY	Hochtemperatur-Korrosionsbeständigkeit	Gasturbinenschaufeln
Ni-Graphit-Legierungen	Ni 25C	Frettingschutz	Einlaufschichten in Kompressoren
Oxide	Al ₂ O ₃	Oxidationsbeständig, hohe Härte	Textilindustrie
Karbide	WC Co12	Verschleißbeständig	Wellen

Tabelle 2 – Wichtigste Werkstoffgruppen bei Spritzpulvern

2.4 Beschichtungsverfahren

Es gibt verschiedene Verfahren, eine thermische Spritzschicht aufzubringen. Nachstehend wird auf die Verfahren genauer eingegangen. Ein Überblick wird in [2] gegeben.

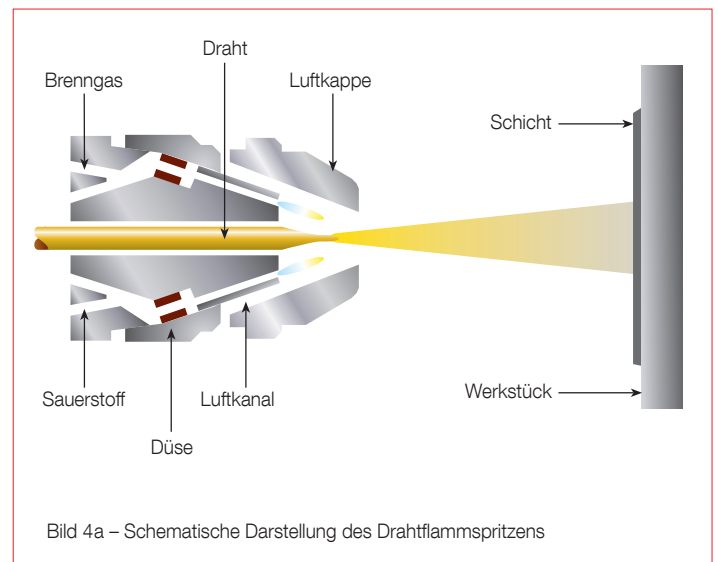
In der folgenden Übersicht wird beschrieben:

- Konventionelles Flamspritzen
- Lichtbogenspritzen
- Plasmaspritzen
- Hochgeschwindigkeitsflamspritzen (HVOF)

2.4.1 Konventionelle Flamspritzverfahren

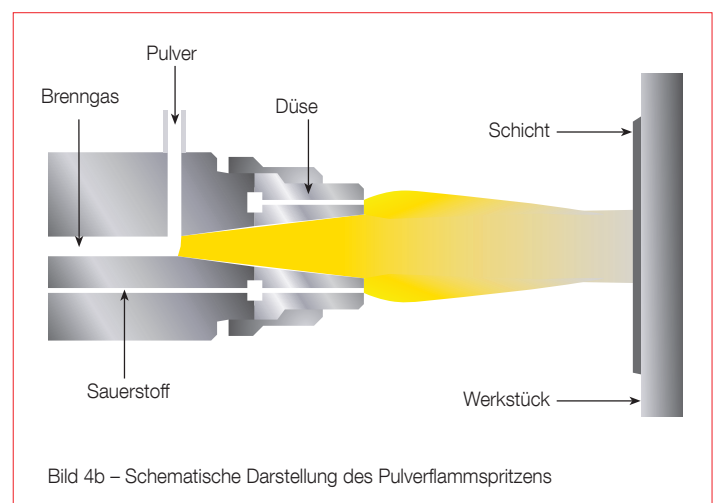
2.4.1.1 Drahtflamspritzen

Beim Drahtflamspritzen wird der drahtförmige Spritzwerkstoff durch eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme abgeschmolzen. Als Brenngase können Acetylen, Propan oder Wasserstoff eingesetzt werden. Der Draht wird mittels eines Vorschubs konzentrisch der Flamme zugeführt, dort aufgeschmolzen und durch zusätzliche Druckluft verdüst und auf den Grundwerkstoff aufgeschleudert.



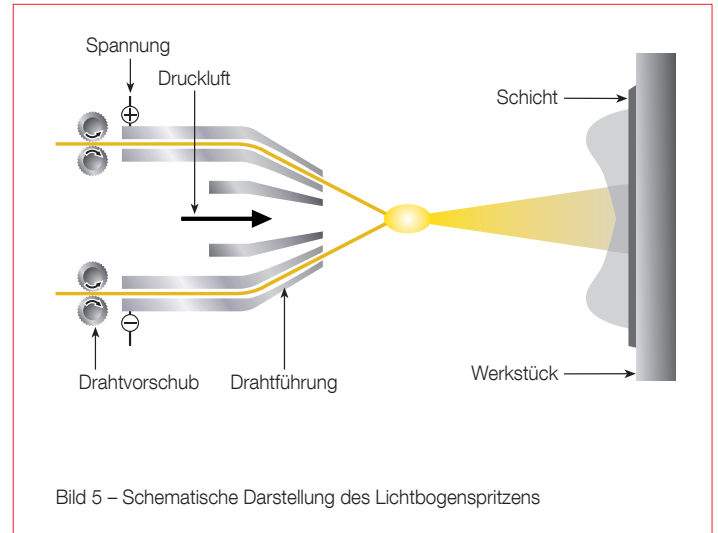
2.4.1.2 Pulverflamspritzen

Dieses Beschichtungsverfahren basiert auf dem gleichen Funktionsprinzip wie das Drahtflamspritzen, mit dem Unterschied, dass der Beschichtungswerkstoff pulverförmig ist. Dadurch kann eine größere Palette von Zusatzwerkstoffen eingesetzt werden, da sich nicht alle Spritzzusätze als Draht herstellen lassen.



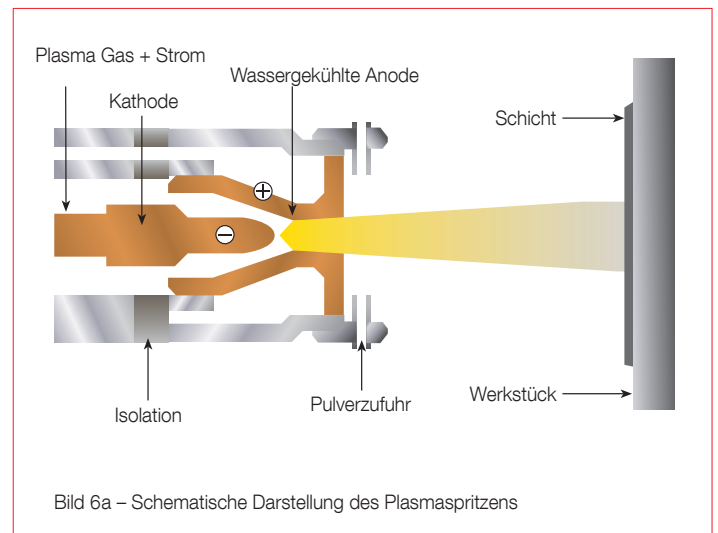
2.4.2 Lichtbogenspritzen

Beim Lichtbogenspritzen wird zwischen zwei metallischen Drähten meist gleicher Zusammensetzung ein Lichtbogen gezündet. Dieser führt zum Aufschmelzen des Drahtes. Mit einem Zerstäubergasstrom wird der geschmolzene Spritzwerkstoff auf das Substrat beschleunigt. Durch eine entsprechende Regelung der Drahtzuführung wird immer so viel Draht nachgeführt, wie abgeschmolzen wird, so dass ein konstanter Lichtbogen brennen kann.



2.4.3 Plasmaspritzen

Bild 6a zeigt schematisch das Prinzip des Plasmaspritzens. Zwischen einer Anode und einer Wolframkathode wird mittels Hochfrequenz ein Lichtbogen gezündet. Das zwischen den Elektroden hindurchströmende Gas (Ar, He, H₂, N₂ oder Gemische) wird dabei ionisiert, sodass ein mehrere Zentimeter langer Plasmastrahl entsteht. Die dort entstehenden Temperaturen können bis zu 16000 K erreichen. Der Spritzwerkstoff wird als Pulver außerhalb des Düsensystems in die Plasmaflamme injiziert und durch das Plasmagas auf die Substratoberfläche geschleudert.



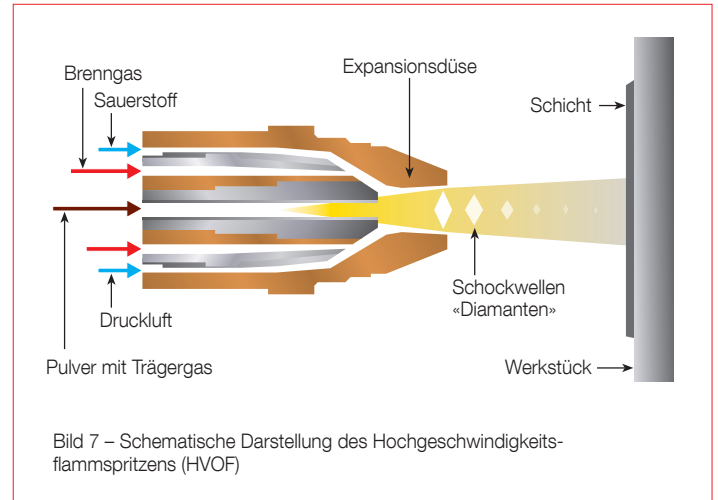
Eine für spezielle Anwendungen verwendete Variante ist das Plasmaspritzen unter kontrollierter Unterdruckatmosphäre. Im Gegensatz zum Beschichten unter Luft (atmosphärisches Plasmaspritzen APS) oxidieren die aufgeschmolzenen Partikel beim Vakuumplasmaspritzen (VPS) weniger und ergeben so Schichten höherer Qualität ^[3].



Bild 6b – VPS Plasmaspritzen

2.4.4 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF)

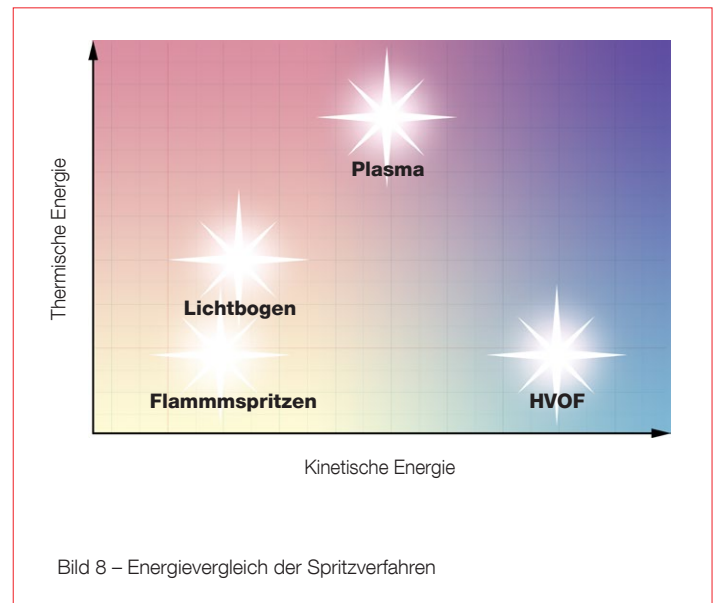
Das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF = high velocity oxy fuel spraying) gehört zu den neueren Verfahren des thermischen Spritzens und wird im Vergleich zum konventionellen Flammspritzen durch einen mit Überschall austretenden Gasstrahl charakterisiert. Dadurch sind die Auftreffgeschwindigkeiten der Teilchen auf das Substrat sehr viel größer, was verbesserte Schichteigenschaften zur Folge hat. Apparativ unterscheidet es sich vom Flammspritzen durch eine Expansionsdüse am Brennerende (Bild 7). Als Brenngase können neben Propan, Propylen, Acetylen und Wasserstoff auch Erdgas oder Flüssigbrennstoffe wie Kerosin verwendet werden.



2.4.5 Vergleich der Verfahren

Die oben erwähnten Verfahren unterscheiden sich grundlegend in der unterschiedlichen thermischen und kinetischen Energie, mit der die Spritzpartikel auf das Substrat aufgebracht werden. Die thermische Energie wird durch die erreichbare Flammentemperatur bestimmt und die kinetische Energie erhält das Teilchen aus der Gasgeschwindigkeit. In Bild 8 ist ein Energievergleich der Spritzverfahren dargestellt. Durch die hohen Temperaturen eignet sich das Plasmaspritzen besonders für Werkstoffe mit einem hohen Schmelzpunkt, wie Keramiken.

Als Spritzwerkstoffe für das HVOF sind vor allem solche Werkstoffe vorteilhaft zu verarbeiten, bei denen sich die hohe kinetische Energie in Verbindung mit der vergleichsweise niedrigen thermischen Energie positiv auf die Schichteigenschaften auswirkt, wie bei Hartmetallschichten. Von großem Interesse ist der Vergleich der Verfahren bezüglich der sich daraus ergebenden Schichten. In Tabelle 3 sind einige wichtige Eigenschaften von Beschichtungen, unterteilt nach Werkstoffgruppen, aufgelistet.



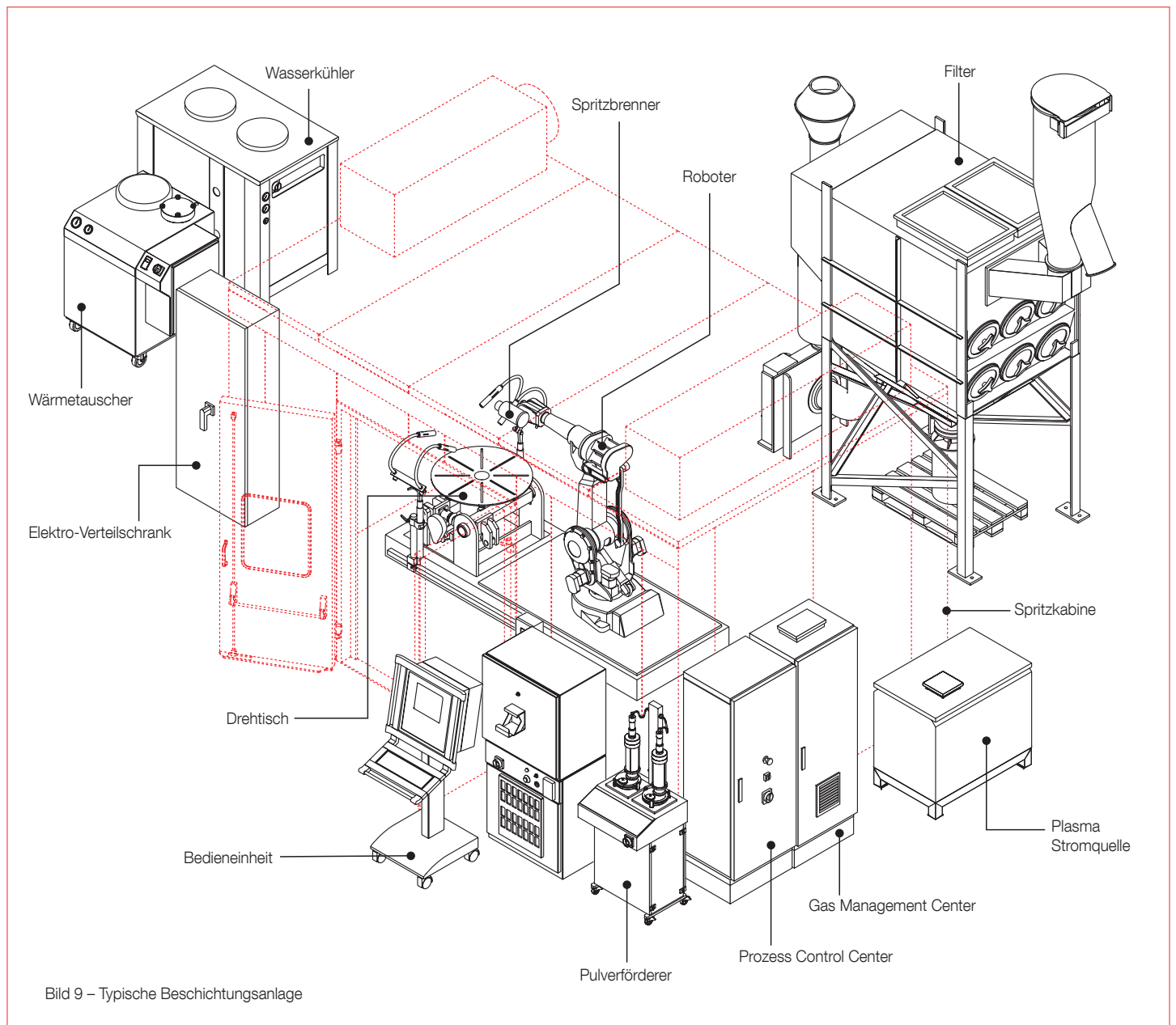
Eigenschaften, Merkmale		Schichtart	Pulverflamm	HVOF	Lichtbogen	Plasma
Gastemperatur	[°C]		3000	2600 – 3000	4000 (Arc)	12000 – 16000
Auftragsleistung	[kg/h]		2 – 6	1 – 9	10 – 25	2 – 10
Partikelgeschwindigkeit	[m/s]		bis 50	bis 700	ca. 150	bis 450
Haft(zug)festigkeit	[MPa]	Eisenmetalle	14 – 21	48 – 62	28 – 41	21 – 34
		NE-Metalle	7 – 34	48 – 62	14 – 48	14 – 48
		Selbstfließende Legierungen	83+ (verschmolzen)	70 – 80	15 – 50	---
		Keramiken	14 – 34	---	---	21 – 41
		Karbide	34 – 48	83+	---	55 – 69
Schichtdickenbereich	[mm]	Eisenmetalle	0.05 – 2.0	0.05 – 2.5	0.1 – 2.5	0.4 – 2.5
		NE-Metalle	0.05 – 5.0	0.05 – 2.5	0.1 – 5.0	0.05 – 5.0
		Selbstfließende Legierungen	0.15 – 2.5	0.05 – 2.5	---	---
		Keramiken	0.25 – 2.0	---	---	0.1 – 2.0
		Karbide	0.15 – 0.8	0.05 – 5.0	---	0.15 – 0.8
Härte (siehe auch Tabelle A1 im Anhang)	[HRC]	Eisenmetalle	35	45	40	40
		NE-Metalle	20	55	35	50
		Selbstfließende Legierungen	30 – 60	30 – 60	---	30 – 60
		Keramiken	40 – 65	---	---	45 – 65
		Karbide	45 – 55	55 – 72	---	50 – 65
Porosität	[%]	Eisenmetalle	3 – 10	< 2	3 – 10	2 – 5
		NE-Metalle	3 – 10	< 2	3 – 10	2 – 5
		Selbstfließende Legierungen	< 2 (verschmolzen)	< 2	---	---
		Keramiken	5 – 15	---	---	1 – 2
		Karbide	5 – 15	< 1	---	2 – 3

Tabelle 3 – Eigenschaften der verschiedenen Verfahren und Schichten in Abhängigkeit vom Beschichtungsverfahren (Richtwerte)

2.4.6 Infrastruktur

Neben dem Kernstück der Beschichtungsanlage, dem Brenner, sind noch eine Vielzahl von weiteren Aggregaten notwendig, um im industriellen Maßstab Beschichtungen aufzubringen. Bild 9 zeigt eine Beschichtungsanlage. In einer Kabine, die zum Schall- und Staubschutz dient, befindet sich die eigentliche Spritzanlage, deren Kernstück die Spritzpistole ist. Diese besitzt Zuleitungen für die Energie- und Gasversorgung, die Regel- und Steuereinheit und Flammüberwachung. Meist ist die Pistole an einem Roboter befestigt, der dann mit gezielten Bewegungen an das Bauteil fährt. Das

Bauteil selbst ist meist wiederum auf einer Manipulations-einheit, z.B. einem Drehtisch, befestigt. So können auch sehr komplizierte Geometrien beschichtet werden. Nicht zu vergessen ist die Entlüftungseinrichtung mit Filteranlage, die den sogenannten «Overspray», also das Pulver, das nicht auf dem Bauteil haftet, absaugt. Pulverstäube können sich u.U. selbst entzünden, so dass die gesamte Anlage brand- und explosionsgeschützt sein muss. Bild 26 auf Seite 21 zeigt eine moderne automatisierte Hochleistungs-Beschichtungsanlage.



2.5 Schichtaufbau

Thermisch gespritzte Schichten weisen herstellungsbedingt eine gewisse Porosität auf. Die höchsten Porositätswerte entstehen beim Flamm- und Lichtbogenspritzen; beim HVOF-Spritzen hingegen werden sehr dichte Schichten mit Porositäten unter 0,5% hergestellt. Typische Plasmaschichten weisen ca. 1 bis 2% Porenanteil auf.

Die Spritzschicht ist lamellar aufgebaut; der Brenner fährt wiederholt über die Oberfläche und spritzt die Schicht Lage für Lage mit einer typischen Lagendicke von 10 bis 20 µm. Zwischen den einzelnen Passagen kühlen die Partikel ab und können teilweise auf der Außenhaut eine im Schliffbild nachweisbare Oxidschicht bilden. Diese Oxidation kann minimiert werden, indem im Vakuum oder unter Schutzgasatmosphäre gearbeitet wird.

In Spritzschichten können sich auch nicht aufgeschmolzene Partikel oder Einlagerungen von «Overspray» befinden; das sind feinste Werkstoffpartikel, die eine Staubwolke um das Werkstück bilden und beim nächsten Überspritzen von der Flamme mitgerissen und in die Schicht eingelagert werden.

Bild 10 stellt eine lichtbogengespritzte Schicht aus X40Cr13. Man erkennt den geschichteten Aufbau und die vorhandene Porosität (die schwarzen Flächen). Die kreisförmigen Partikel sind nicht vollständig aufgeschmolzene, wieder erstarrte Teilchen. Die Dicke dieser Schicht kann bis zu mehreren mm betragen.

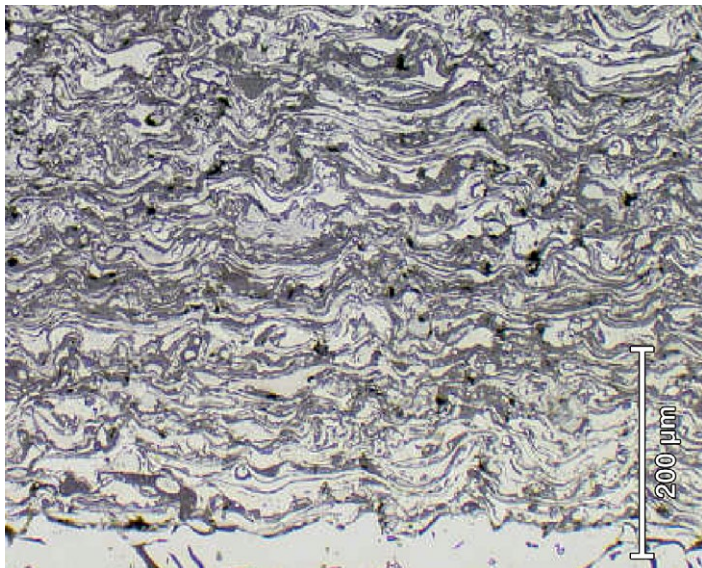


Bild 10 – Lichtbogenspritzschicht aus X40Cr13

Weitaus dichtere Schichten kann man mit dem HVOF Verfahren herstellen. In Bild 11 ist eine solche Schicht aus WC-(CoCr) dargestellt. Ein Porosität ist kaum noch zu erkennen. Die hellen Stellen bestehen aus der WCHartphase, die in eine duktile Matrix aus (Co, Cr) eingebettet ist. Hier liegt die typische Schichtdicke bei 0,2 bis 0,3 mm.

Thermische Spritzschichten zeichnen sich durch meist hohe Eigenspannungen aus, die auf die Erstarrungs- und Abkühlvorgänge zurückzuführen sind. Durch die Schrumpfung bei der Abkühlung der heißen Partikel entstehen Zugeigenspannungen. In Folge der Abhängigkeit des Verhältnisses der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Grundwerkstoff und Substrat können diese kompensiert werden und als Druckspannungen auftreten. Die Temperaturführung während des Beschichtens spielt deshalb eine besondere Rolle; entsprechend muss das Substrat entweder gekühlt oder sogar gewärmt werden.

Die Haftung von keramischen Spritzschichten auf einem Substrat entspricht manchmal nicht den gestellten Anforderungen. Um diese Haftung zu erhöhen, werden in gewissen Fällen Haftgrundschichten aufgebracht, meist NiAl- oder NiCr-Legierungen, eingesetzt als Haftvermittler zwischen Grundwerkstoff und keramischer Deckschicht. Solche Zwischenschichten können außerdem als zusätzliche Korrosionsschutzschichten eine wichtige Funktion übernehmen.

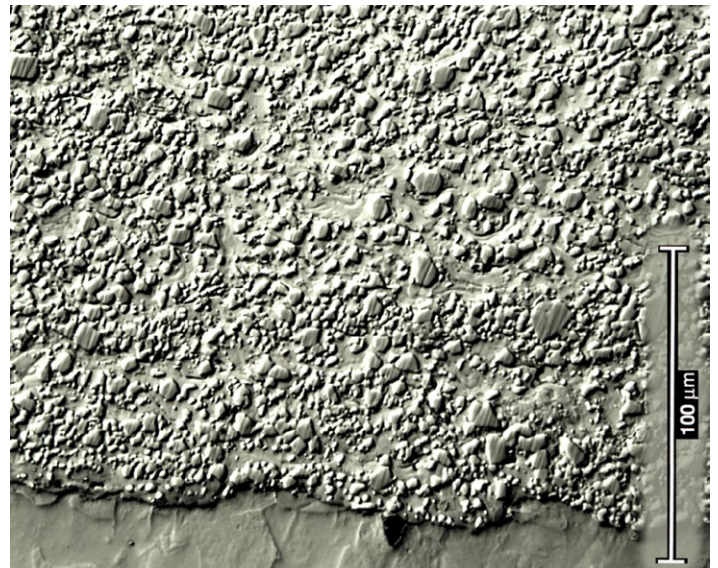


Bild 11 – HVOF-Spritzschicht aus WC-(Co,Cr)12

2.6 Schichteigenschaften

Wie schon ausgeführt sind verfahrensbedingt alle thermischen Spritzschichten mehr oder minder porös und durch den schichtweisen Auftrag besitzen sie einen anisotropen, lagenförmigen Aufbau. Diese Grundeigenschaften lassen sich in einem weiten Bereich variieren und können, je nach Anwendungsfall, nutzbar gemacht werden.

2.6.1 Verschleißschutz

Einer der wichtigsten Einsatzgebiete thermischer Spritzschichten ist der Verschleißschutz^[4]. In diesem Anwendungsgebiet werden Keramik und vor allem Hartmetalllegierungen eingesetzt. Die meist verwendeten Legierungen sind WC/Co oder WC/CoCr. Hier sind die karbidischen Hartphasen (WC), die einen ausgezeichneten Widerstand gegen abrasive und erosive Beanspruchung aufweisen, in eine duktile Matrix (Co) eingebettet.

2.6.2 Korrosionsschutz

Niedrig- und unlegierte Stähle und Gusseisenwerkstoffe sind wenig korrosionsfest und benötigen daher oft einen beständigen Oberflächenschutz. Dieser kann durch flammgespritzte Schichten aus Aluminium oder Zink erzeugt werden. Hauptanwendungsgebiet ist der Brückenbau und der Off-Shore Bereich. Hochtemperaturschutzschichten sind MCrAlY Schichten, die meist unter Vakuum aufgebracht werden.

2.6.3 Isolierung (thermisch/elektrisch)

Keramische Werkstoffe sind ausgezeichnete thermische und elektrische Isolatoren. Außerdem besitzen sie eine gute Oxidations- und Verschleißbeständigkeit. Diese Eigenschaften werden im Motoren- und Turbinenbau für Wärmedämmschichten nutzbar gemacht. Die Schichten senken die Bauteiltemperatur, wodurch die Lebensdauer verlängert wird. Andererseits lässt sich bei gleicher Bauteiltemperatur der Wirkungsgrad aufgrund der reduzierten Kühlleistung verbessern. Diese Schichtsysteme bestehen aus einer Haftschiicht, meist aus einer metallischen und oxidationsbeständigen MCrAlY-Schicht (M = Fe, Ni, Co) und einer keramischen Deckschicht. Aufgrund der guten Thermoschockbeständigkeit wird meist eine Yttrium-stabilisierte Zirkonoxidschicht als Deckschicht verwendet.

2.7 Nachbehandlung

Aufgrund ihrer Oberflächenrauheit und der Porosität müssen Spritzschichten häufig nachbearbeitet werden. Neben den, in der Folge beschriebenen Verfahren gibt es noch weitere Methoden, wie Lagerumschmelzen, Nitrieren, heißisostatisches Pressen oder Kugelstrahlverdichten, die jedoch nur begrenzt Einsatz finden.

2.7.1 Mechanische Nachbehandlung

Thermisch gespritzte Schichten besitzen eine raue Oberfläche mit Rautiefen zwischen 5 und 20 µm (siehe Tabelle A1 in Anhang). Da für die Bauteile oftmals ein bestimmtes Endmaß und Oberflächengüte vorgegeben sind, macht dies eine Nachbearbeitung erforderlich. Je nach aufgebracht Schicht können die Spritzschichten durch konventionelles Drehen oder durch Schleifen/Läppen auf ihr Endmaß bearbeitet werden.

2.7.2 Versiegeln

Das Versiegeln von Spritzschichten dient in erster Linie dem Abdichten von offenen Poren und Mikrorissen in der Spritzschicht, um diese vor korrosiven Medien zu schützen. Diese würden sonst zum Grundmaterial dringen und die Schicht unterwandern (Unterkorrosion).

Als Siegler werden Harze oder Wachse eingesetzt, die im flüssigen Zustand in die Poren eindringen und dort dann aushärten (meist unter Wärme). Die Siegler werden aufgesprüht oder aufgepinselt. Um eine vollständige Abdichtung zu erhalten, muss der Vorgang meist mehrmals wiederholt werden.

Sie werden auch eingesetzt, um den Oberflächen «Anti-Hafteigenschaften» zu verleihen (PTFE-Basis).

2.7.3 Thermische Nachbehandlung

Bei den thermischen Nachbehandlungen unterscheidet man zwischen dem Diffusionsglühen zur Erhöhung der Haftung zwischen Grundwerkstoff und Schicht und dem Einschmelzen «selbstfließender Legierungen». Die «selbstfließenden Legierungen» bilden eine spezielle Gruppe unter den Spritzwerkstoffen, da sie nach dem Aufspritzen in einem zweiten Schritt eingeschmolzen werden. Diese Legierungen bestehen aus einem hohen Anteil an Metalloiden, wie Bor

und Silizium, sowie aus Chrom, Eisen und Nickel, welche im Spritzpulver elementar als Gemisch vorliegen. Beim Spritzprozess kommt es nur teilweise zur Bildung von intermetallischen Phasen aus den elementaren Ausgangspulvern. Das nachträgliche Einschmelzen bewirkt eine vollständige Umwandlung der beteiligten Stoffe in harte Silizid- und Boridphasen. Darüber hinaus bewirkt es die Bildung einer Diffusionsschicht zum Grundmaterial (verbesserte Haftung) und die vollständige Reduzierung von Oberflächenporen, so dass eine vollkommen dichte Oberfläche entsteht. Diese Schichten weisen neben einer sehr hohen Härte auch eine extrem gute Korrosionsbeständigkeit auf.

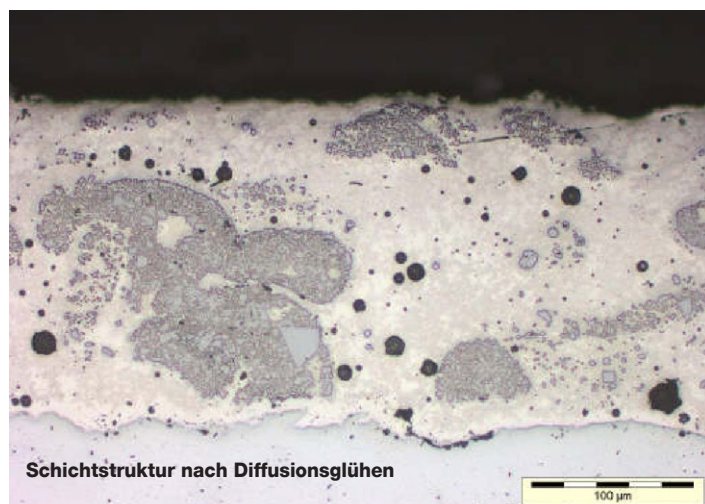
Am weitesten verbreitet ist das manuelle Einschmelzen mit einer Acetylen/Sauerstoff-Flamme, aber auch das Einschmelzen im Ofen, mit Laser- oder Elektronenstrahl oder mit Induktionswärme ist möglich. Die Temperaturen, die dazu nötig sind, liegen im Bereich zwischen 1000 und 1200 °C.

In Bild 12 ist eine solche Ni-Cr-B-Si-Legierung vor und nach dem Einschmelzen dargestellt. Man erkennt deutlich die Homogenisierung des Gefüges, die reduzierte Porosität und die porenfreie Oberfläche der eingeschmolzenen Schicht.

2.8 Charakterisierung der Schichten

Neben den für den jeweiligen Einsatzbereich wichtigen Eigenschaften der Schicht gibt es einige Merkmale, die mit relativ wenig Arbeitsaufwand durchgeführt werden können und zu den standardisierten Messungen einer Qualitätskontrolle gehören. Dies sind:

- Visuelle Kontrolle
- Schichtdickenmessung
- Rauheitsmessung



Ist es notwendig mitlaufende Proben, d.h. spezielle Probepfättchen, die unter denselben Herstellungsbedingungen gespritzt wurden, zu untersuchen, so werden meist die folgenden Eigenschaften bestimmt, die weitere Aussagen über die Qualität der gespritzten Schicht zulassen:

- Schliffherstellung zur Bestimmung der genauen Schichtdicke, der Porosität und des Gefüges, Untersuchung auf Mikrorissbildung und ungeschmolzener Partikel/Oxide
- Härtemessung im Schliff
- Zughaftfestigkeit mittels spezieller Haftzugproben
- Biegeprobe

Die Bestimmung dieser Eigenschaften erfolgt an genormten Probengeometrien, deren genauere Durchführung in verschiedenen Normen [6] nachzulesen ist.

Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl anderer Möglichkeiten, Schichten zu charakterisieren, die jedoch recht aufwendig sind und in der Praxis als übliches Untersuchungsverfahren wenig Anwendung finden. Dazu gehören die verschiedenen Methoden der Elementanalyse, Ritztest, tribologische Untersuchungen, Spannungsanalysen sowie Aussagen zum Korrosions- und Abrasionsverhalten. Diese Methoden werden häufig bei Forschungsarbeiten über Werkstoff- oder Verfahrensentwicklungen eingesetzt. Da es sich dabei um zerstörende Prüfungen handelt, sind sie für eine Produktion wenig geeignet und kommen nur selten als mitlaufende Proben zur Anwendung.

Viele Endanwender haben ihre eigenen Spezifikationen und Prüfverfahren entwickelt, nach denen ihre Schichten charakterisiert und beurteilt werden. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrt werden sehr strenge Richtlinien angewandt.

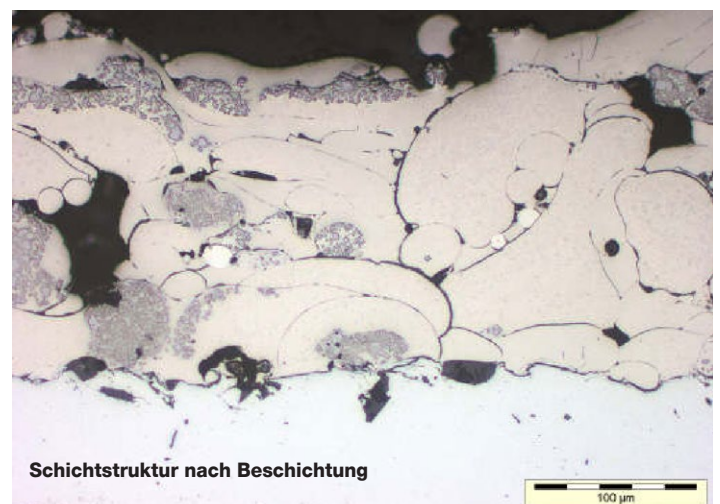


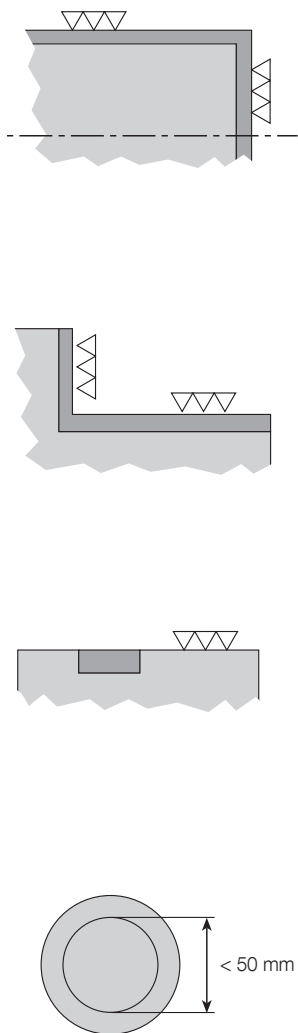
Bild 12 – Selbstfließende Schichten

3 Anwendungen

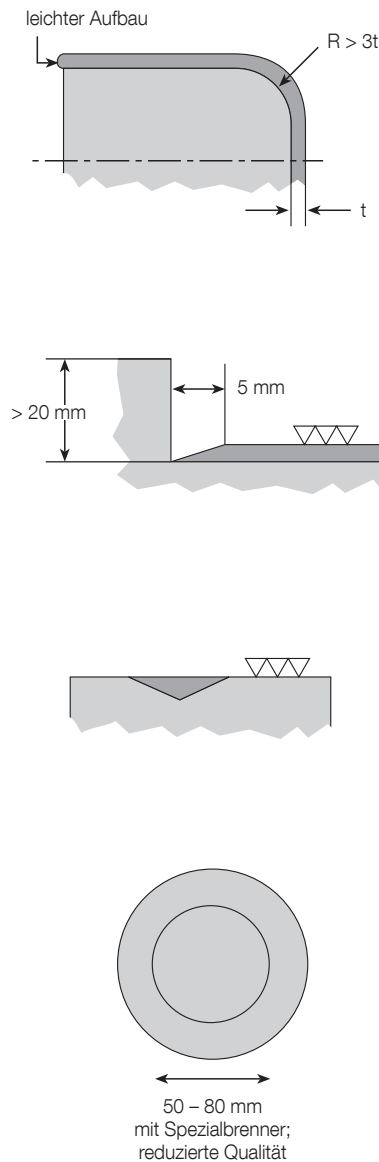
Um die Vorteile von Spritzschichten nutzen zu können, bedarf es neben der richtigen Auswahl der Werkstoffe, des Herstellungsverfahrens, der Prozessparameter etc., auch der geeigneten Konstruktion des Bauteils.

Sehr gut zum Beschichten geeignet sind rotationssymmetrische Bauteile, wie Zylinder, Wellen, Scheiben oder ebene Flächen. Bild 13 illustriert die Eigenschaften beschichtungsgerechter Konstruktionen.

nicht Machbar



Machbar



bevorzugte Konstruktion

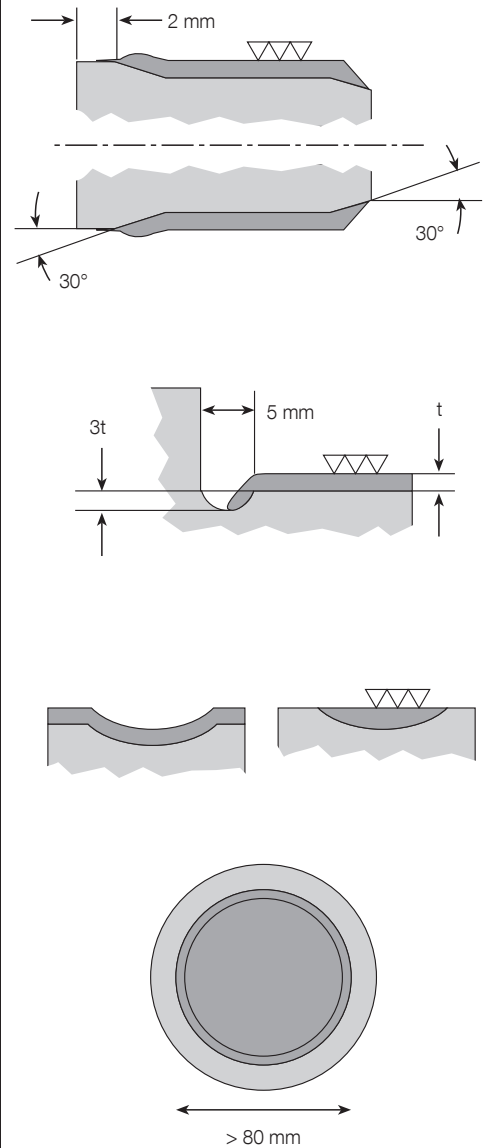


Bild 13 – Beschichtungsgerechte Konstruktion

3.1 Neuteilbeschichtung

3.1.1 Hartchromersatz

Thermisch gespritzte HVOF-Beschichtungen können als Alternative zur Hartverchromung verwendet werden, um Verschleiß- und Korrosionsschutz unter Verwendung von reinem Chrom und verschiedenen Hartmetall-Beschichtungen zu liefern [5]. Die Eigenschaften von HVOF-Schichten übersteigen zum Teil jene von Chrom Schichten und die Bearbeitungszeiten sind in der Regel deutlich kürzer. Die reflektierende Oberfläche der Hartverchromung kann durch Schleifen und Läppen der HVOF-Schicht erreicht werden. Ein Beispiel für die Anwendung von Thermischen Schichten anstelle von Hartchrom sind Fahrwerkskomponente im Luftverkehr (Bild 14).



Bild 14 – Bugfahrwerk eines F5 Tigers mit WC/CoCr Beschichtung

3.1.2 Implantate

Für eine feste und dauerhafte Verankerung von orthopädischen Implantaten, wie z.B. Hüftgelenkprothesen, ist die Oberflächenbeschaffenheit von größter Bedeutung. Die Metco™PLANT-Schichten von Oerlikon Metco werden im Vakuum plasmagespritzt und erhalten durch eine gezielte Prozessbeeinflussung eine stark zerklüftete Oberfläche, in die das Knochengewebe richtiggehend hineinwachsen kann. Metco™PLANT-Schichten gibt es als biokompatible Titanschicht (Bild 15) oder als bioaktive Hydroxylapatit-schicht, welche das Anwachsen des natürlichen Knochengewebes an die Prothesenoberfläche aktiv beschleunigt.



Bild 15 – Biokompatible Metco™PLANT Titanschicht auf Hüftgelenk

3.1.3 Textilmaschinenteile

In langjähriger Zusammenarbeit mit Textilmaschinenherstellern wurden die Schichtsysteme Metco™TEX entwickelt. Diese zeichnen sich durch eine präzise Definition der mit unterschiedlichen Bearbeitungsmethoden erzeugten Morphologie und Topologie der Oberfläche aus. Bei faden-, bzw. faserberührenden Bauteiloberflächen ist die Einstellung einer speziellen Oberflächenstruktur besonders wichtig, um eine maximale Schonung der Fasern zu erreichen. Diese Schichten sind aus oxidischer Keramik, meist mit einer Ni-Zwischenschicht zum besseren Korrosionsschutz unterlegt. Anwendungsbeispiele sind in Bild 16 dargestellt.



Bild 16 – Diverse Textilmaschinenteile

3.1.4 Gasturbinen

In Gasturbinen, sowohl stationären als auch fliegenden, werden thermische Spritzschichten an vielen verschiedenen Stellen mit unterschiedlichen Funktionen eingesetzt. Schutzschichten gegen Hochtemperaturkorrosion, Wärmedämmschichten, Einlaufschichten oder das artgleiche Auftragen von Superlegierungen zur Reparatur der Bauteile, sind einige Beispiele (siehe Bild 17).

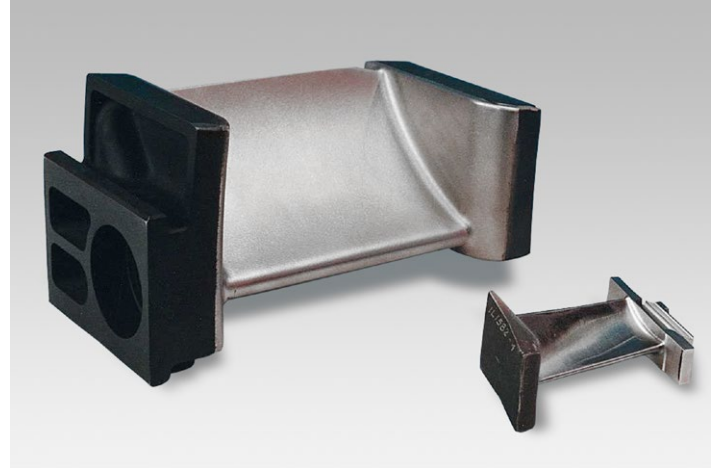


Bild 17 – Beschichtete Gasturbinenschaufeln

3.1.5 Druckindustrie

In Druckmaschinen werden beschichtete Walzen und Zylinder im großen Umfang eingesetzt. Zusammen mit namhaften Partnern aus der Papier- und Druckindustrie wurden verschiedene Metco™PRINT-Schichten entwickelt. So weisen die plasmagespritzten Chromoxidschichten für Rasterwalzen sehr feine Gefügestrukturen auf, die sich positiv auf die feine Rasterung durch Lasergravur auswirken (Bild 18).

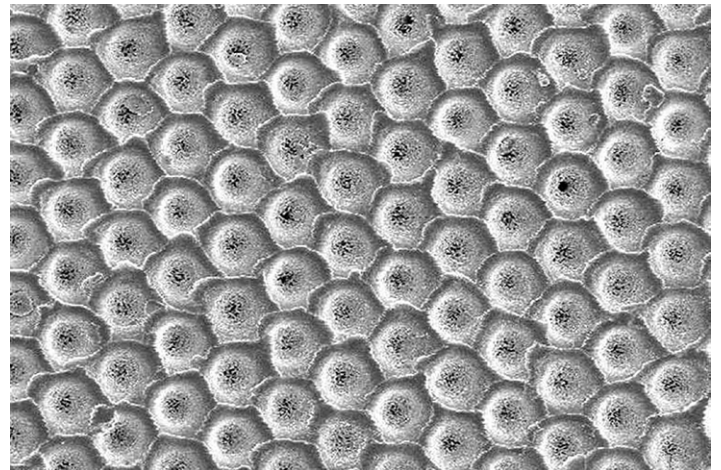


Bild 18 – Lasergravur einer mit Metco™PRINT beschichteten Rasterwalze

3.1.6 Allgemeine Anwendungen im Maschinenbau

In der Maschinenindustrie gibt es die vielfältigsten Anwendungen. Bild 19 zeigt z.B. eine mit Weißmetall beschichtete Planetenachse, wie sie in Zementwerken eingesetzt wird. Diese speziell porös hergestellte Schicht kann das Öl zur Schmierung aufnehmen und so ein Fressen der Lagerteile verhindern.

Weitere Anwendungsbeispiele sind Kolbenringe für Dieselmotoren, Kolbenstangen in Verdichtern, Lager in Pumpen, Ventildeckel, usw.

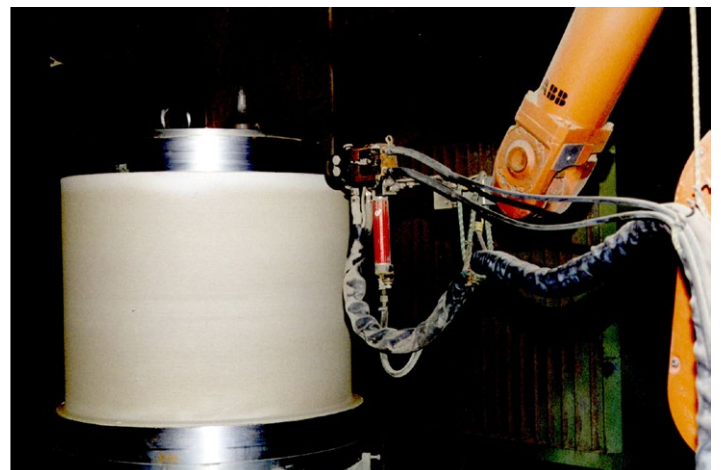


Bild 19 – Planetenachse mit Weißmetall beschichtet

3.1.7 Konsumgüter

Obwohl die meisten Anwendungen von thermischen Beschichtungen für sehr spezielle Bauteile entwickelt worden sind, konnten sich auch solche in der Konsumgüterindustrie durchsetzen. Bild 20 zeigt eine Bügeleisensole, auf die eine keramische Schicht gegen Verschleiß aufgebracht wurde. Anschließend wird diese Schicht mit einem Kunststoffbelag versehen, der Antihafteigenschaften besitzt. Ähnliche Schichten sind auch auf den nichthaftenden Bratpfannen zu finden.

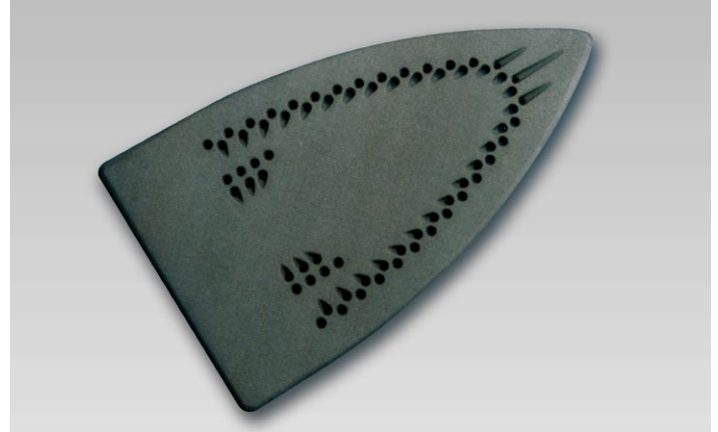


Bild 20 – Beschichtete Bügeleisensole

3.1.8 Automobilindustrie

Neben der Beschichtung zahlreicher Kleinteile wird sich bei den Motorblöcken aus Alu-Guss die neueste Entwicklung von Oerlikon Metco durchsetzen. Die Zylinderbohrungen der Motoren werden mittels eines speziellen rotierenden Plasmaprenners (Bild 21), die auch kleine Bohrungen innen beschichten kann, mit einer verschleißbeständigen Schicht versehen.

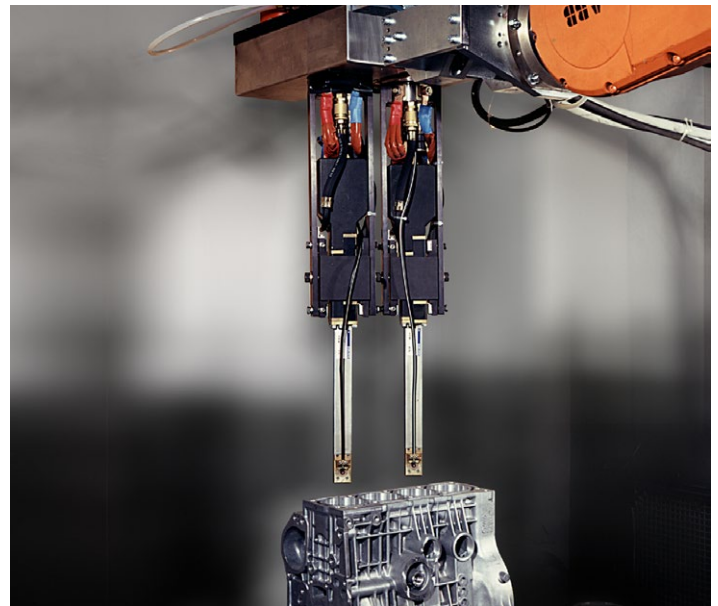


Bild 21 – Dual-Rotaplasma™

3.1.9 Stahlindustrie

Die in der Stahlverarbeitung eingesetzten Walzen sind sehr starken thermischen Belastungen durch den heißen Stahl ausgesetzt. Darüber hinaus muss mit Schlackeanlagerung, oder bei Verzinkungsanlagen mit korrosivem Angriff durch flüssiges Zink gerechnet werden. Sowohl für Reparatur- als auch Neuteile wurden verschiedene Metco™ STEEL Schichtsysteme von Anwendern qualifiziert (Bild 22).



Bild 22 – HVOF Beschichtung einer Potrolle

3.1.10 Papierindustrie

Walzen in der Papierindustrie sind den verschiedensten Angriffen, wie Verschleiß, chemischen Angriff durch Farben, thermischer Belastung bei beheizten Walzen oder mechanischer Belastung durch Reinigungsschaber, ausgeliefert. Gleichzeitig müssen sie eine hohe Oberflächengüte über eine möglichst lange Einsatzdauer aufweisen. Die Metco™CAL-Schichten, speziell für Kalandervalzen entwickelt, werden diesen Anforderungen gerecht (Bild 23).



Bild 23 – Metco™CAL Beschichtung nach dem Polieren

3.1.11 Luftfahrt

Neben den schon bei den Gasturbinen erwähnten Bauteilen, werden noch weitere Beschichtungen in Flugzeugen eingesetzt. Bild 24 zeigt eine innenbeschichtete Brennkammer.

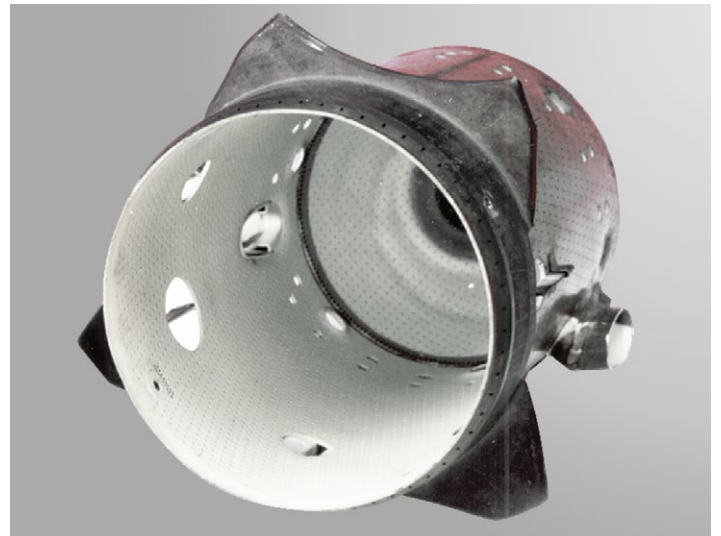


Bild 24 – Brennkammer

3.2 Reparatur

Das thermische Spritzen kann auch als Reparaturverfahren eingesetzt werden, um Bauteile mit Untermaß wieder aufzubauen. Die Schichten können durch anschließendes Drehen oder Schleifen auf Fertigmaß bearbeitet werden. Als Reparaturschichten werden legierte Stähle, Ni-Cr, Ni-Al oder Ni-Cr-Al eingesetzt.

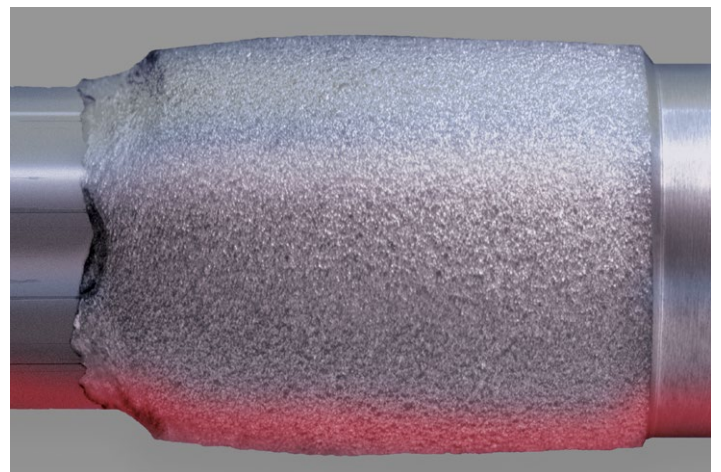


Bild 25 – Reparaturbeschichtung

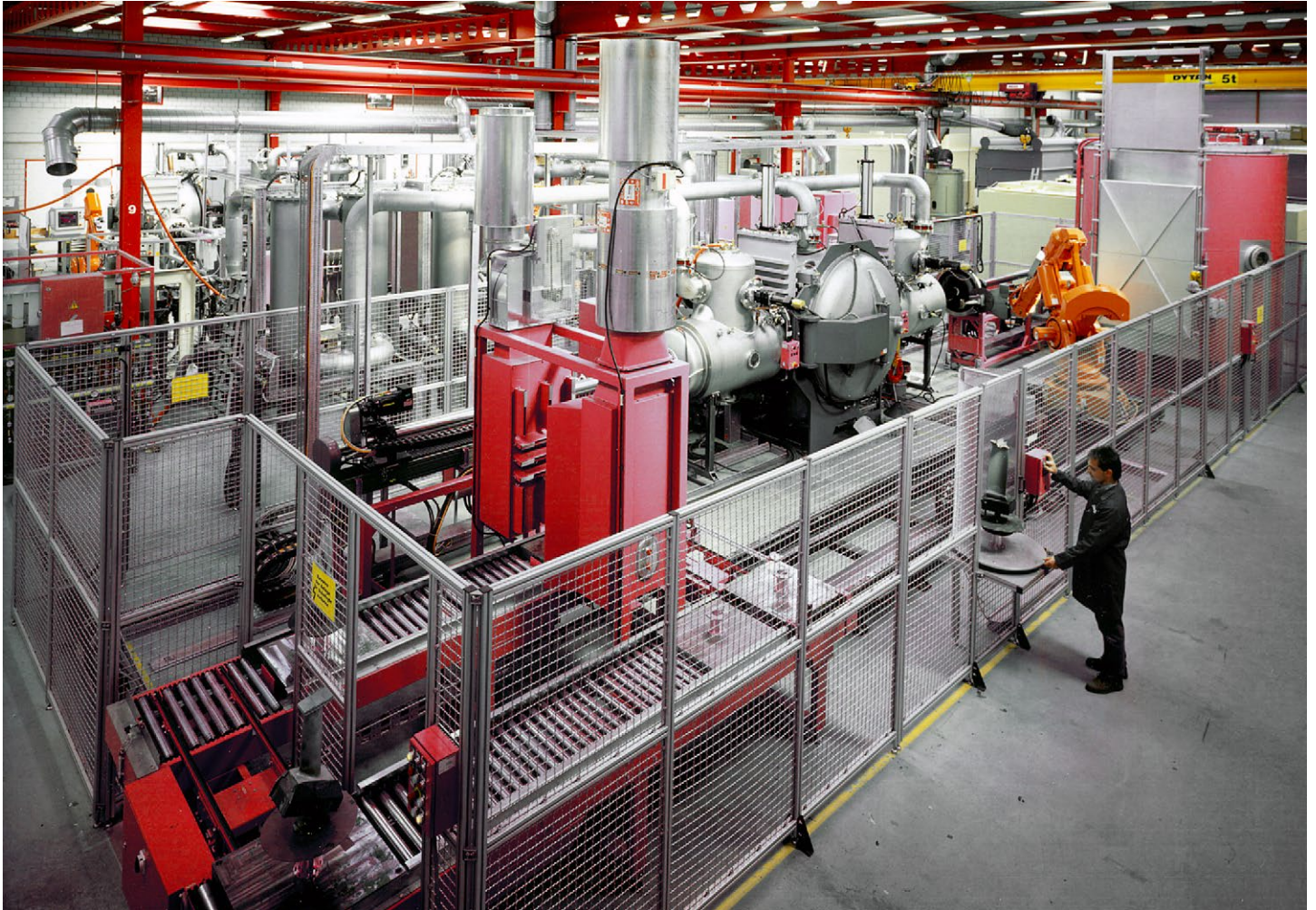


Bild 26 – Moderne LPPS Hochleistungs-Produktionsanlage zur Beschichtung von Gasturbinschaufeln

4 Zusammenfassung

Wie bei wohl keinem anderen Beschichtungsverfahren gibt es beim thermischen Spritzen nahezu keine Begrenzung in den Kombinationsmöglichkeiten Schichtwerkstoff/Substrat sowie in der Auswahl des Spritzwerkstoffs. Daraus gibt sich ein sehr breites Anwendungsspektrum der thermischen Spritzschichten, sowohl im Bereich der Neuteilfertigung als auch bei Reparaturen. Die Eigenschaften solcher Schichten sind aufgrund dieser Vielfalt in weiten Bereichen einstellbar und können auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnitten werden.

Dies setzt jedoch die langjährige Erfahrung und das Know-how von Spezialisten voraus. Mit seinen Kenntnissen im Bau von thermischen Spritzanlagen, mit der Herstellung von Spritzpulvern im eigenen Hause sowie der langjährigen Erfahrung bei der Beschichtung von Einzel- und Serienteilen in eigenen Beschichtungsfirmen besitzt Oerlikon Metco ein kaum zu übertreffendes Wissen auf diesem Gebiet. Dadurch ist Oerlikon Metco der ideale Ansprechpartner auf allen Gebieten des thermischen Spritzens.

5 Anhang

5.1 Tabellen

Rockwell HRC	Vickers HV	Brinell HB	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]
80	1865		
79	1787		
78	1710		
77	1633		
76	1556		
75	1478		
74	1400		
73	1323		
72	1245		
71	1160		
70	1076		
69	1004		
68	942		
67	894		
66	854		
65	820		
64	789		
63	763		
62	746		
61	720		
60	697		
59	674		
58	653	620	2180
57	633	599	2105
56	613	580	2030
55	595	570	1995
54	577	551	1920
53	560	532	1845
52	544	515	1780
51	528	495	1700
50	513	485	1665
49	498	475	1630
48	484	456	1555
47	471	447	1520
46	458	437	1485
45	446	423	1450
44	434	409	1385

Rockwell HRC	Vickers HV	Brinell HB	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
37	363	340	1150
36	354	335	1140
35	345	330	1115
34	336	323	1095
33	327	314	1060
32	318	304	1030
31	310	295	995
30	302	285	965
29	294	280	950
28	286	271	915
27	279	266	900
26	272	257	865
25	266	252	850
24	260	247	835
23	254	242	820
22	248	238	800
21	243	233	785
20	238	228	770

Tabelle A1 – Härtevergleich im Bereich HRC 80 – 20 (ungefähre Vergleichswerte)

Rauheitsklasse	Ra [μm]	Ra [μin]	Rz [μm]
N0	0.0125	0.5	
N1	0.025	0.1	0.29
N2	0.05	2	0.55
N3	0.1	4	0.91
N4	0.2	8	1.74
N5	0.4	16	2.6
N6	0.8	32	4.65

Rauheitsklasse	Ra [μm]	Ra [μin]	Rz [μm]
N7	1.6	64	7.87
N8	3.2	128	15.6
N9	6.3	250	40
N10	12.5	500	63
N11	25	1000	100
N12	50	2000	160

Tabelle A2 – Rauheitswerte (ungefähre Vergleichswerte)

5.2 Literaturhinweise

-
- [1] DIN EN 657; Thermal Spray – Begriffe, Einteilung; Beuth-Verlag, Berlin (1994)
 - [2] H.D. Steffens, J. Wilden: "Moderne Beschichtungsverfahren", DGM-Verlag, ISBN 3-88355-223-2, (1996)
 - [3] P. Huber: "Vakuumpulverstrahlen", Oberfläche surface, 10 (1992), 8
 - [4] H. Simon, M. Thoma: "Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe", Hanser-Verlag, München (1985)
 - [5] E. Lugscheider, H. Reymann: «Hochgeschwindigkeitsflammspritzte Chromschichten zum Verschleiß- und Korrosionsschutz», Schweißen und Schneiden, 50 (1998), 44
 - [6] DIN 50600; Metallographische Gefügebilder, Beuth-Verlag, Berlin
DIN EN 582 Ermittlung der Haftzugfestigkeit, Beuth-Verlag, Berlin (1994)
DIN EN 10109 Teil 1; Härteprüfung, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
DVS 2310 Teil 2; Anleitung zur Schliffherstellung, DVS, Düsseldorf, (1989)
-

Thermische Spritzen

Fortschrittliche technologische Lösungen und Dienstleistungen



Perfekte Oberflächen durch optimale Werkstoffe und innovative Technologien

Oerlikon Metco bietet anwendungsorientierte Lösungen und Dienstleistungen zum Schutz von Oberflächen:

- Technologische Komplettlösungen für das thermische Spritzen und andere fortschrittliche Verfahren sowie die dafür eingesetzten Geräte und Materialien.
- Integrierte Systeme
- Spezialisierte Oberflächenbeschichtungen mittels modernster Technologien
- Technischer Service – Beratung – Schulung – Betreuung

Wir unterhalten ein umfassendes Netzwerk von Produktionsstätten, Verteilzentren und Servicestellen zur Unterstützung von Unternehmen aus Luft- und Raumfahrt, Automobilherstellung, Energieerzeugung und weiteren Schlüsselindustrien.

Produktivitäts- und Gewinnsteigerung mit Lösungen von Oerlikon Metco. Besuchen Sie unsere Webseite unter www.oerlikon.com/metco oder senden Sie uns ein E-Mail an info.metco@oerlikon.com.

Metco Joining & Cladding

Metco Joining & Cladding ist eine führende Marke für Verbindungstechnik und Auftragsschweißlösungen, einschliesslich Oberflächenbeschichtungen, Löten, Laserauftragsschweissen und Plasmapulverauftragsschweissen. Wir sind bereits seit 1970 im Geschäft. Unser individuelles und umfassendes Portfolio an Werkstoffen, das von Pulvern, Drähten, Stäben über Elektroden bis hin zu Hartlötpasten und -bändern reicht, kommt unseren Kunden zugute. Darüber hinaus erfüllen diese Produkte die anspruchsvollen Anforderungen von Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Energiewirtschaft, Bergbau, Öl- und Gasindustrie sowie Landwirtschaft. Metco Joining & Cladding ist weltweit vertreten und kann so in unmittelbarer Nähe zum Kunden umfassende Fachkenntnisse und Lösungen anbieten, auch in Kombination mit unserer breiten Palette an Werkstoffen. Die Marke Metco Joining & Cladding gehört zum international agierenden Oerlikon Konzern (SIX: OERL), der seinen Hauptsitz in der Schweiz hat.

Änderungen vorbehalten.