

Thermisches Spritzen in der Luftfahrtindustrie

Grünendick, T.

Thermische Spritzschichten sind heute bei der Gestaltung, Fertigung und Reparatur von Flugtriebwerken unverzichtbar. Sie erfüllen die ökologischen und ökonomischen Anforderungen bei gleichzeitiger hoher Zuverlässigkeit. Der Artikel gibt einen Überblick über die in der Luftfahrtindustrie angewendeten thermischen Spritzverfahren.

Thermal-spray coatings are indispensable in the design, manufacture and repair of numerous components of aero-engines. In most cases they meet the demands regarding economical and ecological requirements as well as for operational dependability. This article gives a general prospect of the most frequently used applications of thermally sprayed coatings in the aircraft industry.

1 Einführung

Die Grundidee des thermischen Spritzens ist auf die Beobachtung von M. Schoop um die Jahrhundertwende zurückzuführen. Beim Schießen mit Bleikugeln prallten mehrere Geschosse gegen eine Mauer und blieben als plattgedrückte Bleimassen haften. Teilweise schlugen die Kugeln dicht nebeneinander auf und bildeten Vereinigungen, die einer Verschweissung glichen.

Auf der Grundlage dieser Beobachtungen entwickelte der Schweizer Ingenieur Schoop eine Metallspritzpistole (1913), welcher der Hauptverdienst an dem Erreichen des heutigen hohen Standes und an den Erfolgen des Metallspritzverfahrens zugeschrieben wird /1/.

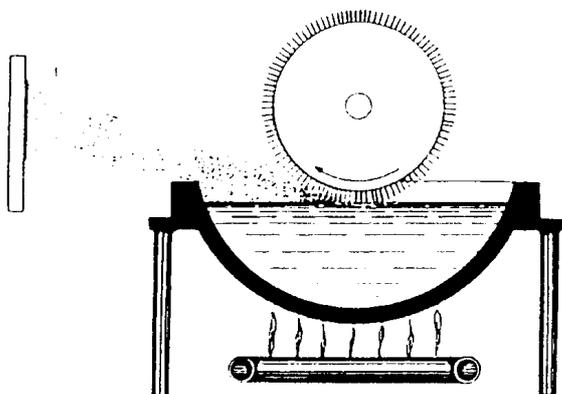


Bild 1: Schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Aufschleudern geschmolzenen Metalls durch eine am Umfang mit Nadeln besetzte rotierende Scheibe /2/

Mit der Einführung der Strahltriebwerke in den 60iger Jahren und der Weiterentwicklung der Spritzverfahren wurden thermische Schutzschichten in der Luftfahrt industriell eingesetzt. Der Erfolg der thermischen Spritzschichten war in keiner anderen Branche während der Markteinführung so groß wie hier.

2 Thermische Spritzverfahren

Das thermische Spritzen ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem der Spritzzusatz (Pulver oder Draht; Metall oder Keramik) kontinuierlich geschmolzen und mit entsprechender Geschwindigkeit auf die Werkstoffoberfläche geschleudert wird.

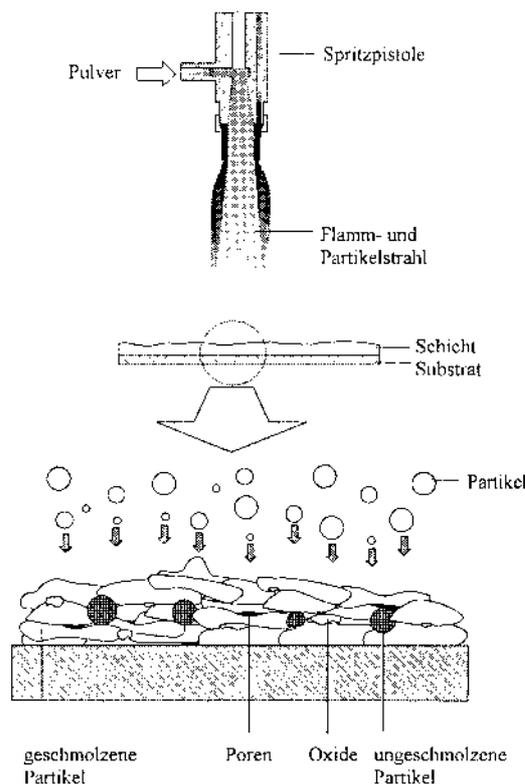


Bild 2: Prozessprinzip /3/

Die dabei entstehende Spritzschicht wird durch nebeneinander und aufeinanderliegende Lagen gebildet, die aus einer Anhäufung von abgeflachten und lamellenförmigen Tröpfchen bestehen (**Bild 2**). Die Spritzschichten sind daher meistens härter, spröder und poröser als der Ausgangswerkstoff.

In der Luftfahrtindustrie werden überwiegend die Verfahren Flamspritzen, Hochgeschwindigkeitsflamspritzen und Plasmaspritzen im Vakuum oder an der Atmosphäre angewendet.

2.1 Flamspritzen

Das Flamspritzen wird zur Oberflächenbeschichtung metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe verwendet. Das Spritzgut, Draht oder Pulver, wird durch eine Acetylen-Sauerstoff-Flamme auf- bzw. angeschmolzen und durch die Ausdehnung des Brenngases in Verbindung mit dem Trägergas auf die Werkstückoberfläche geschleudert (Partikelgeschwindigkeit 50m/Sek). Das Spritzgut ist durch den Drahtvorschub oder die Treibgasmenge dosierbar und wird bestimmt durch die gewünschte Auftragsleistung sowie den Aufschmelzgrad. Das Werkstück wird von der Flamme nicht erfasst und bleibt relativ kalt. Ein typischer Anwendungsfall dieses Beschichtungsverfahrens stellen die Einlaufbeläge im Triebwerksbau dar.

2.2 Hochgeschwindigkeitsflamspritzen

Die Verbrennung beim Hochgeschwindigkeitsflamspritzen erfolgt kontinuierlich in einer Brennkammer (Acetylen, Propan, aber auch flüssige

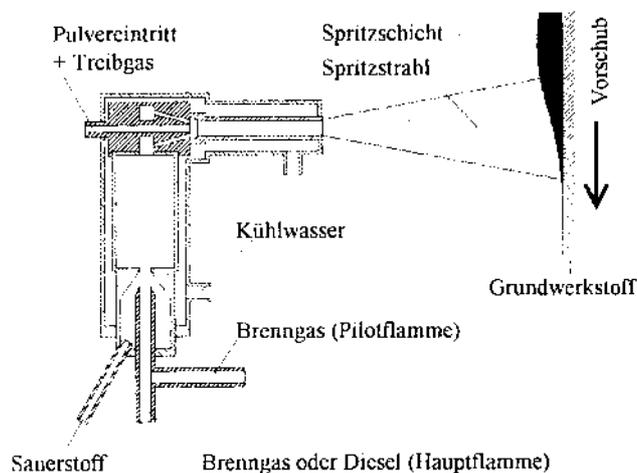


Bild 3: Hochgeschwindigkeitsflamspritzen /1/

Brennstoffe wie Diesel oder Kerosin). Die in der Brennkammer erzeugten Brenngasdrücke von 3-7 bar in Verbindung mit einer nachgeordneten Expansionsdüse bewirken eine besonders hohe Strömungsgeschwindigkeit im Gasstrahl (**Bild 3**). Der pulverförmige Spritzzusatz wird in den Gasstrahl mittig eingeführt, beschleunigt und mit sehr hoher Geschwindigkeit auf das Bauteil geschleudert (550 m/Sek) /4/.

Die hohe kinetische Energie und die begrenzte thermische Belastung des Spritzpulvers ermöglicht bei diesem Verfahren sehr porenarme Schichten und vermindert beispielsweise bei Verschleisschutzschichten die Umwandlung von Karbiden in Mischkarbide (WC/Co und $Cr_3C_2/NiCr$).

2.3 Plasmaspritzen

Das Plasmaspritzen, atmosphärisch oder in Vakuumkammern, ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem der pulverförmige Spritzzusatz in oder außerhalb der Spritzpistole durch die Plasmaflamme auf- bzw. angeschmolzen und auf die Werkstoffoberfläche geschleudert wird (Partikelgeschwindigkeit 450m/Sek). Das Plasma wird durch einen Lichtbogen erzeugt, der zwischen einer stabförmigen,

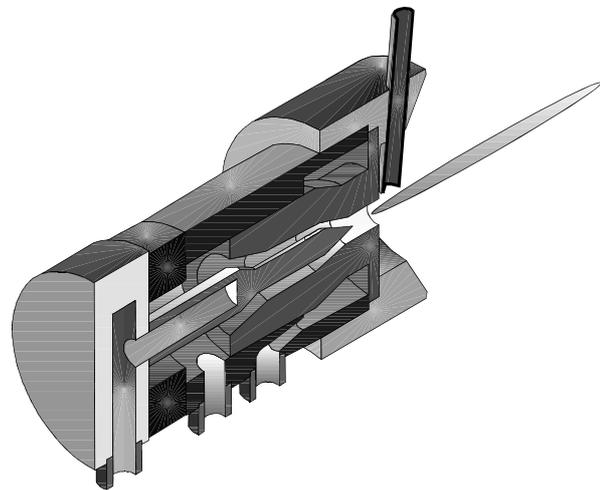


Bild 4: Schematische Darstellung eines Plasmaabrenners /5/

zentrisch angeordneten Wolframkathode, einer ringförmigen, wassergekühlten Kupferanode und von den Plasmagasen (Ar, He, H oder N), gewöhnlich Argon mit einem Zusatz Wasserstoff, umströmt wird (**Bild 4**). Dieser Lichtbogen gibt einen Großteil seiner Wärmeenergie an das Plasmagas ab, das dadurch ionisiert und in den Plasmazustand überführt wird. Bei der Rekombination wird die aufgenommene Wärmeenergie wieder abgegeben, ein elektrisch neutraler Plasmastrahl verlässt die Brenndüse mit hoher Temperatur (bis 20 000 K). Das durch ein Treibgas angesaugte Pulver wird meist verfahrensbedingt in oder außerhalb der Spritzpistole der Plasmaflamme zugeführt und je nach Verweildauer in der Flamme an- oder/und aufgeschmolzen. Das Werkstück wird von der

Flamme nicht direkt erfasst und zusätzlich intensiv gekühlt, /6/. Die Bauteiltemperatur liegt zwischen 100 und 350°C. Plasmaschichten zeichnen sich durch eine hohe Haft-Zugfestigkeit (20-70 MPa) und durch eine gezielt einstellbare Porosität von 1-20% aus.

Ein typischer Anwendungsfall dieses Beschichtungsverfahrens stellen die Wärmedämmschichten, Haftsichten, Heißgaskorrosionsschutzschichten und Verschleisschutzschichten im Triebwerksbau dar.



Bild 5: Maskiertes Bauteil während des Plasmaspritzvorganges /7/

Das Plasmaspritzen wird an der Atmosphäre oder in Vakuumkammern durchgeführt, hierbei hat sich der Betrieb im Vakuum für sehr reaktive Materialien bestens bewährt. Eine weitere Variante des Plasmaspritzens ist es, den Spritzprozess in Kammern mit einer inerten oder druckkontrollierten Atmosphäre ablaufen zu lassen. Keine oder wenige Oxide in der Spritzschicht sowie sehr reine Spritzschichten sind hier zu erwarten /4/.

3 Der Spritzablauf

Bevor die zu beschichtenden Bereiche den thermischen Spritzprozess durchlaufen, müssen die betroffenen Stellen von möglichen Verunreinigungen gesäubert, maskiert und entsprechend oberflächenbehandelt werden. Die Maskierung von Bauteilzonen dient zur Abgrenzung von Schichtflächen und Bereichen, die vom Spritzstrahl nicht erfasst

werden sollen. Auch beim Vorbereiten der Bauteiloberfläche durch Strahlen mit Al_2O_3 benutzt man Abdeckungen, die aus Klebebändern oder metallischen Abdeckungen bestehen.

Für das thermische Spritzen kommen Auflagemasken zur Anwendung, die aus Klebebändern, Silikonmassen und Silikonringen bestehen oder metallische Schattenmasken, die konturgerecht dem Bauteil angepasst sind und durch Abstandszonen ein Anhaften der Schicht mit der Maskierung verhindern sowie die nicht zu beschichtenden Bereiche schützen (**Bild 5**).

Beim thermischen Spritzen ist das Vorbehandeln der Oberfläche der wichtigste Arbeitsgang. Durch eine gute Präparation der Oberfläche lässt sich die Haft-Zugfestigkeit und die Güte der Schicht deutlich steigern. Zu einer guten Vorbehandlung zählen fettfreie und metallisch saubere Oberflächen, aber auch solche, die mit scharfkantigem, sauberem

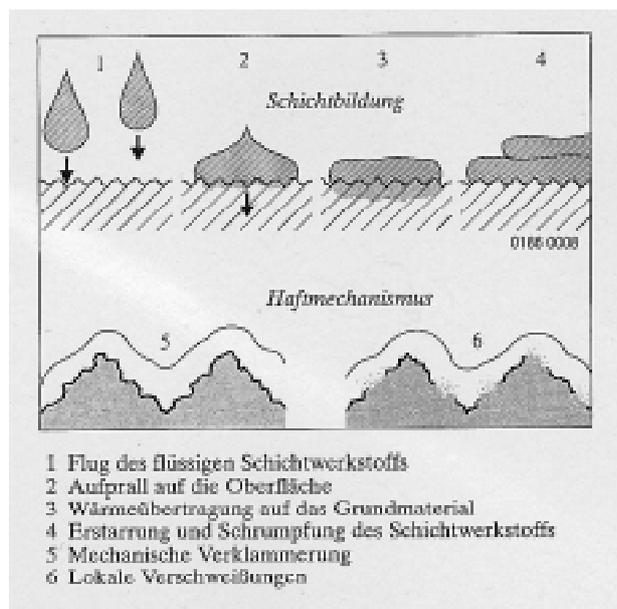


Bild 6: Haftmechanismus /8/

Strahlgut gestrahlt eine optimale Rauigkeit sowie große Haftungsoberflächen gewährleisten.

Um die Haft-Zugfestigkeit durch Oxidation oder andere Umwelteinflüsse nicht zu vermindern, muss das frisch gestrahlte Bauteil verzugslos mit einem thermischen Spritzverfahren beschichtet werden. Die hochaktive Kraterlandschaft, die eine frisch gestrahlte Oberfläche aufweist, begünstigt Diffusionsvorgänge, Mikroschweißungen und mechanische Verklammerungen (**Bild 6**).

Hat das zu beschichtende Bauteil die gewünschte, mit einer Rauigkeitsmessung überprüfte Oberflächenbeschaffenheit, wird das Werkstück maskiert, gegebenenfalls vorgewärmt (max. 150°C), in der Spritzkabine auf dem Handhabungssystem befe-

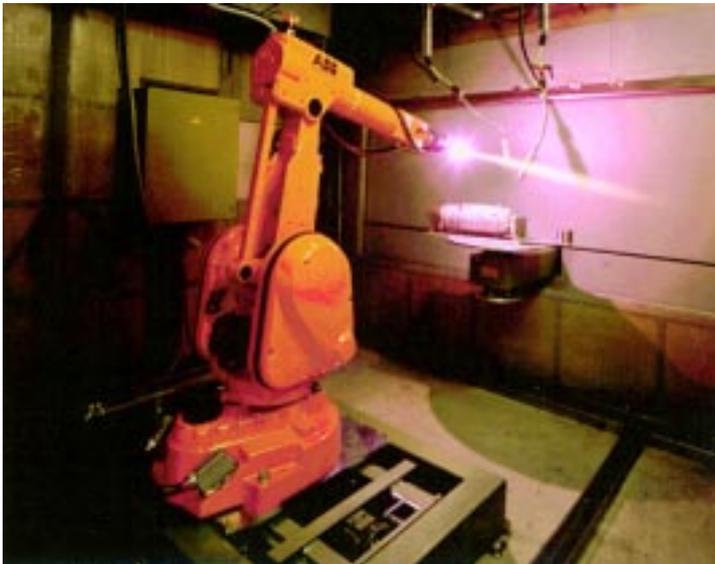


Bild 7: Roboter mit Handlingsystem beim Plasmaspritzen einer Triebwerksbrennkammer /5/

stigt und dem Spritzprozess zugeführt. Das Handhabungssystem ermöglicht das Abfahren der Bauteilkontur unter Einhaltung des vorgegebenen Spritzabstandes. Dieses Handlingsystem ist meist ein integriertes System, bei dem der Roboter mit externen Achsen und einer Verfahreinheit mit der Spritzanlagensteuerung komplett verknüpft ist. Damit wird es möglich, über die Spritzanlagensteuerung einen vollautomatischen Spritzprozess, nebst Zündung der Brenner, durchzuführen. Die speziellen Werkstückaufnahmen fördern die Reproduzierbarkeit und unterstützen die Automatisierung.

Die Spritzanlage sollte in einer Schallschutzkabine untergebracht sein, die gleichzeitig über die Filtereinheit eine wirksame Entsorgung der Spritzstäube -gemäß den gesetzlichen Bestimmungen- gewährleistet.

Nach der Bestückung der Spritzkabine erfolgt der festgelegte Arbeitsablauf vollautomatisch gemäß den Vorgabedaten: Spritzverfahren, Spritzwerkstoff, Spritzpistole, Anlagenparameter (Gase, Abstände, Durchsatz), Bewegungsabläufe und Anzahl der Spritzlagen.

Die Eigenschaften von Spritzschichten ergeben sich aus dem Spritzverfahren, dem Spritzzusatz und den Spritzbedingungen. Ebenso ist es die große Anzahl von Faktoren, die auf die flüssigen Spritzteilchen einwirken und die Art und Weise, wie

sich die Spritzschicht lagenweise aufbaut, die den Charakter und die Eigenschaften der Schicht bestimmen.

Allen Spritzverfahren ist gemeinsam, dass schmelzflüssige Metallteilchen im hocherhitzten Zustand einen Weg zurücklegen, auf dem sie verschiedenen Gasen und der sie umgebenden Atmosphäre ausgesetzt sind. Den größten Einfluss auf die schmelzflüssigen Teilchen hat dabei der Sauerstoff, zu dem die meisten Metalle eine hohe Affinität besitzen. Deshalb sind die Spritzteilchen fast ausnahmslos mit einem Oxidfilm umgeben. Dieser noch weiche oder flüssige Oxidfilm ist einerseits eine Komponente des komplizierten Haftmechanismus und andererseits ein Härtebildner, der für die stets größere Mikrohärtigkeit der Spritzschichten von Bedeutung ist.

Beim thermischen Spritzen ist das intensive Anschmelzen nur dann gewährleistet, wenn Wärmeenergie, Korngröße und die Aufenthaltszeit der Pulverkörner in der Flamme aufeinander abgestimmt sind. Enge Korn-

größenbereiche, gleichmäßige Förderleistung und genau definierte Pulverkornformen sowie Gasmenngen (im gasförmigen Zustand) sind daher wichtige Voraussetzungen.

Neben den aufgeführten Einflussgrößen für den Aufbau der Spritzschicht ist die Geschwindigkeit, mit der die Spritzteilchen aufschlagen, von Bedeutung. Je höher diese kinetische Energie ist, desto stärker werden die Tropfen in der Kraterlandschaft der vorbereiteten Oberfläche und in die bereits aufgebaute Schicht hineingeschossen. Die Tropfen

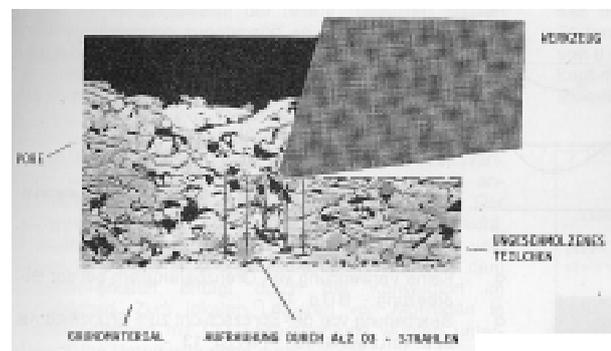


Bild 8: Bearbeitung einer Spritzschicht /9/

verflachen und gehen mit anderen Teilchen Verbindungen ein, die mit Diffundieren, lokalem Verschweißen, Verkralen, Zersprätzen und Versintern erklärt werden (**Bild 6**).

In den meisten Anwendungsfällen werden die Spritzschichten mit einer Zugabe gespritzt, die durch mechanische Nachbehandlung auf Maß gebracht werden muss. Spritzschichten können durch Drehen, Hobeln, Fräsen und Schleifen bearbeitet werden. Um ein Zerstören der Schicht zu vermeiden, muss die Belastung beim mechanischen Bearbeiten minimiert werden. Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und vor allem die Vorschübe sind gering zu halten. Zusätzlich muss der Drehmeißel, der durch Oxideinschlüsse und teilweise Aufhärtung der Spritzteilchen stärker beansprucht wird, entsprechend angepasst werden (**Bild 8**). Beim Schleifen wird die Spritzschicht insgesamt weniger belastet /9/.

Die Prozessqualität wird durch Proben, die überwiegend bauteilrepräsentativ sind, sichergestellt. Es werden je nach Schichttyp metallographische Prüfungen (Gefüge, Schichtdicke, Verunreinigung) und /oder mechanische Prüfungen (Härte, Haftzugfestigkeit, Biegeprüfung) durchgeführt /10/.

4 Anwendungen aus der Triebwerkstechnik

Durch den gezielten Einsatz hochwertiger Metall- und Keramikbeschichtungen mittels thermischer Spritzverfahren werden hochbeanspruchte Funktionsflächen von Triebwerkskomponenten geschützt und die Wiederverwendbarkeit abgenutzter Triebwerksteile ermöglicht sowie deren Standzeit wesentlich erhöht.

Die Eigenschaften dieser Spritzschichten werden jedoch nicht nur durch die Werkstoffzusammensetzung bestimmt, sondern hängen ganz wesentlich von der Schichtstruktur ab, die durch unterschiedliche Spritzparameter erheblich variiert werden kann. So wird zum Beispiel eine Ni5Al-Schicht plasmagespritzt als Maßkorrekturschicht verwendet und flammgespritzt als Einlaufbelag eingesetzt.

Es kommen folgende Schichttypen zur Anwendung:

- Anstreichschichten (Einlauf- und Anlaufschichten)
- Verschleisschutzschichten
- Heißgaskorrosionsschutzschichten
- Wärmedämmschichten
- Maßkorrekturschichten

4.1 Anstreichschichten (Einlauf- und Anlaufschichten)

Um bei Flugtriebwerken einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen, müssen die Spaltverluste (Gasleckage) zwischen den stehenden (Statoren) und den rotierenden (Rotoren) Triebwerksbauteilen sehr klein gehalten werden. Der Spalt ist dann am geringsten, wenn er durch Einschleifen der Komponenten erst im Betrieb entsteht und dabei möglichst nur das statische Teil abgetragen wird (**Bild 10**).

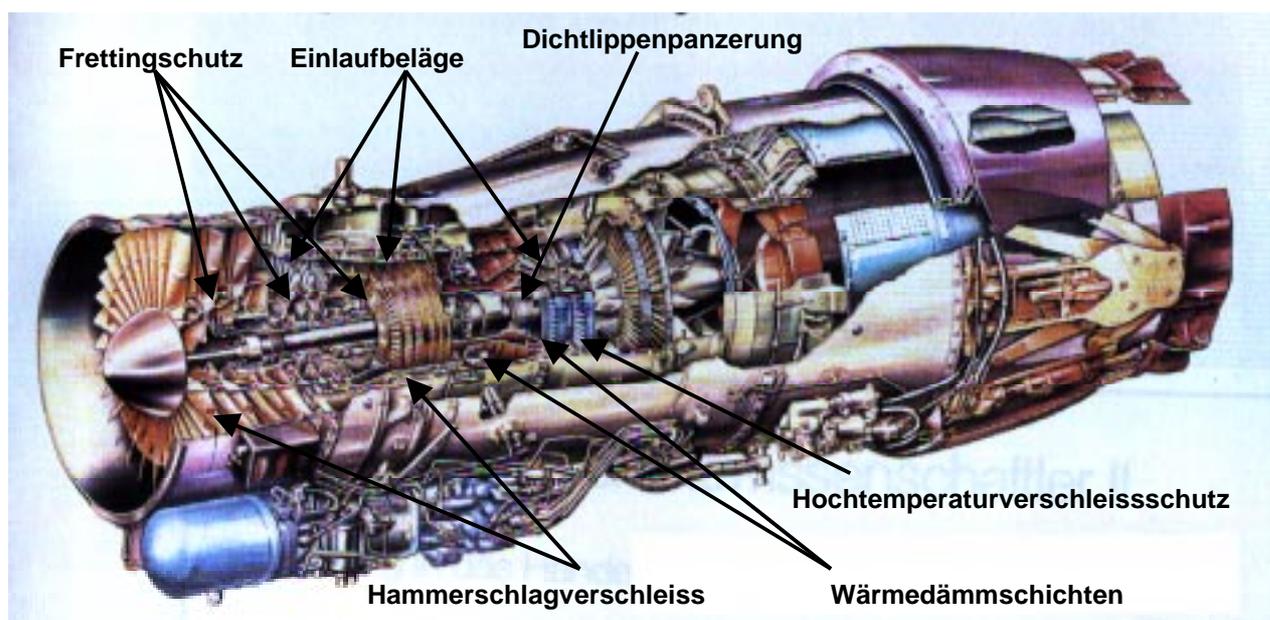


Bild 9: Funktionsteile mit thermisch gespritzten Schichten

Auf dem Stator wird daher eine leicht abreibbare Schicht aufgespritzt, der sog. Einlaufbelag. Hier werden neben den flammgespritzten Nickel/Graphit-Schichten, die eine hohe Porosität und gute Trockenschmierstoffeigenschaften aufweisen, auch plasmagespritzte Aluminium/Polyester-Schichten eingesetzt. Aluminium/Polyester-Schichten zeichnen sich durch eine sehr gute Erosionsbeständigkeit aus (Bild 11).

Die Kontaktfläche des rotierenden Bauteils wird mit einer verschleissbeständigen, abrasiv wirkenden Anlaufschicht gepanzert, da ansonsten durch den Materialabtrag eine erhebliche Unwucht des Bauteils entstehen würde. Die Gegenpartner der Ein-

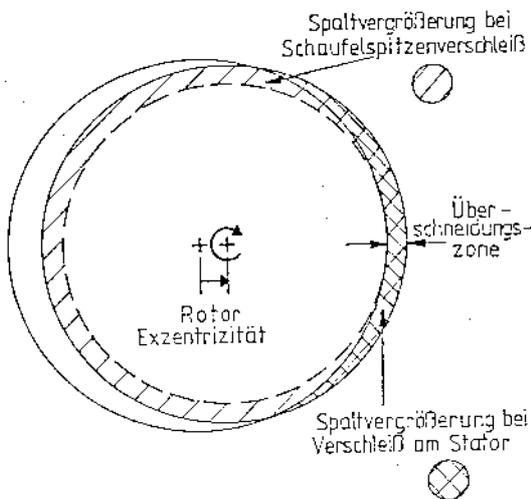


Bild 10: Verkleinerung des Spaltes durch Einlaufbeläge am Stator-Gehäuse /11/

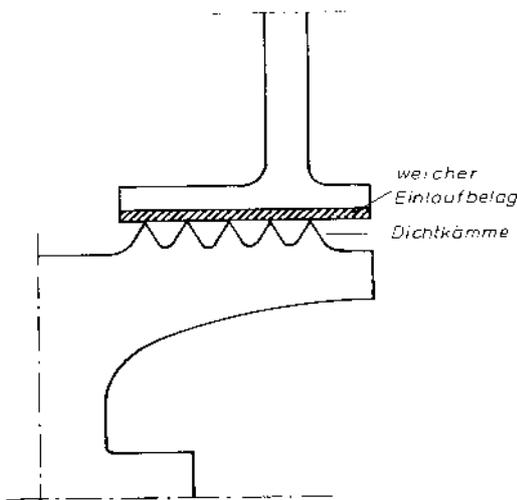


Bild 11: Prinzip einer einfachen Labyrinthdichtung zwischen Scheibe und Dichtungsträger /11/

laufbeläge werden mit harten plasmagespritzten Keramiksichten (Al_2O_3 , $3TiO_2$) unter Verwendung ei-

ner geeigneten metallischen Haftschrift (NiAl, NiCr) beschichtet.

4.2 Verschleisschutzschichten

Für die Herstellung von Verschleiss-Schutzschichten wird meist eine hohe Haftfestigkeit gefordert, die mit den Verfahren Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HGFS), Niederdruck- (NDPS) und atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) gewährleistet wird. Typische Verschleisschutzschichten werden zum Schutz gegen Hammer-schlagverschleiss, Fretting, Erosion und Material-

Verschleissart	Schichtwerkstoff	Verfahren	Bemerkungen
Hammerschlagverschleiss	WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$	HGFS	Schwingungsbedingtes Anstoßen von Schaufeln gegeneinander
Fretting	CuNiIn	APS	Verschleiss der Schaufelfüße durch Eigenschwingung der Schaufel
Erosion	WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$	HGFS	Furchender Verschleiss durch streifende Partikel im Gasstrom
Materialabtrag bei form- und kraftschlüssigen Verbindungen	WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$	APS	Materialabtrag bei Passungen, Flanschen und Lagersitzen

Tabelle 1: Thermisch gespritzte Verschleisschutzschichten.

abtrag bei form- und kraftschlüssigen Verbindungen aufgetragen /11/. **Tabelle 1** zeigt die üblicherweise verwendeten Werkstoffe und Verfahren.



Bild 12: Verschleisschutzschicht aus Chromkarbid-Nickelaluminium an einer Turbinenleit-schaufel /7/

4.3 Heißgaskorrosionsschutzschichten

Zur Reduzierung des Gewichtes und Erhöhung der Betriebstemperaturen werden moderne Superlegierungen im Heißbereich eines Triebwerkes eingesetzt. Diese Werkstoffe sind dennoch nicht in der Lage, gleichzeitig die beschleunigte Korrosions-/Oxidationsneigung und die Abnahme der Festigkeit



Bild 13: Heißgaskorrosionsschutz - Oxidationsschutzschicht, MCrAlY-Schicht /7/

bei hoher Temperatur zu verhindern. Durch Aufbringen von speziellen oxidationsbeständigen Legierungen vom Typ MCrAlY (M = Co, Ni) mittels NDPS oder Plasmaspritzen in kontrollierter Atmo-

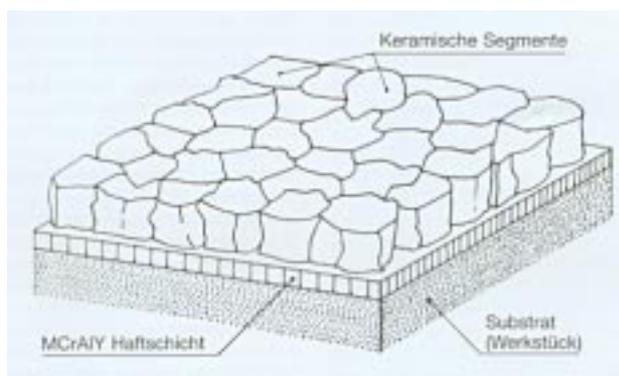


Bild 14: Segmentierte Wärmedämmschicht /12/

sphäre können diese Funktionsflächen geschützt werden (**Bild 13**). Oft dient diese Schicht als oxidationsbeständige Grundsicht, auf der anschließend eine thermisch isolierende keramische Deckschicht aufgespritzt wird (**Bild 14**).

4.4 Wärmedämmschichten

Durch das zusätzliche Auftragen von wärmedämmenden Keramischichten auf korrosionsbeständi-



Bild 15: Mit Zirkoniumoxid beschichtete Brennkammer /5/

gen Haftsichten kann, allerdings nur in Verbindung mit Kühlung von innen, die Bauteilwerkstofftemperatur erniedrigt und damit die Festigkeit erhalten werden. Als keramischer Werkstoff wird meist ZrO_2 mit verschiedenen Stabilisatoren (Y_2O_3 , früher CaO , MgO) verwendet. /12/

Erwünscht sind bei den Wärmedämmschichten vertikale Risse (**Bild 14**), die sich jedoch beim Einsatz unter höchsten Temperaturen als negativ herausstellen. Flüssige Phasen (Sand aus Verdichtertluft), die sich auf der Oberfläche ablagern, setzen die Risse zu und verhindern ihr Schließen bei Abkühlung. **Bild 15** zeigt eine typische Anwendung einer Wärmedämmschicht.

4.5 Maßkorrekturschichten

Maßliche Abweichungen von teuren Triebwerksbauteilen, bedingt durch Konstruktionsänderungen oder Fertigungsfehler, können mittels Rekonditionierung korrigiert werden (**Bild 16**). Die Spritzschichten müssen dabei vergleichbare mechanische, thermische und fertigungstechnische Eigenschaften wie das Substrat (Werkstück) aufweisen. Zur Anwendung kommen die Werkstoffe NiAl, NiCr und Tribaloy.

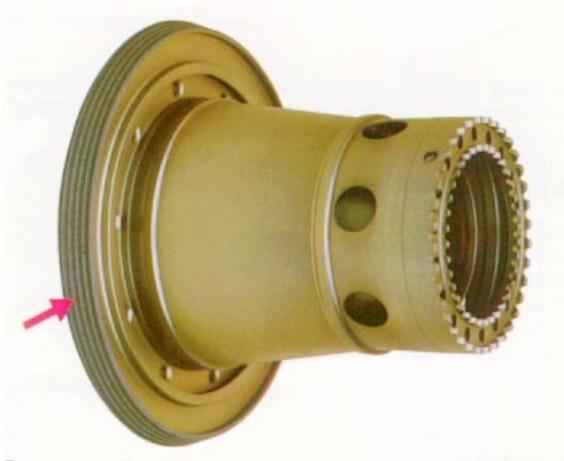


Bild 16: Maßkorrekturschicht aus Aluminimoxid und Titanoxid an den Dichtstegen einer Verdichterwelle /7/

Große Schichtdicken, aber nur geringe Festigkeit und Haftung, werden mit dem Flammgespritzverfahren realisiert. Werden mittlere Haftfestigkeiten und nur mit speziellen Spritzwerkstoffen ausreichende Schichtdicken gefordert, so empfiehlt sich das atmosphärische Plasmaspritzen. Mit dem Hochgeschwindigkeitsspritzen, das in jüngster Zeit zunehmend zum Einsatz kommt, lassen sich häufig artgleiche Spritzwerkstoffe verwenden und große Schichtdicken wegen guter Haftung, bedingt durch Druckeigenstressungen, erzielen /11/.

5 Zusammenfassung

Der Hauptschwerpunkt thermisch gespritzter Schichten liegt nach wie vor in der Luftfahrtindustrie (48%). Aber auch in anderen Industriezweigen gewinnt dieses Beschichtungsverfahren an Bedeutung, z.B. Kraftfahrzeug (5%), Chemie (10%) und Metallverarbeitung (21%). Dies begründet sich in den ökonomischen und technischen Vorteilen, die von thermisch gespritzten Schichten ausgehen. Sie ermöglichen neben einer hohen Wertschöpfung auch neue Produktinnovationen. Weitere intensive Forschungen, z.B. thermische Spritzschichten auf Magnesium, werden der Industrie auch in der Zukunft neue Anwendungsbereiche eröffnen.

6 Literatur

/1/ Steffens, H.-D., Gramlich M.; Entwicklung und technische Nutzung thermischer Spritzverfahren, Jahrbuch Schweißtechnik '97, Düsseldorf 1996

- /2/ Schoop, M. U.: Handbuch der Metallspritz-Technik, Rascher & Cie, AG Verlag, Zürich 1935
- /3/ Voggenreiter, H.: Haftmechanismen beim thermischen Spritzen, SLV München, München 1996
- /4/ Thermisches Spritzen, DIN EN 657, Juni 1994
- /5/ Müller, N.: Grundlagen des Plasmaspritzens, SLV München, München 1996
- /6/ Heinrich, P.: Thermisches Spritzen, Fakten und Stand der Technik, Sonderdruck 10/92, Linde AG, Höllriegelskreuth 1992
- /7/ Thermisches Spritzen, MTU München, München 1983
- /8/ Funktionelle Beschichtungen durch Plasmaspritzen, Plasma Technik AG, Wohlen 1972
- /9/ Hibler, A.: Mechanisches Bearbeiten von thermischen Spritzschichten, DVS Berichte 175, Düsseldorf 1996
- /10/ Thermisch gespritzte Bauteile, DIN 65144, April 1986
- /11/ Schweitzer, K.: Oberflächenbeanspruchung und geeignete Spritzwerkstoffe bei Fluggas-turbinen, SLV München, München 1996
- /12/ Adam, P.: Wärmedämmschichten in Luft-triebswerken, MTU Focus, München 1989