

Einlauf- und Hybridschichten für Schraubenkompressoren

Run-in and hybrid-coatings for twin-screw-compressors

Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. M. Helpertz, Dortmund

Diese Arbeit wird im Sonderforschungsbereich 316 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durchgeführt

Zusammenfassung

Ein Teilprojekt des Sonderforschungsbereiches „Verbundwerkstoffe“ der DFG befaßt sich mit dem Herstellen beschichteter Schraubenrotoren zur Verbesserung des Betriebsverhaltens, der Möglichkeit der Instandsetzung und dem Verzicht auf Synchronisationszahnräder durch hybride Schichtsysteme mit Einlauf-, Verschleißschutz- sowie Korrosionsschutzeigenschaften. Zur Herstellung der Schichtsysteme finden die Verfahren des atmosphärischen Plasmaspritzens (APS) und des Physical Vapour Deposition (PVD) Anwendung. Dabei erwies sich APS-Chromoxid, Cr_2O_3 , auf C60 bei Modellversuchen und trockener Gleitwälzbeanspruchung als sehr verschleißbeständig. Der Einsatz von APS-Zirkoniumoxid, $\text{ZrO}_2\text{7Y}_2\text{O}_3$, ermöglicht die Herstellung von Einlaufschichten mit definiertem Abtragsverhalten. Einlaufverhalten und Mikrostruktur hängen vom Spritzabstand und der Leistung des Plasmabrenners ab und werden diskutiert.

Abstract

A project within the DFG-material-research-program „composites“ covers the manufacturing of coated twin-screw-rotors for the improvement of the operational behaviour, the possible use as method of repair and the substitution of the synchronizing gear by hybrid coating-systems with run-in-properties, wear-reducing effects and corrosion-resistance. The coatings are produced by using atmospheric plasma spraying (APS) and physical vapour deposition (PVD). Tests with simplified samples have shown that APS-chromiumoxide, Cr_2O_3 , on a C60-steel is very wear-resistant under dry test conditions against a combined sliding-rolling-stress. The application of APS-zirconiumoxide, $\text{ZrO}_2\text{7Y}_2\text{O}_3$, allows the production of coatings with defined run-in-characteristics. Behaviour and microstructure depend on the spray-distance and the power of the plasma-spray-device.

1 Einleitung

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert seit 1985 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 316 ein Vorhaben im Verbund mehrerer universitärer Einrichtungen zur Erforschung der Herstellung und der Eigenschaften metall-keramischer Verbundwerkstoffe. Als praktisches Anwendungsbeispiel dient hier die Schraubenmaschine.

Durch die Entwicklung der Schraubenmaschine zieht sich der Leitgedanke, die Konstruktion weiter zu vereinfachen. Heute sind in vielen Fällen Synchronisationszahnäder in Schraubenmaschinen erforderlich, um bei einem schmiermittelfreiem Betrieb im Arbeitsraum die Berührung der Rotorflanken zu verhindern. Beim Einsatz verschleißbeständiger Werkstoffe könnte hierauf verzichtet werden und die Drehmomentenübertragung zwischen Haupt- und Nebenrotor direkt über die Rotorzahnflanken erfolgen.

Darüberhinaus kommt in jüngster Zeit das Bestreben hinzu, die Eigenschaften von Schraubenmaschinen durch sog. Einlaufschichten zu verbessern. Sie besitzen die Eigenschaft, sich bei Berührung von relativ zueinander bewegten Maschinenkomponenten kontrolliert abzutragen, d.h. ohne Abplatzungen und unter Ausbildung einer technisch brauchbaren Oberfläche. Eine klassische Anwendung zur Verbesserung des Wirkungsgrades findet sich in der Minimierung der Spalte zwischen Rotor und Gehäuse von Gasturbinen und Turbokompressoren [1]-[8]. In diesem Fall wird meist das Gehäuse mit einer abtragbaren Einlaufbeschichtung versehen, in die sich dann die meist mit einer verschleißbeständigen Schicht versehenen Schaufeln einarbeiten können, ohne einen Maschinenschaden herbeizuführen. Ein derartiges Verhalten zeigt beispielsweise thermisch gespritztes Zirkoniumoxid $ZrO_2 \cdot 7Y_2O_3$. Zirkoniumoxid hat zudem den Vorteil einer geringen Wärmeleitfähigkeit, so daß es als Wärmedämmschicht eingesetzt werden kann. Hieraus ergeben sich auch Potentiale zur Innovation der Schraubenmaschinen:

- *Erhöhte Betriebssicherheit bei thermischer Dehnung und mechanischer Biegung durch unzulässige Betriebszustände,*
- *Möglichkeit der schnellen Instandsetzung von Gehäusen mit oberflächlichen Schäden,*
- *Ausgleich von Toleranzen,*
- *thermischer Schutz von Maschinenkomponenten sowie*
- *Verbesserung des Wirkungsgrades durch Minimierung aller arbeitsraumbegrenzender Spalte.*

Bei einer Kombination mit anderen Schichten können Systeme mit hybriden Eigenschaften realisiert werden. Im Falle einer Anwendung auf Graugußgehäusen erscheint beispielsweise

die Kombination mit einer tieferliegenden Korrosionsschutzschicht aus einer Metall-Chrom-Aluminium-Legierung, MCrAl, gegen kondensierende Feuchte mit Schadstoffen sinnvoll. Für den Einsatz in unsynchronisierten, trockenlaufenden Maschinen wurde ein System aus verschleißbeständigem Cr_2O_3 mit darüberliegendem $\text{ZrO}_2\cdot 7\text{Y}_2\text{O}_3$ entwickelt. Dabei wird das Chromoxid an den Flankenbereichen freigelegt, an denen eine Drehmomentenübertragung erfolgt, während die nichttragenden Flankenbereiche nur soweit abgetragen werden, wie es die kinematischen Randbedingungen erfordern, also mit minimalem Spalt.

2 Stand der Technik

Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages beschränkt sich aus Gründen der Übersicht auf den Einsatz hybrider Schichtsysteme in trockenlaufenden Schraubenmaschinen.

2.1 Verzicht auf das Synchronisationsgetriebe

Während öleingespritzte Schraubenmaschinen üblicherweise unsynchronisiert betrieben werden, ist bei den trockenlaufenden Varianten ein Synchronisationsgetriebe nach dem derzeitigen Stand der Technik zwingend erforderlich. Hierdurch ist ein größerer Material- und Montageaufwand gegeben. Aus [9] ist lediglich eine Lösung für Maschinen mit Wassereinspritzung bekannt. Bei der beschriebenen Bauweise werden die Rotoren mit Zähnen aus keramikverstärktem Kunststoff durch ein Gießverfahren hergestellt. Der Verbund besteht aus einer Kombination von Polyurethan mit Quarzsand und die Drehmomentübertragung erfolgt direkt über die Zahnflanken der Schraubenrotoren.

2.2 Einlaufbeschichtungen

Die Auslegung jeder Schraubenmaschine ist stets durch einen Konflikt geprägt: Eine Reduktion der arbeitsraumbegrenzenden Spaltweiten erhöht den Wirkungsgrad, führt aber zu einer Verminderung der Betriebssicherheit und umgekehrt.

Eine Lösung dieses Problems besteht in der Anwendung sog. *Einlaufschichten* auf Rotoren und Gehäuse wie sie bereits für Turbomaschinen bekannt sind. So gibt [7] einen Überblick über den Stand der Beschichtungssysteme und -technologien für thermisch und korrosiv belastete Gasturbinenbaugruppen. Neben der Herstellung von Wärmedämmschichten durch Elektronenstrahl-PVD, Plasmaspritzen und Hochgeschwindigkeitsflammspritzen gehen die Autoren auch auf die Problematik der Einlaufschichten ein. Bei Luftfahrtanwendungen sind plasmagespritzte Einlaufschichten auf der Basis von ZrO_2 bereits erfolgreich im Einsatz. Für den Turbinenbereich wird ein Multilayer-Schichtsystem vorgestellt, welches durch geeignete *Gradierung, Porosität* und *Mikrorissigkeit* sowohl Wärmedämm- als auch *Einlaufeigen-*

schaften aufweist. Es soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß eine geeignete Mikrostruktur keramischer Dichtsysteme eine geringere Rißanfälligkeit zur Folge hat.

Weitere Literaturbeispiele [1]-[8] verdeutlichen, daß Einlaufschichten auf dem Gebiet der Turbinen ständig an Bedeutung gewinnen. Der Lösungsansatz besteht grundsätzlich in der Herstellung einer *porösen Schichtmatrix*, in die teilweise nichtmetallische Werkstoffe wie Kunststoffe oder Keramiken feinverteilt eingebunden sind. Häufig kommt ein thermisches Spritzverfahren zur Anwendung, das es erlaubt, die Mikrostruktur gezielt zu beeinflussen und die Eigenschaften in einem großen Bereich zu variieren. Von besonderer Bedeutung ist die Beständigkeit gegen erhöhte Temperaturen, thermomechanische Ermüdung, Oxidation, Erosion sowie Korrosion, aber auch Wärmedämmeigenschaften und Benetzungsfähigkeit sind relevant. Für extreme Einsatzfälle geht die Tendenz zu keramischen Werkstoffen wie ZrO_2 . Die Gefahr eines Ermüdungsversagens kann durch geeignete Morphologie mit Rißablenkung deutlich reduziert werden.

Darüberhinaus bietet das thermische Spritzen die Möglichkeit zur Reparatur von Maschinengehäusen [7], [10]-[12]. MCrAlY-Schichten vermeiden gleichzeitig Oxidation und Heißgaskorrosion [13].

Vereinzelt werden auf dem Gebiet der Schraubenkompressoren organische Lacke, ähnlich sog. Gleitlacken, als Einlaufschicht verwendet. Ihre thermische Beständigkeit ist jedoch nach eigenen Untersuchungen auf einen Temperaturbereich von unterhalb 200°C beschränkt. Darüberhinaus legen Probleme mit der Haftung auf dem Substrat sowie mit Spalt- und Lochkorrosion die Applikation eines anderen Schichtsystems nahe.

Auf dem Gebiet der Einlaufbeschichtungen weist die Literatur meist Anwendungen in Turbomaschinen aus. Der Einsatz derartiger Schichtsysteme in einer engspieligen Verdängermaschine ist folglich ein weitgehend unerforschtes Feld mit hohem Entwicklungspotential.

3 Theoretische Ergebnisse

3.1 Beanspruchung von Verschleißschutzschichten im Mikrokontakt

Zur Reduzierung des Versuchsaufwandes werden die zu untersuchenden Schichtsysteme am Fachgebiet Fluidenergiemaschinen zunächst Modellversuchen an geometrisch einfachen Prüfkörpern unterzogen. Als Versuchsbedingungen dienen für den Zahneingriff repräsentative Belastungen, um eine Vorauswahl für reale Maschinenversuche zu treffen. Hierfür stehen zwei Verschleißversuchsanlagen zur Verfügung, bei denen jeweils die Mantelflächen zweier zylindrischer Prüfkörper mit unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten gegeneinander geprüßt werden:

Versuchsanlage		A	B
Durchmesser der Zylinder	[mm]	120	80
Anpreßkraft	[N]	75	23
Länge der Linienberührung	[mm]	25	12
Hertzsche Flächenpressung bei Stahl	[N/mm ²]	60	60
Umfangsgeschwindigkeiten	[m/s]	27 und 30	27 und 30
Temperatur	[°C]	20 bis 150	20

Table 1: Modellversuchsanlagen und -bedingungen

Table 1: Testing-rig and -conditions

Die Tatsache, daß trotz nominell gleicher Belastungen unterschiedliche Standzeiten der Schichtsysteme zu beobachten waren, führte zu einer genaueren Betrachtung der Werkstoffbelastung [14]. So repräsentiert die angegebene Kontaktkraft lediglich einen zeitlichen Mittelwert. Die durch die Probengeometrie angeregten dynamischen Lastspitzen finden dort keine Berücksichtigung. Die Höhe dieser Dynamik hängt von den Größen Federsteifigkeit, Dämpfung sowie Masse der bewegten Elemente der Versuchsanlage, **Bild 3**, ab und ist für die in **Table 1** aufgeführten Anlagen A und B unterschiedlich. Darüberhinaus stellt die Hertzsche Pressung nur eine theoretische Belastungsgröße für ideale Oberflächen dar. Die an der Werkstoffoberfläche gegebene und sich laufend ändernde Rauigkeit führt vielmehr zu einer ungleichmäßigen Belastung und zu einer weiteren Spannungs- und Kontakttemperaturerhöhung im Mikrobereich. Mit dem in [14] genauer beschriebenen Modell wurden erstmals quantitative Abschätzungen der mikroskopischen Temperatur- und Pressungsbeanspruchungen an den Modellversuchsanlagen durchgeführt. Einschränkend muß erwähnt werden, daß die Berechnungen nur elastische Verformungen berücksichtigen kann. Diese Situation ist bei einer glatten und eingelaufenen Oberfläche gegeben. Der Ablauf einer derartigen Simulation stellt sich wie folgt dar:

- Reduktion der Versuchsanordnung auf ein Feder-Masse-Dämpfer-System
- Berechnung der Dynamik unter Vorgabe der Randbedingungen, dabei insbesondere die Verwendung eines realen Rundheitsschriebes für die Anregungsfunktion im Kontaktbereich
- Berechnung des Kraft-Zeitverlaufs und Ermittlung der maximalen Kontaktkräfte
- Berechnung der lokalen mikroskopischen Pressung eines ausgesuchten Oberflächen-ausschnitts mit einem Federmodell unter Verwendung von Oberflächenmessdaten aus rasterkraftmikroskopischen Messungen

- Berechnung der instationären Erwärmung im Mikrokontaktbereich an einem ausgesuchten Oberflächenabschnitt

Die mit einem Rasterkraftmikroskop exemplarisch aufgenommenen Oberflächenmorphologien einer Cr_xN_y -PVD-Schicht und einer Cr_2O_3 -APS-Schicht dienten als Grundlage für die geschilderte Simulation. Es traten für das Verständnis der Verschleißvorgänge folgende wichtige Ergebnisse zutage:

- Formfehler der Rundheit im Submikrometerbereich reichen aus, um die Kontaktkraft auf das 10- bis 20-fache des zeitlichen Mittelwertes zu steigern.
- Je nach Oberflächenrauheit sind die lokalen Pressungen im Vergleich zur Hertzschen Pressung nochmals um den Faktor 50 bis 100 größer. Dies führt bei Cr_2O_3 zu Pressungen bis ca. 20 000 N/mm², bei Cr_xN_y bis ca. 10 000 N/mm².
- Im Verlaufe der Mikrokontaktberührung können an den Oberflächen Temperaturen bis ca. 520 °C bei Cr_xN_y und bis ca. 340 °C bei Cr_2O_3 entstehen. Bei gleicher Gesamtberührfläche sind dabei wenige große Flächen ungünstiger als viele kleine, da die Summe der Berandungsflächen, über die Wärme abgeführt wird, dann geringer ist.

3.2 Einlaufschichten

3.2.1 Anforderungen an Einlaufschichten

Aus der Anwendung von Einlaufschichten in Schraubenmaschinen und den in der Einleitung aufgeführten Zielen ergibt sich eine Reihe von Anforderungen, die am vollständigsten in einer detaillierten Anforderungsliste erfaßt werden können. Je nach Standpunkt (Beschichter / Schraubenmaschinenhersteller) differieren die Ansprüche und es sind ggf. Kompromisse zu finden. Die wichtigsten Eigenschaften eines Einlaufschichtsystems sind:

- *Schneller Einlauf bei geringen Kräften*
- *Geeignetes Abtragsverhalten bei Relativgeschwindigkeiten zwischen 0 und 150 m/s*
- *Korrosions- und Erosionsbeständigkeit*
- *Hohe Standzeit*
- *Zugänglichkeit des Beschichtungsverfahrens zu den relevanten Oberflächen bzw. eine die Zugänglichkeit gewährleistende Konstruktion*
- *Temperaturbeständigkeit bis ca. 400°C in Kompressoren, bis ca. 950°C in einem Heißgasmotor*
- *Geringe Beschichtungskosten*
- *Gute Haftung auf dem Substrat*
- *Realisierung von Schichtdicken bis ca. 500 µm*

Bei dem Einsatz von Einlaufschichten in Schraubenmaschinen ist zu beachten, daß es sich um ein System mit drei Verschleißpartnern handelt, nämlich Hauptrotor, Nebenrotor und Gehäuse. Einlaufvorgänge sind dann im Profileingriff an den Flanken der Rotoren sowie zwischen Rotoren und Gehäuse zu erwarten, während sich bei homogenen rein metallischen Rotoren in diesen Bereichen wirkungsgradmindernde Spalte befinden. **Bild 1** verdeutlicht beispielhaft das Zusammenwirken zwischen einem Rotorzahn und dem Gehäuse. Durch unterschiedliche Verschleißbeständigkeit der Partner können der Einlaufvorgang und damit auch die Geometrie der Partner gezielt beeinflusst werden. Es erscheint daher sinnvoll, ein System mit abgestufter Verschleißbeständigkeit (VB) umzusetzen:

$$VB_{\text{Hauptrotor}} > VB_{\text{Nebenrotor}} > VB_{\text{Gehäuse}}$$

Dadurch definiert der angetriebene Hauptrotor die Geometrie der betroffenen Nebenrotorflankenbereiche, während beide Rotoren die Bohrungsgeometrie des Gehäuses festlegen und so Fertigungs- und Montagefehler weitgehend ausgleichen. Ein solches System jeweils abnehmender Verschleißbeständigkeit läßt sich durch die Applikation von Cr_2O_3 auf dem Hauptrotor, Al_2O_3 -verstärktem $\text{ZrO}_2\text{7Y}_2\text{O}_3$ auf dem Nebenrotor und $\text{ZrO}_2\text{7Y}_2\text{O}_3$ auf der Gehäuseinnenwandung realisieren. Vorversuche zeigen, daß auch die Verwendung von nur einem Werkstoffsystem unterschiedlicher Modifikation (z.B. $\text{ZrO}_2\text{7Y}_2\text{O}_3$) durch entsprechende Variation der Spritzparameter möglich ist.

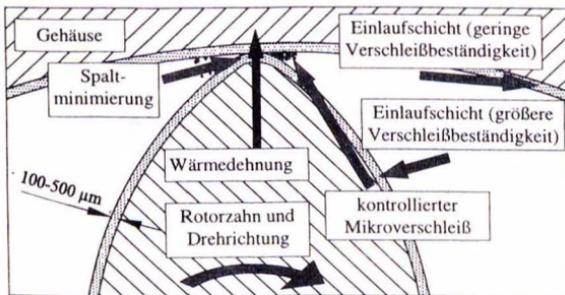


Bild 1: Prinzip einer Einlaufschicht am Beispiel des Gehäusespaltes

Fig. 1: Principle of a run-in-coating by the example of the casing-clearance

Zum Abbau von Rauigkeiten muß die Abstufung der Verschleißbeständigkeit auch eine gewisse Einglättung bei den beständigeren Partnern durch kontrollierten Mikroverschleiß zulassen.

Im Rahmen eines Transferprojektes der DFG sind Anwendungstests von Einlaufschichten an einer Realmaschine geplant. In diesem

Zusammenhang sollen verschiedene Beschichtungsvarianten auch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Möglicherweise liegt das Optimum bei der *selektiven*

Beschichtung ausgesuchter Komponenten, wie etwa der ausschließlichen Beschichtung nur des Gehäuses.

3.2.2 **Beanspruchung von Einlaufschichten im Mikrokontakt**

Zu Beginn des Verschleißvorgangs liegen sowohl die Verschleißschutz- als auch die Einlaufbeschichtungen mit einer relativ hohen Rauheit von $R_{z}=25\ \mu\text{m}$ vor. Dies führt in der Anfangsphase des Versuchs zwangsläufig zu einer sehr hohen Belastung der Mikrokontakte, wahrscheinlich teilweise bis in den Bereich plastischer Verformung. Folglich ist die Berechnung der Kontaktverhältnisse mit dem elastischen Modell nach Kap. 3.1 nicht mehr zulässig. Aus diesem Grund ist in [15] die Methode nach KUHLMANN-WILSDORF auf Chromoxid und Zirkoniumoxid angewendet worden. Man geht davon aus, daß die Pressung in einem Mikrokontakt der Werkstoffhärte im Berührungspunkt entspricht. Da keine gemessene Oberflächenkonturen in die Berechnungen eingehen, sind die Ergebnisse in Abhängigkeit der Anzahl der Mikrokontakte dargestellt. Dabei zeigt sich, daß die thermische Belastung wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Zirkoniumoxid wesentlich über den Temperaturen des Chromoxids liegt. Bei 1000 Berührungspunkten ist für Chromoxid eine Erwärmung um ca. 300°C zu erwarten, während sie bei Zirkoniumoxid in einem Bereich um ca. 600°C liegt (Reibbeiwert zwischen 0,3 und 0,5). Die höheren Temperaturen begünstigen eine größere Abtragsrate des Zirkoniumoxides gegenüber anderen Werkstoffen und sind ein Hinweis für die Eignung dieser Schicht für ein Einlaufsystem.

Einschränkend sollte erwähnt werden, daß diese Berechnungen nur Tendenzen darstellen können, da die Annahmen der Homogenität und Isotropie sowie der gleichbleibenden Größe und Eingriffsverhältnisse der Kontaktpunkte bei einer Spritzschicht nicht gegeben sind. Auch traten bei Einlaufversuchen mit Zirkoniumoxid Mechanismen wie Mikrobrechen oder -scheren der porösen Schichtmorphologie in den Vordergrund.

4 **Modellversuche**

Die Herstellung der APS-Beschichtungen erfolgte am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Universität Dortmund durch eine handelsübliche Spritzanlage in Verbindung mit einer 5-Achsen-Steuerung, die eine Berücksichtigung der Rotorgeometrie gestattet. Die diesem Beitrag vorliegenden Abbildungen der Schichten zeigen jeweils Querschliffe aus Verschleiß- bzw. Einlaufproben zylindrischer Modellkörper.

4.1 Verschleißversuche

Bei Versuchen an zylindrischen Prüfkörpern unter den in Tabelle 1 dargestellten Bedingungen hat sich APS-Chromoxid mit einer Schichtdicke von ca. 200 μm bei Raumtemperatur und bei 150 $^{\circ}\text{C}$ als sehr verschleißbeständig erwiesen (**Bild 2**). Der

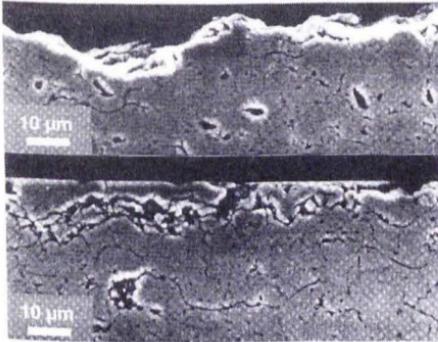


Bild 2: *Chromoxid, vor (oben) und nach (unten) einem 1000h-Verschleißtest*

Fig. 2: *Chromiumoxide, before (above) and after (below) a 1000h-wear-test*

Verschleißprozeß vollzieht sich stets nach folgendem Muster:

- Anfangsrauigkeit $R_z = 25 \mu\text{m}$
- Einlaufabtrag von 0,01-0,02 mm in den ersten Stunden
- Glättung der Oberfläche bis zum Spiegelglanz und ein Abtrag unter 0,01 mm in 1000 h Versuchsdauer.

Eine Untersuchung der Oberfläche zeigt die Bildung von ebenen Plateaus, welche mit zurückgebliebenen Löchern durchzogen sind. Unter Einbezug der Löcher ergibt sich ein $R_z = 15 \mu\text{m}$, während innerhalb der sehr ebenen Plateaus die

Oberflächenrauigkeit auf Werte zwischen $R_z = 0,2 \mu\text{m}$ und $2 \mu\text{m}$ sinkt. In den Grübchen findet man teilweise festgewalzten Abrieb [14]. Untersuchungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop weisen auf Strukturveränderungen der Schicht hin. Es sind vermehrt amorphisierte Phasen anzutreffen, deren Bildung mit der tribologischen Beanspruchung, der Erwärmung und der schnellen Abkühlung des Chromoxids verbunden wird [15]. Darüberhinaus gibt es Hinweise auf eine oberflächliche plastische Verformung, wenn hohe Temperaturen und Druckspannungen gegeben sind [14].

4.2 Einlaufversuche

Die durchgeführten Einlaufversuche dienen zunächst zur Beurteilung des Einlaufverhaltens im Flankenbereich der Rotorverzahnung. Der Radius der Prüfkörper ergibt sich aus der Hauptkrümmung der im Eingriff stehenden Flankenbereiche. Bei dem Standardversuch (Typ 1) für Verschleißschutzschichten nach Tabelle 1 wurde die Anpreßkraft über eine auf einem beweglichen Schlitten wirkendes und über Seile umgelenktes Gewicht eingeleitet. Zur weiteren Beurteilung wurde die Anlage modifiziert, **Bild 3**. Dies macht Zustellversuche

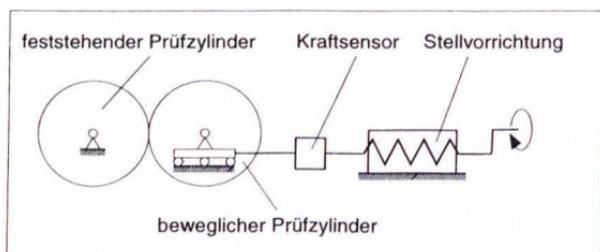


Bild 3: Schema der Versuchsanordnung für Einlaufversuche

Fig. 3: Schematic of the testing-device for run-in-experiments

(Typ 2) möglich, bei denen der Abstand zwischen den Prüfkörpern durch einen Mikrometerschlitten variiert werden kann. Die Kraft zwischen den Prüfkörpern ergibt sich aus der Federsteifigkeit der Anordnung sowie dem Abtragsverhalten der Schicht.

Mit der beschriebenen Anordnung wurden Einlaufversuche unter verschiedenen Umgebungsbedingungen und mit unterschiedlichen Schichtkombinationen durchgeführt, **Tabelle 2**.

Nr.	Schichtsystem und Paarung	Spritzabstand [mm]	Brennerleistung [kW]	Umgebung	Temperatur [°C]	Typ	Einlauf-eigenschaft
1	Z gegen Z	80	ca. 35	L	20-30	2	-
2	Z gegen Z	80	ca. 35	L	20-30	1	-
3	Z gegen Z	160	ca. 28	L	20-30	2	+
4	Z gegen Z	160	ca. 28	L	20-30	2	+
5	Z gegen Z	160	ca. 28	L	20-30	2	+
6	Z gegen C	Z: 160 C: 80	Z: ca. 28 C: ca. 35	L	20-30	2	0
7	Z gegen Z	160	ca. 28	L	150	2	+
8	Z gegen Z	160	ca. 28	L + VE	20-30	2	+
9	H gegen H	Z: 160 C: 80	Z: ca. 28 C: ca. 35	L	20-30	1 (500 h)	+
10	H gegen H	Z: 160 C: 80	Z: ca. 28 C: ca. 35	L	150	1 (500 h)	+

Tabelle 2: Durchgeführte Einlaufversuche, Substrat: C60-Stahl

Table 2: Realized run-in-experiments, substrate: C60-steel

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
Z	ZrO ₂ 7Y ₂ O ₃	VE	Vollentsalztes Wasser
C	Cr ₂ O ₃	Typ 1	Konstante Last (3 N/mm Linienberührung)
H	Hybrid = ZrO ₂ 7Y ₂ O ₃ auf Cr ₂ O ₃	Typ 2	Zustellung mit Mikrometerschlitten
L	Luft		
Shortcut	Meaning	Shortcut	Meaning
Z	ZrO ₂ 7Y ₂ O ₃	VE	desalted water
C	Cr ₂ O ₃	Typ 1	constant load (3 N/mm length of the contact-line)
H	Hybrid = ZrO ₂ 7Y ₂ O ₃ on Cr ₂ O ₃	Typ 2	approachment with displacement-device
L	Air		

Versuche haben ergeben, daß die durch den Spritzprozeß erzeugte Morphologie entscheidenden Einfluß auf das Einlaufverhalten hat. So weisen die mit 1 und 2 gekennzeichneten Proben in Tabelle 2 wegen des geringeren Spritzabstandes und der höheren Brennerleistung eine dichte Schichtstruktur geringer Porosität auf. Es konnte weder im Standardversuch (Typ 1) noch im Zustellversuch (Typ 2) ein Einlaufverhalten festgestellt werden. Die auftretenden Belastungen führten vielmehr zu einer Rißbildung und -fortpflanzung bis zur Substratoberfläche und in der Folge zu großflächigen Schichtablösungen, **Bild 4**.

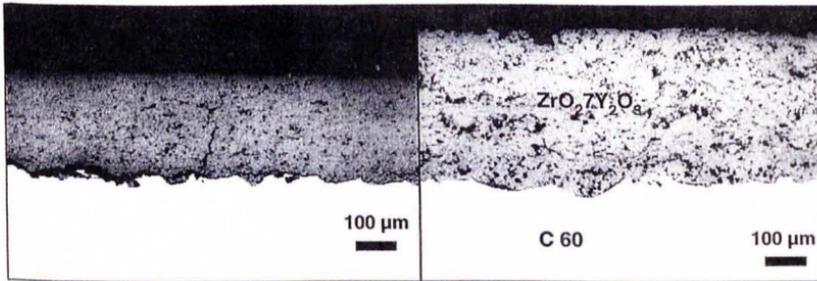


Bild 4: Zirkonoxid ohne (links) und mit (rechts) Einlaufeigenschaften

Fig. 4: Zirconiumoxide without (lefthand) and with (righthand) run-in-property

Ein Spritzabstand von 160 mm in Verbindung mit reduzierter Brennerleistung läßt eine poröse Morphologie mit vielen parallel zur Oberfläche laufenden Phasengrenzen entstehen und bewirkt das gewünschte Einlaufverhalten, Bild 4. Die für den Einlaufvorgang relevanten Mechanismen waren unter den verschiedenen Bedingungen (Nr. 3-10) prinzipiell gleich und können an einem konkreten Beispiel dargestellt werden:

Bild 5 zeigt den Übergangsbereich zwischen gelaufenem und ungelaufenem Teil des Prüfkörpers einer Hybridschicht. Es wird deutlich, daß die Anbindung der Schichtpartikel

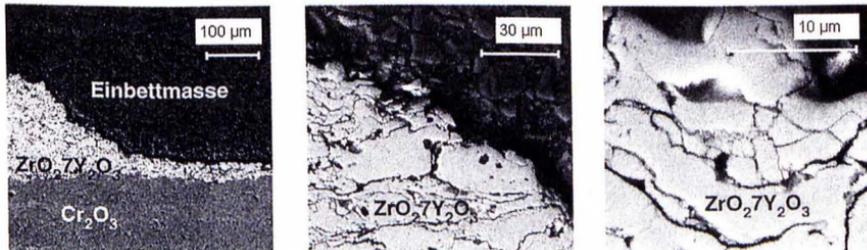


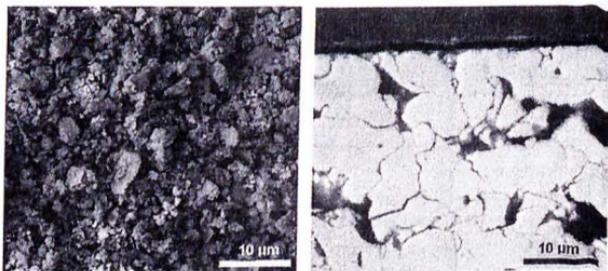
Bild 5: Mikrostruktur als Ursache des Einlaufverhaltens

Fig. 5: Microstructure as reason for the abrasibility

untereinander geringer ist als die Anbindung an das Substrat. Daher erfolgt der Abtrag immer nur oberflächlich. Die Morphologie der Schicht bietet zahlreiche vorwiegend parallel zur Oberfläche verlaufende Phasengrenzen an, die ein kontrolliertes Herauslösen kleiner Partikel und eine Reißablenkung ermöglichen. Aus den eingelaufenen Bereichen ist ersichtlich, daß die Partikel der Schicht i.a. noch Abschervvorgängen oder einem Mikro-schleifen ausgesetzt sind, da einerseits die betreffende Oberflächenkontur quer durch Schichtpartikel hindurchläuft und andererseits auch die Mehrzahl der während der Einlaufphase aufgefangenen Verschleißpartikel kleinere Abmessungen besitzt als die Bestandteile der Ausgangsschicht, **Bild 6**. Die Größe dieser Partikel liegt in der Regel unter 10 µm und ist somit im Hinblick auf die in Schraubenmaschinen anzutreffenden Spalte unkritisch.

Bild 6: *Verschleißpartikel (links), durchtrennte Partikel des Ausgangsgefüges (rechts)*

Fig. 6: *Wear-particles (lefthand), abraded particles of the origin structure (righthand)*



Ein weiteres Schichtsystem war die Kombination einer Chromoxidschicht, die gegen eine Zirkoniumoxidschicht lief. Es zeigte sich prinzipiell das gleiche Einlaufverhalten wie bei der angeführten Hybridschicht, die Oberfläche wies jedoch Riefen und einige kleinere Löcher auf. Dies resultiert vermutlich aus der durch die Chromoxidschicht gegebenen Oberflächenrauigkeit, die sich wegen der großen Verschleißbeständigkeit dieses Stoffes nicht abbaut, sondern auf den Zirkoniumoxid-Gegenkörper überträgt.

Für den Einsatz einer Einlaufschicht in Schraubenmaschinen ist die *Haftung* auf dem Substrat von ausschlaggebender Bedeutung. Zur Beurteilung der Anbindung wurden daher Messungen an Haftzugproben durchgeführt. Sowohl bei der Ausführung des Zirkoniumoxids direkt auf dem Substrat als auch bei der Hybridschicht auf Chromoxid lagen die Meßwerte mit durchschnittlich 62 N/mm² bzw. 49 N/mm² in einem akzeptablen Bereich. In den Versuchen Nr. 9 und Nr. 10 wurde das Verhalten der Hybridschicht geprüft. Diese besteht aus einer Chromoxidschicht, auf die eine Einlaufschicht aus Zirkoniumoxid aufgetragen wurde. Durch Zustellung der Prüfkörper verschleißt die Einlaufschicht, bis die tieferliegende Chromoxidschicht an die Oberfläche gelangt. Die Geometrie des Prüfkörpers war durch eine

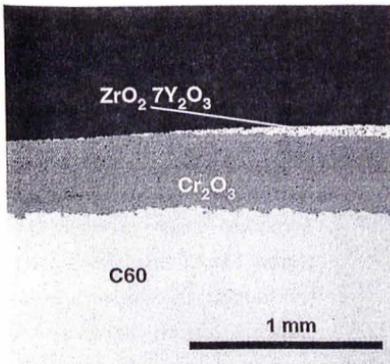


Bild 7: *Übergangsbereich von Zirkoniumoxid auf Chromoxid an der Fase des Prüfkörpers*

Fig. 7: *Transition-area from zirconiumoxide to chromiumoxide at the chamfers of the sample*

an der Zylinderfläche angebrachte Fase so gewählt, daß die Chromoxidschicht nicht über die volle Breite trägt, sondern im Bereich der Fase Reste der Zirkoniumoxidschicht keilförmig zurückblieben. Nach einem Einlauf wurde der Körper einem Dauerversuch unter konstanter Last unterzogen. Dabei übernahm das Chromoxid im Bereich der Zylinderfläche die Belastung auf, während der keilförmig zurückgebliebene Rest der Einlaufschicht vorwiegend durch entstehende Vibrationen beansprucht wurde. Bezogen auf Stahl lag eine Hertzsche Pressung von 60 N/mm^2 vor. Dabei führt die lineare Schichtdickenabnahme der Zirkoniumoxidschicht bis auf null zu einer besonders gravierenden Beanspruchung in der Grenzschicht zum Chromoxid. Je nach Kontakt-

verhältnissen entstehen auf der Oberfläche Spannungsspitzen durch Rauheitsgipfel, die um mehr als eine Größenordnung als die nach HERTZ berechneten Werte höher sein können. Diese Spannungen klingen in zunehmender Tiefe ab, können aber noch ausreichen, um in der Grenzfläche zu einem anderen Werkstoff ein Versagen durch Schichtablösung zu induzieren [14]. Der Versuch wurde nach 500 h abgebrochen, ohne daß ein Ablösen größerer Zirkoniumoxidpartikel durch die vorliegende Kontaktdynamik eintrat, **Bild 7**.

5 Maschinenverschleißversuche

Im Rahmen der Arbeiten im Sonderforschungsbereich kam ein mit Chromoxid beschichtetes Schraubenrotorpaar zum Einsatz. Die durch das Fertigungsverfahren gegebenen Untermaße ließen eine optimale Beschichtung nicht zu, da die Schichtdicke als Funktion der Zahnflankenkoordinaten zu realisieren war. So ergab eine Vermessung der Rotoren bezogen auf den Industriestandard unzulässige Steigungs- und Teilungsfehler. Gerade bei einer direkten Kraftübertragung durch die Rotorflanken führen derartige Fehler zu einer Erhöhung der Kontaktdynamik, wie sie prinzipiell auch aus den Modellversuchen bekannt ist. Die in der Maschine vorliegende Kontaktdynamik ist bislang noch nicht quantitativ ermittelt worden.

Dennoch war ein Versuchsbetrieb möglich. Nach nur 50 h Versuchsdauer im Trockenlauf zeigten sich in der Nähe des Nebenläufer-Wälzkreises Teile des freigelegten Substrates. An dieser Stelle lag wegen der gegebenen Untermaße apriori eine geringere Schichtdicke vor als üblich. In den beanspruchten Bereichen des Hauptläufers, die eine größere Schichtdicke aufwiesen, war dagegen eine den Modellversuchen ähnliche Glättung festzustellen, Bild 8. Am Übergang zur Stirnfläche kam es teilweise zu einer Schichtablösung, die durch die

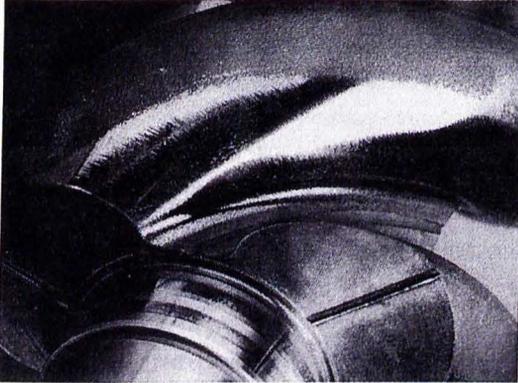


Bild 8: *Mit Chromoxid beschichteter Rotor nach 50 h unsynchronisiertem Trockenlauf*

Fig. 8 *Chromiumoxide-coated rotor after 50 h dry operation without the synchronizing gear*

gegebene Dynamik begünstigt wurde. Die Nutzung eines anderen Fertigungsverfahrens für die Untermaßrotoren gestattet die Herstellung von Rotoren, die eine Beschichtung mit konstanter Schichtdicke erlauben. Dadurch vereinfacht sich das Beschichtungsverfahren und geforderte Toleranzen könnten leichter eingehalten werden. Versuche mit neuen Untermaßrotoren stehen unmittelbar bevor.

6 Literatur

- [1] Schmid R.
Nicoll A. R. *Advances in abradable coatings for gas turbines*, Konferenz Einzelbericht, ASME-Papers, S. 1-10, Paper Nr. 94-GT-449, 1994
- [2] Dorfman M.
Novinski E.,
Kushner B.,
Rotolico A. *A high performance alternative to NiCrAl/bentonite for gas turbine abradable seals*, Proc. of the 13th Int. Thermal Spray Conf. org. by ASM Int. Orlando, FA, USA 28 May-5 June, S. 587-594, 1992
- [3] Jarosinski W. J.
Gruninger M. F. *High Temperature boron nitride abradable materials*, Konferenz Einzelbericht: Thermal Spray: Int. Advances in Coatings Technol., Proc. of the 13th Int. Thermal Spray Conf. org. by ASM Int. Orlando, FA, USA 28 May-5 June, S. 691-694, 1992
- [4] McComas, C. C. *Run-in coating for abradable seals in gas turbines*, European Patent Specification, Publication Nr. EP 0 382 993-B1, Europäisches Patentamt, München, 1993
- [5] Chon T.,
Guimaraes L.,
Kushner B. A.,
Rotolico A. J. *Diamond jet (HVOF) applied abradable coatings for turbine fan case*, Konferenz Einzelbericht: SAE-Papers, S. 1-7, Paper Nr. 900961, 1990
- [6] Marantz, D. R. *Improved abradable coating and its production*, European Patent Specification, Publication Nr. EP 0 361 709-A1, Europäisches Patentamt, München, 1990
- [7] DeMasi-Marcin J. P.
Gupta D. K. *Protective coatings in the gas turbine engine*, Zeitschriftenaufsatz: Surface and Coatings Technology, Band 68/69, S. 1-9, 1994
- [8] Mutasim, Z. Z.
Hsu, L. L. *Evaluation of thermal sprayed bronze abradable coatings: effect of temperature and time on coating microstructure and performance*, In: Konferenz-Einzelbericht: ASME-Papers Nr. 93-GT-371, S. 1-9, 1993
- [9] Kirsten, K. *Keramik/Kunststoffverband statt Stahl – In der Verdichtertechnik ist noch Luft zum Sparen*, In: VDI-Nachrichten Nr. 6, 12.02. 1988
- [10] Meyer, P. J. *Economics of MCrAlY coatings*, In: Konferenz-Einzelbericht, ITSC 95, 14th Internat. Thermal Spray Conf., Thermal Spraying, Current Status and Future Trends, Band 1, S. 217-222, Kobe (Japan), 1995
- [11] Grimenstein, L. *Pumps reap the benefits of thermal spray repair*, Zeitschriftenaufsatz: Welding Journal, Band 74, Heft 10, S. 53-56, New York, 1995
- [12] Alperine, S.
Martinou, R.
Meurel, R.
Huchin, J. P. *New trends in coatings developments for turbine blades: materials processing and repair*, In: Konferenz-Einzelbericht: Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines, Band 558, S. 28.1-10, Rotterdam, 1994
- [13] Gou, X. X.
Zheng, X. M.
Milidantri, G.
Fenton, R. *Development and applications of low pressure plasma sprayed coatings on gas turbine engine components*, In: Konferenz-Einzelbericht, ITSC 95, 14th Internat. Thermal Spray Conf., Thermal Spraying, Current Status and Future Trends, Band 1, S. 73-77, 1995
- [14] Dämgen, U. *Beanspruchung von verschleißbeständigen Werkstoffverbunden in Schraubenkompressoren*, Dissertation, Universität Dortmund, 1998
- [15] Haumann, D. *Beschichten komplexer Geometrien am Beispiel von Schraubenrotoren*, Dissertation, Universität Dortmund, 1997, Werkstofftechnologische Schriftenreihe, Band 2, Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1998