

Beschichtung von Schraubenrotoren

Prof. Dr.-Ing. **K. Kauder** VDI
und Dipl.-Ing. **U. Dreischhoff** VDI, Dortmund

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Beschichtung von trockenlaufenden Schraubenrotoren soll das Konstruktionselement *Synchronisationsgetriebe* für den heute noch notwendigen berührungsfreien Lauf der Rotoren *entfallen*. Ebenso bietet die Beschichtung die Möglichkeit einer *Minimierung der Spaltströme* mit dem Ziel einer *Steigerung der Energiewandlungsgüte*. Der vorliegende Beitrag zeigt den Status einer laufenden Forschungsarbeit, bei der metallische und metall-keramische Verbundwerkstoffe zum Einsatz kommen. Die Arbeit wird im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 316 der Deutschen Forschungsgemeinschaft "Herstellung, Be- und Verarbeitung sowie Prüfung metallischer und metall-keramischer Verbundwerkstoffe" durchgeführt. Es werden *Beschichtungstechniken, Grund- und Beschichtungswerkstoffe* sowie die verwendete *Verschleißprüfung* basierend auf der Gaskraftbelastung der Schraubenrotoren aufgezeigt.

Summary

With the aid of coated, dry-running screw rotors the *synchronizing gear* - which is necessary for a non-contact running til to-day - *will be omitted*. Besides the coating allows to *minimize the gap flow volumes* with the intention to *increase the amount of energy converted*. This paper shows the status of the present research work in which metallics and metallic-ceramics composed materials are used. The work is a section of the special research-field no. 316 of the Deutsche Forschungsgemeinschaft with the

title "Construction, mechanical treatment, machining and testing of metallics and metallic-ceramics composed materials". This paper describes *surface technologies, substrates, coatings* and the used *wear test*, based on the gas load of the screw rotors.

1. Einleitung

Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens der Deutschen Forschungsgemeinschaft, in dem Herstellungs-, Be- und Verarbeitungs- sowie Prüfungsverfahren für metallische und metall-keramische Verbundwerkstoffe untersucht werden, soll das Problem der Festkörperreibung zunächst in Schraubenverdichtern, zu einem späteren Zeitpunkt auch in Schraubengmotoren, bearbeitet werden. Das Entwicklungsziel dieser Forschungstätigkeit stellt sich zum einen in der Ausarbeitung von *Randbedingungen für eine Beschichtung* von Schraubenrotoren, zum anderen in der *Herstellung* von Schraubenrotoren dar, die mit einer Verschleißschicht versehen sind, so daß durch Einsparung des externen Synchronisationsgetriebes ein *schmiermittelfreier, berührender* Lauf der Rotoren in einer Schraubenmaschine ermöglicht wird.

Die Rechtfertigung für die Konzipierung eines trockenlaufenden Schraubenverdichters ohne Ausgleichsgetriebe liegt in der oftmals gestellten Forderung nach einem schmiermittelfreien Betrieb, der beispielsweise in der Lebensmittelindustrie und häufig bei der Prozeßgasverdichtung unverzichtbar ist sowie in dem Bestreben, die erhöhten Anlagenkosten durch die Ölabscheidung und dem damit verbundenen Wartungsaufwand zu senken und in der Minimierung des Bauaufwandes und -volumens von Schraubenmaschinen. Des weiteren läßt sich beim Einsatz beschichteter Schraubenrotoren durch Minimierung der Profileingriffsspaltströme eine Steigerung der Energiewandlungsgüte erreichen, wenn man voraussetzt, daß die Entropieproduktion in der Maschine, die dann auch vom Reibungskoeffizienten der Schichtpaarun-

gen abhängt, niedrig gehalten werden kann. Beschichtete Schraubenrotoren bieten, für den Fall, daß eine Kühlung des Arbeitsraumes vorgesehen wird, die Möglichkeit, beliebige Wärmetransportfluide einzusetzen, da die heute verwendete Ölkühlung als unzureichend gelten kann.

2. Vergleich verschiedener Verfahren für die Beschichtung von Schraubenrotoren

Aus dem breiten Verfahrensspektrum zum Beschichten technischer Oberflächen wurden speziell für das Aufbringen von Verschleißschichten die Verfahren in eine engere Wahl gezogen, die in jüngster Zeit, einerseits durch verbesserte Verfahrensvarianten, andererseits durch die Vielzahl der verwendbaren Grund- und Beschichtungswerkstoffe vielversprechende Erfolge in tribologischen Systemen erreichten. Es handelt sich hierbei um die *thermischen Spritzverfahren* (z.B. Flamspritzen, Lichtbogenspritzen, Plasmaspritzen) und um die *Dünnschichttechnologien*

PVD (Physical Vapour Deposition) und
CVD (Chemical Vapour Deposition).

Die *PVD-Verfahren* lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- *Bedampfen (Evaporation Process)*,
- *Zerstäuben (Sputtering)* und
- *Ionenplattieren (Ion-plating)*.

Das Ionenplattieren zählt zu den neuen *PVD-Verfahren*. Es findet zusehends mehr Interesse, weil hier die Vorteile des Bedampfens (hohe Verdampfungsraten) mit denen des Zerstäubens (Herstellung hafter, dichter Schichten) miteinander verbunden werden /1/.

Bei einem Vakuum von 10^{-1} Pa wird der Beschichtungswerkstoff thermisch verdampft und mittels besonderer Mechanismen auf dem Rotor abgeschieden. Zwischen dem als Kathode gepolten Rotor und dem als Anode gepolten Verdampfungs-material wird ein Plasma erzeugt. Die mit dessen Hilfe er-

zeugten hochenergetischen Edelgasionen sputtern zunächst Fremdbeläge von der Rotoroberfläche ab, reinigen sie und ätzen sie an. In das Plasma eingedampftes Beschichtungsmaterial wird zum geringen Teil durch Stoßionisation umgeladen, kurzzeitig ionisiert und zur Kathode (Rotor) hin beschleunigt. Nichtmetallische Werkstücke können mit einem kathodisch gepolten Drahtnetz überzogen werden. Gegebenenfalls wird der Rotor zur besseren Schichtausbildung beheizt /2/.

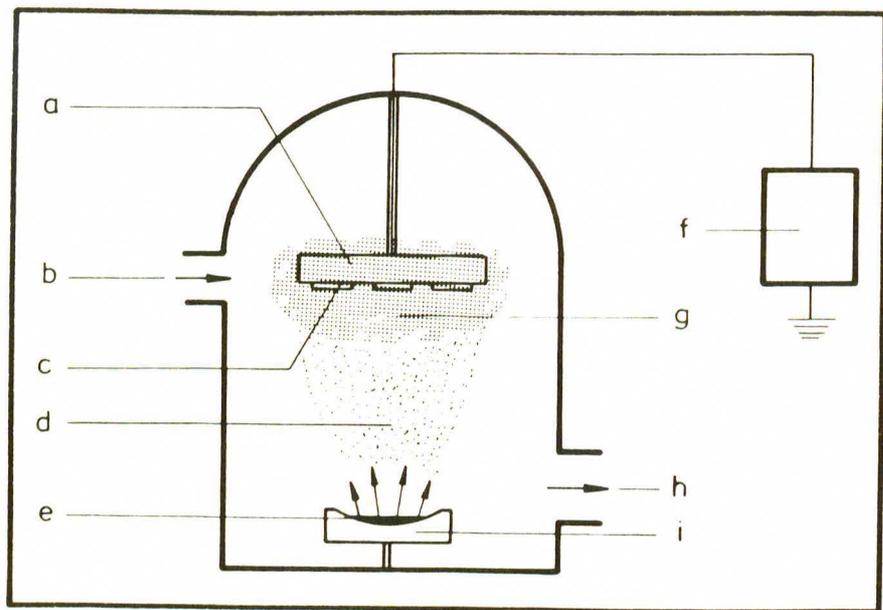


Bild 1: Schema einer Ionenplattierungsanlage

Fig. 1: View of an ion-plating-system

a	Werkstückhalter	a	substrate holder
b	Gas	b	working gas
c	Werkstück(e)	c	substrate(s)
d	verdampftes Material	d	evaporated material
e	Beschichtungsmaterial	e	coating material
f	Energieversorgung	f	power supply
g	Plasma	g	plasma
h	Vakuumpumpe	h	vacuum pump
i	Verdampfer	i	evaporating system

Unter dem Begriff *CVD* versteht man ein physikalisch-chemisches Verfahren, um hochwertige, verschleißfeste und/oder korrosionsbeständige Schichten aus gasförmigen Metall-Verbindungen in hochreiner Form auf der Oberfläche erhitzter Werkstücke abzuscheiden. Dieses Abscheiden erfolgt in besonderen Anlagen, die aus einem Versorgungssystem für die gasförmigen Reaktanten, dem Abscheidebehälter und einem Entsorgungssystem für die entstehenden gasförmigen Reaktionsprodukte bestehen.

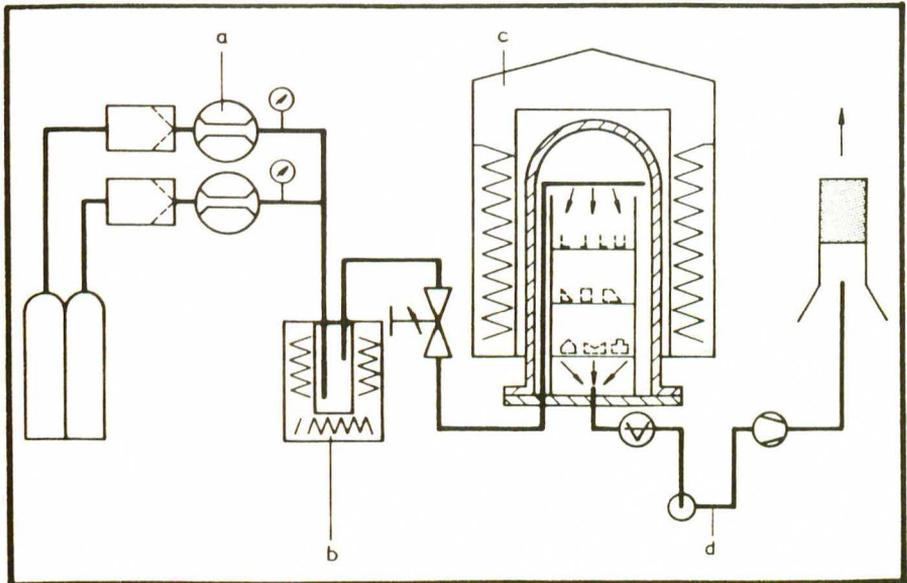


Bild 2: Schema einer CVD-Anlage

Fig. 2: View of a CVD-system

- a Gasreinigung und Dosierung
- b Verdampfungs- und Einspeisesystem
- c Reaktor und Beheizung
- d Vakuumpumpe und Abgasneutralisation

- a conditioning and dosage
- b evaporating system and feed-system
- c reactor and heating
- d vacuum pump and neutralization of waste-gas

Im folgenden wird auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Beschichtungstechniken hinsichtlich des Aufbringens von Verschleißschuttschichten auf Schraubenrotoren näher eingegangen.

2.1. Schichtdickenverteilung an den Zahnflanken

Aufgrund der komplizierten Bauteilgeometrie der Schraubenrotoren war es sinnvoll, erste Erfahrungen zu den Verfahrensabläufen der ausgewählten Oberflächenbeschichtungs-techniken zu sammeln und Aussagen über die damit erzielbaren Schichtqualitäten zu machen. Unter "Schichtqualität" sind hier nicht die mechanischen Eigenschaften und die Verschleißfestigkeit der Schutzschichten zu verstehen, die separat auf einem Versuchsstand untersucht werden, sondern hier geht es in erster Linie um die Güte der Schichtdickenverteilung an den Zahnflanken der Rotoren. Aus diesem Grund sind Vorversuche unternommen worden, Schraubenrotoren auch mit dem thermischen Spritzverfahren *Flammspritzen* zu beschichten. Nach einer solchen Oberflächenbeschichtung lieferte bereits die optische Kontrolle, daß die Schichtdickenverteilung an den Zahnflanken der Rotoren stark streute. Zusätzlich aufgenommene Schliffbilder von Zahnflankenabschnitten bestätigten diese Aussage. Es ergaben sich Abweichungen in der Größenordnung einiger Zehntelmillimeter bis zu einem Millimeter.

Das aber würde wahrscheinlich eine *spanende Nachbearbeitung* mit diamantgebundenen oder mit CBN-beschichteten Schleifscheiben auch dann bedeuten, wenn eine Optimierung des Spritzprozesses durch Automatisierung zu erreichen wäre.

Parallel zu den Beschichtungsversuchen mittels thermischer Spritzverfahren wurden Schraubenrotoren durch ein *PVD-Verfahren (Ionenplattieren)* mit Titanitrid (TiN) beschichtet. Die Abscheidungs-temperatur für TiN liegt heute bei diesem Verfahren in einem Temperaturbereich um 450°C, die Schichtdicke beträgt ca. 3µm. Ein bemerkenswerter wirtschaftlicher Vorteil dieses Verfahrens ist es, daß trotz der komplizierten Rotorgeometrie eine *spanende Nachbearbeitung entfallen kann*.

2.2. Fertigung des Schraubenrotorrohlings

Die Dicke thermisch gespritzter Schichten liegt je nach Anwendungsfall im Bereich von 0,1 mm bis 8 mm /3/, häufig werden Schichtstärken um 2 mm eingesetzt. Die Stärke der Verschleißschichten bei Schraubenrotoren wird ca. 0,3 mm betragen, um Schichteigenspannungen minimal zu halten und die Gefahr frühzeitigen Abplatzens der Schichten zu verhindern.

Schraubenrotor-Rohlinge müssen deshalb mit einem entsprechenden *Untermaß* gefertigt werden. Es besteht die Notwendigkeit, speziell an die Schichtdicke angepaßte Fräser herzustellen und nicht, wie es wünschenswert wäre, Serienprofile je nach Einsatzfall, wahlweise beschichten zu können.

Bei den Dünnschichtverfahren PVD und CVD beträgt die Schichtdicke funktioneller Oberflächen je nach abgedampftem oder aufgedampftem Werkstoff 1 bis 10 μm .

Gründe dafür sind, daß:

- a) die angestrebten Oberflächeneigenschaften bereits bei dünnen Schichten erreicht werden können,
- b) die Beschichtungszeit wegen der hohen Beschichtungs-temperatur und der damit möglichen Grundwerkstoffbeanspruchung kurz gehalten werden soll,
- c) die linearen Ausdehnungskoeffizienten von Schicht- und Rotorwerkstoff zum Teil recht unterschiedlich sind und bei Überschreitung bestimmter Schichtdicken die Gefahr des Abplatzens besteht,
- d) insbesondere Hartstoffe wie TiC, TiN usw. bei dünnen Schichten ein noch ausreichendes, quasi elastisches Verhalten aufweisen und trotz ihrer hohen Härte in genügender Weise schlag- und stoßfest sind /4/.

2.3. Anforderungen an den Grundwerkstoff

Für die thermischen Spritzverfahren können die gängigen, häufig im Verdichterbau eingesetzten Vergütungsstähle C 35 (1.0501) und C 45 (1.0503) als Schraubenrotor-Grundwerkstoff Verwendung finden. Die thermische Belastung des Grundwerkstoffes bleibt dabei gering.

So kann z.B. beim Plasmaspritzen, trotz der im elektrischen Lichtbogen im Innern des Plasmabrenners erzeugten hohen Temperatur von 30.000 K und dem mit ca. 1.000 m/s austretenden Plasmastrahl, der Prozeß so gesteuert werden, daß der Grundwerkstoff nahezu "kalt" bleibt /5/.

Übliche Grundwerkstofftemperaturen liegen beim Plasmaspritzen je nach Volumen des zu beschichtenden Bauteils und verwendetem Spritzwerkstoff bei ca. 200°C.

Bei den PVD- und CVD-Verfahren ist der zu beschichtende Rotor vergleichsweise höheren Prozeßtemperaturen und einer längeren Aufwärm- und Reaktionsphase ausgesetzt.

Um z.B. leistungsfähige reproduzierbare PVD-Titan-Nitrid-Schichten auf Bauteilen oder Werkzeugen aufzubringen, sind Temperaturen von über 450°C notwendig. Der Bereich der zulässigen bzw. geeigneten Grundwerkstoffe, die mit einer Verschleißschuttschicht versehen werden können, beschränkt sich auf spezielle Stähle und auf Hartmetalle.

Beim Aufstäuben (Sputtern) von Schichten werden die Rotoren zwischen 300°C und 500°C warm, wo hingegen das Hochleistungserstäuben nur zu Temperaturbelastungen von 100°C bis 250°C führt /2/.

Die CVD-Beschichtungstemperaturen liegen im Regelfall zwischen 900°C und 1.100°C; so wird z.B. Titan-Carbid bei ca. 1.000°C abgeschieden.

Wegen der Temperaturexposition muß häufig ein geringer Verzug der zu beschichtenden Bauteile akzeptiert werden. Bauteile mit wesentlich geringeren Maßtoleranzen als $\pm 0,03$ mm sind im Regelfall für das CVD-Beschichten wenig geeignet /2/.

Man kann Werkstücke mit plasmaunterstützten CVD-Verfahren bei etwa 250°C bis 400°C beschichten und gelangt somit in den Temperaturbereich des Sputterns /6/. Allerdings sind plasmaunterstützte CVD-Anlagen noch nicht hinreichend weit industrialisiert, sie befinden sich für verschiedene Beschichtungswerkstoffe noch in der Entwicklung.

Da der Grundwerkstoff beim späteren technischen Einsatz wegen der extrem dünn abgeschiedenen Schichten zusätzlich eine *Stützfunktion* ausüben muß (Kompensation der ungenügenden Tragfähigkeit harter Schichten) sollte er, für eine PVD-Beschichtung eine *Mindestausgangshärte* von 60 bis 64 HRC besitzen, um eine nachfolgende zusätzliche Wärmebehandlung im Vakuum oder unter Schutzgas auszuschließen.

Während Hartmetalle wegen ihrer hohen Temperaturbeständigkeit mittels herkömmlicher CVD-Verfahren problemlos beschichtet werden können, ist bei Stahl-Rotoren eine Wärmenachbehandlung erforderlich /6/.

Wie schon erwähnt, besteht die Notwendigkeit höherwertige und kostensteigernde Grundwerkstoffe für diese Dünnschichtverfahren heranzuziehen. *Bild 3* zeigt eine Auswahl von Stählen, auf die heute mit PVD- und CVD-Verfahren Verschleißschichten erfolgreich aufzubringen sind.

Werkstoffgruppe	DIN-Bezeichnung	Werkstoff-Nr.
Kaltarbeitsstähle hochlegiert	X 155 CrMo 12 1	1.2379
	X 165 CrMoV 12	1.2601
	X 210 CrW 12	1.2436
mittellegiert	X 100 CrMoV 5 1	1.2363
niedriglegiert	145 Cr 6 1)	1.2063
	100 Cr 6 1)	1.3505
	90 MnV 8 1)	1.2842
unlegiert	C 100 W 1 1)	1.1540
	C 100 W 2 1)	1.1650
Warmarbeitsstähle	X 38 CrMoV 5 1	1.2343
	X 32 CrMoV 3 3	1.2365

Bild 3:

Zur Beschichtung mit dem PVD- und CVD-Verfahren verwendbare Substratwerkstoffe

Fig. 3:

Used substrates in PVD- and CVD-processes

1) für PVD-Verfahren nur bedingt geeignet

3. Übersicht über thermisch gespritzte und durch PVD, CVD abgeschiedene Verschleißschutzschichten

Es ist eine Vielzahl von Beschichtungswerkstoffen bekannt, die als Verschleißschutz in tribologischen Systemen eingesetzt werden. Bild 4 gibt einen Überblick der durch thermisches Spritzen, PVD und CVD aufgetragenen Schutzschichten, die besonders häufig veröffentlicht sind.

Je nach Art der tribologischen Beanspruchung und der wirksamen Verschleißmechanismen werden Bauteile mit unterschiedlichen Verschleißschutzschichten versehen bzw. kommen verschiedene Schichtpaarungen zum Einsatz.

Eine Anforderung, die an geeignete Beschichtungswerkstoffe für Schraubenrotoren gestellt werden sollte, ist - neben der Voraussetzung eines guten Verschleißverhaltens - ein niedriger Reibungskoeffizient der Schichtpaarung bei reiner Festkörperreibung, da ähnlich wie bei Zahnradgetrieben sowohl eine Wälz-, als auch eine Gleitbewegung zwischen den Zahnflanken stattfindet. Der, durch das Gleiten verursachte Verlust an mechanisch nutzbarer Energie, der eine Wirkungsgradeinbuße bedeutet, sollte deshalb minimal gehalten werden.

Bild 5 zeigt beispielhaft einige thermisch gespritzte Schichtpaarungen mit günstigem Verschleiß- und Reibungsverhalten bei Festkörperreibung.

Ausgezeichnete Abrieb- und Verschleißbeständigkeit besitzen auch die thermisch gespritzten CoMoSi-Schichten (Tribaloys). Ihr Reibungskoeffizient beträgt bei Trockenreibung 0,3 /2/.

Ein geringer Verschleiß und ein niedriger Reibungskoeffizient kann auch für folgende PVD- bzw. CVD-Hartstoff-Schichtpaarungen angegeben werden:

TiC / TiN	TiC / TiC
TiC / WC	TiC / Cr ₇ C ₃

(nach Hintermann, aus /2/).

Verschleißschutzschichten			
	durch thermisches Spritzen aufge- bracht	durch PVD abgeschieden	durch CVD abgeschieden
Metalle und Legierungen	Mo legierter Stahl Co-Werkstoff mit Al ₂ O ₃ bzw. Cr ₂ O ₃ CoMoSi-Legierung (Tribaloy) Hartlegierungen mit Matrix, Fe, Co, Ni und Boriden, Car- biden, Siliciden der Elemente V, Cr, Mo, W	Cr Cr 80 - Ni 20	Cr Mo
Boride	TiB ₂ ZrB ₂		NiB FeB / Fe ₂ B
Carbide	TiC Cr ₃ C ₂ NbC TaC WC - TiC TaC - NbC Cr ₃ C ₂ - NiCr WC - Co	SiC TiC TiC - TiN CrC Cr ₃ C ₂ WC Ti (CN)	SiC TiC TiC - TiN TiC - Al ₂ O ₃ CrC Cr ₇ C ₃ Ti (CN)
Nitride		TiN	TiN Fe _{2,3} N / Fe ₄ N
Oxide	Al ₂ O ₃ TiO ₂ Cr ₂ O ₃ ZrO ₂ Al ₂ O ₃ - TiO ₂ Al ₂ O ₃ - MgO Cr ₂ O ₃ - TiO ₂ ZrO ₂ - MgO ZrO ₂ - CaO ZrO ₂ - SiO ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃

Bild 4: Thermisch gespritzte, durch PVD und CVD abgeschiedene Verschleißschutzschichten

Fig. 4: Thermal sprayed and PVD-, CVD-wear resistant coatings

Schichtpaarung	
80 Cr ₂ O ₃ , 20 Al ₂ O ₃	- 80 Cr ₂ C ₂ , 20 NiCr
80 Cr ₂ O ₃ , 20 Al ₂ O ₃	- 80 Cr ₂ O ₃ , 20 Al ₂ O ₃
84 Cr ₂ C ₂ , 15% Ni-Cr	- 99 Al ₂ O ₃
WC + 15% Ni	- 99 Al ₂ O ₃
WC + 15% Ni	- TiC 161

Bild 5: Thermisch gespritzte Schichtpaarungen mit günstigem Verschleiß- und Reibungsverhalten bei Festkörperreibung nach Union Carbide, aus /2/

Fig. 5: Thermal sprayed coatings with favorable properties of wear and friction in case of solid-state friction; according to Union Carbide, /2/

4. Theoretische Überlegungen zur Ermittlung der Belastungen von Verschleißschutzschichten bei Schraubenrotoren

Im folgenden soll eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Hertz'schen Pressung zwischen den Rotorzahnflanken beliebiger, idealer Profilformen erläutert werden. Erste Aussagen über die Belastung von Verschleißschutzschichten bei Schraubenrotoren lassen sich mit Hilfe der Hertz'schen Pressung gewinnen, und daraus können gegebenenfalls Profiländerungen abgeleitet werden, mit dem Ziel, die Schichtbeanspruchung infolge Pressung und Gleitung zu minimieren.

Im ersten Schritt als starr angenommen, können Geometrieänderungen und elastische Verformungen der Rotoren, die durch mechanische und thermische Belastung in der realen Maschine auftreten, sowie Abweichungen der Ist- von der Sollgeometrie durch Fertigungsfehler in weiteren Schritten in die Rechnung eingeführt werden. Korte /7/ und Buthmann /8/ haben sich ausführlich in ihren Arbeiten mit Verfor-

mungsproblemen und Ist-/Sollgeometrieabweichungen bei Schraubenrotoren beschäftigt.

Das von Schüler /9/ erarbeitete Programmpaket - ROTEP I - zur rechnergestützten Entwicklung und Optimierung von Schraubenrotorprofilen wird als Basis für die theoretischen Überlegungen und Berechnungen zur Belastungsermittlung von Schraubenrotoren herangezogen.

Da ein Schraubenrotor radialsymmetrisch behandelt werden kann, reicht zur vollständigen Profilbeschreibung ein einzelner Zahn von Haupt- und Nebenrotor aus, solange man dabei von einer Sollkontur ausgeht. Vorgegeben sind die Stützwerte idealer, spielfreier Rotorprofile. Davon ausgehend erfolgt durch die Vorgabe eines beliebigen Spieles die Umrechnung der vorliegenden Profildaten von Haupt- und Nebenrotor in äquidistante, *spielbehaftete Zahnkonturen*.

Anschließend werden Haupt- und Nebenrotor so weit verdreht, bis die *korrespondierenden Flanken* aneinander anliegen, d.h., bis der Berührungspunkt ermittelt ist. Die Suche nach diesem Berührungspunkt zwischen den Rotorflanken vollzieht sich vom Eintauchen eines Hauptrotorzahnes in eine Nebenrotorzahnlücke bis zum Austauchen.

Die allgemeine *Theorie nach Hertz* für beliebig gekrümmte, feste elastische Körper verlangt die Kenntnis der *Hauptkrümmungen* und der *Hauptkrümmungsrichtungen* der beiden Rotoren im Berührungspunkt. Unter Hauptkrümmung wird hier die kleinste und größte Krümmung eines Rotors verstanden, unter Hauptkrümmungsrichtung, die Lage der Hauptkrümmung zu einem festen räumlichen Bezugssystem.

Bei Kenntnis dieser Größen ist es möglich, die Zahnflanken der Schraubenrotoren im Berührungspunkt durch Flächen zweiter Ordnung (z.B. Ellipsoide, Hyperboloide) zu beschreiben (*Bild 6*).

Ferner gehen in die Berechnung der Hertz'schen Pressung die Normalkraftbeanspruchung und die Werkstoffdaten (Elastizi-

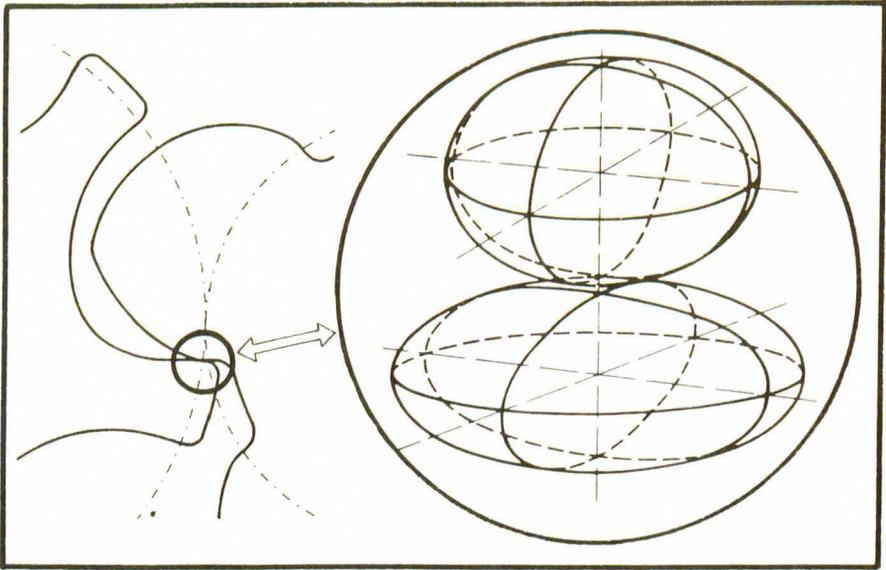


Bild 6: Beschreibung der Zahnflanken von Haupt- und Nebenrotor im Berührungspunkt durch Flächen zweiter Ordnung

Fig. 6: Description of the teeth surfaces of the male and female rotor in the point of contact by surfaces of second order

tätsmodul, Querkontraktionszahl) ein. Die Normalkraftbeanspruchung ergibt sich aus der Aufteilung des Nebenrotormomentes auf die einzelnen Berührungspunkte, wobei hier zunächst in erster Näherung von der Annahme einer gleichmäßigen Momentenaufteilung ausgegangen wird. Man erhält eine Annäherung an die reale Kontaktflächenbelastung aus den Tragbildern der unbelasteten und belasteten Rotorpaarungen.

5. Tribologische Prüfungen

5.1. Aufbau des Modellverschleißversuchsstandes

Tribologische Prüfsysteme lassen sich vereinfachend in drei Gruppen einteilen, nämlich in

- Modellprüfung,
- Bauteilversuch,
- Praxistest.

Um den komplizierten Praxisfall, also den Verdichterbetrieb mit trockenlaufenden, direkt miteinander kämmenden Schraubenrotoren, in einfache Grundvorgänge zerlegen zu können, wurde für die *erste Phase* der tribologischen Untersuchungen ein Modellversuchsstand entwickelt, mit dem sowohl das Gleit-, als auch das Wälzverschleißverhalten (Ermüdungsverschleißverhalten) beschichteter, jedoch zylindrischer Probekörper untersucht wird, *Bild 7, Bild 8*.

Als Antrieb dient ein drehzahlregelbarer Gleichstrommotor mit einer Kupplungsleistung von $P_e = 30 \text{ kW}$ und einer maximalen Drehzahl $n = 3.000 \text{ min}^{-1}$. Um die im realen Verdichterbetrieb auftretenden hohen Umfangsgeschwindigkeiten von $u > 50 \text{ m/s}$ realisieren zu können, ist dem Motor ein Untersetzungs-Zahnriementrieb nachgeschaltet, so daß die Antriebsdrehzahl des treibenden Prüfkörpers auf $n = 12.000 \text{ min}^{-1}$ erhöht werden kann. Dies bedeutet, daß sich für einen verwendeten Probekörperdurchmesser von $d = 120 \text{ mm}$ eine maximale Umfangsgeschwindigkeit von $u = 75 \text{ m/s}$ ergibt.

Damit die definiert einstellbare Anpreßkraft, die durch unterschiedliche Gewichtssätze aufgebracht wird, keine Verfälschung durch die leistungsabhängige Querkraft des Riementriebes erfährt, erfolgt eine Trennung des Prüfkörperpaares von der Antriebseinheit durch eine Kupplung.

Die abtriebsseitige Probe ist direkt mit einer Wirbelstrombremse gekuppelt.

Mit dieser Versuchsanordnung können durch geeignete Wahl

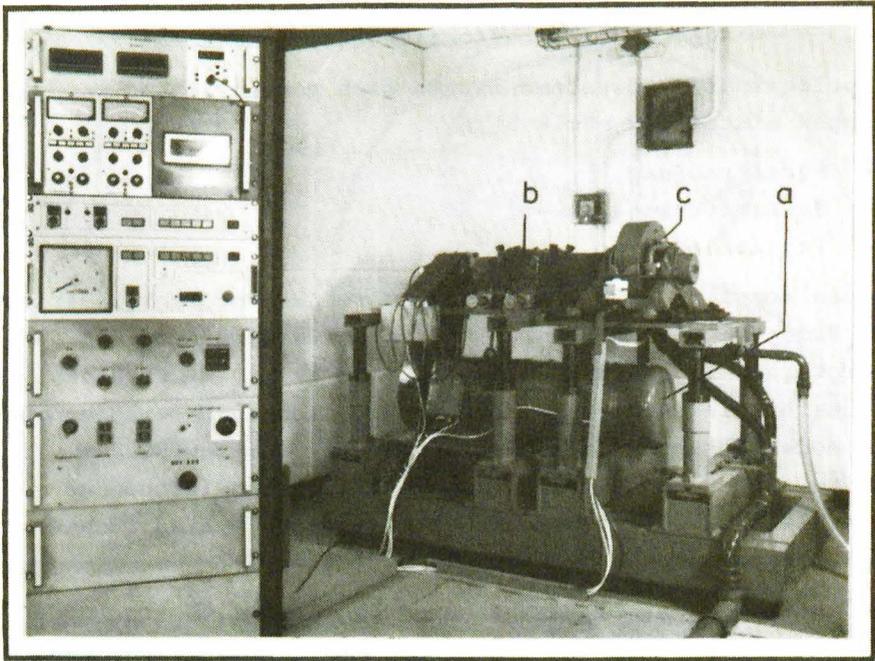


Bild 7: Oberflächenverschleißversuchsstand der Universität Dortmund, Prinzip in Bild 8 (Bauteile a, b, c)

Fig. 7: Surface-endurance testing machine of the university of Dortmund, method of operation in Fig. 8 (component parts a, b, c)

der An- und Abtriebsdrehzahlen der zylindrischen Probekörper sowohl Wälzen als auch variable Gleitgeschwindigkeiten simuliert werden. Aufgrund der vorgesehenen Meßmöglichkeiten von Antriebsdrehzahl und Lastmoment können dann bei bekannter Anpreßkraft auch Aussagen über die Reibungszahl verschiedener Werkstoffpaarungen gewonnen werden.

5.2. Versuchsprogramm

Für die Modellprüfphase sind als Schichtbeanspruchungsparameter (Pressung, Gleitgeschwindigkeit) die Werte heranzuziehen, die, wie in Kapitel 4 beschrieben, mit einem ver-

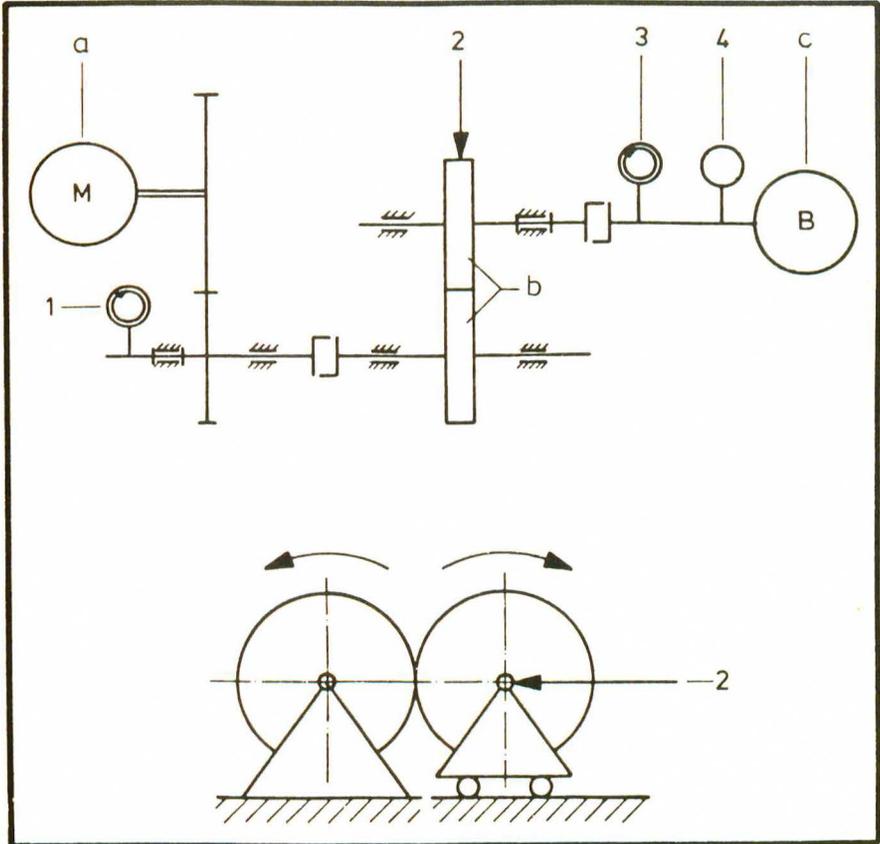


Bild 8: Schematischer Aufbau des Verschleißversuchsstandes für beschichtete, zylindrische Probekörper

Bauteile:

- a regelbarer Gleichstrommotor
- b zylindrische Probekörper
- c Wirbelstrombremse

Meßstellen:

- 1 Antriebsdrehzahl
- 2 Normalkraft
- 3 Abtriebsdrehzahl
- 4 Drehmoment

Fig. 8: Principle of the surface-endurance testing machine for coated, cylindrical samples

component parts:

- a variable-speed direct current motor
- b cylindrical samples
- c eddy-current brake

measuring points:

- 1 rotational speed of the driving side
- 2 normal force
- 3 rotational speed of the power take-off side
- 4 driving torque

feinerten Algorithmus zur Ermittlung der Belastung von Schraubenrotorprofilen berechnet werden.

Als Prüfkörpergrundwerkstoffe kommen zum Einsatz:

- C 45 , für die thermisch gespritzten Schichten,
- X 155 CrVMo 12 1 , für die Beschichtung mittels PVD.

Als Schichtpaarungen sind zunächst folgende Werkstoffe vorgesehen:

- Thermisch gespritzt:

Al₂O₃- TiO₂ 60/40 - Al₂O₃- TiO₂ 60/40

Ni-Graphit - Al₂O₃

W C - Co 88/12 - Al₂O₃

- mittels PVD abgeschieden:

TiC - TiN

TiN - TiN.

Die Schichtpaarungen, die unter den Modellversuchsbedingungen das beste Verschleißverhalten zeigen, bzw. die höchsten Standzeiten erreichen, sollen in anschließenden Bauteilversuchen Verwendung finden. Geplant ist, daß die Versuchseinrichtung (vgl. Bilder 7 und 8) dahingehend abgeändert wird, daß die beschichteten Probekörper nun durch beschichtete Schraubenrotoren ersetzt werden.

Das Belastungsmoment der Bauteilversuche folgt aus dem resultierenden Moment der Gaskraftbelastung.

Im Anschluß an die Bauteilversuchsphase erfolgt die Erprobung der beschichteten Rotoren im Schraubenverdichter.

Literatur

- /1/ Steffens, H.D. Stellung des thermischen Spritzens
 Ertürk, E. innerhalb der Oberflächenbeschichtungstechnik
 in: Jahrbuch Oberflächentechnik,
 Band 40, Berlin-Heidelberg: Metall-
 Verlag GmbH, 1984, S. 283

- /2/ Simon, H.
Thoma, M. Angewandte Oberflächentechnik für
metallische Werkstoffe
München Wien: Carl Hanser Verlag,
1985
- /3/ Eschnauer, H.
Schwarz, E. Seminar Verschleißschutz techni-
scher Oberflächen - Beschichtung
durch thermisches Spritzen
VDI-Bildungswerk, Karlsruhe: 3. und
4.12.85 (Vortragsveröffentlichung)
- /4/ Putzier, U. CVD-Verfahren
in: Veredelung von Metalloberflä-
chen, Haus der Technik, Heft 374
Essen: Vulkan-Verlag Dr.W. Classen,
1978, S. 8
- /5/ Kayser, H. Thermisch gespritzte Schichten im
Vergleich zu anderen Oberflächen-
behandlungsverfahren
in: Veredelung von Metallober-
flächen, Haus der Technik, Heft
374, Essen: Vulkan-Verlag
Dr. W. Classen, 1978, S. 65
- /6/ Rie, K. T. Plasmagestützte CVD-Verfahren
in: Beschichtungen für Hochlei-
stungsbauteile, VDI Berichte 624
Düsseldorf: VDI Verlag, 1986, S.49
- /7/ Korte, K. J. Simulation der kinematischen und
thermodynamischen Abläufe in der
rotierenden Schraubenmaschine
Universität Bochum, Dissertation,
1980

- /8/ Buthmann, P. Rechnergestützte Schraubenverdichterprofilentwicklung und -rotorauslegung unter Berücksichtigung der betriebsbedingten Verformungen
Universität Bochum, Dissertation, 1985
- /9/ Schüler, R. Entwicklung von Schraubenmaschinen-Rotoren - Ein Beitrag zur Optimierung von Schraubenmaschinen
Universität Dortmund, Dissertation, 1984