



REIBFLÄCHENBESCHICHTUNG IM TROCKEN LAUFENDEN KOLBENKOMPRESSOR

NUTZEN UND RISIKEN

Dr. Norbert Feistel



Dr. Norbert Feistel studierte Allgemeinen Maschinenbau an der Universität Karlsruhe. 1987 Abschluss als Dipl.-Ing. (TH). Beginn der beruflichen Karriere als Konstrukteur in der Abteilung Rollen- und Kettenförderer der Firma Mannesmann Demag Fördertechnik, Offenbach/Main. 1988 Eintritt in die Abteilung Forschung und Entwicklung der Firma Burckhardt Compression, Winterthur, Schweiz. Hier ist er tätig als Fachspezialist für die Entwicklung trocken laufender Dichtsysteme für Prozessgas-Kompressoren. 2002 Promotion an der Universität Erlangen-Nürnberg mit einer Arbeit zum Betriebsverhalten trocken laufender Dichtsysteme von Kreuzkopfkompressoren.

Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Prozessgas-Kompressoren steigen stetig. Deshalb gewinnen Massnahmen zum Schutz der Gegenlaufflächen von Dicht- und Führungsringen zunehmend an Bedeutung. Unklar ist hierbei, welche Einflüsse die verschiedenen Beschichtungen auf die Prozesse haben, die im trocken laufenden Reibkontakt stattfinden. Prüfstandversuche mit trocken laufenden Dichtsystemen ergaben, dass es bei einigen Beschichtungen – trotz hoher Härtewerte von deutlich über 1'000 HV – nach einer Versuchsdauer von nur 500 Stunden zu einer erheblichen Änderung der Oberflächenstruktur kam; mit ihr ging typischerweise auch eine hohe Verschleissrate der Dichtelemente einher. Auch die unterschiedliche Chemikalienbeständigkeit der verschiedenen Beschichtungen scheint neben der Oberflächentopographie ein wichtiger Einflussfaktor für die Transferfilmbildung zu sein. Insbesondere bei einer hohen Druckbelastung erbrachte eine Nitrierstahlkolbenstange niedrigere Verschleissraten im Vergleich zu allen für den Einsatz in korrosiven Medien empfohlenen Beschichtungen.

KAPITEL 1

Einleitung

Die Verwendung von Beschichtungen zur Vermeidung von Schäden bei der Verdichtung von korrosiven Gasen hat sich seit vielen Jahren bewährt. Da die Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Prozessgas-Kompressoren stetig steigen, werden Beschichtungen heute zum Schutz tribologisch beanspruchter Oberflächen aber auch dann vermehrt verwendet, wenn korrosive Medien fehlen. So wird in der API 618 unabhängig vom Grundmaterial die Verwendung einer den Verschleiss mindernden Beschichtung für die Kolbenstangen empfohlen¹. Auch im Verdichtungsraum kann eine verschleissfeste Beschichtung bei einem hoch belasteten Dichtsystem, beim Gebrauch von Kolben- und Führungsringen mit abrasiven Füllstoffen oder bei abrasiven Gasverschmutzungen im Fördergas erforderlich werden.

Dem komplexen Anforderungsprofil für den Einsatz einer Beschichtung in einem Prozessgas-Kompressor, das vor allem durch die unterschiedlichsten Gase, Gasgemische und Begleitstoffe geprägt ist, steht heute eine Vielzahl an Kombinationen aus Beschichtungswerkstoffen und -verfahren gegenüber. Insbesondere im trocken laufenden Kolbenkompressor sind zusätzlich

noch die im Reibkontakt stattfindenden Interaktionen zwischen den Reibpartnern und dem Umgebungsmedium zu beachten. Auch die für stabile Trockenlaufbedingungen wichtige Oberflächenstruktur der Beschichtung wirft Fragen hinsichtlich optimaler Parameter und Realisierbarkeit auf. Hinzu kommt die grosse Bandbreite an Einflussparametern, um die gewünschte Schichtqualität zu erzeugen.

KAPITEL 2

ANFORDERUNGEN AN EINE REIBFLÄCHENBESCHICHTUNG IM TROCKEN LAUFENDEN KOLBENKOMPRESSOR

Um die für eine konkrete Anwendung am besten geeignete Kombination aus Beschichtungswerkstoff und -verfahren bestimmen zu können, sind neben guten Materialkenntnissen auch möglichst genaue Informationen über die vorliegenden Beanspruchungsarten notwendig. Je nach Einsatzgebiet werden eine hohe Korrosionsbeständigkeit und/oder eine hohe Verschleissfestigkeit gefordert. Abhängig davon, ob es sich um eine Neubeschichtung oder die Reparatur eines verschlissenen Bauteils handelt, ist die maximal zulässige Schichtdicke von Bedeutung, die einzelne Verfahren bereits ausschliesst oder zumindest die Verwendung einer speziellen Aufbauschicht erforderlich macht. Das Durchmesserpektrum der innen zu beschichtenden Zylinder reicht von unter 50 mm bis über einem Meter. Schliesslich kommt bei der ölfreien Verdichtung auch noch die Eignung der Reibflächenbeschichtung für den trocken laufenden Betrieb mit einer Vielzahl von gefüllten Kunststoffmaterialien hinzu.

2.1 KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT

Beschichtungen mit einer möglichst guten Chemikalienbeständigkeit werden eingesetzt, um bei der Verdichtung von korrosiven Gasen wie Chlor, Chlorwasserstoff, Schwefelwasserstoff etc. Schäden an den metallischen Reibflächen im Zylinder und an der Kolbenstange zu vermeiden. Über viele Jahre hinweg haben sich für solche Anwendungen vor allem keramische Beschichtungen, beispielsweise das Dichromtrioxid (Cr_2O_3), bewährt.

Neben den Keramiken werden vermehrt auch Hartmetallbeschichtungen bei der Verdichtung korrosiver Medien eingesetzt. In der für Reibflächenbeschichtung gängigsten Variante in Form von Wolframkarbid in einer Kobaltmatrix stellt jedoch das unedle Kobalt den Schwachpunkt bei der Korrosionsbeständigkeit dar. Zur Verbesserung wurde die metallische Kobaltmatrix zu etwa einem Drittel durch Chrom ersetzt. Diese WC/CoCr-Beschichtungen haben sich im Kolbenkompressor rasch in vielen Anwendungen mit korrosiven Medien bewährt. Eine ebenfalls sehr korrosionsbeständige Variante einer Hartmetallbeschichtung ist das Chromkarbid in einer Matrix aus Nickel und Chrom. Die insbesondere auch für Hochtemperaturanwendung geeignete Verschleisschutzschicht hat sich in der chemischen Industrie und der Luft- und Raumfahrt durch gute Ergebnisse ausgezeichnet und wird mittlerweile auch als Reibflächenbeschichtung in Kompressoren verwendet.

Die für den Korrosionsschutz geeigneten Keramiken und Hartmetalle werden meistens durch thermisches Beschichten aufgetragen. Thermische Spritzschichten weisen jedoch verfahrensbedingt immer eine Porosität auf, deren Ausprägung insbesondere auch durch das jeweilige Beschichtungsverfahren beeinflusst wird. Das Spektrum reicht hier von sehr dichten Schichten mit einer Porosität von unter 0.5% bis hin zu Werten

von über 2%. Korrosive Medien können durch diese Poren und Mikrorisse in der Spritzschicht zum Substrat vordringen. Um einer solchen Unterkorrosion vorzubeugen, sind zusätzliche Massnahmen nötig, wie das Versiegeln der Oberfläche, die thermische Nachbehandlung mittels selbstfliessender Spritzpulver oder die Verwendung einer dichten, korrosionsbeständigen Zwischenschicht zwischen Grundwerkstoff und Beschichtung. So werden beispielsweise Zwischenschichten aus Nickel-Chrom-Molybdän-Legierungen oder aus chemisch abgeschiedenem Nickel als Diffusionsbarriere eingesetzt. Schliesslich bietet sich als alternativer Beschichtungsprozess das Hochtemperatur-CVD-Verfahren an. Damit lässt sich durch eine mehrfache Abfolge von Aufsprühen und Tempern einer keramischen Suspension mit anschließender Versiegelung ebenfalls eine nahezu porenfreie Schicht erzeugen.

2.2 VERSCHLEISSFESTIGKEIT

An einer Gegenauflfläche aus Grauguss können bereits Trockenlaufmaterialien mit abrasiven Füllstoffen wie Keramik, Glas- oder Kohlefasern schwere Verschleisschäden hervorrufen. Sind im Gas abrasive Verschmutzungen – wie beispielsweise Aluminiumoxid – enthalten, werden auch die Grenzen der Verschleissfestigkeit eines guten Nitrierstahls überschritten⁷. Selbst das Beschichten mit Hartchrom bietet hier keinen Schutz. Abhilfe kann dann nur noch eine Beschichtung mit einer deutlich höheren Verschleissfestigkeit leisten. Bei der Wahl einer solchen Verschleisschutzschicht wird üblicherweise vor allem eine möglichst hohe Härte favorisiert. Hier bieten einige im PVD- oder CVD-Verfahren abgeschiedene Dünnschichten mit maximalen Dicken von nur wenigen Mikrometern theoretisch sehr gute Voraussetzungen. So werden für die bekannten Titanitridschichten Mikrohärtewerte von über 2'000 HV angegeben. Die extrem harten diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (DLC) besitzen noch wesentlich höhere Mikrohärtewerte von 4'000 bis 6'000 HV. Hohe Härtewerte allein sind jedoch keine Garantie für einen ausreichenden Schutz des Basismaterials, wenn beispielsweise die Anforderungen an die Haftfestigkeit nicht erfüllt werden und die Schicht im Betrieb durch Abblättern versagt.

Sind die oben erwähnten Aluminiumoxidpartikeln im Gasstrom enthalten, haben sich im praktischen Betrieb neben keramischen Beschichtungen mit einer hohen Härte von um 2'000 HV auch einige Hartmetallbeschichtungen hervorragend bewährt. Das heterogene Gefüge dieses gesinterten Verbundstoffes aus harten Karbiden in einer weichen Metallmatrix hat sich auch gegenüber sehr harten Gasverschmutzungen als verschleissbeständig erwiesen, obwohl die Härte eines Hartmetalls aus 88% WC und 12% Co nur etwa 1'300 bis 1'400 HV beträgt.

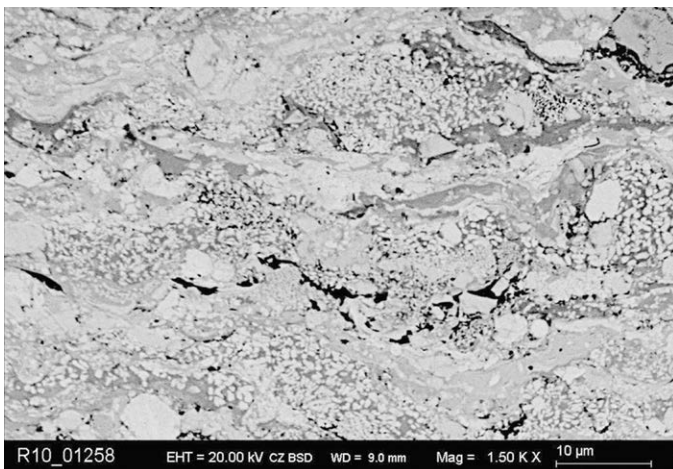
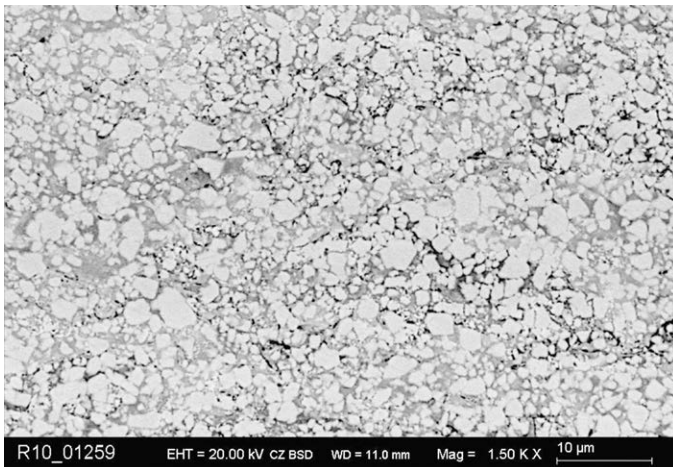
2.3 SCHICHTQUALITÄT

Die Anforderungen an die Qualität einer Reibflächenbeschichtung werden mittels einer Schichtspezifikation beschrieben, die vereinbarten Grenzwerte für die Zusammensetzung, die Dicke, die Härte, die Porosität, die Haftzugfestigkeit etc. der Schicht enthält. Tatsächlich hängen die Eigenschaften einer Beschichtung jedoch von einer Vielzahl weiterer Parameter ab. Auch das Ver-

fahren, die Spritzpistole, der Brennstoff, die Auftragsrate etc. beeinflussen beispielsweise beim thermischen Spritzen die Schichtqualität in hohem Masse. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wählt der Beschichter ein Pulver mit der hierfür am besten geeigneten Fraktion. Eine Änderung dieser Parameter kann sich jedoch – trotz gleicher Pulverzusammensetzung – ganz erheblich auf die Schichtqualität auswirken. In Abbildung 1 ist dies bereits optisch gut erkennbar an den Unterschieden im Schichtgefüge von zwei WC/Co-Beschichtungen, die mit verschiedenen Verfahren aufgetragen wurden. Die in einem Detonationsverfahren applizierte Schicht besitzt eine wesentlich gröbere Struktur mit Karbiden im Grössenbereich von 10 bis 25 μm , während eine nahezu gleich zusammengesetzte, mittels Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) aufgetragene WC/Co-Beschichtung eine sehr feine Struktur mit Karbiden im Grössenbereich von lediglich 4 bis 5 μm aufweist⁹. **Abb. 1, unten**

Abb. 1

WC/Co-Beschichtung aufgetragen im Detonationsverfahren (unten) und mittels Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF)⁹



In der Praxis lässt es sich nicht immer vermeiden, dass die Qualität gleich zusammengesetzter Beschichtungen verfahrensbedingt variiert. So ist beispielsweise die Innenbeschichtung von Zylindern mit einem kleinen Durchmesser ab einem kritischen Wert nicht mehr möglich mit dem für die Aussenbeschichtung einer Kolbenstange optimalen Verfahren, Spritzpistole oder Pulverfraktion. Für eine reproduzierbare Schichtqualität ist es daher unabdingbar, nicht nur die Schichtspezifikation, sondern alle Verfahrensparameter, die Vorbereitung der Substratoberfläche und die Nachbehandlung der Beschichtung in Form einer Spritzanweisung durch eine Verfahrensprüfung zu qualifizieren^{2,3}.

2.4 TAUGLICHKEIT FÜR DEN TROCKEN LAUFENDEN BETRIEB

Die Praxis zeigt, dass mit Grauguss oder Nitrierstahl als Gegenlaufmaterial im Trockenlauf sehr gute Standzeitergebnisse für die Dicht- und Führungsringe möglich sind. Auch eine Reibflächenbeschichtung soll das leisten. Die Voraussetzung, mit den verschiedenen Trockenlaufmaterialien eine funktionierende Reibpaarung zu bilden, ist daher ein entscheidendes Kriterium, das die Auswahl der zur Verfügung stehenden Beschichtungen in einem hohen Masse einschränkt.

Allgemeine Beschreibung der für den trocken laufenden Betrieb wichtigen Anforderungen:

- Beständigkeit gegenüber lokal hohen Temperaturen von über 300 °C
- Möglichst gute Wärmeleitfähigkeit
- Günstige Eigenschaften für Bildung eines stabilen Transferfilms
- Günstige Beeinflussung der tribochemischen Abläufe im Reibkontakt

Die Wärmeleitfähigkeitswerte der in Frage kommenden Reibflächenbeschichtungen können von denen der gängigen metallischen Gegenlaufmaterialien erheblich abweichen. So zeigen die kohlenstoffbasierten Schichten deutlich bessere Werte. Auch die WC/Co-Beschichtungen besitzen eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit. Bei den Keramiken reicht das Spektrum von hervorragend wärmeleitenden Werkstoffen, wie Siliziumkarbid, bis hin zum Isolator (z.B. Zirkonoxid).

Im Trockenlaufbetrieb hat sich nicht eine möglichst geringe Rauigkeit, sondern ein optimaler Rauigkeitsbereich bewährt⁷. Deshalb ist eine entsprechend präzise Oberflächenbearbeitung nach dem Auftragen der Beschichtung durch Schleifen, Läppen, Honen etc. nötig. Hier ist zunächst unklar, ob die für die verschiedenen metallischen Gegenlaufpartner bewährten Rauigkeitswerte auf eine konkrete Beschichtung übertragbar sind und ob sie in dieser Kombination auch eine optimale Wirkung zeigen.

Der letzte Aspekt verweist auf die bekannte Tatsache, dass die im trockenen Reibkontakt ablaufenden tribochemischen Prozesse massgeblich Reibung und Verschleiss beeinflussen und so, beispielsweise durch die Bildung einer schützenden Deckschicht auf der Lauffläche der Dichtelemente, positiv wirken können⁶. Nicht für alle Beschichtungen liegen jedoch ausreichende Erfahrungen

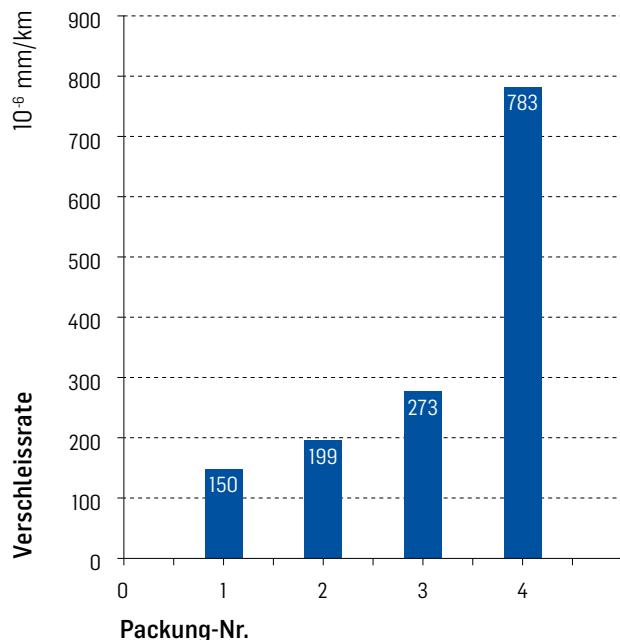
bezüglich ihrer tribochemischen Interaktionen mit einer Vielzahl an Kombinationen aus gefüllten Kunststoffmaterialien und Gasen vor. Insbesondere für die chemisch wenig aktiven Keramiken, aber auch für Beschichtungen mit ausgeprägten Antihafteigenschaften, wie Hartchrom oder Verbundwerkstoffe aus Nickel-Phosphor mit eingelagerten PTFE-Partikel, sind deutliche Unterschiede gegenüber den gängigen metallischen Gegenlaufpartnern zu erwarten. Insbesondere bei den PTFE-haltigen Beschichtungen ist zu berücksichtigen, dass diese mit dem im Betrieb gebildeten, tribochemisch veränderten Transferfilm nicht identisch sind und daher den Prozess der Transferfilmbildung nicht vorwegnehmen, sondern stattdessen auch negativ beeinflussen können.

KAPITEL 3

REIBFLÄCHENBESCHICHTUNGEN IN DER PRAXIS

Die zuvor beschriebenen Anforderungen an eine Reibflächenbeschichtung im trocken laufenden Kolbenkompressor erfüllen heute vor allem Hartmetall- und Keramikbeschichtungen, die durch einen thermischen Spritzprozess aufgetragen werden. Dieses Verfahren hat die grösste Variationsbreite bezüglich der Beschichtungswerkstoffe, der Schichteigenschaften und der Schichtdicken. Dies bietet vor allem ein grosses Potenzial für die Reparatur von verschlissenen Reibflächen.

Abb. 2
Verschleissraten von vier Trockenlaufpackungen zur Abdichtung einer hartmetallbeschichteten Kolbenstange



Der Einsatz von Hartmetall und Keramik wird jedoch unterschiedlich gehandhabt. So favorisiert man heute für Kolbenstangenbeschichtungen zunehmend Hartmetalle. Sie haben unter anderem eine geringere Schlagempfindlichkeit im Vergleich zu den Keramiken. Dies wirkt sich positiv aus und wird bei der Handhabung im Alltag sehr geschätzt. Darüber hinaus lassen sich mit dem HVOF-Verfahren applizierte Hartmetallpulver sehr dichte, porenarme Schichten erzeugen. Für das Spritzen von Keramikschichten sind höhere Temperaturen erforderlich, die im Plasmaverfahren erreicht werden. Aufgrund kleinerer Spritzpistolenabmessungen sind hiermit aber auch Innenbeschichtungen mit einem Durchmesser von knapp unter 50 mm möglich. Auch wird das Einsatzspektrum von Keramikbeschichtungen durch optimierte Mehrstoffsysteme ständig erweitert. Konkurrenziert wird das thermische Beschichten von Büchsen mit kleinen Durchmessern durch das Hochtemperatur-CVD-Verfahren, das ebenfalls für solche Anwendungen geeignet ist.

Trotz zusätzlicher Kosten hat die Verwendung von Reibflächenbeschichtungen im Kolbenkompressor deutlich zugenommen. So verdrängen beispielsweise verschleissfeste Kolbenstangenbeschichtungen zunehmend die nitrierten Kolbenstangen, die bis vor einigen Jahren vor allem bei niedrigen Trockenlaufbelastungen noch weit verbreitet waren. Für die Investition in eine solche Oberflächenveredelung erwarten die Kunden jedoch einen Mehrwert in Form einer deutlich verlängerten Standzeit der beschichteten Komponenten.

Die Betriebserfahrungen mit Reibflächenbeschichtungen zeigen, dass sie die an sie gestellten Anforderungen auch meistens hervorragend erfüllen, insbesondere bieten sie erhöhten Verschleisschutz im Vergleich zu einer unbeschichteten Reibfläche. Mit dem Betriebsverhalten von trocken laufenden Kolbenstangendichtungen wurden in der Praxis jedoch unterschiedliche Erfahrungen gemacht. So kam es bei Anwendungen mit Druckdifferenzen oberhalb von etwa 20 barg gelegentlich zu sehr kurzen Standzeiten von Packungen, wobei jeweils auffällige, spiegelglatte Flächen auf der Kolbenstange beobachtet wurden. Abbildung 2 zeigt hierzu den Verlauf der über alle Dichtelemente gemittelten Verschleissrate von Trockenlaufpackungen eines Wasserstoffkompressors mit einer Druckbelastung 54 barg. Es fällt auf, dass sich die Verschleissrate trotz konstanter Bedingungen für den Aufbau und den Betrieb der Packungen fortwährend verschlechterte, bis es schliesslich mit dem vierten Dichtsystem zu einem Frühausfall kam. Die Packungen wurden jeweils auf der gleichen Kolbenstange mit einer Hartmetallbeschichtung betrieben. Die Beschichtung war mit Ausnahme einer niedrigen Rauigkeit im Bereich des Reibwegs der Packungsringe in einem hervorragenden Zustand. **Abb. 2**

KAPITEL 4

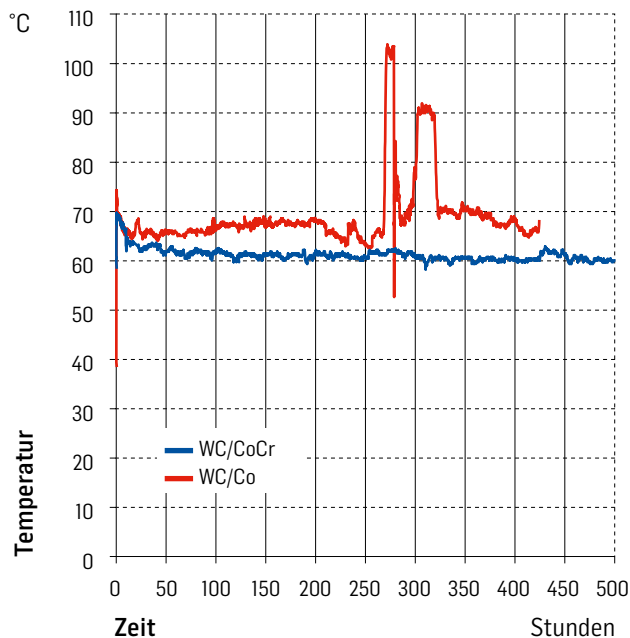
WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN TROCKEN-LAUFMATERIAL UND GEGENLAUFOBEBERFLÄCHE

Aufschluss über die in der Praxis beobachteten Phänomene mit beschichteten Kolbenstangen sollten Versuche in einem trocken laufenden Prüfstandverdichter geben. Hierzu wurde dessen 550 mm lange "Tailrod" mit einem Durchmesser von 50 mm mit dem Hartmetall WC/Co sowohl im Detonations- als auch im HVOF-Verfahren beschichtet. Zum Vergleich mit den beiden chromfreien Schichten wurde auf eine weitere Kolbenstange das chrom-haltige Hartmetall WC/CoCr ebenfalls im HVOF-Verfahren appliziert. Schliesslich wurde noch eine Vierstoffkeramik aus Aluminiumoxid, Chromoxid, Zirkonoxid und Titanoxid in den Vergleich aufgenommen. Als Referenz für eine metallische Gegenlauffläche diente eine Nitrierstahlkolbenstange. Für alle Oberflächen wurde ein Mittenrauwert Ra im Bereich von 0.20 bis 0.30 μm vorgegeben. **Tab. 1**

Als Beanspruchungskollektiv für die mit trockenem Stickstoff durchgeführten Versuche wurde der Saugdruck zu 16 barg, der Enddruck zu 40 barg sowie die mittlere Kolbengeschwindigkeit zu 3.18 m/s festgelegt. Es kam jeweils nur ein Dichtelement aus einem PTFE/PPS-Polymerblend in einer gekühlten Packung zum Einsatz, um so eindeutige Verhältnisse bei der Einleitung der Reibleistung in die Kolbenstange zu gewährleisten. Das für die Packungsringe gewählte PTFE/PPS-Polymerblend, gefüllt mit Graphit und Kohlefasern, hat sich in vielen Anwendungen selbst in Kombination mit Grauguss von geringer Härte als nicht abrasiv erwiesen⁷. Für jeden Versuch war eine Dauer von 500 Stunden vorgesehen, die jedoch mit der WC/CoCr-beschichteten Kolbenstange unerreicht blieb. Hier kam es nach 270 Stunden zu einem plötzlichen Temperaturanstieg in der Dichtelementkammer und damit zum Unterbrechen des Versuchs. **Abb. 3**

Abb. 3

In der Dichtelementkammer gemessene Temperaturen für die beiden im HVOF-Verfahren mit WC/CoCr und WC/Co beschichteten Kolbenstangen

**Tab. 1**

Härte- und Rauigkeitswerte der getesteten Gegenlaufmaterialien

Gegenlaufmaterial	Nitrierstahl	WC/Co	WC/Co	WC/CoCr	Keramik
Beschichtungsverfahren	–	HVOF	Detonation	HVOF	Plasma
Härte HV0.3	731	1'128	1'156	1'279	926
Ra [μm]	0.237	0.263	0.223	0.277	0.280
Rz (DIN) [μm]	1.797	2.093	1.793	1.957	2.487
Rk [μm]	0.773	0.840	0.667	0.933	0.303
Verhältnis Rk/Rz	0.430	0.401	0.372	0.477	0.122
Rmr [%]	31.29	46.86	53.47	32.15	82.12

Härtewerte als Mittelwert aus je 10 Messungen, Rauigkeitswerte als Mittelwert aus je 6 Tatschnittmessungen^{4,5}

Beim Ausbau zeigte sich, dass das Dichtelement durch den Temperaturanstieg thermisch beschädigt worden war und daher durch ein neues ersetzt werden musste. Auf der Kolbenstange hatte im Bereich der Reibfläche des Dichtelements bereits ein deutlicher Abbau der Rauigkeit stattgefunden, was im Vergleich mit dem Neuzustand der Oberfläche gut erkennbar ist. **Abb. 4**

Im weiteren Verlauf kam es zu einem erneuten raschen Anstieg der Temperatur, und nach einer Dauer von 424 Stunden musste der Versuch schliesslich wegen hoher Leckage endgültig abgebrochen werden. Die Oberfläche der Kolbenstange war im Bereich der Reibfläche glatt poliert und spiegelnd. **Abb. 4, unten**

Bei den übrigen Versuchen wurde solch ein steiler Temperaturanstieg auf Werte über 100 °C nicht beobachtet. Hier verliefen die Kammertemperaturen nach dem Einlauf stabil in einem Bereich zwischen etwa 60 bis 70 °C. In Abbildung 3 ist daher zum Vergleich nur der Temperaturverlauf für die mit WC/Co (HVOF) beschichtete Kolbenstange dargestellt.

Abb. 4
Reibfläche einer mit WC/CoCr beschichteten Kolbenstange im Neuzustand (oben), und nach einer Betriebsdauer von 270 (Mitte) und 424 Stunden (Kantenlänge 300 * 225 µm)

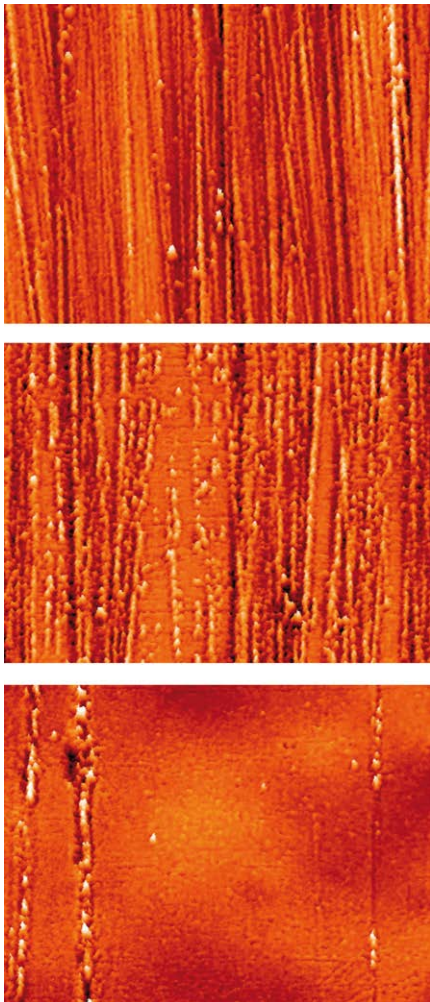
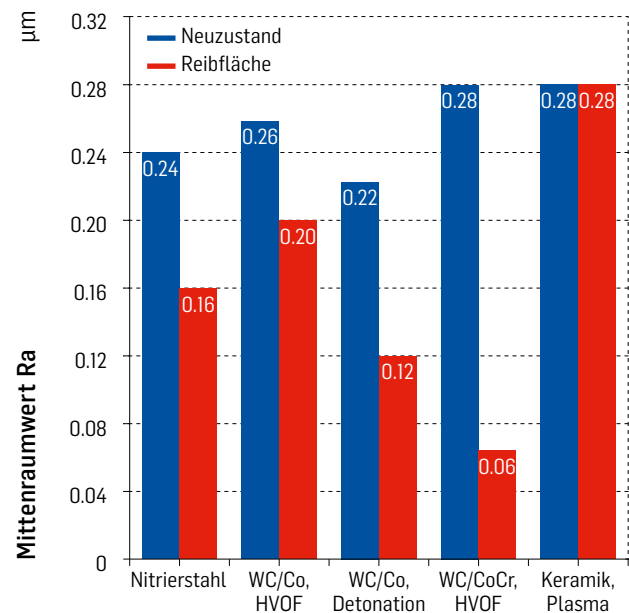


Abb. 5
In den Reibflächen verschiedener Gegenlaufmaterialien gemessene arithmetische Mittenrauwerte Ra im Vergleich zum Neuzustand



Vor allem während der Einlaufphase einer trocken laufenden Reibpaarung kommt es selbst bei sehr harten Gegenlaufpartnern durch Brechen von Rauigkeitsspitzen, dem Einlagern von Abriebpartikeln und der Neuorganisation von Oberflächen zu Änderungen der Oberflächentopographie. Diese Effekte können entlang des Reibwegs sehr unterschiedlich ausgeprägt sein, weshalb Rauigkeitsmessungen in diesem Bereich meist sehr schwankende Werte ergeben. Daher wurden bei allen Kolbenstangenoberflächen jeweils die Stellen mit minimaler Rauigkeit gesucht und ausgewertet.

Vergleicht man die so gewonnenen arithmetischen Mittenrauwerte Ra mit denen im Neuzustand, so fällt auf, dass sie mit Ausnahme der keramischen Beschichtung bei allen Oberflächen abnehmen. Auf der keramischen Beschichtung führte die Transferfilmbildung sogar zu einer geringfügigen Zunahme des Ra-Werts. Besonders auffällig war der Rauigkeitsverlust bei der WC/CoCr-beschichteten Kolbenstange, obwohl für diese die höchsten Härtewerte ermittelt wurden. Für die beiden chromfreien Hartmetallschichten und sogar für den Nitrierstahl fiel die Abnahme der Ra-Werte deutlich geringer aus. **Tab. 1, Abb. 5**

Als ein weiteres Versuchsergebnis zeigt Abbildung 6 die Verschleissraten der auf den verschiedenen Oberflächen unter sonst gleichen Bedingungen betriebenen Dichtelemente. Den niedrigsten Wert ergab der Versuch mit der keramisch beschichteten Kolbenstange. Sehr gute Resultate konnten auch mit den beiden chromfreien Hartmetallvarianten erzielt werden. Ihre Verschleissraten lagen ebenfalls deutlich unter dem Wert für die Nitrier-

Abb. 6
Verschleissraten eines einzelnen Packungsrings in trockenem Stickstoff auf verschiedenen Gegenlaufmaterialien

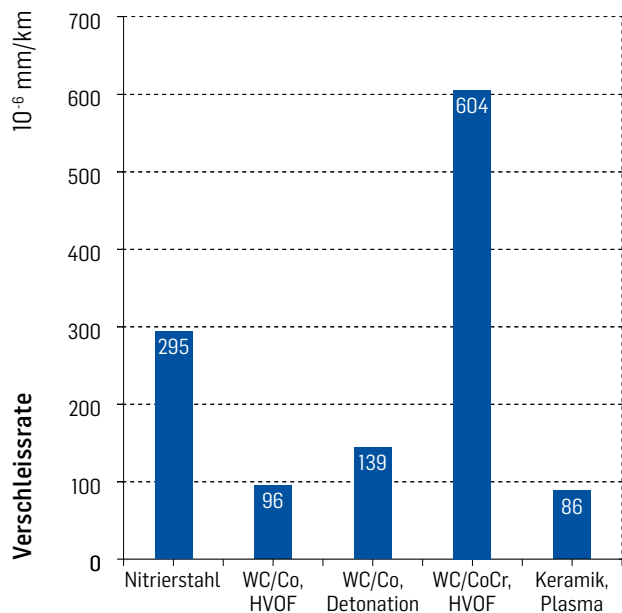
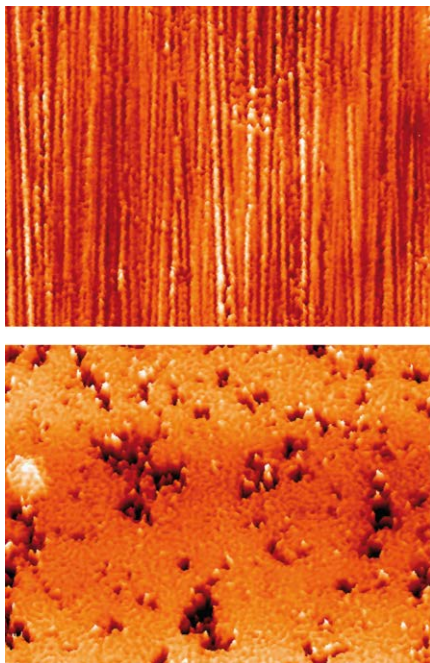


Abb. 7
Durch Poren gekennzeichnete Oberfläche einer im Plasmaverfahren aufgetragenen Keramik (unten) im Vergleich zu einer Nitrierstahlfläche (Kantenlänge 300 * 225 µm)



stahloberfläche. Die mit Abstand höchste Verschleissrate ergab der Versuch mit der WC/CoCr-beschichteten Kolbenstange in Kombination mit abschnittsweise hohen Kammertemperaturen und dem höchsten Abfall des Ra-Wertes. **Abb. 6**

KAPITEL 5

DIFFERENZIERUNG DER EINFLUSSGRÖSSEN

Die Oberfläche des harten Gegenlaufpartners wird meist nur durch die Angabe eines zulässigen Bereichs für den arithmetischen Mittenrauwert Ra beschrieben, obwohl die funktionsgerechte Gestaltung der Gegenkörperoberfläche von besonderer Bedeutung für die trocken laufende Reibpaarung weich/hart ist. Hierbei bleibt jedoch die bekannte Tatsache unberücksichtigt, dass der arithmetische Mittenrauwert Ra für eine Oberflächencharakterisierung völlig ungeeignet ist, da hiermit nicht zwischen verschiedenen Profilen unterschieden werden kann. Spitzen und Riefen werden bei der Ermittlung des Ra-Werts gleichwertig behandelt. Der arithmetische Mittenrauwert eignet sich daher nur dann als Kenngrösse zur Qualitätsprüfung, wenn der Charakter der Rauigkeit bekannt ist, d.h., ob es sich beispielsweise um eine zerklüftete oder plateauartige Oberfläche handelt⁸.

Es gibt mehrere Kenngrössen, die eine funktionsgerechte Beurteilung von Oberflächen erlauben und so die Aussagen einer Ra-Messung ergänzen können. Dies kann beispielsweise mittels der folgenden aus Länge und Tiefe zusammengesetzten Kenngrössen erfolgen:

- Verhältnis von Kernrautiefe Rk zur gemittelten Rautiefe Rz
- Verhältnis von mittlerer Glättungstiefe Rp zur gemittelten Rautiefe Rz
- Materialanteil des Profils Rmr

Insbesondere bei den im Plasmaverfahren aufgetragenen porösen Keramikschichten können nach dem Bearbeiten Oberflächen entstehen, die sich durch ein plateauartiges Rauheitsprofil mit einem durch die Poren verursachten hohen Riefenanteil auszeichnen. Oft wird bei einer solchen Oberfläche jedoch die obere Grenze des zulässigen Ra-Werts überschritten. Während ein unzulässig grosser Ra-Wert eines Profils mit einem ausgeprägten Spitzenanteil zu einem hohen Abrasionsverschleiss am weichen Trockenlaufelement führt, ist dieser bei einem plateauartigen Rauheitsprofil nicht notwendigerweise von Nachteil. Eine erste, rasche Aussage zum Charakter des Rauheitsprofils lässt sich durch das Verhältnis von Kernrautiefe Rk zur gemittelten Rautiefe Rz (DIN) machen⁸. So haben sich in der Praxis Oberflächen mit Werten für dieses Verhältnis von kleiner oder gleich 0.25 auch dann im Trockenlauf bewährt, wenn ihr Ra-Wert die zulässige Obergrenze überschritt. **Tab. 1, Abb. 7**

Aussagen zum Profilcharakter der verschiedenen Kolbenstangenoberflächen lassen sich auch mittels des in Tabelle 1 enthaltenen Materialanteils Rmr machen. Dieser wurde jeweils mit einer um 2% gegenüber der höchsten Profilspitze verschobenen Nulllinie c0 in einer Schnittliniertiefe von $c1 = Rz/4$ ermittelt. Vergleicht man die Rmr-Werte für die drei Hartmetallschichten, so fällt auf, dass der Materialanteil der WC/CoCr-beschichteten Kolbenstange gegenüber den beiden chromfreien Varianten deutlich tiefer und nur geringfügig über dem Minimalwert der Nitrierstahlkolbenstange von 31.3% liegt. Den höchsten Wert von 82.1% zeigte die keramische Beschichtung.

Vergleicht man die Oberflächentopographien der beiden im HVOF-Verfahren aufgetragenen Schichten, so erweist sich, dass die mit WC/CoCr beschichtete Kolbenstange eine gröbere Struktur mit vielen Ausbrüchen besitzt. Für beide Hartmetallvarianten wurde jeweils Pulver mit einer Fraktion von $-45 + 15 \mu\text{m}$ verwendet, was in der WC/CoCr-Beschichtung zu geringfügig kleineren Karbiden mit einer Grösse von etwa $3 \mu\text{m}$ im Vergleich von etwa 4 bis $5 \mu\text{m}$ für die chromfreie Beschichtung führte.

Abb. 8, rechts

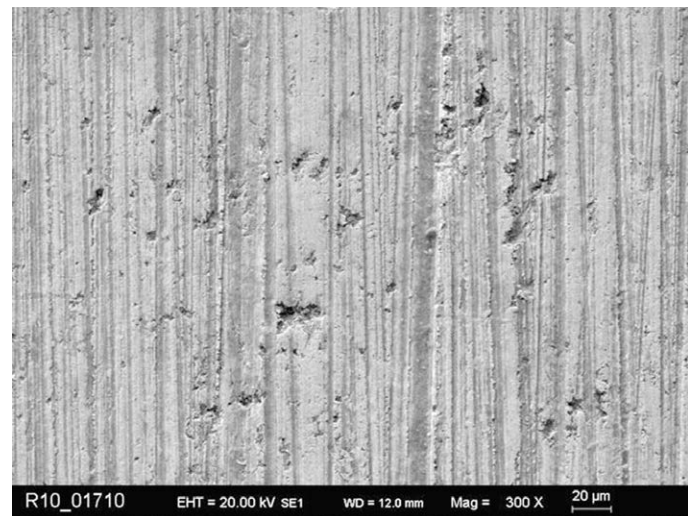
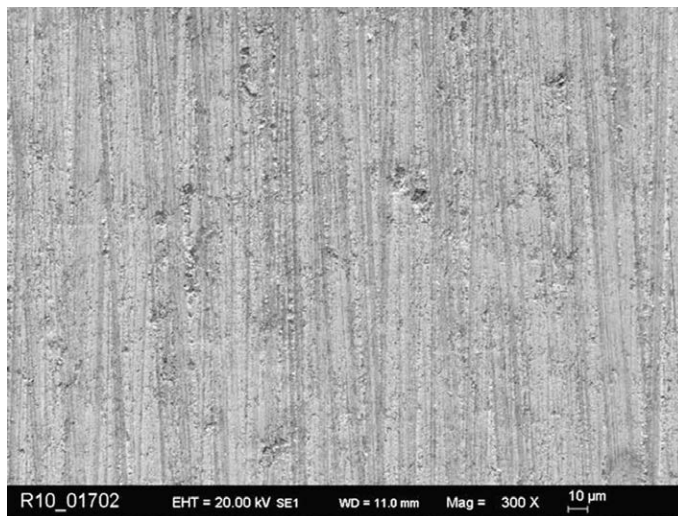
Die nach dem Bearbeiten beobachteten Unterschiede in den Oberflächentopographien lassen sich daher kaum mit ihrem Gefüge erklären, sondern eher mit der unterschiedlichen

Zusammensetzung des Matrixmaterials und den daraus resultierenden Materialeigenschaften. Während in der chromfreien Variante der Kobaltanteil 12 Gew.-% beträgt, ist er im WC/CoCr-Pulver auf 10 Gew.-% reduziert und mit 4 Gew.-% Chrom ergänzt worden. Der Chromanteil wirkt sich negativ auf die Zähigkeit des Verbundstoffes aus, was offensichtlich die Erzeugung eines Oberflächenprofils mit einem hohen Materialanteil erschwert und in ungünstigen Fällen gar zu den beobachteten Ausbrüchen führen kann⁹.

Betrachtet man die Versuchsergebnisse mit der keramischen Beschichtung sowie den beiden chromfreien WC/Co-Beschichtungen, so kommt man zum Schluss, dass plateauartige Oberflächen mit einem möglichst hohen Materialanteil für den Trockenlauf günstige Bedingungen bieten. Eine solche plateauartige Struktur lässt sich beispielsweise dadurch erzeugen, dass die Spitzen des aufgerauten Profils durch ein geeignetes Superfinish-Verfahren abgetragen werden und so eine Oberfläche mit einem ausgeprägten Riefenanteil entsteht.

Abb. 8

Unterschiedliche Oberflächen nach dem Bearbeiten einer WC/Co- und einer WC/CoCr-Beschichtung (rechts)⁹



Tab. 2

Rauigkeitswerte der im trockenen Wasserstoff getesteten Gegenlaufmaterialien

Gegenlaufmaterial	Nitrierstahl	WC/Co	WC/CoCr	CrC/NiCr
Beschichtungsverfahren	–	HVOF	HVOF	HVOF
Rmr, Neuzustand [%]	33.89	64.36	40.60	43.58
Ra, Neuzustand [μm]	0.220	0.227	0.170	0.237
Ra, Reibfläche [μm]	0.157	0.140	0.102	0.077

KAPITEL 6

EINFLUSS DER BESCHICHTUNGEN AUF DAS BETRIEBSVERHALTEN VON TROCKENLAUFSYSTEMEN

Die in den Einringversuchen gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Oberflächenstruktur verschiedener Beschichtungen auf das Betriebsverhalten von trocken laufenden Dichtsystemen sollten in realitätsnahen Versuchen in einem Wasserstoffkompressor weiter untersucht werden. Hierzu wurden Kolbenstangen mit einem Durchmesser von 50 mm mit den beiden Hartmetallvarianten mit und ohne Chromanteil im HVOF-Verfahren beschichtet und ihre Oberflächen durch einen zusätzlichen Superfinish-Prozess mit einem möglichst hohen Materialanteil Rmr ausgestattet. Tabelle 2 zeigt, dass dies bei der chromfreien Schicht deutlich besser gelang. Um dem auffällig hohen Rauigkeitsverlust auf der WC/CoCr-beschichteten Kolbenstange

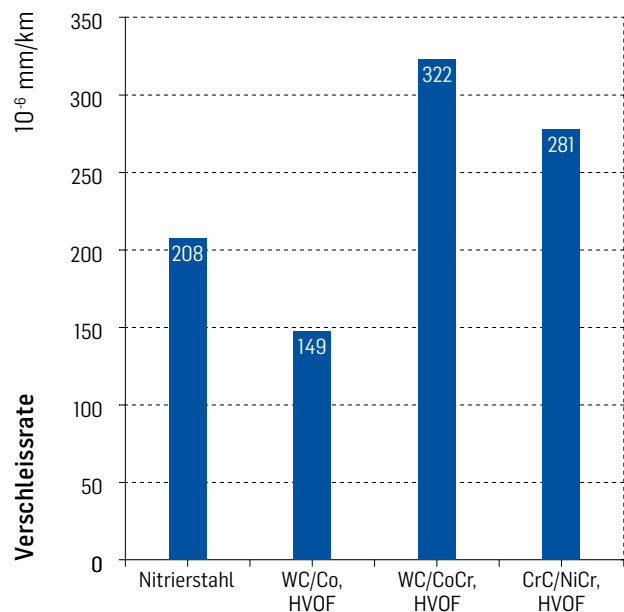
entgegenzuwirken, wurden für alle Oberflächen etwas niedrigere Ra-Werte im Bereich von 0.15 bis 0.25 μm gewählt. Als Vergleich für eine metallische Oberfläche diente wiederum eine konventionell geschliffene Nitrierstahlkolbenstange. **Tab. 2**

Für die Versuche in der ersten Verdichtungsstufe des mit sehr trockenem Wasserstoff betriebenen horizontalen Kompressors wurden ein Saugdruck von 14 barg, ein Enddruck von 40 barg sowie eine mittlere Kolbengeschwindigkeit von 3.41 m/s vorgegeben. Als Kolbenstangendichtsystem wurde jeweils eine gekühlte Packung mit sechs Packungsringen aus einem PTFE/PPS-Polymerblend verwendet. Für jeden Versuch war wiederum eine Dauer von 500 Stunden vorgesehen.

Auch in dieser Versuchsreihe zeigte die WC/CoCr-beschichtete Kolbenstange ein auffälliges Verhalten. Zwar verlief der Versuch problemlos, die mittlere Verschleissrate der sechs Packungsringe betrug jedoch im Vergleich zu derjenigen der chromfreien Variante mehr als das Doppelte und war selbst gegenüber dem Ergebnis für die Nitrierstahlkolbenstange – trotz des höheren Materialanteils Rmr – noch um rund ein Drittel höher. **Abb. 9**

Abb. 9

Mittlere Verschleissraten der Packungen in trockenem Wasserstoff auf verschiedenen Gegenlaufmaterialien



Analysen im Labor sollten daher zeigen, ob neben den verschiedenen Oberflächentopographien auch die unterschiedliche Zusammensetzung der beiden Hartmetallvarianten über tribochemische Wechselwirkungen zwischen den Reibpartnern und dem Umgebungsmedium Reibung und Verschleiss beeinflusst⁹. Die mittels der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) und der Mikrosondenanalyse (WDX) durchgeführten Untersuchungen ergaben jedoch keine gelaufenen und ungelaufenen Bereiche der Beschichtungen, wie beispielsweise eine Verarmung von Sauerstoff oder Chrom. Auch hatte sich in den oberflächennahen Bereichen nichts an der Schichtstruktur geändert. Die Versuchsreihe wurde dennoch um eine weitere Hartmetallbeschichtung ergänzt, die ähnlich wie die WC/CoCr sehr korrosionsbeständig ist. Die mittlere Verschleissrate der auf dieser CrC/NiCr-beschichteten Kolbenstange betriebenen Dichtelemente lag zwar etwas tiefer als das Ergebnis für die WC/CoCr-Schicht, aber immer noch deutlich höher im Vergleich zu den Werten für die chromfreie Hartmetallvariante und die Nitrierstahlkolbenstange. Darüber hinaus kam es in der Reibfläche der CrC/NiCr-beschichteten Kolbenstange zu einem erheblichen Rückgang des Ra-Werts von 0.237 auf nur noch 0.077 μm . Dieser Verlust an Oberflächenrauigkeit ging einher mit der Bildung eines auffälligen silberfarbenen Belags auf den Laufflächen der Dichtelemente.

Tab. 2, Abb. 10

Ebenfalls eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit besitzt die in den Einringversuchen erfolgreich getestete Vierstoffkeramik. Aufgrund der sehr guten Ergebnisse bei einem Enddruck von 40 barg sollte diese Beschichtung ihre Trockenlaufzeit nun bei einer deutlich höheren Belastung mit einem Saugdruck von 40 barg und einem Enddruck von 100 barg in der zweiten Verdichtungsstufe des Wasserstoffverdichters unter Beweis stellen. Als Dichtsystem wurde hier eine gekühlte Packung mit insgesamt 10 für diese Anwendung optimierten Packungsrings aus einem PTFE/PPS-Polymerblend verwendet.

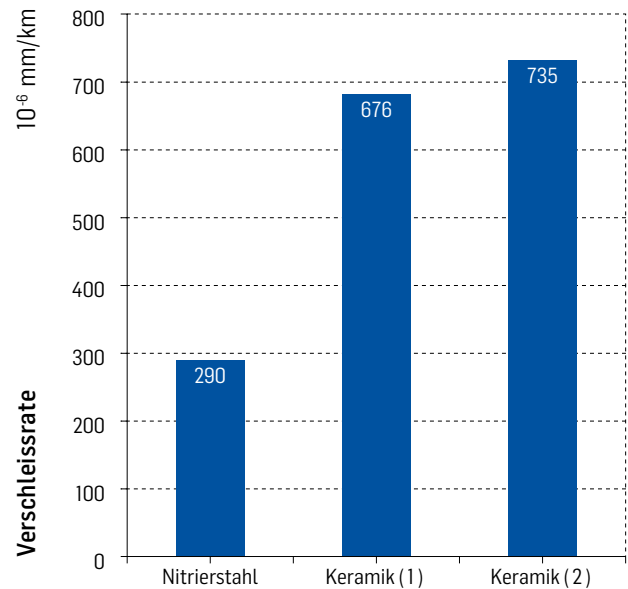
Abb. 10

Silberfarbener Belag auf der Lauffläche eines trocken laufenden Packungsrings nach Betrieb auf einer CrC/NiCr-beschichteten Kolbenstange



Abb. 11

Mittlere Verschleissraten für zwei Versuche mit einer Keramikbeschichtung im Vergleich zu einer Nitrierstahlkolbenstange



Bereits während des Versuchs liessen auffällig hohe Temperaturen auf der Kolbenstangenoberfläche sowie am Austritt von Leckgas und Kühlwasser auf ein eher ungünstiges Betriebsverhalten schliessen. Die mittlere Verschleissrate für die auf der keramischen Beschichtung betriebenen Dichtelemente betrug denn auch mehr als das Doppelte des für eine konventionelle Nitrierstahlkolbenstange ermittelten Wertes. **Abb. 11**

Das schlechte Ergebnis wurde durch einen Wiederholungsversuch bestätigt. Abweichend von der bei den übrigen Versuchen beobachteten kompakten Struktur des Transferfilms wurde hier bei beiden Versuchen eine grosse Menge loser, pulverförmiger Partikel auf der Oberfläche der keramischen Beschichtung vorgefunden.

KAPITEL 7

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Trotz hoher Härtewerte von deutlich über 1'000 HV fiel bei einigen Hartmetallbeschichtungen der arithmetische Mittenrauwert Ra im Bereich der Dichtelementreibfläche nach nur 500 Stunden um mehr als 0.1 µm ab. Mit dieser Änderung der Oberflächenstruktur gingen typischerweise auch hohe Verschleissraten der Packungsringe einher, was die in der Praxis gemachten Beobachtungen bestätigt.

Unterschiede in der Höhe des Rauigkeitsverlusts lassen auf einen Einfluss von Zusammensetzung und Gefüge des Verbundstoffs Hartmetall schliessen. So wurde bei den Hartmetallbeschichtungen mit einer reinen Kobaltmatrix ein erheblich geringerer Rückgang der Rauigkeit beobachtet als bei denjenigen mit einem chromhaltigen Matrixmaterial.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für den Rauigkeitsverlust ist die Topographie der Gegenkörperoberfläche. Die Versuche ergaben, dass plateauartige Oberflächen mit einem möglichst hohen Materialanteil für den Trockenlauf günstige Bedingungen bieten und die Reduktion der Rauigkeit geringer ausfällt. Auch hier zeigte sich ein Einfluss der Schichtzusammensetzung, denn die Erzeugung einer solchen Oberfläche mit einem möglichst hohen Materialanteil gelang bei den WC/Co-Beschichtungen besser als bei den beiden Hartmetallvarianten WC/CoCr und CrC/NiCr.

Diese mit einem hohen Materialanteil ausgestatteten WC/Co-Beschichtungen zeigten denn auch niedrigere Verschleissraten im Vergleich zu den Versuchen mit einer konventionellen Nitrierstahlkolbenstange. Eine als Alternative zu den Hartmetallbeschichtungen getestete Vierstoffkeramik, die aufgrund ihrer porösen Oberflächentopographie nochmals deutlich höhere Werte für den Materialanteil besitzt, erzielte bei einer Druckbelastung von 40 bar das beste Versuchsergebnis. Bei einer Laststeigerung auf 100 bar wurden dann jedoch reproduzierbar schlechtere Verschleissraten als für die Nitrierstahlkolbenstange ermittelt.

Grosse Mengen loser Partikel auf der Gegenauflfläche lassen vermuten, dass die korrosionsbeständige Keramikbeschichtung die Transferfilmbildung negativ beeinflusst. Neben der Oberflächentopographie scheint daher auch die unterschiedliche Chemikalienbeständigkeit der verschiedenen Beschichtungen ein wichtiger Einflussfaktor für das Verschleissverhalten zu sein. Insbesondere bei einer hohen Druckbelastung konnten mit allen für den Einsatz in korrosiven Medien empfohlenen Beschichtungen – trotz höherer Werte für den Materialanteil – nur schlechtere Verschleissraten im Vergleich zu einer Nitrierstahlkolbenstange erzielt werden.

Nomenklatur

PTFE	Polytetrafluorethylen
PPS	Polyphenylensulfid
CVD	Chemical vapor deposition (chemische Gasphasenabscheidung)
PVD	Physical vapor deposition (physikalische Gasphasenabscheidung)
HVOF	High velocity oxygen fuel (Hochgeschwindigkeitsflammspritzen)
DLC	Diamond-like carbon (amorpher, diamantähnlicher Kohlenstoff)
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert
Rz	Gemittelte Rautiefe
Rk	Kernrautiefe
Rp	Mittlere Glättungstiefe
Rmr	Materialanteil des Rauheitsprofils
c0	Referenzschnitthöhe
c1	Schnittlinientiefe

Literatur

- 1 American Petroleum Institute
Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services API Standard 618, Fifth Edition
Washington, D.C. 20 005, December 2007
- 2 DIN EN 15311
Thermisches Spritzen – Bauteile mit thermisch gespritzten Schichten – Technische Lieferbedingungen
Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Juni 2007
- 3 DIN EN 15648
Thermisches Spritzen – Bauteilbezogene Verfahrensprüfung
Beuth-Verlag GmbH, Berlin, April 2009
- 4 DIN EN ISO 3274
Geometrische Produktspezifikation – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten
Beuth-Verlag GmbH, Berlin, April 1998
- 5 DIN EN ISO 4287
Geometrische Produktspezifikation – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Juli 2010
- 6 Tomschi, U.:
Verschleissverhalten von Trockenlaufwerkstoffen für Abdichtelemente in Kolbenkompressoren
Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1995
- 7 Feistel, N.:
Trocken laufende Dichtsysteme in der Praxis – neue Herausforderungen durch neue Materialien
Industriepumpen + Kompressoren 3, 2007, S. 141 – 148
- 8 Volk, R.:
Rauheitsmessung
Beuth Verlag GmbH, Berlin Wien Zürich, 2005
- 9 Kühnert, B.:
Schichtbeurteilung von Kolbenstangen
Unveröffentlichter Bericht von Sulzer Innotec, Winterthur, 2010

Titelbild

RHEIN-RUHR Beschichtungs-Service GmbH,
Rheinberg, Deutschland



KOLBENKOMPRESSOREN FÜHRENDE TECHNOLOGIE FÜR TIEFSTE LEBENSZYKLUSKOSTEN

**Laby®
Kompressoren**
Berührungslos
und ölfrei



**Laby®-GI
Kompressoren**
Vollständiger
Massenausgleich



**Prozessgas-
Kompressoren**
API 618 konform



**Hyper-
Kompressoren**
Sicher und
zuverlässig bis
zu 3'500 bara



KOMPRESSORKOMPONENTEN HÖCHSTE LEISTUNG UND MAXIMALE LEBENSDAUER

Ventile:

- Burckhardt Poppet Valve™
- Burckhardt Plate Valve™
- Manley® valve, lizenziert von Burckhardt Compression

Kolbenringe

Führungsringe

Kolbenstangenpackungen

Packungsringe

Ölabstreifer

Komponenten für Hyper/
Sekundärverdichter

SERVICE

DIE VOLLE AUSWAHL ZU IHRER
VERFÜGUNG

Burckhardt Ventilservice

Ersatzteildienst

Montage und Service

Technische Unterstützung

Komponentenreparaturen

Engineering-Dienstleistungen

Umbauten

Zustandsüberwachung und
Diagnose

Schulungen

FÜR ALLE KOLBENKOMPRESSOREN

Burckhardt Compression AG

CH-8404 Winterthur

Schweiz

Tel.: +41 (0)52 262 55 00

Fax: +41 (0)52 262 00 51

24-Stunden-Notfalltel.: +41 (0)52 262 53 53

info@burckhardtcompression.com

www.burckhardtcompression.com

Ihr lokaler Kontakt