

Wassereinspritzung in Schraubenkompressoren

K. Kauder, U. Dämgen, Dortmund

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

Zusammenfassung

In dem Forschungsvorhaben "Herstellen beschichteter Schraubenrotoren" werden verschleißbeständige Rotoren erprobt, die den Verzicht auf das vielfach notwendige Synchrongetriebe in Schraubenmaschinen ermöglichen sollen. Unter den Bedingungen *trockener Reibung* in einem *geometrisch vereinfachten Verschleißversuch* erwies sich nur der *Verbund von thermisch gespritztem Chromoxid auf Stahl* als erfolgversprechend. Bei Versuchen in einem *Schraubenkompressor mit Wassereinspritzung* zeigten 2 *PVD-Schichten in nach 1000 Stunden abgebrochenen Dauerversuchen günstige Ergebnisse*. In diesem Zusammenhang lieferten *Untersuchungen zur Energiewandlungsgüte* bei Trockenlauf, bei Wassereinspritzung und bei Öleinspritzung weitere Ergebnisse. Die optimale Einspritzmenge hängt von der Umfangsgeschwindigkeit ab, der Wellenleistungsbedarf der Verdichtung ist unter sonst gleichen Bedingungen bei Wassereinspritzung etwas geringer, die Dichtwirkung des Wassers weicht von der des Öles etwas ab.

Abstract

In a research program on *composite materials* the manufacturing of wear-resistant screw rotors was tested, in order to dispose of timing gears where it is necessary today. Only *thermally sprayed chromium oxide coatings on steel* performed in a promising way under *dry friction* conditions in a geometrically simplified wear test. Two *tests in a water-injected screw compressor with PVD-coated rotors* ended after 1000 h without loss of performance. Some research work on efficiency under dry, water-injected and oil-injected conditions followed. The optimal water injection rate is a function of peripheral speed, the shaft power consumption injecting water is a bit lower than under the same conditions injecting oil, the sealing effect of water is a little different from that of oil.

1. Einleitung

Durch die Entwicklung der Schraubenmaschine zieht sich der Leitgedanke, die Maschinenkonstruktion weiter zu *vereinfachen*. Heute sind in vielen Fällen Synchronzahnräder in Schraubenmaschinen erforderlich. Auf sie könnte verzichtet werden beim Einsatz verschleißbeständiger Werkstoffe, die ohne die Schmierwirkung von Öl Rotormomente im Zahneingriff

übertragen können. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert seit 1985 ein Vorhaben im Verbund mehrerer universitärer Einrichtungen zur Erforschung der Herstellung und der Eigenschaften sogenannter metall-keramischer Verbundwerkstoffe; dazu gehören auch *metall-keramische Verschleißschutz- Schichtverbunde*. Als praktisches Anwendungsbeispiel wird in diesem Verbundforschungsvorhaben, dem Sonderforschungsbereich 316, das *Herstellen beschichteter Schraubenrotoren* untersucht. Neben der Untersuchung des Trockenlaufs ist seit etwa vier Jahren auch der Einsatz von Wasser im Kompressor, dem es aufgrund niedriger Viskosität für gewöhnlich an Schmiereigenschaft mangelt, mit in das Vorhaben einbezogen worden.

2.1

Theoretische Ergebnisse

Die genauere Betrachtung der Beanspruchung des Rotorwerkstoffes im Zahneingriff ergibt einige wichtige Unterschiede zwischen Zahnradgetrieben und Schraubenmaschinen:

- Das ist die *andere Flankengeometrie* als die herkömmlichen Evolventen für Leistungsgetriebe.

- Bei *Schraubenrotor-Verzahnungen* sind die Abweichungen von der Idealgeometrie meist kleiner als 10 μm , die Verformungen unter dem zu übertragenden Moment typischerweise kleiner als 1 μm . Sie sind also so klein, daß die *aufgrund von Fertigungsabweichungen "zurückstehenden Flankenteile"* zunächst überhaupt nicht in Eingriff kommen.

Da die Fertigungsabweichungen schwer vorhersagbar sind, kann auch der genaue Punkt auf der Flanke, an dem die Rotorzähne einander berühren, nur annähernd vorberechnet werden. Die genauen Werte der Flankenpressung und der Gleitgeschwindigkeit, die beide von der Lage des Punktes auf der Flanke abhängig sind, können deshalb ebenfalls nur grob vorhergesagt werden. Der *Wert der Flankenpressung sinkt* allerdings *durch einen geringen Einlaufabtrag* von wenigen μm deutlich. Falls sehr dünne ($< 5\mu\text{m}$) harte Beschichtungen verwendet werden, ist ein Ausgleich der oft größeren Fertigungsabweichungen durch einen Einlaufabtrag nur sehr beschränkt möglich.

- Maschinenteile haben nach der Fertigung keine ideal glatte Oberfläche, sondern eine meßbare *Rauhigkeit*. Diese Rauhigkeit wird nach ihrer Form häufig mit einem "Miniaturgebirge" verglichen. Der Schmierfilm aus Öl bei herkömmlichen Zahnradern hat häufig eine Dicke von etwa 0,3 bis 2 μm und gleicht die rauhigkeitsbedingten unterschiedlichen Höhen der Oberfläche im Zahneingriff in der Art eines elastischen Polsters teilweise oder vollständig aus. *Wenn kein* derartiger *Schmierfilm* vorhanden ist, *tragen* bei den geringen elastischen Verformungen der Schraubenrotorverzahnungen *nur* jeweils die *Rauhigkeits-"gipfel"*. Diese haben dann zunächst Druckspannungen bis nahe an die Fließgrenze des Werkstoffes zu ertragen. Auch im Mikrobereich kann mit einem Ausgleich der Oberflächenbelastung durch Abtrag der am stärksten belasteten Bereiche gerechnet werden. Dies ist jedoch dann ein von der Art des Ver-

schleißabtrages abhängiger Vorgang. Es kann sein, daß in der Art eines Poliervorganges winzige Partikel von der Oberfläche an den Rauheitsgipfeln abgetragen werden. Es kann jedoch auch sein, daß größere Partikel aus der Oberfläche ausbrechen, so daß die Oberfläche noch rauher wird. Was jeweils auftritt, ist unter anderem stark werkstoffabhängig.

Die Beanspruchungen im Rotorprofileingriff sind mit aus der wissenschaftlichen Literatur bekannten Untersuchungen von Verschleißvorgängen nur wenig vergleichbar.

Bemerkenswert sind dabei folgende Erkenntnisse aus der Literatur:

Die Verschleißbeständigkeit ist keine Materialeigenschaft!

Wie groß der Verschleiß jeweils wird, *hängt weitgehend von den Umständen ab*, also z. B. von den *Kontaktverhältnissen*, dem Verhältnis zwischen Normalkraft und makroskopisch aufeinander gleitender Fläche (auch als scheinbare Flächenpressung bezeichnet), dem *Werkstoff des Gegenkörpers*, der *Gleitgeschwindigkeit*, dem *Umgebungsmedium*, der *Anfangsrauigkeit* usw. Es ist also nicht möglich, aus dem Verhalten einer Reibpaarung in einem bestimmten Fall auf das Verhalten unter anderen Bedingungen zu schließen. Bei Schraubenrotorprofilen liegen häufig Gleitgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s vor und der Punkt des Eingriffes bewegt sich mit ≤ 50 m/s über die Flankenoberfläche hinweg. Da dies außerhalb des meist untersuchten Bereiches -reine Gleitreibung bei niedriger Geschwindigkeit- liegt, wurde recht schnell deutlich, daß zur Beurteilung der Eignung von möglichen Werkstoffverbunden in dem *hier vorliegenden, komplexen Fall* eigene Untersuchungen notwendig waren. Deshalb erfolgte die *Simulation der Werkstoffbeanspruchung in einer Schraubenmaschine* in einem eigens dafür entwickelten *Modell-Verschleißversuchsstand*.

Durch die unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten von 2 *zylindrischen Rollen* wird an der Berührlinie der Rollen ein Wälzvorgang bewirkt, mit einer Gleitgeschwindigkeitskomponente und einer Geschwindigkeitskomponente, mit der sich der Eingriffspunkt über die Körperoberfläche bewegt. Der Standardversuch an diesem Versuchsstand hat folgende Parameter:

Durchmesser beider Rollen	120 mm
Rollenbreite	25 mm
Anpreßkraft der Rollen aneinander	75 N
Umfangsgeschwindigkeiten der Rollen	30 und 27 m/s, dadurch Gleitgeschwindigkeit 3 m/s
Flächenpressung nach der Hertzschen Theorie bei Stahlrollen	60 N/mm ² (Die Theorie gilt für ideale Zylinder, bei rauen Oberflächen dient diese Zahl nur als Vergleichsmaßstab)
Umgebungstemperatur	jeweils zunächst Raumtemperatur, dann 150 °C entsprechend den minimalen und maximalen Rotortemperaturen in einem durchschnittlich belasteten Trockenlaufkompressor

2.2 Modellverschleißversuche

Die bisher durchgeführten Versuche erstrecken sich über eine breite Werkstoffpalette.

Ein leicht vorstellbares Ergebnis ist, daß *ungehärteter Stahl* sofort durch *Fressen*, also lokale Verschweißung der Oberflächen und nachfolgendes Ausreißen größerer Partikel, versagt. *Gehärteter Stahl* wird langsam abgetragen, mit etwa 1 µm/h. Bei *gehärtetem Stahl* als Grundwerkstoff hätte ein Verbund also eine gewisse *Notlaufeigenschaft*.

Schnell zeigte sich auch, daß übliche metallische Hartlegierungen keinen Erfolg brachten. Mehrere oxidkeramische Schichten wie Al₂O₃ mit 30% TiO₂ oder ZrO₂ wurden jeweils mit dem *Plasmaspritzverfahren*¹⁾ etwa 1 mm dick auf Stahl aufgebracht, zumeist mit einer Zwischenschicht zur Haftungsverbesserung zwischen Grundwerkstoff und Keramikschicht, und danach geschliffen. Auch hier ist die Abtragsrate zu hoch.

Einzig eine Paarung aus *chromoxid* -(Cr₂O₃)- beschichteten Stahlrollen (Grundwerkstoff C60 normalgeglüht, mit einer NiCrAl- Haftvermittlungsschicht, darauf Cr₂O₃, Oberfläche geschliffen) zeigte sowohl bei Raumtemperatur als auch bei höherer Temperatur einen geringen Verschleiß. Da die Bearbeitung der Schicht durch Schleifen kostenträchtig ist, unterblieb zunächst die weitere Untersuchung, bis die Entwicklung der Spritzschichten innerhalb des SFB Ende 1992 eine überraschende Neuerung lieferte. Es erwies sich als möglich, *Chromoxidschichten mit geringer und gleichmäßiger Schichtdicke* von 200-300 µm bei geringer Rauigkeit (Wert von R_Z ≈ 10 µm) aufzubringen. Dies führte zu dem Gedanken, solche Schichten *ohne spanende Nachbearbeitung* auf Stahlrollen aufzubringen und im Modellverschleißversuch zu erproben. Diese Versuche verliefen *erfolgreich*. Es kam zu einem Einlaufvorgang mit geringem Schichtabtrag bei Glättung weiter Teile der Oberfläche bis hin zum Spiegelglanz, danach trat in 1000 h Versuchsdauer, je 500 h bei Raumtemperatur und bei 150 °C, kein meßbarer Verschleiß mehr ein. Eine Weiterentwicklung zur Verbesserung der Schichtdickenkonstanz, mit der auch das ansonsten übliche Aufbringen einer Zwischenschicht aus NiCrAl auf die Stahloberflächen als Haftvermittler zwischen Stahl und Chromoxid eingespart wird, gelang. An der Problemlösung, auch auf die sehr *komplexen Rotorgeometrien vorhersagbare Schichtdicken* aufbringen zu können, wird gegenwärtig gearbeitet. Hierbei ist es notwendig, die Schichtauftragsrate als Funktion vieler Verfahrensparameter, wie Flankenform und Vorbehandlung der Rotorflanken, Einstellung der Plasmaflamme, Chromoxid-Pulver-Förderrate, Verfahrensgeschwindigkeit etc. zu messen und aus diesen Ergebnissen die Verfahrenbahnen für die Plasmaspritzpistole zu bestimmen. Bei dem Beschichtungsvorgang ist die Soll-Schichtdicke auf möglichst etwa 0,01 mm genau einzuhalten. Dies soll in einem Regelkreis mit Messung der erreichten Schichtdicke

¹⁾ Schichtwerkstoff-Pulver wird in eine Plasmaflamme eingeblasen, aufgeschmolzen und von der Flamme in flüssigem Zustand auf die zu beschichtende Fläche geschleudert

nach jeder aufgetragenen Schichtlage und darauf folgender Korrektur der Beschichtungsparameter für den nächsten Beschichtungsvorgang erreicht werden.

Mit PVD²⁾-Verfahren ist es möglich, dünne Schichten (typischerweise 1 bis 20 µm) auf einen Stahlgrundkörper in einer Weise aufzudampfen, daß die Schicht überall eine nahezu gleiche Dicke hat und die Geometrie und Rauigkeit des Grundkörpers erhalten bleibt. *Ein Nachbearbeiten der Schicht erübrigt sich also a priori.* Die technisch erprobten Beschichtungsverfahren umfassen eine ganze Reihe von Materialien mit zum Teil sehr hoher Härte. Die Eigenschaften der Schicht können dabei meist durch Änderung der Beschichtungsparameter gezielt beeinflußt werden. Deshalb konzentrierten sich die Versuche der Jahre 1990 bis 93 auf PVD-Schicht-Stahl-Verbunde.

Zwei Beschichtungswerkstoffe erfuhren dabei eine eingehende Betrachtung:

Zum einen *Chromnitrid*, ein bei Gleitbeanspruchungen erprobter Schicht-Werkstoff, der schon bei relativ niedrigen Temperaturen (250 °C) am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Universität (Prof. Steffens) hergestellt werden kann, und zum anderen eine speziell für Gleit- und Wälzpaarungen in Maschinen industriell entwickelte Beschichtung aus *Wolframkarbid und Kohlenstoff*.

Als Grundwerkstoff für die Chromnitridbeschichtung fand der Stahl 100 Cr6 im gehärteten Zustand Verwendung; er weist auch nach einer Anlaßbehandlung bei 250°C eine hohe Härte von 58 HRC auf. Die Versuche mit diesem Verbund, bei denen unter verschiedenen Bedingungen erzeugte Chromnitridschichten mit Dicken zwischen 3 und 10 µm betrachtet wurden, erbrachten eine deutliche *Steigerung der Verschleißbeständigkeit* gegenüber nahezu allen bis dahin untersuchten Werkstoffen (Abtragsrate minimal 1/20 µm/h). Diese *Verschleißbeständigkeit* ist jedoch auch noch *nicht hinreichend*. Der Reibbeiwert beträgt im Modellverschleißversuch 0,2 bis 0,3. Der Verschleißmechanismus ist noch nicht vollständig geklärt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß hier ein langsamer gleichmäßiger Abtrag der Schicht aufgrund hoher Temperaturen an Rauigkeits- "gipfeln" vorliegt, verursacht durch die hohe Gleitgeschwindigkeit und dynamische Kraftmaxima. Deshalb sind weitere Versuche in Vorbereitung, um durch gezielte Modifikationen des Chromnitrid-Schichtaufbaus die Beständigkeit weiter zu erhöhen. Die zum Vergleich betrachteten PVD-Schichten nitridischer und in einem Fall auch oxidischer Natur, teilweise aus industrieller Herstellung und im Verschleißschutz erprobt, haben keine besseren Laufeigenschaften als das bisher eingesetzte, an der Universität Dortmund im Rahmen des SFB 316 erzeugte Chromnitrid.

Einzig eine *Wolframkarbid-Kohlenstoff-Schicht*³⁾ zeigt ein vielversprechendes, dabei aber nur teilweise durchschaubares Verhalten. Als Grundwerkstoff konnte hier der niedrigeren Be-

²⁾Physical Vapour Deposition - Abscheidung einer Schicht aus Dampf oder Ionen in einer Vakuumkammer

³⁾chem.: WC-C, Handelsname "Balinit C"

schichtungstemperatur wegen (etwa 150 °C) der Stahl 16 MnCr5, einsatzgehärtet auf 62 HRC, Anwendung finden. Die Schicht ist mehrlagig aufgebaut, mit einer aufgedampften Chromschicht von unter 1 µm Dicke, darüber dann je eine Lage WC, eine Lage C, eine Lage WC usw., insgesamt etwa 7 Doppellagen, zusammen ca. 7µm dick.

Bei Raumtemperatur hat der Verbund nur *minimalen Verschleiß*, 2 Dauerversuche wurden nach 1000 Stunden ohne Schichtversagen beendet. Die Oberfläche ist spiegelartig geglättet, der Reibbeiwert liegt zwischen 0,03 und 0,08. Bei 150 °C hingegen sinkt der Reibbeiwert teilweise auf einen überraschenden Minimalwert von 0,01, die *Beschichtung* ist dann allerdings nach höchstens 90 h weitgehend *abgetragen*. Die zusammen mit dem Hersteller unternommenen Schicht-Modifikationen brachten bisher keine Verbesserungen. Der genaue Verschleißmechanismus ist auch hier noch nicht bekannt, ein thermisch bedingtes Versagen durch lokal sehr hohe Reibungswärme darf auch hier vermutet werden.

3. Versuche in der realen Maschine

3.1 Verschleiß-Versuche im Schraubenkompressor bei trockener Reibung

Parallel zu den Versuchen an Modellverschleißkörpern fanden Versuche mit beschichteten Rotoren in Schraubenkompressoren statt. Ein Versuch mit Rotoren aus WC-C- beschichtetem einsatzgehärtetem 16MnCr5 endete schon nach 100 h. Die Verschleißschutzschicht war abgetragen, es kam *nicht* zum Fressen, der *Liefergrad* der Maschine nahm jedoch aufgrund sich vergrößernder Spalte im Profileingriff kontinuierlich ab. Ein Versuch mit *chromnitridbeschichteten* Rotoren aus gehärtetem Stahl 100 Cr6 verlief später ganz ähnlich.

Diese Versuche im realen Kompressor haben so die Ergebnisse der Modellverschleißversuche bestätigt.

Weitere Versuche in einem Schraubenkompressor mit trockener Reibung sind geplant, wenn der im Modellversuch erfolgreich erprobte Verbund aus Stahl mit der *Cr₂O₃- Spritzschicht* geringer Rauigkeit und hoher Schichtdickengleichmäßigkeit für Rotoren zur Verfügung steht.

3.2 Verschleißversuche im Schraubenkompressor mit Wassereinspritzung

Nach umfangreichen früheren Untersuchungen über das Ölverhalten in Schraubenkompressoren, die sich auch auf Öle mit sehr niedriger Viskosität [1] erstreckten, sollten folgerichtig die Experimente mit Wasser in der Maschine fortgesetzt werden. Dazu bot der Sonderforschungsbereich gute Voraussetzungen, nämlich um die Frage zu beantworten, in wie weit Verschleißschutzschichten sich mit Wasser im Kompressor bewähren würden, hatten doch die WC-C-Schichten bei niedrigen Temperaturen günstige Eigenschaften gezeigt. Der *Verzicht auf ein Synchrongetriebe* mit Hilfe geeigneter Rotorwerkstoffe brächte ja auch *bei Wassereinspritzung* erhebliche Vorteile. Da die vorhandene Versuchsmaschine ein Graugußgehäuse

besitzt, erfolgte die Zugabe eines *Inhibitors* in das Umlaufwasser als Rostschutzmittel für die gesamte Anlage. Der Versuch mit Rotoren aus dem Werkstoff *16 MnCr5 mit WC-C- Schicht* lieferte denn auch das erwartete Ergebnis:

- Die Rotoren zeigten auch nach 1000 h Betriebszeit einen *nur geringen Schichtabtrag*.
- Der Liefergrad blieb im Rahmen der Meßgenauigkeit konstant.
- Die Spiele im Profileingriff vergrößerten sich nicht.

Diese Versuchsrotoren sind in Bild 1 abgebildet.

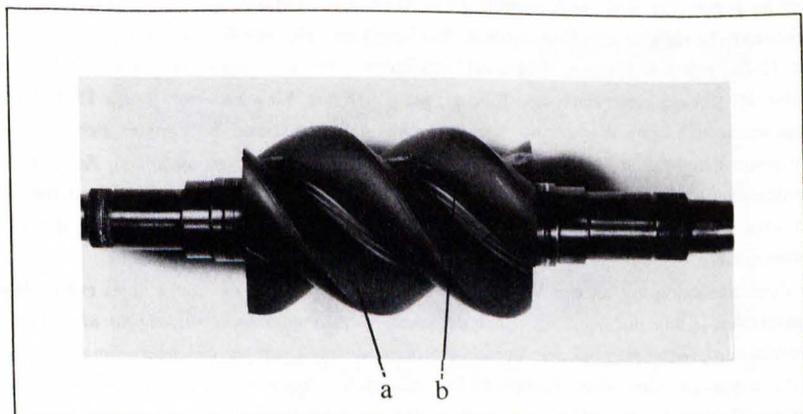


Bild 1: Hauptrotor mit einer Wolframkarbid-Kohlenstoff (WC-C) Beschichtung nach erfolgreichem Dauerversuch über 1000h mit Wassereinspritzung in die Maschine

a matt dunkler Bereich: WC-C- Beschichtung wie nach Herstellung

b dunkelglänzend: WC-C- Beschichtung im Wälzkontakt geglättet

Fig. 1: WC-C-(tungsten carbide- carbon) coated male screw rotor after successful long-time-test (1000 h) in a water-injected screw-compressor

a dull area: WC-C- coating as manufactured

b polished area: WC-C- coating polished in flank contact

Die Besonderheiten des Zahneingriffes bei Schraubenmaschinen sind hier gut zu erkennen: Es trägt jeweils nur ein Teil der Zahnflanke in der Nähe des Wälzkreises, wie aufgrund der geometrischen Analyse vorhergesagt. Die *Laufspuren* sind, durch die Fertigungsabweichungen bedingt, unregelmäßig. Sie erscheinen hauptsächlich auf den vorlaufenden Flanken ausgeprägt, den momentübertragenden Flanken, wenn der Hauptrotor den Nebenrotor antreibt. Die mikroskopische Untersuchung vermittelt den Eindruck einer glänzenden Oberfläche; meist in

der Mitte der Tragspuren findet sich ein Abtrag der Schicht bis auf den Grundkörper und an den glänzenden Stellen der schwarzen Oberfläche eine stark geglättete Schicht.

Die *Versuchsbedingungen* waren:

- 50 m/s Hauptrotor-Umfangsgeschwindigkeit,
- Eintrittsdruck etwa 1 bar, Austrittsdruck etwa 3 bar,
- Wassereinspritzung von 2 l Wasser je m³ geförderter Luft und eine
- Wassereinspritztemperatur im Mittel von 25 °C.

Hier sei angemerkt, daß die Anwendung des Korrosionsschutzzusatzes zunächst mit Schwierigkeiten behaftet war. Die Konzentration blieb zunächst unkontrolliert und stieg zeitweise auf das 12-fache des Sollwertes. Bedenken gegenüber einer Korrosion bei Stillstand, die sich später als unbegründet erwiesen, führten dazu, daß die Maschine vor jedem Halt durch längeren Betrieb ohne Wassereinspritzung trocken gefahren wurde. So konnten sich aus dem abtrocknenden Wasser harte, schmirgelnde Krusten auf den Rotoren ausbilden. Aus diesem Grunde dürfte der Schichtabtrag deutlich höher ausgefallen sein, als er es bei einem Betrieb mit stetiger Wasserbenetzung auch bei Stillstand und kontrollierter Konzentration der Fall gewesen wäre.

Im Zusammenhang mit diesem Versuch wurde eine Abschätzung zur Dicke eines eventuellen Wasserschmierfilms durchgeführt. Nach der *elastohydrodynamischen Theorie für ideal glatte Oberflächen* ergäbe sich bei den Versuchsrotoren, abhängig davon, welche Fertigungsabweichungen man annimmt, eine Wasserschichtdicke von 0,05 bis maximal 0,12 µm. Die Rauigkeit der Flanken liegt mit Werten von $R_z \approx 0,2$ µm aber deutlich höher, so daß von einer überwiegenden Übertragung der Normalkraft *im Zahneingriff durch Festkörperkontakt* ausgegangen werden muß.

Der im Vergleich zu entsprechenden Schmierfilmdicken bei Öl überraschend niedrige Wert entsteht nicht nur aufgrund der niedrigen Grundviskosität des Wassers, sondern auch durch das Fehlen der bei Öl typischen *Viskositätszunahme unter Druck*. Eine genauere Bestimmung der Traganteile von Flüssigkeitsfilm und Festkörperberührung auf experimentellem Wege ist geplant.

Im 1. Halbjahr '94 lief ein weiterer Versuch mit *chromnitridbeschichteten Rotoren* aus gehärtetem Stahl 100 Cr6 unter fast unveränderten Versuchsbedingungen. Der einzige Unterschied bestand jedoch in der Wasserbehandlung. Die Konzentration des Inhibitors wurde fortlaufend kontrolliert. Ein Trockenfahren des Kompressors vor Unterbrechungen unterblieb ebenfalls, so daß das Ergebnis nur eingeschränkt vergleichbar ist. Auch hier trat bei einem Dauerversuch *über 1000 h nur ein recht geringer Schichtabtrag* auf, [Bild 2](#). Dies scheint zunächst im Widerspruch zu der geringen Beständigkeit dieses Verbundes im Rollenversuch zu stehen. Da jedoch die *Ursache des Verschleißes in hoher lokaler Wärmeentwicklung* zu vermuten ist, kann die bis in den Profileingriff hineinreichende auch mikroskopische Kühlwir-

kung des Wassers eine Arbeitshypothese für dieses günstige Verhalten liefern. Die Größe der Fläche, auf der die Schicht vollständig abgetragen und der Grundwerkstoff Stahl freigelegt wurde, war bei diesem Versuch *deutlich größer als bei dem Versuch mit Wolframkarbid-Kohlenstoff (WC-C)- beschichteten Rotoren*. Das Standzeitende kam, wie aufgrund der Modellversuche vorhergesagt, durch den allmählichen Abtrag der Schicht bis auf den Grundwerkstoff zustande. *Sichtbare Abtragsspuren wie Abrasionsriefen sind auch auf Rasterelektronenmikroskopaufnahmen nicht zu finden.*

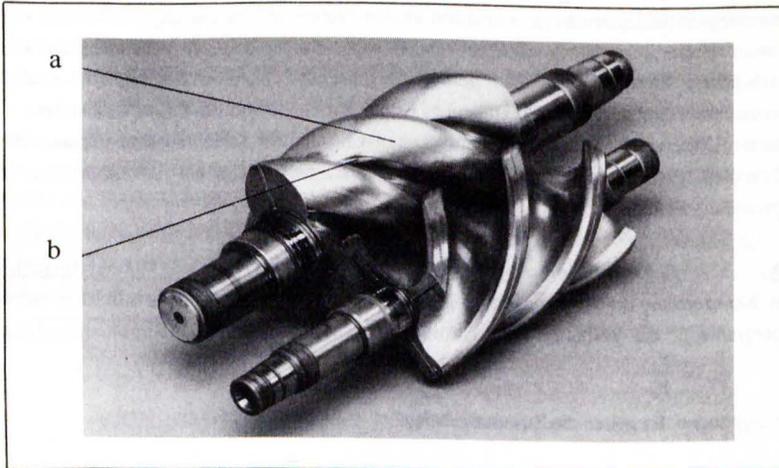


Bild 2: Hauptrotor mit Chromnitrid Beschichtung nach erfolgreichem Dauerversuch mit Wassereinspritzung in die Maschine über 1000h-Versuch

- | | | |
|---|-----------------|---|
| a | matter Bereich: | Beschichtung wie nach Herstellung |
| b | glänzend: | Beschichtung im Wälzkontakt geglättet/ abgerieben |

Fig. 2: Chromium nitride coated male screw rotor after successful long-time test (1000 h) in a water-injected screw-compressor

- | | | |
|---|----------------|---|
| a | dull area: | coating as manufactured |
| b | polished area: | coating polished/ worn off in flank contact |

Zur *Konzeption der Schraubenkompressorversuchsanlage* ist anzumerken, daß für die hier beschriebenen Versuche mit und ohne Wasser der gleiche Kompressor Verwendung fand, eine als Trockenläufer konstruierte Maschine.

Die Schutzwirkung des Inhibitors in der Anlage erwies sich als akzeptabel. Es traten in beiden Langzeitversuchen keine meßbaren Abträge durch Korrosion an dem ansonsten ungeschützten Graugußgehäuse auf. Um die Gefahr der Bildung von Ablagerungen zu umgehen, wurde

vollentsalztes Wasser verwendet. Nur ein geringer Wasseraustausch mit einer mittleren Verweilzeit des Wassers im Bereich von Wochen war für den ersten Langzeitversuch vorgeesehen. Eine Überprüfung der Bakterienzahl nach mehreren hundert Stunden erbrachte dabei zwar hohe, aber noch annehmbare Konzentrationen.

In einem *Langzeit-Korrosionsversuch* mit luftumspülten Proben aus GG, Stahl und *chromnitridbeschichtetem Stahl*-Verbund in verschiedenen Wasseransätzen konnte die Wirkung des Inhibitors überprüft werden. Im mit dem Inhibitor versetztem Wasser trat nach 1000 h bei Raumtemperatur nahezu keine Korrosion an den Proben auf. In Leitungswasser und vollentsalztem Wasser korrodierten die Stahl- und GG-Oberflächen dagegen vollständig und das mit beachtlichem Materialabtrag. Die poröse Chromnitrid-Schicht erwies sich dabei als sehr korrosionsbeständig. An den Poren kam es jedoch zur Korrosion des Grundwerkstoffs.

Weitere Dauerversuche mit weiterentwickelten Chromnitrid-Schichten sind geplant. Hierbei soll anstelle des in der Bearbeitung ungünstigen Stahles 100Cr6 eine *nitriergedehärteter Stahl* Anwendung finden.

3.3 Energiewandlungsgüte in Schraubenkompressoren mit Wassereinspritzung

Als Kennzeichen der Energiewandlungsgüte in der Maschine wird der effektive isentrope Gütegrad η_{es} , das Verhältnis von isentroper Leistung P_s , zu effektiver Kupplungsleistung P_e

$$\eta_{es} = \frac{P_s}{P_e}$$

herangezogen. Es gelten die Zusammenhänge:

$$\eta_{es} = \frac{P_i}{P_e} \cdot \frac{P_s}{P_i} = \eta_m \cdot \frac{\dot{m}_f \cdot w_s}{\dot{m}_f \cdot w_i} = \eta_m \cdot \frac{\lambda_L \cdot \dot{m}_{th} \cdot w_s}{n_a \cdot W_i} = \eta_m \cdot \frac{\lambda_L \cdot n_a \cdot m_{Ar} \cdot W_s}{n_a \cdot W_i}$$

$$\eta_{es} = \eta_m \cdot \lambda_L \cdot \frac{W_s}{W_i} = \eta_m \cdot \eta_{is}$$

Darin

bedeuten:

P_s	die Leistung eines isentrop verdichtenden, verlustfreien Kompressors
P_e	die effektive Kupplungsleistung
P_i	die indizierte Innenleistung, abweichend von der üblichen Definition gehen hydraulische Reibungsverluste im Arbeitsraum der Maschine hierin <i>nicht</i> ein, da diese <i>mefstechnisch</i> von anderen mechanischen Verlusten außerhalb des Arbeitsraumes nicht zu trennen sind
W_s	indizierte Arbeit pro Arbeitsspiel bei isentroper, verlustfreier Maschine
W_i	indizierte Arbeit pro Arbeitsspiel in der realen Maschine
$\dot{m}_f = \lambda_L \cdot \dot{m}_{th}$	der geförderte Massenstrom
\dot{m}_{th}	der theoretische Massenstrom

m_{Ar}	die Masse im Arbeitsraum je Arbeitsspiel bei isentroper, verlustfreier Maschine
n_a	Anzahl der Arbeitsspiel je Zeiteinheit
w_i	die indizierte spez. Arbeit
w_s	die indizierte spez. Arbeit bei isentroper, verlustfreier Maschine
λ_L	der Liefergrad
$\eta_m = P_i / P_e$	der mechanische Wirkungsgrad
η_{is}	der isentrope indizierte Gütegrad

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist immer zu bedenken, daß es sich bei der Versuchsmaschine um einen umgebauten Trockenlaufkompressor handelt mit:

- asymmetrischem 3+4 Zähne-Profil,
- recht großen Spalten, einer
- eingebauten Ölpumpe für das Lager- und Getriebschmieröl und
- einem *berührenden Dichtring* an jedem Rotorwellenende zur Abdichtung des Arbeitsraumes gegenüber den Lagerräumen.

Diese Einflüsse verringern a priori die Energiewandlungsgüte gegenüber einer für den Betrieb mit Flüssigkeitseinspritzung optimierten Maschine. Damit ist die Vergleichbarkeit zu einem typischen öleingespritzten Kompressor eingeschränkt.

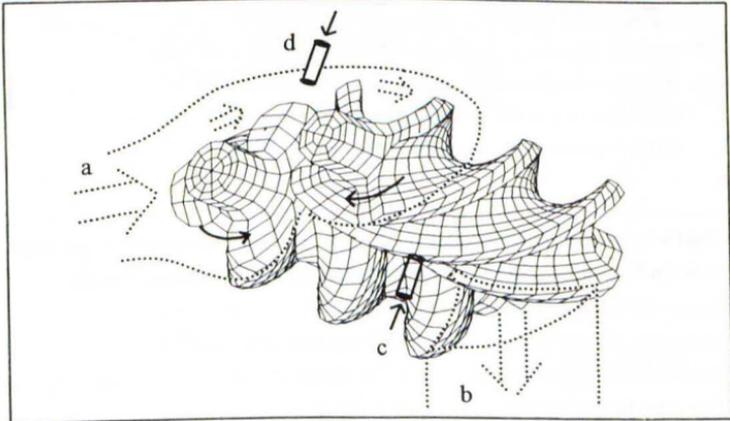


Bild 3: Lage der Einspritzorte im Schraubenkompressor

a	Ansaugöffnung	b	Austrittsöffnung
c	druckseitige Einspritzöffnung	d	saugseitige Einspritzung

Fig.3: Position of water injection into screw compressor

a	suction duct	b	exhaust duct
c	injection hole at high pressure side	d	injection nozzle at low pressure side

Dennoch wurden Versuche sowohl mit Wasser- als auch mit Öleinspritzung mit dieser Versuchsmaschine durchgeführt. Einspritzorte sind eine Bohrung an der Verschneidungskante der beiden Rotorbohrungen im Gehäuse, auf halbem Weg zwischen dem druck- und dem saugseitigem Ende des Arbeitsraumes, ähnlich den meisten öleingespritzten Schraubenkompressoren, und zusätzlich eine Einspritzung in der Saugöffnung, Bild 3

Um den Einfluß einer Erwärmung der Luft beim Ansaugvorgang zu minimieren, erfolgt, wo nicht anders vermerkt, eine Rückkühlung der *Einspritzflüssigkeit auf etwa Raumtemperatur*.

Wenn die Rotoroberflächen mit der reibungsarmen *WC-C-Verschleißschutzschicht* versehen sind, ist bei Betrieb des Kompressors mit und ohne Synchrongetriebe der effektive Gütegrad nahezu unverändert. Bei Einsatz der Cr_xN_y -Verschleißschutzschicht mit ihrem höheren Reibungsbeiwert sinkt der Gütegrad ohne Synchrongetriebe um etwa 1%. Die Versuche mit verschiedenen Einspritzparametern erfolgten mit montiertem Gleichlaufgetriebe.

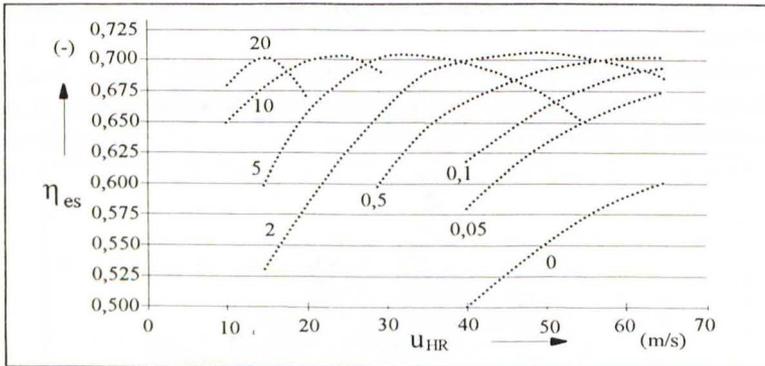


Bild 4 Effektiver isentroper Gütegrad η_{es} als Funktion der Hauptrotorumfangsgeschwindigkeit u_{HR} bei Wassereinspritzung durch die druckseitige Einspritzöffnung bei einem Druckverhältnis $\Pi = 3,5$

Parameter: Wassermenge / geförderte Luftmenge in dm^3/m^3

Fig. 4 Effective isentropic efficiency η_{es} as function of main rotor peripheral speed when injecting water through the injection hole at a pressure ratio $\Pi = 3,5$
parameter: relation water volume / air volume in dm^3/m^3

Als Ausgangspunkt der Darstellung verdeutlicht Bild 4 den Verlauf des *effektiven isentropen Gütegrades* η_{es} bei einem Druckverhältnis von 3,5, das etwa dem eingebauten Volumenverhältnis entspricht, aufgetragen über der Hauptrotorumfangsgeschwindigkeit u_{HR} mit verschiedenen Verhältnissen zwischen Wasser und geförderter Luft als Parameter. Die Wassereinspritzung erfolgt hierbei, wie industriell meist üblich, durch die Gehäusebohrung auf der Druck-

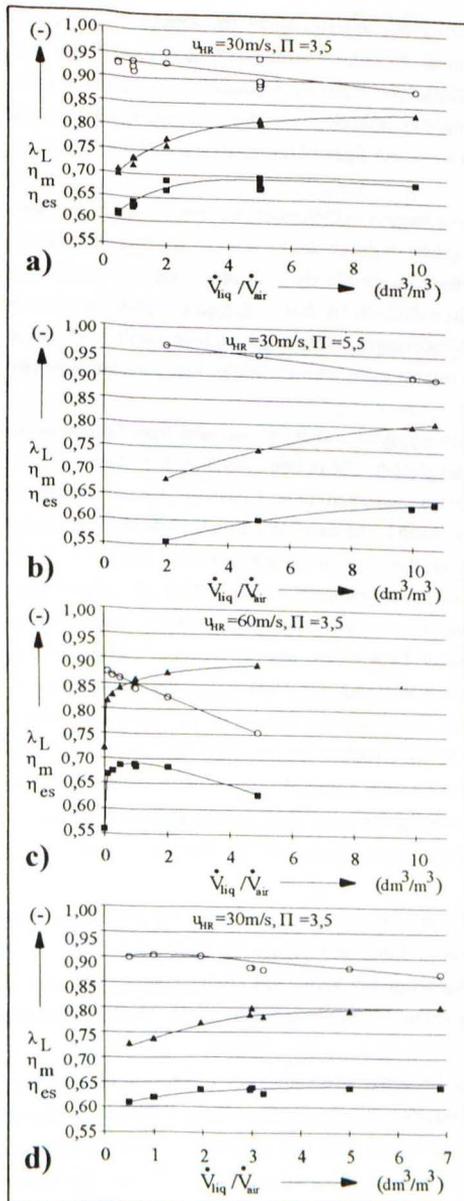


Bild 5: Verlauf von Liefergrad λ_L \blacktriangle mech. Wirkungsgrad η_m \circ und effektiver, isentropischer Gütegrad $\eta_{e,s}$ \blacksquare als Funktion des Verhältnisses von eingespritzter Flüssigkeit (Index liq) zum angesaugten Luftvolumen $\dot{V}_{liq} / \dot{V}_{air}$. Einspritzung in die druckseitige Bohrung in Teilbild a) - c) Wassereinspritzung bei Raumtemperatur, in Teilbild d) Öleinspritzung bei 80 °C

Fig. 5: relation between supply efficiency λ_L \blacktriangle mechanical efficiency η_m \circ and effective, isentropic efficiency $\eta_{e,s}$ \blacksquare and liquid injection rate $\dot{V}_{liq} / \dot{V}_{air}$ air at ambient conditions injection through the casing hole a) to c) water injection at ambient temperature, d) oil injection at 80 °C

seite. Bild 4 ist auf Basis vieler Meßergebnisse mit verschiedenen Rotoren und geringfügig verschiedenen Spaltweiten zustande gekommen. Zu jeder Umfangsgeschwindigkeit gehört in Hinblick auf den Gütegrad ein *optimales Flüssigkeits-/Luft-Verhältnis*. Die Höhe des jeweiligen Gütegradoptimums im Umfangsgeschwindigkeitsbereich von 15 bis 65 m/s fällt nur wenig unterschiedlich hoch aus. Dies ist möglicherweise ein Spezifikum des verwendeten Kompressors.

Bei hohen eingespritzten Flüssigkeitsvolumen liegt das Optimum bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten; hier sind die Spalte von vornherein durch die Flüssigkeit weitgehend gedichtet; die hydraulischen Reibungsverluste steigen durch die dann großen Flüssigkeitsvolumen schon bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten deutlich an. Bei niedrigen Flüssigkeitsvolumen liegt das Optimum, wie bekannt, bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten; hier werden die Spalte erst bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten relativ dicht; die hydraulischen Reibungsverluste bleiben gering.

In Bild 5a sind Liefergrad, mechanischer Wirkungsgrad und effektiver isentroper Gütegrad bei 30 m/s und einem Druckverhältnis von 3,5 dargestellt. Die in den mechanischen Wirkungsgrad eingehenden Verluste umfassen alle Einflüsse zwischen dem Einleiten der mechanischen Energie in den Kompressor durch die Antriebswelle und ihrer Abgabe als Volumenänderungsarbeit der Rotoren an das Arbeitsfluid, also die Reibung im Zahnradgetriebe, die Leistung der eingebauten Schmierölpumpe, die Reibung an den Dichtungen und vor allem die hydraulischen Reibungsverluste im Arbeitsraum, die wesentlich von der eingespritzten Wassermasse abhängen. Die gegenläufigen Effekte von steigender Dichtigkeit, also steigendem Liefergrad und höherer Reibung (= sinkendem mechanischem Wirkungsgrad) bei steigendem Einspritzvolumen auf den Gütegrad sind klar zu erkennen. Dabei fällt das Maximum des Gütegrades bei 5 bis 8 dm³/m³ relativ flach aus. Bei einem hohen Druckverhältnis, Bild 5b, befindet sich das Optimum außerhalb des gefahrenen Bereiches bei sehr hohen Wasservolumen im Arbeitsraum. Geringere Wassermassen reichen nicht aus, um die für einen hohen Gütegrad nötige Dichtigkeit zu erzielen. Bei kleineren Druckverhältnissen verschiebt sich das Optimum wiederum zu kleineren Einspritzvolumina.

Dem Bild 5c sind die Verhältnisse bei erhöhter Umfangsgeschwindigkeit zu entnehmen. Das Optimum des Gütegrades ist hier bei geringen Einspritzvolumen im Bereich von 0,5 bis 1 dm³/m³ zu finden. Eine große Dichtwirkung schon bei geringen Flüssigkeitsvolumen, die bei einer Öleinspritzung aufgrund einer eventuellen Verpuffungsgefahr nicht nutzbar gemacht werden kann, ist hier besonders deutlich.

Beim Vergleich zwischen Bild 5a und 5c ist bemerkenswert, daß der Liefergrad bei niedriger Umfangsgeschwindigkeit auch bei hohen Einspritzmengen um 5% niedriger bleibt als bei der hohen Umfangsgeschwindigkeit. Die Hauptverlustquelle ist hier in den Leckmassenströmen zu suchen. Dagegen verhält sich der mechanische Wirkungsgrad genau umgekehrt. Bei hohen

Umfangsgeschwindigkeiten ist die Hauptverlustquelle in den mechanischen Verlusten zu suchen.

Bild 5d zeigt zum Vergleich den gleichen Betriebsbereich wie Bild 5a, hier jedoch mit 80 °C warmem mineralischen Öl der Viskosität ISO VG32 als Einspritzflüssigkeit. Dabei liegt die optimale Einspritzmenge in beiden Fällen bei 5 bis 8 dm³/m³. Sowohl der Liefergrad als auch der mechanische Wirkungsgrad liegen hier niedriger als bei Wassereinspritzung ($\Delta\eta_{es} = 6\%$). Bei der Klärung dieser Tatsache soll Bild 6 mit dem Verlauf des Liefergrades über der Einspritztemperatur bei Wasser und Öl einbezogen werden. Hohe Einspritztemperaturen verschlechtern den Liefergrad und infolgedessen den Gütegrad. Der Grund dafür dürften vor allem die Aufheizung der einströmenden Luft an den wärmeren Gehäusewandungen und Rotorzahnflanken sowie in den Ansaugbereich gelangte warme Flüssigkeitstropfen sein. Bei gleicher Flüssigkeitstemperatur liegt der Liefergrad bei Öl höher als bei Wasser. Die Dichtungswirkung steigt bei Öl also tendenziell bei gleicher Einspritzmenge gegenüber Wasser, seine Reibungswirkung aber auch. Wenn jeweils bei Raumtemperatur eingespritzt

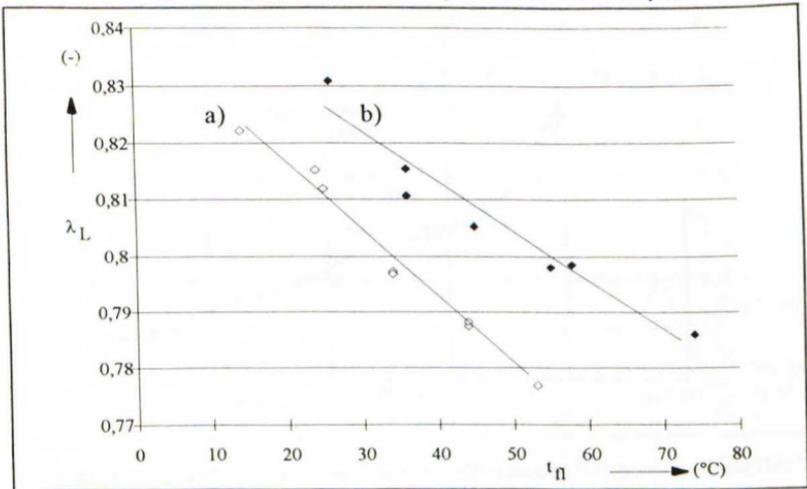


Bild 6: Abhängigkeit des Liefergrades λ_L von der Einspritzflüssigkeit-Temperatur t_η Einspritzung von Wasser und Öl durch die druckseitige Bohrung, $u_{HR} = 30$ m/s, $\Pi = 3,5$

a) Wasser $5 \text{ dm}^3/\text{m}^3$

b) Öl ISO VG 32 $3 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ (maximal mögliches Einspritzvolumen bei 25°C)

Fig. 6: Relation between supply efficiency λ_L and injection fluid temperature t_η water and oil injection through casing hole, $u_{HR} = 30$ m/s, $\Pi = 3,5$

a) water $5 \text{ dm}^3/\text{m}^3$

b) oil ISO VG 32 $3 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ (maximum injection volume at 25 °C)

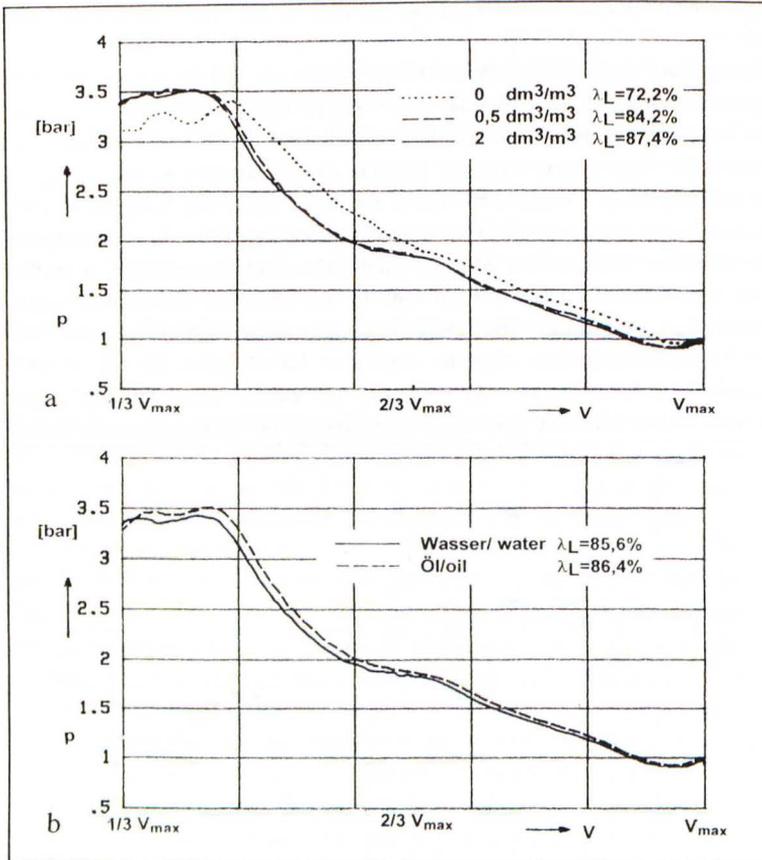


Bild 7: Messungen des Arbeitskammerdruckes p über dem Arbeitskammervolumen V bei einer Hauptrotorumfangsgeschwindigkeit $u_{HR}=60$ m/s und einem Druckverhältnis $\Pi=3,5$

- a) bei verschiedenen Einspritzvolumen und Wassereinspritzung,
 b) bei Öl- und Wassereinspritzung, Flüssigkeitsvolumen $1 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ geförderte Luft

Fig. 7: Test results of working chamber pressure p as function of its volume V at male rotor peripheral speed $u_{HR}=60$ m/s and pressure ratio $\Pi=3,5$

- a) with different injection rates and water injection
 b) with water and oil, $1 \text{ dm}^3/\text{m}^3$

wird, ist der Gütegrad bei Öl um 2% geringer gegenüber der Wassereinspritzung. Dabei ist der Liefergrad höher, der deutlich niedrigere mechanische Wirkungsgrad verkehrt die durch die bessere Abdichtung bewirkte Verbesserung der Energiewandlungsgüte jedoch in eine Verschlechterung.

Der Ort der Wassereinspritzung hat bei Einspritzvolumen $< 0,5 \text{ dm}^3$ Wasser pro m^3 geförderter Luft nahezu keinen Einfluß auf den Gütegrad, bei hohen Einspritzmengen erweist sich jedoch die Einspritzung auf der Druckseite als günstiger. Der Vorteil beträgt beim Gütegrad etwa 2%. Dies war zu erwarten, da große Flüssigkeitsvolumina in der saugseitigen Hälfte des Kompressorgehäuses die hydraulischen Reibungsverluste vergrößern, aber nur wenig zur Spaltabdichtung beitragen, da hier die Spaltmassenströme durch die niedrigen anliegenden Druckdifferenzen von vornherein gering sind. Die Wirkung der Flüssigkeitstemperatur auf Liefergrad und Gütegrad ist bei einer saugseitigen Einspritzung merklich höher. Hinsichtlich des Einspritzortes entsprechen sich die Ergebnisse bei Wasser- und Öleinspritzung.

Ein Unterschied in der Dichtwirkung von Wasser und Öl ist noch zu erwähnen: Das Indikatordiagramm verdeutlicht die Dichtwirkung eingespritzter Flüssigkeiten, Bild 7a. Eine höhere innere Dichtigkeit, die einen höheren Liefergrad bewirkt, läßt das p-V-Diagramm "schlanker" werden. Bei Einspritzung von Öl bei Raumtemperatur ist hingegen das p-V-Diagramm merklich "fülliger" als es dem Liefergrad entspräche, siehe Bild 7b.

Die Ergebnisse lassen sich mit Hilfe des Flüssigkeitsverteilungsmodells, wie in [7] beschrieben und im nachfolgenden Vortrag eingehender erklärt, begründen:

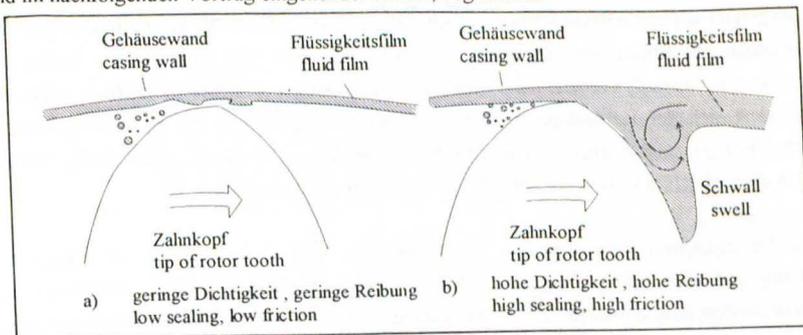


Bild 8: Schnitt durch einen Rotorzahn bei a) geringen und b) hohen Einspritzvolumen

Fig. 8: Cross-section across rotor tooth at a) low and b) high liquid injection rate

Die Abdichtung der Umfangsspalte und Stirnspalte erfolgt durch einen dünnen Flüssigkeitsfilm an der Gehäuseinnenwand. Dieser kann schon durch geringe Flüssigkeitsmassenströme aufgebaut werden, er dichtet den Spalt aber nicht vollständig ab. Steigt die Flüssigkeitsmasse,

wird der Wandfilm so dick, daß er von den Rotorzahnköpfen erfaßt und in Form eines Schwalles transportiert wird. Sodann ist der Spalt dicht, die Reibung nimmt aber entsprechend zu. Schon kleine Flüssigkeitsmassen bewirken durch ihre Dichtwirkung gegenüber dem Trockenlauf einen stark zunehmenden Liefergrad des Kompressors. Höhere Einspritzvolumina erhöhen den Liefergrad weiter - ein zunehmender Teil der Umfangsspalte wird nun durch einen *Schwall* versperrt, der Reibungsanteil wächst. Ähnlich ist die Wirkung an der Kopfrundungsöffnung (Blasloch) und am Profileingriffsspalt. Die Kopfrundungsöffnung wird durch die an der druckseitigen Verschneidungskante der Gehäusebohrungen zusammentreffenden Flüssigkeitsschwallvolumina von Haupt- und Nebenrotorzahnkopf mehr oder weniger weit versperrt. Die durch diese Spalten gelegentlich durchtretenden Luftmengen führen zur Bildung einiger Flüssigkeitstropfen im Profillückenraum, die an der Profiltraoberfläche die Filmdicke erhöhen. An den Rotorzahnflanken verhindern die Fliehkräfte den Aufbau dickerer Flüssigkeitsfilme. Zur Versperrung des Profileingriffsspalt es deshalb oft nur unvollständig. Auch für die Kopfrundungsöffnung und den Profileingriffsspalt gilt, daß eine geringe Flüssigkeitsmasse die Dichtigkeit verbessert, größere Flüssigkeitsmassen steigern diese Dichtigkeit, dann aber überproportional die daraus folgende Reibung. Eine höhere Viskosität -bei Öl- begünstigt die Bildung eines etwas dickeren Flüssigkeitsfilmes auf den Zahnflanken, indem die der Zentrifugalkraft entgegenstehende Flüssigkeitsreibung ansteigt, welche das Abschleudern der Flüssigkeit bremst. Ein durch dickere Flüssigkeitsfilme auf den Zahnflanken besser gedichteter Profileingriffsspalt macht sich in einem höheren Liefergrad bemerkbar. Dabei ist die insgesamt aufzubringende Reibungsarbeit aufgrund der höheren Viskosität jedoch größer, der mechanische Wirkungsgrad geringer. Das p-V-Diagramm zeigt unter solchen Bedingungen einen "fülligeren" Verlauf, denn durch den vollständiger gedichteten Profileingriffsspalt vermindert sich der Luftleckmassenstrom aus der Arbeitskammer, die Spaltmassenströme durch Umfangs- und Stirnspalt sowie Kopfrundungsöffnung in die Kammer hinein bleiben jedoch etwa gleich- im Ergebnis steigt der Druck in der Arbeitskammer.

Nach den bisherigen Ergebnissen ist eine Bauart von Schraubenmaschinen mit Wassereinspritzung und ohne Synchrongetriebe vielversprechend. Der Gütegrad dieses Maschinentyps kann gegenüber dem herkömmlichen Maschinenbetrieb vor allem dadurch günstiger ausfallen, daß die Einspritzflüssigkeit wesentlich kälter gehalten werden kann. Auf die Beeinträchtigung der Lagerlebensdauer durch auskondensierende Luftfeuchtigkeit im Schmierstoff braucht hier keine Rücksicht genommen werden. Dazu kommt die Möglichkeit, einen höheren mechanischen Wirkungsgrad zu erzielen. Drei *Fragen* scheinen jedoch noch nicht endgültig beantwortet:

- Die Erste ist die der Anlagenkorrosion. Dem *Korrosionsproblem* im Wasserkreislauf kann begegnet werden durch:

-die Ausführung der Anlage in korrosionsbeständigen Materialien, hier sind die Kosten zu bedenken,

-einen Inhibitorzusatz im Wasser. Dabei ist die chemische Zusammensetzung genau zu beachten. Das abzuführende Wasser muß zudem umweltverträglich sein.

• Die Zweite ist die nach der chemischen und bakteriellen *Beherrschung des Wasserkreislaufes* im industriellen Dauerbetrieb. Hier sind verschiedene Konzepte möglich. Zu beachten ist: Je länger Wasser im Kreislauf verbleibt, desto mehr Verunreinigungen aus der Luft konzentrieren sich darin und desto schneller können sich Mikroorganismen vermehren. Es besteht die Gefahr, daß aus der Luft eingetragene Spurengase den pH-Wert des Wassers verändern, daß Keimansammlungen den Wasserfluß beeinträchtigen und daß sich Krankheitskeime im Wasserkreislauf vermehren. Chemische Zusätze zur *Bekämpfung dieser Mikroorganismen* sind vielfach ein Hindernis für die erwünschte einfache Ableitung des Kreislaufwassers in die Kanalisation oder sie wirken korrosionsverstärkend.

• Die *Versorgung des geschlossenen Wasserkreislaufes* der Anlage -Frage 3- kann erfolgen:

-Mit Wasser aus dem öffentlichen Leitungsnetz. Hier muß der Gefahr der Bildung von Ablagerungen begegnet werden. Es könnte problemlos ein sehr häufiger Wasserwechsel erfolgen, womit die mikrobielle Gefahr gebannt wäre. Dann aber ist ein Inhibitor aus Kostengründen schwer anwendbar.

-Mit enthärtetem Wasser. Von Nachteil sind hier die Aufbereitungskosten.

-Mit bei Überschreitung des Drucktaupunktes ausfallendem Wasser. Hier ist bei kalter Witterung der Wassergehalt der Luft so niedrig, daß zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden müssen.

-Große Schraubenkompressoren, bei denen heute eine Rückkühlung des Einspritzöles mittels Kühlwasser aus einem Kühlwassernetz, mitunter auch noch mit Frischwasser erfolgt, könnten auch in einem offenen Kreislauf direkt mit diesem Wasser als Einspritzflüssigkeit versorgt werden. Der Einsparung an Wärmetauschern steht hier der Mehraufwand bei der Beherrschung des Ablagerungsproblem und/oder des mikrobiellen Problem gegenüber.

Die Lösung der hier anstehenden Fragen wird entscheidend sein für den Erfolg der Entwicklungsbemühungen um die mit Wassereinspritzung arbeitende Schraubenmaschine. Ein Forschungsvorhaben hierzu befindet sich in der Vorbereitung.

Ein weiteres Problem ist das der *Lagerschmierung und -abdichtung*. Die Anwendung einer eigenen Ölschmierung für die 4 Lager und der Einbau spezieller Dichtungen für die Abdichtung des Arbeitsraumes an den Wellenzapfen, diese Abdichtung ist keinesfalls ein triviales Problem, verursacht Kosten. Es widerspricht zudem dem Wunsch nach einer einfachen Maschine. Hier böte sich an, zumindest *wassergeschmierte Gleitlager* einzusetzen.

Vollhydrodynamischer Betrieb wassergeschmierter Lager ist bei Nenndrehzahl erreichbar. Schwierigkeiten sind allerdings zu erwarten von:

- ★ den Anfahr- und Auslaufvorgängen, bei denen die Lager im Mischreibungsbereich laufen, und dies bei nicht unerheblichen Gleitgeschwindigkeiten und Reibungsenergien und von
- ★ dem Auftreten möglicher kleiner harter Partikel.

Ein dadurch bedingter Verschleiß in den Lagern führte bei einem Abtrag einiger Hundertstel Millimeter zum Anstreifen der Rotoren am Gehäuse. Weiche Lagermaterialien wie Graphit, die unter solchen Bedingungen in aller Regel stärkeren Verschleiß zeigen, sind somit wohl nur schwerlich anwendbar, keramische Bauteile sind heute recht kostspielig und empfindlich beim Einbau. Bei größeren Anlagen könnte die hydrostatische Unterstützung der Lager durch eine getrennte Hochdruckpumpe eine Lösung bieten. Ein Forschungsvorhaben zu diesem Themenkomplex wird gerade begonnen.

4. Literatur

- [1] Kauder, K. Einfluß der Schmierstoffviskosität auf das Betriebsverhalten von Schraubenverdichtern.
In: Technische Mitteilungen, Band 72, Heft 6, S. 410 - 412
Essen: Vulkan-Verlag 1979
- [2] Kauder, K. Verschleißschutz für Schraubenrotoren
Dreischhoff, U. In: VDI Berichte 859, S. 321-346,
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990
- [3] Dreischhoff, U Festkörperreibung in Schraubenmaschinen,
Ein Beanspruchungsmodell für Werkstoffverbunde
Dissertation (1991), Universität Dortmund
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 230
- [4] Kauder, K. Tribologische Probleme in Schraubenmaschinen.
In: Tribologie in der Forschung und Antriebstechnik (1992),
Berlin: Technik und Kommunikations Verlag
- [5] Steffens, H.-D. Keramische Schutzschichten.
Gramlich, M In: Veröffentlichung anläßlich "Haus der Technik",
Keramik als Konstruktionswerkstoff, 13.-14. Nov. 1991, Essen
- [6] Steffens, H.-D. Some Aspects of Properties Design of Plasma Sprayed Barrier Coatings
Neuer, G. In: Powder Metallurgy International, No. 2, 1991
Brandl, W.; Babiak, Z.
Brandt, R.
- [7] Harling, H.-B. Untersuchungen zur Ölverteilung in Schraubenkompressoren mit Schmiermitteleinspritzung
Dissertation (1993), Universität Dortmund
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 230