

MoS₂-Dünnschichten für unsynchronisierte, trockenlaufende Schraubenmaschinen

Umweltfreundliche und nachhaltige Schmierungskonzepte als Herausforderung und Chance

Daniel Aurich, Alexandra Wittig, Dominic Stangier, Jörg Debus, Carl-Arne Thomann, Wolfgang Tillmann, Andreas Brümmer

Einleitung

Schraubenmaschinen zählen zu den Rotationsverdrängermaschinen. Sie bestehen aus zwei gegenläufig rotierenden Rotoren, die in einem sie eng umschließenden Gehäuse gelagert sind [1]. Durch das kompakte Design und den wartungsarmen Betrieb ist der Schraubenkompressor heutzutage der meistgenutzte Kompressortyp in der Druckluft- und Kältetechnik [2]. Eine unsynchronisierte, trockenlaufende Schraubenmaschine vereint die Vorteile von konventionellen nass- und trockenlaufenden Schraubenmaschinen. Der Verzicht auf ein zusätzliches Synchronisationsgetriebe und auf ein Schmiermittel ermöglichen eine Reduktion des Bauraums und eine Vermeidung von Schmiermittelrückständen im Prozessgas. Unsynchronisierte, trockenlaufende Schraubenmaschinen bieten im Hinblick auf ökologische Aspekte bedeutende Vorteile im Gegensatz zu den konventionellen Bauarten, stellen jedoch ein technologisches Neuland dar. Um dennoch eine verschleißarme Drehmomentübertragung über die Rotorverzahnung wie bei dem Einsatz von flüssigen Schmierstoffen zu gewährleisten, ist eine Beschichtung der Schraubenrotoren unerlässlich. Dabei ermöglichen moderne Vakuumbeschichtungsverfahren, wie die Physikalische Gasphasenabscheidung (kurz: PVD), bei der Dünnschichten im Bereich von 1 bis 3 µm synthetisiert werden, eine endkonturnahe Beschichtung der Schraubenrotoren ohne Nachbearbeitung [5]. MoS₂ ist einer der am häufigsten verwendeten Festschmierstoffe und zeigt großes Potential als alternative Lösung zu konventionellen flüssigen Schmierstoffen [3]. MoS₂ ist durch einen lamellenartigen Aufbau



Moderne Vakuumbeschichtungsverfahren stellen die Schlüsseltechnologie zur Synthetisierung von MoS₂-Dünnschichten auf Schraubenrotoren dar. Die Beschichtung erfolgt endkonturnahe, erfordert keine Nachbearbeitung und liefert optimale Reib- und Verschleißseigenschaften.

ZUSAMMENFASSUNG

Unsynchronisierte, trockenlaufende Schraubenmaschinen weisen ein großes Potential auf, eine ressourcenschonende Alternative zu konventionellen Bauformen von Schraubenmaschinen zu liefern. Durch die Einsparung eines Synchronisationsgetriebes und den Verzicht auf ein flüssiges Schmiermittel ergeben sich ökonomische und ökologische Vorteile, da der Material- und Energieeinsatz reduziert werden. Die Reinheit des Prozessgases wird erhöht und die Umweltbelastung wird somit minimiert. Vakuumbeschichtungsverfahren stellen eine der Schlüsseltechnologien zur Realisierung einer

unsynchronisierten, trockenlaufenden Schraubenmaschine dar. Durch die endkonturnahe Beschichtung und die Möglichkeit, die strukturellen Eigenschaften der Beschichtung gezielt zu verändern, lassen sich die Dünnschichten optimal konditionieren. Durch den Einsatz von MoS₂-Dünnschichten als Vertreter der Festschmierstoffe können die Reibeeigenschaften der Schraubenmaschinen verbessert werden, sodass auch an dieser Stelle ein großes Potential vorliegt, die Reibung und somit den Energieeinsatz zu reduzieren.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

charakterisiert, wodurch ein einfaches Abgleiten der einzelnen Scherebenen ermöglicht wird, was wiederum zu einer niedrigen Reibung führt [4]. Laboruntersuchungen mit MoS_2 beschichteten Rundproben zeigten bereits eine deutliche Reduzierung in Ball-on-Disk Versuchen. Das Verhalten von MoS_2 -Dünnschichten auf Schraubenrotoren ist jedoch noch gänzlich unbekannt und stellt insbesondere eine Herausforderung in Bezug auf die Konditionierung des Gleitwälzkontaktes zwischen den Schraubenrotoren hinsichtlich einer langen Lebensdauer dar. Im Weiteren werden erste Ergebnisse zum Einfluss von MoS_2 -Dünnschichten auf das Einsatzverhalten von unsynchronisierten, trockenlaufenden Schraubenrotoren vorgestellt und das Potential der Beschichtung als umweltfreundliche Alternative zu konventionellen Schmierölen vorläufig evaluiert.

Versuchsaufbau und Durchführung

Um das Einsatzverhalten von MoS_2 -Beschichtungen in einer trockenlaufenden, unsynchronisierten Schraubenmaschine zu evaluieren und die realen mechanischen Belastungen im Rotorkontakt nachzubilden, wird der in Abb. 1 gezeigte Versuchsaufbau verwendet. Bei diesem wird ein modifiziertes Schraubenrotorgehäuse eingesetzt, welches zur Umgebung geöffnet ist, sodass keine innere Verdichtung stattfindet. Zur kontrollierten Einstellung der Kontaktbelastung wird einerseits ein Servomotor als drehzahl geregelter Antrieb am Hauptrotorstrang benutzt. Andererseits wird der Nebenrotor über

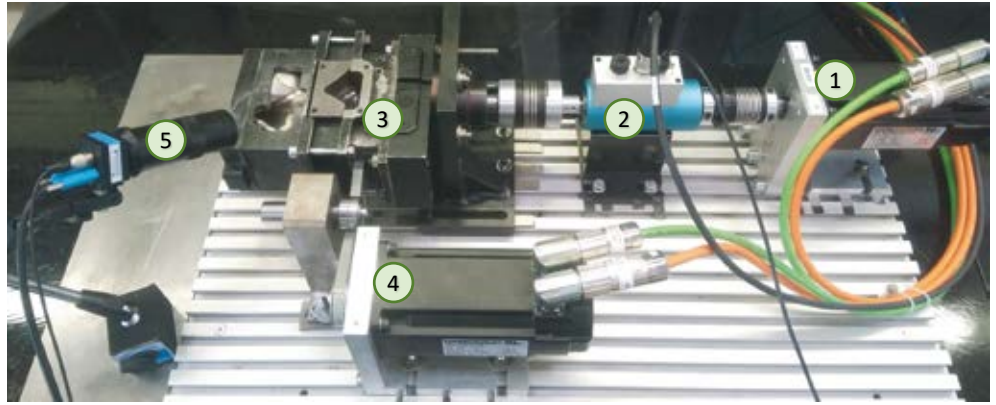


ABBILDUNG 1: Versuchsaufbau: 1 Motor, 2 Drehmomentmesswelle, 3 modifiziertes Schraubenmaschinengehäuse, 4 Bremse, 5 Kamera

einen Zahnriemen mit einem zweiten Servomotor verbunden, sodass ein drehzahlunabhängiges Bremsmoment aufgeprägt werden kann. Durch die präzise Regelung der Drehzahl und des Bremsmoments lassen sich die Gleitgeschwindigkeit und die Kontaktkraft zwischen den Schraubenrotoren genau einstellen.

Neben dem Drehmoment am Hauptrotorstrang wird über ein Kamerasystem mit Mikroskopobjektiv die zeitliche Entwicklung des Rotorkontakts am Nebenrotorzahnkopf optisch überwacht. In Abb. 2 ist die zur Umgebung geöffnete Schraubenmaschine und die Ausrichtung der Kamera dargestellt. Die Kamera wird über ein Triggersignal der Drehmomentmesswelle hardwareseitig mit der Rotordrehung gekoppelt, sodass im laufenden Betrieb der Rotoreingriff optisch über Momentaufnahmen erfasst werden kann. Der Nebenrotorzahnkopf wird über eine flimmerfreie 50 W PowerLED beleuchtet, wodurch eine Belichtungs-



ABBILDUNG 2: Modifiziertes Schraubenmaschinengehäuse und Kameraperspektive

zeit der Kamera von $50 \mu\text{s}$ ermöglicht wird.

Die untersuchten Schraubenrotoren basieren auf einem asymmetrischen Schraubenrotorprofil [1], welches für den trockenlaufenden Einsatz in einer unsynchronisierten Schraubenmaschine angepasst wurde. Das spielfreie Rotorprofil wurde dafür flächennormal zurückgezogen. Lediglich im Bereich des Wälzpunkts wurde das originale Rotorprofil am Haupt- und Nebenrotor beibehalten, sodass entsprechend Abb. 3 ein definierter Kontakt zwischen den Rotoren erfolgt.

Für die mechanische Betrachtung kann durch diese Modifikation von einer punktuellen Berührung der beiden Rotoroberflächen ausgegangen werden. Die Kontaktspannungen, die Einfederung und die Kontaktfläche lassen sich über die Formeln der Hertz'schen Pressung für zwei gekrümmte, sich berührende Körper berechnen [2].

Durch die Beschränkung des Eingriffs auf den Bereich des Wälzpunkts kann sichergestellt werden, dass keine

SUMMARY

MoS_2 thin films for unsynchronized, dry-running screw machines

Unsynchronized, dry-running screw machines have great potential to provide a resource-saving alternative to conventional screw machine designs. By saving external synchronization and the absence of a liquid lubricant, there are economic and ecological advantages. The use of materials and energy are reduced and the purity of the process gas is increased, the impact on the environment is minimized. Vacuum coating processes are

one of the key technologies for realizing an unsynchronized, dry-running screw machine. The synthesized thin films can be optimally conditioned thanks to the near-net-shape coating and the possibility of changing the structural properties of the coating in a targeted manner. MoS_2 thin films as solid lubricant exhibit improved friction properties. As a result there is also a great potential to reduce friction and thus the use of energy.

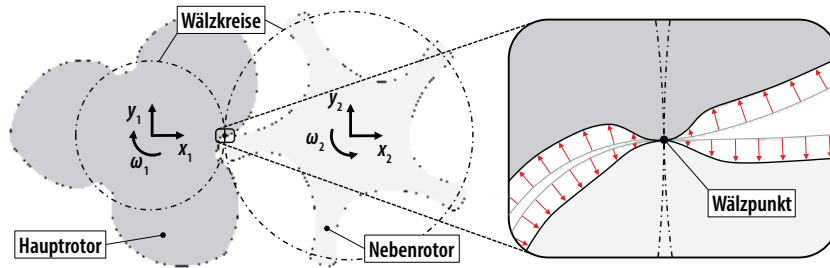


ABBILDUNG 3: Asymmetrisches Schraubenrotorprofil und Modifizierung des Eingriffsbereichs.

	Hauptrotor	Nebenrotor
Zähnezahl	3	5
Rotorlänge	100 mm	
Achsabstand	51,229 mm	
Rotorsteigung	180 mm	-300 mm
Drehmoment	Messwert	≈ 2,3 Nm
Drehzahl	825 min ⁻¹	495 min ⁻¹
Kontaktkraft	72 N	
Kontaktspannung	1,9 GPa	
max. Gleitgeschwindigkeit	≈ 1,0 m s ⁻¹	

TABELLE 1: Parameter der Schraubenrotoren, Betriebspunkt und Kontaktbelastung des Anwendungsversuchs.

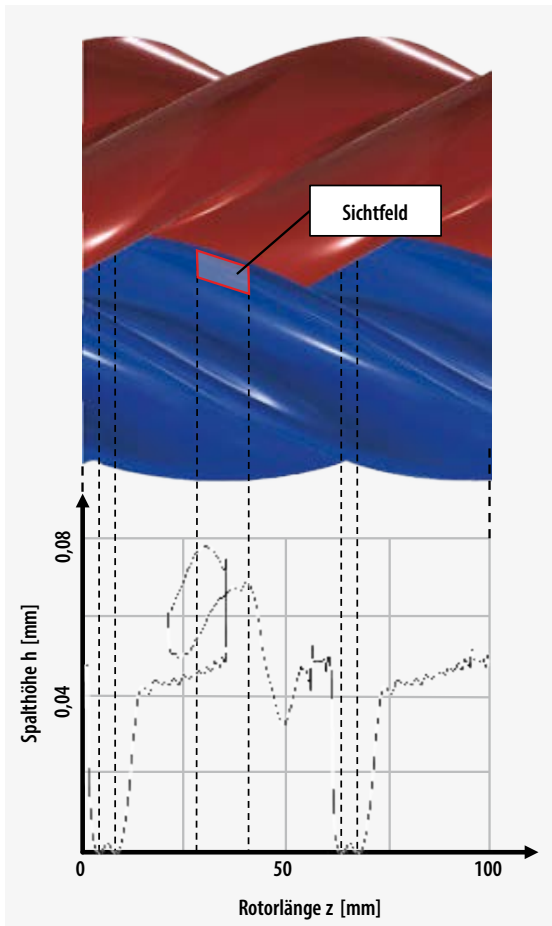


ABBILDUNG 4: Höhe des Profileingriffspalts und Sichtfeld der Kamera.

hohen Gleitgeschwindigkeiten vorliegen, da diese proportional zum Abstand zwischen Kontakt- und Wälzpunkt sind und sich im Wälzpunkt somit zu Null ergeben [1]. Durch die elastische Deformation des Eingriffsbereichs bildet sich entsprechend der Theorie nach Hertz eine Kontaktfläche um den Kontaktpunkt aus. Auf dieser Kontaktfläche ergeben sich Gleitgeschwindigkeiten, die mit steigendem Abstand zum Wälzpunkt zunehmen [2].

In Tab. 1 sind geometrischen Daten des untersuchten Schraubenrotorpaars, der Betriebspunkt und die resultierenden Kontaktbelastungen des Anwendungsversuchs aufgeführt. Das Rotorprofil weist eine Überdeckung der Verzahnung von 1,8 auf. Dementsprechend liegen in den meisten Rotorstellungen zwei potentielle Eingriffspunkte vor. In Abb. 4 ist der Spalthöhenverlauf entlang des Profileingriffspalts und ein Modell des untersuchten Schraubenrotorpaars dargestellt. Durch das flächennormale Zurückziehen der Rotoroberflächen ergibt sich über weite Bereiche eine Spalthöhe von über 0,04 mm zwischen den Rotoren. Die Bereiche mit verschwindender Spalthöhe entsprechen den potenziellen Eingriffspunkten, die sich durch die Rotation der Rotoren entlang der Rotorachse verschieben. Während global zwei Eingriffsbereiche vorliegen, bilden sich profilbedingt lokal zwei dicht beieinanderliegende Eingriffspunkte in einem Abstand von 5 mm aus. Das Kamerasystem wurde so installiert, dass das Sichtfeld den Bereich abdeckt, in dem der Übergang von zwei potentiellen zu einem Kontaktpunkt stattfindet. Zwischen dem Rotorkontakt und der getriggerten Aufnahme des Kontaktbereichs liegt eine Drehung des Nebenrotors von 40° vor.

Bei den Einsatzversuchen wurden zwei Rotorpaare aus 16MnCr5 untersucht, welche in Abb. 5 dargestellt sind.

Dabei handelt es sich einerseits um ein unbeschichtetes Rotorpaar, welches als Referenz dient, und andererseits um eine Paarung, bei welcher der Nebenrotor mit MoS₂ beschichtet ist. Die Herstellung der MoS₂-Dünnschicht erfolgte in einer industriellen Beschichtungsanlage Typ CC800/9 Custom (Fa. CemeCon, Deutschland). Vor dem Beschichtungsprozess erfolgte eine Sequenz aus Plasmaätzen und Heizen, um die Oberfläche von Verunreinigungen zu entfernen. Zur Schichtsynthese wurden zwei MoS₂-Targets im HiPIMS Modus verwendet, welche mit einer durchschnittlichen Targetleistung von 3 kW angesteuert wurden. Als Parameter wurden eine Bias-Spannung von -100 V, ein Argondruck von 400 mPa sowie eine Heizleistung von 1 kW angelegt. Als HiPIMS-Parameter wurde eine Pulsdauer von 200 µs und eine Pulsfrequenz von 1 kHz verwendet [6].

Durch mehrfaches Ein- und Ausbauen und Vermessen des unbeschichteten Rotorpaars, wurde der Einfluss von Montageabweichungen charakterisiert. Die Dauer des Anwendungsversuchs betrug für beide Rotorpaare 45 Minuten, wobei die Hauptrotordrehzahl von 825 min⁻¹ und das Bremsmoment am Nebenrotor von ungefähr 2,3 Nm konstant gehalten wurden.

Ergebnisse der Einsatzversuche

Für die Charakterisierung und den Vergleich des Kontaktbereichs des unbeschichteten und des beschichteten Rotorpaars im Einsatzversuch wurden über die Laufzeit des Versuchs die Nebenrotorzahnköpfe über das Kamerasystem bei jeder Umdrehung optisch erfasst. In Abb. 6 ist die Entwicklung des Materialabtrags eines Zahns des unbeschichteten Rotorpaars im Vergleich zu einem Zahnkopf des beschichteten Nebenrotors dargestellt. Durch die Fertigung und Montage der Rotoren sind bereits zu Beginn des Versuchs bei beiden Rotorpaaren leichte Schleif-/Eingriffsspuren vorhanden. Mit zunehmender Anzahl an Kontakten bilden sich bei beiden Rotorpaaren zwei parallel verlaufende Eingriffslinien aus. Dies ist auf die Eingriffssituation entsprechend Abb. 4 zurückzuführen, wobei sich die beiden lokalen Eingriffspunkte dicht unterhalb und oberhalb des Wälz-

kreises ausbilden. Insbesondere bei der unteren Eingriffslinie ist eine zunehmende Schwarzfärbung beider Rotorpaare zu erkennen. Unter Tageslicht betrachtet zeigt dieser Bereich eine braune Färbung (vgl. Abb. 2), was auf eine Oxidation des Grundkörpers und die Bildung von Eisenoxid aufgrund der Kontakttemperaturen von über 400 °C im Eingriffsbereich hindeutet [7]. Die oberen Eingriffslinien zeigen bei beiden Rotorpaaren, trotz der gleichen theoretischen Belastung, bis zum Ende des Versuchs keine signifikanten Oxidationsspuren, sodass hier insgesamt eine geringere Belastung als auf der unteren Eingriffslinie abgeleitet werden kann. Diese ungleichmäßige Belastung deutet auf eine Fertigungstoleranz des Rotorprofils hin. Besonders bei dem unbeschichteten Rotorpaar bildet sich ab 4200 Kontakten eine Tribospur auf der unteren Eingriffslinie im rechten Bereich des Sichtfelds aus. Das Ende der Tribospur korreliert mit der Überdeckung des Rotorprofils, sodass an dieser Stelle ein weiteres Zahnepaar in den Eingriff kommt und die Belastung des bestehenden Eingriffs reduziert wird. Gegenüber dem unbeschichteten Nebenrotor bildet sich die obere Eingriffslinie am beschichteten Nebenrotorzahnkopf deutlicher aus, wobei die Änderung der Eingriffsbreite ab ca. 4200 Kontakten in einen stationären Zustand übergeht. Zwischen dem Abtrag der Beschichtung und dem des Grundwerkstoffs kann auf Basis der optischen Auswertung nicht unterschieden werden. Die Entwicklung der oberen Eingriffslinie deutet jedoch auf einen Übertrag von Material auf den unbeschichteten Hauptrotor hin. Dieser Effekt wurde ebenfalls bei Ball-on-Disk Versuchen festgestellt. Dabei führt der Transfer des abgelösten Beschichtungsmaterials zum Gegenkörper zu einer

Trennung von Grund- und Gegenkörper, einer dezentralen Zuführung des Beschichtungsmaterials und daraus resultierend zu einer Reduzierung der Reibung [6]. Ab 4200 Kontakten sind die Transfermechanismen zwischen den Rotorzähnen demnach in einem ausgeglicheneren Zustand.

In Abb. 7 ist die Entwicklung des Materialabtrags der fünf Zähne des beschichteten Nebenrotors dargestellt. Der Vergleich der Zähne zeigt, dass sich der Materialabtrag zu Beginn des Anwendungsversuchs inhomogen entwickelt. Dies führt zu dem Schluss, dass fertigungsbedingte Profilabweichungen zu einer ungleichmäßigen Belastung der Rotorzähne während der Einlaufphase führen. Durch weitere Kontakte der Rotorzähne homogenisiert sich das Eingriffsbild. Profilabweichungen von Schraubenrotoren liegen typischerweise im Bereich von Hundertsteln Millimetern. Demgegenüber liegt die Dicke der untersuchten MoS₂-Beschichtung bei 3 µm, sodass eine Homogenisierung des Eingriffsbildes nicht allein durch den Transfer von Beschichtungsmaterial erfolgen kann. Dies ist ein Indikator dafür, dass bei den Transferprozessen während der Einlaufphase sowohl Beschichtungs- als auch Grundkörpermaterial zwischen den Rotorzähnen übertragen wird.

Während des Anwendungsversuchs wurde das Nebenrotordrehmoment bei ungefähr 2,3 Nm konstant gehalten und das Hauptrotordrehmoment gemessen. Durch mehrfaches Ein- und Ausbauen des unbeschichteten Rotorpaares konnte ein Referenzantriebsmoment im Bereich von 1,4627 Nm bis 1,4841 Nm ermittelt werden. Dieser Bereich charakterisiert die montagebedingten Abweichungen beim Einbau der Lager und des Zahnriemens. Die Einlaufphase wurde



ABBILDUNG 5: Verwendete Rotorpaare: I unbeschichtete Rotoren, II Hauptrotor unbeschichtet, Nebenrotor beschichtet.

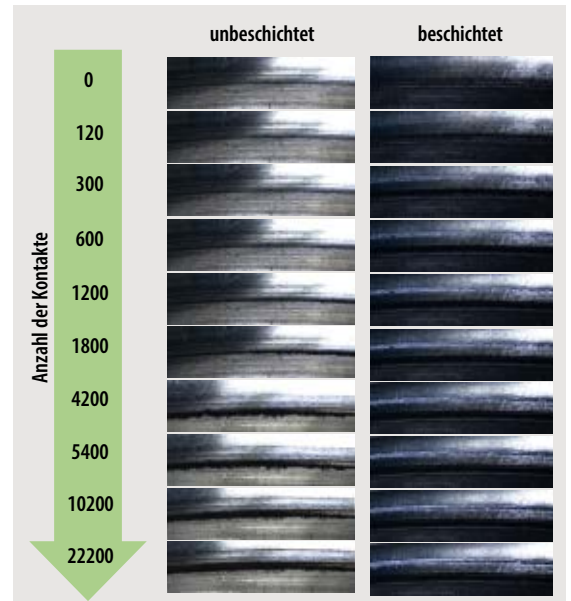


ABBILDUNG 6: Vergleich der Entwicklung des Materialabtrags an einem Zahnkopf des unbeschichteten und des beschichteten Nebenrotors in Abhängigkeit der Kontakte.

bei der Auswertung des Drehmoments nicht betrachtet. Bei dem Rotorpaar mit beschichtetem Nebenrotor wurde ein Antriebsmoment von 1,4231 Nm gemessen. Dieser Wert liegt unterhalb des zuvor ermittelten Referenzbereichs. Im Mittel resultiert aus der Beschichtung des Nebenrotors mit MoS₂ eine Reduktion des Antriebsdrehmoments von 3,4 %. Durch die Drehmomentmesswelle am Hauptrotorstrang wer-

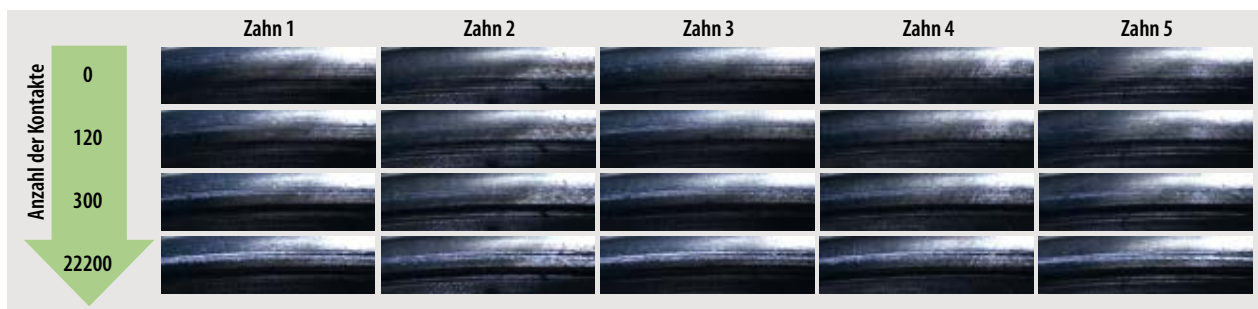


ABBILDUNG 7: Vergleich der Verschleißentwicklung zwischen den Zahnköpfen am beschichteten Nebenrotor.

den neben dem Reibmoment zwischen den Rotoren auch die Lager- und Riemenschleifung sowie das Bremsmoment erfasst. Eine isolierte, quantitative Bewertung des Reibmoments im Rotor-eingriff kann mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht erfolgen. Die Reduktion des gesamten Antriebsmoments durch die MoS₂-Beschichtung lässt aber auf eine vielfache Reduktion des Reibmoments zwischen den Rotoren schließen. Insgesamt kann somit aus der MoS₂-Beschichtung des Nebenrotors eine signifikante Verbesserung der Reibeigenschaften erzielt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen wurden das tribologische Verhalten von MoS₂-Dünnschichten in Einsatzversuchen unter realen Betriebsbedingungen auf Schraubenrotoren analysiert. Wie bei den Laborversuchen am Tribometer ist die Reibungsreduzierung im Anwendungsversuch auf die dynamischen Effekte des Schichtmaterials während der tribologischen Belastung zurückzuführen. Das abgelöste Schichtmaterial zirkuliert im Kontaktbereich und wird zur Oberfläche des Gegenkörpers transferiert, was zu einer ausreichenden Zufuhr von Schichtmaterial führt. In der Einlaufphase liegen eine inhomogene Belastung und ein instationärer Ausgleichsprozess des transferierten Schichtmaterials zwischen den

Rotorzähne vor, welche auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen sind. Die Einlaufphase geht nach ca. 4200 Kontakten in eine stationäre Phase über, sodass der Transfer von Schichtmaterial zwischen den Rotorzähnen einen ausgeglichenen Zustand erreicht. Durch die Überdeckung des Schraubenrotorpaars ist zudem die Belastung in Richtung der Rotorachsen nicht gleichmäßig verteilt, sodass Rotorbereiche ohne Profilüberdeckung durch eine höhere Belastung einen größeren Verschleiß aufweisen. Dieser Belastungsunterschied zeigt sich bei den beiden untersuchten Schraubenrotorpaaren in ungleichen Maßen, sodass an dieser Stelle die Fertigungstoleranzen ebenfalls eine maßgebliche Rolle spielen.

Zur isolierten Betrachtung der Reibeigenschaften der MoS₂-Beschichtung im Kontakt eines Schraubenrotorpaars ist eine Modifizierung des Prüfstands notwendig. Durch den Einsatz eines aerostatischen Lagersystems und den Umbau auf ein riemenfreies Bremskonzept lässt sich die Anzahl an reibungs- und drehmomentindizierenden Komponenten auf ein Minimum reduzieren. Zudem ist eine quantitative Vermessung der Rotoroberflächen erforderlich, um die Fertigungstoleranzen und die Profilabweichung der Schraubenrotoren zu charakterisieren und den resultierenden Einfluss auf die Kontaktbelastung zu bestimmen.

Danksagung

Die Ergebnisse entstanden im Rahmen des SPP 2074 „Fluidfreie Schmiersysteme mit hoher mechanischer Belastung“. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung und für die Förderung des Projektes.

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] L. Rinder: Schraubenverdichter, Springer-Verlag, 1979.
- [2] M. Utri, D. Aurich, A. Brümmer, A. Wittig, W. Tillmann, H. Moldenhauer, J. Debus: Theoretische Untersuchung der mechanischen Rotorbelastung von unsynchronisierten, trockenlaufenden Schraubenmaschinen. Prozesstechnik & Komponenten, Dr. Harnisch Verlag GmbH, 2019.
- [3] T. W. Scharf, S.V. Prasad: Solid lubricants: A review. Journal of Materials Science **48** (2013) 511-531.
- [4] M. R. Vazirisereshk, A. Martini, D. A. Strubbe, M. Z. Baykara: Solid Lubrication with MoS₂. A Review. Lubricants **7** (2019) 7.
- [5] W. Choi, N. Choudhary, G. Han, J. Park, D. Akinwande, Y. Lee: Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications. Materials Today **20** (2017) 116-130.
- [6] W. Tillmann, A. Wittig, D. Stangier, H. Moldenhauer, C.-A. Thomann, J. Debus, D. Aurich, A. Brümmer: Influence of the bias-voltage, the argon pressure and the heating power on the structure and the tribological properties of HiPIMS sputtered MoS₂ films. Surface and Coatings Technology (2020) 125358.
- [7] H. Moldenhauer, M. Bayer, J. Debus, A. Nikolov, A. Brümmer: Raman scattering study of micrometer-sized spots of magnetite and hematite formed at 18CrNiMo7-6 screw rotor surfaces due to liquid-free, unsynchronized operation. International Conference on Screw Machines 2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **425** (2018).

AUTOREN

Daniel Aurich, M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fluidtechnik der TU Dortmund und erforscht den hochbelasteten und unsynchronisierten Betrieb trockenlaufender Schraubenmaschinen.



Alexandra Wittig, M.Sc.

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund, und erforscht Zusammenhänge zwischen Synthesebedingungen und Struktureigenschaften von MoS₂ Dünnschichten sowie deren tribologisches Verhalten.

Dipl.-Ing. Dominic Stangier

ist Abteilungsleiter PVD-Prozesse am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund.

Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Jörg Debus

ist Akademischer Rat in der experimentellen Physik an der TU Dortmund, wo er nanotribologische Fragestellungen mit optisch-spektroskopischen Methoden untersucht.

Carl Arne Thomann, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand in der experimentellen Physik der TU Dortmund. Er untersucht nanoskalige Wechselwirkungen zwischen Substrat, Schmierstoff und Umgebung im Reibkontakt.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing Wolfgang Tillmann

ist seit 2002 Leiter des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie an der TU Dortmund und untersucht grundlagenbasierte Fragestellungen der Beschichtungs- und Fügetechnik sowie produktionstechnische Themen.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer

ist seit 2006 Leiter des Fachgebietes Fluidtechnik der TU Dortmund, an dem seit über 45-Jahren die Erforschung der Schraubenmaschine in verschiedenen Ausführungen im Fokus steht.

Daniel Aurich, M. Sc., Fachgebiet Fluidtechnik, Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Dortmund, Leonard-Euler-Str. 5, 44227 Dortmund, E-Mail: daniel.aurich@tu-dortmund.de