

Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 440

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Vierneusel,
Haßfurt

Verschleiß- und feuchteresistente MoS₂- Festschmierstoffschichten für den Gleit- und Wälzkontakt

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Verschleiß- und feuchteresistente MoS₂-Festschmierstoffschichten für den Gleit- und Wälzkontakt

Herstellung, Charakterisierung, technische Anwendung

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von
Bernd Vierneusel
aus Haßfurt

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 06. März 2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Prof. Dr. rer. nat. Mathias Göken

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Vierneusel,
Haßfurt

Nr. 440

Verschleiß- und
feuchteresistente MoS₂-
Festschmierstoffschichten
für den Gleit- und Wälz-
kontakt

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Vierneusel, Bernd

Verschleiß- und feuchteresistente MoS₂-Festschmierstoffschichten für den Gleit- und Wälzkontakt

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 440. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

220 Seiten, 90 Bilder, 21 Tabellen.

ISBN 978-3-18-344001-6, ISSN 0178-949X,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

Für die Dokumentation: Dünnschichttechnologie – Festschmierstoff – Verschleißfestigkeit – Umgebungsbedingungen – Gleit/Wälzlager

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler, die sich mit der Entwicklung trockenlaufender Tribosysteme unter extremen und wechselnden Umgebungsbedingungen befassen. Angetrieben durch das Ziel ein leistungsstarkes, vakuumfähiges und zugleich feuchteresistentes Dünnschichtsystem bereitzustellen, befasst sich die Arbeit mit der inneren Beschaffenheit von Molybdändisulfid-(MoS₂) Schichten, welche als Bindeglied zwischen dem Herstellungsprozess und den gewünschten Schichteigenschaften systematisch untersucht und weiterentwickelt wurde. Eine ausführliche Werkstoffcharakterisierung verschiedener Schichtmodifikationen sowie deren tribologische Validierung in der realen Anwendung von Axial-Rillenkugellagern dienen dazu, Aufbau und Verhalten von MoS₂-Schichtsystemen besser nachvollziehen und beurteilen zu können. Darüber hinaus können die experimentell gewonnenen Erkenntnisse in Verbindung mit der erarbeiteten Simulation des Zerstäubungs- und Transportprozesses von Beschichtungsteilchen als Grundlage zur zielgerichteten Herstellung verschleißfester MoS₂-Schichten dienen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 29

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-344001-6

Danksagung

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Die wesentliche Grundlage dazu lieferte das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt „Optimierung des tribologischen Verhaltens von Molybdändisulfid-PVD-Schichten im Hinblick auf wechselnde Umgebungsbedingungen“. Dieses wurde gemeinsam mit der Abteilung Materialschutz und Oberflächentechnik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sowie dem Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin durchgeführt.

Für das erfolgreiche Abschließen meiner Promotion haben viele Personen beigetragen, denen ich hiermit herzlich danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack für die Möglichkeit, diese Arbeit unter seiner Leitung durchführen zu können. Ich bedanke mich besonders für das entgegengebrachte Vertrauen, die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, viele wertvolle Anregungen und stete Hilfsbereitschaft.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Mathias Göken, Inhaber des Lehrstuhls für allgemeine Werkstoffeigenschaften, bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates. Die Unterstützung seines Lehrstuhls hat wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Mein herzlicher Dank gilt an dieser Stelle Frau Lisa Benker und Herrn Dr. Benoit Merle für die zeitintensiven Eigenspannungsanalysen und die wertvollen fachlichen Diskussionen.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Peter Felfer für seinen Einsatz als fachfremder Prüfer sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die ermutigenden persönlichen Gespräche.

Herrn Dr. Stephan Tremmel, Leiter der Abteilung Maschinenelemente des KTmfk, danke ich für die hervorragende fachliche Betreuung meiner Forschungsarbeit, seine ständige Diskussions- und Hilfsbereitschaft und die inhaltliche Prüfung des Manuskripts.

Für die ausgezeichnete Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsprojekt danke ich Mitarbeitern der BAM, insbesondere Herrn Dr. Thomas Gradt und Herrn Dr. Thomas Schneider. Herrn Dr.-Ing. Werner Österle und Frau Dr. Ilona Dörfel danke ich für die dort ausgeführten mikroskopischen Untersuchungen sowie Herrn Matthias Heidrich und Herrn Olaf Berndes für die Durchführung der tribologischen Prüfungen im Vakuum.

Herrn Prof. Dr. Rainer Hock vom Lehrstuhl für Kristallographie und Strukturphysik der FAU danke ich für die röntgenographischen Analysen und die wichtigen fachlichen Anregungen.

Danken möchte ich zudem allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, die mich in meiner Zeit am KTMfk begleitet haben und für eine hervorragende Arbeitsatmosphäre sorgten. Allen Studentinnen und Studenten, die als Hilfskraft oder im Rahmen einer Abschlussarbeit zur Arbeit beitrugen, möchte ich ebenfalls herzlich danken.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meiner Frau Simone, die mir bei der Entstehung der Arbeit viel Rückhalt gab, motivierte und unterstützte.

Zu guter Letzt danke ich meiner Cousine Stefanie Beck für das ausführliche Lektorat des Manuskripts.

Rügheim, 2017

Bernd Vierneusel

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Chemische Elementsymbole und Summenformeln	X
Einheiten und Einheitenpräfixe	XI
Formelzeichen	XI
Kurzfassung	XV
Abstract	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Defizite in der aktuellen Forschung, abgeleiteter Handlungsbedarf und Lösungsweg	3
1.3 Vorüberlegungen zur methodischen Schichtentwicklung	6
2 Grundlagen der Tribologie	9
2.1 Das tribologische System	10
2.2 Tribologische Mess- und Prüftechnik	11
2.3 Kontaktkinematik und -beanspruchung	12
2.4 Reibung.....	14
2.5 Verschleiß	16
2.6 Zusammenhang von Reibung und Verschleiß	17
3 Feststoffgeschmierte Wälzlagerungen	19
3.1 Gebrauchsdauerberechnung	19
3.2 Beanspruchung und Kinematik im Axial-Rillenkugellager	20
4 Dünne tribologische Schichten	23
4.1 Schichtstruktur	24
4.2 Verschleiß dünner Schichten	25
4.2.1 Verschleißbildung durch Ausbreitung von Mikrorissen	25
4.2.2 Beanspruchung eines Schicht-Substrat-Systems.....	27
4.2.3 Beanspruchbarkeit eines Schicht-Substrat-Systems	30

5	PVD-Technik.....	32
5.1	Kathodenerstäuben (Sputtern).....	32
5.2	Lichtbogenverdampfen	35
5.3	Schichtbildung und -struktur.....	35
5.3.1	Keimbildung und -wachstum.....	36
5.3.2	Koaleszenz von Inseln	37
5.3.3	Kontinuierliches Schichtwachstum	37
5.3.4	Ausbildung kristallographischer Vorzugsorientierungen	41
5.3.5	Entstehung von Eigenspannungen.....	43
6	Molybdändisulfid und dessen Eignung als Festschmierstoff	47
6.1	Kristallstruktur	47
6.2	Extrinsische Einflüsse auf das tribologische Verhalten dünner MoS ₂ -Schichten.....	48
6.3	Intrinsische Einflüsse auf das tribologische Verhalten dünner MoS ₂ -Schichten.....	51
6.3.1	Schichtstruktur und kristallographische Orientierung	51
6.3.2	Stöchiometrie.....	54
6.3.3	Fremdelemente	55
6.3.4	Eigenspannungen.....	57
6.4	Tribologisches Verhalten im Gleitkontakt.....	58
6.5	Tribologisches Verhalten im Wälzkontakt	61
7	Analyse des Sputter- und Transportprozesses mittels Monte-Carlo-Simulation	64
7.1	Überblick und Zielsetzung der Untersuchungen.....	64
7.2	Simulationsverfahren und -modell.....	65
7.3	Der Einfluss der Kathodenspannung auf die Energieverteilung gesputterter Partikel	69
7.4	Der Einfluss des Prozessdrucks auf den Impuls des Teilchenstroms	70
7.5	Der Einfluss der Kathodenspannung auf den Impuls des Teilchenstroms	72
7.6	Der Einfluss des Target-Substrat-Abstands auf die Winkelverteilung gesputterter Partikel	73
7.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die experimentellen Arbeiten... 75	
8	Substratvorbereitung, Schichtherstellung und -charakterisierung	77
8.1	Substratwerkstoffe	77
8.2	Schichtherstellung.....	79
8.3	Schichtdickenmessung.....	80
8.4	Topographische Untersuchungen.....	81
8.5	Strukturelle Charakterisierung.....	81
8.5.1	Röntgenographische Untersuchungen (XRD).....	81

8.5.2	Elektronenmikroskopische Untersuchungen (REM, TEM).....	83
8.6	Mechanische Charakterisierung	84
8.6.1	Instrumentierte Eindringprüfung.....	84
8.6.2	Eigen Spannungsmessung.....	86
8.6.3	Haftungsuntersuchungen.....	88
8.7	Tribologische Untersuchungen.....	88
8.7.1	Modellversuche unter Gleitbewegung	88
8.7.2	Bauteilversuche unter Wälzbedingungen.....	91
9	Entwicklung nicht-dotierter Molybdändisulfid-Schichtvarianten	94
9.1	Überblick und Zielsetzung der Untersuchungen	94
9.2	Versuchsplanung und Auswertung.....	95
9.2.1	Versuchsplanung.....	95
9.2.2	Überblick eingesetzter statistischer Methoden zur Datenauswertung	97
9.3	Tribologisches Verhalten.....	101
9.4	Mechanische Eigenschaften	108
9.4.1	Überblick.....	108
9.4.2	Einfluss mechanischer Eigenschaften auf das tribologische Verhalten	111
9.5	Strukturell-chemische Merkmale	112
9.5.1	Überblick.....	112
9.5.2	Einfluss der Schichtmerkmale auf die mechanischen Eigenschaften	120
9.5.3	Einfluss der Merkmale auf das tribologische Verhalten.....	124
9.6	Herstellungsbedingungen	128
9.7	Erweiterte Untersuchung des Einflusses von Eigen Spannungen auf die Leistungsfähigkeit nicht-dotierter MoS ₂ -Schichten	133
9.8	Zusammenfassung	140
10	Entwicklung dotierter Molybdändisulfid-Schichtvarianten	144
10.1	Überblick und Zielsetzung der Untersuchungen	144
10.2	Versuchsumfang und Auswertung	144
10.3	Tribologisches Verhalten.....	145
10.4	Mechanische Eigenschaften und Einflüsse auf das tribologische Verhalten	148
10.5	Strukturell-chemische Merkmale und Einflüsse auf mechanische Eigenschaften und das tribologische Verhalten	149
10.6	Zusammenfassung	152
11	Studie zur Wälzbeständigkeit der entwickelten Beschichtungen	154
11.1	Überblick und Zielsetzung der Untersuchungen	154
11.2	Versuchsumfang und Auswertung	154
11.3	Tribologisches Verhalten.....	155

11.4	Mechanische Eigenschaften und Einflüsse auf das tribologische Verhalten.....	160
11.5	Strukturell-chemische Merkmale und Einflüsse auf mechanische Eigenschaften und das tribologische Verhalten.....	161
11.6	Zusammenfassung.....	162
12	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
13	Anhang.....	167
	Literaturverzeichnis.....	179

Abkürzungsverzeichnis

a-C	Amorpher Kohlenstoff
AFM	Atomic force microscope
ASTM	American Society for Testing and Materials
a. u.	Arbitrary unit (willkürliche/unskalierte Einheit)
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BP	Bipolar gepulst
C1	Lichtbogenkathode C1
C3	Lichtbogenkathode C2
C4	Sputterkathode
CCD	Central composite design
CPM	Characteristics-properties modelling
CVD	Chemical vapor deposition
DIC	Digital image correlation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond-like carbon
E1...E3	Eigenschaft 1 bis 3
EDX	Energiedispersive Röntgenanalyse
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
FIB	Focused ion beam
H1... H4	Herstellungseinfluss 1 bis 4
HR-TEM	High resolution-TEM
K	Käfig
LB	Laufbahn
LSM	Laser scanning microscope
M	Modus
Me	Metallisches Element
M1...M3	Merkmal 1 bis 3
n. v.	Nicht vorhanden
N/A	Nicht angegeben
NASA	National aeronautics and space administration
PACVD	Plasma-assisted chemical vapor deposition
PE	Polyethylen
PI	Polyimid
PSPP	Processing, structure, properties and performance
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	Physical vapor deposition
REM	Rasterelektronenmikroskop
rF	Relative Feuchte
RKL	Rillenkugellager
RT	Raumtemperatur

SAED	Selected area electron diffraction
SRIM	Stopping and range of ions in matter
ta-C	Tetraedrisch-amorpher Kohlenstoff
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TS	Technische Spezifikation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
V1...V4	Verhalten 1 bis 4
WK	Wälzkörper
XFEM	Extended finite element method
XRD	X-ray diffraction

Chemische Elementsymbole und Summenformeln

2H-MoS ₂	Hexagonales Molybdädisulfid
3R-MoS ₂	Rhomboedrisches Molybdädisulfid
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
Ar	Argon
BN	Bornitrid
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Fe ₂ W ₃ C	Eisen-Wolfram-Carbid
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Mo ₂ O ₃	Molybdän(III)-oxid
MoO ₂	Molybdändioxid
MoO ₃	Molybdäntrioxid
MoS ₂	Molybdädisulfid
Ni	Nickel
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silicium
SiC	Siliziumkarbid
SO	Schwefelmonoxid
SO ₂	Schwefeldioxid
Ti	Titan
TiB ₂	Titandiborid
TiN	Titannitrid
TiO ₂	Titandioxid
TiS ₂	Titandisulfid

V	Vanadium
W	Wolfram
WC	Wolframkarbid
WS ₂	Wolframdisulfid

Einheiten und Einheitenpräfixe

°	Grad
°C	Grad Celsius
A	Ampere
Å	Angström (1 Å = 10 ⁻¹⁰ m)
eV	Elektronenvolt (1 eV ≈ 1,6 · 10 ⁻¹⁹ J)
g	Gramm
Hz	Hertz
J	Joule
K	Kelvin
m	Meter
N	Newton
Pa	Pascal
s	Sekunde
u	Atomare Masseneinheit (1 u ≈ 1,67 · 10 ⁻²⁷ kg)
V	Volt
W	Watt
G	Giga (10 ⁹)
M	Mega (10 ⁶)
k	Kilo (10 ³)
d	Dezi (10 ⁻¹)
c	Centi (10 ⁻²)
m	Milli (10 ⁻³)
μ	Mikro (10 ⁻⁶)
n	Nano (10 ⁻⁹)
p	Piko (10 ⁻¹²)

Formelzeichen

<i>a</i>	Risslänge
<i>A</i>	Fläche
<i>b</i>	Halbmesser der Kontaktfläche
<i>d</i>	Durchmesser
<i>d</i> _{außen}	Außendurchmesser
<i>d</i> _c	Kritische Ritzspurbreite
<i>d</i> _{innen}	Innendurchmesser

E	Elastizitätsmodul
E	Teilchenenergie
e	Volumendehnung (Summe der Dehnungen in alle drei Raumrichtungen)
E_{Ar}	Argon-Ionenenergie
E_{IT}	Eindringmodul
E_{Mo}	Energie von Molybdänteilchen
E_S	Elastizitätsmodul der Schicht
E_S	Energie von Schwefelteilchen
E_{Su}	Elastizitätsmodul des Substrats
F, F^*	Kraft
F_a	Axialkraft
F_N	Normalkraft
F_R	Reibungskraft
F_Z	Zentripetalkraft
g	Faktor zur Berücksichtigung der Körper- und Rissgeometrie
G	Energiefreisetzungsrate
G_c	Kritische Energiefreisetzungsrate
GD	Gebrauchsdauer
G_I	Energiefreisetzungsrate für den Rissöffnungsmodus I
H	Härte
H_0	Kritische Härte für das Einsetzen der Versetzungsbewegung (Werkstoffkonstante)
H_{IT}	Eindringhärte
K	Spannungsintensitätsfaktor
K	Proportionalitätsfaktor zwischen Volumendehnung e und dem Verhältnis aus der Teilchendichte verzerrter Atome n und der (Gesamt-) Teilchendichte N
k	Verschleißkoeffizient
k	Variable zur Zusammenfassung mehrerer Konstanten (Abschnitt 5.3.5)
k	Erweiterungsfaktor
K_c	Bruchzähigkeit (kritischer Spannungsintensitätsfaktor)
K_H	Korngrenzenwiderstand (Werkstoffkonstante)
K_I	Spannungsintensitätsfaktor für den Rissöffnungsmodus I
K_V	Reibenergie-Verschleiß-Faktor
L_c	Kritische Last
M_K	Kreiselmoment
M_S	Bohrmoment
M_S	Molare Masse der Schichtatome
n	Teilchendichte der von der Verzerrung betroffenen Atome (Atome im Ungleichgewichtszustand)
n	Stichprobenumfang
n	Überrollungen
N	Teilchenzahl
N	Teilchendichte (Atomanzahl pro Volumeneinheit)
N_A	Avogadro-Konstante ($6,022... \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
p	Pressung
p_0	Maximale Hertzsche Pressung
p_{Ar}	Argon-Prozessdruck
Q	Molare Energie (Energie pro Stoffmenge)
q	Elektrische Ladung
r	Weg in radialer Richtung

R^2	Determinationskoeffizient
rF	Relative Luftfeuchtigkeit
r_{Kugel}	Kugeldurchmesser
R_S	Spezifische Gaskonstante
s	Weg
s	Standardabweichung
t	Zeit
T	Temperatur
$t_{\text{krit}}(95\%)$	Kritischer t-Wert für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$
T_M	Schmelztemperatur
t_S	Schichtdicke
T_{Su}	Substrattemperatur
t_{Su}	Dicke des Substrats
v	Geschwindigkeit
v_G	Gleitgeschwindigkeit
V_p	Nutzbare Schmierstoffvolumen
W_{SR}	Summenreibenergie
W_V	Verschleißvolumen
x	Weg in x-Richtung
z	Weg in z-Richtung
μ	Reibungszahl
α	Ausgangs-Berührungswinkel
α	Signifikanzniveau (oder Irrtumswahrscheinlichkeit)
α_0	Betriebs-Berührungswinkel
α_S	Ausdehnungskoeffizient der Schicht
α_{Su}	Ausdehnungskoeffizient des Substrats
β	Winkel des transportierten Teilchens (zur Oberflächennormalen des Targets)
β_0	Winkel des gesputterten Teilchens beim Verlassen des Targets (zur Oberflächennormalen des Targets)
δ	Faktor zur Berücksichtigung der Kohäsionsenergie bei der Eigenspannungsberechnung nach Windischmann (Abschnitt 5.3.5)
ΔT	Temperaturdifferenz
$\Delta\sigma_{\text{th}}$	Änderung thermischer Eigenspannungen
θ	Auftreffwinkel (zur Oberflächennormalen des Targets)
θ	Beugungswinkel
ν	Querdehnzahl
ν_S	Querdehnzahl der Schicht
ν_{Su}	Querdehnzahl des Substrats
π	Kreiszahl ($\pi = 3,1415926\dots$)
ρ	Dichte
ρ_S	Dichte der Schicht
σ	(Normal-)Spannung
σ_0	Eigenspannung
$\sigma_{0^\circ}, \sigma_{45^\circ}, \dots$	Richtungsabhängige Spannung
σ_c	Kritische Spannung
σ_i	Intrinsische Eigenspannungen
σ_I, σ_{II}	Hauptspannung

$\sigma_{i,\text{Druck}}$	Intrinsische Druckeigenstressungen
σ_n	Nennspannung
σ_r	Normalspannung in radialer Richtung
σ_{th}	Thermische Eigenstressungen
σ_v	Vergleichsspannung
σ_x	Normalspannung in x-Richtung
σ_z	Normalspannung in z-Richtung
τ	Schubspannung
τ_{max}	Maximale Schubspannung
Φ	Teilchenfluss(-dichte)
Φ_{Mo}	Teilchenfluss(-dichte) von Molybdanteilchen
Φ_{S}	Teilchenfluss(-dichte) von Schwefelteilchen
ω_B	Winkelgeschwindigkeit des Walkkorpers um die Bohrachse
ω_K	Winkelgeschwindigkeit des Kafigs
ω_R	Winkelgeschwindigkeit des Walkkorpers um die Rollachse
ω_{res}	Resultierende Winkelgeschwindigkeit

Kurzfassung

Der Schlüssel zu leistungsstarken, trockenlaufenden Gleit- und Wälzlagerungen sind innovative Festschmierstoffsysteme. Dünne Schichten aus Molybdändisulfid (MoS_2) kommen zur reibungsarmen Trennung gegeneinander bewegter Kontaktflächen zwar häufig zum Einsatz, allerdings verhalten sie sich äußerst sensibel gegenüber den Umgebungsbedingungen. So ist das tribologische Verhalten von MoS_2 im Vakuum zwar ausgezeichnet, unter der oxidativen Wirkung hoher Feuchtigkeits- und Sauerstoffkonzentrationen in normaler Luft verschleißt es dagegen sehr stark. Dieses bislang unbewältigte Problem führt in Anwendungen, in denen Komponenten über den gesamten Produktlebenszyklus sowohl im Vakuum als auch in Luft betrieben werden, zu erheblichen Herausforderungen bei der funktionssicheren Auslegung. Es gilt dies durch Weiterentwicklung des Werkstoffs zu bewältigen.

Das hieraus abgeleitete Ziel der Arbeit ist ein leistungsstarkes, vakuumfähiges und zugleich feuchteresistentes MoS_2 -Festschmierstoffsystem. Die systematische Prozessanalyse und der daraus abgeleitete Beitrag zum nachhaltigen Systemverständnis des tribologischen Schichtverhaltens und dessen Verknüpfung mit der Mikrostruktur und den Herstellungsbedingungen bilden den wissenschaftlichen Kern der Arbeit. Es wird angestrebt, den Nutzen der so entwickelten Schichten durch Übertrag in eine konkrete technische Anwendung zu bestätigen.

Die Arbeit gliedert sich in einen simulativen und einen experimentellen Teil. Durch eine zweistufige Monte-Carlo-Simulation des Zerstäubungs- und des Transportvorgangs von Beschichtungsteilchen werden im ersten Teil Effekte der Prozessparameter auf die Intensität des schichtbildenden Teilchenstroms analysiert, um damit das Potential verschiedener Parametereinstellungen für das Wachstum verschleißbeständiger MoS_2 -Schichten zu bewerten. Im anschließenden experimentellen Teil erfolgt die Schichtabscheidung durch physikalische Gasphasenabscheidung. Zur Erhöhung der Verschleiß- und Feuchteresistenz wird die Schichtstruktur zum einen durch Prozessparametereinstellungen beim Kathodenzerstäuben und zum anderen durch die Dotierung mit Fremdmetallen modifiziert. Die Validierung erfolgt unter reiner Gleitbewegung im Stift-Scheibe-Modellversuch und unter Wälzbewegung im Bauteilversuch mit Axial-Rillenkugellagern.

Bei den erzeugten Schichten mit der höchsten Verschleißbeständigkeit korrespondieren die Verschleißkoeffizienten in Luft nahezu mit denen im Vakuum. Die hierfür verantwortliche kompakte Mikrostruktur bildet sich unter der verdichtenden Wirkung hoch-energetischer Partikelströme bei der Herstellung. Niedriger Prozessdruck und geringer

Abstand zwischen Beschichtungsquelle und Substrat sind dafür die maßgeblichen Voraussetzungen. Weitere Faktoren für die Leistungsfähigkeit der Schichten sind hohe Druckeigenspannungen, ein geringer Schwefelanteil und ein hohes Verhältnis zwischen der Schichthärte und dem Schicht-Eindringmodul (H/E -Verhältnis). Die Bauteilversuche zeigen, dass die Gebrauchsdauer trockenlaufender Axial-Rillenkugellager mit einer solchen strukturmodifizierten MoS_2 -Schicht die bislang aus der Literatur bekannten Werte bei vergleichbaren Randbedingungen deutlich übersteigt.

Insgesamt konnte zum einen das angestrebte Ziel einer leistungsfähigen, verschleiß- und feuchteresistenten MoS_2 -Schicht umgesetzt werden. Zum anderen ermöglicht das in der Arbeit geschaffene Systemverständnis des Herstellungsprozesses zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten eine systematische und zielgerichtete Synthese dieser Schichten.

Abstract

The key to high-performance dry-running sliding and rolling bearings are innovative solid lubricants. Although thin solid lubricant coatings of molybdenum disulfide (MoS_2) are often employed to ensure low friction between moving surfaces, their performance is very sensitive to varying environmental conditions. While MoS_2 provides outstanding tribological performance in vacuum, the wear of MoS_2 in air is extremely high. Therefore it is difficult to achieve the functionality of mechanical components which are exposed to both environmental conditions throughout the entire product lifecycle. As a consequence, there is a substantial need for the further development of this material.

The derived objective of this work is a powerful vacuum-capable and moisture resistant MoS_2 solid lubricant system. The sustainable understanding of the coating behavior and its link to the microstructure and the required manufacturing conditions constitutes the main scientific challenge. It is further aimed to confirm the benefit of the developed coatings by transferring them into an industrial application.

The thesis consists of a simulative and an experimental part. In the simulative part, effects of the process parameters on the intensity of the particle flux are analyzed by a two-step Monte Carlo simulation of particle sputtering and transport. The calculation results enable assessing the potential of different parameter settings for the creation of high wear resistant MoS_2 coatings. Within the experimental part, coatings are deposited by physical vapor deposition. To increase the wear and moisture resistance, the coating structures are modified by metal doping and by adjusting the parameters of the sputtering process. The validation is carried out under pure sliding using pin-on-disc-testing and under rolling motion using component tests with thrust ball bearings.

Coatings with highest performance show wear coefficients in air that almost correspond to those in vacuum. These highly wear resistant coatings are characterized by dense microstructures, high compressive residual stresses, low sulfur contents and high ratios between hardness and indentation modulus (H/E -ratio). Essential requirements to achieve such coatings are high energy particle fluxes during manufacturing which can be obtained by low process pressures and low target-substrate-distances. Compared to literature, the service life of dry-running thrust ball bearings could be significantly extended by equipping them with the developed MoS_2 -coatings.

On the one hand, the aim of a powerful wear- and moisture-resistant MoS_2 coating has been successfully developed. On the other hand, the gained scientific understanding of the manufacturing process enables a targeted synthesis of wear resistant MoS_2 -coatings.

