

Beschichtete Bauteile

Leistungsfähiger
und zuverlässiger



Beschichtete Bauteile

Leistungsfähiger und zuverlässiger

Herausgeber:
OC Oerlikon Balzers AG
Oerlikon Balzers Headquarters
Iramali 18
Postfach 1000
LI-9496 Balzers
Liechtenstein

Tel +423 388 75 00
Fax +423 388 54 19
E-Mail: info.balzers@oerlikon.com
www.oerlikon.com/balzers

© 2008
3. Auflage / August 2008

Reproduktion, Übersetzung in andere Sprachen, Mikroverfilmung, elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Vervielfältigung und Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Inhalt

Auf die Oberfläche kommt es an	07
Tribo-Effekte unter der Lupe	09
Das tribologische System	09
Die Reibung	10
Typische Verschleißmechanismen	11
Die Problematik reiner Werkstoff-Lösungen	12
Vorteile der Oberflächen-Behandlung	12
Vielschichtige Oberflächen-Technologie	13
Verfahren zur Oberflächen-Behandlung	13
PVD- und PACVD-Verfahren	16
Hartstoffschichten und deren Bezeichnungen	19
Eigenschaften der BALINIT®-Schichten	20
BALINIT®-Schichten im Überblick	21
Vorteile der BALINIT®-Beschichtungen	28
Grenzen der BALINIT®-Beschichtungen	29
Beschichtung als Konstruktionselement	31
Werkstoffe richtig wählen	31
Werkstoffe und ihre Beschichtbarkeit	32
Härte und Festigkeit der Werkstoffe	34
Die Oberflächengüte der Bauteile	34
Beschichtungsgerechtes Bauteil-Design	35
Konservierung und Verpackung	36
Maßgeschneiderte Lösungen	37
Motorentechnik	37
Motoren	37
Motorsport	41
Kraftstoffeinspritzung	43
Antriebstechnik	45
Fahrzeuggetriebe	45
Industrieantriebe	49
Wälzlager	51
Fluidtechnik	55
Kompressoren	55
Hydraulik-Pumpen und Hydraulik-Motoren	57
Ventile und Armaturen	60
Weitere Anwendungsgebiete	61

Partner für Ihren Erfolg	65
Forschung und Entwicklung	65
Messtechniken zur Qualitätssicherung	66
Messtechniken zur Spezifikation und Analyse	68
Applikationssupport	71
Dienstleistungen nach Maß	71
Produktionsprozess und Verfahrenstechnik	73
Qualitätsmanagement	74
Glossar	75
Tribologie, PVD-Technologie, Beschichtungen	

Auf die Oberfläche kommt es an

Ein entscheidendes Kriterium für die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Präzisionsbauteilen ist ihr Reibungsverhalten. Dieses wird wesentlich durch die Eigenschaften der Bauteiloberflächen bestimmt. Entsprechend große Bedeutung kommt den verschiedenen Verfahren zur Oberflächenbehandlung der Teile zu, durch die ihre Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessert und die Reibung vermindert werden kann.

Plasmaunterstützte Beschichtungsverfahren von Oerlikon Balzers (im weiteren Text: Balzers) bewähren sich als überzeugende Lösung zur Realisierung wirtschaftlich und zuverlässig funktionierender Tribosysteme. Dabei geht die Zusammenarbeit mit den Kunden längst über das reine Beschichten hinaus: Verlangt sind heute im gleichen Maße kompetente Mitarbeit und Beratung bereits in der Entwicklungs- und Design-Phase, professionelles Projekt- und Qualitätsmanagement sowie Logistikkonzepte und Prozesse, die den Ansprüchen einer Serienfertigung gerecht werden.

BALINIT®-Beschichtungen lassen sich jederzeit in gleicher Qualität reproduzieren. Die von Balzers entwickelten PVD- und PACVD-Verfahren liefern die Voraussetzungen dazu ebenso wie die adäquaten technischen Qualitätssysteme, durch die sich die geforderten und festgelegten Spezifikationen im Produktionsprozess überprüfen und einhalten lassen.

Die Erfahrung zeigt, dass viele Tribosysteme durch die Wahl der richtigen Beschichtung optimiert werden können. BALINIT®-Standardschichten können entsprechend ihren Eigenschaften zielgerichtet eingesetzt werden, um die gewünschten Ergebnisse zu erreichen. Darüber hinaus erarbeitet Balzers zusammen mit dem Kunden maßgeschneiderte Lösungen, um spezifische Systemleistungen zu realisieren und konstruktive Freiräume zu schaffen.

Die Beschichtung steigert die Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Bauteilen und ermöglicht kompaktere und leichtere Konstruktionen. Geringerer Energieverbrauch und der Einsatz von weniger und umweltschonenden Betriebsmitteln sind weitere Vorteile, die im Maschinen- und Apparatebau ebenso genutzt werden wie im Motoren- und Fahrzeugbau.

Komponenten von Werkzeug- und Textilmaschinen, Kunststoff-Spritzgussmaschinen oder etwa Maschinen zur Lebensmittelverarbeitung werden heute standardmäßig mit BALINIT® beschichtet. Auch in der Fluidtechnik bewährt sich die Schicht, u.a. auf hoch beanspruchten Bauteilen von Hydraulikantrieben, Pumpen und Ventilen.

Auf Motorenbauteilen überzeugt BALINIT® als serienreife Lösung, die Leistungssteigerungen des gesamten Systems ermöglicht. Beispiele dafür sind BALINIT®-beschichtete Komponenten von modernsten Diesel-Einspritzsystemen sowie Kolbenbolzen, Tassenstößel und Kolbenringe. Als Partner namhafter Automobil-Hersteller und Zulieferer ist Balzers maßgeblich an der Entwicklung innovativer Technologien beteiligt.

Diese Broschüre gibt dem Konstrukteur und seinem Auftraggeber ebenso wie dem Betriebs- und Instandhaltungs-Ingenieur einen Überblick über die Verfahren zur Herstellung von verschleißfesten, reibungsarmen und korrosionsbeständigeren Oberflächen und zeigt speziell die Möglichkeiten und Vorteile der PVD- bzw. PACVD-Schichten BALINIT® auf.

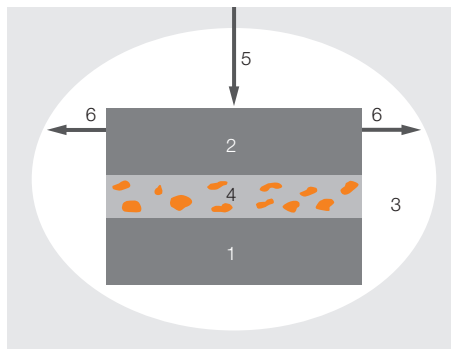
Tribo-Effekte unter der Lupe

Die Lösung von Verschleißproblemen beginnt mit der genauen Betrachtung des jeweiligen tribologischen Systems samt allen beteiligten Einflussfaktoren. Daraus lässt sich ableiten, welche Reibungszustände und Verschleißmechanismen wann auftreten und wirksam werden. Effizientere Problemlösungen als reine Werkstoff- oder Design-Alternativen bieten oft gezielte Behandlungen der Bauteiloberflächen, insbesondere Beschichtungen.

Das tribologische System

Ein tribologisches System besteht zunächst aus den Oberflächen der Komponenten, die miteinander in bewegtem Kontakt sind und damit tribologisch aktiv werden. Deren Werkstoff-Zusammensetzung und Struktur beeinflussen die Reibung und den Verschleißeffekt maßgeblich. Darüber hinaus haben häufig Schmiermedien wie Öl, Fett oder Wasser tribologische Auswirkungen. Auch Partikel auf den Oberflächen haben Einfluss auf den Verschleiß. Weitere Wirkkräfte sind die vorherrschenden Einsatztemperaturen, die aufgetragenen Lasten sowie die Art der Belastung, zum Beispiel gleitend, rollend, oszillierend oder schwellend.

All diese Einflüsse bestimmen das tribologische System und Verhalten - und damit letztlich Ausmaß, Art und Verlauf des Verschleißes. Ein fundamentaler Zusammenhang besteht dabei zwischen Reibung und Verschleiß.



Tribosystem

- 1 Grundkörper
- 2 Gegenkörper
- 3 Umgebungseinflüsse:
 - Temperatur
 - Relative Feuchtigkeit
 - Druck
- 4 Zwischenstoffe:
 - Öl
 - Fett
 - Wasser
 - Partikel
 - Verunreinigungen
- 5 Belastung
- 6 Bewegung

Die Reibung

Reibung in einem Tribo-System lässt sich anhand des Kontaktzustands der Reibpartner klassifizieren:

Festkörperreibung liegt vor, wenn Grund- und Gegenkörper in unmittelbarem Kontakt stehen.

Grenzreibung ist eine Sonderform der Festkörperreibung im Übergang zur Mischreibung. Dabei sind die Oberflächen der Kontaktpartner mit adsorbierten Schmierstoff-Molekülen bedeckt.

Mischreibung ist eine Überlagerung von Reibungszuständen wie Festkörperreibung bzw. Grenzreibung und Flüssigkeitsreibung. Dabei wird die Belastung teilweise von Festkörperkontakten, teilweise von einem tragenden Schmierfilm aufgenommen.

Flüssigkeitsreibung bezeichnet Reibung in einem flüssigen Schmierfilm, der die Kontaktpartner vollständig voneinander trennt (hydrodynamische und hydrostatische Reibung).

Für diese Reibungszustände gilt in der Regel: Mit zunehmendem Direktkontakt der bewegten Grund- und Gegenkörper wächst die Reibung und damit auch die Verschleißgefahr. Der

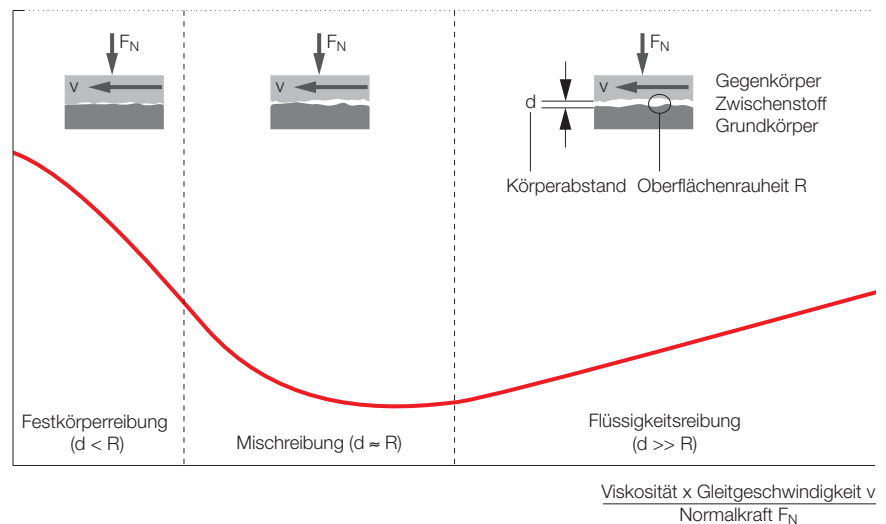
Grad der Reibung in einem Tribosystem wird durch den Reibwert μ (auch: Reibungszahl) bestimmt. Diese Kenngröße ist abhängig von den auftretenden Reibungszuständen sowie von den tribologischen Wirkfaktoren im Anwendungsprozess.

Die **Stribeck-Kurve** zeigt, dass sich besonders bei Flüssigkeitsreibung in ölgeschmierten Tribosystemen niedrige

Reibwerte ergeben. Dieser Zustand ist jedoch abhängig von konstanten Einsatzbedingungen und passender Systemkonstruktion. Trotz Schmierung lässt sich Misch- und Grenzreibung oft nicht vollständig vermeiden, insbesondere beim Anfahren oder Auslaufen eines Tribo-Prozesses. Verschiedenste Verschleißmechanismen können die Folge sein.

Stribeck-Kurve: Schematische Darstellung der Reibung

Reibungszahl μ



Stribeck-Kurve Ölschmierung und Reibwert

Die Stribeck-Kurve zeigt den Verlauf des Reibwertes ölgeschmierter Tribosysteme. Niedrige Reibwerte entstehen vor allem bei Flüssigkeitsreibung, wenn also die Summe der Rautiefen von Grund- und Gegenkörper kleiner als die Schmierfilmdicke ist. Dies setzt einen hohen Quotienten aus der Parameter-Kombination Viskosität, Gleitgeschwindigkeit und Belastung (Normal-

kraft) voraus. Außerdem muss die Konstruktion des Tribosystems die Bildung eines sich in Strömungsrichtung verengenden Spaltes zulassen. Denn im Schmierfilm muss sich Druck gegen eine von außen aufgebrachte Kraft aufbauen können. Verringert sich mit abnehmender Gleitgeschwindigkeit oder zunehmender Belastung die Dicke des Schmierfilms, kann dies zu Mischreibung, Grenz- oder Festkörperreibung führen.

Typische Verschleißmechanismen

In der Praxis treten die einzelnen Verschleißmechanismen in Tribosystemen selten in Reinform auf. In der Regel wirken mehrere dieser Mechanismen gleichzeitig oder folgen während des Verschleißprozesses aufeinander. Meist spielt einer davon eine dominante Rolle beim verschleißbedingten Versagen.

Abrasiver Verschleiß kommt zustande durch Materialabtrag aufgrund harter oder kantiger Partikel, die zwischen die Reibpartner gelangen. Auch harte oder kantige (abrasive) Oberflächen und Rauheitsspitzen der Gegenkörper können die Ursache sein. Abrasion wird begünstigt, wenn die Ober-

flächenhärten der Tribopartner sehr unterschiedlich sind, oder wenn die härtere Oberfläche genügend rau oder kantig ist.

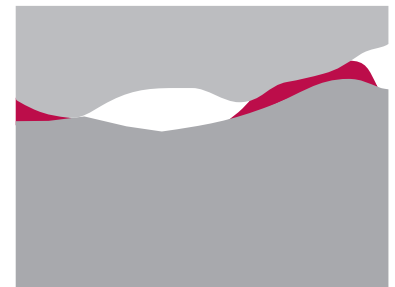
Die Folgen sind Kratzer, Riefen, Späne und Abtrag auf den Oberflächen.



Adhäsiver Verschleiß tritt auf, wenn zwei tribologisch aktive Oberflächen unter Mischreibungsbedingungen oder bei Trockenlauf eine enge, haftende (adhäsive) Bindung eingehen. Dies kann der Fall sein, wenn die Oberflächen eine gleiche Materialzusammensetzung oder eine hohe Verbindungs-

neigung aufweisen und sich keine schützende Passivschicht bildet.

Die Folgen sind Kaltverschweißungen mit Materialübertragung, Löcher, Aufschmierungen oder ähnliche Zerstörungen der Oberflächenstrukturen (Fressen).



Oberflächenermüdung entsteht durch wiederholte mechanische bzw. hydraulische Schwell- oder Wechselbeanspruchungen. Dies führt zur Bildung und Ausbreitung von Rissen unter der beanspruchten Oberfläche, die dabei zerstört wird. Wenn die Oberfläche durch Reibung beansprucht wird, lässt sich der Verschleiß durch Senkung des Reibwerts mindern. Bei

hydraulischer Belastung ist die Härte und Elastizität des Materials entscheidend.

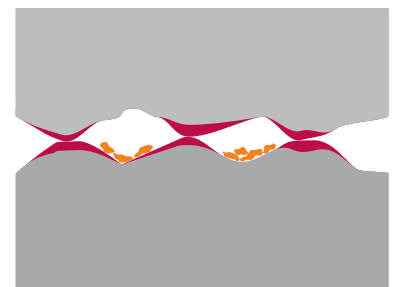
Die Folgen von Oberflächenermüdung sind Risse, Grübchen (Pitting) und Graufleckigkeit (Micropitting), insbesondere bei Wälzelementen. Bei hydraulischen Komponenten ist es die Kavitationserosion.



Tribooxidation tritt auf, wenn der tribologische Reibungskontakt eine chemische Reaktion hervorruft. Die Reaktionsprodukte beeinflussen die tribologischen Vorgänge an den Oberflächen nachhaltig. Zum Beispiel können eng tolerierte Bauteilpaarungen oder Lagersitze verklemmen. Tribo-

oxidation lässt sich verringern durch Temperatur- und Reibwertsenkung sowie inerte (reaktionsträge) Kontaktflächen und formstabilere Oberflächen.

Die Folge von Tribooxidation ist zum Beispiel Passungsrost.



Die Problematik reiner Werkstoff-Lösungen

Die Identifikation von Verschleißmechanismen in Tribosystemen gibt erste Aufschlüsse darüber, welche Maßnahmen den Verschleiß mindern können:

- Herabsetzen des Reibwerts
- Erhöhen der Oberflächenhärte
- Aufbringen inerter Oberflächenschichten

Sucht man die Verschleißminderung allein durch die Wahl der Konstruktionswerkstoffe zu erreichen, so zeigt

sich: Einige Werkstoffe besitzen zwar tribologische Vorteile wie etwa hohe Festigkeit, weisen jedoch gleichzeitig Nachteile - zum Beispiel Korrosionsanfälligkeit - auf. Andere Einschränkungen bei der Werkstoffauswahl ergeben sich aus konstruktiven Anforderungen in Bezug auf Design, Gewicht, Funktion, Kosten, Verfügbarkeit und Umweltschutz.

Vorteile der Oberflächen-Behandlung

Konstruktive Freiräume schaffen insbesondere mittels **PVD-** (Physical Vapour Deposition) **oder PACVD-** (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) **Verfahren** aufgebrachte Oberflächen-Beschichtungen. Dabei sorgt der Grundwerkstoff für Festigkeit und Zähigkeit, während die Beschichtung gegen Verschleiß und Korrosion schützt sowie die Reibung reduziert. Zur Anwendung kommen vor allem Kohlenstoffschichten, aber auch Nitridschichten bewähren sich für zahlreiche Applikationen.

Die Behandlung von Bauteil-Oberflächen eröffnet dagegen vielfältige Chancen. Zum einen will man das tribologisch erwünschte Systemverhalten meist ohne aufwendigen Design- oder Werkstoffwechsel herstellen. Zum anderen können Oberflächen-Behandlungen bereits in der Bauteil-Entwicklungsphase konstruktive Freiräume schaffen. Dabei geht es um das gezielte Beeinflussen von Oberflächen-Eigenschaften, um die folgenden Vorteile im technologischen Wettbewerb nutzen zu können:

- Verlängerung der Lebensdauer
- Belastungsreserven
- Wartungsfreundlichkeit und -kosten
- Umwelt- und Ressourcenschonung
- Gutes Ansprechverhalten von bewegten Systemen
- Niedriger Energieaufwand
- Korrosionsbeständigkeit
- Konstruktion mit engen Toleranzen
- Einsatz kostengünstigerer Grundwerkstoffe

Vielschichtige Oberflächen-Technologie

Beim Vergleich der Methoden zur gezielten Oberflächenbehandlung von Präzisionsbauteilen zeigen PVD- und PACVD-Verfahren viele Vorzüge. Der Grund: Mit Hilfe dieser Beschichtungstechniken lassen sich verschleißfeste und gut gleitende Hartstoffschichten präzise, anwendungsgerecht und umweltschonend aufbringen und auf ihre Anforderungen wie etwa Härte, Reibwert oder Dicke anpassen. Balzers fasst diese Hartstoffschichten unter dem Markennamen BALINIT® zusammen.

Verfahren zur Oberflächen-Behandlung

DIN 8580 nennt zwei Hauptgruppen von Fertigungsverfahren zur Beeinflussung von tribologischen Vorgängen an Werkstoffoberflächen:

- das **Beschichten** mit Verfahren wie zum Beispiel die galvanische Abscheidung, das thermische Spritzen oder das Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (PVD/PACVD);
- das **Verändern der Werkstoffeigenschaften**, zum Beispiel durch Nitrieren oder Borieren.

Alle Verfahren haben aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften ihre speziellen Anwendungsbereiche. In vielen Fällen können jedoch verschiedene Verfahren eingesetzt werden, insbesondere wenn die Beanspruchungen nicht zu hoch sind.

Galvanische Verfahren

Die wichtigsten galvanischen oder chemischen Verfahren für den Verschleiß- und Korrosionsschutz sind das Hartverchromen und das chemische Vernickeln.

Hartchrom besitzt eine Härte von ca. 1.200 HV und wird in Schichtdicken bis 200 µm abgeschieden. Es eignet sich für abrasiv beanspruchte Bauteile. Die verfahrensbedingten Mikrorisse limitieren aber den Einsatz als Korrosionsschutz. Zwar können durch Dünnschichtverchromung Mikrorisse vermieden werden. Bei solchen nur wenige µm dicken Schichten mit einer Härte von 1.200 HV ist der Verschleißwiderstand dann allerdings begrenzt.

Chemisch Nickel kann je nach Verfahrensführung in verschiedenen Härtestufen hergestellt werden. Die maximale Härte liegt bei ca. 600 HV. Die Stärke chemischer Nickelschichten liegt vor allem im Korrosionsschutz. Durch Einlagerungen (Dispersion) harter (Diamant, Siliziumkarbid) oder weicher (PTFE) Phasen können die tribologischen Eigenschaften verbessert werden.

Beim **Nitrieren** diffundiert Stickstoff in die Stahloberfläche und härtet den Stahl in den Randzonen bis zu einer Tiefe von typischerweise 0,5 mm. In der äußeren Diffusionszone wird eine Härte von ca. 900 HV erreicht. Je nach Verfahrensführung und Grundwerkstoff kann sich eine Verbindungszone (Eisenitrid, z.B. Fe₄N) in Stärken bis 20 µm ausbilden. Diese Nitridzonen widerstehen mittlerem Verschleiß und Korrosion.

Galvanische Verfahren und Nitrierverfahren arbeiten teilweise mit umweltproblematischen Medien. Bei klassischen Hartchrombädern fallen zudem so genannte Chrom-VI-Verbindungen an, die krebserregend sind. In vielen Industrie-Regionen ist das Aufstellen bestimmter Galvanikanlagen kaum mehr möglich. Ähnliches gilt auch für Salzbad-Nitrieranlagen.

Wichtige Eigenschaften der **PVD-** und **PACVD-Verfahren** sind:

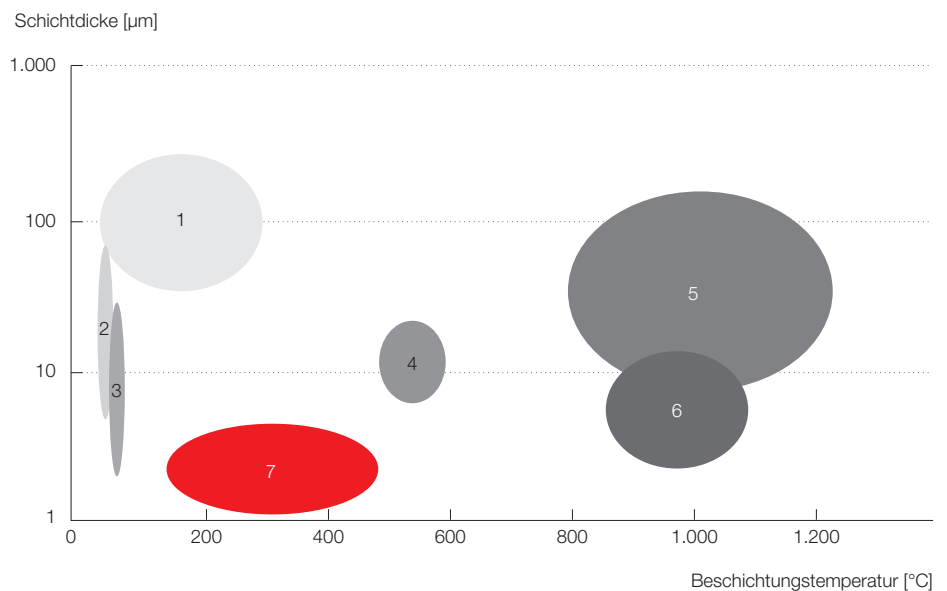
- Eine **große Vielfalt von Schichtvarianten** ist herstellbar. Der Beschichtungsprozess im Hochvakuum ermöglicht die Erzeugung von Schichteigenschaften, wie sie unter Atmosphärendruck in Gasen und Bädern (thermisches Spritzen, Nitrieren, galvanisches oder chemisches Abscheiden) nicht erreichbar sind. Das Resultat sind Schichten mit guter Haftung, hoher Härte und Verschleißbeständigkeit - häufig speziell zugeschnitten auf den jeweiligen Einsatz.

- Die für die Bauteil-Beschichtung eingesetzten PVD-/PACVD-Verfahren arbeiten bei relativ **niedrigen Beschichtungstemperaturen** von 200 °C bis 500 °C. Die Temperaturen sind so gewählt, dass man unter oder im Bereich der Anlasstemperatur von Stählen liegt. Dadurch werden die Grundeigenschaften der Werkstoffe nicht störend beeinflusst.

- Die Schichten sind typischerweise 0,5 bis 4 Mikrometer dünn. Diese eher **geringe Schichtdicke** mit eng tolerierten Abweichungen ermöglicht das konturgetreue, passgenaue und maßhaltige Aufbringen der Schicht auf Bauteiloberflächen, ohne dass eine teure Nachbearbeitung erfolgen muss.

- PVD-/PACVD-Verfahren sind **umweltschonend** und kommen ohne Einsatz und Erzeugung umweltbelastender Stoffe oder Emissionen aus. Die eingesetzten Gase sind Edelgase wie z. B. Argon sowie handelsübliche Arbeitsgase wie Wasserstoff und Acetylen. Es entstehen auch keine toxischen Reaktionsprodukte.

Schichtdicken und Behandlungstemperaturen



- 1 Plasmaspritzen
- 2 Galvanische und chemische Abscheidung
- 3 Phosphatieren
- 4 Nitrieren (Verbindungsschicht)
- 5 Borieren
- 6 CVD
- 7 PVD und PACVD

Einsatzbereich verschiedener Verfahren zur Oberflächenbehandlung

	Schutz gegen Fressen	Schutz gegen Abrasion	Schutz gegen Korrosion	Einsatzbereiche
Galvanisches Hartchrom	+	++	+	Chem. Apparatebau, Lebensmitteltechnik, Hydraulik
Chemisch Nickel	+	+	+++	Chem. Apparatebau, Lebensmitteltechnik, Hydraulik
Diffusionsverfahren (Nitrieren, Nitrocarburieren, Borieren)	+	++	+	Motorelemente, Werkzeuge
Plasmaspritzen	+	++	++	Turbinenschaufeln
CVD (thermisch)	++	++	+	Werkzeuge
PVD-Hartstoffschichten (TiN, TiCN, TiAlN, CrN)	++	++	+	Werkzeuge, Maschinenbau, Motorelemente, Motorsport
PVD-/PACVD-Kohlenstoffschichten (WC/C, DLC)	+++	++	++	Maschinenbau, Motorelemente, Motorsport

Tribologische Vorteile: PVD- und PACVD-Beschichtungen

Beschichtungen mittels PVD- und PACVD-Verfahren zeigen vielfach überlegene tribologische Eigenschaften:

- PVD- und PACVD-Schichten, insbesondere Kohlenstoffschichten, zeichnen sich durch die einzigartige Kombination von **Fress- und Abrasionsschutz** aus.
- Das **Trockenlaufverhalten** von behandelten und unbehandelten Bauteilen gibt vor allem Aufschluss, wel-

chen Schutz Oberflächenbeschichtungen gegen Fressen und Oberflächenermüden bieten. Die durch Gleitverschleißtests ermittelten Daten belegen den nach einer anfänglichen Einlaufphase niedrigen Reibwert von BALINIT®-Kohlenstoffschichten, der sich insbesondere bei Mangel-schmierung und Mischreibung positiv auswirkt.

- PVD-Hartstoffschichten haben nur eine geringe **chemisch-physikalische Wechselwirkung** mit Metallen. Sie sind deshalb gut geeignet, um auch das Auftreten von Tribooxi-

dation zu verhindern. Dank der korrosionsschutzverbessernden Eigenschaften von PVD-Schichten werden die Bauteile auch vor äußeren Einflüssen geschützt.

Gleitverschleißtest

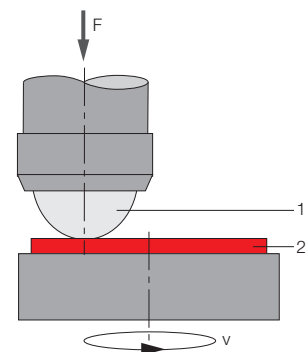
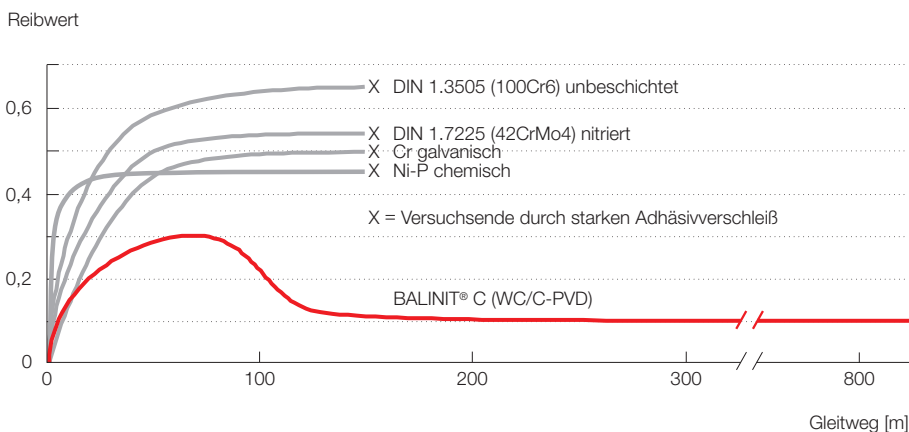
Prüfmethode:

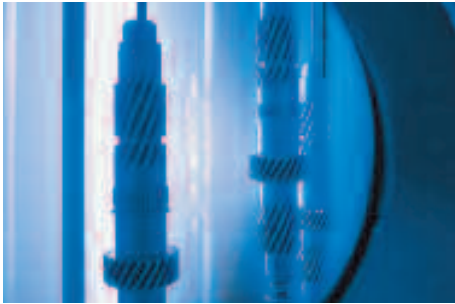
- 1 Fest eingespannte Kugel, Ø 3 mm
DIN 1.3505 (100Cr6), 60 HRC
- 2 Prüfling:
DIN 1.3505 (100Cr6), 60 HRC
gestrahlt oder geschliffen, N4
beschichtet

Prüfbedingungen:

- F = 30 N
- v = 0,3 m/s
- Trockenlauf

Trockenlaufverhalten / Gleitverschleißtest





PVD- und PACVD-Verfahren

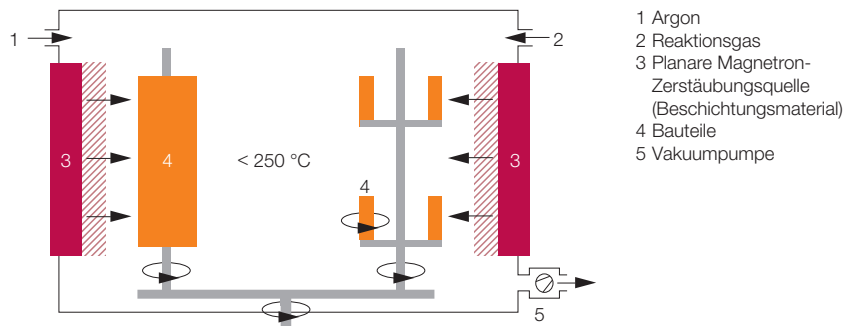
Die auf den vorhergehenden Seiten beschriebenen Vorteile sind die Gründe dafür, dass Balzers bei der Beschichtung von Präzisionsbauteilen auf PVD (Physical Vapour Deposition)- und PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)-Verfahren setzt. Dabei kommen Technologien zum Einsatz, die mit Plasma-Unterstützung arbeiten und flexibel sowie präzise steuerbar sind: **Sputtern, Ion-plating, Arc Evaporation** sowie **PACVD**.

Sputtern

Beim reaktiven Sputtern (Kathodenzerstäubung) sind die gereinigten und vorbehandelten Bauteile zur Beschichtung in der Vakuumkammer einer PVD-Sputteranlage auf einem Drehteller chargiert. Nach dem Aufheizen der Bauteile erfolgt das Ionenätzen durch den Beschuss mit Argonionen. Dies erzeugt eine reine metallische Oberfläche frei von atomaren Kontaminationen - eine wichtige Voraussetzung für die Schichthaftung. Dann wird eine hohe negative elektrische Spannung an die Zerstäubungsquellen mit dem Schichtmaterial gelegt. Die dadurch zündende elektrische Gasentladung führt zur Bildung von positiven Argonionen, die in Richtung Beschichtungsmaterial beschleunigt werden und dieses zerstäuben. Die abgestäubten Partikel reagieren mit einem zusätzlich

eingeführten Reaktionsgas, das die nichtmetallische Komponente der späteren Hartstoffschicht enthält. Als Ergebnis schlägt sich eine dünne, kompakte Schicht mit der gewünschten Struktur und Zusammensetzung auf den Bauteilen nieder. Um überall eine einheitliche Schichtdicke zu erreichen, werden die Bauteile während des Beschichtens gleichmäßig um eine oder mehrere Achsen gedreht.

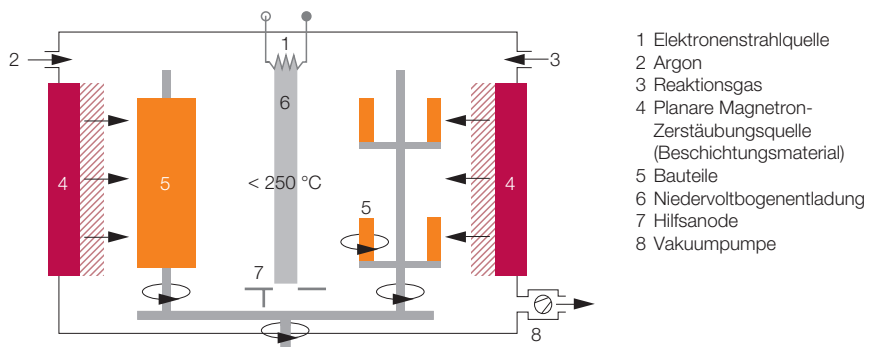
Balzers nutzt das Sputtern zur **WC/C-Beschichtung**. Dabei wird aus einem wolframhaltigen Schichtmaterial und einem kohlenstoffhaltigen Reaktionsgas ein Schichtsystem abgeschieden, das aus einer Matrix aus Kohlenstoff und Wasserstoff mit wolframhaltigen Einlagerungen besteht. Diese WC/C-Schicht (a-C:H:W) trägt den Markennamen **BALINIT® C**.



- 1 Argon
- 2 Reaktionsgas
- 3 Planare Magnetron-Zerstäubungsquelle (Beschichtungsmaterial)
- 4 Bauteile
- 5 Vakuumpumpe

Enhanced Sputtern

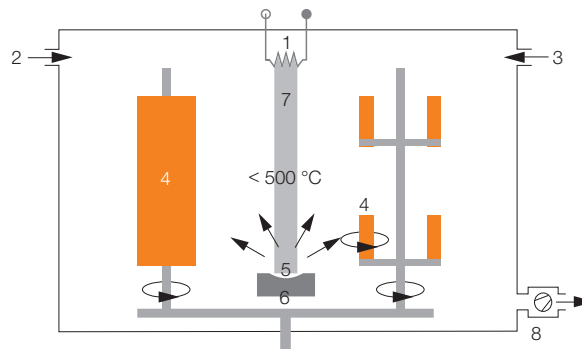
Nach einem ähnlichen Prinzip lässt sich die **Chromnitridschicht** BALINIT® CNI durch Enhanced Sputtern abscheiden. Dabei wird die Beschichtung aus einem chromhaltigen Schichtmaterial und gasförmigem Stickstoff mit zusätzlicher Ionisierung erzeugt. Dank einer Niedervoltbogenentladung in der Anlagenmitte wird die Plasmaintensität um ein Mehrfaches gesteigert und dadurch ein viel höherer Ionisierungsgrad erreicht.



- 1 Elektronenstrahlquelle
- 2 Argon
- 3 Reaktionsgas
- 4 Planare Magnetron-Zerstäubungsquelle (Beschichtungsmaterial)
- 5 Bauteile
- 6 Niedervoltbogenentladung
- 7 Hilfsanode
- 8 Vakuumpumpe

Ionplating

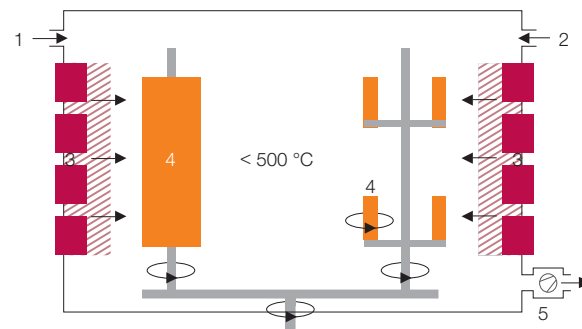
Ionplating ist ein PVD-Verfahren, das reaktives Elektronenstrahl-Verdampfen nutzt. Wird beim Sputtern das Beschichtungsmaterial durch Beschuss mit Argonionen von einer Metallplatte abgetragen, so wird beim Ionplating die metallische Komponente des Schichtmaterials (z. B. Titan oder Chrom) durch einen Niederspannungs-Lichtbogen verdampft. Balzers setzt Ionplating beispielsweise zur Herstellung der **Titannitridschicht** BALINIT® A ein.



- 1 Elektronenstrahlquelle
- 2 Argon
- 3 Reaktionsgas
- 4 Bauteile
- 5 Beschichtungsmaterial
- 6 Tiegel (Anode)
- 7 Niedervoltbogenentladung
- 8 Vakuumpumpe

Arc Evaporation

Arc Evaporation oder Arc-Verdampfen ist eine spezielle Form des Aufdampfens von Beschichtungsmaterial. Dabei wird zwischen Trägerplatte (Anode) und Beschichtungsmaterial (Kathode) ein Lichtbogen gezündet, der sich über das Beschichtungsmaterial bewegt und dieses verdampft. Wegen der dabei eingesetzten hohen Ströme und Leistungsdichten wird das verdampfte Material zu einem Großteil ionisiert. Reaktionsgas und Metallionen treffen auf die Bauteil-Oberfläche und schlagen sich dort als Schichtmaterial nieder.

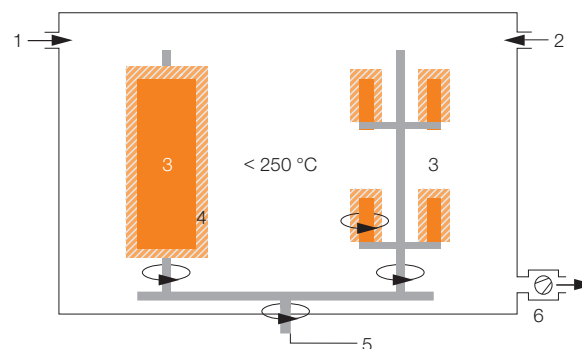


- 1 Argon
- 2 Reaktionsgas
- 3 Arc-Quellen (Beschichtungsmaterial und Trägerplatte)
- 4 Bauteile
- 5 Vakuumpumpe

Balzers nutzt dieses Verfahren u. a. zur Herstellung der **Titanaluminiumnitrid-Schicht** BALINIT® FUTURA NANO.

PACVD-Prozess

Das Hochfrequenz-PACVD-Verfahren setzt Balzers zur Herstellung der **metallfreien Kohlenstoffschicht** BALINIT® DLC ein. Die Prozessanordnung ähnelt der des Sputterns. Im Unterschied dazu wird jedoch nach dem Aufputtern einer metallischen Haftschiicht eine hochfrequente Wechselspannung angelegt. Nach **Einführen** des Reaktionsgases findet in der Vakuumkammer eine Gasentladung statt. In dieser entstehen Kohlenstoff- und Wasserstoff-Atome (Ionen und Radikale), die auf den Bauteilen eine

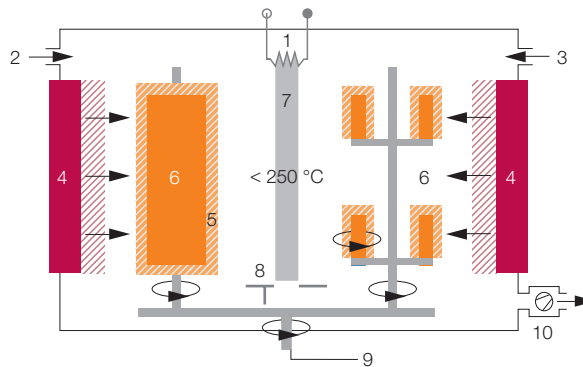


- 1 Argon
- 2 Reaktionsgas
- 3 Bauteile
- 4 Plasmasaum
- 5 Hochfrequenzanschluss
- 6 Vakuumpumpe

kompakte Schicht bilden. Durch Variation der angelegten Spannung werden die Schichteigenschaften beeinflusst.

Kombinierter PVD/PACVD-Prozess

Um **kohlenstoffhaltige Multifunktionsschichten** wie z.B. BALINIT® DLC STAR aufbringen zu können, wird der Prozess „Enhanced Sputtern“ mit dem „PACVD-Prozess“ kombiniert. Eine harte, zähe Metallschicht wird durch Sputtern abgeschieden, während die darauf aufbauende, tribologisch wirksame Kohlenstoffschicht mittels PACVD-Verfahren erzeugt wird. Im Gegensatz zu herkömmlichen Kombinationsschichten werden die Multifunktionsschichten von Balzers in

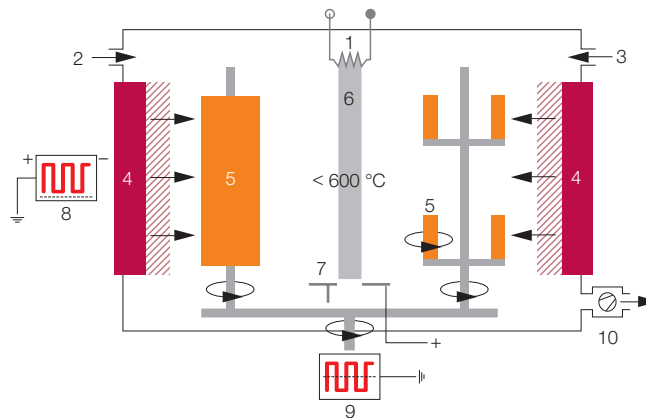


- 1 Elektronenstrahlquelle
- 2 Argon
- 3 Reaktionsgas
- 4 Planare Magnetron-Zerstäubungsquelle (Beschichtungsmaterial)
- 5 Plasmasaum
- 6 Bauteile
- 7 Niedervoltbogenentladung
- 8 Hilfsanode
- 9 Hochfrequenzanschluss
- 10 Vakuumpumpe

einem einzigen Beschichtungsprozess hergestellt. Es entstehen homogene, defektfreie Schichten von einzigartiger Qualität und Haftfestigkeit.

P3e™ Pulse Enhanced Electron Emission

P3e™ ist eine Beschichtungstechnologie, mit der es Balzers als weltweit erster Firma gelang, **harte, Aluminiumoxid-basierende Schichten in Korundstruktur** in einem PVD-Verfahren bei Temperaturen deutlich unter 600 °C abzuscheiden. Bisher war das Aufbringen derartiger Schichten nur in CVD-Verfahren bei wesentlich höheren Temperaturen möglich: Dabei besteht bei bestimmten Hartmetallsorten allerdings die Gefahr der Versprödung, Stähle konnten praktisch überhaupt nicht beschichtet werden. Grundsätzlich sind die PVD-Oxidschichten für



- 1 Elektronenstrahlquelle
- 2 Betrieb der kathodischen Arc-Quellen in Sauerstoff
- 3 Reaktionsgas O₂
- 4 Arc-Quellen (Beschichtungsmaterial und Trägerplatte)
- 5 Bauteile
- 6 Niedervoltbogenentladung
- 7 Hilfsanode
- 8 Gepulste kathodische Arc-Verdampfung
- 9 Gepulste Substratspannung mit hoher Leistung
- 10 Vakuumpumpe

Werkzeuge entwickelt worden. Sie bieten sich jedoch auch bei Maschinenelementen überall dort als Lösung an, wo eine isolierende Wirkung, Temperatur- und Korrosionswiderstand gefragt sind.

Hartstoffschichten und deren Bezeichnungen

Die heutige Anzahl und Namensvielfalt der Schichten, die sich mit den beschriebenen PVD- und PACVD-Verfahren herstellen lassen, ist sehr groß. Man kann die wichtigsten Hartstoffschichten in drei Gruppen einteilen. Zur ersten Gruppe gehören die Schichten, die sich aus Metallen und Stickstoff zu Metallnitriden verbinden (TiN, CrN, TiAlN etc.). Eine weitere Gruppe sind die karbidischen Schichten, die aus Metallen und Kohlenstoff entstehen (TiC, WC, NbC etc.). Mischformen aus diesen beiden Gruppen sind heute ebenfalls realisiert (z. B. TiCN). Als dritte Gruppe können die metallhaltigen (a-C:H:Me) und die metallfreien (a-C:H) Kohlenstoffschichten zusammengefasst werden.

Bei nitridischen Hartstoffschichten verbinden sich Metallatome der Gruppen IV bis VI im Periodensystem (Ti, Cr) mit Nichtmetallatomen (C, N, O). Meist werden stöchiometrische Verbindungen gewählt (d. h. 50% Metall- und 50% Nichtmetallatome), da solche Verbindungen häufig die günstigsten Eigenschaften haben.

Kohlenstoffschichten werden mehrheitlich unter Verwendung von Kohlenwasserstoff gebildet. Je nach Prozessführung entstehen unterschiedliche amorphe Kohlenwasserstoff-Netzwerke (a-C:H). Die C-Atome können dabei graphitisch (sp^2) oder diamantartig (sp^3) gebunden sein. Der Anteil der Bindungsart bestimmt den Reibwert und die Härte der Schicht. Dies hat im Markt zu einer uneinheitlichen Vermischung von Material-, Prozess- und

Gruppenbezeichnungen geführt. So bezeichnet etwa die angloamerikanische Abkürzung „DLC“ (Diamond Like Carbon) die ganze Gruppe der amorphen Kohlenstoffschichten. Als Bezeichnung für eine einzelne Kohlenstoffschicht aus dieser Gruppe ist „DLC“ auf jeden Fall unzureichend.

Die Produktfamilie der Kohlenstoffschichten von Balzers hat ihre eigenen Markennamen: Dabei bezeichnet BALINIT® C das a-C:H:W-Schichtsystem (WC/C), die a-C:H-Schicht heißt BALINIT® DLC.

Eine weitere Klasse von Kohlenstoffschichten sind wasserstofffreie Kohlenstoffschichten. Sie werden als tetragonaler Kohlenstoff oder amorpher Diamant bezeichnet (ta-C).

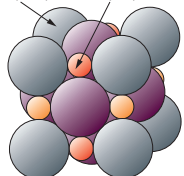
Bezeichnung von Kohlenstoffschichten

	Wissenschaftliche Bezeichnung	Balzers-Markennamen	Weitere marktübliche Bezeichnungen
Metallfreie Kohlenstoffschichten	a-C:H	BALINIT® DLC	DLC (Diamond Like Carbon) iC (ionic Carbon) a-DLC
Metallhaltige Kohlenstoffschichten	a-C:H:Me Me = Metall (z.B. Wolfram, Titan, Tantal)	BALINIT® C	DLC (Diamond Like Carbon) Me-DLC MeC (Metal Carbon) iC/Me Me-C:H MeC/C MCH
Wasserstofffreie Kohlenstoffschichten	ta-C		amorpher Kohlenstoff amorpher Diamant

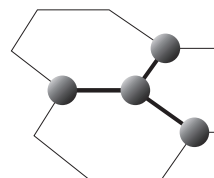
Schichtwerkstoffe und Materialstruktur

Nitridschichten

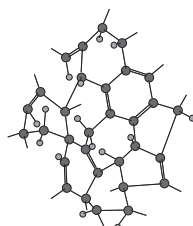
Metall: Ti, Cr, Al
Nichtmetall: C, N, B



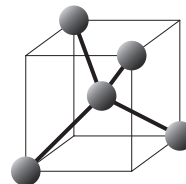
Kohlenstoffschichten



Graphit (sp^2)



DLC (sp^2 und sp^3)



Diamant (sp^3)

Eigenschaften der BALINIT®-Schichten

Die mit PVD- und PACVD-Verfahren hergestellten BALINIT®-Schichten haben hervorragende Eigenschaften, die für den Einsatz auf Präzisionsbauteilen besonders geeignet sind:

- Hohe Härte
- Hoher Widerstand gegen Verschleiß
- Niedriger Reibwert
- Gute Korrosionsbeständigkeit
- Geringe Schichtdicken
- Hohe Maß- und Konturtreue
- Gute Haftung

Die **Schichtdicken** betragen üblicherweise 0,5 bis 5 Mikrometer, wobei sich die Schichten der Topographie des Werkstoffs exakt anpassen und dadurch die Erhaltung der Konturtreue gewährleisten. Die Schärfe von Kanten und die Oberflächenrauheit bleiben nahezu unverändert erhalten. Dadurch ist keine Nacharbeit mehr nötig, die Beschichtung kann der letzte Fertigungsschritt der Bauteile sein.

Schichthaftung: Durch das Ionenätzen vor dem Beginn der Materialab-scheidung entsteht eine hervorragende metallurgische Anbindung der Schichten an den Grundwerkstoff. Trotz ihrer hohen Härte haften BALINIT®-Schichten so gut, dass selbst bei plastischer Verformung der Oberfläche keine Ablplatzungen auftreten.

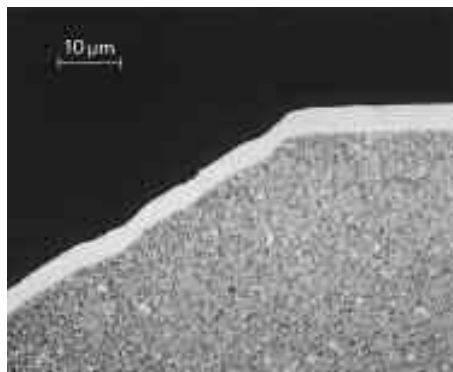
Eigenschaften und tribologische Wirkung der BALINIT®-Schichten

	BALINIT® C	BALINIT® C STAR
Schichtmaterial	a-C:H:W (WC/C)	CrN + a-C:H:W
Typische Mikrohärt e (HK 0,01)*/**	1.000 1.500	1.000 1.500
Typische Schichtdicken (µm)	1 - 4	3 - 5
Zunahme der Oberflächenrauigkeit R_a (µm)*	ca. 0,02	ca. 0,02
Reibwert gegen Stahl (trocken)*	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2
Beschichtungstemperatur (°C)	< 250	< 250
Maximale Anwendungstemperatur (°C)*	300	300
Schichtfarbe	anthrazit	anthrazit
Schutz gegen Abrasivverschleiß	++ ++	++ ++
Schutz gegen Adhäsivverschleiß	+++	+++
Schutz gegen Tribooxidation	++	++
Schutz gegen Oberflächenermüdung	+++ +++	+++ +++
Schutz gegen Korrosion*	+	++

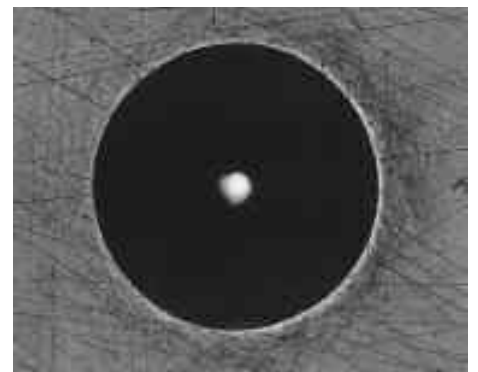
* abhängig von Anwendung und Testbedingungen

** Ionplating

*** HK (Härte Knoop) entspricht ca. HV (Härte Vickers)



Hohe Konturtreue von BALINIT®-Schichten



Ausgezeichnete Haftung von BALINIT®-Schichten

BALINIT® DLC	BALINIT® DLC STAR	BALINIT® CNI	BALINIT® D	BALINIT® A	BALINIT® FUTURA NANO
a-C:H	CrN + a-C:H	CrN	CrN	TiN	TiAlN
> 2.000	> 2.000	1.750	1.750	2.300	3.300
0,5 - 3	2 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4
ca. 0,02	ca. 0,02	ca. 0,02	ca. 0,2	ca. 0,03**/ca. 0,2	ca. 0,2
0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	0,5	0,5	0,4	0,4
< 250	< 250	< 250	< 500 / < 250	< 500 / < 250	< 500 / < 250
350	350	700	700	600	900
schwarz	schwarz	silbergrau	silbergrau	goldgelb	violett-grau
+++	+++	+	+	++	+++
+++	+++	++	++	++	++
++	++	++	++	++	++
++	++	+	+	+	+
++	+++	+++	+++	++	++

BALINIT®-Schichten im Überblick

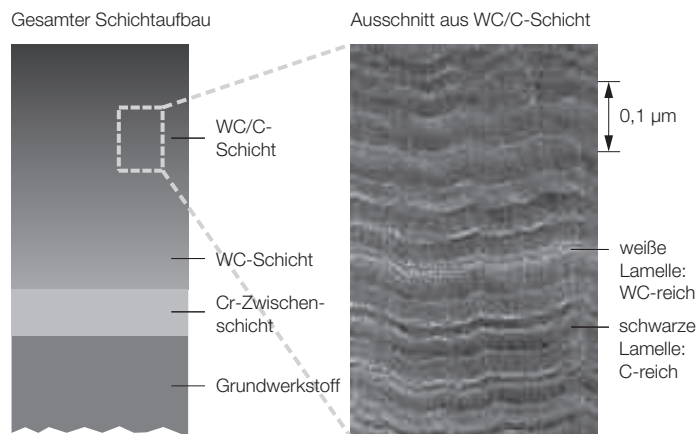
BALINIT® C BALINIT® C Star

Eigenschaften

BALINIT® C ist eine amorphe, metallhaltige Kohlenstoffschicht (a-C:H:W bzw. WC/C) mit multilamellarem Aufbau. Wolframkarbidreiche und kohlenstoffreiche Phasen wechseln sich in Abständen weniger Atomlagen ab. Dies führt zu einem sehr niedrigen Trockenreibungswert von 0,1 bis 0,2. Bei BALINIT® C STAR wird durch die Kombination mit einer darunter liegenden Metallschicht (CrN) die Lasttragfähigkeit der tribologisch wirksamen Kohlenstoffschicht erhöht.

Nutzen

BALINIT® C-Schichten schützen vor allem gegen adhäsiven Verschleiß (Fressen), sind hoch belastbar auch bei Mangelschmierung oder Trockenlauf und reduzieren dank des geringen Reibwertes die Gefahr von Oberflä-



Schichtaufbau BALINIT® C

Der multilamellare Aufbau der Kohlenstoffschicht BALINIT® C führt zu einem günstigen Einlauf- und Glättungsverhalten und reduziert die Trockenreibung.

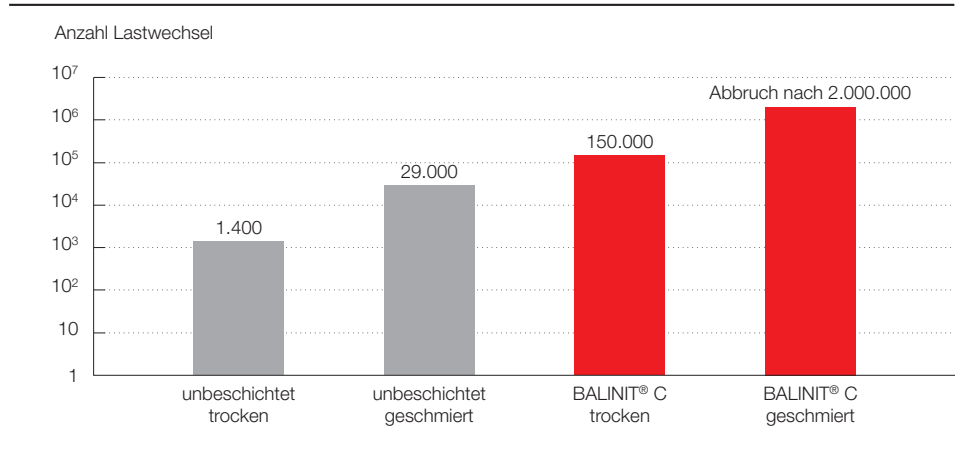
chenermüdung (Pitting) und Tribooxidation (Passungsrost). BALINIT® C mit 1.000 HK Härte wird bei geringerer abrasiver Beanspruchung, bei hohen Flächenpressungen, aber verhältnismäßig niedrigen Gleitgeschwindigkeiten eingesetzt. Wegen ihrer maßvollen Härte zeigt diese BALINIT® C-Variante ein ausgezeichnetes Einlauf- und Glättungsverhalten bei konstanter Gleitbeanspruchung. Mit höherer Härte (1.500 HK) ist BALINIT® C bei höheren Gleitgeschwindigkeiten einsetzbar und bietet besseren Schutz gegen abrasiven Verschleiß. BALINIT® C STAR bewährt sich bei sehr hohen Flächenpressungen auf weichen Substraten.

Besondere Reibungseigenschaften

Trockenlauf

Trockenlauf ist der am häufigsten untersuchte Fall. Dies nicht, weil es der häufigste Anwendungsfall ist, sondern weil er gut definiert und einfach zu messen ist. In ihm zeigt sich die Besonderheit der BALINIT® C (WC/C)-Beschichtung: das sehr gute Einlauf-Glättungsverhalten sowie geringfügiger Schichtübertrag und dadurch auch eine Glättung des Gegenkörpers. Gegenüber anderen Gleitwerkstoffen wie MoS₂, graphitbasierten Gleitlacken oder Ni-PTFE-Schichten kombiniert WC/C niedrige Reibung mit hoher Verschleißfestigkeit.

BALINIT® C bei Trockenlauf und Mangelschmierung (Zahnradtest)

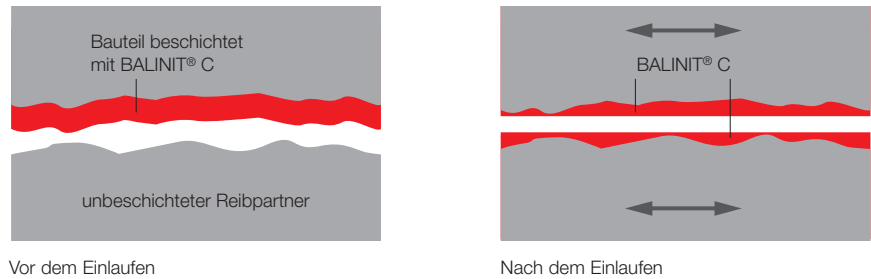


FZG-Test

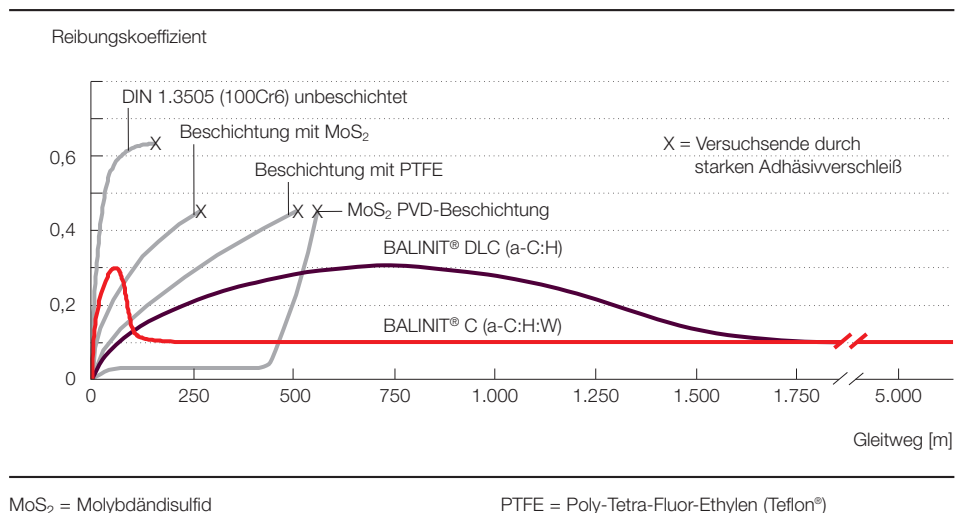
Drehzahl: 1.000 U/min
Flächenpressung: 1.000 N/mm²

Schmierstoff: Esso CL46B (auf pflanzlicher Basis)
Ölmenge: 1 Tropfen pro Minute
Quelle: IMM (TU Dresden)

Schichtglättung und Schichttransfer von BALINIT® C



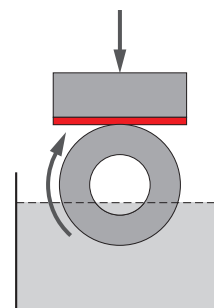
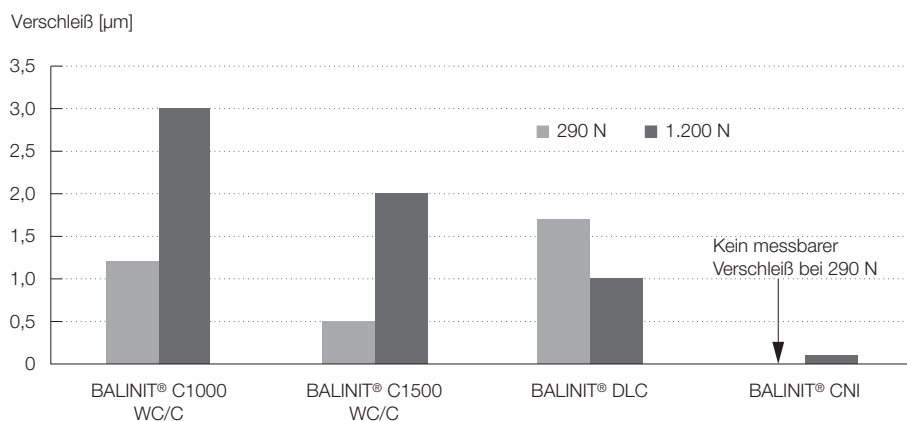
BALINIT® C im Reibungsvergleich



MoS₂ = Molybdändisulfid

PTFE = Poly-Tetra-Fluor-Ethylen (Teflon®)

Verhalten von BALINIT®-Schichten bei Mischreibung



Block-Ring-Test

Block beschichtet
Geschwindigkeit: 0,3 m/s
Last: 290 N / 1.200 N
Öl: 5W-30

Mischreibung

Viel häufiger als im Trockenlauf werden Kohlenstoffschichten in geschmierten Systemen eingesetzt. Das Verhalten von Schichten mit und im Vergleich zu Schmierstoffen wurde schon anhand eines Zahnrad-Fressversuchs gezeigt (Seite 22). Versuche des Institutes IMM der Technischen Universität Dresden zeigen, dass sowohl eine geringfügige Schmierstoffschicht als auch die WC/C-Beschichtung die Lebensdauer deutlich steigern können. Die besten Ergebnisse erzielt aber die Kombination von Schmierstoff und Beschichtung. Das bedeutet einerseits, dass eine Beschichtung eine reguläre Schmierstoffschicht nicht ersetzen kann, aber andererseits, dass sich Schmierstoff und WC/C-Beschichtung positiv ergänzen.

Mischreibungstests zeigen, dass dabei nicht nur Kohlenstoffschichten gut abschneiden, sondern auch Nitridschichten. Insbesondere Chromnitrid kann Kohlenstoffschichten sogar überreffen.

Schichten und Additive

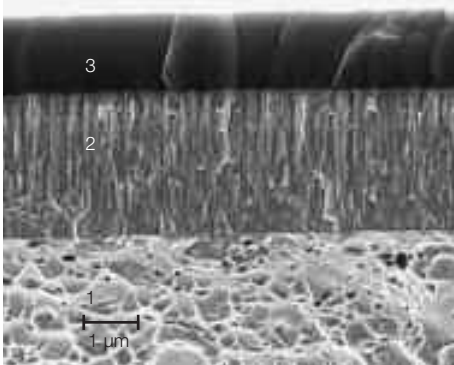
In geschmierten Systemen werden zur Verschleißminderung vielfach Additive eingesetzt. Seit einigen Jahren gibt es Anstrengungen, die Wirkung von Additiven bei der Anwendung mit beschichteten Teilen zu ermitteln. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Auswirkungen eher geringfügig sind. Manchmal ergänzen sich Schicht (meist wurde WC/C untersucht) und Additive positiv, manchmal negativ. Beispielsweise formen Hochdruckadditive auf Schwefelbasis mit dem Wolfram der WC/C-Beschichtung WS₂-Verbindungen, die ähnlich MoS₂ reibungsmindernd wirken. Dies wurde bei kurzen Laufzeiten, hoher Pressung und geringer Gleitgeschwindigkeit gemessen.

In den meisten Fällen hat die Beschichtung die robustere und dauerhaftere Wirkung. Dies verwundert nicht, ist doch die Beschichtung als gleichmäßige und zugleich harte, verschleißfeste Schicht aufgebracht, wohingegen Additive nur als kleine, weiche Partikel und nur bei Belastung zur Wirkung kommen.

Für die Zukunft zeichnen sich zwei Trends ab: erstens werden Additive aus Gründen des Umweltschutzes reduziert eingesetzt und durch Beschichtungen ersetzt werden. Andererseits werden Additive getestet und entwickelt werden, die im Zusammenwirken mit PVD-Schichten mehr Leistung bringen als eine dieser Maßnahmen allein.

Einsatz

BALINIT® C wird im gesamten Maschinenbau, im Motoren- und Getriebebau sowie in der Fluidtechnik eingesetzt. Auch ermöglicht die Schicht die Funktionssicherheit von Systemen, in denen Schmierstoffe nicht erlaubt sind (Kälte-, Vakuum-, Reinraum- oder Lebensmitteltechnik). BALINIT® C eignet sich besonders für Einsatz- und Wälzlagerstähle, da die Beschichtung bei Temperaturen unter 200 °C erfolgen kann.



Typischer Aufbau einer BALINIT®-Multifunktionsschicht der Version STAR:

- 1 Grundwerkstoff (Bauteil)
- 2 CrN-Stützschrift
- 3 Tribologisch wirksame Kohlenstoffschrift

BALINIT® DLC BALINIT® DLC STAR

Eigenschaften

BALINIT® DLC ist eine reine, metallfreie, amorphe Kohlenstoffschrift ($a\text{-C:H}$), die nur Kohlenstoff und Wasserstoff enthält. Ihr Diamant-Bindungsanteil (sp^3) ist höher als bei den BALINIT® C-Schichten. Die Schicht ist deshalb sehr hart und kompakt (>2000 HK). Sie ist auch chemisch äußerst stabil und erzielt einen Trockenreibwert von 0,1 bis 0,2. Dank einer speziellen Beschichtungstechnologie ist die Haftung trotz hoher Eigenspannungen sehr gut. Für extreme Lastbeanspruchungen kann die Kohlenstoffschrift mit einer metallischen Stützschrift (CrN) kombiniert werden (BALINIT® DLC STAR).

Nutzen

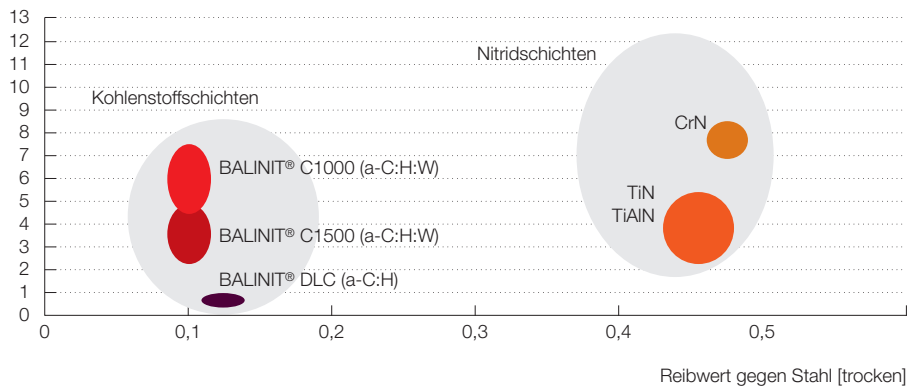
BALINIT® DLC widersteht höchsten Verschleißbeanspruchungen und hohen Relativ-Geschwindigkeiten. Die Stärken der Schicht liegen im Schutz gegen hohe Abrasion, Tribooxidation und Adhäsion (Fressen). Die Schicht ermöglicht Flächenpressungen, die unter normalen Einsatzbedingungen schnell zum Fressen und zu Kaltverschweißungen führen. Reibungsverluste werden auf ein Minimum reduziert, die Korrosionsbeständigkeit wird verbessert. BALINIT® DLC STAR steigert die Lasttragfähigkeit der harten DLC-Schichten.

Verschleißkoeffizient und Reibung

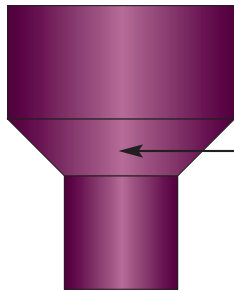
Werden Bauteile durch Gleitverschleiß beansprucht, spielt die Kombination von geringer Reibung und hohem Abrasivwiderstand die entscheidende Rolle. Die Reibung wird im Trocken-Gleittest mit dem Stift-Scheibeverfahren gemessen. Der Abrasivwiderstand wird mit dem Kalotten-Verschleißtest ermittelt. Bei diesem rotiert eine Stahlkugel auf der Oberfläche, durch Zugabe von Diamantpaste gräbt sich die Kugel kalottenförmig in die Schicht. Die niedrigsten Reibwerte und Verschleißraten und damit die besten Voraussetzungen für Anwendungen mit Gleitverschleiß erreichen BALINIT® DLC-Schichten.

Verschleißkoeffizient und Reibwert

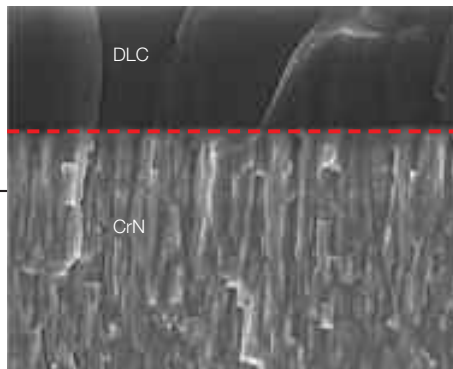
Verschleiß-Koeffizient [$10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$]



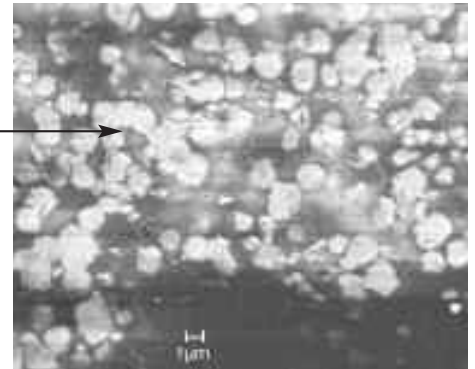
BALINIT® DLC STAR für Ventilsitze



Nadelsitz (schematische Darstellung)



Bruchfläche der BALINIT® DLC STAR-Schicht



Aufsicht auf die verschlissene Oberfläche
Helle Punkte: Spitzen der CrN-Körner
Dunkle Fläche: Eingelaufene DLC-Schicht

BALINIT® DLC STAR für Ventilsitze

Bei Komponenten wie z. B. Düsenadeln von Diesel-Einspritzsystemen sind Gleitverschleiß und Abrasion nicht die einzigen Belastungen. An den Kegeldichtflächen, die mit hoher Frequenz die Treibstoffmenge regeln, treten hohe zyklische Zug-Druckbelastungen in Verbindung mit extrem schnellen Mikrobewegungen auf. Dabei werden die Oberflächen nicht nur durch Reibung und Abrieb, sondern auch stark durch Oberflächenermüdung beansprucht. Bei solchen Belastungen bewähren sich sowohl die harte Multifunktionsschicht BALINIT® DLC STAR

als auch Nitridschichten. Bei der BALINIT® DLC STAR-Schicht sorgt die DLC-Schicht für ein gutes Einlaufverhalten, während der Verschleiß in der Regel am Interface CrN-DLC gestoppt wird. Dies ist in der REM-Aufnahme deutlich zu sehen. Die weißen Flecken zeigen die Spitzen der kolumnaren CrN-Kristalle, die umgebenden dunklen Stellen die eingelaufene DLC-Schicht.

Einsatz

Motorsport, Automobil- und Textilindustrie, Mess-Systeme, Pumpen, Dichtungen, Ventile sowie andere Präzisionsbauteile, die hohen Verschleißschutz und hohe Oberflächengüte erfordern, sind bewährte Anwendungen für BALINIT® DLC-Schichten. Ihre Vorzüge spielt die Schicht auch auf hochbelasteten Komponenten in modernen Diesel-Einspritzsystemen aus. BALINIT® DLC STAR verbessert Leistung und Standfestigkeit von Komponenten des Ventiltriebs, von Kolbenbolzen und Komponenten in Hochdruckpumpen entscheidend.

BALINIT® CNI

Eigenschaften

BALINIT® CNI ist eine Chromnitridschicht (CrN), die dank eines speziellen Beschichtungsverfahrens besonders dicht und glatt ist. Die Rauigkeitszunahme R_a liegt mit $< 0,02 \mu\text{m}$ unterhalb der üblichen Fertigungstoleranzen und die Schichthärte ist mit 1.750 HK wesentlich höher als bei galvanisch hergestelltem Hartchrom (ca. 1.000 HK).

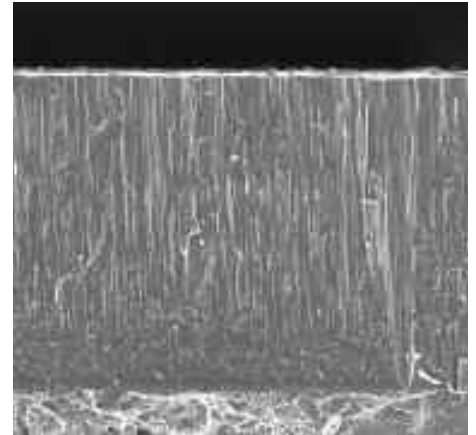
Nutzen

Die mit BALINIT® CNI beschichteten Teile überzeugen durch hohe Verschleißfestigkeit und gutes Gleitverhalten bei Mangelschmierung und starker mechanischer Beanspruchung von Bauteilen. Gleichzeitig wird die Korrosionsbeständigkeit verbessert. Da die Beschichtungstemperatur unter 250°C liegt, kann ein breites Spektrum von Werkstoffen beschichtet werden. Es entstehen konturentreue Schichten, die als letzter Schritt in der Fertigung präziser Teile aufgebracht werden können und keine zusätzliche Nachbearbeitung erfordern. Durch das angewendete Produktionsverfahren fallen außerdem keine umweltbelastenden Emissionen und Rückstände an.

Einsatz

Das Anwendungsspektrum von BALINIT® CNI reicht von diversen Verschleißschutz-Anwendungen im Maschinenbau über die Hydraulik (Kolben) bis hin zur Automobilindustrie (Komponenten des Ventiltriebs, Kolbenringe) und Flugzeugindustrie. Darüber hinaus ist BALINIT® CNI lebensmittelecht, d.h. es kann auch auf Teile aufgebracht werden, die direkt mit Lebensmitteln in Kontakt kommen. Weitere Anwendungen finden sich überall dort, wo bisher dünne galvanische Chrom- und Nickelschichten eingesetzt wurden. Aufgrund seines speziellen Herstellungsverfahrens hat sich BALINIT® CNI auch als hochleitfähiges Material bewährt und zeigt eine exzellente chemische Stabilität im elektrischen Kontaktwiderstand. So können auch unter aggressivsten Umgebungsbedingungen elektrische Leitfähigkeiten bei chemischen Elektroden, Heißkontakten und Anwendungen in Brennstoffzellen sichergestellt werden.

Eine wichtige Eigenschaft von PVD-Schichten ist die geringe Schichtdicke. Damit grenzen sich PVD-Schichten von konventionellen Verfahren der Galvanik oder der thermischen Spritztechnik ab. Allerdings werden die Lücken zwischen den Verfahren zunehmend durch dünnere Galvanikschichten als auch durch dickere PVD-Schichten geschlossen. So werden heute bis zu $50 \mu\text{m}$ dicke CrN-Schichten auf relativ präzise Teile aufgebracht, die einem erhöhten Abrasions- oder Korrosionsverschleiß ausgesetzt sind. Typische Beispiele sind Schichten für Kolbenringe, Pumpen für abrasive Medien sowie Komponenten von Textilmaschinen (Komponenten mit Faserkontakt oder Fadenführungen).

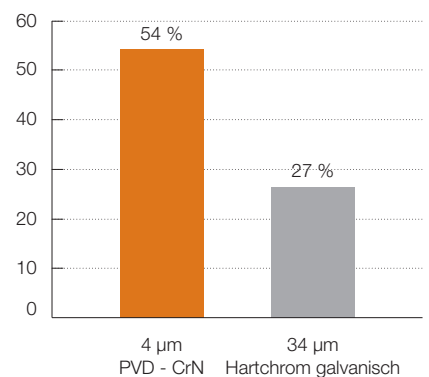


Schichtaufbau BALINIT® CNI

Diese Chromnitridschicht zeichnet sich nicht nur durch hohe Härte aus, sondern ist auch ausgesprochen dicht und glatt. Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der beschichteten Teile werden gleichermaßen verbessert.

Korrosionstest

Nicht korrodierte Fläche [%]



Vergleich von PVD-CrN mit galvanisch abgeschiedenem Hartchrom:
48h-Salzsprühstest nach DIN 50021 SS
Prüfkörper: Unbehandelter Wälzlagerstahl (100Cr6)
Oberflächengüte: $N2 / R_a = 0,04 / R_z = 0,4$

BALINIT® D

Eigenschaften

BALINIT® D ist eine Chrom-Nitrid-Schicht (CrN) und wird durch reaktives Ionplating oder Arc-Evaporation hergestellt. Dieser Fertigungsprozess wird bei Temperaturen von bis zu 500 °C durchgeführt.

Nutzen

BALINIT® D zeichnet sich durch eine günstige Kombination von Abrieb-, Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit aus. Im Vergleich zu Hartchromschichten ist die Schicht deutlich härter (etwa 1.750 HK) und haftet zugleich besser.

Einsatz

Mit BALINIT® D werden große, temperaturunempfindliche Komponenten (Gehäuse, Wellen) aus dem Maschinenbau, der Automobil- und der Luftfahrtindustrie beschichtet. Zu den beschichtbaren Werkstoffen zählen vor allem Titan und Sphäroguss, aber auch hoch angelassene Stähle.

Prall-Erosionsverschleiß

In der Fluidtechnik, beim Steuern des Durchflusses von abrasiven Medien, spielt der Prall-Erosionsverschleiß eine entscheidende Rolle, das metallische Gleiten tritt in den Hintergrund. Um dieser Art von Beanspruchung optimal zu widerstehen, müssen Oberflächen und Schichten hohe Härte und Zähigkeit kombinieren. Diesen Anforderungen werden Nitridschichten wie TiN und CrN oder DLC-Schichten mit einer Nitrid-Stützschiicht (BALINIT® DLC STAR) am besten gerecht.

BALINIT® A

Eigenschaften

BALINIT® A ist eine Titan-Nitrid-Schicht (TiN) und wird wie BALINIT® D durch Ionplating oder Arc-Evaporation hergestellt. Im Gegensatz zu BALINIT® D wird an Stelle von Chrom Titan eingesetzt.

Nutzen

BALINIT® A ist universell verwendbar und zeichnet sich durch hohe Härte (rund 2.300 HK), gute Gleiteigenschaften (Reibwert 0,4) und hohe Temperaturbeständigkeit aus.

Einsatz

Mit BALINIT® A lassen sich hoch angelassene Stähle sowie bestimmte niedriger angelassene Stähle beschichten. Die Schicht wird dort eingesetzt, wo ein hoher Abriebwiderstand, oft gepaart mit einer dekorativen Funktion, gewünscht ist.

BALINIT® FUTURA NANO

Eigenschaften

BALINIT® FUTURA NANO ist eine Titanaluminiumnitrid-Schicht (TiAlN), die mittels Arc-Evaporation bei Temperaturen bis zu 500 °C hergestellt wird. Gegenüber Chrom- oder Titanitridschichten sind dabei die Härte (3.300 HK), der Reibwert, die Eigenspannung und die maximale Anwendungstemperatur optimiert.

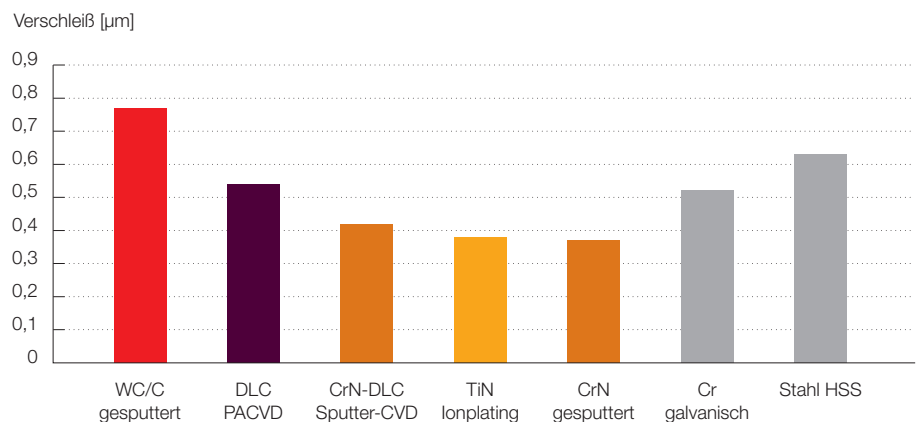
Nutzen

Die Schicht weist eine außerordentlich hohe Verschleiß-, Stoß- und Temperaturfestigkeit (bis zu 900 °C) auf.

Einsatz

BALINIT® FUTURA NANO wird vor allem für Motorkomponenten mit hoher Temperaturbelastung (Ventile) sowie für Fahrwerksbauteile eingesetzt, die starkem abrasivem Verschleiß unterliegen. Gute Resultate werden auch bei Komponenten von Strömungsmaschinen erzielt.

Nitrid- und Kohlenstoffschichten im Prall-Erosionsverschleiß



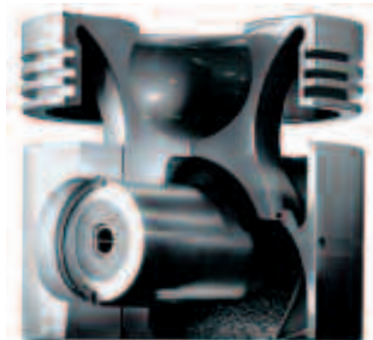
Test: Zentrifugalrad
200 µm-Partikel SiO₂, 80 m/s, 90° Auftreffwinkel

Vorteile der BALINIT®-Beschichtungen

Die charakteristischen Eigenschaften von BALINIT® eröffnen in der Anwendungspraxis viele Vorteile - und damit neue konstruktive Freiräume.

BALINIT®

- **erhöht Funktionssicherheit und Lebensdauer.** Viele Maschinenelemente tragen eine hohe Funktionsverantwortung. Schon wenige μm Verschleiß reichen hier zum Versagen. BALINIT®-Verschleißschutz garantiert höhere Funktionssicherheit, die Lebensdauer steigt.
- **schützt beim Trockenlauf.** Bei unerwünschtem Schmierstoffverlust sichern die niedrigen BALINIT®-Reibwerte den Betrieb bei Mangelschmierung und Notlauf. Die Schichten gewährleisten auch dort Funktionssicherheit, wo Schmierstoffe nicht erlaubt sind - etwa in der Kälte-, Vakuum-, Lebensmittel-, Reinraum- oder Weltraumtechnik.
- **ersetzt teure Werkstoffe.** Während der einfache Grundwerkstoff für die nötige Festigkeit sorgt, erzielt BALINIT® hohe Härte und gutes Gleitverhalten. Diese Aufgabenteilung ermöglicht es, teure Werkstoffe wie Hartmetall, Keramik oder Bronze durch kostengünstigeren Stahl zu ersetzen, z. B. Hartmetall bei Pumpenwellen, Bronzebuchsen in Hydraulikaggregaten und für Kolbenbolzen von Verbrennungsmotoren oder Lagermetalle von Gleitlagern.
- **ermöglicht mehr Leistung und weniger Gewicht.** BALINIT®-Schichten überzeugen vor allem dann, wenn gleichzeitig höhere tribologische Belastungen und höhere mechanische Beanspruchungen



Ersatz der Bronzebuchse durch Beschichtung des Kolbenbolzens.

- gefordert sind. BALINIT® C beispielsweise steigert die Tragfähigkeit von Zahnrädern - und ermöglicht so höhere Belastungen und eine kleinere, also leichtere Bauweise.
- **reduziert Schmierung und Wartung.** Ölschmierung treibt wegen der ständig nötigen Kontrolle und Instandhaltung die Betriebskosten in die Höhe. Eine Lebensdauer-Fettschmierung aber genügt selten den hohen tribologischen Anforderungen. Eine zusätzliche BALINIT®-Beschichtung verbessert das tribologische Verhalten und erzielt eine signifikante Verlängerung der Wartungsintervalle.
- **verringert die Korrosionsanfälligkeit.** Dank dieser Eigenschaft der BALINIT®-Schichten können hoch belastete Bauteile auch in ungünstigen Umgebungsbedingungen zuverlässig ihre Funktion erfüllen.
- **erübrigt aufwendiges Nacharbeiten.** Die geringen Dicken und die angepassten Temperaturen der BALINIT®-Beschichtungen verhindern Rauheitszunahmen und undefinierte Maßänderungen. Dank der konturen-treuen Abbildung und der homogenen Verteilung ermöglicht das Beschichten Fertigungstoleranzen von weni-

ger als $1 \mu\text{m}$ und stellt den letzten Arbeitsgang in der Herstellung präziser Bauteile dar.

- **schont die Umwelt.** Schmierstoffe und Additive belasten die Umwelt. Deshalb kommen zum Beispiel in der Fluidtechnik vermehrt Hydraulikflüssigkeiten auf Wasserbasis (HFA-Flüssigkeiten) zum Einsatz, in anderen Fällen auch Schmieröle ohne Additive. In der Klimatechnik wird außerdem auf ozon-neutrale Kältemittel umgestiegen. Entstehen dadurch Verschleißprobleme, so eröffnen BALINIT®-Schichten neue Lösungswege.

Umweltschonender Beschichtungsprozess

Mit dem Einsatz von BALINIT®-Beschichtungen setzen Sie auf eine fortschrittliche Technologie. Im Gegensatz zu vielen herkömmlichen Beschichtungsverfahren wie Phosphatieren, Nitrieren oder galvanisches und chemisches Beschichten (z. B. Hartchrom, Chemisch-Nickel), treten beim BALINIT®-Vakuumprozess keine umweltbelastenden Materialverbindungen, Emissionen und Rückstände auf. Falls Sie an Umwelt- oder Produktionsnormen gebunden sind oder eine Zertifizierung nach ISO 14001 anstreben, können Ihnen BALINIT®-Beschichtungen neue Lösungsansätze bieten.

Grenzen der BALINIT®-Beschichtungen

Trotz vieler Vorteile hat der Einsatz einer BALINIT®-Beschichtung in bestimmten Fällen Grenzen:

Ersatz für korrosionsarmen Stahl

Die Korrosionsbeständigkeit beschichteter Bauteile hängt vom Schicht- und Grundwerkstoff, vom korrosiven Medium sowie von der Oberflächenrauheit des Bauteils ab. BALINIT® verbessert zwar auch die Korrosionsbeständigkeit, jedoch sind PVD-beschichtete unlegierte Stähle kein Ersatz für korrosionsarmen Stahl. Denn korrosive Medien können durch kleinste lokale Defekte in die dünnen Hartstoffschichten dringen und auf dem Grundwerkstoff Lochkorrosion verursachen.

Dauer-Trockenlauf

BALINIT®-Schichten steigern die Lebensdauer von Präzisionsbauteilen in allen Reibungszuständen: bei hydrodynamischer Schmierung, Mischreibung und Trockenlauf. Die Beschichtung ermöglicht den Betrieb im Notlauf, erreicht aber nicht den Reibwert eines Ölfilms und kann eine Schmierung in hoch belasteten Tribosystemen daher nicht dauerhaft ersetzen (fehlende Kühlwirkung).

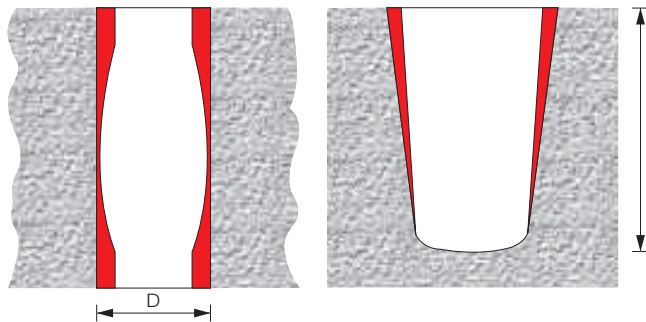
Starker Abrasivverschleiß

Sind zum Beispiel selbst Hartmetalle einigen Zehntel Millimetern Verschleiß ausgesetzt, bieten dünne Hartstoffschichten trotz ihrer höheren Härte in der Regel nur eine geringfügige Verbesserung.

Ungünstige Geometrie der Bauteile

Tiefe Bohrungen sowie enge, tiefe Schlitz- und Nuten (Kavitäten) lassen sich aus physikalisch-technischen Gründen nur bedingt beschichten.

Beschichtbarkeit von Innenkonturen



Als Faustregel für eine akzeptable Schichthaftung und Schichtdicke gilt: Die Öffnung (Durchmesser D) sollte größer sein als die zu beschichtende Tiefe (Länge L).

Vom Problemlöser zum Konstruktionselement

Leistungspotenziale und Einsatzmöglichkeiten von BALINIT®-Schichten sind heute bei weitem nicht ausgeschöpft. Nur eine frühzeitige und konsequente Betrachtung des gesamten Tribosystems mit allen beteiligten Elementen, deren Eigenschaften sowie den Wechselwirkungen zwischen den Reibpartnern, führt zu einer Maximierung des Beschichtungserfolges. Die Antwort dazu bietet ausgeklügeltes **Surface Engineering**, das Balzers Ihnen bereits in der frühen Konstruktionsphase anbietet.

Beschichtung als Konstruktionselement

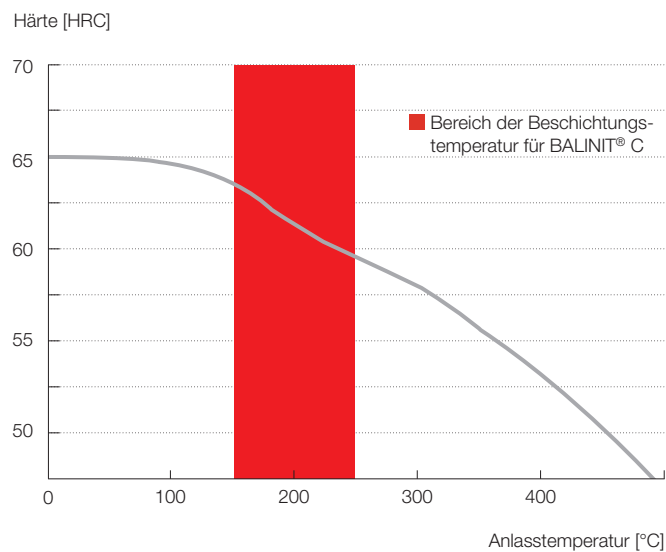
Wer die Potenziale von Verschleißschutzschichten vollständig ausschöpfen will, sollte sich bereits in der Konstruktionsphase damit befassen. Denn dann lassen sich Bauteil-Gestaltung, Fertigungsverfahren, Werkstoffwahl und Wärmebehandlung optimal mit einer hoch wirksamen Beschichtung in Einklang bringen. So schafft eine Beschichtung auch konstruktive Freiräume für ein leistungsfähigeres System.

Werkstoffe richtig wählen

Das Beschichten von Stählen mit PVD- bzw. PACVD-Verfahren ist grundsätzlich uneingeschränkt möglich. Dabei gilt für jeden Werkstoff: Die Temperatur der letzten Wärmebehandlung - bei Stählen ist dies meist die Anlasstemperatur - muss über der Beschichtungstemperatur liegen, da die Beschichtung der letzte Fertigungsschritt ist.

Maschinenbauingenieure wählen für hoch belastete Bauteile meist gehärteten unlegierten Stahl (z.B. Kugellagerstahl DIN 1.3505 / 100Cr6). Das ist ein guter Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und Festigkeit. Die wichtigsten PVD- und PACVD-Verfahren haben in ihrer Prozessdefinition darauf Rücksicht genommen. Die Beschichtungen werden im Bereich der Anlasstemperatur zwischen 150 °C und 250 °C durchgeführt. Eine Mindesttemperatur beim Beschichtungsstart ist für eine gute Schichthaftung erforderlich (ca. 100 °C bis 150 °C). Während des Beschichtungsprozesses kann die Temperatur, je nach Teilemasse und Chargenbelegung, steigen. Die Beschichtungstemperatur soll dabei die Anlasstemperatur nicht oder nicht zu stark überschreiten, damit keine unzulässige Härtereduktion stattfindet. In der Praxis wird zugun-

Abstimmung von Anlass- und Beschichtungstemperatur



Anlassdiagramm DIN 1.3505 (100Cr6)

ten robuster Prozesse und guter Schichthaftung häufig eine geringfügig höhere Temperatur und ein leichter Härteabfall akzeptiert (2-5 HRC). Es wird empfohlen, diese Werte in den Qualitätsvereinbarungen festzulegen und zu dokumentieren.

Auf den folgenden Seiten finden sie Hinweise zur Wahl des geeigneten Werkstoffes sowie zur beschichtungsgerechten Konstruktion, Vorbehandlung und Konservierung der Bauteile.

Werkstoffe und ihre Beschichtbarkeit

Stahl

Wälzlager-, Einsatz- und spezielle Werkzeugstähle sind typische Werkstoffe für Präzisionsbauteile. Diese sowie andere tief angelassene Stähle lassen sich bei Temperaturen bis 200 °C beschichten. Typische Vertreter sind Stähle wie z. B. DIN 1.3505 (100Cr6), DIN 1.7131 (16MnCr5).

Vergütungsstähle sowie **höher angelassene Werkzeugstähle** wie z. B. DIN 1.3343 (S6-5-2) oder HSS sind problemlos beschichtbar. Bei Präzisionsbauteilen finden Vergütungsstähle wegen der geringeren Härte jedoch seltener Anwendung.

Nitrierte Stähle sind beschichtbar, allerdings sind zuvor die porösen Teile der Verbindungsschicht abzutragen. Die Bauteile müssen leicht nachgeschliffen oder vor dem Beschichten mikrogestrahlt werden. Die gängigsten Nitrierverfahren sind Gas-, Salzbad- und Plasmanitrieren. Plasmanitrieren bietet die günstigste Basis für eine nachfolgende PVD- bzw. PACVD-Beschichtung, da sich dabei die Entstehung einer Verbindungsschicht unterdrücken lässt.

Austenitische Stähle sind mit allen PVD-/PACVD-Hartstoffschichten zu beschichten. Bei diesen weichen Stählen ist zu beachten, dass dünne Schichten zwar Reibung und Verschleiß reduzieren, die Deformationsfestigkeit aber nicht erhöhen.

Allgemeine Baustähle können mit allen PVD-/PACVD-Hartstoffschichten beschichtet werden. Wegen ihrer geringen Festigkeit und Stützwirkung kommen diese typischen Konstruktionsstähle aber für Präzisionsbauteile nur selten zum Einsatz.

Gusseisen

Gusseisen eignet sich von der Temperatur her gut zum Beschichten. Die tribologischen Bauteil-Eigenschaften lassen sich durch eine Beschichtung verbessern. Graphiteinschlüsse im Grundwerkstoff haben jedoch Einfluss auf den Schichtaufbau.

Nichteisen-Metalle

Nickel- und Titanlegierungen sind gut beschichtbar und werden hauptsächlich für Sonderanwendungen wie Korrosionsschutz oder Leichtbauweise eingesetzt.

Kupfer-, Magnesium- oder Aluminiumlegierungen sind in speziellen Fällen beschichtbar. Bei der Legierungsauswahl sind die Aushärtebedingungen wichtig. Empfohlen wird eine Warmaushärtung bei der maximal möglichen Temperatur. Nichteisenmetall-Legierungen haben eine geringe Härte und Stützwirkung bei hohen Flächenpressungen. Daher ist ihr Einsatz auf werkstoffgerechte Beanspruchungen begrenzt.

Messing ist nur nach vorheriger chemischer Vernickelung beschichtbar.

Aluminiumlegierungen weisen natürliche oder künstliche (hartanodisierte) Oxidschichten auf. Aluminiumlegierungen ohne Hartanodisierung können auf zwei Arten beschichtet werden: Bei einer chemischen Vorvernickelung

(es reichen 5 µm) sind sie in Standardprozessen beschichtbar. Ohne Vorvernickelung muss in Spezialprozessen beschichtet werden.

Verchromte und vernickelte Metalle sind prinzipiell beschichtbar. Der Einsatz solcher Galvanik-PVD-Verbundschichten ist aufgrund der begrenzten Haftung der Galvanikschicht am Grundwerkstoff am sinnvollsten für die kombinierte Korrosions- und Verschleißbeanspruchung bei weniger hohen Belastungen.

Sinterwerkstoffe

Hartmetalle sind in der Regel ohne Einschränkung beschichtbar. Dabei sind jedoch die mechanischen Bearbeitungsverfahren (z. B. Schleifen) anzupassen. Bei der Bearbeitung von Hartmetallen sollten Kühlschmierstoffe mit Kobalt-Inhibitoren eingesetzt werden. Nicht beschichtbar sind **Sintermetalle** mit offenen Poren, da Rückstände aus dem Sinterprozess im Vakuum ausgasen und die Plasma-Prozesse stören.

Andere Werkstoffe

Geeignete, z. B. leitfähige bzw. metallisierte **Keramiken** lassen sich beschichten. Oxidkeramiken (z.B. Aluminiumoxid) sind in Spezialprozessen beschichtbar. Diese Prozesse erlauben trotz der isolierenden Oberfläche eine Beschichtung.

Kunststoffe sind wegen ihrer fehlenden Leitfähigkeit und Temperaturempfindlichkeit nicht mit BALINIT® beschichtbar.

Beschichtbare Werkstoffe

Werkstoffe	BALINIT® C a-C:H:W	BALINIT® DLC a-C:H	BALINIT® CNI CrN	BALINIT® D CrN BALINIT® FUTURA NANO TiAlN	BALINIT® A TiN
Stähle mit Wärmebehandlungstemperaturen > 500 °C					
Vergütungsstähle	+	+	+	+	+
Kaltarbeitsstähle	+	+	+	+	+
Warmarbeitsstähle	+	+	+	+	+
Schnellarbeitsstähle	+	+	+	+	+
Austenitische Stähle	+	+	+	+	+
Ausscheidungsgehärtete Stähle	+	+	+	+	+
Stähle mit Wärmebehandlungstemperaturen um 200 °C					
Wälzlagerstähle	+	+	+	□	□
Einsatzstähle	+	+	+	□	□
Härtbare Chromstähle	+	+	+	□	□
Tief angelassene Werkzeugstähle	+	+	+	□	□
Weitere Werkstoffe					
Allgemeine Baustähle	+	+	+	+	+
Nitrierte Stähle (nach Vorbehandlung)	+	+	+	+	+
Gusseisen	□	□	□	□	□
Verchromte Metalle	□	□	□	□	□
Vernickelte Metalle	□	□	□	□	□
Nickellegierungen	+	+	+	+	+
Titanlegierungen	+	+	+	+	+
Kupferlegierungen	□	□	□	□	□
Aluminiumlegierungen	□	□	□	□	□
Hartmetalle	+	+	+	+	+
Sintermetalle (nach Vorbehandlung)	□	□	□	□	□
Keramik	□	□	□	□	□
Kunststoffe	-	-	-	-	-

- + beschichtbar
 - nicht beschichtbar
 □ bedingt beschichtbar (auf Anfrage)

Härte und Festigkeit der Werkstoffe

Auch die Härte und Tragfestigkeit der Werkstoffe spielen bei der Beschichtung eine besondere Rolle, da typische PVD-/PACVD-Schichten nicht selbsttragend sind. Ein harter Grundwerkstoff bietet der Schicht eine ausreichende Stützwirkung und verhindert das Einbrechen der Schicht („Eierschaleneffekt“).

Als **Faustregel** gilt deshalb: Je höher die Last im System, desto härter muss der Grundwerkstoff des zu beschichtenden Bauteils sein (> 45 HRC). Bei weichen Stählen kann Plasmanitrieren oder Einsatzhärten eine die Schicht stützende Randzone erzeugen. Um im Nachhinein keinen Härteverlust zu erleiden, muss die Anlasstemperatur über der Beschichtungstemperatur des Bauteils liegen. Es wird empfohlen, die Werkstoffhärte im Vergleich zum unbeschichteten Bauteil nicht zu reduzieren. In einem Tribosystem ist es vorteilhafter, den härteren der beiden Reibpartner zu beschichten.

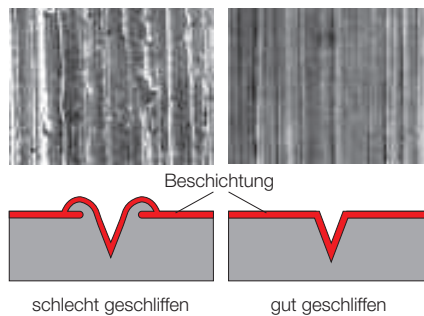
Die Oberflächengüte der Bauteile

Neben der Festigkeit der Bauteile beeinflusst auch ihr Oberflächenzustand die Leistungsfähigkeit einer Schicht. Als unerlässliche Voraussetzung für einen einwandfreien Beschichtungsprozess im Vakuum gilt deshalb:

Ein gut beschichtbares Bauteil ist geschliffen oder poliert, gut gereinigt und für den Transport konserviert.

Dabei sind folgende Details zu beachten:

- Die Oberflächen müssen metallisch blank sein. Korrodierte, brünierte, dampfangelassene oder ähnlich behandelte Oberflächen lassen sich nicht beschichten.
- Geschliffene Oberflächen dürfen keine Grate, Schleifrisse, Oxidhäute und Neuhärtezonen aufweisen.



- Die beim Schleifen eingesetzten Kühlmittel dürfen keine Calciumsulfonate, Bor- und Jodverbindungen oder Entschäumer auf Silikonbasis enthalten.
- Geschliffene, gehonete, polierte oder geläppte Flächen sind von Bearbeitungsmitteln und deren Rückständen zu befreien.
- Lötstellen sind frei zu halten von Lunkern, Flussmitteln und Cadmium.
- Sacklöcher und Innengewinde müssen frei sein von Härtesalzen und anderen Verunreinigungen.
- Späne, Wachs, Klebstreifen, Lacke und andere nichtmetallische Verunreinigungen sowie Schleifstaub, Rückstände von Reinigungsmitteln, Fingerabdrücke und dergleichen müssen von den Bauteilen entfernt werden.
- Die Bauteile sollten entmagnetisiert sein.

Die Rauigkeit spielt bei Reibungs- und Verschleißvorgängen eine zentrale Rolle. Je geringer die Rauigkeit, desto günstiger sind die tribologischen Eigenschaften. Allerdings steigen mit zunehmender Oberflächengüte auch die Kosten. Diese Regel gilt für unbeschichtete ebenso wie für zu beschichtende Oberflächen. Konstrukteure wählen für hoch belastete Präzisionsbauteile möglichst gut geschliffene Oberflächen ($R_z = 0,5$ bis $5 \mu\text{m}$). PVD-Schichten bilden die Oberflächentopographie exakt nach, es kommt zu einer sehr geringen Erhöhung der Rauigkeit.

Bei einer Beschichtung mit „weicheren“ Hartstoffschichten wie BALINIT® C (WC/C, ca. 1.000 HK) kann dank des sehr guten Einlauf- und Glättungs- sowie des guten Gegenkörperverhaltens die Rauigkeit im oberen Bereich (also 3 bis $5 \mu\text{m}$) gewählt werden. Bei den harten Nitrid- oder DLC-Schichten sollte die Rauheit R_z zwischen $0,5$ und $1 \mu\text{m}$ liegen, um nicht unzulässig hohen Gegenkörperverschleiß zu verursachen.

Bei PVD-Schichten ist die Rauheitszunahme meist vernachlässigbar. Sie beträgt bei Sputter-, Aufdampf-, und PACVD-Prozessen ca. $0,2 \mu\text{m}$ (R_z), bei Arc-Schichten ca. $2 \mu\text{m}$. Um Rauheitsspitzen (Droplets) bei Arc-Schichten wieder zu eliminieren, sind heute Verfahren wie nachträgliches Strahlen oder Bürsten etabliert.

Beschichtungsgerechtes Bauteil-Design

Schicht- gleich Funktionsfläche

Der Konstrukteur kann die Beschichtungs-Stückkosten entscheidend beeinflussen, wenn er die Beschichtung beim Bauteil-Design von Anfang an berücksichtigt. Die günstigste konstruktive Auslegung ist erreicht, wenn nur das Teil mit der Funktionsfläche beschichtet werden muss, wenn also andere Bauteil-Flächen nicht unnötig mitbeschichtet oder aufwendig abgedeckt werden müssen. Ein Beispiel (vgl. Abb.): Ist die Verzahnung als Funktionsfläche fest mit den Wellenzapfen verbunden, muss notgedrungen das gesamte Bauteil beschichtet werden. Eine günstigere Lösung ist die getrennte Herstellung von Verzahnung und Zapfen. Dies spart Platz in der Beschichtungsanlage und optimiert somit die Anzahl der Bauteile pro Charge. Nach der Beschichtung lassen sich beide Teile zusammenfügen oder durch Formschluss verbinden.

Die besten Beschichtungsergebnisse erhält man, wenn die konstruktiven Beschaffenheiten und Geometrien der Bauteile mit den physikalisch-technischen Gegebenheiten der Reinigungs-, Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesse in Einklang gebracht werden.

Bauteil-Beschaffenheit

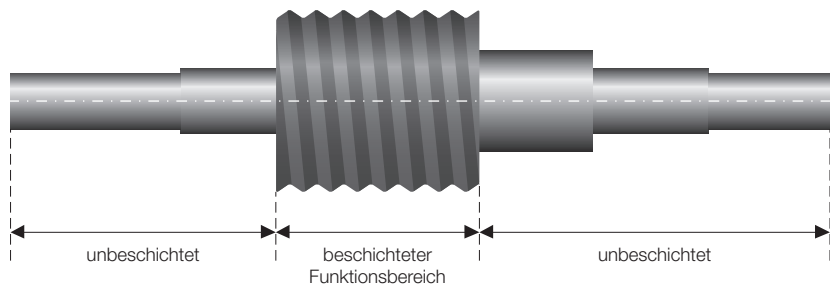
- Zum Beschichten werden die Bauteile auf einer Halterung befestigt. Die zur Fixierung benötigte Fläche bleibt unbeschichtet. Dies ist zu berücksichtigen.
- Flächen, die von Beschichtungen frei bleiben müssen, werden durch eine mechanische Maske abgedeckt. Ein optimales Bauteil-Design sollte dies erlauben, denn das Abdecken mit Pasten wie beim Nitrieren ist nicht möglich.
- Bereits gefügte, das heißt verklebte, verschraubte oder verpresste Bauteile, können nicht beschichtet werden, da die Fügeflächen im Vakuum ausgasen bzw. nicht ausreichend

gereinigt werden können. Schweißkonstruktionen sind vor dem Beschichten spannungsfrei zu glühen.

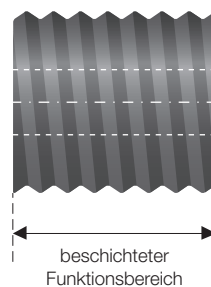
- Sacklochbohrungen erlauben Beschichtungen, allerdings darf die Bohrungstiefe nicht größer als der Durchmesser sein.

Geometrie, Abmessungen und Gewichte

Neben der Bauteilbeschaffenheit sind auch Geometrie und Gewicht zu berücksichtigen. Die maximal beschichtbaren Bauteil-Abmessungen und das maximale Bauteilgewicht werden von der Schichtwahl bestimmt. Als Grenzwerte gelten ca. 3.000 kg bzw. ein Durchmesser von 1.300 mm und eine Länge von 1.500 mm.



Nicht beschichtungsgerecht konstruiertes Bauteil: Weniger Teile pro Beschichtungs-Charge möglich, Maskieren (Abdecken) nötig.



Beschichtungsgerecht konstruiertes Bauteil: Mehr Teile pro Beschichtungs-Charge möglich.

Konservierung und Verpackung

Die Bauteile müssen gegen Rostbildung während des Transportes geschützt werden. Dies kann durch die Behandlung mit leicht wasserverdrängendem Öl erfolgen, welches sich nach der Anlieferung bei der alkalischen Reinigung rückstandsfrei entfernen lässt. Alternativ kann auch VCI-Papier (volatile corrosion inhibitor) in einer Vakuumverpackung verwendet werden. Nicht verwendet werden sollen unverdünntes Öl, Fett oder Wachs. Diese Konservierungsmittel sind nur schwer zu entfernen und würden die sensiblen Bäder in den Reinigungsanlagen zerstören.

Bei Verwendung von Kühlemulsionen in der Fertigung gilt es zwingend zu beachten, dass vor dem Konservieren die Bauteile sauber gereinigt werden. Dies muss mit einem wässrigen Prozess unter Verwendung von voll entsalztem Wasser (DI Wasser) geschehen. Je nach Wasserhärte kann sich sonst Kalk auf den Bauteilen ablagern, der in Kombination mit dem Konservierungsmittel dauerhafte und chemisch nicht mehr entfernbare Rückstände auf der Oberfläche bilden kann.

Die fertigungstechnische Bearbeitung mit Ölen hat sich als unproblematischer erwiesen, da die Gefahr von Rückständen auf den Bauteilen geringer ist.

Sachgerechte Verpackung schützt die Bauteile vor unerwünschten äußeren oder gegenseitigen Beschädigungen. Zu empfehlen ist eine Verpackung, die sich auch zum Rücktransport eignet und mehrfach verwendbar ist.

Bei Großserien empfehlen wir, die Fertigungsmedien und die Verpackung mit uns abzustimmen. Wir sind Ihnen dabei gerne behilflich.

Nicht nur die Bauteilkonstruktion lässt sich für optimale Beschichtungsergebnisse auslegen. Zur Leistungssteigerung von Bauteil und System ist auch die Wahl der auf die jeweilige Applikation abgestimmten Schicht entscheidend, wie im folgenden Kapitel deutlich wird. Dazu bietet Balzers sowohl bewährte Standardlösungen als auch für spezifische Bedürfnisse maßgeschneiderte Schichtvarianten an.

Maßgeschneiderte Lösungen

Arbeiten heute Konstrukteure und Design-Ingenieure an neuen und innovativen Entwicklungen, stehen Vorgaben wie leichtere Bauweise, höhere Leistung bei gleichzeitig kleineren Abmessungen sowie umweltschonendere Konzepte mit möglichst wenig Schmier- und Wartungsaufwand im Vordergrund. Mit den Forderungen an die Systeme wachsen jedoch auch die Ansprüche an die Komponenten. Klassische Werkstoffe stoßen dabei schnell an ihre Grenzen. Mit anwendungsgerecht abgestimmten BALINIT®-Hartstoffschichten lässt sich ihr Leistungspotenzial deutlich steigern. In manchen Fällen wurden neue konstruktive Lösungen überhaupt erst durch BALINIT® möglich.

Motorentchnik

Weniger Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß zum Schutz der Umwelt bei gleichzeitig mehr Leistung und Fahrkomfort - auf diese Herausforderungen reagieren Fahrzeug- und Motoren-Entwickler mit entsprechenden Motoren-Innovationen:

- Benzinmotoren mit Direkteinspritzung, variabler Ventilverstellung, kleinerem Hubraum und Turboaufladung sowie Brennstoffzellen-Hybridtechnik;
- Dieselmotoren mit Hochdruck-Einspritzung, Rußpartikelfiltern und Abgasrückführung, betrieben mit schwefelfreien Treibstoffen.

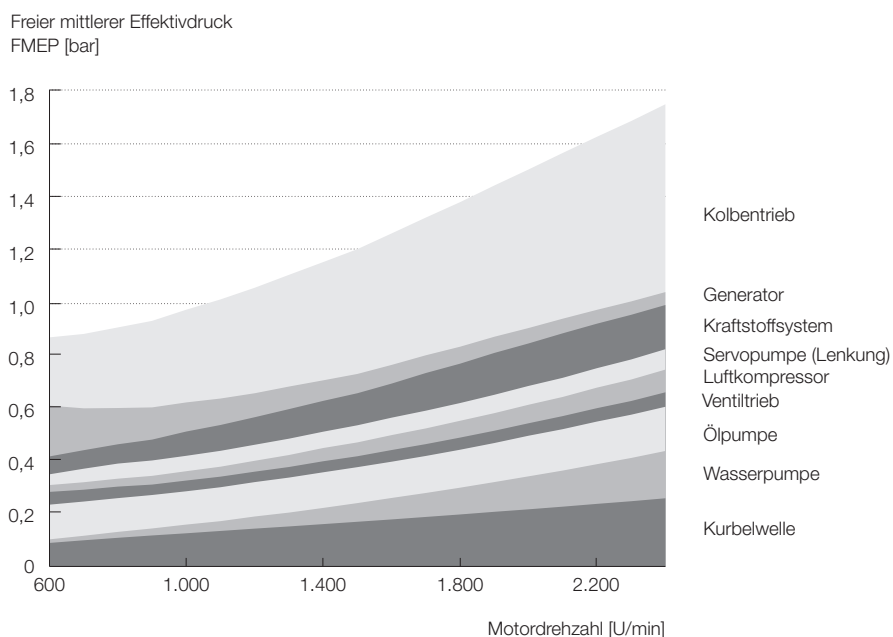
Der Härtestest im Motorsport ist dabei oft der erste Schritt, bevor beschichtete Teile in die Serienproduktion der Automobilindustrie Eingang finden. Mechanische Komponenten werden im Rennsport auf höchste Belastbarkeit ausgelegt und sollen gleichzeitig möglichst leicht sein. BALINIT®-Schichten tragen maßgeblich dazu bei, dass diese Teile im harten Renn-einsatz zuverlässig funktionieren und eine längere Lebensdauer erreichen.

Motoren

Konstruktive Neuerungen zur Steigerung der Effizienz (wie etwa leichtere Aluminium-Motorblöcke) erfordern einen großen Entwicklungsaufwand. Weniger Beachtung fand bisher die Reduktion motorinterner Reibung und ihre Auswirkung auf die Nennleistung. Reibungsverluste in Motoren werden beispielsweise durch Pleuel-Verbindungen, Pleuellager, Pleuellagerbolzen, Pleuellagerpleuel, Pleuellagerpleuelbolzen und Ölpumpen verursacht. Die

Reduktion der Reibung bringt nicht nur Leistungszuwächse sondern auch Potenzial zur Senkung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß. Sowohl in der Fahrzeug-Serienfertigung als auch im Rennsport bewähren sich Lösungen mit BALINIT® Kohlenstoff- bzw. Metallschichten. Das sehr gute Verschleiß- und Reibungsverhalten dieser Schichten steigert die Leistung und Lebensdauer von Motoren-Bauteilen, zum Beispiel von Pleuellagern, Pleuellagerbolzen und Pleuellagerpleuelbolzen.

Reibungsanteile eines LKW-Dieselmotors



Dieses Ergebnis eines Testprogramms zeigt, wie stark einzelne Motorenkomponenten Reibungsverluste erzeugen und dadurch den Treibstoffverbrauch eines LKW-Dieselmotors beeinflussen.
Quelle: IVECO Motorenforschung AG

Ventiltrieb

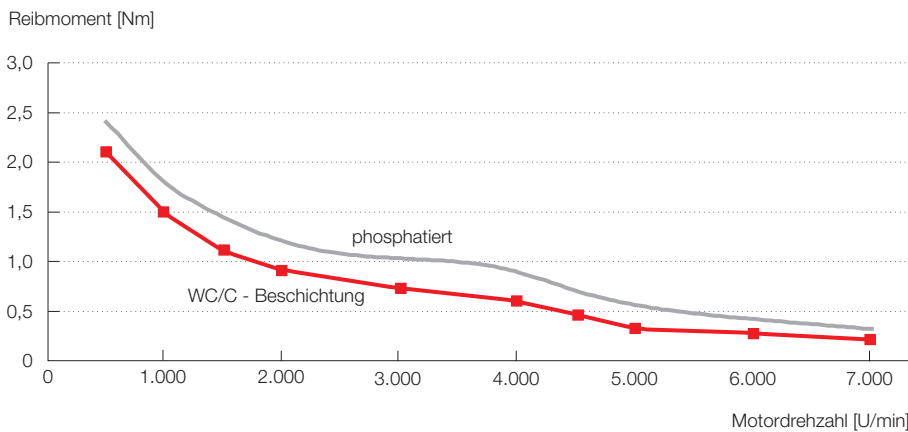
BALINIT® C und BALINIT® CNI empfehlen sich zur Großserienbeschichtung von Tassenstößeln. Zeigt die WC/C-Schicht ihre besonderen Vorteile durch die niedrige Reibung, überzeugt die CrN-Schicht vor allem durch die gute Benetzbarkeit bei gleichzeitig sehr feiner Oberfläche. Beide Schichten

sind hinsichtlich Lebensdauer und Verschleiß dem konventionellen Phosphatieren weit überlegen. In Sachen Reibung und Verschleißreduktion setzen sich BALINIT®-Schichten u.a. auch im Motorrennsport durch. Dort wird BALINIT® DLC STAR serienmäßig für die Beschichtung von Schleppebeln und Tassenstößeln eingesetzt.



Die Beschichtung von Motorenteilen reduziert die Reibung und steigert dadurch Leistung und Effizienz der Antriebsaggregate.

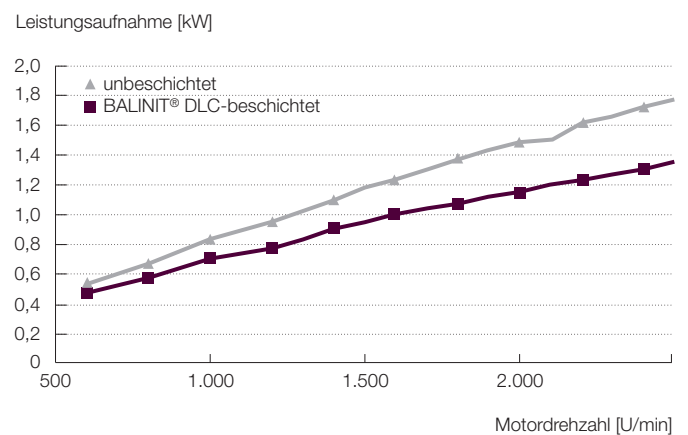
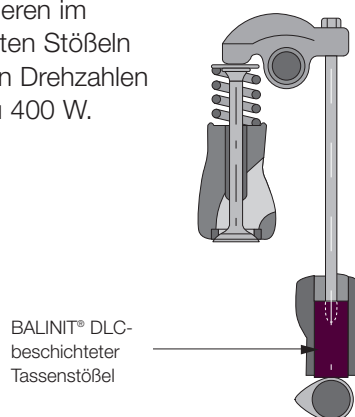
Reibungsminderung im PKW-Ventiltrieb durch Kohlenstoff-Beschichtung der Tassenstößel



Prüfmethode: Zylinderkopf-Prüfstand geschleppt
Quelle: Ford / INA

Auch bei LKW's werden messbare Vorteile erzielt: Auf einem Motorprüfstand wurden DLC-beschichtete Stößel getestet. Sie reduzieren im Vergleich zu unbeschichteten Stößeln aus Gusseisen bei höheren Drehzahlen die Reibleistung um bis zu 400 W.

Reduzierte Leistungsaufnahme im Ventiltrieb mit BALINIT® DLC-beschichteten Tassenstößeln (LKW)



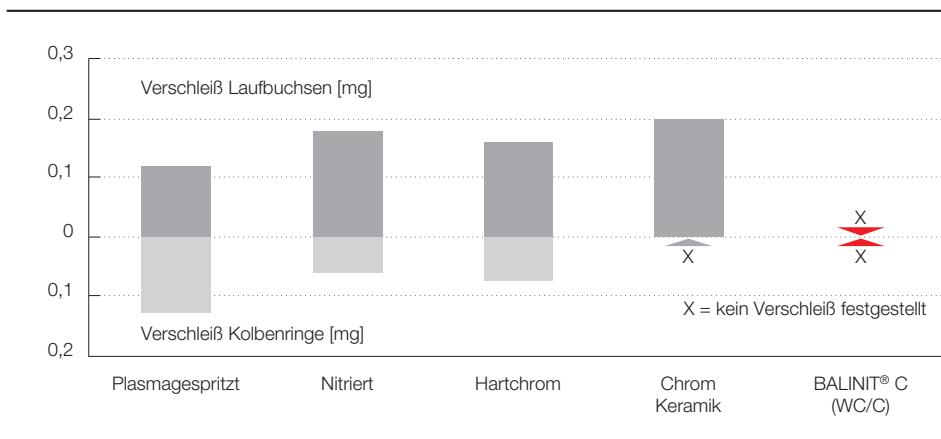
Kolbenringe

Kolbenringe tragen wesentlich zu Reibungsverlusten in Motoren bei, steigende Zünddrücke und Abgasrückführung verursachen zusätzlich Verschleiß. Dies eröffnet verschiedensten Verschleißschutzschichten entsprechendes Verbesserungspotenzial. Neben bewährten Kolbenringbeschichtungen

wie Hartchrom und Molybdän sowie Nitrierschichten für Stahlringe etablieren sich zunehmend hartstoffdispergierte Galvanikschichten und PVD-Schichten. Ein Referenzversuch hat gezeigt, dass BALINIT® C zu den besten Lösungen zählt. Im Vergleich mit den wichtigsten Standardschichten zeigt BALINIT® C den geringsten Ring- und Zylinder Verschleiß.



Verschleiß von Laufbuchsen bei verschieden behandelten Kolbenringen



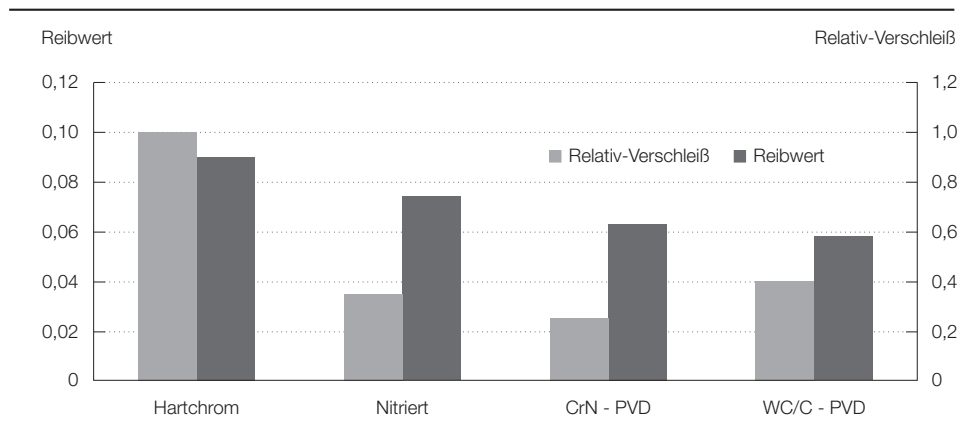
Tribometer: Cameron-Plint TE77
 Last: 8 MPa
 Temperatur: 80 °C
 Testzeit: 6 Stunden
 Frequenz: 10 Hz
 Laufbuchsen: Grauguss
 Öl: Lubrizol TH 53303

Jeweils nur Kolbenring-Oberfläche behandelt

Quelle: Scania AB

Bei der Simulation mit PKW-Kolbenringen wurde festgestellt, dass PVD-CrN und PVD-WC/C im Fresstest höhere Lasten ertragen als mit Hartchrom beschichtete oder nitrierte Ringe. Zusätzlich erreicht CrN den niedrigsten Verschleiß, WC/C die niedrigste Reibung. Im Motorentest werden diese Ergebnisse eindrücklich bestätigt: WC/C und CrN reduzieren die Reibleistung um 9 bis 20 % gegenüber Hartchrom beschichteten oder nitrierten Ringen (bei 2000 U/min).

Reibungs- und Verschleißtests von PKW-Kolbenringen



Testbedingungen (Modellversuch):
 Verschleißtest: 100 N, 600 cm/min, 60 min
 Reibungstest: 100 N, 100 cm/min
 Schmierstoff: Öl
 Zylinderbuchse: Gusseisen

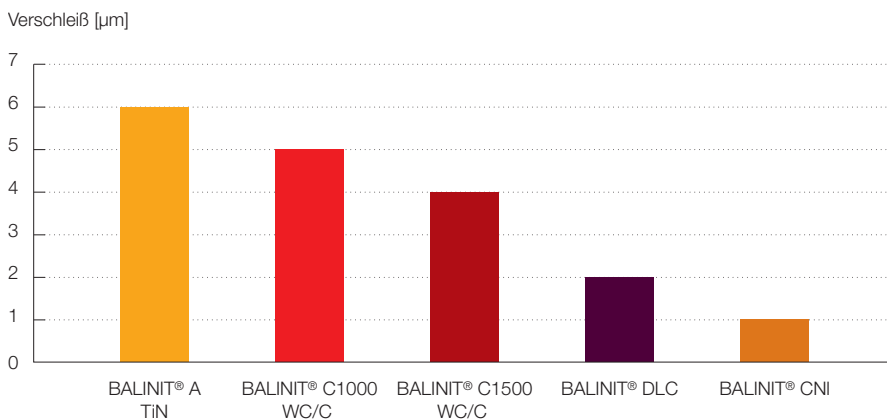
Ähnlich eindrucksvoll sind die Ergebnisse bei Kolbenringen in 2-Taktmotoren für Freizeit- und Sportmaschinen. Bei dieser Anwendung reichen teilweise selbst etablierte Chrom-Dispersionsschichten nicht aus und versagen durch Brandrisse. In einer Testreihe wurden verschiedene PVD-Schichten miteinander verglichen. Den niedrigsten Verschleiß erreichten gesputterte CrN-Schichten (BALINIT® CNI). Sie werden in einer Stärke von 10 µm serienmäßig eingesetzt.

Neben der Substitution konventioneller Kolbenringbeschichtungen dienen DLC- und WC/C- Schichten auch als Einlaufschichten auf nitrierten, verchromten oder flammgespritzten Kolbenringoberflächen.

Kolbenbolzen

Die hohen Einspritz- und Verbrennungsdrücke heutiger Diesel- und Rennmotoren erzeugen sehr hohe Flächenpressungen zwischen Kolbenbolzen und kleinem Pleuel-Auge. Dabei können die Bronze-Buchsen, die üblicherweise als Bolzen-Gleitlager verwendet werden, an ihre Deformationsgrenze stoßen. Die Beschichtung der Kolbenbolzen mit BALINIT® DLC oder BALINIT® DLC STAR übernimmt die Gleitfunktion der Buchsen und macht diese dadurch überflüssig. Sie ermöglicht auch die leichtere und steifere Bauweise der Pleuel. Außerdem werden durch BALINIT®-Beschichtungen Aufschmierungen in der Bohrung des Aluminiumkolbens wirkungsvoll unterdrückt.

Verschleiß von Kolbenringen in 2-Takt-Motoren

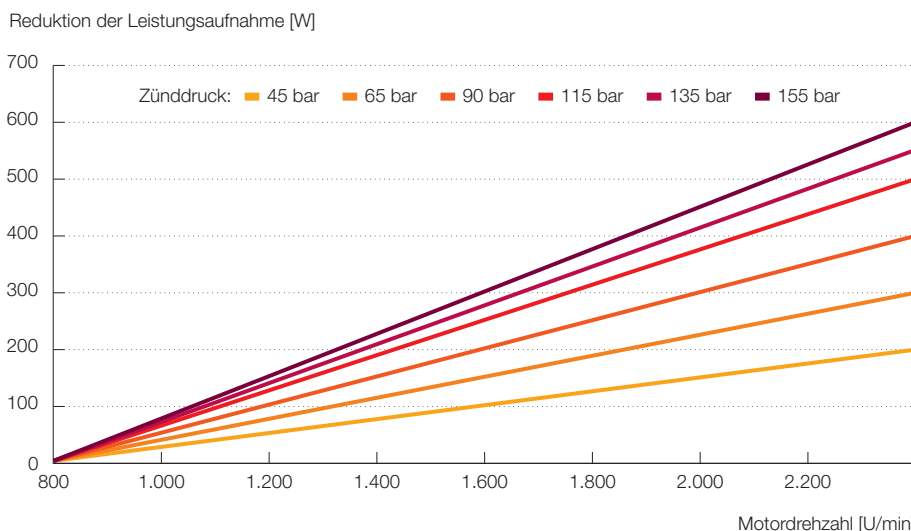


Laufzeit: 50 Stunden



Neben der Einsparung der Bronzebuchse und einer Verschleißreduzierung erreicht man mit PVD-beschichteten Kolbenbolzen auch eine deutliche Reduzierung der Reibung und damit eine Reduzierung der Motoren-Verlustleistung. In einer Testanordnung wurde die Motoren-Reibleistung bei hoher Drehzahl und hohem Zünddruck um bis zu 600 W reduziert.

Reibungsminderung BALINIT® DLC-beschichteter Kolbenbolzen (LKW)



Motorsport

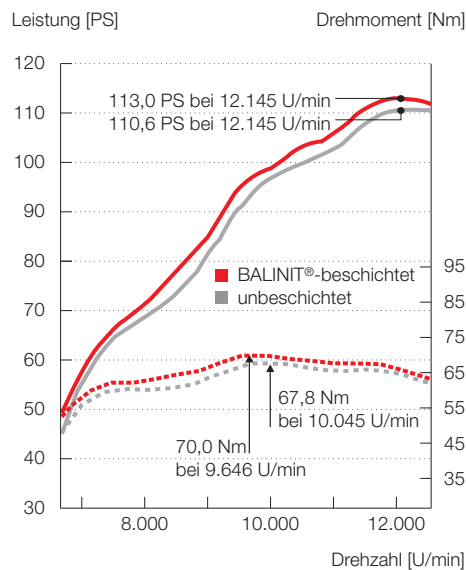
Innovative Lösungen im Motorsport sind häufig Vorreiter für Serienanwendungen im Kraftfahrzeugbau. Dies gilt auch für Beschichtungen. In fast allen Kategorien des Motorsports wird längst eine Vielzahl von PVD-beschichteten Komponenten eingesetzt, vor allem im Ventiltrieb, in der Kolbengruppe, in Getrieben und bei Chassis- und Aufhängungsteilen.

Verschleiß- und Reibungsreduktion bei Motorrädern

Die Beschichtung von Tassenstößel, Schwinghebel, Kolbenbolzen und Getriebeteilen führt bei Sport-Motorrädern sowohl zu einer höheren Verschleißfestigkeit als auch zu einer Leistungserhöhung. Bei einer Kawasaki Ninja wurden am Dynamometerprüfstand +2,2 % Leistung ermittelt. Heute werden serienmäßig Kolbenbolzen und Schwinghebel mit BALINIT® DLC beschichtet.



Reibungsreduktion



Motorrad: Kawasaki Ninja
 Beschichtete Teile:
 Tassenstößel: BALINIT® DLC
 Kolbenbolzen: BALINIT® C (WC/C)
 Getriebe: BALINIT® C (WC/C)

Leistungsgewinn: 2,4 PS = 2,2 %
 Drehmomentzunahme:
 2,2 Nm = 3,3 % bei tieferer Drehzahl



Tassenstößel eines Kawasaki-Rennmotorrades.
 Links: unbeschichtet nach ca. 250 km; starker Verschleiß erfordert Austausch.
 Rechts: BALINIT® DLC-beschichtet nach ca. 1.000 km; fast kein Verschleiß, noch im Einsatz.

Stoßdämpfer

Die Beschichtung von Stoßdämpfern sieht nicht nur gut aus. Die ausgezeichneten Gleiteigenschaften von PVD-Schichten sorgen auch für besseres Ansprechverhalten (reduziertes stick slip) und verbessertes „Anti-diving“-Verhalten. Es werden TiN, DLC und TiAlN eingesetzt.



BALINIT® FUTURA NANO (TiAlN)-beschichtetes Tauchrohr für Motorräder

Formel 1

Nicht wegzudenken sind dünne Hartstoffschichten aus Formel 1-Boliden. Extrem belastete Motorenteile wie Nockenwellen, Schwinghebel, Ventile und Pleuel werden mit DLC- und Nitridschichten versehen, um die hohen Drehzahlen, Flächenpressungen und die geforderten, immer länger werdenden Einsatzzeiten zu überstehen.

Bei Pleueln wird das kleine Pleuelauge beschichtet, um einen buchsenfreien Betrieb zu ermöglichen. Die Reibpartner für solche Pleuelaugen sind meist DLC-beschichtete Kolbenbolzen. Die Seitenflächen der Pleuel werden beschichtet, um möglichst geringe Reibungsverluste an den Pleuelwellen sicherzustellen.

Ventile werden am Sitz, an der Spitze und am Schaft hoch beansprucht. Bei Auslassventilen bewähren sich duktile CrN-Schichten (z.B. BALINIT® CNI), bei Einlassventilen WC/C oder DLC. Im Ventiltrieb werden DLC-Schichten, meist mit Nitrid-Grundschrift (z. B. BALINIT® DLC STAR) eingesetzt.

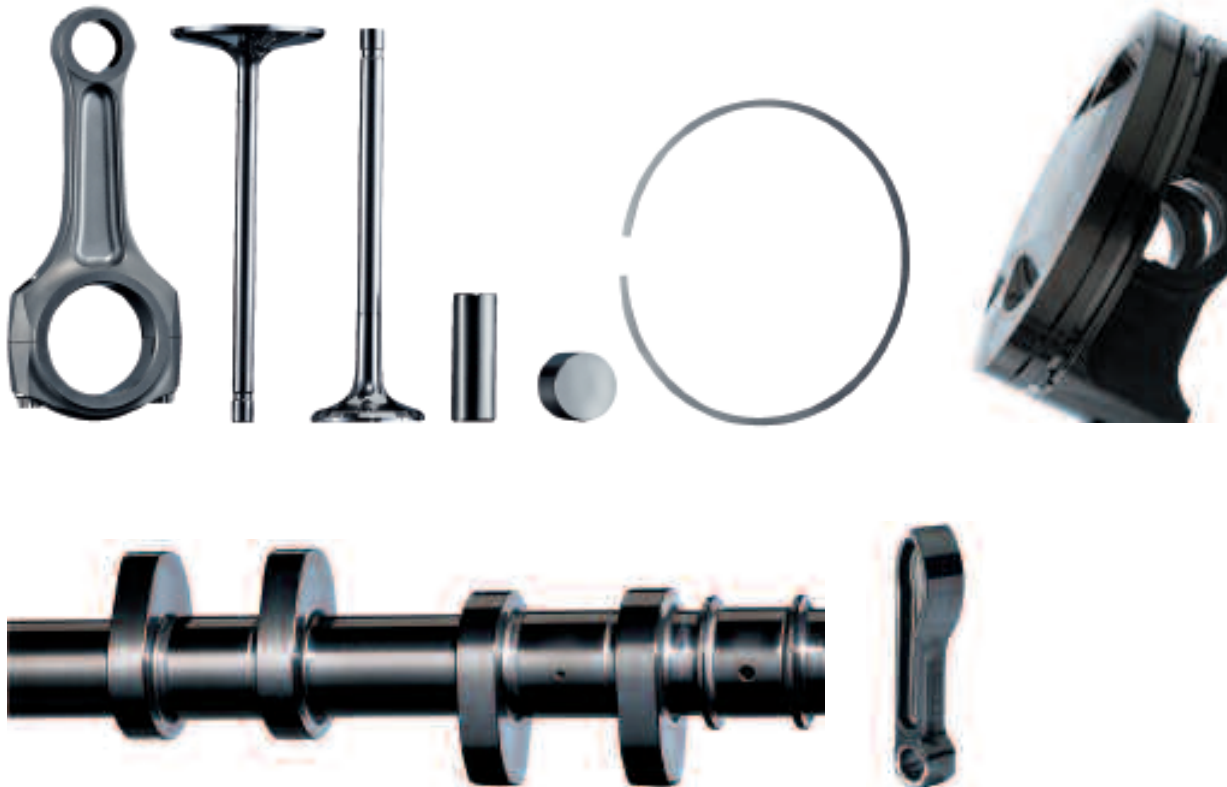
Darüber hinaus werden sehr viele Teile der Lenkung und Aufhängung sowie Titan-Verschraubungen mit WC/C oder TiN beschichtet.

In einem Spezialverfahren können Titanteile zusätzlich oxidiert werden (Ti-Plus). Dabei wird neben einer TiO₂-Schicht auch eine Sauerstoff-Diffusionsschicht von typischerweise 10-15 µm erzeugt, die den eher weichen Titanlegierungen eine gute Stütz-

wirkung verleiht. Etabliert ist dieses Verfahren unter anderem bei Ventildfedertellern. Prädestiniert ist es aber auch für innen liegende Flächen (Bohrungen).

Bei kritischen Einsatzbedingungen können Pleuelringe die Aluminiumpleuel nicht mehr zuverlässig von der Pleuelwand trennen. Mit Kohlenstoffbeschichteten Aluminiumpleuel lässt sich die Gefahr des Festfressens vermeiden. Das Beschichten der Pleuelnuten ist zugleich ein wirksamer Schutz gegen die zyklische Reibbeanspruchung durch die Pleuelring-Seitenflanken.

BALINIT®-beschichtete Bauteile für den Motorsport



Kraftstoffeinspritzung

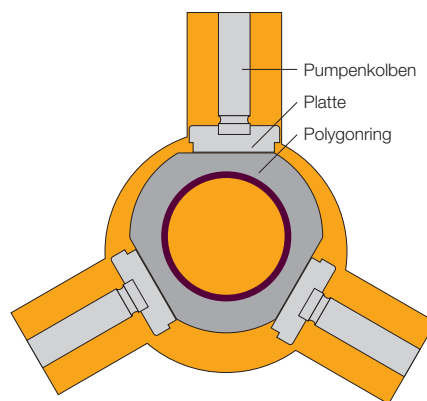
Innovative Diesel-Einspritzsysteme wie Pumpe-Düse oder Common-Rail sind Meilensteine in der Motorentechnologie. Mit hohen Diesel-Einspritzdrücken von mittlerweile über 2.000 bar garantieren sie optimale Kraftstoff-Ausnutzung und verbesserte Motoren-Abgaswerte. Jedoch belasten die hohen Drücke die konventionellen Komponenten-Werkstoffe extrem und können zu nicht tolerierbarem Verschleiß des Systems führen. Erhöhte Kontaktkräfte und entsprechend engere Schmier-spalten erschweren die Schmierung, was den Verschleiß zusätzlich fördert.

Die Auswirkungen sind:

- Kolben und Injektornadeln müssen Fertigungstoleranzen von unter 1 µm aufweisen, um Leckagen im Betrieb zu verhindern; tolerierte Verschleiß-raten über die Lebensdauer liegen im Bereich von Zehntel Mikrometern.
- Lagerkomponenten aus gehärtetem Stahl werden durch die auftretenden Drücke so hoch belastet, dass sie anfressen können.
- Klassische Gleitlager-Materialien wie z. B. Bronzen können plastisch deformiert werden.

Aufgrund ihrer Eigenschaften setzen BALINIT®-Kohlenstoffschichten die Werkstoff-Leistungsgrenzen herauf und schützen hoch beanspruchte Präzisionsbauteile wirkungsvoll gegen Adhäsiv- und Abrasivverschleiß. Gleichzeitig besitzen die Schichten ideale Notlaufeigenschaften, sodass sich auch bei Mangelschmierung hohe Laufreserven ergeben. In der Praxis tragen die Schichten dazu bei, die effektive Motorleistung zu steigern, Wartungsintervalle zu verlängern sowie Kraftstoffverbrauch, Rußpartikel-ausstoß und Emissionswerte zu senken.

Serienbeschichtungen mit BALINIT® C, BALINIT® DLC und BALINIT® DLC STAR sind ein unentbehrlicher Beitrag für die Funktion von Injektoren, Kolben und Gleitlagern von Common-Rail- und Pumpe-Düse-Einspritzpumpen geworden. Hartstoffschichten bewähren sich jedoch schon länger - zum Beispiel für Inline- und Verteilerpumpen von Nutzfahrzeugen, Schiffsdiesel- und Stationärmotoren.



Schematische Darstellung einer Diesel-Einspritzpumpe



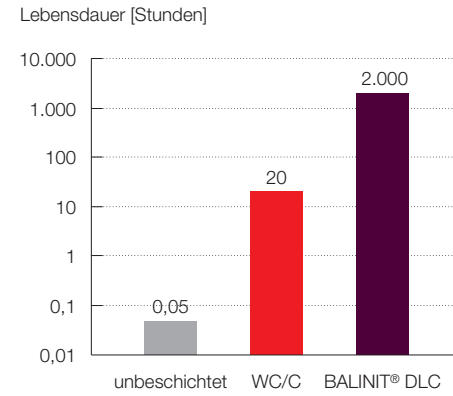
BALINIT®-beschichteter Polygonring einer Diesel-Einspritzpumpe

Common-Rail-Injektoren

BALINIT® DLC setzt Akzente im Common-Rail-System: Durch die harte Kohlenstoffschicht kann ein sehr hoher Abriebwiderstand für die tribologisch stark belasteten Komponenten moderner Common-Rail-Injektoren sichergestellt werden. Diese müssen nicht nur hohen Oberflächenpressungen, sondern gleichzeitig auch starker abrasiver Belastung durch feinste Partikel im Kraftstoff standhalten. BALINIT® DLC ermöglicht die geforderte Lebensdauer dieser Bauteile.



Lebensdauer von Common-Rail-Injektorkolben



Testbedingungen
Material: Lagerstahl DIN 1.3505
Versuchsende: 1 µm Materialverschleiß
Diesel-Injektor unter verschärften Betriebsbedingungen

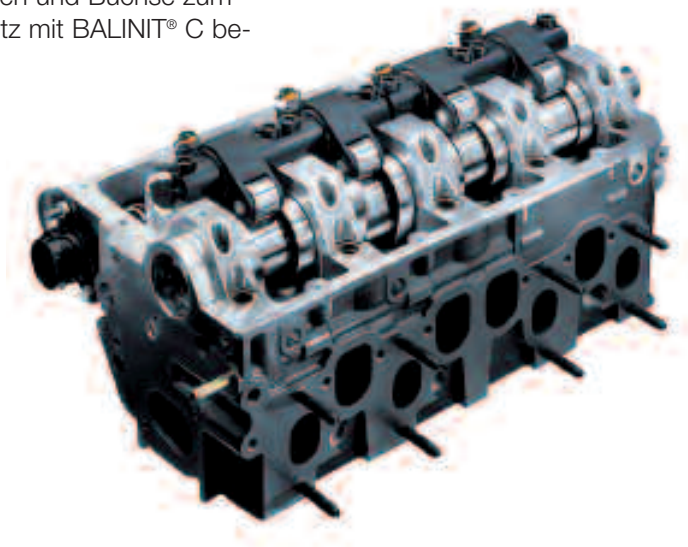
Pumpenkolben von Schiffen, Lokomotiven und Nutzfahrzeugen

Bereits seit den 80er Jahren werden Kolben für Inline-, Verteiler- und Einzylinderpumpen von Schiffsdiesel- und Baufahrzeugmotoren sowie von Stationärantrieben (Notstromaggregaten) von Balzers PVD-beschichtet. Der Einsatz von Schweröl und verunreinigten Treibstoffen verursacht gerade bei diesen Anwendungen frühzeitig Verschleiß und hohe Wartungskosten. Aus diesem Grund zählen mit BALINIT® C oder BALINIT® DLC beschichtete Kolben bei Großmotoren zur Erstausrüstung der Einspritzpumpen und verhelfen zu mehr Wirtschaftlichkeit und weniger Schadstoffen.



Pumpe-Düse: Gleitlager

Die Kohlenstoffschicht BALINIT® C stärkt verschiedene Komponenten des Pumpe-Düse-Systems: z. B. Gleitlager, welche die Bewegung von der Nocke zum Kolben übertragen. In einem schwimmend gelagerten System mit einem Bolzen, einer Buchse und einer Rolle sind Bolzen und Buchse zum Verschleißschutz mit BALINIT® C beschichtet.



Antriebstechnik

Das Design von Antriebs-elementen für den Fahrzeug- und Maschinenbau wird bestimmt von Themen wie: leichtere Bauweise, höhere Wirkungsgrade, erhöhte Lastzustände, geringerer Schmierstoff-einsatz und längere Wartungsintervalle. Diese Forderungen ziehen jedoch eine zunehmende Verschleißbeanspruchung von Lager- und Getriebe-Bauteilen nach sich. Werkstoff-Alternativen können diese Belastungen nur selten befriedigend ausgleichen.

Fahrzeuggetriebe

Bei Zahnradgetrieben bestimmen Belastung und Umfangsgeschwindigkeit die jeweiligen Verschleißerscheinungen oder Ausfallursachen:

- **Abrieb** entsteht, wenn sich bei geringer Umfangsgeschwindigkeit kein durchgehender Schmierfilm zwischen den Zahnflanken bildet und sich deren Oberflächen berühren (Mischreibung).
- Zum **Anfressen** kann es zum einen bei geringer Umfangsgeschwindigkeit und zusätzlich höheren Lasten kommen. Zum anderen tritt Anfressen auf, wenn mit steigender Umfangsgeschwindigkeit und Temperatur die Viskosität und Dicke des Schmierfilms sinken und der Schmierfilm schließlich abreißt. Meist geht dem auch ein Abrieb der Zahnflanken voraus.

Anders Verschleißschutzschichten: Ihr Einsatz schützt die Komponenten vor Anfressen und Pitting, vervielfacht deren Laufzeit und erhöht die Lebensdauer des Gesamtsystems.

Die Kohlenstoffschicht BALINIT® C bewährt sich zum Beispiel in Planetengetrieben von Baumaschinen und Nutzfahrzeugen, beim Notlauf von Hubschraubergetrieben oder zur Reibungsminderung und Leistungssteigerung in Getrieben von Rennfahrzeugen.

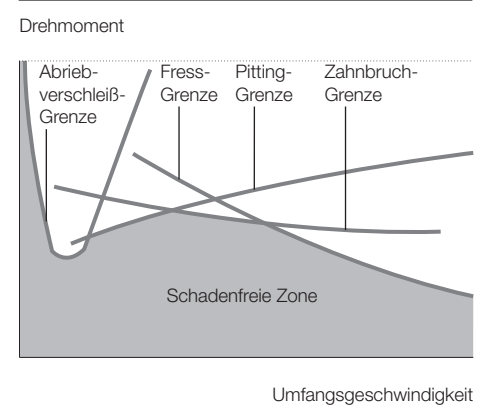
- Auch **Pitting** (Grübchen-Bildung) ist möglich: Auf den Zahnflanken kommt es zwar zur Ausbildung eines tragenden Schmierfilms, jedoch bestimmt die Druckfestigkeit der Zahnradoberfläche die Belastungsgrenze. Durch fortlaufende Überrollungen bei hohen Wälzpressungen treten feine Risse an Korngrenzen oder Einschlüssen unterhalb der Oberfläche auf. Diese führen zur Ablösung von Oberflächenteilchen, an den Zahnflanken entstehen kleine Grübchen.

- **Micropitting** (Graufleckigkeit) ist auf mangelnde Schmierung zurückzuführen. Mikroskopisch kleine Risse und Ausbrüche erzeugen den Eindruck eines grauen Flecks.

Mit der Verwendung einsatzgehärteter Stähle ist die Belastbarkeit von Zahnradern werkstofftechnisch fast ausgereizt. Die Fressgefahr wird heute durch Additive im Getriebeöl verringert. Wirkungsvoller gegen sämtliche Verschleißmechanismen in Getrieben sind jedoch Kohlenstoffschichten.

Insbesondere die WC/C-Schicht BALINIT® C trennt metallische Zahnrad-Oberflächen bei Mischreibung zuverlässig. Fressgefahr und Grau-

Aber auch bei sehr hoch beanspruchten industriellen Wälzlagern setzt man auf die Beschichtung von Wälzkörpern und Laufringen, u.a. zum Schutz vor Oberflächenermüdung, Reiboxidation und Brinelling sowie zur Ermöglichung von schmiermittelfreiem Betrieb.



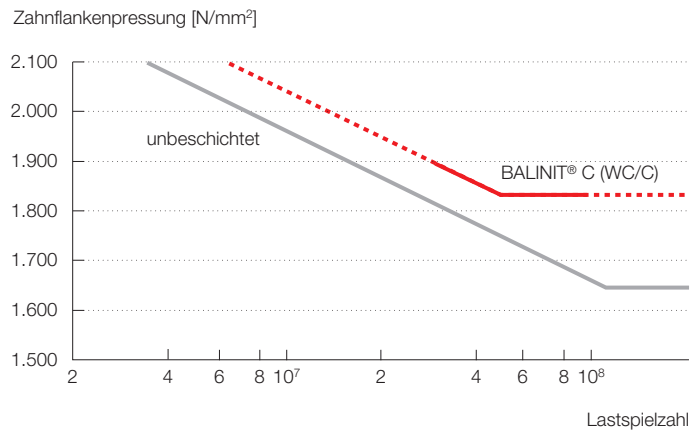
Betriebsgrenzen von Getrieben

fleckigkeit nehmen ab, die maximale Tragfähigkeit steigt gegenüber einsatzgehärteten Zahnradern. Ein Grund dafür ist das hervorragende Einlaufverhalten von BALINIT® C. Die Schicht verringert die lokalen Flächenpressungen (Hertz'sche Pressung) und erhöht die Zuverlässigkeit von Zahnradern, die unter ungünstigen Schmierverhältnissen laufen.

Schnelllaufende Stirnradgetriebe

BALINIT® C vervierfacht die Laufzeit von Zahnrädern im Lebensdauertest und erhöht die Dauerfestigkeit um 10 bis 15 Prozent gegenüber nur einsatzgehärteten Zahnrädern, gemessen im Normtest (FZG-C-Test). Dabei wurde als Schadensgrenze für die Zahnrad-Lebensdauer ein Einzelzahnverschleiß von 4 Prozent durch Pitting zugrunde gelegt. Ausschlaggebend für die besseren Werte ist vor allem die Senkung der lokalen Flächenpressung (Hertz'sche Pressung) - Ergebnis der Reibungsminderung im Wälzkontakt sowie des hervorragenden Einlaufverhaltens von BALINIT® C.

Hochbelastetes, schnelllaufendes Getriebe



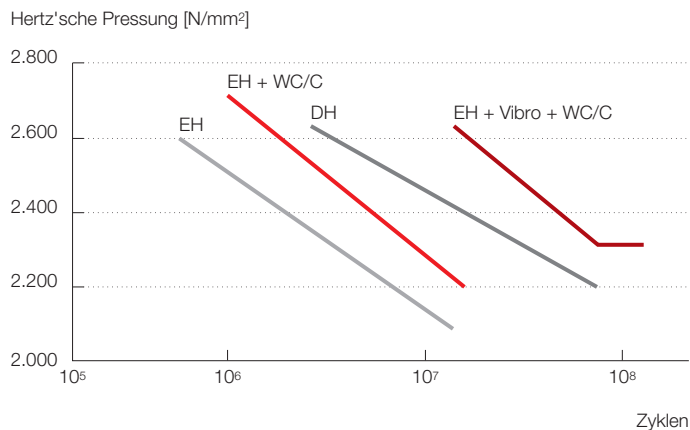
Prüfmethode: FZG-C-Test
 Material: Einsatzgehärteter Stahl
 Härte: 62 HRC
 Rauigkeit: R_z = 3 µm
 Versuchsende: 4 % Materialverschleiß pro Zahn (gewichtsbezogen)

Unbeschichtetes Getriebezahnrad:
 Oberflächenermüdung (Pitting) trotz durchgehendem Schmierfilm

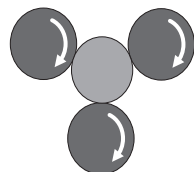
Pittingverschleiß bei kombinierten Oberflächenbehandlungen

Eine PVD-Beschichtung ist jedoch nicht die einzige Möglichkeit, die Pitting-Tragfähigkeit von Zahnrädern zu erhöhen. Weitere Behandlungen sind kombiniertes Einsatzhärten und Nitrieren (Duplex-Behandlung) sowie Polieren der Oberflächen mittels Vibrofinish. Sowohl die PVD-Beschichtung mit WC/C als auch die Duplexbehandlung steigern die Pitting-Tragfähigkeit und Lebensdauer von Zahnrädern deutlich, die besten Ergebnisse werden aber mit einer Kombination von Vibrofinish und WC/C-Beschichtung erzielt.

Rollenkontakt-Ermüdungstest



EH: Einsatzgehärtet 0,7 bis 0,9 mm
 DH: Duplex-gehärtet 1.050 HV10
 WC/C: BALINIT® C-beschichtet 1.000 HV / 2µm
 Vibro: Superfinish von Agusta, R_a 3,2 / 0,6 µm



Testbedingungen:
 Öl: Mobil Jet / 80 °C
 Gleit-Roll-Verhältnis: 24 %
 Drehzahl: 2.860 U/min
 Material: M50 Nii / > 700 HV
 Quelle: J. Kleff, D. Wiedmann, ZF
 Asset Brite Euram Project

Zahnradverschleiß durch Fressen

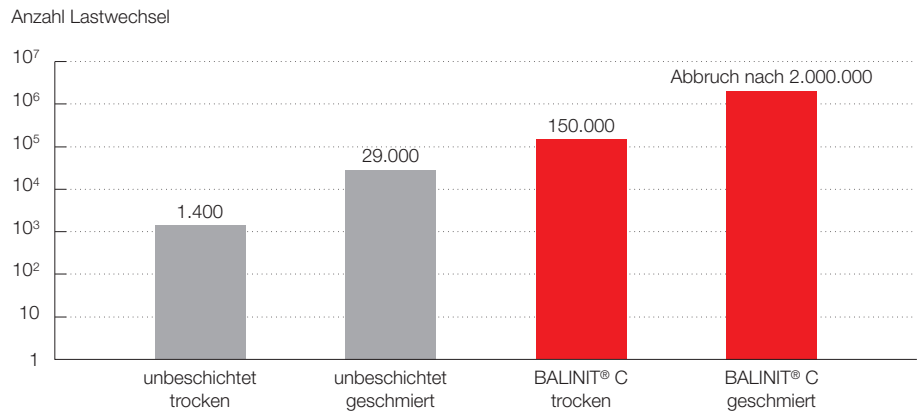
Ein wichtiger Verschleißmechanismus bei Zahnradern ist das Fressen als Folge von Mangelschmierung. Dies kann an Prüfständen durch gezielte Zugabe von nur sehr kleinen Schmiermengen simuliert und mit Beschichtungen verglichen werden. Versuche des Institutes IMM der Technischen Universität Dresden zeigen, dass sowohl eine geringfügige Schmierung als auch die WC/C-Beschichtung die Lebensdauer deutlich steigern können. Die besten Ergebnisse erzielt aber die Kombination von Schmierstoff und Beschichtung. Das bedeutet einerseits, dass eine Beschichtung eine reguläre Schmierung nicht ersetzen kann, aber andererseits, dass sich Schmierung und WC/C-Beschichtung positiv ergänzen.

Stirnradgetriebe für Motorräder

Die praktische Auswirkung des Fressschutzes von Zahnradern zeigte sich in einer Notfallsituation bei einem Motorradrennen. Durch Ölverlust war das Getriebe durch Fressen gefährdet. Da jedoch die am stärksten belasteten Zahnradern beschichtet waren, konnte der Fahrer das Rennen überraschend beenden. Bei der Analyse zeigte sich, dass die unbeschichteten Zahnradern deutliche Verschleißspuren hatten, die beschichteten jedoch praktisch keinen Abrieb aufwiesen.



Zahnradverschleiß bei Trockenlauf und Mangelschmierung



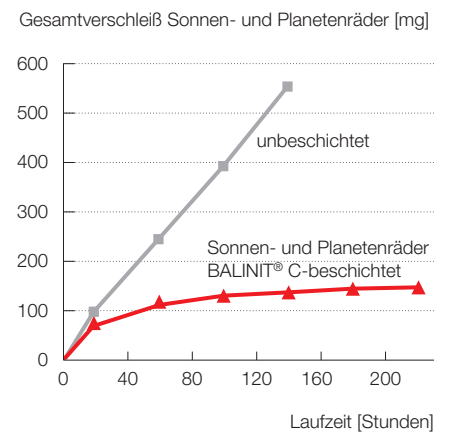
FZG-Test

Drehzahl: 1.000 U/min
 Flächenpressung: 1.000 N/mm²
 Schmierstoff: Esso CL46B (auf pflanzlicher Basis)
 Ölmenge: 1 Tropfen pro Minute
 Quelle: IMM (TU Dresden)

Planetengetriebe für Betonmischer

Eine ganz andere Belastung führt zum Verschleiß in Planetengetrieben von Betonmischern: auf Grund der sehr langsamen Geschwindigkeit und der gleichzeitig hohen Flächenpressung bildet sich kein Schmierfilm und es kommt am Sonnenrad, das am höchsten belastet ist, zu starkem Abrieb. Durch die BALINIT® C (WC/C)-Beschichtung wird der Verschleiß nach einer Einlaufphase praktisch gestoppt.

Modellversuch Planetengetriebe



Testbedingungen
 Verzahnung: FZG-C
 Langsamlauf-Verschleiß
 Last: 2.180 MPa (316 KSI)
 Gleitgeschwindigkeit: 0,04 m/s

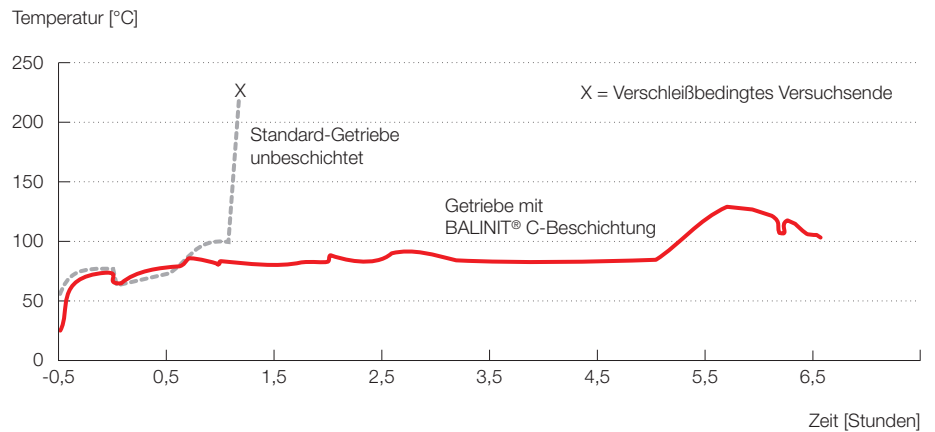
Zahnradern eines Motorradstirnradgetriebes nach Ölverlust: BALINIT® C (WC/C)-beschichtet (links), unbeschichtet (rechts)

Getriebe für Luftfahrzeuge

In der Luftfahrt werden aus Gewichtsgründen zunehmend hoch belastete Getriebezahnräder aus Titanlegierungen statt aus Stahl gefertigt. Titanlegierungen neigen aufgrund ihrer geringeren Härte zu Abrasiv- und Adhäsivverschleiß. BALINIT® C schützt die Oberflächen wirkungsvoll gegen Verschleiß.

Aber auch Stahlgetriebe profitieren von BALINIT®-Beschichtungen. Bei Ölverlust im Getriebe sollen Hubschrauber eine möglichst lange Notlaufreserve haben, um sicher landen zu können. Bei Tests von Hubschraubergetrieben aus einsatzgehärtetem Stahl wurde durch die BALINIT® C-Beschichtung des gesamten Getriebes der Notlaufbetrieb von knapp einer Stunde auf über sechs Stunden verlängert.

Hubschraubergetriebe



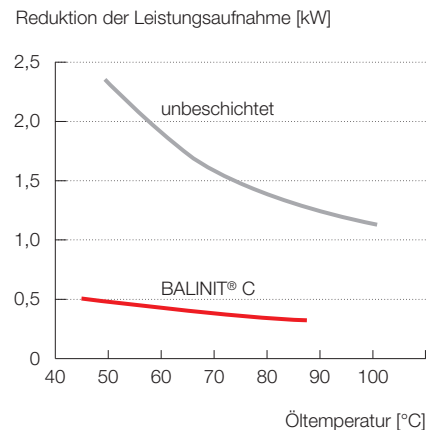
Nach Ölverlust wird mit dem BALINIT® C-beschichteten Getriebe ein wesentlich längerer Notlaufbetrieb ermöglicht.
Quelle: P. Maret, C. Varailhon / EUROCOPTER Frankreich

Torsen-Differentiale

Die Leistung von PKW-Differentialgetrieben wird durch Reibung und Verschleiß, die vor allem bei Kaltstart verursacht werden, beeinträchtigt. Ingenieure setzen die WC/C-Beschichtung mit Erfolg zur Steigerung der Zuverlässigkeit ein.

LKW-Hinterachsgetriebe

LKW-Hinterachsgetriebe mit Spiralkegelverzahnung weisen sehr hohe Reibung auf. Entwicklungsingenieure untersuchten deshalb die Möglichkeit, die Reibung durch PVD-Schichten zu verringern. Dabei zeigte sich, dass die Reibungsverluste durch die WC/C-Beschichtung je nach Öltemperatur um 1-1,5 kW reduziert werden konnten.



Reduktion der Leistungsaufnahme einer LKW-Hinterachse durch BALINIT®-Beschichtung

Übersetzungsverhältnis: 2,93
Drehzahl: 1.100 U/min



Industrieantriebe

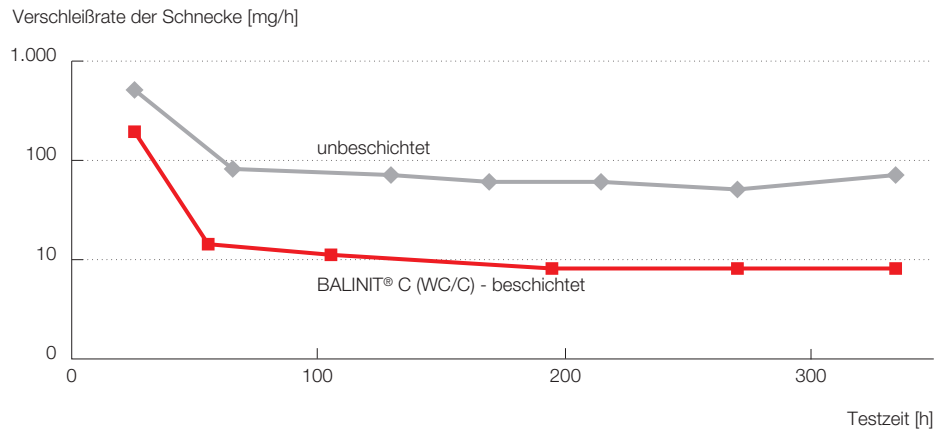
Schneckengetriebe mit beschichteter Schnecke

Schmiermittel bietet nicht immer eine Lösung, um immer höher belastete Schraubwälzgetriebe vor Reibung und Verschleiß zu schützen. Schneckengetriebe beispielsweise weisen sehr ungünstige tribologische Verhältnisse auf. Die Gleitbewegung und die Belastung zwischen Schnecken- und Radflanke erschweren den Aufbau eines Schmierfilms. Um Anfräsen zu vermeiden, wird das Rad deshalb zumeist aus Bronze gefertigt. Im Betrieb reiben sich die Zähne des Bronzerads jedoch rasch ab, und das Zahnrad muss nachgestellt oder ausgewechselt werden. Kohlenstoffschichten können Zuverlässigkeit und Leistung von Schneckenantrieben auf unterschiedliche Arten verbessern. Im Schneckengetriebe einer Laser-Bearbeitungsmaschine z. B. reduziert die Beschichtung einer Stahlschnecke mit BALINIT® C den Verschleiß sowohl der Schnecke als auch des Bronzerades.

Schneckengetriebe mit beschichtetem Stahlrad

Bei Werkzeugmaschinen werden Schneckengetriebe zur genauen Positionierung der Werkstücke eingesetzt. Durch Verschleiß kommt es bei einem klassischen Bronze-Schneckenrad zu Ungenauigkeiten, die sich durch Nachjustierungen nicht vollständig ausgleichen lassen und in der Folge Maßabweichungen an den Werkstücken verursachen. Dies erfordert insbesondere bei teuren Teilen, wie z.B. bei Turbinenschaufeln, aufwändige Nacharbeit. Um dies zu vermeiden, werden die Bronzeräder durch WC/C-beschichtete Stahlräder ersetzt. Die Beschichtung übernimmt einerseits die Gleiteigenschaften der Bronze, zugleich schützt ihre Härte zusammen mit der Stützwirkung des Stahles wirksam gegen Verschleiß.

Schneckengetriebe: Höhere Last und längere Standzeit



Getriebedaten:
Anzahl Zähne (Rad): 41
Winkel: 12,5°
Axialabstand: 100 mm

Testbedingungen:
Schnecke: 400 U/min

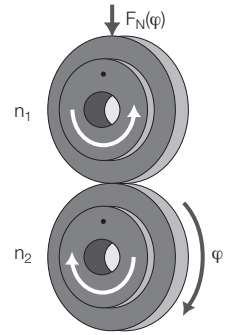
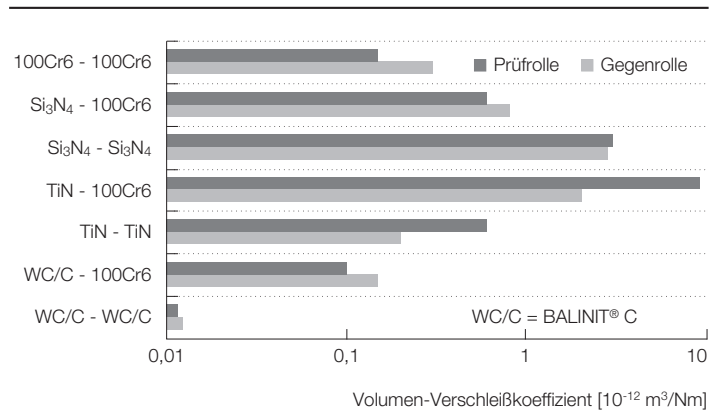
Materialien:
Schnecke: DIN 1.7131 (16MnCr5E)
Rad: Bronze DIN 2.1060.03 (GZ-CuSn12Ni)



Kurvengetriebe

BALINIT® C bleibt deutlicher Sieger im Vergleichstest: Weil Kurvengetriebe durch ihr Last- und Geschwindigkeitsprofil ungünstige und verschleißfördernde Schmierverhältnisse aufweisen, wurde nach einer verbesserten Lösung gesucht. Dabei verglich man Paarungen mit gehärtetem Stahl, PVD-beschichtetem gehärtetem Stahl und mit Keramik (Si_3N_4). Die mit Abstand besten Ergebnisse erzielte die Beschichtung einer oder beider Rollen mit BALINIT® C.

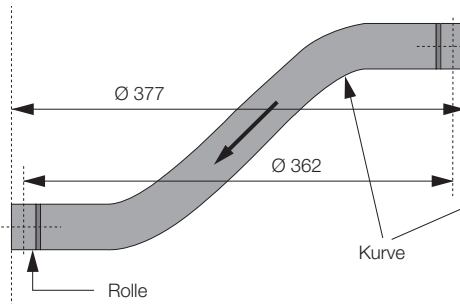
Simulation Kurvengetriebe



Kontaktkraft: 0 - 2.000 N
 Hertz'sche Pressung: 0 - 1.106 MPa
 Schlupf: 10 %
 Drehzahlen: $n_2 = 200 \text{ min}^{-1}$ / $n_1 = 0,9 \cdot n_2$
 Quelle: Uni-GH-Siegen / Labor für Oberflächentechnik

Kurvenantrieb in Dosenformmaschinen

Bei Dosenformmaschinen müssen sehr hohe Kräfte übertragen werden. Dazu werden Kurvenantriebe eingesetzt. Durch die geringe Bewegungsgeschwindigkeit bildet sich kein ausreichender Schmierfilm, die Oberflächen neigen zum Fressen. Durch die WC/C-Beschichtung der Rollen wurde die Lebensdauer des Kurvenantriebes signifikant gesteigert.

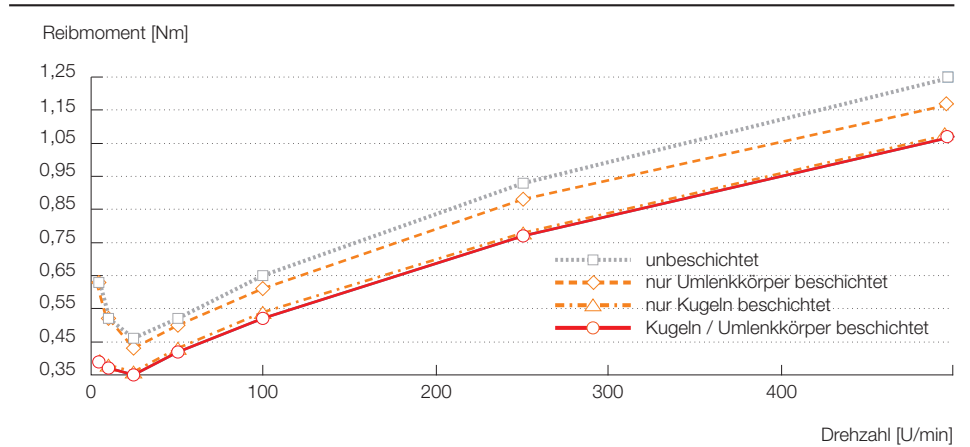


Kugelgewindegetriebe

BALINIT® C steigert die Geschwindigkeit in Abläufen von Werkzeugmaschinen. Der Vorschub dieser Maschinen erfolgt vielfach mit Gewindespindeln. Hohe Positionierungsgeschwindigkeiten werden jedoch begrenzt durch den Verschleiß und die Reibung zwischen den Kugeln und den Umlenkörpern. Praxistests ergaben, dass insbesondere die WC/C-Beschichtung der Kugeln Reibmoment und Stick-Slip-Effekte vermindern.



Kugelgewindegetriebe



BALINIT® C (WC/C) reduziert Reibung und Verschleiß und vermindert das Reibmoment des Kugelgewindegetriebes.
Quelle: WBK Universität Karlsruhe

Wälzlager

Wälzlager unterliegen durch ihre typische Wälzbewegung prinzipiell günstigen Reibungs- und Verschleißbedingungen. Bei hohen Belastungen und ungünstigen Schmierzuständen kann es jedoch zu Verschleißmechanismen kommen, die letztlich das gesamte Tribosystem beeinträchtigen:

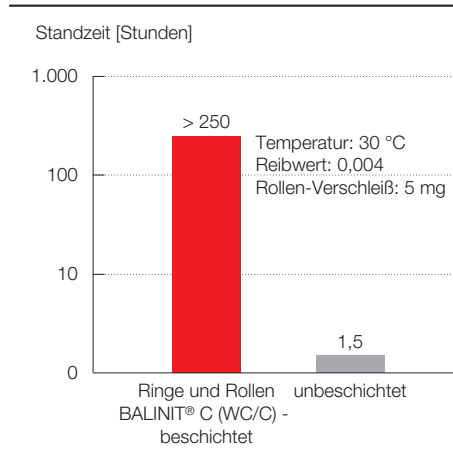
- Anfressen bei Schmierstoffmangel
- Abrieb durch Verunreinigungen
- Oberflächenermüdung (Pitting) bei Überlastung
- Fretting oder Brinelling bei Vibrationen

Um solchen und anderen Beanspruchungen entgegenzuwirken, werden heute unterschiedliche Werkstoffe eingesetzt - so zum Beispiel der Standard-Lagerwerkstoff 100Cr6 (DIN 1.3505, AISI 52100) in sehr reiner Form. Vor Korrosion schützen stickstofflegierte Stähle oder Verchromungen, für Hochtemperatur-Anwendungen eignen sich Werkzeugstähle, für sehr schnell laufende Applikationen Wälzkörper aus Keramik.

Für viele Anwendungen und Reibanforderungen reichen konventionelle Werkstoffe jedoch nicht aus bzw. Sondermaterialien sind zu teuer. In diesen Fällen sind BALINIT®-Beschichtungen aufgrund ihrer hohen Härte und Maßhaltigkeit eine ausgezeichnete Lösung. Vor allem dort, wo die Zuverlässigkeit und Schmiermöglichkeit durch extreme Einsatzbedingungen (hohe oder tiefe Temperaturen, aggressive Medien, Vakuum, Reinraum) begrenzt sind, schützen diese PVD-Schichten wirkungsvoll gegen Verschleiß und erschließen zusätzliches tribologisches Potenzial.

Zylinderrollen-Axiallager

Das Reibungs- und Verschleißverhalten von Wälzlagern wird auf eigens dafür konzipierten Prüfständen untersucht. Kritische Schmierbedingungen und Belastungen, die zum Fressen führen, werden bevorzugt auf Zylinderrollen-Axiallager-Prüfständen untersucht. Dieser Lagertyp ist durch seinen Gleitanteil von Haus aus hoher tribo- logischer Belastung ausgesetzt.



FE-8-Prüfstand
Lagertyp: 81206
Belastung: 33 kN
Käfigmaterial: PA 66
Drehzahl: 15 U/min
Trockenlauf
Quelle: IME / RWTH Aachen



Wälzlager-Kontaktpaarung

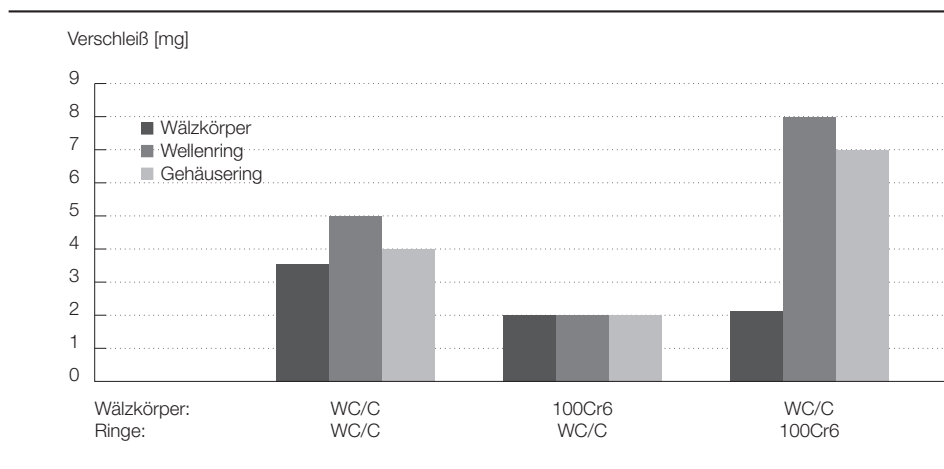
Vom Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen wurde untersucht, wie sich der Verschleiß von Axiallagern entwickelt, wenn unterschiedliche Kontaktpaarungen WC/C-beschichtet werden. Es wurden einmal nur die Wälzkörper, einmal nur die Ringe und einmal beide Reibpartner beschichtet. Es war interessant festzustellen, dass die Beschichtung aller Komponenten nicht das

beste Verschleißverhalten aufweist. Am besten schnitt das Beschichten der Ringe ab, gefolgt von der Beschichtung aller Komponenten.

Der Vorteil der Ring- gegenüber der Wälzkörperbeschichtung ist erklärbar, da mehr Kontaktfläche beschichtet wird und die Beschichtung etwas dicker ist. Das schwächere Verhalten aller beschichteten Komponenten ist nicht direkt erklärbar. Es könnte bedeuten, dass Stahloberflächen mit dem

gewählten Schmierstoff im Zusammenwirken mit der WC/C-Beschichtung besonders gute Einlauf- und Verschleißsituationen erzeugen. Dieses Verhalten muss aber nicht zwangsläufig auf andere Tribosysteme übertragbar sein. Es gilt in jedem Fall nur für Systeme, die zum Adhäsivverschleiß neigen. Bei Abrasion und Oberflächenermüdung ist es günstiger, beide Reibpartner zu beschichten.

Einfluss der Kontaktpaarung bei Beschichtung von Axiallagerkomponenten



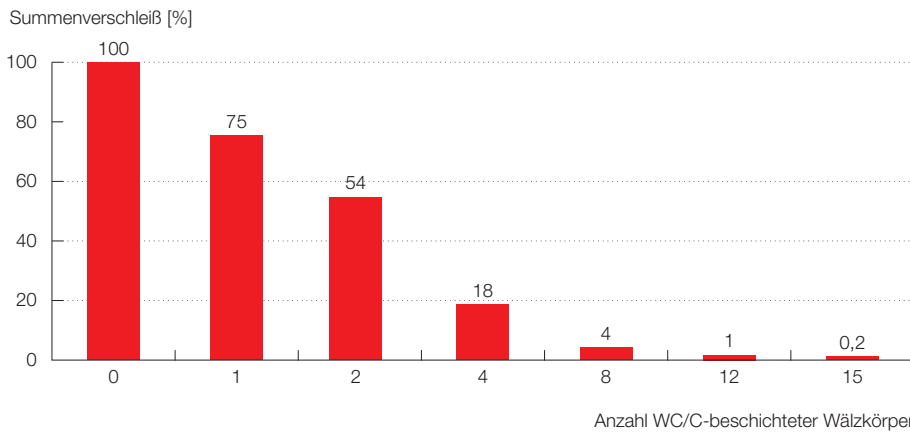
Versuchsbedingungen:
Prüfstand: Axiallager FE8
Lager: 81212
Drehzahl: 7,5 min⁻¹
Axialkraft: 80 kN
Pressung: 2.000 MPa
Lagertemperatur: 70 °C
Laufzeit: 80 h
Grundwerkstoffe: DIN 1.3505 (100Cr6)
Quelle: J. Loos / RWTH Aachen

Teilweise Beschichtung von Wälzkörpern

Ein weiterer interessanter Versuch bestand darin, eine variierende Zahl von Wälzkörpern zu beschichten. Es sollte gezeigt werden, ob und wie gut der Verschleißschutz durch Beschichtung funktioniert, auch wenn nicht alle Wälzkörper beschichtet sind. Das Ergebnis überrascht: bereits eine geringe Anzahl beschichteter Wälzkörper bringt deutliche Verbesserungen. Zwei von max.

15 beschichteten Wälzkörpern senken den Verschleiß bereits um ca. 50 %, die halbe Anzahl beschichteter Wälzkörper senkt den Verschleiß bereits um über 90 %. Die Ursache dafür liegt darin, dass die beschichteten Wälzkörper ein gutes Einlauf-Glättungsverhalten auch der Ringe fördern, da auch etwas Schichtmaterial auf die Ringe gelangt. Das gleiche Phänomen ist zudem auch gegenüber den unbeschichteten Wälzkörpern zu beobachten.

Verschleißverhalten bei unterschiedlicher Anzahl beschichteter Wälzkörper

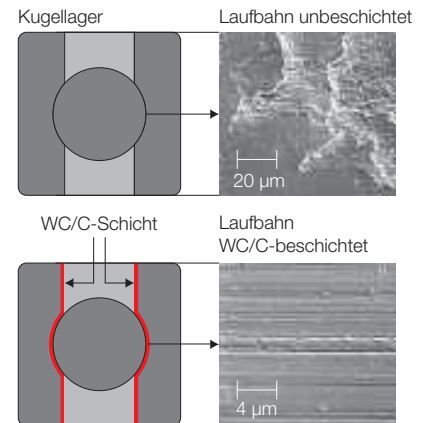


Versuchsbedingungen:
 Prüfstand: Axiallager FE8
 Lager: 81212
 Drehzahl: 7,5 min⁻¹
 Axialkraft: 80 kN
 Pressung: 2.000 MPa
 Lagertemperatur: 70 °C
 Laufzeit: 80 h
 Grundwerkstoffe: 100Cr6
 Quelle: J. Loos / RWTH Aachen

Oberflächenermüdung

Versuche an Spindellagern haben schon Anfang der 1980er-Jahre gezeigt, dass durch die WC/C-Beschichtung eine Reduktion des Laufbahnverschleißes zu erwarten ist. Aktuelle Messungen haben detailliert die Wirkung der einzelnen Komponenten untersucht. So zeigt sich bei Radiallagerprüfstand-Versuchen, dass durch die WC/C-Beschichtung von Innenringen nur eine leichte Erhöhung der Lebensdauer erreicht wird, da nun die unbeschichteten Wälzkörper zu verschleiben beginnen. Erst durch die Beschichtung der Ringe und der Wälzkörper wird eine signifikante Erhöhung der Lebensdauer erreicht.

Laufbahnverschleiß schnelldrehender Spindellager

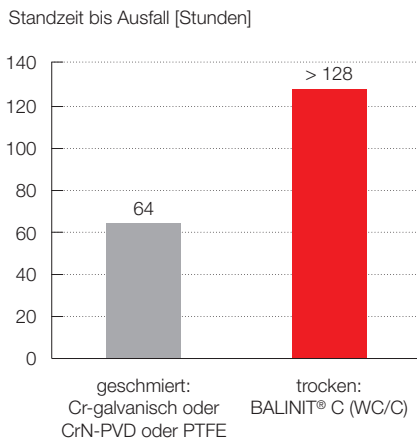


Lagertyp: Spindellager 7014 P4
 Testzeit: 50 h
 Drehzahl: 19.000 U/min
 Drehzahlkennwert: $1,7 \cdot 10^6$
 Fettschmierung

Kugellager

Unter hoher statisch-vibrierender Last schützt BALINIT® C Kugellager wirkungsvoll vor Reiboxidation und Brinelling. Galvanische Chromschichten und Teflon-Schichten (PTFE) blieben gegen diese Verschleißarten weitgehend unwirksam. Durch die WC/C-Beschichtung werden Verschleiß und Geräuschentwicklung reduziert und die Standzeit der Lager z. B. in Erodiermaschinen wird mehr als verdoppelt.

Kugellager unter vibrierender Last



Verschleißreduzierung durch BALINIT® C (WC/C)-beschichtete Wälzlager bei Funkenerodiermaschinen.
Quelle: INA / Balzers

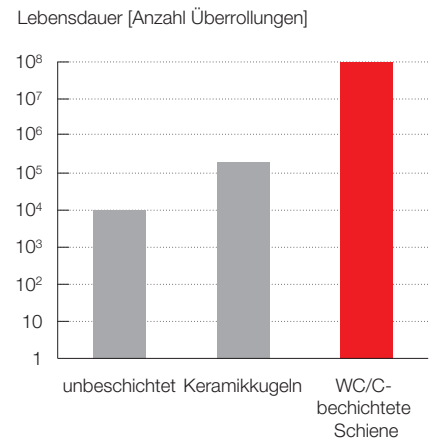
Lagerkugeln

Neben Innen- und Außenringen sowie Zylindern werden auch Kugeln von Kugellagern mit BALINIT® C beschichtet. Dabei beträgt die typische Schichtdicke 0,5 bis 1 µm, die Gleichmäßigkeit gemessen über den gesamten Umfang beläuft sich auf etwa ± 0,1 µm. Das gute Glättungsverhalten der Schicht kompensiert eine geringe Rauheitszunahme.



Linearführung für Halbleiter-Bestückung

In bestimmten Industriezweigen ist keine Schmierung erlaubt. So erfordert beispielsweise die Halbleiterfertigung aus Gründen der Sauberkeit schmierstofffreie Produktionsmaschinen. Trotzdem müssen Antriebskomponenten lange und zuverlässig laufen. Bei Linearführungen wird dies durch die WC/C-Beschichtung der Rollen sichergestellt. WC/C-beschichtete Schienen mit unbeschichteten Stahlrollen weisen eine deutlich höhere Lebensdauer auf als unbeschichtete Schienen mit Keramik-Wälzkörpern.



Belastung: 20 % der dynamischen Tragzahl C
Trockenlauf
Quelle: Fa. Schneeberger / Roggwil

Fluidtechnik

Das Umweltprotokoll von Montreal verlangt, dass ab dem Jahr 2020 die Kältemittelkompressoren für Fahrzeuge und Haushalte auf den Einsatz chlorierter Fluor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) verzichten. Neue Konzepte mit umweltschonenden Kältemitteln führen jedoch in der Regel zu weniger guten Schmier- und Verschleißeigenschaften.

Auch die Hersteller von Hydraulik- antrieben werden zunehmend mit

schmierungs- und korrosionstechnischen Fragen konfrontiert: Der Trend zu leichter Bauweise, höheren Drücken und Drehzahlen führt dazu, dass die Hydraulik-Komponenten höheren tribologischen Belastungen standhalten müssen. Zusätzliche Anforderungen entstehen in Bereichen, wo Wasser statt Öl als Druckmedium eingesetzt wird oder wo fluidtechnische Komponenten verschärften korrosiven und abrasiven Betriebsbedingungen ausgesetzt sind.

Hartstoffschichten sind ein Lösungsbeitrag für viele dieser fluidtechnischen Problemstellungen. BALINIT®-beschichtete Komponenten verursachen deutlich weniger Verschleiß und erhöhen die Lebensdauer von Kältemittel- und Luftkompressoren, Hydraulikpumpen oder von hydraulischen und pneumatischen Ventilen und Armaturen. Außerdem ermöglicht die Beschichtung den Ersatz von teuren Materialien wie Bronze, Hartmetall oder Keramik.

Kompressoren

Die bisher in Kompressoren als Kältemittel eingesetzten chlorierten Fluor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) sind gut mit Schmierstoffen mischbar und ermöglichen im Allgemeinen einen verschleiß- und störungsfreien Betrieb der Verdichter. Umweltschonende, FCKW-freie Kältemittel sind dagegen nur schlecht mit Schmiermitteln mischbar und können zur Phasentrennung von Kältemittel und Öl führen. Sie verursachen deshalb oft eine ungenügende Schmierwirkung und gewähren keinen ausreichenden Verschleißschutz der mechanischen Komponenten über die geforderte Lebensdauer.

Schmiermittelfrei betriebene Luftkompressoren unterliegen ähnlichen Beanspruchungen, wobei durch feuchte Umgebungsbedingungen noch eine verstärkte korrosive Belastung dazu kommt.

Die Hersteller von Luft- und Kältemittelkompressoren nutzen zunehmend die Vorteile der PVD-Beschichtungen, die einen sicheren Betrieb der Verdichter gewährleisten.

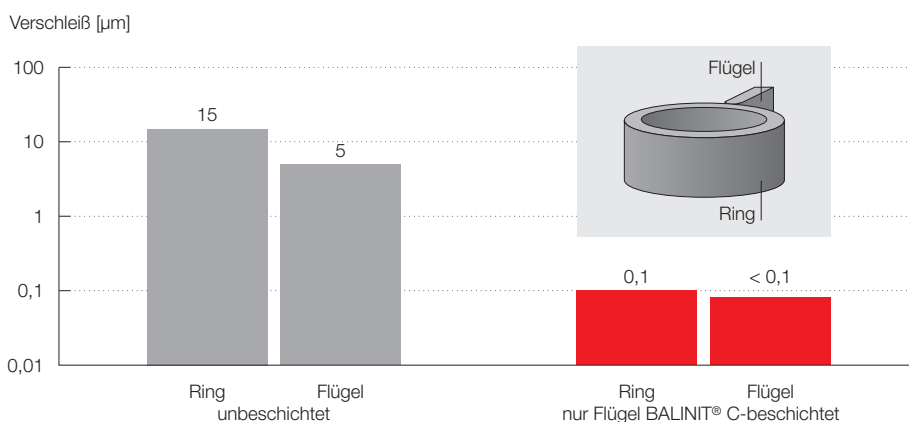
Kältemittel-Flügelzellenkompressoren

Beim Betrieb mit FCKW-freien Kältemitteln ist nur eine mangelhafte Schmierwirkung gegeben, starker Verschleiß ist die Folge. Werden die Stahlflügel mit BALINIT® CNI oder BALINIT® C beschichtet, wird der Verschleiß an Flügeln und am Ring der Kompressoren entscheidend reduziert.

Mit Blick auf die Zukunft müssen auch die chlorfreien Kohlenwasserstoffe als

problematisch eingestuft werden. Sie schädigen zwar nicht die Ozonschicht, tragen aber zum Treibhauseffekt bei. Ein sehr umweltfreundliches Kältemittel ist dagegen Kohlendioxid (CO₂). Es wird für Flügelzellen- und Kolbenkompressoren von Haushaltgeräten und Fahrzeugen getestet. In beiden Systemen zeigen CrN- und WC/C-Beschichtungen in Kombination mit Schmierstoffen auf Glykol- und Esterbasis ein sehr gutes Reibungs- und Verschleißverhalten.

Flügelzellenkompressoren mit FCKW-freien Kältemitteln

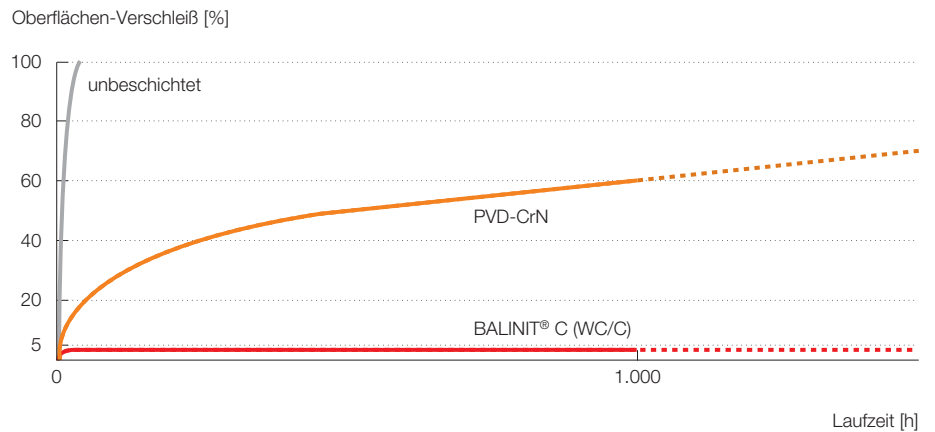


Testbedingungen
Zeit: 1.000 Stunden
Druck: 3,5 N/mm²
Temperatur: 100 °C
Kältemittel: FCKW-frei
Ringwerkstoff: Gusseisen
Flügelwerkstoff: Stahl

Schraubenluftverdichter

Herkömmliche Schraubenluftverdichter werden entweder als synchronisierte Trockenläufer oder als unsynchronisierte Verdichter mit Öleinspritzung konzipiert. Ist es aus Gründen der Sicherheit und der Umweltverträglichkeit notwendig, ohne Öleinspritzung zu arbeiten, mussten bisher aufwendig konstruierte Modelle mit Synchronisiergetrieben eingesetzt werden. In Tests mit BALINIT®-beschichteten Verdichterschrauben wurde nachgewiesen, dass unsynchronisierte Kompressoren auch dann zuverlässig funktionieren, wenn anstelle der Öleinspritzung mit Wassereinspritzung gearbeitet wird. Ohne Beschichtung kommt es in kürzester Zeit zum Anfressen. Chromnitrid (CrN) verbessert zwar das Verschleißverhalten, jedoch sind nach 1.000 Stunden Laufzeit rund 60 Prozent der CrN-beschichteten Oberflächen verschlissen. Mit BALINIT® C ist nach 3 Prozent Einlaufverschleiß kein weiterer Oberflächenabtrag mehr feststellbar.

Schraubenluftverdichter mit Wassereinspritzung



Testbedingungen:
Beide Schrauben beschichtet
Gleitgeschwindigkeit: 50 m/s
Testdauer: 1.000 Stunden
Kühlung und Schmierung mit Wasser
Unsynchronisiert
Quelle: Universität Dortmund



Hydraulik-Pumpen und Hydraulik-Motoren

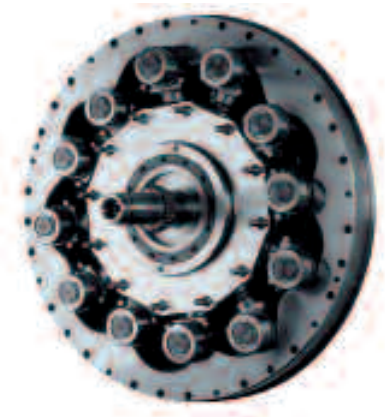
Hoher Druck, extreme Strömungsgeschwindigkeiten und kleinste Partikel beanspruchen Komponenten in Wasserpumpen teilweise so stark, dass Hartmetall als Materiallösung nicht mehr ausreicht. Die äußerst harten Schichten BALINIT® DLC und BALINIT® FUTURA NANO bieten sich hier als passende Verschleißschutzlösung an, um zusätzlich konstruktive Freiräume zu schaffen.

Auch andere hoch beanspruchte Hydraulik-Komponenten werden durch die Beschichtung mit BALINIT® wirksam gegen Verschleißmechanismen wie Erosion, Kavitation, Deformation, Adhäsion und Abrasion geschützt.

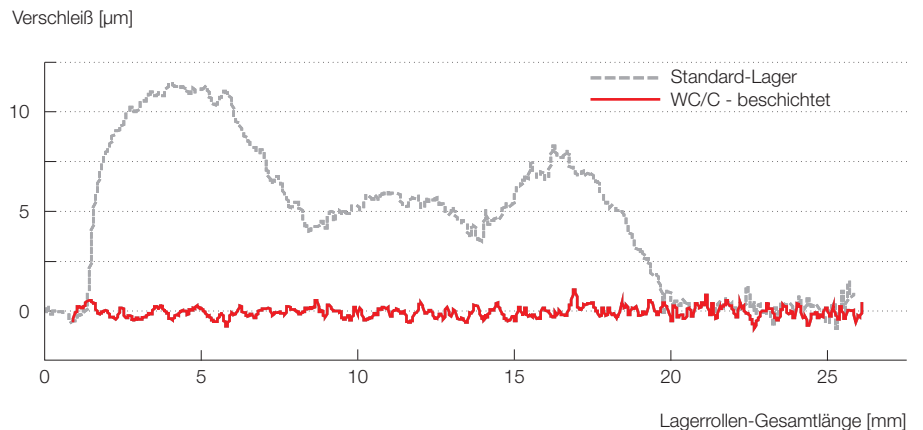
Aufgrund ihrer Vorzüge eignen sich Hartstoffschichten auch für Sonderbereiche: So dürfen als Druckmedien für Applikationen im Bergbau (Brandgefahr) und bei Waldarbeiten (Umweltschutz) keine Mineralöle verwendet werden. Dort kommen schwer entflammbare Hydraulikmedien auf Wasserbasis (HFA, HFC) zum Einsatz. In all diesen Fällen können BALINIT®-Beschichtungen die entstehenden tribologischen Herausforderungen lösen.

Radialkolben-Pumpen Radialkolben-Motoren

Die hohe Leistungsdichte in sehr kompakten Hydraulikmotoren erschwert die Schmierung, sodass Reibungsverluste und Adhäsivverschleiß auftreten. Dank BALINIT® C sinkt die statische Reibung zwischen Rollen und Graugusskolben um 40 Prozent, die Energieverluste beim Motorstart gehen um 18 Prozent zurück, und Stick-Slip tritt nicht mehr auf. Darüber hinaus verhindert die WC/C-Beschichtung das Anfressen und reduziert die Beeinträchtigungen bei den Lagerrollen insgesamt so deutlich, dass nach 58.000 Umdrehungen über die gesamte Länge der Lagerrollen praktisch kein Verschleiß mehr festzustellen ist. Die unbeschichtete Stahlrolle weist dagegen bis zu 10 µm Verschleiß auf.



Radialkolben-Hydraulikmotor



Verschleißreduktion bei WC/C-beschichtetem Wälzlager im Radialkolbenmotor:

Last: 70 kN

Temperatur: 50 °C

Testdauer: 58.000 U

Drehzahl: 6 U/min

Schmierstoff: Shell Tellus 68 S / 4 mg/l ISO MTD

Quelle: U. Olofsson, H. Sjöström, U. Sjödin / ASME Journal of Tribology

Axialkolbenpumpen

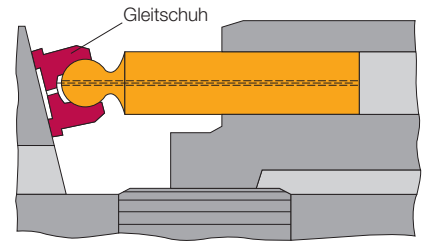
Axialkolbenpumpen gewinnen an Widerstandsfähigkeit, wenn die Gleitschuh-Komponenten nicht aus Bronze, sondern aus Stahl gefertigt und mit BALINIT® C beschichtet werden. Das System wird dadurch resistenter gegen Abrasion, mechanische Überlastung und Deformationen, die steigende Drücke und Drehzahlen typischerweise an Gleitschuhen aus Bronze verursachen. Die Beschichtung gewährleistet die Gleitfunktion und sorgt für erhöhten Verschleißschutz, während der Stahl Deformationen verhindert. Auch auf dem Axialkolben sichert BALINIT® C die Gleitfunktion und verhindert dadurch Fressschäden, die durch Mangelschmierung hervorgerufen werden.



Bronze: Abrasivverschleiß und Verformung



Stahl und BALINIT® C (WC/C): Verschleiß < 1 µm



Testbedingungen:
 Max. Druck: 350 bar
 Max. Drehzahl: 2.200 U/min
 Testdauer: 1.000 Stunden

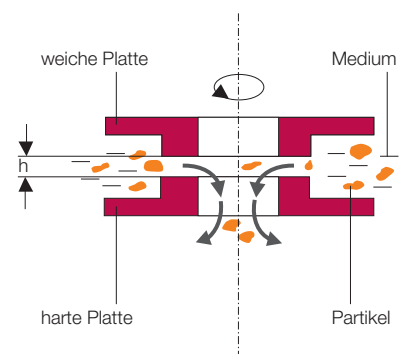
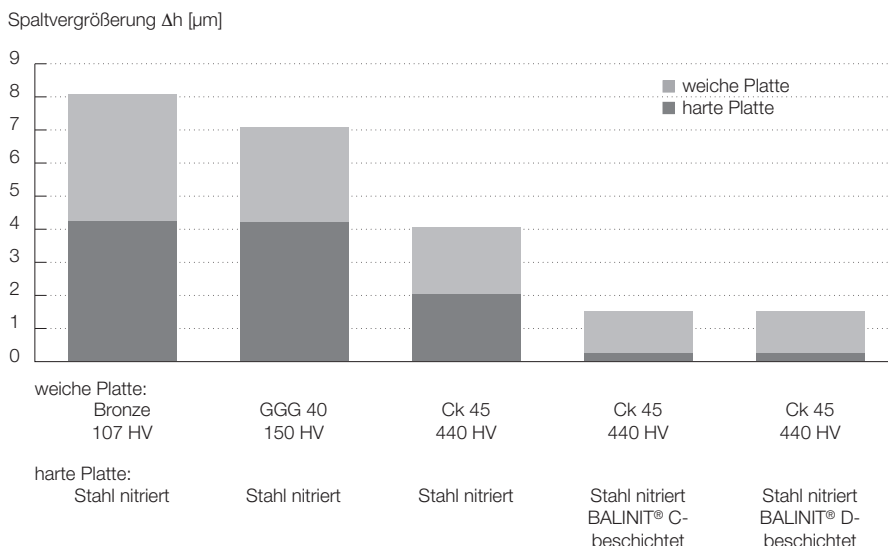
Abrasionsverhalten von Hydraulik-Werkstoffen

Bei Axialkolbenpumpen wird häufig eine Paarung aus harten und weichen Werkstoffen eingesetzt, um den Verschleiß möglichst gering zu halten (z. B. Nitrierstahl und Bronze für Steuerplatte-Zylindertrommel). Um die optimale Kombination zu ermitteln, wurde

in Modellmessungen das Verschleißverhalten verschiedener Werkstoffe untersucht, wobei auch PVD-beschichtete Komponenten mit einbezogen wurden. Feststoffpartikel im durchströmenden Medium verursachen zwischen den zu prüfenden Scheiben eine messbare Spaltvergrößerung. Es zeigt sich, dass markante Verbes-

serungen erzielt werden, wenn die weichen Gleitwerkstoffe durch einen Vergütungsstahl (DIN 1.1191/Ck 45) ersetzt werden und gleichzeitig die harte Platte PVD-beschichtet wird. Das gesamte System wird dadurch abriebfester.

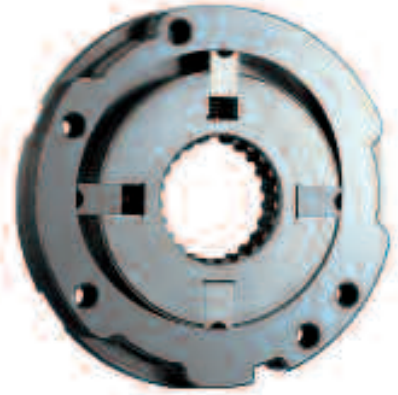
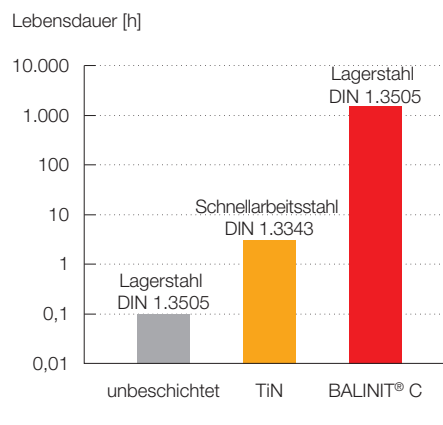
Abrasionsverhalten von Materialien hydraulischer Komponenten



Drei-Körper-Verschleiß:
 Partikelkonzentration: 2,5 g/l
 Partikelgröße: 0 - 50 µm
 Originale Spaltgröße h: 32 µm
 Medium: Öl-Wasser-Emulsion HFA
 Quelle: Dissertation St. Lehner / IFAS Aachen

Flügelzellenpumpen ohne Additiv-Zusatz

Unbeschichtete Flügel einer Flügelzellenpumpe fressen im Test mit additiv-freiem Hydrauliköl bereits nach wenigen Minuten. In der Praxis zeigt sich, dass die mit BALINIT® C beschichteten Flügel eine markante Verlängerung der Lebensdauer gegenüber unbeschichteten und mit Titanitrid (TiN) beschichteten Flügeln bewirken.



BALINIT® C (WC/C)-beschichtete Flügel verlängern die Lebensdauer der Pumpe vor allem beim Einsatz von Hydraulikmedien mit geringem Verschleißschutzvermögen.
Hydraulikmedium: Additiv-freies Mineralöl

Schraubenspindelpumpen im Wassereinsatz

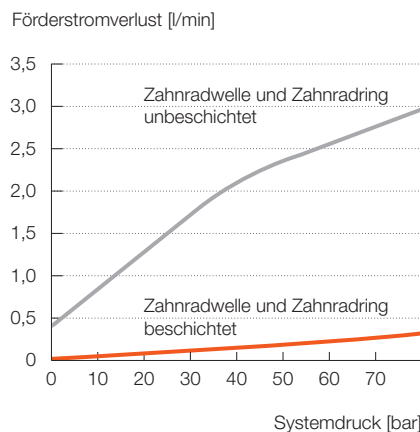
BALINIT® C verhindert das Anfressen von Schraubenspindelpumpen, die in Süßwasser oder bei maritimen Anwendungen Einsatz finden. Die Spindeln sind aus korrosionsbeständigen Stählen, die leicht zum Anfressen neigen. Dies unterbindet die gegen Wasseranriff inerte WC/C-Beschichtung, sodass die Lebensdauer sichergestellt werden kann.

Abriebfeste Hochdruck-Pumpenkolben

Im Betrieb von Hochdruckpumpen können abrasive Partikel trotz des Einsatzes von Hartmetall (Härte: 1.500 Vickers) Riefen und damit Undichtheit verursachen. Die Kohlenstoffschicht BALINIT® DLC verbessert durch ihre hohe Härte von über 2.000 Knoop den Abriebwiderstand. Teure Werkstoffe wie Hartmetalle oder Keramikkolben lassen sich somit bei nicht zu hohen Flächenpressungen durch gehärteten Stahl ersetzen.

Innenzahnradpumpe

Beim Fördern abrasiver Medien tritt an Komponenten von Innenzahnradpumpen wie Zahnradwelle und Zahnradring so starker Verschleiß auf, dass untragbare Förderstromverluste entstehen. Mit einer harten, besonders dicken TiAlN-Schicht (ca. 7 µm) werden Verschleiß und damit die Förderstromverluste stark reduziert.



Ventile und Armaturen

In Ventilen und Armaturen entsteht oft Korrosion gepaart mit Abrasion und Erosion durch mitgeführte Partikel. Insbesondere bei Hochdrucksystemen zählen Abriebwiderstand sowie Schutz gegen Anfressen und Korrosion zu nachdrücklichen Forderungen bei der Herstellung von Komponenten.

Entsprechende Lösungskonzepte, die alle diese Eigenschaften vereinen, sind mit klassischen Materialpaarungen und ohne Einsatz von Beschichtungen aber kaum zu realisieren.

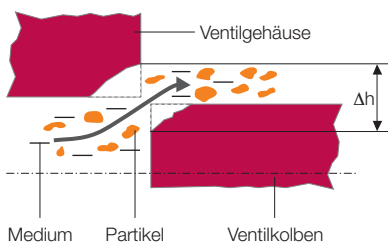
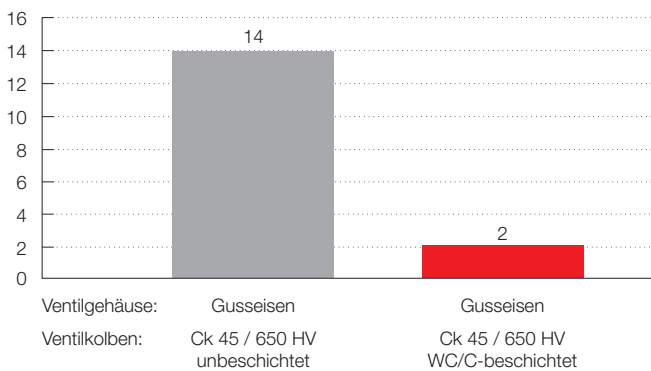
Leckage-Schutz für Hydraulik-Ventile

PVD-Kohlenstoffschichten wie BALINIT® C schützen Ventile vor Verschleiß und gewährleisten dadurch deren präzisen Betrieb, Dichtheit und Wirkungsgrad. Aufgrund ihrer hohen Härte schützen die Schichten die hochpräzisen Gehäuse-, Sitz- und Kolbenkan-

tengeometrien auch beim Einsatz unreinigter Medien. Dies verhindert eine Leckage. BALINIT® C zeigt in einem Versuch mit Proportional-Wegeventilen bei Verwendung der Hydraulikflüssigkeit HFA nur einen Bruchteil des Verschleißes verglichen mit dem unbeschichteten Ventil aus Vergütungsstahl.

Verschleißverhalten von BALINIT® C (WC/C)-beschichteten Hydraulikventilen

Spaltvergrößerung Δh [μm]



Durchfluss: 50 l/min
 Ventiltyp: 4/3 Proportional-Wegeventil
 Medium: Öl-Wasser-Emulsion HFA
 Quelle: Dissertation St. Lehner / IFAS Aachen



Trockenlauf von Pneumatikventilen

BALINIT® C ermöglicht den Betrieb von Pneumatikventilen im Trockenlauf und senkt dadurch Ausfallkosten. Diese Ventile steuern unter anderem in Papiermaschinen das präzise Aufrollen der Papierbahnen und sind üblicherweise fettgeschmiert. Bei Fettmangel klemmen sie jedoch und verursachen einen teuren Produktionsstopp. Die WC/C-Beschichtung senkt die Reibung soweit, dass die Pneumatikventile auch fettfrei funktionieren.

Klimaanlagen-Ventile

In Klimaventilen, die den Außenluft-Einlass steuern, kann es zu Korrosion und Tribooxidation der Ventilstößel kommen. Durch die Beschichtung mit BALINIT® C oder BALINIT® DLC wird der Reibwert reduziert und der Korrosionsschutz markant verbessert. Die präzise Steuerfunktion der Ventile ist dadurch viel länger gewährleistet.



Weitere Anwendungsgebiete

Gerade bei Maschinen und bei Systemen, die eine hohe Lebensdauer und/oder Betriebssicherheit erfordern, werden extreme Anforderungen an hochpräzise Bauteile gestellt. Entsprechend steigt auch das Versagensrisiko. Durch die Beschichtung mit BALINIT® lassen sich Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Maschinenbauteilen deutlich steigern und die geforderten Spezifikationen erfüllen.

Die vorteilhaften Eigenschaften und das leistungssteigernde Einsatzverhalten der Beschichtung werden in den verschiedensten Bereichen des Maschinenbaus genutzt, um die Funktionssicherheit zu gewährleisten, Wartungsintervalle zu verlängern und Betriebskosten zu senken.

Einige BALINIT®-Schichten sind sowohl von der RCC (Registration and Consulting Company) als auch von der FDA (Food and Drug Administration) für den Einsatz in der lebensmittelverarbeitenden und Medizinal-Industrie zugelassen.

Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen sollen immer schneller und präziser fertigen. Dies führt zu höheren Belastungen und demzufolge zu mehr Verschleiß auf Kosten von Bearbeitungsgenauigkeit und Produktqualität. BALINIT®-Schichten halten die Präzision im Spiel und dienen als maßgeschneiderter Verschleißschutz für Werkzeugmaschinen-Komponenten wie z. B. Getriebe, Spannsysteme, Gewindespindeln, Führungsschienen und Steuerscheiben.

Spannsysteme

BALINIT® C und BALINIT® DLC halten die Fertigungsgenauigkeit von Spannsystemen auf hohem Niveau: Besonders bei schnellen Spannvorgängen in der Massenfertigung oder bei hohen Spannkräften kommt es zu unerwünschtem Verschleiß von Spannzangen, der die Präzision beeinträchtigt. Die Beschichtung mit BALINIT® C und BALINIT® DLC vermindert Reiboxidation und Fretting und steigert dadurch die Effizienz von Spannsystemen.



Kunststoff-Spritzgussmaschinen

Gleitelemente von Kunststoff-Spritzgusswerkzeugen wie Auswerfer, Schieber oder Ausdrehkerne werden durch BALINIT® C wirkungsvoll gegen Verschleiß und Anfressen geschützt. Die Beschichtung ist ein Muss, wenn die Endprodukte nicht mit kontaminierenden Schmier- und Trennmitteln in Berührung kommen dürfen. Durch die anti-adhäsiven Eigenschaften verrin-

gert BALINIT® auch das Anhaften der Schmelze auf Schneckenspitzen, Rückströmsperren, Düsen und Verschlussnadeln.

Ausdrehkerne

Beim Spritzgießen von Verschlusskappen für pharmazeutische Verpackungen dürfen keine Schmier- und Trennmittel verwendet werden. Mit BALINIT®-beschichteten Ausdrehkernen können die Wartungsintervalle für ein 30fach-Werkzeug von einer Woche auf mehr als 8 Monate verlängert werden. Sicheres Entformen und um 10 % kürzere Zykluszeiten bringen eine um 20 % höhere Produktivität.



Auswerfer von Kunststoffformen

BALINIT® C (WC/C) verhindert das Klemmen und Anfressen der Auswerfer und erhöht dadurch die Fertigungssicherheit beim Spritzgießen.



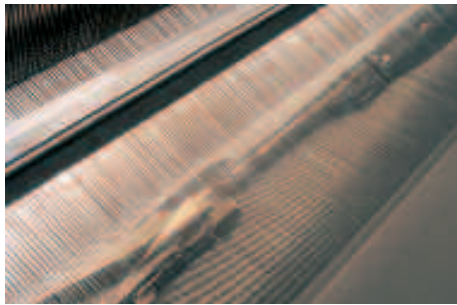
Textilmaschinen

Komponenten von Textilmaschinen werden durch Fasern und deren Zusatzstoffe (z.B. Titanoxid) sowie durch Verunreinigungen (Staub) stark abrasiv beansprucht. Weiters erzeugen immer schnellere Maschinen-Bewegungen hohe Gleitgeschwindigkeiten an reibenden Metallkomponenten.

Webmaschinen

Schussfadenklemmen

Für Schussfadenklemmen von Greifer-Webmaschinen kamen bisher boriierte Stahlkomponenten zum Einsatz. Die relativ raue Oberfläche, die diese Behandlung erzeugt, führte jedoch zu einem ungünstigen Betriebsverhalten. Die Beschichtung mit BALINIT® CNI kombiniert hohe Härte und damit Verschleißfestigkeit mit einer glatten Oberfläche, so dass das Klemmen der Fäden zuverlässig funktioniert.



In Webmaschinen werden die am stärksten beanspruchten Webkamm-lamellen mit TiN, CrN und DLC beschichtet. Bei Texturiermaschinen werden DLC-Schichten eingesetzt. Düsen von Luftdüsenwebmaschinen werden mit TiN, CrN oder DLC beschichtet.

Spinnmaschinen

Bei Spinnmaschinen bewähren sich CrN-Schichten auf Auflösewalzen von Rotorspinnmaschinen und auf Ringen von Ringspinnmaschinen.

Kohlenstoffschichten versagen bei Ringspinnmaschinen frühzeitig durch die zu hohe Temperatur, die durch die extrem hohe Geschwindigkeit der Ringläufer erreicht wird.

Fadenführer und Umlenkungen aus Stahl und Keramik werden mit CrN und DLC beschichtet.



Auflösewalze einer Rotorspinnmaschine mit BALINIT® CNI-Beschichtung



Spinnring mit BALINIT® CNI-Beschichtung



Fadenführer mit BALINIT® DLC-Beschichtung

Maschinen zur Verarbeitung von Lebensmitteln

Gegen Korrosion in Lebensmittelmaschinen werden vielfach rostfreie, austenitische Stähle eingesetzt. Da es sich dabei aber um relativ weiche Werkstoffe handelt, drohen in stärkerem Maße Verschleiß und Anfressen. Zusätzliche Materialbelastungen ergeben sich z. B. bei der Verwendung von Abfüllkolben, die in ein eng toleriertes Gehäuse eingebracht sind. Hier erbringt das durchgeleitete Abfüllprodukt nur eine geringe Schmierwirkung bzw. führen pulverförmige Zusatzstoffe zu starker Abnutzung. Der Einsatz von Schmiermitteln oder konventionellen Beschichtungen kommt jedoch oft nicht in Frage, weil alle Materialien, die mit Nahrungsmitteln in Berührung kommen, lebensmittelecht sein müssen. BALINIT®-Schichten erfüllen diese Anforderungen und sind FDA-zertifiziert.

Dosierkolben

Die Beschichtung mit BALINIT® CNI verbessert die Funktion von Dosierkolben zum Abfüllen von Marmeladen deutlich. Durch den Austritt von Fruchtsäure, aber auch durch Kondensation bei Betriebsstillstand tritt Korrosion auf. Zudem führen Ablagerungen an Dichtungen zu Abrasivverschleiß. Mit einer BALINIT® CNI-Beschichtung arbeiten die Abfüllstationen über viele Monate hinweg wartungsfrei.

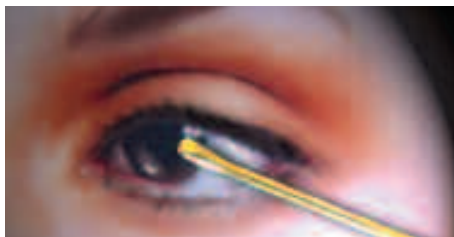


Medizinaltechnik

Sauberkeit und schmierungsfreier Betrieb sind beim Einsatz medizinischer Instrumente unerlässlich. Damit wächst jedoch die Verschleißanfälligkeit dieser chirurgischen Werkzeuge. Die Kohlenstoffschichten BALINIT® C und BALINIT® DLC erweisen sich hier in mehrfacher Hinsicht als vorteilhaft. Sie verhindern das Anfressen und gewährleisten den einwandfreien Betrieb auch im Trockenlauf, z. B. auf Pneumatik-Komponenten von Geräten zum Implantieren und Entfernen von Knochenmarknägeln oder in chirurgischen Knochensägen. Zugleich schützen sie die Komponenten und Geräte beim Sterilisieren gegen Korrosion.



Auf Instrumenten für die Augenchirurgie dient BALINIT® A (TiN) wegen seiner goldgelben Farbe als Unterscheidungsmerkmal gegenüber unbeschichteten Instrumenten. Außerdem wird die vorteilhafte ästhetische Wirkung der Schicht geschätzt.



Präzisionsmechanik

Reibungsmindernde und abriebfeste, aber auch dekorative Schichten werden in der Präzisionsmechanik eingesetzt. So werden z. B. Gleitführungen für Mikroskope oder Gehäuse-Gleitelemente von Mobiltelefonen mit WC/C beschichtet.

Komponenten mechanischer Uhren (Zahnräder, Wellen, Lagerstellen, Federn, Federgehäuse) werden mit BALINIT® C und BALINIT® DLC beschichtet, um Wartungsintervalle zu verlängern und einen ölfreien Betrieb zu ermöglichen. Zudem werden Kohlenstoff- und Nitridschichten aufgebracht, um den Uhren ein attraktives farbliches Aussehen zu verleihen. Es werden Elemente aus Stahl, vernickeltem Messing oder Teile aus Silizium beschichtet.

Partner für Ihren Erfolg

Seit der BALINIT®-Markteinführung 1980 wurden mit der ständig weiterentwickelten Balzers PVD-Beschichtungstechnologie viele hundert Millionen Bauteile für namhafte Automobilhersteller und -zulieferer sowie Maschinenbau-Unternehmen in Groß- und Kleinserie beschichtet. Balzers nimmt hier eine weltweit führende Stellung ein und verfolgt eine Strategie, die bei Forschung und Entwicklung anfängt und bis zu einem globalen Netz von Beschichtungs- und Applikationszentren mit hohem Qualitätsstandard reicht.

Diese Strategie erfüllt die Anforderungen, die für eine erfolgreiche Bauteil-Beschichtung heute gelten:

- Starkes Gewicht auf individuellen Beschichtungslösungen;
- Bereitstellung einer effizienten Fertigungsstruktur samt kundenorientiertem Projektmanagement;
- Integration des spezifischen Know-hows typischer Tribosysteme für den funktionsgerechten Zuschnitt von Schichten und Produktionsverfahren.

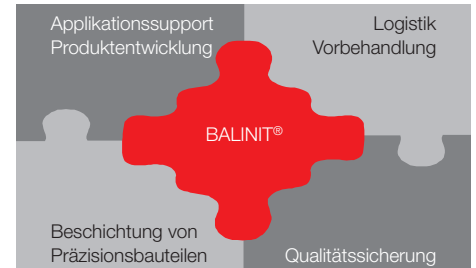
So kann Balzers den selbst gesteckten hohen Kernanspruch erfüllen: Berater-der Entwicklungspartner mit Kompetenz für den Erfolg nicht nur von Schichten, sondern von Bauteil und System zu sein.

Forschung und Entwicklung

Das fundierte Beschichtungs-Know-how von Balzers gründet auf den weltweiten Aktivitäten sowie den engen Kontakten zur Industrie und zu zahlreichen Forschungsinstituten der Fertigungstechnologie und Konstruktions-technik.

Entwicklung von Schichten, Applikationen und Anlagen

Das Forschungs- und Entwicklungszentrum befindet sich am Balzers-Hauptsitz in Liechtenstein. In den dortigen Labors werden kundenspezifische Anwendungsforschung betrieben sowie die Grundlagen für serientaugliche PVD- und PACVD-Verfahren entwickelt. Um die Leistungsfähigkeit der Schichten weiter zu steigern und Fehlerquellen systematisch zu beseitigen, werden neue Schichtsysteme in Tests weit höheren Belastungen ausgesetzt als im realen Bauteileinsatz. So lassen sich die Produktfamilie BALINIT® und der Zuschnitt von Beschichtungs-Lösungen auf gewünschte Produktspezifikationen immer weiter optimieren. Ständig weiterentwickelt werden auch die Anlagen- und Fertigungstechnik sowie die technischen Qualitätssysteme für die Produktion. Die Entwicklung von neuen Schichtsystemen wird auf Produktionsanlagen durchgeführt, um einen schnellen Transfer in die Serienfertigung sicherzustellen.



Balzers Expertise & Services:
Kompetenz für Bauteil und System

Analytik und Qualitätssicherung

Neben den standardisierten Verfahren zu Qualitätssicherung bietet Balzers zusätzlich fundierte Detail-Expertisen wie etwa die Analyse tribologischer Fragestellungen oder metallografische Untersuchungen und Bewertungen an. Zu den Dienstleistungen zählen auch weiterentwickelte Messmethoden speziell für Schichten mit Dicken im Bereich von 1 µm.

Entwicklungspartnerschaft

Für besonders schwierige Aufgabenstellungen, bei denen hochspezialisierte Messtechniken benötigt werden, wird die Kompetenz externer Labore und Forschungsinstitute genutzt. Darüber hinaus arbeitet Balzers eng mit renommierten Anbietern spezieller Messtechniken zusammen und entwickelt so Mess-Systeme zur Qualitätssicherung und Prüfung beschichteter Bauteile, um die Beschichtungen stetig zu verbessern.

Messtechniken zur Qualitätssicherung

Verlässliche Messmethoden unter genormten Testbedingungen (Referenzsubstrate, Umgebungsbedingungen, Prozesse) sind die Voraussetzung dafür, die Eigenschaften von PVD- und PACVD-Hartstoffschichten bestimmen und werten zu können. Die Qualität eines beschichteten Bauteiles in der Serienfertigung zu beurteilen heißt, eine verbindliche Aussage über die vom

Kunden geforderten Spezifikationen zu machen. Dazu bedient sich Balzers u. a. Verfahren, wie sie in den VDI-Richtlinien 3824 (Blatt 4) und 3198 beschrieben sind.

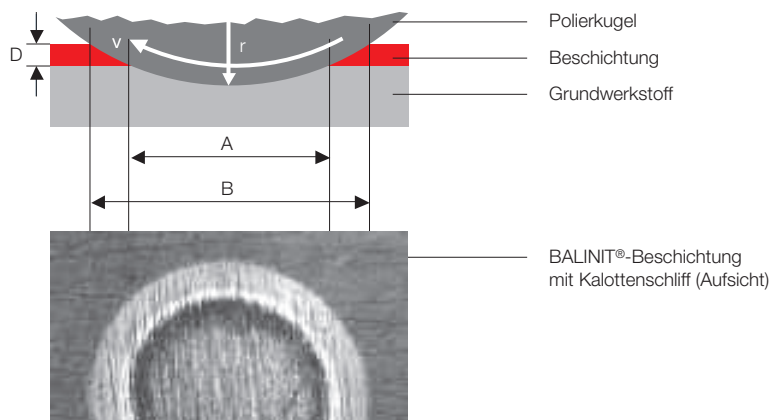
Messtechniken zur Qualitätssicherung

Methoden	Merkmal	Voraussetzungen	Genauigkeit	Zerstörend für Schicht	Zerstörend für Substrat
Kalottenschliff	Schichtdicke	Geometrie, Rauigkeit	0,3 - 0,5 μm	ja	ja
XRF Röntgenfluoreszenz	Schichtdicke	Geometrie Elementart	0,3 - 0,5 μm	nein	nein
FTIR Infrarotspektroskopie	Schichtdicke	DLC-Schicht > 0,5 μm	0,1 μm	nein	nein
Rockwell-Härteprüfung HRC	Substrathärte	Substrathärte Geometrie	± 1 HRC	ja	ja
Rockwell-Test	Schichthaftung	Substrathärte Geometrie	$\pm 0,5$ HF-Klassen	ja	ja
Tastschnitt-Profilometer	Rauigkeit	Geometrie	*	nein	nein

* abhängig von den Testbedingungen

Bestimmung der Schichtdicke mittels Kalottenschliff

Bei diesem Messverfahren wird in das beschichtete Substrat mit Hilfe einer Stahlkugel eine sphärische Vertiefung geschliffen. Die entstehende Kalotte wird ausgemessen und daraus die Schichtdicke berechnet.

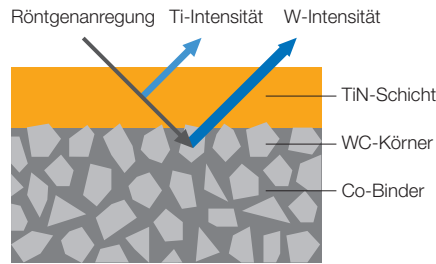


Schichtdickenmessung durch Kalottenschliff:
Berechnung der Schichtdicke D aus den Maßen A, B und dem Kugelradius r.

Bestimmung der Schichtdicke mittels Röntgenfluoreszenz XRF

Hierbei wird die zu prüfende Oberfläche mit Breitband-Röntgenstrahlen bestrahlt. Die Intensität der für die Beschichtung charakteristischen Röntgenfluoreszenzlinien wird als Maß für die Schichtdicke herangezogen. Kalibrierte Spektren für die zu untersuchenden Schichtmaterialien und Grundwerkstoffe sind im Messgerät gespeichert. Bei einer zu messenden Probe müssen Schichtart und Grundwerkstoff bekannt sein. Die entspre-

chenden Daten werden als Referenzgrößen vor einer Messung eingegeben. Aufgrund der Intensitäten des Schicht- und Grundmaterials ermittelt das Gerät dann die Schichtdicke.

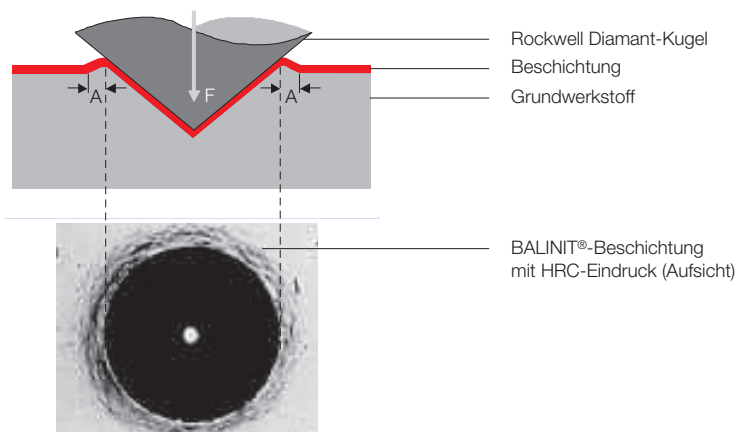


Bestimmung der Schichtdicke mittels Infrarotspektroskopie

Für BALINIT® DLC wurde ein spezielles Infrarot (IR)-Verfahren entwickelt. Die IR-transparente DLC-Schicht wird dabei reflektiv durchstrahlt und über das Interferenzverhalten wird die Schichtdicke ermittelt.

Haftungsprüfung durch Rockwelltest

Bei einer konventionellen Härteprüfung nach Rockwell (DIN 50103) werden das Rissnetzwerk bzw. die Schichtabplatzungen im Randbereich des Härteindrucks lichtmikroskopisch ausgewertet. Es erfolgt eine Bewertung in sechs Haftungsklassen gemäß VDI-Richtlinie 3198.



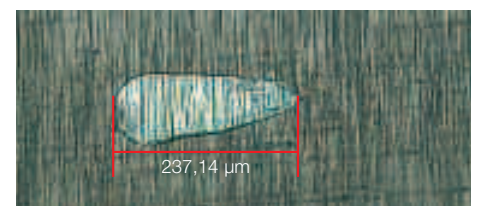
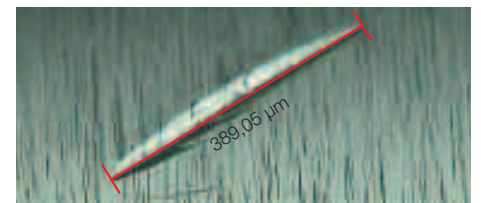
Schichthaftungstest durch Rockwell-Eindruck: Vergleichende Beurteilung der Schichthaftung anhand des Verformungsbildes im Bereich A mit definierten Bildreihen.

Tastschnitt-Profilometer

Viele hoch beanspruchte Präzisionsteile werden heute auf μm genau gefertigt und müssen auch nach der Beschichtung einwandfrei die spezifizierte Geometrie aufweisen. Deshalb müssen charakteristische Größen wie Durchmesser, Planität oder Konzentrität auch nach der Beschichtung geprüft und nachgewiesen werden.

Optische Prüfungen mit Lichtmikroskop

Die tribologischen Eigenschaften können durch Oberflächendefekte negativ beeinflusst werden. Um die Oberflächenqualität zu überprüfen, werden zur visuellen Kontrolle Lichtmikroskope und Leuchtlupen, bei Großserien vollautomatische Kamerasysteme eingesetzt. Es werden standardisierte Fehlerkataloge verwendet, welche die typischen Merkmale geschliffener, beschichteter Bauteile beschreiben.



Messtechniken zur Spezifikation und Analyse

Methoden	Merkmal	Voraussetzungen	Genauigkeit	Zerstörend für Schicht	Zerstörend für Substrat
Querschliff, Gewaltbruch REM, Mikroskop	Schichtdicke, Schichtstruktur	keine	0,1 - 0,5 µm	ja	ja
REM-EDX Energiedispersive Röntgenanalyse im Rasterelektronenmikroskop	Schichtzusammen- setzung	Nachweisbare Elementart ≥ Bor	*	nein	nein
Nano-/Mikrohärte	Schichthärte	Geometrie, Rauigkeit Schichtdicke > 1 µm	± 20 %	ja	nein
Ritztest	Schichthaftung	Substrathärte Geometrie	*	ja	ja
Verschleißtest Kalottenanschliff	Verschleißkoeffizient	Plane Oberfläche Rauigkeit	*	ja	nein
Tribometer Rotation, Oszillation	Reibbeiwert, Lebensdauerest	Geometrie	*	ja	ja
Oberflächenscanner	Oberflächentopographie	Geometrie	*	nein	nein
Schichtaufbau	Tiefenprofilanalyse	Geometrie	± 2 %	ja	ja
XRD Röntgen-Srukturanalyse	Kristallstruktur	Geometrie	*	ja	ja

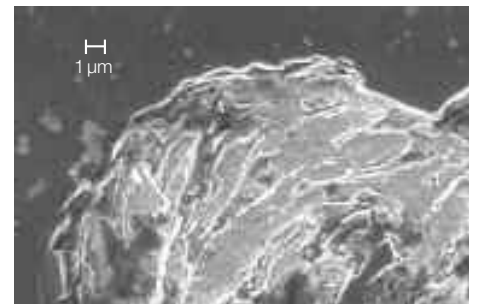
* abhängig von den Testbedingungen

Während in der Produktion Methoden herangezogen werden, die serienbegleitend eine kostengünstige und standardisierte Qualitätssicherung ermöglichen, stehen für die Entwicklung weitergehende Analysemethoden zur Verfügung. Die Verfahren sind teilweise aber sehr aufwendig und werden daher nur selten in der Qualitätssicherung eingesetzt.

Als Mess-Systeme benutzt Balzers:

Raster-Elektronen-Mikroskope (REM) mit EDX-Systemen

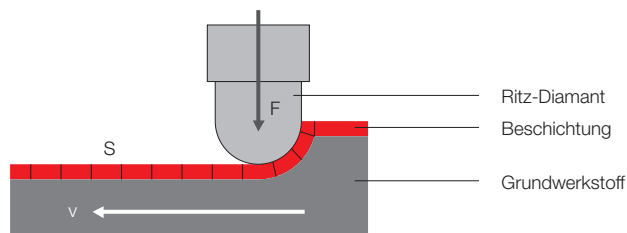
Die Mikroskope liefern hochaufgelöste Bilder der Oberfläche, analysieren mit Hilfe von EDX-Systemen die Schichtzusammensetzung und ermitteln die darin vorkommenden Elemente. Das REM wird auch verwendet, um Aufschluss über den Verschleißmechanismus eines Tribosystems zu geben. Das Bild zeigt den Ermüdungsver-schleiß einer hoch belasteten DLC-beschichteten Ventiltriebskomponente.



Schichtermüdung einer hoch belasteten DLC-beschichteten Ventiltriebskomponente
Vergrößerung: 8.000x (REM-Aufnahme)

Ritztest

Hierbei wird ein Rockwell-C-Diamant mit steigender Belastung über die beschichtete Oberfläche gezogen. Als Maß der Schichthaftung werden die Schichtschädigungen lichtmikroskopisch nach Art und Größe in Abhängigkeit von der Belastung bewertet.



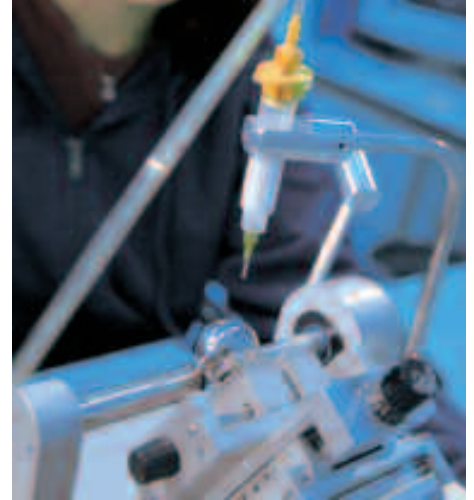
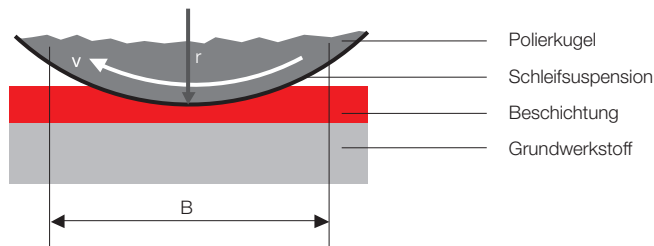
Ritz-Diamant
Beschichtung
Grundwerkstoff

Ritz in BALINIT®-beschichteter Oberfläche, Aufsicht

Abrasions-Verschleißtest (Calowear)

Mit Hilfe einer Stahlkugel und einer abrasiven Paste wird die Schicht angeschliffen und daraus der Verschleißkoeffizient der Beschichtung bestimmt. Im Unterschied zur Schichtdickenmessung wird die Schicht nur angeschlif-

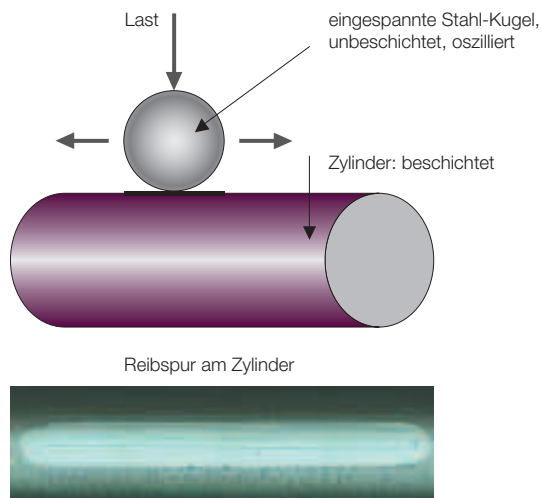
fen, nicht durchgeschliffen. Der Test wird mit standardisierten Parametern von Aufbau, Kugelgröße, Geschwindigkeit, Diamantsuspension usw. durchgeführt. Das Verschleißvolumen wird dann mit einem Referenzmaterial, meist einer genormten DLC-Schicht, verglichen.



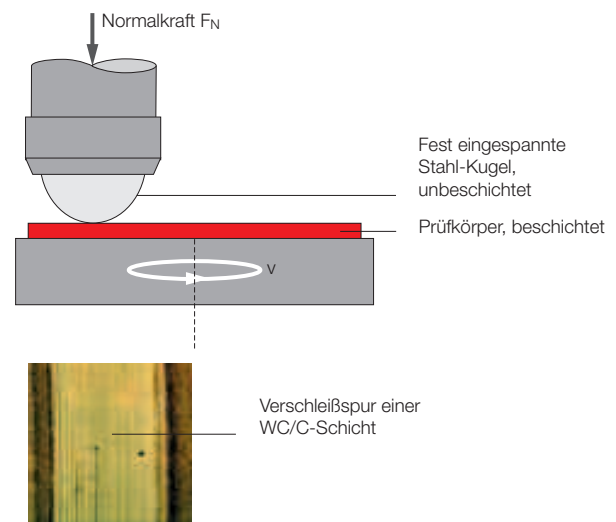
Tribometer

Mit einem Tribometer wird der Reibwert μ oder das Verschleißverhalten von Oberflächen gemessen. Dies kann mit rotierenden oder oszillierenden Prüfkörpern erfolgen. Je nach Untersuchungsaufgabe kann Schmiermittel zugesetzt werden.

Tribometer mit oszillierender Bewegung

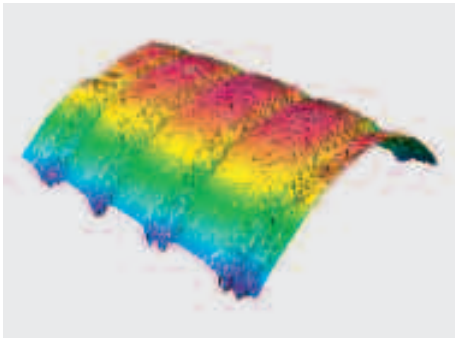


Tribometer für Gleitverschleißtest



Oberflächenscanner

Mit diesem dreidimensional und berührungslos arbeitenden Abtastgerät wird die beschichtete Bauteil-Oberfläche auf ihre einwandfreie Beschaffenheit und Rauigkeit geprüft.

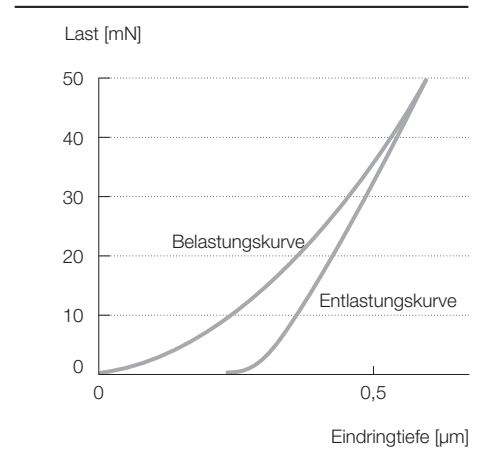
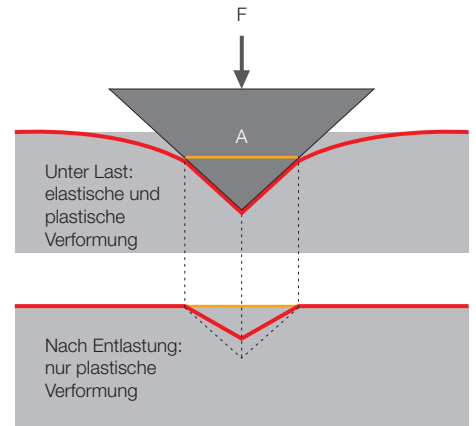


XRD Röntgen-Strukturanalyse

Bei der XRD-Analyse werden die Kristallphasen von Hartstoffschichten durch Röntgenbeugung ermittelt. Das Gerät hat dazu alle möglichen Phasen von Hartstoffschichten gespeichert und vergleicht diese mit der Probe.

Nano- und Mikrohärtete

Bei der klassischen Härtemessung nach Vickers und Knoop für Bulk-Werkstoffe wird aufgrund relativ hoher Prüflasten nur die plastische Verformung der Härteeindrücke ermittelt. Bei der Messung dünner Schichten darf der Diamant nur bis zu einer Tiefe von 10 % der Schichtdicke eindringen. Dies erfordert sehr kleine Prüflasten (10-50 mN). Bei solch geringen Eindringtiefen muss auch der elastische Verformungsanteil berücksichtigt werden. Dies erreicht man durch dynamische Messverfahren. Es wird eine Belastungs- und Entlastungskurve aufgenommen, die zur Ermittlung der Schichthärte herangezogen wird. Die so ermittelten Daten werden in die üblichen Knoop- und Vickerswerte übertragen. Während bei weniger elastischen Nitridschichten noch einfache Knoop-Härtemessungen vorgenommen werden, ist für die hochelastischen DLC-Schichten unbedingt die dynamischen Eindringmessung durchzuführen.



Applikationssupport

Balzers offeriert weltweit kundennahen Applikationssupport auf folgenden Kompetenzfeldern:

Tribologie- und Materialberatung

Aus langjähriger Erfahrung und dem gezielten Einsatz der PVD-Beschichtungstechnologien resultieren tribologische Lösungskonzepte, die Verschleiß und Reibung für vielfältige Anwendungen auf ein Minimum senken.

Frühzeitige gemeinsame Produktentwicklung

Um das technische und wirtschaftliche Potenzial von Schichten bei vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand voll auszuschöpfen, bietet sich die frühzeitige Produktentwicklung der zu beschichtenden Bauteile im Experten-Team aus Oberflächen- und Fertigungstechnikern, Tribologen und Konstrukteuren an. Balzers versteht sich hierbei als Design-Partner mit Blick fürs System sowie großer Erfahrung in der Serienfertigung und berät beim beschichtungsgerechten Konstruieren von Bauteilen.

Kundennahe Applikations-Support-Zentren

Ein globales Netz von Applikations-Support-Zentren ermöglicht den Kunden schnellen Service vor Ort sowie frühzeitigen Zugriff auf technologische Neuentwicklungen von Balzers. Balzers ist in allen wichtigen Industrieregionen Europas, Amerikas und Asiens vertreten. Jeder Standort garantiert einen gleich bleibend hohen Qualitätsstandard in sämtlichen Kompetenzbereichen, Prozessabläufen und technischen Gegebenheiten. Die Entwick-



lung völlig neuer und kundenspezifischer Beschichtungslösungen stellt die intensivste Form des Applikationssupports für Balzers-Kunden dar.

Dienstleistungen nach Maß

Balzers hat es sich zum Ziel gesetzt, die technologische Gesamtkompetenz für die angebotenen Dienstleistungen und für die gesamte Wertschöpfungskette der Produktions- und Verfahrenstechniken zur Verfügung zu stellen. Die Beschichtungsanlagen und -verfahren sind Eigen- und Weiterentwicklungen, ihr Einsatz ist auf Kostenminimierung ausgelegt. Dazu tragen unter anderem folgende Faktoren bei:

- Flexibler Einsatz und optimale Ausnutzung der Anlagenkapazität durch modular aufgebaute Beschichtungsanlagen.
- Kürzeste Durchlaufzeiten.

- Minimaler Einsatz von Verbrauchsmaterialien.
- Integration der PVD-Beschichtungsanlagen in automatisierte Produktionsabläufe.
- Konsequenter Ausbau automatisierter Fertigungsabläufe in Zusammenarbeit mit den Kunden, um hohe Qualität und Produktivität zu sichern.

Neben dem Lohnservice bietet Balzers kundenspezifischen Zugang zur PVD-Technologie, der den jeweiligen strategischen Überlegungen des Kunden in Bezug auf Technologiezugriff, Flexibilität und Investitionsbereitschaft gerecht wird.

Kundengerechte Produkte und Dienstleistungen

Verkauf von Anlagen und Produktionslinien

Balzers verkauft seine Anlagen oder schlüsselfertige Produktionslinien, wenn der Kunde das Beschichten in seine Fertigung integrieren und in eigener Verantwortung durchführen möchte. Der Kunde erwirbt in diesem Fall auch einen definierten Beschichtungsprozess, wobei Anlagenfunktion und Beschichtungsqualität sichergestellt sind. Balzers bietet darüber hinaus Unterstützung an - zum Beispiel in Form von Trainingsangeboten zur Mitarbeiter-Qualifizierung, Serviceverträgen oder Retrofits für Anlagen und Verfahren.

Lohnbeschichtung

Balzers bietet den gesamten Produktionsprozess von der Bauteil-Eingangsprüfung über die Beschichtung bis zur Auslieferung im Lohnservice an. Dies bringt große Kosten- und Qualitätsvorteile für den Kunden, der sich Eigenaufwand in Sachen Know-how-Erwerb, Mitarbeiterqualifizierung und Praxisbetrieb erspart. Weltweit wird das Netz der Balzers-Beschichtungscentren ständig erweitert. Die Produktionsabläufe in den Beschichtungscentren sind eng an die Liefertermine gekoppelt. Daher bietet Balzers einen vernetzten Logistik-Service an, der sich nahtlos in die Kunden-Prozessketten einfügt und sich an den Branchenbedürfnissen orientiert.

Inhouse-Beschichtung

Für Beschichtungen in Großserie folgt Balzers auf Wunsch auch der Standortwahl des Kunden, um kurze Wege und langfristige Vorteile zu schaffen. Das heißt, Balzers übernimmt die Bauteil-Beschichtung in eigener Regie, integriert in den Produktionsablauf am Standort des Kunden.



Weltweiter Beschichtungs-Service

Alle Zentren arbeiten mit identischer Anlagentechnik und gleichem Know-how. Dies garantiert weltweit denselben hohen und reproduzierbaren Qualitätsstandard (ISO 9001 bzw. ISO/TS 16949).

Produktionsprozess und Verfahrenstechnik

Der Weg von der Eingangsprüfung der zu beschichtenden Präzisionsbauteile bis zum Rückversand an den Kunden ist ein spezialisierter Produktionsprozess in vielen Einzelschritten – zugeschnitten auf die jeweils geforderte Beschichtung mit ihren besonderen Eigenschaften.



Eingangsprüfung

Die zu beschichtenden Bauteile werden auf Stückzahl, Werkstoff und Oberflächenzustand geprüft. Auf Basis der Kundenspezifikationen wird die Fertigungsfolge festgelegt.

Reinigung

Die Reinigung erfolgt mehrstufig in einer Ultraschall-Reinigungslinie in alkalisch-wässrigen Lösungsmitteln ohne umweltbelastende Zusätze.

Saubere Oberflächen sind entscheidend für die Schichthaftung. Aus diesem Grund legt Balzers Wert auf PVD-gerechte Oberflächenpräparation. Mit dem Kunden werden die letzten Bearbeitungs- und Konservierungsschritte vor einer Beschichtung definiert und, sofern nötig, den Anforderungen der PVD-Beschichtung angepasst.

Das Reinigen von Serienbauteilen wird vereinfacht durch Anlieferung in speziellen Körben bzw. durch automatisierte Beladung der Reinigungslinie.

Vorbehandlung

Sind zusätzliche Vorbehandlungen nötig, nutzt Balzers dazu entsprechende Technologien: Ausheizen im Vakuumofen sorgt zum Beispiel für die Ent-

fernung von Materialrückständen in engen Bohrungen; Mikrostrahlen beseitigt poröse Oberflächenschichten.

Chargierung

Vor der Beschichtung werden die Bauteile - bei Serienbauteilen meist automatisch - auf ein auswechselbares Drehgestell chargiert und in die Anlage eingefahren. Dabei sichert eine kundenspezifische Anordnung und Halterung der Bauteile reproduzierbare Präzision.

Beschichtung

Die Beschichtung besteht aus einer Abfolge automatisch gesteuerter sowie dokumentierter Prozesse. Die folgende Prozessreihenfolge kennzeichnet die spezielle Balzers-Beschichtungstechnologie:

- Abpumpen der Beschichtungsanlage auf einen Basisdruck von rund 10^{-6} mbar
- Anlagen- und Sicherheitscheck
- Erhitzen der Bauteile auf die benötigte Temperatur
- Ionenätzen der Bauteile zur Erzeugung atomar reiner Oberflächen
- Beschichten mittels PVD-/PACVD-Verfahren
- Abkühlen
- Anlagencheck/Prozesskontrolle

Das Balzers Beschichtungs-Know-how wird im Übergang von der Ätz- in die Beschichtungsphase deutlich. Genau gesteuertes Aufbringen geeigneter Zwischenschichten sorgt hier für optimale Haftung der Funktionsschicht. Diese kann im Monolayer- oder Multilayer-Verfahren aufgebracht werden. Die Einstellung der Plasma-Parameter bestimmt die Schichteigenschaften, und die erprobte Anlagentechnologie gewährleistet die nötige Prozesssicherheit.



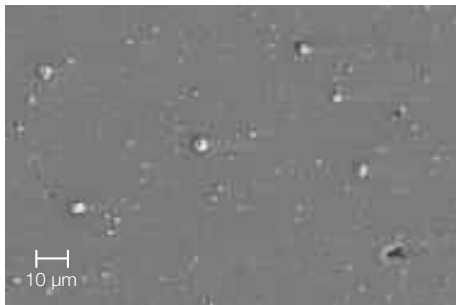
Endprüfung

Dazu gehört die Prüfung von Eigenschaften wie Härte, Schichtdicke und Schichthaftung sowie die Sichtkontrolle. Bei der Serienbeschichtung wird eine vereinbarte Zahl von Prüfteilen entnommen und eine statistische Prozesskontrolle der vereinbarten Prüfgrößen durchgeführt. Die automatisierte Prüfung von Serienbauteilen findet überall dort statt, wo dies unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich ist.

Nachbehandlung/Konservierung

In vielen Fällen führt Balzers eine Nachbehandlung durch, zum Beispiel wenn die beschichteten Bauteile zu entmagnetisieren oder zu konservieren sind.

Zunehmende Bedeutung erlangt das mechanische Nachbehandeln von Schichten. Obwohl durch die Beschichtung die Rauigkeit der Oberflächen nur geringfügig zunimmt, kann durch Abtragen kleinster Metalltröpfchen (Droplets) oder Wachstumsfehler die tribologische Leistungsfähigkeit beschichteter Bauteile weiter gesteigert werden.



Oberfläche einer PVD-Arc-Schicht mit Droplets, ohne Nachbehandlung.



Oberfläche einer PVD-Arc-Schicht mit Nachbehandlung.

Verpackung/Versand

Die beschichteten Bauteile werden üblicherweise im gleichen Gebinde, in dem sie angeliefert wurden, zurückgesandt. Besonderes Einsparungspotenzial ergibt sich, wenn die Bauteile bereits in geeigneten Reinigungskörpern angeliefert werden.

Qualitätsmanagement

Qualitätsmanagement beginnt nicht erst beim Wareneingang: Qualitätsverständnis und aktive Partnerschaft mit den Kunden heißt für Balzers vor allem auch Beratung während des gesamten Projektverlaufes. Dazu zählen maßgeschneiderte Lösungsvorschläge bei der Fragestellung der Schichtauswahl. Die Beratung erstreckt sich auch auf andere Bereiche: zum Beispiel welche Verpackung und Konservierung zur Anlieferung eines Produkts optimal ist, um die besten Bedingungen für den Beschichtungsprozess zu schaffen.

Null-Fehler-Qualität

Ziel von Balzers ist die Null-Fehler-Qualität. Dies wird erreicht durch ein zertifiziertes, prozessorientiertes Qualitätsmanagement. Weltweit sind alle Balzers-Beschichtungszentren nach ISO 9001 zertifiziert. Darüber hinaus erhielt Balzers als erster PVD-Beschichter das Zertifikat nach dem Qualitätsstandard QS-9000 für die

Beschichtungszentren, die sich auf die Beschichtung von Präzisionsbauteilen spezialisiert haben. Alle Produktionsstandorte, welche die Automobil-Industrie beliefern, sind zusätzlich nach ISO/TS 16949 zertifiziert.

Qualität bedeutet für Balzers das Erfüllen von Anforderungen der Kunden und ist somit die Grundvoraussetzung für die Kundenzufriedenheit. Die Beherrschung der Beschichtungsprozesse, modernes Prüfmittelmanagement, Messmittelfähigkeit und Statistische Prozesskontrolle (SPC) sind daher alltägliche Bestandteile der technischen Qualitätssicherung von Balzers und basieren auch auf der langjährigen Erfahrung in der Großserienproduktion.

Qualitätsmanagement ist nicht statisch, sondern ein Prozess, der bei Balzers gelebt und kontinuierlich verbessert wird.



Zertifiziertes Qualitätsmanagement

Weltweit sind alle Balzers-Beschichtungszentren nach ISO 9001 zertifiziert. Zentren, die sich auf die Beschichtung von Bauteilen für die Automobil-Industrie spezialisiert haben, sind auch im Besitz des ISO/TS 16949-Zertifikates.

Abrasion

Abrasiveverschleiß

Abtragen von Materialoberflächen durch harte oder kantige Oberflächen bzw. Partikel und Verunreinigungen im Zwischenmedium.

Adhäsion

Adhäsivverschleiß

Bildung von Grenzflächen-Haftverbindungen zweier Festkörper. Das kann zu Materialübertrag führen, der umso stärker ist, je enger der Kontakt ist und je weniger Fremdstoffe sich zwischen den beiden Oberflächen befinden.

Arc Evaporation

Beschichtungsverfahren im Vakuum nach dem Prinzip des Lichtbogen-Verdampfens.

Aufschmierung

siehe Adhäsivverschleiß

Ausheizen

Thermische Vakuumbehandlung zwecks Entgasen von Bohrungen, Sacklöchern oder Oberflächen.

BALINIT®

Markenname der von Balzers erzeugten und vertriebenen Hartstoffschichten.

Batch

siehe Charge

Brinelling

Bleibende Deformation eines Werkstoffs durch vibrierende und oszillierende Belastung, z.B. bei Kugellagern.

Charge (Batch)

Anlagenbeschickung bzw. Fertigungslos.

CrN-Schicht (Chromnitrid)

PVD-Hartstoffschicht.

CVD-Verfahren

(Chemical Vapour Deposition)

Thermisch aktiviertes, chemisches Vakuum-Beschichtungsverfahren aus der Gasphase.

DLC-Schicht

(Diamond Like Carbon)

PACVD-Hartstoffschicht.

Eierschaleneffekt

Schalenförmiges Einbrechen von Hartstoffschichten beim Einsatz unter hoher Last, verursacht durch die fehlende Stützwirkung des Grundwerkstoffes.

Entgasen

Thermisches Verdampfen organischer Rückstände und gebundener Gase.

Erosion

Zerstörung der Oberfläche fester Körper im Kontakt mit strömenden Flüssigkeiten, hervorgerufen durch mechanische Interaktion harter Partikel in der Flüssigkeit.

Festfressen

(Seizing)

Stärkste Form von Adhäsivverschleiß. Kaltverschweißen von Teilen infolge starker Reibung.

Fressen

(Scuffing, Galling)

Zerstörung von zwei gegeneinander bewegten Oberflächen durch adhäsiven Verschleiß (Kaltverschweißung mit Materialübertrag). Großer Verschleiß oder Oberflächenausfall wird als Galling bezeichnet.

Fretting

Verschleißmechanismus zweier Reibpartner, die sich zueinander tangential mit kleinen, oszillierenden Schwingungen reiben (siehe auch Adhäsion).

Galvanisches Beschichten

(Chrom, Nickel)

Elektrochemische Abscheidung von Metallschichten auf elektrisch leitende Oberflächen aus Salzlösungen.

Graufleckigkeit

(Micropitting)

siehe Oberflächenermüdung

Grübchenbildung

(Pitting)

siehe Oberflächenermüdung

Hartstoffschichten

Schichten mit hoher Härte (i.a. Metalle in Form von Karbiden, Nitriden, z.T. Siliziden oder diamantähnlichen Kohlenstoffschichten), die zwecks höherem Widerstand gegen Verschleiß und Verminderung des Reibungskoeffizienten aufgebracht werden.

Hertz'sche Pressung

Flächenpressung beim Kontakt zweier beliebig gekrümmter Körper.

Ionenätzen

Abtragen von Oberflächenmaterial durch Ionenbeschuss.

Ionisation

Ionisierungsgrad

Im Gas werden durch verschiedene Arten der Anregung (z.B. Temperatur, Lichtbogen, Hochfrequenz) elektrisch beeinflussbare Teile (Ionen und Elektronen) erzeugt. Maß für die Stärke der Ionisation ist der Ionisierungsgrad.

Ionplating

Beschichtungsverfahren im Vakuum nach dem Prinzip des Elektronenstrahl-Verdampfens.

Kaltverschweißen

Feste, lokale Verbindungen der beiden Reibpartneroberflächen durch direkten metallischen Kontakt unter hohem Druck und bei fehlender Trennung durch Schmierung (siehe auch Adhäsion).

Karussell

Drehgestell, welches die Bauteile auf speziellen Halterungen aufnimmt.

Kavitäten

Enge Vertiefungen (Löcher, Nuten) in Oberflächen, deren Beschichtung mit PVD/PACVD-Prozessen schwierig ist.

Kavitationserosion

Zerstörung der Oberfläche fester Körper im Kontakt mit strömenden Flüssigkeiten, hervorgerufen durch Druckwellen implodierender Dampfblasen.

Korrosion

Von der Oberfläche ausgehende Zerstörung eines Metalls infolge chemischer oder elektrochemischer Reaktion mit Partnern aus der Umgebung.

Mikrostrahlen

Beschuss von Oberflächen mit sehr feinem Abrasivstoff (z.B. Korund mit einer Körnung von 10 - 20 µm) zum Entfernen von Verunreinigungen oder zur Strukturierung der Oberfläche.

Monolayer-Schicht

Hartstoffschicht als Einzellage, die in sich homogen ist.

Multilayer-Schicht

Hartstoff-Schichtpaket, das aus Einzelschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften besteht.

Nitrieren

(u.a. Plasmanitrieren)
Thermochemische Veredelung (Härten, Passivieren) oberflächennaher Bereiche von Eisenwerkstoffen durch Eindiffundieren von Stickstoff aus stickstoffhaltigen Lösungen oder Gasen, ggf. mit Plasmaunterstützung.

Oberflächenermüdung

Zerstörung der Werkstoffoberfläche durch dynamische Belastung. Infolge Materialermüdung Bildung von Rissen und Ausbrechen von Teilen (Grübchen und Grauflecken).

PACVD-Verfahren

(Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)
Plasmaunterstütztes, chemisches Vakuum-Beschichtungsverfahren aus der Gasphase.

Passivierungsschicht

Schicht, welche die Oberfläche chemisch weniger angreifbar macht.

Phosphatieren

Chemische Veredelung (Härten, Passivieren) oberflächennaher Bereiche von Eisenwerkstoffen durch Eindiffundieren von Phosphor.

Plasma

Zustand von Gas, oft bezeichnet als 4. Aggregatzustand der Materie; besteht aus elektrisch beeinflussbaren Bestandteilen (Ionen, Elektronen, angeregte und neutrale Teilchen).

Plasmapolymer

Schicht aus einem Polymer, das aus der Gasphase unter Plasmaeinwirkung entsteht.

Plasmaunterstützte Beschichtungsverfahren

siehe Vakuum-Beschichtungsverfahren

PVD-Verfahren

(Physical Vapour Deposition)
Beschichtungsverfahren im Vakuum mit physikalischem Abscheiden des Beschichtungsmaterials aus der Dampfphase (z.B. Ionplating, thermisches Verdampfen/Arc Evaporation oder Zerstäubung/Sputtern).

Reibung

Mechanischer Widerstand bei der Relativbewegung sich berührender Körper. Erscheint als Reibungskraft oder Reibungsenergie.

Reibungsart

(Bewegungsart)
In Abhängigkeit der Bewegungsart der Reibpartner wird unterschieden in: Gleitreibung, Rollreibung, Wälzreibung.

Reibungszustand

(Kontaktzustand)
In Abhängigkeit vom Kontaktzustand der Reibpartner wird unterschieden in: Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung, Flüssigkeitsreibung und Gasreibung.

Reibwert

Reibbeiwert

Reibungszahl

Reibungskoeffizient

Der Reibwert μ ist das Verhältnis von Reibungskraft zu Normalkraft zweier Körper in Relativbewegung ($\mu = FR/FN$). Im ungeschmierten Zustand spricht man von Trockenreibwert.

Schichteigenspannung

Elastische Spannungen, die ohne äußere Kräfte und Momente in der Schicht existieren und sich im mechanischen Gleichgewicht befinden. Eigenspannungen beeinflussen z. B. die Schichthaftung und werden in Giga-pascal (GPa) gemessen.

Sputtern

Enhanced Sputtern

Beschichtungsverfahren im Vakuum nach dem Prinzip des Feinstzerstäubens von Materialien durch Ionenbeschuss.

Stick-Slip

Ruckweise Gleitbewegung zweier Reibpartner. Wechsel von Haft- und Gleitreibung, auch tribologisches Stottern genannt.

Substrat

Zu beschichtendes Bauteil oder Grundwerkstoff.

Surface Engineering

Gezielte Konstruktion und Behandlung von Oberflächen, um optimale Verschleißbeigenschaften zu erzielen.

TiN-Schicht

(Titannitrid)
PVD-Hartstoffschicht.

Tribologie

Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Befasst sich mit Verschleiß-, Reibungs- und Schmierungsprozessen.

Tribologische Beanspruchung

Beanspruchung eines festen Körpers durch Kontakt- und Relativbewegung mit einem festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper.

Tribooxidation

(Reiboxidation)
Oxidation von Oberflächen, verursacht durch Reibungskontakte im Tribosystem (z.B. Passungsrost).

Tribosystem

Gesamtsystem der relevanten Kontaktstelle. Bestehend aus stofflichen Elementen (Reibpartner, Schmierung, Verunreinigungen und Umgebungsmedien), deren Eigenschaften und Wechselwirkungen sowie Eingangsgrößen (Kräfte, Bewegung, Temperatur), Nutz- und Verlustgrößen (Wirkungsgrad, Reibung, Verschleiß).

Ultraschall-Reinigen

Reinigung von Festkörperoberflächen in Flüssigkeiten (wässrige Detergentien oder organische Lösungsmittel) unter Anwendung von Ultraschall.

Vakuum-Beschichtungsverfahren

Verfahren zur gleichförmigen Beschichtung von Werkstoffoberflächen, basierend auf chemischen und physikalischen Prozessen im Hochvakuum (PVD-, CVD- und PACVD-Verfahren).

Verschleiß

Fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen.

Verschleißfestigkeit

Verschleißkoeffizient

Widerstand gegen fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Beanspruchung. Mittels systemspezifischer Versuche kann ein Kennwert bestimmt werden (Verschleißkoeffizient).

Verschleißmechanismen

Beim Verschleißvorgang ablaufende physikalische und chemische Prozesse. Das Wirken verschiedener Mechanismen (Adhäsion, Abrasion, Oberflächenermüdung, Tribooxidation) verursacht Verschleiß.

Verschleißschutzschichten

siehe Hartstoffschichten

Wärmebehandlung

Die Temperatur der letzten Wärmebehandlung (Anlassen, Aushärten, Glühen) darf bei der Beschichtung nicht überschritten werden, da dies zu Gefügeänderungen im Bauteil führen kann.

WC/C-Schicht

(Wolframcarbid/Kohlenstoff)
PVD-Hartstoffschicht.

