

Supraschmierung im Automobil

Neue, kohlenstoffbasierte Werkstoffe mindern
Kraftstoffverbrauch und Verschleiß



Die klassischen Methoden, Reibung zu minimieren, haben Ingenieure in der langen Entwicklungsgeschichte des Maschinenbaus im Wesentlichen ausgereizt. Weitere Optimierungen spielen sich meist im kleinen Prozentbereich ab. Jetzt können neuartige Beschichtungen aus diamantähnlichen, schwarz glänzenden Kohlenstoffverbindungen ihre Vorteile ausspielen. Sie verbinden eine außerordentliche Gleitfähigkeit mit Antihafteigenschaften, chemischer Stabilität und einer extremen Materialhärte. In dem Forschungsprojekt Pegasus arbeiten Wissenschaftler aus Forschung und Industrie an der großtechnischen Nutzung für Antriebsstränge in Fahrzeugen.

Supraschmierfähigkeit oder auch Superlubricity nennen Physiker das Phänomen, dass spezielle Materialien extrem niedrige Reibungskoeffizienten von 0,01 bis 0,4 erzielen. Auf die Existenz dieses quantenphysikalisch erkläraren Effektes bei Kohlenstoffschichten wiesen theoretische Arbeiten erstmals 1991 hin. Er konnte in der Folgezeit experimentell bestätigt werden. Aber erst 2005 gelang es japanischen Forschern, diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC: Diamond-Like Carbon) zu entwickeln, die in Kombination mit speziellen organischen Schmierstoffen Supraschmierfähigkeit aufwiesen.

Das Projekt Pegasus verfolgt das Ziel, den Superlubricity-Effekt in technischen Anwendungen nutzbar zu machen. Unter Federführung von BMW arbeiten sieben Unternehmen und Forschungseinrichtungen gemeinsam an Schichtenentwicklung,

Dieses Forschungsprojekt
wird gefördert vom:

Bundesministerium für Wirtschaft
und Technologie (BMWi)

Beschichtungsverfahren sowie an angepassten Schmiermitteln die letztlich serientauglich werden sollen. Im Fokus stehen Automobilmotoren im Motor und im Antriebsstrang.

Zwei zentrale Aufgaben gilt es zu lösen: Zum einen wollen die Wissenschaftler Verfahren entwickeln, mit denen die Kohlenstoffe als optimierte Schicht auf unterschiedliche Gleitkomponenten aufgebracht werden können, zum anderen ermitteln sie durch die systematische Reihenuntersuchung geeignete Schmierstoffe. Insbesondere müssen die superlubricity-aktiven Substanzen wirksam in den Schmierstoff eingebracht werden, ohne dass der Schmierstoff seine sonstige Funktionalität einbüßt.

Im Kohlenstoffdreieck variieren Materialeigenschaften

DLC-Schichten können mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden. Je nach Anforderungsprofil bewegt man sich dabei in einem „Kohlenstoff-Dreieck“ zwischen Diamant-, Graphit- und Polymercharakter (Abb. 1). Am härtesten ist wasserstofffreier tetraedisch gebundener Kohlenstoff (kurz ta-C). Zwar hat dieser nicht die kristalline Struktur von Diamant, weist aber überwiegend diamantähnliche Bindungen (sp^3) auf. Entsprechend tendieren die physikalischen Eigenschaften, wie Dichte, Steifigkeit und Härte, zum Diamant. Immer noch sehr hart, aber graphitähnlicher verhält sich das Material mit zunehmenden (sp^2)-Bindungsanteilen (a-C). Bei beiden Bindungstypen nehmen mit wachsendem Wasserstoffanteil polymerartige Schichtstrukturen zu. Alle DLC-Schichten weisen unter ungeschmierten Bedingungen bereits eine niedrige Reibung im Direktkontakt zu unterschiedlichsten Reibpartnern auf. Unterschiede zwischen den DLC-Schichten bestehen vor allem hinsichtlich der Verschleißfestigkeit. So besitzen die Schichten mit einem hohen sp^3 -Anteil, also die ta-C-Schichten, die höchste Härte und damit die größte Verschleißbeständigkeit. Für Anwendungen in denen höchste Verschleißbeständigkeit gefragt ist, z.B. in abrasiven Medien, ist dieser Schichttyp prädestiniert. Aus prozesstechnischer Sicht sind die a-C:H-basierten Schichten hingegen einfacher herstellbar, so dass dieser Schichttyp bereits in zahlreichen Anwendungen weit verbreitet ist. Welche Schichten für welche konkreten Anwendungen letztlich ausgewählt werden, hängt von der Gesamtheit des Anforderungsprofils ab. Daher rührt auch die Vielfalt von unterschiedlichen a-C:H- oder ta-C-basierten Schichtsystemen.

Wie stabile Oberflächen entstehen

Nur mit viel Erfahrung lässt sich die komplexe Abfolge der Beschichtungsprozess-Schritte planen und so präzise steuern, dass das behandelte Werkstück die gewünschten Oberflächeneigenschaften erhält. Die Projektpartner erreichten erhebliche Verbesserungen sowohl bei den ta-C- und a-C:H-basierenden Schichtsystemen als auch bei plasmapolymere Schichten. So zeigte sich beispielsweise, dass eine Abfolge von harten und weichen Kohlenstoff-Schichtlagen erhebliche spannungsmechanische Vorteile und damit einen höheren Widerstand gegen Verschleiß und Abplatzung liefert.

Die eigentliche Funktionsschicht benötigt einen Unterbau aus Haft- und Stützmaterialien, um eine ausreichende Haftfestigkeit auf dem Werkstück zu erreichen (Abb. 2). Die Stoffe werden durch Kathodenzerstäubung (Sputtern) im Hochvakuum auf die Oberfläche aufgebracht. Gängige Haftschichten bestehen zum Beispiel aus Chrom oder Titan, die Stützsichten aus Wolframcarbid. Für den

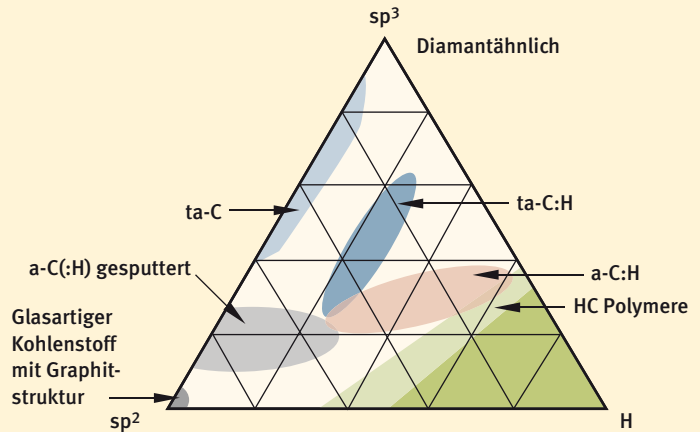


Abb. 1 Die Eigenschaften von diamantähnlichen Beschichtungen variieren je nach Bindungstyp. Quelle: nach W. Jacob, W. Möller in Appl. Phys. Lett. 63

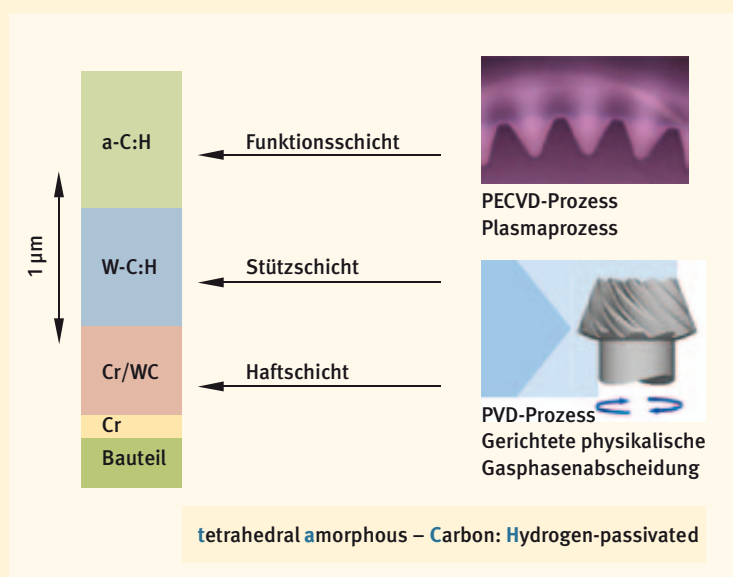


Abb. 2 Haft-, Stütz- und Funktionsschicht werden mit vergleichsweise „kalten“ Beschichtungsverfahren aufgebracht und sind dadurch für viele Werkstoffe verfügbar. Quelle: BMW Group

Aufbau der DLC-Schicht auf diesem Untergrund nutzen die Forscher die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung. Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass es für eine Vielzahl von Materialien einsetzbar ist, da die Prozesstemperatur unter 200 °C gehalten werden kann.

Kunststoffe beschichten? Auch das geht

Sehr geringe Abscheidetemperaturen bei plasmapolymere Beschichtungen ermöglichen auch die Bedampfung von Gleitkomponenten aus elastisch verformbaren Kunststoffen. Eine lediglich 1 – 3 µm starke Schicht auf siliziumorganischer Basis reduziert die Reibung bei Elastomeren um mehr als die Hälfte – sowohl für geschmierte als auch für trockene Anwendungsfälle. Es zeigte sich, dass die Schichten auf unterschiedlichen Kunststoffen sehr fest anhaften. Sie beeinflussten die Flexibilität des Grundwerkstoffes aber nur unwesentlich. Je nach Anforderungsprofil können sie in unterschiedlichen Härten aufgebracht werden. Da die Kosten vergleichsweise gering sind, kann ein großes technisches und wirtschaftliches Potenzial erwartet werden.

Beschichtung und Schmierstoff im Zusammenspiel

Die Supraschmierfähigkeit entsteht in der Regel erst im Zusammenspiel der Beschichtung mit geeigneten Schmierstoffen. Aus bisher noch nicht vollständ-

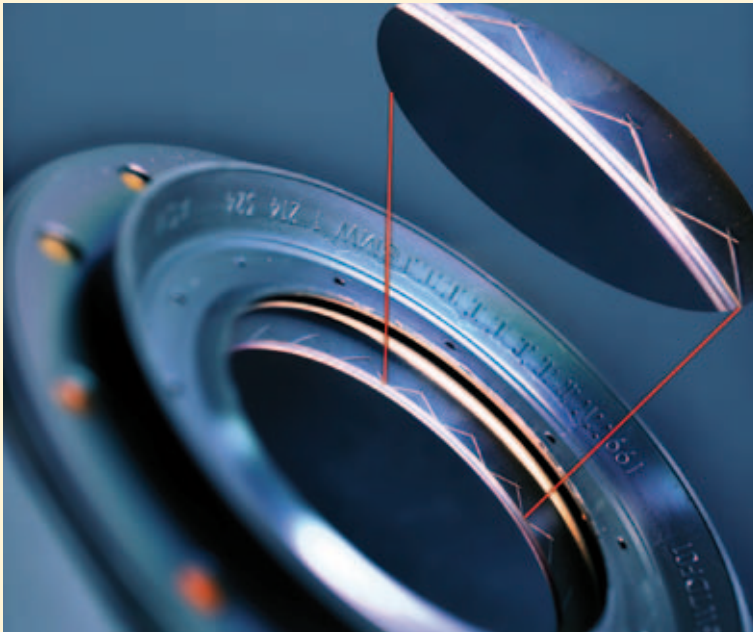


Abb. 3 Radialwellendichtring mit Dichtlippenbereich. Auch elastische Kunststoffkomponenten lassen sich dauerhaft reibungsmindernd beschichten. Quelle: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)

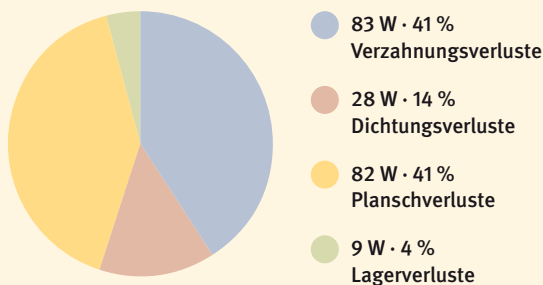


Abb. 4 Typische Verluste in einem Achsgetriebe bei 5.200 W Eingangsleistung Quelle: BMW Group

dig aufgeklärten Gründen können bestimmte Kohlenstoffschicht-Schmierstoff-Kombinationen über den normalen Reibungsvorteil von DLC hinaus nochmals enorme Reibungsreduzierungen erreichen. Um den tribochemischen Mechanismen und Abhängigkeiten auf die Spur zu kommen, testeten die Projektpartner systematisch ausgewählte DLC-Schichten zunächst mit unterschiedlichen reinen organischen Fluiden als Schmierstoff, später dann in volladditivierten Schmierstoffen. Computergestützte atomistische Simulationen trugen zum Verständnis der Reibungsvorgänge bei.

Praxisversuch: Weniger Reibung im Achsgetriebe

Welche Effizienzgewinne lassen sich im Antriebsstrang von Fahrzeugen durch DLC-Beschichtung und angepassten Schmierstoff erreichen? Diese Frage untersuchten die Wissenschaftler exemplarisch an einem Hinterachsgetriebe. Auf diese Komponente wirkt die gesamte Antriebsleistung und die Verluste sind durchaus nennenswert. Wie sich diese typischerweise zusammensetzen, zeigt Abb. 4: Bei 5.200 W Eingangsleistung gehen etwa 200 W, also etwa 4 % als Wärme verloren. Einen wesentlichen Anteil daran haben Antriebskegel- und Antriebsstellerrad. Da ihre komplexe Geometrie zudem die größte Herausforderung für die eingesetzten Glättungs- und Beschichtungsprozesse darstellt, eignen sie sich gut für genauere Untersuchungen. Eingebaut in ein Originalgetriebe verglichen die Forscher ein Antriebskegel-

Reibungskräfte beherrschen

Die Beherrschung von Reibungskräften spielt im Fahrzeugbau eine zentrale Rolle. Einerseits sorgt Reibung erst dafür, dass die Reifen die Motorkraft auf die Straße bringen, Fahrzeuge nicht aus der Kurve getragen werden und dass Bremsen Wirkung zeigen. Andererseits, etwa im Achslager, steht Reibung für Mehrverbrauch und Verschleiß.

Die Reibung sinkt auf ein Minimum, wenn die Reibungsflächen vollständig durch einen Schmierfilm getrennt sind. Dies erfordert eine gute Versorgung mit Schmiermittel, eine hinreichende Glattheit der Flächen und auch eine gewisse Gleitgeschwindigkeit zwischen den Reibungsflächen. Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, befinden sich die Reibpaarungen im Gebiet der Misch- bzw. der Festkörper- oder der Grenzreibung, was in aller Regel mit einem relativ hohen Reibkoeffizienten und Verschleiß einhergeht. In dieser Situation spielen DLC beschichtete Oberflächen ihren Vorteil einer niedrigen Reibung aus. Durch DLC-Beschichtung können Gleitpaarungen mit ungünstigen Schmierungs-situationen Reibverluste deutlich minimieren.

rad im Serienzustand mit zwei weiteren, die durch Feinbeziehungsweise Gleitschliff besonders geglättet waren, sowie mit einem DLC-beschichteten Funktionsmuster. Um gerade auch die Planschverluste zu analysieren, die durch die Bewegung der Bauteile im Schmierstoff entstehen, wurden Untersuchungen mit verschiedenen viskosen Ölen durchgeführt.

In welchem Maße die optimierten Oberflächen die Verlustleistung mindern, hängt erwartungsgemäß von den Betriebsbedingungen wie Drehzahl, Drehmoment und Temperatur ab. Die DLC-Beschichtung zeigt ihre Wirkung vor allem bei Festkörper-, Misch- und Grenzreibung. In Bereichen ohne Oberflächenkontakt bleibt sie wirkungslos, schadet aber auch nicht. Betrachtet man die Änderung der Verlustleistung, dann zeigt sich deutlich, dass die Oberflächen im Betriebspunkt 6000 U/min – 25 Nm – 50 °C noch überwiegend getrennt sind und die Beschichtung ihre Wirkung noch nicht entfalten kann. Bei höheren Temperaturen und steigenden Drehmomenten erhöht sich der Anteil des Festkörperkontakts und die DLC-Beschichtung kommt zum Tragen.

Durch ein dünnflüssigeres Achsöl können die Planschverluste gesenkt werden. Das zeigt sich vor allem bei niedrigen Lasten und hohen Drehzahlen. Dafür verschlechtert sich der Wirkungsgrad in Lastpunkten mit hohem Moment. In den Versuchen konnten bei allen Temperaturen nur Verbesserungen bei den höheren Drehzahlen mit niedrigeren Drehmomenten gemessen werden. Dort wurde die Verlustleistung um 7 – 18 % gesenkt.

Das Fazit der Untersuchung: Optimierte Oberflächen in Verbindung mit angepassten Schmierstoffen reduzieren die Verluste im Achsgetriebe deutlich. Als besonders wirkungsvoll erweist sich die Kombination von glatten, mit DLC beschichteten Oberflächen mit niederviskosen Schmierstoffen. Sie verbindet reduzierte Planschverluste bei hohen Drehzahlen mit geringen Lasten durch die Beschichtung im Hochlastbereich. In der Summe ergibt sich eine Reduktion der Verlustleistung zwischen 12 und 32 % in allen untersuchten Lastbereichen.



Energieeffizienz und mehr

Der Druck auf die Automobilindustrie, den Verbrauch der Fahrzeuge zu senken, nimmt drastisch zu. Zum einen stieg der Preis für Treibstoff alleine in den letzten zehn Jahren um über 40 %. Zum anderen verschärft die Europäische Union sukzessive die Emissionszielwerte für Neufahrzeuge – verknüpft mit Transferzahlungen, wenn das Ziel verfehlt wird. Die Hersteller reagieren auf die Herausforderungen und sie haben eine Vielzahl von Stellschrauben: Sie reduzieren das Fahrzeuggewicht durch optimierte Bauweisen der Karosserie (tailored Blanks) und durch leichtere Materialien und sie nutzen technische Systeme beispielsweise zur Rückgewinnung der Bremsenergie. Ein spannendes Thema ist die Antriebstechnik: Je nach Einsatzgebiet konkurrieren optimierte Verbrennungsmotoren mit Hybridtechnologien. Abhängig vom Entwicklungsstand der Batterie- und Wasserstofftechnologie werden zunehmend auch Elektroantriebe in den Wettbewerb eintreten. Die erreichten Effizienzgewinne durch diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtungen im Antriebsstrang kommen allen Antriebskonzepten zugute. Verringert sich die Reibung, so erhöht dies die Lebensdauer der Komponenten und vermindert den Energie- und Schmierstoffverbrauch. Aber nicht nur deshalb finden sich DLC-Beschichtungen immer öfter in Hochtechnologieprodukten. Sie können beispielsweise auch wirksam zum Korrosionsschutz und zur Verbesserung der Notlaufeigenschaften eingesetzt werden. Mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt kann letztendlich eine Vielzahl unterschiedlichster Maschinen optimiert werden, bei denen Kräfte übertragen werden, beispielsweise Pumpen, hydraulische Anlagen, Drehmaschinen und weitere industrielle Anlagen. So wurden bereits Radlager entwickelt, bei denen die Reibung in etwa um die Hälfte gegenüber konventionellen Lagern reduziert ist. Auch für neuartige Gasgeschmierte Gleitringdichtungen wurde die Basis geschaffen. Als kostengünstige Komponenten sollen sie beispielsweise in Fahrzeugen bei der Energierückgewinnung aus Abgasen eingesetzt werden. Wegen dieser Potenziale und weil noch viele Fragen zur praktischen Umsetzung zu klären sind, wollen die Projektbeteiligten gemeinsam mit weiteren Partnern die Untersuchungen fortführen und das Spektrum ausweiten. Auch jenseits der Energieforschung eröffnen die unterschiedlichen DLC-Schichten technische Lösungswege für weitere Einsatzgebiete. Aufgrund ihrer chemischen Resistenz und biologischen Verträglichkeit sind sie wie geschaffen für Medizinprodukte wie Gelenkprothesen, Herzklappen oder kieferorthopädische Materialien. Interessant sind auch die optischen Eigenschaften denn die Lichtabsorption im infraroten und roten Spektralbereich ist äußerst gering. Als Schutzschicht können sie exponierte optische Bauteile vor extremen Umwelteinflüssen schützen und gleichzeitig der Entspiegelung dienen. Viele neue Ideen wurden schon realisiert. Weitere dürften schon bald den Weg aus den Laboren in die Praxis finden – man darf gespannt sein.

Projektbeteiligte

- » **Projektleitung:** Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft, Dr. Johann Schnagl, 80809 München, Telefon: 089/382-0
- » **Projektpartner:** Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG, Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH, ZF Friedrichshafen AG

Links und Literatur

- » Donnet, C. (Hrsg.); Erdemir, A. (Hrsg.): Tribology of diamond-like carbon films. Fundamentals and applications. New York: Springer, 2008. 664 S., ISBN 978-0-387-30264-5, 106,95 Euro.

Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info im Bereich Publikationen/Projektinfos. In der Rubrik „Service“ finden Sie ergänzende Informationen wie weitere Projektadressen und Links.
- » BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Projektorganisation

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
11019 Berlin

Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Michael Gahr
52425 Jülich

Förderkennzeichen
0327499A-G

Impressum

ISSN
0937 - 8367

Herausgeber
FIZ Karlsruhe GmbH · Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Autor
Dr. Franz Meyer

Titelbild
BMW Group

Urheberrecht
Eine Verwendung von Text und Abbildungen aus dieser Publikation ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion gestattet. Sprechen Sie uns an.

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44

BINE Informationsdienst
Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197
53113 Bonn
Tel. 0228 92379-0
Fax 0228 92379-29
kontakt@bine.info
www.bine.info

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages